

Tony R. Kuphaldt



INTRODUCERE ÎN CIRCUITE ELECTRICE  
ȘI ELECTRONICE

Volumul 1: Curentul continuu

Traducere: Mihai Olteanu

SCIENTIAro

## Prefață

Cartea de față reprezintă varianta românească, tradusă de Mihai Olteanu, a volumului „Curentul continuu” din seria „Lessons in Electric Circuits” scrisă de Tony R. Kuphaldt sub licența „Design Science License”.

Cartea în limba română se distribuie gratuit prin intermediul site-ului Scientia.ro. Orice comentarii sau sugestii de îmbunătățire sunt binevenite și pot fi trimise pe adresa [admin@scientia.ro](mailto:admin@scientia.ro). Puteți utiliza conținutul de față în orice scop, respectând condițiile impuse de licența DSL, în principal, menționarea sursei originale.

*Atenție, pe tot parcursul cărții se va folosi notația reală de deplasare a electronilor prin circuit, și anume, dinspre borna negativă (-) spre borna pozitivă (+) !*

# CUPRINS

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>01 - CONCEPTE DE BAZĂ ÎN ELECTRICITATE .....</b>                      | <b>1</b>   |
| 1. ELECTRICITATE STATICĂ .....                                           | 1          |
| 2. CONDUCTORI, DIELECTRICI ȘI DEPLASAREA ELECTRONILOR .....              | 5          |
| 3. CIRCUITE ELECTRICE .....                                              | 9          |
| 4. TENSIUNEA ȘI CURENTUL .....                                           | 10         |
| 5. REZISTENȚA ELECTRICĂ.....                                             | 18         |
| 6. TENSIUNEA ȘI CURENTUL ÎNTR-UN CIRCUIT PRACTIC.....                    | 21         |
| 7. SENSUL CONVENȚIONAL ȘI SENSUL REAL DE DEPLASARE AL ELECTRONILOR ..... | 22         |
| <b>02 - LEGEA LUI OHM.....</b>                                           | <b>26</b>  |
| 1. LEGEA LUI OHM .....                                                   | 26         |
| 2. PUTEREA ÎN CIRCUITELE ELECTRICE .....                                 | 30         |
| 3. CALCULAREA PUTERII ELECTRICE .....                                    | 32         |
| 4. REZISTORUL .....                                                      | 34         |
| 5. CONDUCTȚIA NELINIARĂ.....                                             | 37         |
| 6. CONEXIUNEA UNUI CIRCUIT .....                                         | 41         |
| 7. POLARITATEA CĂDERILOR DE TENSIUNE.....                                | 44         |
| <b>03 - PROTECȚIA LA ELECTROCUTARE .....</b>                             | <b>46</b>  |
| 1. SIGURANȚA ÎN DOMENIUL ELECTRIC .....                                  | 46         |
| 2. DRUMUL CURENTULUI ÎN CAZUL ELECTROCUTĂRII .....                       | 48         |
| 3. LEGEA LUI OHM (RECONSIDERARE) .....                                   | 53         |
| 4. PRACTICI DE BAZĂ .....                                                | 60         |
| 5. REACȚIA ÎN CAZURI DE URGENȚĂ .....                                    | 62         |
| 6. SURSE POTENȚIALE DE PERICOL .....                                     | 64         |
| 7. PROIECTAREA APARATELOR ELECTRICE .....                                | 67         |
| 8. UTILIZAREA APARATELOR DE MĂSURĂ - MULTIMETRUL.....                    | 71         |
| <b>04 - NOTAȚIA ȘTIINȚIFICĂ ȘI PREFIXE METRICE .....</b>                 | <b>79</b>  |
| 1. NOTAȚIA ȘTIINȚIFICĂ.....                                              | 79         |
| 2. ARITMETICA NOTAȚIEI ȘTIINȚIFICE.....                                  | 81         |
| 3. NOTAȚIA METRICĂ.....                                                  | 82         |
| <b>05 - CIRCUITE SERIE ȘI PARALEL.....</b>                               | <b>85</b>  |
| 1. CE SUNT CIRCUITELE „SERIE” ȘI „PARALEL” .....                         | 85         |
| 2. CIRCUITE SERIE SIMPLE .....                                           | 87         |
| 3. CIRCUITE PARALEL SIMPLE .....                                         | 90         |
| 4. CONDUCTANȚA ELECTRICĂ .....                                           | 92         |
| 5. CALCULAREA PUTERII .....                                              | 93         |
| 6. APLICAREA CORECTĂ A LEGII LUI OHM .....                               | 94         |
| 7. ANALIZA CIRCUITELOR LA DEFECT.....                                    | 95         |
| 8. REALIZAREA PRACTICĂ A CIRCUITELOR SIMPLE .....                        | 100        |
| <b>06 - CIRCUITE DIVIZOARE ȘI LEGILE LUI KIRCHHOFF.....</b>              | <b>107</b> |
| 1. CIRCUITE DIVIZOARE DE TENSIUNE .....                                  | 107        |
| 2. POTENȚIOMETRUL.....                                                   | 110        |
| 3. LEGEA LUI KIRCHHOFF PENTRU TENSIUNE .....                             | 112        |
| 4. CIRCUITE DIVIZOARE DE CURENT .....                                    | 116        |
| 5. LEGEA LUI KIRCHHOFF PENTRU CURENT .....                               | 120        |

|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| <b>07 - CIRCUITE SERIE-PARALEL COMBinate.....</b>          | <b>122</b> |
| 1. CE ESTE UN CIRCUIT SERIE-PARALEL.....                   | 122        |
| 2. METODE DE ANALIZĂ A CIRCUITELOR SERIE-PARALEL.....      | 123        |
| <b>08 - APARATE DE MĂSURĂ.....</b>                         | <b>130</b> |
| 01. CE ESTE UN APARAT DE MĂSURĂ .....                      | 130        |
| 02. VOLTMETRUL .....                                       | 133        |
| 03. IMPACTUL VOLTMETRULUI ASUPRA CIRCUITULUI .....         | 138        |
| 04. AMPERMETRUL.....                                       | 143        |
| 05. IMPACTUL AMPERMETRULUI ASUPRA CIRCUITULUI .....        | 147        |
| 06. OHMMETRUL .....                                        | 149        |
| 07. OHMMETRE CU TENSIUNI ÎNALTE.....                       | 153        |
| 08. MULTIMETRUL .....                                      | 156        |
| 09. WATTMETRUL .....                                       | 157        |
| 10. TERMINALI TIP KELVIN ȘI REZISTORI DE PRECIZIE.....     | 158        |
| 11. CIRCUITE ÎN PUNTE - PUNTEA WHEATSTONE ȘI THOMSON ..... | 162        |
| 12. REALIZAREA PRACTICĂ A REZISTORILOR DE CALIBRARE .....  | 167        |
| <b>09 - SEMNALE ELECTRICE DE INSTRUMENTAȚIE .....</b>      | <b>170</b> |
| 1. SEMNALE ANALOGICE ȘI SEMNALE DIGITALE .....             | 170        |
| 2. SISTEME CU SEMNALE DE TENSIUNE .....                    | 173        |
| 3. SISTEME CU SEMNALE DE CURENT.....                       | 174        |
| 4. TAHOGENERATORUL .....                                   | 177        |
| 5. TERMOCUPLA.....                                         | 177        |
| 6. TERMOPILA.....                                          | 180        |
| <b>10 - ANALIZA REȚELOR DE CURENT CONTINUU.....</b>        | <b>183</b> |
| 01. CE ESTE ANALIZA UNEI REȚELE ELECTRICE.....             | 183        |
| 02. METODA RAMURII DE CURENT .....                         | 185        |
| 03. METODA BUCLEI DE CURENT.....                           | 190        |
| 04. METODA NODULUI DE TENSIUNE .....                       | 195        |
| 05. TEOREMA LUI MILLMAN .....                              | 199        |
| 06. TEOREMA SUPERPOZIȚIEI .....                            | 202        |
| 07. TEOREMA LUI THEVENIN.....                              | 207        |
| 08. TEOREMA LUI NORTON .....                               | 211        |
| 09. ECHIVALENȚA TEOREMELOR THEVENIN-NORTON.....            | 214        |
| 10. TEOREMA LUI MILLMAN REVIZUITĂ.....                     | 215        |
| 11. TEOREMA TRANSFERULUI MAXIM DE PUTERE .....             | 218        |
| 12. TRANSFORMAREA TRIUNGHI-STEIA ȘI STEIA-TRIUNGHI .....   | 220        |
| <b>11 - BATERII ȘI SURSE DE ALIMENTARE .....</b>           | <b>225</b> |
| 1. LEGĂTURA CHIMICĂ .....                                  | 225        |
| 2. PILA VOLTAICĂ.....                                      | 227        |
| 3. BATERIILE ELECTRICE .....                               | 229        |
| 4. CAPACITATEA BATERIILOR (Ah) .....                       | 231        |
| 5. BATERII SPECIALE .....                                  | 234        |
| 6. CONSIDERAȚII PRACTICE (BATERII) .....                   | 237        |
| <b>12 - CONDUCTORI ȘI DIELECTRICI .....</b>                | <b>239</b> |
| 1. FIZICA CONDUCTORILOR ȘI A DIELECTRICILOR.....           | 239        |
| 2. MĂRIMEA ȘI AMPERAJUL CONDUCTORILOR.....                 | 242        |
| 3. SIGURANȚE FUZIBILE .....                                | 243        |
| 4. REZISTIVITATEA ELECTRICĂ .....                          | 248        |
| 5. COEFICIENTUL DE TEMPERATURĂ AL REZISTENȚEI .....        | 250        |



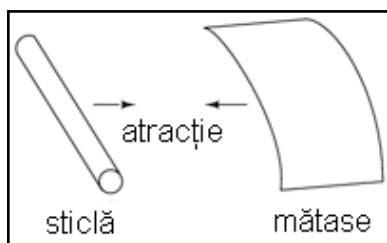
|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| 6. SUPRACONDUCTIBILITATEA .....                              | 252        |
| 7. STRĂPUNGerea DIELECTRICĂ .....                            | 255        |
| <b>13 - CONDENSATORUL ȘI CÂMPUL ELECTRIC.....</b>            | <b>256</b> |
| 1. CÂMPUL, FORȚA ȘI FLUXUL MAGNETIC ȘI ELECTRIC .....        | 256        |
| 2. CONDENSATORUL.....                                        | 258        |
| 3. RELAȚIA TENSIUNE-CURRENT A CONDENSATORULUI .....          | 261        |
| 4. FACTORI CE AFECTEAZĂ CAPACITATEA ELECTRICĂ .....          | 266        |
| 5. CONECTAREA ÎN SERIE ȘI ÎN PARALEL A CONDENSATORILOR ..... | 269        |
| 6. CONSIDERAȚII PRACTICE (CONDENSATORUL).....                | 270        |
| <b>14 – ELECTROMAGNETISM.....</b>                            | <b>272</b> |
| 1. MAGNEȚI PERMANENȚI .....                                  | 272        |
| 2. ELECTROMAGNETISM .....                                    | 275        |
| 3. UNITĂȚI DE MĂSURĂ ALE CÂMPULUI MAGNETIC.....              | 278        |
| 4. PERMEABILITATEA, SATURAȚIA ȘI CURBELE DE HISTEREZIS ..... | 280        |
| 5. INDUCȚIA ELECTROMAGNETICĂ .....                           | 284        |
| 6. TRANSFORMATORUL ȘI INDUCTANȚA MUTUALĂ.....                | 286        |
| <b>15 - BOBINA ȘI CÂMPUL MAGNETIC.....</b>                   | <b>287</b> |
| 1. BOBINA.....                                               | 288        |
| 2. RELAȚIA TENSIUNE-CURRENT A BOBINEI.....                   | 291        |
| 3. FACTORI CE AFECTEAZĂ INDUCTANȚA BOBINEI .....             | 296        |
| 4. CONECTAREA ÎN SERIE ȘI ÎN PARALEL A BOBINELOR .....       | 298        |
| 5. CONSIDERAȚII PRACTICE (BOBINA) .....                      | 299        |
| <b>16 - CONSTANTELE DE TIMP RC ȘI L/R .....</b>              | <b>300</b> |
| 1. RĂSPUNSUL TRANZITORIU AL CONDENSATORULUI .....            | 301        |
| 2. RĂSPUNSUL TRANZITORIU AL BOBINEI.....                     | 303        |
| 3. ANALIZA CIRCUITELOR TRANZITORII RC ȘI L/R.....            | 304        |
| 4. DE CE L/R ȘI NU LR .....                                  | 309        |
| 5. CAZURI SPECIALE DE CALCUL.....                            | 312        |
| 6. CIRCUITE COMPLEXE .....                                   | 314        |
| 7. REZOLVAREA CIRCUITULUI PENTRU VARIABILA TIMP .....        | 316        |

# 01 - Concepte de bază în electricitate

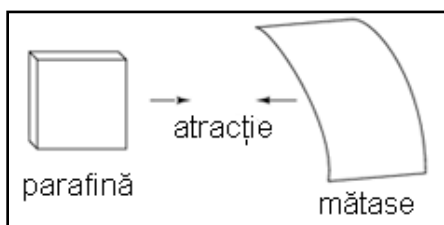
## 1. Electricitate statică

- Toate materialele sunt construite din blocuri denumite atomi
- Toți atomii în mediul lor natural conțin particule numite electroni, protoni și neutroni, cu excepția izotopului de protiu ( ${}^1_1\text{H}$ ) al hidrogenului
- Electronii au o sarcină electrică negativă (-)
- Protonii au o sarcină electrică pozitivă (+)
- Neutronii posedă o sarcină electrică neutră
- Electronii pot fi îndepărtați de atomi mult mai ușor decât protonii și neutronii
- Numărul protonilor din nucleu determină identitatea atomului ca și element unic

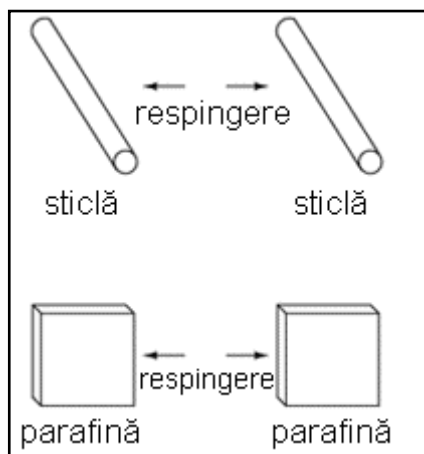
### Atracția electrostatică



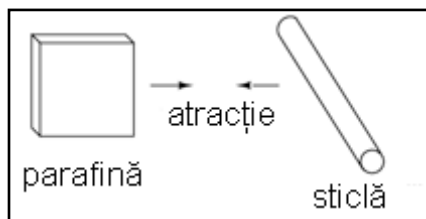
Cu secole în urmă, a fost descoperit faptul că anumite tipuri de materiale se atrag „misterios” după frecare. De exemplu: după frecarea unei bucați de mătase de o bucată de sticlă, cele două materiale vor tinde să se lipească unul de celălalt. Într-adevăr, există o forță de atracție ce acționează chiar și atunci când cele două materiale sunt separate unul de celălalt.



Sticla și mătasea nu sunt singurele materiale ce se comportă astfel. Oricine s-a frecat vreodată de un balon din latex s-a confruntat cu exact același fenomen atunci când a observat că balonul tinde să se lipească de el/ea. Parafina și mătasea sunt o altă pereche de materiale ce manifestă forțe de atracție după frecare.



Acest fenomen a devenit și mai interesant după ce a fost descoperit faptul că materialele identice se resping întotdeauna după frecare .



A fost de asemenea observat faptul că o bucată de sticlă frecată cu mătase adusă în apropierea unei bucăți de parafină frecată în prealabil cu lână, conduce la fenomenul de atracție dintre cele două materiale.

Mai mult decât atât, s-a descoperit că orice material care posedă proprietăți de atracție sau respingere după frecare, poate fi clasificat într-una din cele două categorii: atras de sticlă și respins de parafină, sau respins de sticlă și atras de parafină. Nu s-au găsit materiale care să fie atrase sau respinse atât de sticlă cât și de parafină, sau care să reacționeze față de una fără să reacționeze față de cealaltă.

O atenție sporită a fost îndreptată spre materialele folosite pentru frecare. S-a descoperit că după frecarea a două bucăți de sticlă cu două bucăți de mătase, atât bucățile de sticlă cât și bucățile de mătase se resping reciproc

Acest lucru era foarte straniu. Până la urmă, niciunul dintre aceste materiale nu era **vizibil** modificat în urma frecării, dar cu siguranță se comportau diferit după frecare. Oricare ar fi fost schimbarea ce avea loc pentru a determina atracția sau respingerea acestor materiale unul de celălalt, era una invizibilă.

## Sarcina electrică

Unii experimentatori au speculat existența „fluidelor” invizibile ce se deplasează de pe un obiect pe celălalt în timpul frecării, și că aceste „fluide” induc o forță fizică pe o anumită distanță. Charles du Fay a făcut parte din primii experimentatori ce au demonstrat existența categorică a două tipuri de schimbări ca urmare a frecării împreună dintre două tipuri de obiecte. Existența a mai mult de un singur tip de schimbare suferită de aceste materiale, era evidentă din faptul că rezultau două tipuri de forțe: atracție și respingere. Transferul ipotetic de fluid a devenit cunoscut sub numele de sarcină.

## Sarcina electrică pozitivă și sarcina electrică negativă

Un cercetător renumit, Benjamin Franklin, ajunge la concluzia existenței unui singur tip de fluid ce se deplasează între obiectele frecate, și că cele două „sarcini” diferite nu sunt decât fie un exces, fie o deficiență din exact același fluid. După ce a experimentat cu parafină și lână, Franklin a sugerat că lâna neprelucrată transferă o parte din acest fluid invizibil de pe parafina netedă, ducând la un exces de fluid pe lână, și un deficit de fluid pe parafină. Diferența rezultată de conținut în lichid dintre cele două obiecte ar cauza prin urmare o forță de atracție, datorită faptului că fluidul încercă să-și recapete echilibrul existent anterior între cele două materiale.

Postularea existenței unui singur „fluid” ce era fie câștigat, fie pierdut în timpul frecării, se potrivea cel mai bine comportamentului observat: că toate aceste materiale se împărțeau simplu într-una din cele două categorii atunci când erau frecate, și cel mai important, că cele două materiale active frecate unul de celălalt se încadrau întotdeauna în categorii opuse, fapt evidențiat de atracția inevitabilă dintre cele două materiale. În alte cuvinte, nu s-

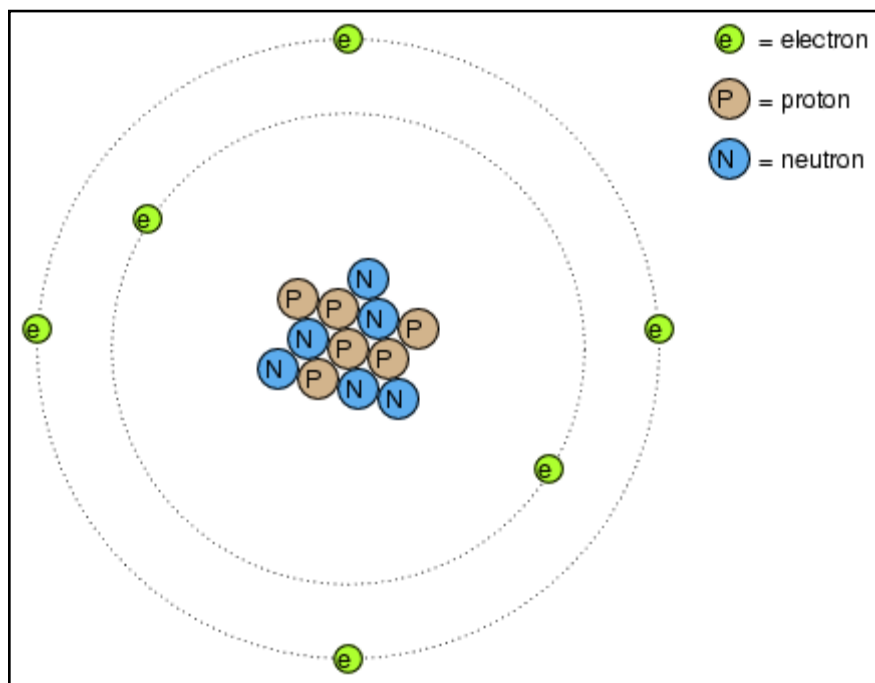
a întâmplat niciodată ca două materiale frecate unul de celălalt, să devină amândouă în același timp fie pozitive, fie negative.

După speculațiile lui Franklin legate de îndepărtarea „fluidului” de pe parafină cu ajutorul lânii, sarcina ce avea să fie asociată cu parafina frecată a devenit cunoscută sub denumirea de negativă (pentru presupusa deficiență de fluid), iar tipul de sarcină asociat cu lâna frecată a devenit cunoscută ca fiind pozitivă (pentru presupusul exces de fluid). Această conjunctură inocentă va cauza multe bătăi de cap celor ce vor studia electricitatea în viitor!

## Unitatea de măsură a sarcinii electrice și sarcina electrică elementară

Măsurători precise ale sarcinii electrice au fost efectuate de către fizicianul francez Charles Coulomb în anii 1780, cu ajutorul unui dispozitiv numit balanță de torsiune, măsurând forța generată între două obiecte încărcate din punct de vedere electric. Rezultatele muncii lui Coulomb au dus la dezvoltarea unității de măsură pentru sarcina electrică, și anume *Coulomb-ul*. Dacă două corpuri „punctiforme” (corpuri ipotetice fără suprafață) sunt încărcate cu o sarcină egală de 1 Coulomb și plasate la 1 metru distanță, acestea ar genera o forță de atragere (sau de respingere, în funcție de tipul sarcinilor) de aproximativ 9 miliarde de Newtoni. Definiția operațională a unui Coulomb, ca și unitate a sarcinii electrice (în termeni de forță generată între cele două puncte încărcate cu sarcină electrică), s-a descoperit că este egală cu un exces sau o deficiență de aproximativ 6.250.000.000.000.000 (6.25 x 10<sup>18</sup>) de electroni. Sau invers, un electron are o sarcină de aproximativ 0.00000000000000000016 Coulombi (1,6 x 10<sup>-19</sup>). Prin faptul că electronul este cel mai mic purtător de sarcină electrică cunoscut, această ultimă valoare a sarcinii pentru electron a fost desemnată ca sarcina electrică elementară.

## Electronii și structura atomică a materialelor



Mult mai târziu se va descoperi faptul că acest „fluid” este de fapt compus din bucăți mici de materie numite electroni, denumiți astfel după cuvântul antic grecesc dat chihlimbarului: un alt material ce manifestă proprietăți electrice când este frecat de lână. Experimentele realizate de atunci au relevat faptul că toate obiectele (corpurile) sunt compuse din „blocuri” extrem de mici, denumite atomi, iar acești atomi la

rândul lor sunt compuși din componente și mai mici, denumite particule. Cele trei particule fundamentale regăsite în compoziția majorității atomilor poartă denumirea de protoni, neutroni și electroni. Deși majoritatea atomilor sunt o compoziție de protoni, neutroni și electroni, nu toți atomii au neutroni; un exemplu este izotopul de protiu ( ${}^1_1\text{H}$ ) al hidrogenului, ce reprezintă forma cea mai ușoară și mai răspândită a hidrogenului, cu doar un singur proton și un singur electron. Atomii sunt mult prea mici pentru a fi văzuți, dar dacă am putea privi unul, ar arăta aproximativ conform figurii de mai sus.

Chiar dacă fiecare atom dintr-un material tinde să rămână o unitate, în realitate există mult spațiu liber între electroni și „ciorchinele” de protoni și neutroni din mijloc

Acest model brut este cel al carbonului, cu 6 protoni, 6 neutroni și 6 electroni. În oricare atom, protonii și neutronii sunt foarte strâns legați între ei, ceea ce reprezintă o calitate importantă. Masa strâns legată de protoni și neutroni din centrul unui atom poartă denumirea de nucleu, iar numărul de protoni din nucleul unui atom, determină identitatea elementului: dacă schimbăm numărul protonilor din nucleul unui atom, schimbăm implicit și tipul atomului. Legătura strânsă a protonilor de nucleu este responsabilă de stabilitatea elementelor chimice.

Neutronii au o influență mult mai mică asupra caracterului chimic și a identității atomului față de protoni, cu toate că sunt la fel de greu de scos sau adăugat din nucleu, datorită legăturii lor puternice. În cazul adăugării sau câștigării unui neutron, atomul își menține aceeași identitate chimică, dar va avea loc o modificare ușoară a masei sale, și ar putea dobândi proprietăți nucleare ciudate precum radioactivitatea.

## **Electronii se pot deplasa liberi în interiorul atomului**

Totuși, electronii posedă o libertate de mișcare în cadrul atomului semnificativ mai mare decât cea a protonilor și neutronilor. Aceștia pot fi mutați de pe pozițiile lor (sau pot chiar părăsi atomul cu totul!) de către o energie mult mai mică decât cea necesară îndepărtării particulelor din nucleu. Dacă se întâmplă acest lucru, atomul își păstrează proprietățile sale chimice, dar apare un dezechilibru important. Electronii și protonii sunt unici prin faptul că sunt atrași unii de ceilalți la distanță. Este acea atracție la distanță responsabilă de atracția în urma frecării corpurilor, unde electronii sunt îndepărtați de atomii lor originali și ajung pe atomii unui alt corp.

## **Sarcina electrică netă a atomului este zero**

Electronii tind să respingă alți electroni la distanță, precum este și cazul protonilor cu alți protoni. Singurul motiv pentru care protonii se atrag în nucleul atomului se datorează unei forțe mult mai puternice, numită forță nucleară tare ce își face simțit efectul doar pe distanțe foarte scurte. Datorită acestui efect de atracție/respingere între particulele individuale, spunem că electronii și protonii au sarcini electrice opuse. Adică, fiecare electron are o sarcină negativă, și fiecare proton are o sarcină pozitivă. În număr egal în cadrul unui atom, își neutralizează unul altuia prezența, astfel încât sarcina electrică netă a atomului este zero.

De aceea imaginea atomului de carbon are șase electroni: pentru a balansa sarcina electrică a celor șase protoni din nucleu. Dacă pleacă electroni, sau vin electroni în plus, sarcina netă a atomului va suferi un dezechilibru, lăsând atomul „încărcat” în ansamblu, și ducând la interacțiunea acestuia cu particule sau alți atomi încărcăți din apropiere. Neutronii nu sunt nici atrași dar nici respinși de către electroni, protoni, sau alți neutroni, prin urmare se spune că ei nu au sarcină electrică.

## **Frecarea materialelor și deplasarea electronilor**

Procesul de adăugare sau de îndepărtare a electronilor este exact ceea ce se întâmplă atunci când anumite combinații de materiale sunt frecate unele de celelalte: electronii din atomii unui material sunt forțați prin frecare să-și părăsească atomii, și să ajungă pe atomii unui alt material. Cu alte cuvinte, electronii reprezintă „fluidul” lui Benjamin Franklin despre care vorbeam mai sus.

## **Electricitatea statică și eroarea lui Benjamin Franklin**

Rezultatul dezechilibrului acestui „fluid” (electroni) dintre obiecte poartă numele de electricitate statică. Se numește „statică”, pentru că electronii mutați de pe un material pe altul tind să rămână staționari. În cazul parafinei și a lânii, s-a determinat printr-o serie de experimente, că electronii din lână sunt transferați pe atomii din parafină, ceea ce este exact opusul ipotezei lui Franklin! În onoarea lui Franklin, ce a desemnat sarcina parafinei ca fiind „negativă”, și pe cea a lânii ca fiind „pozitivă”, spunem că electronii posedă o sarcină „negativă”.

Astfel, un obiect a cărui atomi au primit un surplus de electroni, se spune că este încărcat „negativ”, pe când un obiect a cărui atomi au pierdut electroni se spune că este încărcat „pozitiv”, cu toate că aceste denumiri sunt ușor de încurcat. În momentul în care a fost descoperită adevărata natură a „fluidului” electric, nomenclatura moștenită de la Franklin legată de sarcina electrică era prea adânc înrădăcinată ca să mai poată fi schimbată cu ușurință, prin urmare, a rămas la fel până în zilele noastre.

## **2. Conductori, dielectrics și deplasarea electronilor**

- În conductori, electronii din învelișurile superioare ale atomilor se pot deplasa cu ușurință, iar aceștia sunt denumiți electroni liberi
- În dielectrics, electronii din învelișurile superioare nu au aceeași libertate de mișcare
- Toate metalele sunt conductoare din punct de vedere electric
- Electricitatea dinamică, sau curentul electric, reprezintă mișcarea uniformă a electronilor printr-un conductor.

- Electricitatea statică este imobilă (în cazul unui dielectric), sarcină electrică fiind acumulată fie printr-un exces sau o deficiență de electroni dintr-un corp. De obicei este formată prin separare de sarcină atunci când două obiecte sunt aduse în contact și apoi despărțite
- Pentru ca electronii să curgă continuu (la nesfârșit) printr-un conductor, este necesară existența unui drum complet și neîntrerupt pentru a facilita atât intrarea cât și ieșirea electronilor din acel conductor

## Conductivitatea electrică a materialelor

Electronii diferitelor tipuri de atomi posedă grade diferite de libertate. În cazul unor tipuri de materiale, precum metalele, electronii de la marginea atomilor prezintă legături atât de slabe încât se deplasează haotic în spațiul dintre atomii materialului respectiv sub simpla influență a temperaturii camerei. Pentru că acești electroni practic nelegați sunt liberi să-și părăsească atomii și să plutească în spațiul dintre atomii învecinați, sunt adesea denumiți electroni liberi.

În alte tipuri de materiale, precum sticla, electronii atomilor au o libertate de mișcare foarte restrânsă. Chiar dacă forțe exterioare, precum frecarea fizică a materialului, pot forța o parte din acești electroni să-și părăsească atomii respectivi pentru a ajunge pe atomii unui alt material, aceștia nu se mișcă totuși foarte ușor între atomii aceluiași material.

## Materiale conductoare și materiale dielectrice

Această mobilitate a electronilor în cadrul unui material poartă numele de conductivitate. Conductivitatea este determinată de tipul atomilor existenți într-un material (numărul protonilor din nucleul atomului determinându-i identitatea chimică) și modul în care atomii sunt legați unul de celălalt. Materialele cu o mobilitate ridicată a electronilor (mulți electroni liberi) se numesc conductoare, pe când materialele cu o mobilitate scăzută a electronilor (puțini electroni liberi sau deloc) se numesc dielectrice (materiale izolatoare).

Câteva exemple comune de conductori și dielectrice:

**Conductori:** argint, cupru, aur, aluminiu, fier, oțel, alamă, bronz, mercur, grafit, apă murdară, beton

**Dielectrice:** sticlă, cauciuc, ulei, asfalt, fibră de sticlă, porțelan, ceramică, cuarț, bumbac, hârtie (uscată), plastic, aer, diamant, apă pură

Trebuie înțeles faptul că nu toate materialele conductoare au același nivel de conductivitate, și nu toți dielectricei impun o rezistență egală mișcării electronilor. Conductivitatea electrică este analoagă transparenței materialelor la lumină: materialele ce „conduc” cu ușurință lumina se numesc „transparente”, pe când cele ce nu o fac, se numesc „opace”. Dar, nu toate materialele transparent conduc lumina în aceeași măsură. Sticla de geam este mai bună decât majoritatea materialelor plastice, și cu siguranță mai bună decât fibra de sticlă „curată”. Același lucru este valabil și în cazul conductorilor electrice.

De exemplu, argintul este cel mai bun conductor din această listă, oferind o trecere mai ușoară electronilor precum niciun alt material enumerat nu o face. Apa murdară și betonul sunt și ele trecute ca și materiale conductoare, dar acestea sunt mult sub nivelul oricărui metal din punct de vedere al conductivității.

## Factori ce influențează conductivitatea electrică

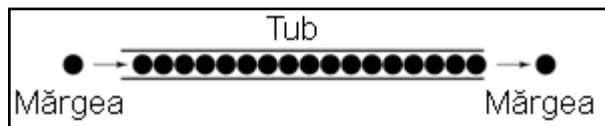
Dimensiunea fizică afectează de asemenea conductivitatea. De exemplu, dacă luăm două fâșii din același material conductiv - una subțire, alta groasă - cea groasă se va dovedi un conductor mai bun decât cea subțire la o aceeași lungime. Dacă luăm o altă pereche de fâșii - de data aceasta amândouă cu aceeași grosime, dar una mai scurtă decât cealaltă - cea scurtă va oferi o trecere mai ușoară a electronilor față de cea lungă. Acest lucru este analog curgerii apei printr-o țeavă: o țeavă groasă oferă o trecere mai ușoară decât una subțire, iar o țeavă scurtă este mai ușor de parcurs de apă decât o țeavă lungă, toate celelalte dimensiuni fiind egale.

Trebuie de asemenea înțeles faptul că unele materiale își modifică proprietățile electrice în diferite situații. De exemplu, sticla este un foarte bun dielectric la temperatura camerei, dar devine conductoare atunci când este încălzită la o temperatură foarte înaltă. Gaze precum aerul, în mod normal materiale dielectrice, devin de asemenea conductoare atunci când sunt aduse la temperaturi foarte ridicate. Majoritatea metalelor devin conductoare mai slabe atunci când sunt încălzite, și mai bune atunci când sunt răcite. Multe materiale conductoare devin conductoare perfecte (fenomenul poartă denumirea de supraconductivitate) la temperaturi extrem de scăzute.

## Deplasarea electronilor poartă numele de curent electric

Deși în mod normal deplasarea electronilor „liberi” dintr-un conductor este aleatoare, fără vreo direcție sau viteză particulară, electronii pot fi influențați să se deplaseze într-un mod coordonat printr-un material conductor. Această deplasare uniformă a electronilor poartă denumirea de electricitate, sau curent electric. Pentru a fi mai exacti, s-ar putea numi electricitate dinamică, în contrast cu electricitatea statică, ce reprezintă o acumulare de sarcină electrică nemișcată.

Asemenea curgerii apei prin spațiul liber al unei țevi, electronii sunt liberi să se deplaseze prin spațiul liber din interiorul și dintre atomi unui conductor. Conductorul poate părea că este solid atunci când îl privim, dar ca oricare alt material compus în marea lui parte din atomi, este în mare parte gol! Analogia curgerii lichidului se potrivește așa de bine încât deplasarea electronilor printr-un conductor este adesea denumită curgere.



Trebuie să facem o observație importantă. Mișcându-se uniform printr-un conductor, fiecare electron îl împinge pe cel de lângă el, astfel încât toți electronii se mișcă împreună

precum un grup. Punctul de plecare și cel final al mișcării unui electron printr-un conductor electric este atins practic instant, dintr-un capăt în celălalt al conductorului, chiar dacă viteza de deplasare a fiecărui electron în parte este mică. O analogie aproximativă este cea a unui tub umplut dintr-un capăt în celălalt cu mărgele.



Tubul este plin de mărgel, precum un conductor este plin de electroni liberi, pregătiți să fie puși în mișcare de o influență externă. Dacă o singură mărgea este introdusă brusc în acest tub plin prin partea stângă, o alta va ieși instant pe partea cealaltă. Chiar dacă fiecare mărgea a parcurs doar o distanță scurtă, transferul de mișcare prin tub este practic instant (din partea stângă înspre capătul din dreapta), oricât ar fi tubul de lung. În cazul electricității, efectul de ansamblu dintr-un capăt în celălalt al conductorului are loc la viteza luminii. Fiecare electron în parte însă, se deplasează prin conductor la o viteză mult mai mică.

## Deplasarea electronilor necesită un drum neîntrerupt

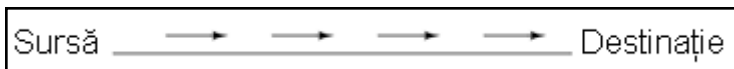
Dacă dorim ca electronii să se deplaseze pe o direcție anume, trebuie să la punem la dispoziție traseul respectiv, precum un instalator trebuie să instaleze conductele de apă necesare pentru aprovizionarea cu apă. În acest scop, firele sunt confecționate din metale bune conductoare de electricitate precum cuprul sau aluminiul, într-o mare varietate de dimensiuni.

Țineți minte că electronii se pot deplasa doar atunci când au oportunitatea de a se mișca în spațiul dintre atomii unui material. Acest lucru înseamnă că există curent electric doar acolo unde există o traiectorie continuă din material conductor ce permite deplasarea electronilor. În analogia cu mărgelile, acestea pot fi introduse prin partea stângă a tubului (și ieși pe partea dreaptă), doar dacă tubul este deschis la celălalt capăt pentru a permite ieșirea mărgelilor. Dacă tubul este închis la capătul din dreapta, mărgelile se vor „aduna” în tub, iar „curgerea” lor nu va avea loc. Același lucru se poate spune despre curentul electric: curgerea continuă a curentului necesită un drum neîntrerupt pentru a permite deplasarea.

---

Putem ilustra acest lucru prin desenul alăturat.

O linie subțire, continuă (precum cea de sus) reprezintă simbolul convențional pentru o porțiune continuă de fir (electric). Din moment ce firul este compus din material conductor, precum cuprul, atomii conținuți în acesta posedă mulți electroni liberi ce se pot deplasa cu ușurință în interiorul firului. Dar, nu va exista niciodată o deplasarea continuă sau uniformă a electronilor prin acest fir dacă nu au de unde să vină și încotro să se îndrepte.



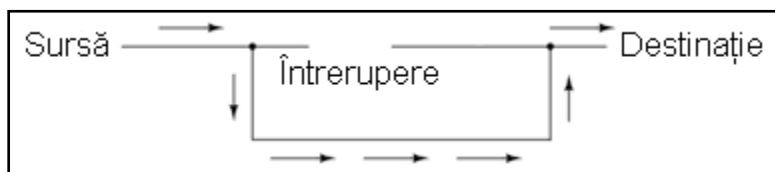
Să presupunem prin urmare o sursă și o destinație a electronilor.

Acum, cu sursa împingând noi electroni pe fir prin partea stângă, curgerea electronilor prin fir este posibilă (indicată de săgeți). Dar, această curgere va fi întreruptă în cazul în care calea formată de firul conductor este întreruptă.



Întrucât aerul este un dielectric (material izolator), iar spațiul dintre cele două fire este ocupat de aer, calea ce era înainte continuă, este acum întreruptă, iar electronii nu se pot deplasa de la Sursă spre Destinație. Această situație este asemănătoare tăierii conductei de apă în două și astupării celor două capete: apa nu

poate curge dacă nu are pe unde să iasă din țevă. În termeni electrici, atunci când firul era format dintr-o singură bucată avea condiția de continuitate electrică, iar acum, după tăierea și separarea firului în două, acea continuitate este întreruptă.



Dacă ar fi să luăm un alt fir ce duce spre Destinație și pur și simplu am face contact fizic cu firul ce duce spre Sursă, am avea din nou o cale continuă pentru curgerea electronilor. Cele

două puncte din diagramă reprezintă contactul fizic (metal-metal) dintre cele două fire.

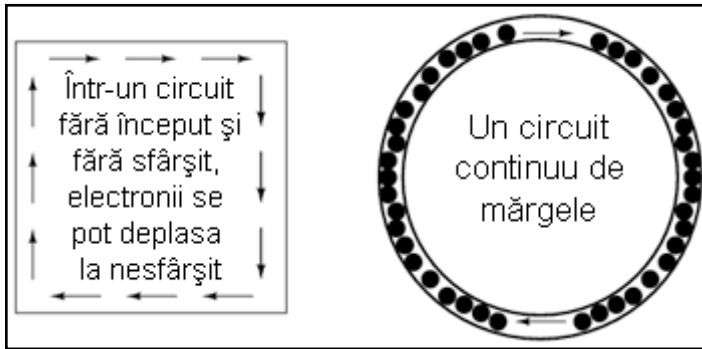
Acum avem continuitate dinspre Sursă, prin noua conexiune, în jos, în dreapta, și apoi în sus, spre Destinație. Acest aranjament este analog instalării unui teu într-o instalație de apă pentru dirijarea apei prin această nouă țevă, spre destinație. Atenție, segmentul de fir întrerup nu conduce curent electric pentru că nu mai face parte dintr-un drum complet de la Sursă spre Destinație.

### 3. Circuite electrice

- Un circuit electric este o buclă de material conductor ce permite electronilor curgerea continuă fără început sau sfârșit
- Întreruperea unui circuit înseamnă că elementele sale conductoare nu mai formează un drum complet, iar curgerea continuă a electronilor nu mai poate avea loc
- Locul întreruperii este irelevant în ceea ce privește capacitatea circuitului de a susține curgerea electronilor. Orice întrerupere, *oriunde* în circuit împiedică curgerea electronilor prin acesta

#### Circuitul electric

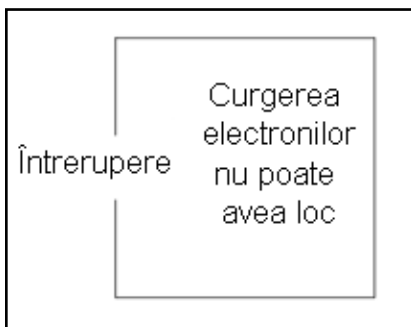
Poate vă întrebați cum este posibil ca electronii să se deplaseze continuu într-o direcție uniformă prin fire dacă nu am lua în considerare aceste Surse și Destinații ipotetice. Pentru ca aceste idealizări să funcționeze, ambele ar trebui să posede o capacitate infinită pentru a putea susține o curgere continuă a electronilor! Folosind analogia cu mărgelile și tubul, sursa de mărgelile și destinația acestora ar trebui să fie infinit de mari pentru a conține o cantitate suficientă de mărgelile necesară „curgerii” lor continue.



Răspunsul acestui paradox se regăsește în conceptul de circuit: o buclă continuă și neîntreruptă pentru curgerea electronilor. Dacă luăm un fir, sau mai multe fire puse cap la cap, și îl aranjăm sub formă de buclă, astfel încât să formeze un drum continuu, curgerea uniformă a electronilor fără ajutorul surselor și destinațiilor ipotetice de mai sus, este posibilă.

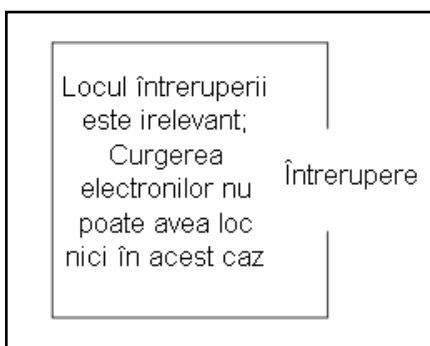
În cadrul acestui circuit, în sensul acelor de ceasornic, fiecare electron împinge electronul din fața lui, ce împinge electronul din fața lui, și așa mai departe, precum un circuit din mărgele. astfel, putem susține o deplasare continuă a electronilor fără a recurge la sursele și destinațiile infinite (surse teoretice). Tot ceea ce avem nevoie este prezența unei motivații pentru acești electroni, lucru ce-l vom discuta în următoarea secțiune din acest capitol.

### Continuitatea circuitului asigură deplasarea electronilor



Trebuie realizat faptul că și în acest caz, continuitatea circuitului este la fel de importantă precum în cazul firului conductor analizat mai sus. La fel ca și în acel exemplu, orice întrerupere a circuitului oprește curgerea (deplasarea) electronilor.

### Punctul de discontinuitate din circuit este irelevant



Un principiu important de reținut este că nu contează locul întreruperii. Orice discontinuitate din circuit va întrerupe curgerea electronilor prin întreg circuitul. O curgere continuă a electronilor prin circuit poate fi realizată doar dacă există un drum (cale) continuu și neîntrerupt printr-un material conductor prin care aceștia să se poată deplasa.

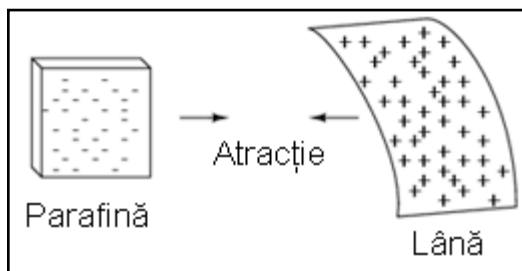
## 4. Tensiunea și curentul

- Electronii pot fi „motivați” să se deplaseze printr-un conductor de către aceeași forță prezentă în cazul electricității statice

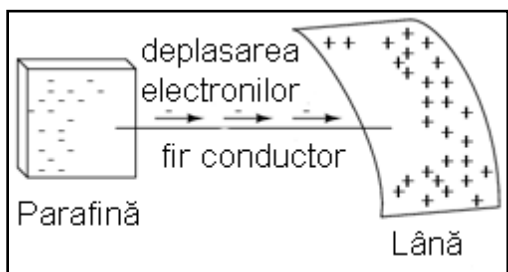
- Tensiunea este măsura energiei potențiale specifice (energie potențială pe unitate de sarcină electrică) dintre două puncte. În termeni non-științifici, este măsura „împingerii” disponibile pentru motivarea electronilor
- Tensiunea, ca și expresie a energiei potențiale, se măsoară tot timpul între două puncte. Câteodată se mai numește și cădere de tensiune
- Când o sursă de tensiune este conectată la un circuit, tensiunea electrică determină o deplasare a electronilor prin acel circuit, deplasare ce poartă numele de curent
- Într-un circuit format dintr-o singură buclă, valoarea curentului este aceeași în oricare punct al circuitului
- Dacă un circuit ce conține o sursă de tensiune este întrerupt, întreaga tensiune electrică se va regăsi la capetele firelor unde a avut loc întreruperea
- Căderea de tensiune desemnată prin +/- se numește polaritate. Este de asemenea relativă, ea depinde de ambele puncte la care se face referire.

## Dezechilibrul de sarcină

Precum am menționat mai sus, doar un drum continuu (circuit) nu este suficient pentru a putea deplasa electronii: avem de asemenea nevoie de un mijloc de „împingere” a lor prin circuit. La fel ca mărgelele dintr-un tub sau apa dintr-o țevă, este nevoie de o forță de influență pentru a începe curgerea. În cazul electronilor, această forță este aceeași ca și în cazul electricității statice: forța produsă de un dezechilibru de sarcină electrică.



Dacă luăm exemplul parafinei și lânii frecate împreună, vedem că surplusul de electroni de pe parafină (sarcină negativă) și deficitul de electroni de pe lână (sarcină pozitivă) crează un dezechilibru de sarcină între cele două. Acest dezechilibru se manifestă printr-o forță de atracție între cele două corpuri.



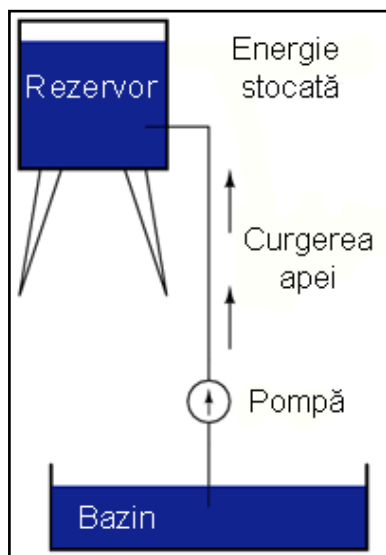
Dacă introducem un fir conductor între cele două corpuri încărcate din punct de vedere electric, vom observa o curgere a electronilor prin acesta datorită faptului că electronii în exces din parafină trec prin fir înapoi pe lână, restabilind dezechilibrul creat.

Dezechilibrul dintre numărul electronilor din atomii parafinei și cei ai lânii crează o forță între cele două materiale. Neexistând niciun drum prin care electronii se pot deplasa de pe parafină înapoi pe lână, tot ce poate face această forță este să atragă cele două corpuri împreună. Acum că un conductor conectează cele două corpuri, această forță va face ca electronii să se deplaseze într-o direcție uniformă prin fir, chiar dacă numai pentru un timp

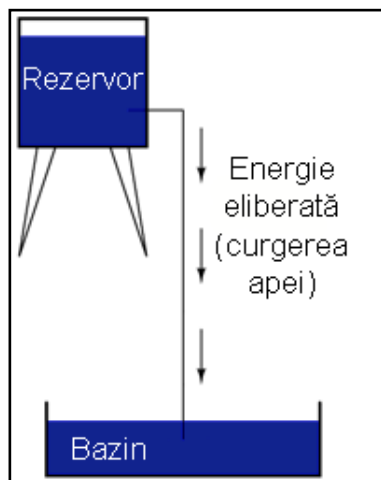
foarte scurt, până în momentul în care sarcina electrică este neutralizată în această zonă (restabilirea echilibrului), iar forța dintre cele două materiale se reduce.

## Stocarea energiei

### Analogia rezervorului de apă

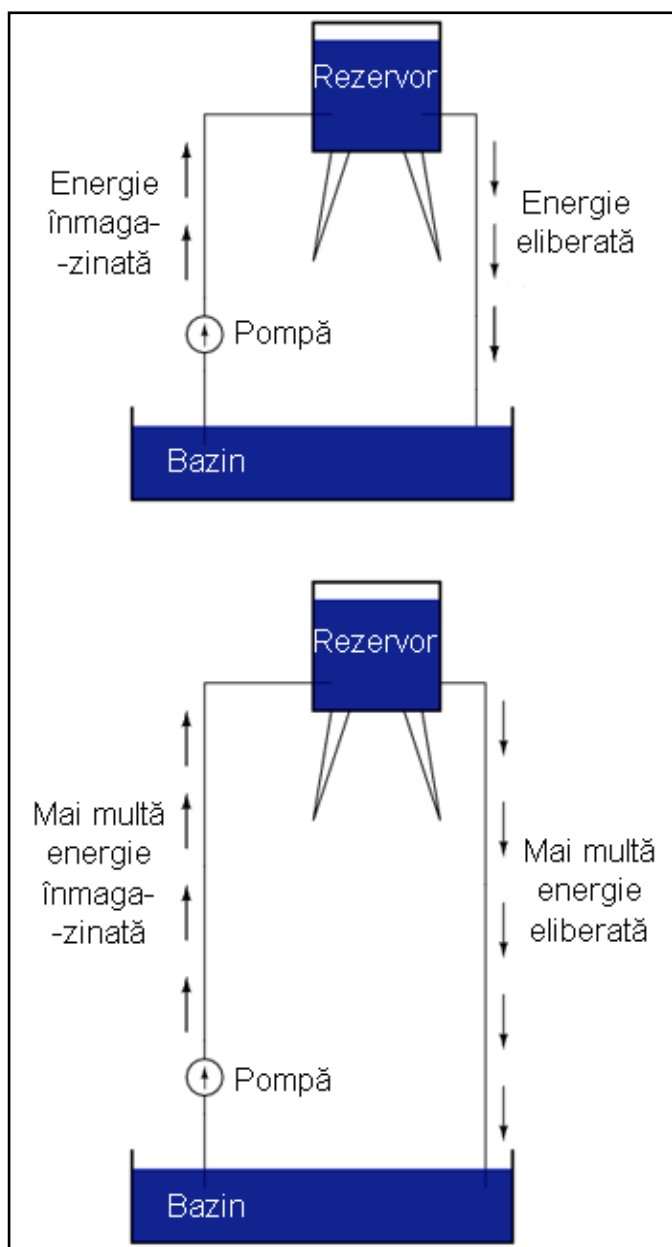


Sarcina electrică formată prin frecarea celor două materiale reprezintă stocarea unei anumite cantități de energie. Această energie este asemănătoare energiei înmagazinate într-un rezervor de apă aflat la înălțime, umplut cu ajutorul unei pompe dintr-un bazin aflat la un nivel mai scăzut.



Influența gravitației asupra apei din rezervor dă naștere unei forțe ce tinde să deplaseze apa spre nivelul inferior. Dacă construim o țeavă de la rezervor spre bazin, apa va curge sub influența gravitației din rezervor prin țeavă spre bazin.

Este nevoie de o anumită energie pentru pomparea apei de la un nivel inferior (bazin) la unul superior (rezervor), iar curgerea apei prin țeavă înapoi la nivelul inițial constituie eliberarea energiei înmagazinate prin pomparea precedentă.



Dacă apa este pompată la un nivel și mai ridicat, va fi necesară o energie și mai mare pentru realizarea acestui lucru, prin urmare, va fi înmagazinată o energie și mai mare, și de asemenea, va fi eliberată o energie mai mare decât în cazul precedent.

### Cazul electronilor

Electronii nu sunt foarte diferiți. Dacă frecăm parafina și lâna împreună, în fapt, „pompăm” electronii de pe „nivelurile” lor normale, dând naștere unei condiții în care există o forță între parafină și lâna, datorită faptului că electronii încearcă să-și recâștige vechile poziții (și echilibru în cadrul atomilor respectivi). Forța de atragere a electronilor spre pozițiile originale în jurul nucleelor pozitive ale atomilor, este analoagă forței de gravitație exercitată asupra apei din rezervor, forță ce tinde să tragă apa înapoi în poziția sa originală.

La fel precum pomparea apei la un nivel mai înalt rezultă în înmagazinare de energie, „pomparea” electronilor pentru crearea unui dezechilibru de sarcină electrică duce la înmagazinare de energie prin acel dezechilibru. Asigurarea unui drum prin care electronii să poată curge înapoi spre „nivelurile” lor originale are ca

rezultat o eliberare a energiei înmagazinate, asemenea eliberării energiei în cazul rezervorului, atunci când este pus la dispoziție un drum pe care apa poate să curgă prin intermediul unei țevi.

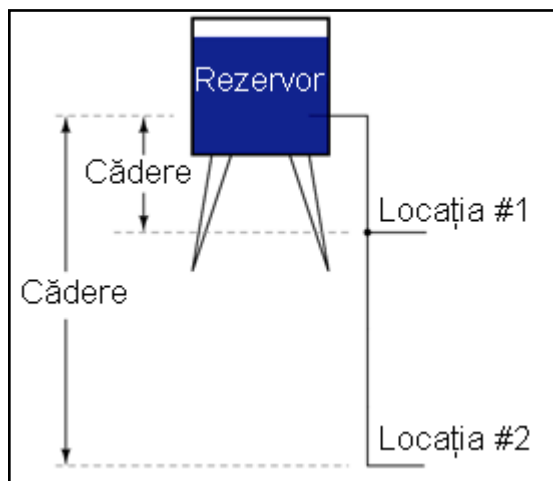
## Tensiunea electrică

Atunci când electronii se află într-o poziție statică (prin analogie cu apa dintr-un rezervor), energia înmagazinată în acest caz poartă numele de energie potențială, pentru că are posibilitatea (potențialul) eliberării acestei energii în viitor.

Această energie potențială, înmagazinată sub forma unui dezechilibru de sarcină electrică capabilă să provoace deplasarea electronilor printr-un conductor, poate fi exprimată printr-un termen denumit tensiune, ceea ce tehnic se traduce prin energie potențială pe unitate de sarcină electrică, sau ceva ce un fizician ar denumi energie potențială specifică. Definită în contextul electricității statice, tensiunea electrică este măsura lucrului mecanic necesar deplasării unei sarcini unitare dintr-un loc în altul acționând împotriva forței ce tinde să mențină sarcinile electrice în echilibru. Din punct de vedere al surselor de putere electrică, tensiunea este cantitatea de energie potențială disponibilă pe unitate de sarcină, pentru deplasare electronilor printr-un conductor.

## Exprimarea tensiunii electrice

Deoarece tensiunea este o expresie a energiei potențiale, reprezentând posibilitatea sau potențialul de eliberare a energiei atunci când electronii se deplasează de pe un anumit „nivel” pe un altul, tensiunea are sens doar atunci când este exprimată între două puncte distincte.



Datorită diferenței dintre înălțimile căderilor de apă, potențialul de energie eliberată este mai mare prin țeava din locația 2 decât cea din locația 1. Principiul poate fi înțeles intuitiv considerând aruncarea unei pietre de la o înălțime de un metru sau de la o înălțime de zece metri: care din ele va avea un impact mai puternic cu solul? Evident, căderea de la o înălțime mai mare implică eliberarea unei cantități mai mari de energie (un impact mai violent).

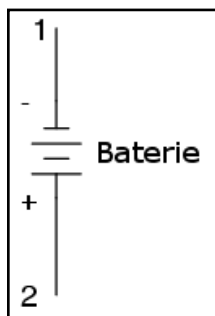
Nu putem aprecia valoarea energiei înmagazinate într-un rezervor de apă prin simpla măsurare a volumului de apă: trebuie să luăm de asemenea în considerare căderea (distanța parcursă) apei. Cantitatea de energie eliberată prin căderea unui corp depinde de distanța dintre punctul inițial și cel final al corpului. În mod asemănător, energia potențială disponibilă pentru a deplasa electronii dintr-un punct în altul depinde de aceste puncte. Prin urmare, tensiune se exprimă tot timpul ca și o cantitate între două puncte. Este interesant de observat că modelul „căderii”

unui corp de la o anumită distanță la alta este atât de potrivit, încât de multe ori tensiune electrică dintre două puncte mai poartă numele de cădere de tensiune.

## Alte modalități de generare a tensiunii

Tensiunea poate fi generată și prin alte mijloace decât frecare diferitelor tipuri de materiale împreună. Reacțiile chimice, energia radiantă și influența magnetismului asupra conductorilor sunt câteva modalități prin care poate fi produsă tensiunea electrică. Ca și exemple practice de surse de tensiune putem da bateriile, panourile solare și generatoarele (precum „alternatorul” de sub capota automobilului). Pentru moment, nu intrăm în detalii legate de funcționarea fiecărei dintre aceste surse - mai important acum este să înțelegem cum pot fi aplicate sursele de tensiune pentru a crea o deplasare uniformă și continuă a electronilor prin circuit.

## Conectarea surselor de tensiune în circuit



Să luăm pentru început simbolul bateriei electrice și să construim apoi un circuit pas cu pas. Orice sursă de tensiune, incluzând bateriile, are două puncte de contact electric. În acest caz avem punctul 1 și punctul 2 de pe desenul de mai sus. Liniile orizontale de lungimi diferite indică faptul că această sursă de tensiune este o baterie, și mai mult, în ce direcția va împinge tensiunea acestei baterii electronii prin circuit.

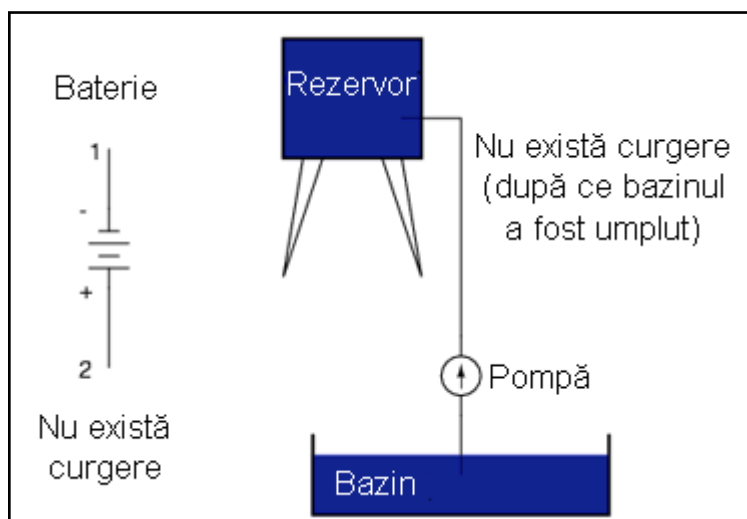
Faptul că liniile orizontale ale bateriei din simbol par să fie separate (prin urmare reprezintă o întrerupere a circuitului prin care electronii nu pot trece) nu trebuie să ne îngrijoreze: în realitate, aceste linii orizontale reprezintă plăci metalice (anod și catod) introduse într-un lichid sau material semi-solid care nu doar conduce electronii, dar și generează tensiunea electrică necesară împingerii lor prin circuit datorită interacțiunii acestui material cu plăcile.

Puteți observa cele două semne + respectiv - în imediata apropiere a simbolului bateriei. Partea negativă (-) a bateriei este tot timpul cea cu liniuță mai scurtă, iar partea pozitivă (+) a bateriei este tot timpul capătul cu liniuță mai lungă. Din moment ce am decis să denumim electronii ca fiind încărcăți negativ din punct de vedere electric, partea negativă a bateriei este acel capăt ce încearcă să împingă electronii prin circuit, iar partea pozitivă este cea care încearcă să atragă electronii.

## Deplasarea electronilor

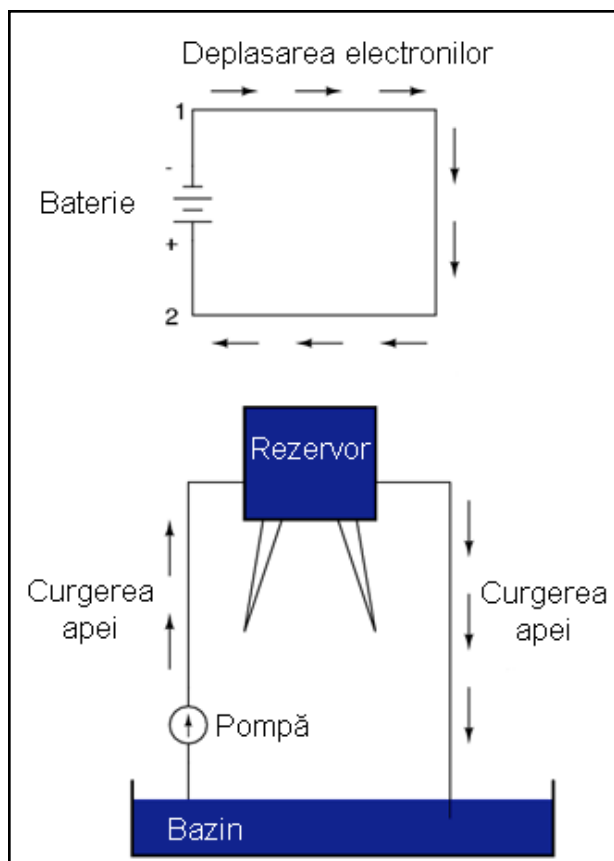
Atunci când capetele „+” și „-” ale bateriei nu sunt conectate la un circuit, va exista o tensiune electrică între aceste două puncte, dar nu va exista o deplasare a electronilor prin baterie, pentru că nu există un drum continuu prin care electronii să se poată deplasa.





Același principiu se aplică și în cazul analogiei rezervorului și pompei de apă: fără un drum (țeavă) înapoi spre bazin, energia înmagazinată în rezervor nu poate fi eliberată prin curgerea apei. Odată ce rezervorul este umplut complet, nu mai are loc nicio curgere, oricât de multă presiune ar genera pompa. Trebuie să existe un drum complet (circuit) pentru ca apa să curgă continuu dinspre bazin spre rezervor și înapoi în bazin.

### Realizarea unui drum continuu



Putem asigura un astfel de drum pentru baterie prin conectarea unui fir dintr-un capăt al bateriei spre celălalt. Formând un circuit cu ajutorul unei bucle din material conductor, vom iniția o deplasare continuă a electronilor în direcția acelor de ceasornic (în acest caz particular).

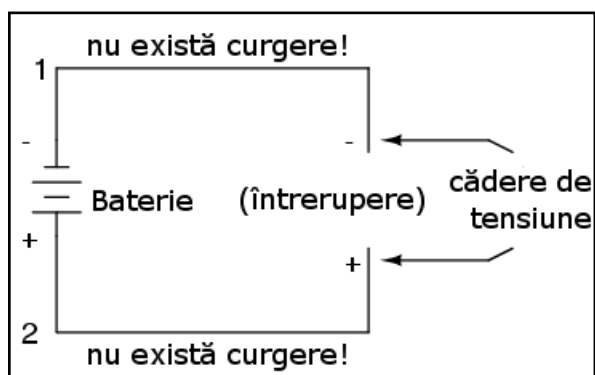
### Curentul electric

Atâta timp cât bateria va continua să producă tensiune electrică, iar continuitatea circuitului electric nu este întreruptă, electronii vor continua să se deplaseze în circuit. Continuând cu analogia apei printr-o țeavă, curgerea

continuă și uniformă de electroni prin circuit poartă numele de curent. Atâta timp cât sursa de tensiune electrică continuă să „împingă” în aceeași direcție, electronii vor continua să se deplaseze în aceeași direcție prin circuit. Această curgere uni-direcțională a electronilor prin circuit poartă numele de curent continuu, prescurtat **c.c.**. În următorul volum din această serie vom analiza circuitele electrice în care deplasarea electronilor are loc alternativ, în ambele direcții: curent alternativ, prescurtat a.c.. Dar pentru moment, vom discuta doar despre circuite de curent continuu

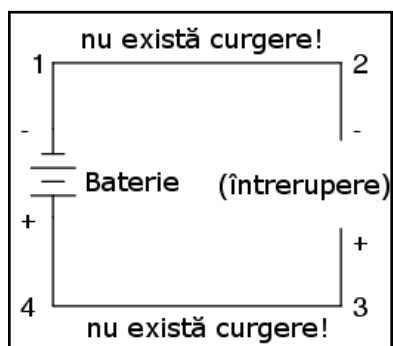
Curentul electric fiind compus din electroni individuali ce se deplasează la unison printr-un conductor împingând electronii de lângă ei, precum mărgelele dintr-un tub sau apa dintr-o țeavă, cantitatea deplasată în oricare punct din circuit este aceeași (circuit serie). Dacă ar fi să monitorizăm o secțiune transversală dintr-un fir într-un singur circuit, numărând electronii ce trec prin ea, am observa exact aceeași cantitate în unitate de timp (curent) în oricare parte a circuitului, indiferent de lungimea sau diametrul conductorului.

## Întreruperea circuitului



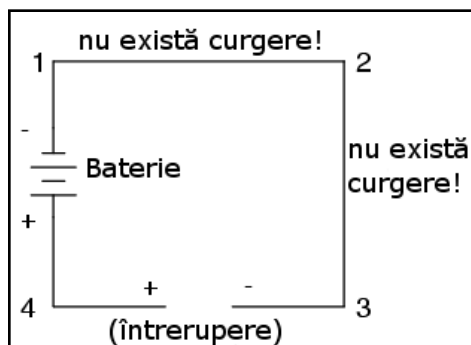
Dacă întrerupem continuitatea circuitului în oricare punct, curentul electric se va întrerupe în întreg circuitul, iar întreaga tensiune electrică produsă de baterie se va regăsi acum la capetele firelor întrerupte, ce erau înainte conectate.

Observați semnele „+” și „-” puse la capătul firelor unde a fost realizată întreruperea circuitului, și faptul că ele corespund celor două semne „+” și „-” adiacente capetelor bateriei. Aceste semne indică direcția pe care tensiunea electrică o imprimă curgerii electronilor, acea direcție potențială ce poartă denumirea de polaritate. Țineți minte că tensiunea electrică se măsoară tot timpul între două puncte. Din acest motiv, polaritatea unei căderi de tensiune depinde de asemenea de cele două puncte: faptul că un punct din circuit este notat cu „+” sau „-” depinde de celălalt capăt la care face referire.



Să ne uităm la următorul circuit, în care fiecare colț al circuitului este marcat printr-un număr de referință.

Continuitatea circuitului fiind întreruptă între punctele 2 și 3, polaritatea căderii de tensiune între punctele 2 și 3 este „-” pentru punctul 2 și „+” pentru punctul 3. Polaritatea bateriei (1 „-” și 4 „+”) încearcă împingerea electronilor prin circuit în sensul acelor de ceasornic din punctul 1 spre 2, 3, 4 și înapoi la 1.



Să vedem acum ce se întâmplă dacă conectăm punctele 2 și 3 din nou împreună, dar efectuăm o întrerupere a circuitului între punctele 3 și 4.

Întreruperea fiind acum între punctele 3 și 4, polaritatea căderii de tensiune între aceste două puncte este „+” pentru 4 și „-” pentru 3. Observați cu atenție faptul că semnul punctului 3 este diferit față de primul exemplu, acolo unde întreruperea a fost între punctele 2 și 3 (3 a fost notat cu „+”). Este imposibil de precizat ce semn va avea punctul 3 în acest circuit, fie „+” fie „-”, deoarece polaritate, la fel ca tensiunea, nu reprezintă o caracteristică a unui singur punct, ci depinde tot timpul de două puncte distincte!

## 5. Rezistența electrică

- Rezistența electrică reprezintă opoziția față de curentul electric
- Un scurt circuit reprezintă un circuit electric ce oferă o rezistență foarte scăzută curgerii electronilor (sau deloc). Scurt circuitele sunt periculoase în cazul surselor de tensiune înaltă datorită curenților intensi ce pot cauza eliberarea unei cantități mari de energie sub formă de căldură
- Un circuit deschis este un circuit electric ce nu are continuitate, prin urmare nu există o cale pe care electronii să o poată urma
- Un circuit închis este un circuit electric complet, continuu, cu un drum pe care electronii îl pot urma
- Termenii deschis și închis se referă atât la întrerupătoare cât și la întregul circuit. Un întrerupător deschis este un întrerupător fără continuitate: electronii nu se pot deplasa prin el. Un întrerupător închis este un întrerupător ce oferă un drum direct, cu o rezistență scăzută, electronilor pentru curgere.

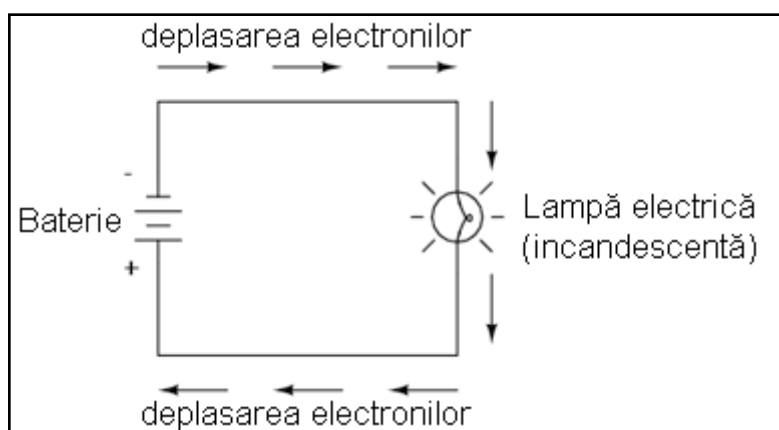
### Rezistența și rezistorul sunt doi termeni diferiți

Este foarte ușor să confundăm termenii de rezistență și rezistor. Rezistența reprezintă opoziția față de curentul electric, iar rezistorul este un dispozitiv fizic utilizat în circuitele electrice. Este adevărat, rezistorii posedă rezistență electrică, dar trebuie să înțelegem că cei doi termeni nu sunt echivalenți!

## Scurt-circuitul

Circuitele prezentate în capitolele precedente nu sunt foarte practice. De fapt, conectarea directă a polilor unei surse de tensiune electrică cu un singur fir conductor este chiar periculoasă. Motivul pentru care acest lucru este periculos se datorează amplitudinii (mărimii) curentului electric ce poate atinge valori foarte mari într-un astfel de scurt-circuit, iar eliberarea energiei extrem de dramatică (de obicei sub formă de căldură). Uzual, circuitele electrice sunt construite pentru a folosi energia eliberată într-un mod practic, cât mai în siguranță posibil. Evitați conectarea directă a polilor surselor de alimentare !

## Utilizarea practică a energiei electrice



O utilizare practică și populară a curentului electric este iluminatul electric (artificial). Cea mai simplă formă a lămpii electrice îl reprezintă un „filament” introdus într-un balon transparent de sticlă ce dă o lumină albă-caldă („incandescență”) atunci când este parcurs de un curent electric suficient de mare.

Ca și bateria, becul are două puncte de contact electric, unul pentru intrarea electronilor, celălalt pentru ieșirea lor. Conectată la o sursă de tensiune, o lampă electrică arată precum în circuitul alăturat.

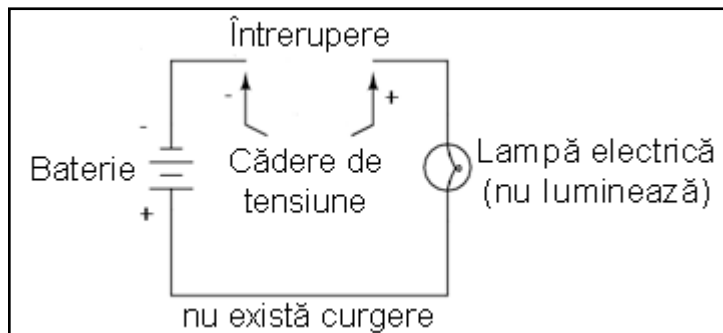
## Opoziția față de trecerea electronilor prin conductori poartă numele de rezistență

Atunci când electronii ajung la filamentul din material conductor subțire al lămpii, aceștia întâmpină o rezistență mult mai mare la deplasare față de cea întâmpinată în mod normal în fir. Această opoziție a trecerii curentului electric depinde de tipul de material, aria secțiunii transversale și temperatura acestuia. Termenul tehnic ce desemnează această opoziție se numește rezistență. (Spunem că dielectricii au o rezistență foarte mare și conductorii o rezistență mică).

Rolul acestei rezistențe este de limitare a curentului electric prin circuit dată fiind valoarea tensiunii produsă de baterie, prin comparație cu „scurt circuitul” în care nu am avut decât un simplu fir conectat între cele două capete (tehnice, borne) ale sursei de tensiune (baterie).

## Disiparea energiei sub formă de căldură

Atunci când electronii se deplasează împotriva rezistenței se generează „frecare”. La fel ca în cazul frecării mecanice, și cea produsă de curgerea electronilor împotriva unei rezistențe se manifestă sub formă de căldură. Rezultatul concentrării rezistenței filamentului lămpii pe o suprafață restrânsă este disiparea unei cantități relativ mari de energie sub formă de căldură, energie necesară pentru „aprinderea” filamentului, ce produce astfel lumină, în timp ce firele care realizează conexiunea lămpii la baterie (de o rezistență mult mai mică) abia dacă se încălzesc în timpul conducerii curentului electric.

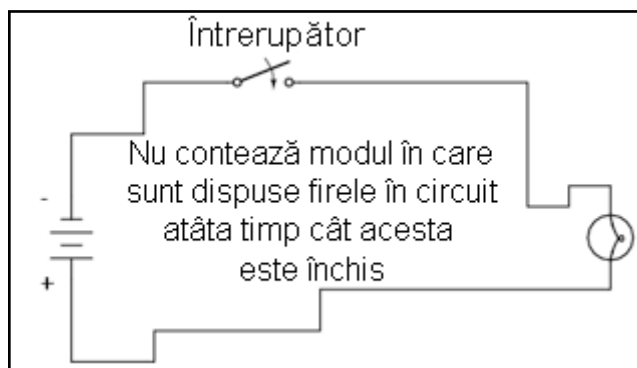


Ca și în cazul scurt circuitului, dacă continuitatea circuitului este întreruptă în oricare punct, curgerea electronilor va înceta prin întreg circuitul. Cu o lampă conectată la acest circuit, acest lucru înseamnă că aceasta va înceta să mai lumineze.

## Circuitul deschis și circuitul închis

Ca și înainte, fără existența curentului (curgerii electronilor), întregul potențial (tensiune) al bateriei este disponibil la locul întreruperii, așteptând ca o conexiune să „astupe” întreruperea, permițând din nou curgerea electronilor. Această situație este cunoscută sub denumirea de circuit deschis, o întrerupere a continuității circuitului ce întrerupe curentul în întreg circuitul. Este suficientă o singură „deschidere” a circuitului pentru a întrerupe curentul electric în întreg circuitul. După ce toate întreruperile au fost „astupate” iar continuitatea circuitului restabilită, acum circuitul poate fi denumit circuit închis.

## Întreprupătorul electric



Ceea ce observăm aici se regăsește în principiul pornirii și opririi lămpilor prin intermediul unui întrerupător. Deoarece orice întrerupere în continuitatea circuitului rezultă în oprirea curentului în întreg circuitul, putem folosi un dispozitiv creat exact pentru acest scop, denumit întrerupător, montat într-o locație oarecare, dar astfel încât să putem controla deplasarea electronilor prin circuit.

Acesta este modul în care întrerupătorul poate controla becul din cameră. Întrerupătorul însuși constă dintr-o pereche de contacte metalice acționate de un buton sau de un braț mecanic. Când contactele se ating, electronii se vor deplasa dintr-un capăt în celălalt al circuitului iar continuitatea acestuia este restabilită (circuit/contact închis);

când contactele sunt separate, curgerea electronilor este întreruptă de către izolația dintre contacte reprezentată în acest caz de aer, iar continuitatea circuitului este întreruptă (circuit/contact deschis).

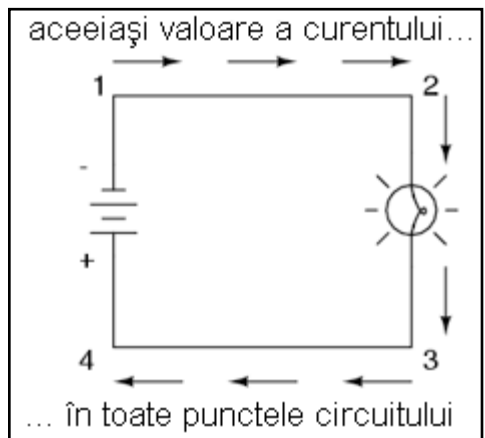
## Întrerupător închis și întrerupător deschis

Folosind în continuare terminologia circuitelor electrice, un întrerupător ce realizează contactul între cei doi terminali ai săi crează continuitate pentru curgerea electronilor prin acesta, și este denumit un întrerupător închis. Analog, un întrerupător ce crează o discontinuitate nu va permite electronilor să treacă, și se numește un întrerupător deschis.

## 6. Tensiunea și curentul într-un circuit practic

### Curentul într-un circuit simplu este același în oricare punct, dar tensiunea nu

Deoarece este nevoie de energie pentru a forța electronii să se deplaseze împotriva opoziției unei rezistențe, va exista întotdeauna o tensiune electrică între oricare două puncte ale unui circuit ce posedă rezistență. Este important de ținut minte că, deși cantitatea de curent (cantitatea de electroni ce se deplasează într-un anumit loc în fiecare secundă) este uniformă într-un circuit simplu, cantitatea de tensiune electrică (energia potențială pe unitate de sarcină) între diferite seturi de puncte dintr-un singur circuit poate varia considerabil.

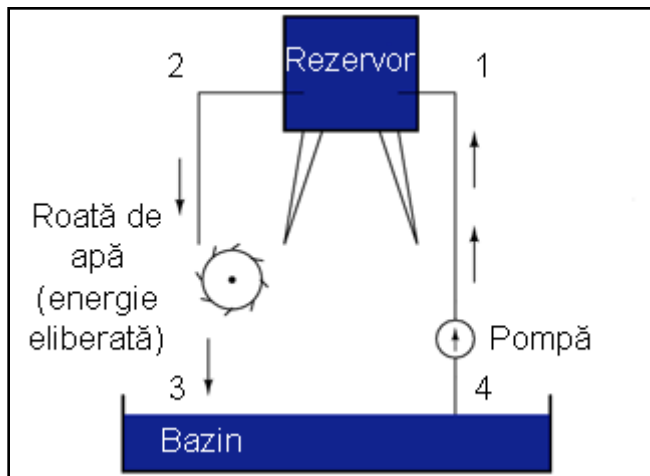


Să luăm acest circuit ca și exemplu. Dacă luăm patru puncte din acest circuit (1, 2, 3 și 4), vom descoperi că valoarea curentului ce trece prin fir între punctele 1 și 2 este exact aceeași cu valoarea curentului ce trece prin bec între punctele 2 și 3. aceeași cantitate de curent trece prin fir și între punctele 3 și 4, precum și prin baterie între punctele 1 și 4.

Dar, vom descoperi că tensiunea ce apare între oricare două puncte din acest circuit, este direct proporțională cu rezistența prezentă între cele două puncte, atunci când curentul este același în întregul circuit (în acest caz, el este). Într-un circuit normal precum cel de mai sus, rezistența becului va fi mult mai mare decât rezistența firelor conductoare, prin urmare ar trebui să vedem o cantitate substanțială de tensiune între punctele 2 și

3, și foarte puțină între punctele 1 și 2, sau între 3 și 4. Desigur, tensiunea dintre punctele 1 și 4 va fi întreaga „forță” oferită de baterie, și va fi doar cu foarte puțin mai mare decât tensiune dintre punctele 2 și 3 (bec).

Putem aduce din nou în discuție analogia rezervorului de apă:



Între punctele 2 și 3, acolo unde apa ce cade eliberează energie asupra roții, există o diferență de presiune, reflectând opoziția roții la trecerea apei. Din punctul 1 în punctul 2, sau din punctul 3 la punctul 4, acolo unde apa curge liberă prin rezervor și bazin întâmpinând o rezistență extrem de scăzută, nu există o diferență de presiune (nu există energie potențială).

Totuși, rata de curgere a apei prin acest sistem continuu este aceeași peste tot (presupunând că nivelul apei din rezervor și bazin nu se schimbă): prin pompă, prin roată și prin toate țevile. Același lucru este valabil și în cazul circuitelor electrice simple: rata de curgere a electronilor este aceeași în oricare punct al circuitului, cu toate că tensiunile pot varia între diferite seturi de puncte.

## 7. Sensul convențional și sensul real de deplasare al electronilor

- Sensul convențional de deplasare al electronilor: de la borna pozitivă (+) la borna negativă (-)
- Sensul real de deplasare al electronilor: de la borna negativă (-) la borna pozitivă (+)
- Pe tot parcursul cărții se va folosi notația reală de deplasare a electronilor prin circuit, și anume, de la (-) la (+)

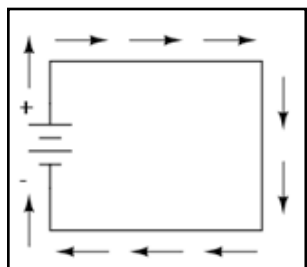
### Purtătorii sarcinii electrice

Când Benjamin Franklin a presupus direcția de curgere a sarcinii electrice (de pe parafină spre lână), a creat un precedent în notațiile electrice ce există până în zilele noastre, în ciuda faptului că acum se știe că electronii sunt purtătorii de sarcină electrică, și că aceștia se deplasează de pe lână pe parafină - nu invers - atunci când aceste două materiale sunt frecate unul de celalalt. Din această cauză spunem că electronii posedă o sarcină electrică negativă: deoarece Franklin a presupus că sarcina electrică se deplasează în direcția contrară față de cea reală. Prin urmare, obiectele pe care el le-a numit „negative” (reprezentând un deficit de sarcină) au de fapt un surplus de electroni.

**Termenii de „pozitiv” și „negativ” sunt pure convenții tehnice**

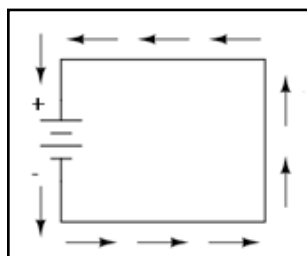
În momentul în care a fost descoperită adevărata direcție de deplasare a electronilor, nomenclatura „pozitiv” și „negativ” era atât de bine stabilită în comunitatea științifică încât nu a fost făcut niciun efort spre modificarea ei, deși numirea electronilor „pozitivi” ar fi mult mai potrivită ca și purtători de sarcină în „exces”. Trebuie să realizăm că termenii de „pozitiv” și „negativ” sunt invenții ale oamenilor, și nu au nici cea mai mică însemnătate dincolo de convențiile noastre de limbaj și descriere științifică. Franklin s-ar fi putut foarte bine referi la un surplus de sarcină cu termenul „negru” și o deficiență cu termenul „alb” (sau chiar invers), caz în care oamenii de știință ar considera acum electronii ca având o sarcină „albă” (sau „neagră”, în funcție de alegerea făcută inițial).

### Sensul convențional de deplasare al electronilor



Datorită faptului că tindem să asociem termenul de „pozitiv” cu un „surplus”, și termenul „negativ” cu o „deficiență”, standardul tehnic pentru denumirea sarcinii electronilor pare să fie chiar invers. Datorită acestui lucru, mulți ingineri se decid să mențină vechiul concept al electricității, unde „pozitiv” înseamnă un surplus de sarcină, și notează curgerea curentului în acest fel. Această notație a devenit cunoscută sub denumirea de sensul convențional de deplasare al electronilor. În această situație, sarcinile electrice se deplasează de la terminalul pozitiv (+) la terminalul negativ (-).

### Sensul real de deplasare al electronilor



Alții aleg să descrie deplasarea sarcinii exact așa cum se realizează ea din punct de vedere fizic într-un circuit. Această notație a devenit cunoscută sub numele de sensul real de deplasare al electronilor. În această situație, sarcinile electrice se deplasează dinspre „-” (surplus de electroni) spre „+” (deficiență de electroni).

**Atenție, pentru tot restul cărții se va folosi notația reală de deplasare a electronilor !!!**

### Rezultatul analizei circuitelor este același indiferent de notația folosită

În cazul sensului convențional de deplasare al electronilor, deplasarea sarcinii electrice este indicată prin denumirile (tehnic incorecte) de + și -. În acest fel aceste denumiri au sens, dar direcția de deplasare a sarcinii este incorectă. În cazul sensului real de deplasare al electronilor, urmărim deplasarea reală a electronilor prin circuit, dar denumirile de + și - sunt puse invers. Contează chiar așa de mult modul în care punem aceste etichete într-un circuit? Nu, atâta timp cât folosim aceeași notație peste tot. Putem folosi direcția imaginată de Franklin a curgerii electronilor (convențională) sau cea efectivă (reală) cu aceleași rezultate din punct de vedere al analizei circuitului.



Conceptele de tensiune, curent, rezistență, continuitate și chiar elemente matematice precum legea lui Ohm sau legile lui Kirchhoff, sunt la fel de valide oricare notație am folosi-o.

Notația convențională este folosită de majoritatea inginerilor și ilustrată în majoritatea cărților de inginerie. Notația reală este cel mai adesea întâlnită în textele introductive (aceste, de exemplu) și în scrierile oamenilor de știință, în special în cazul celor ce studiază fizica materialelor solide pentru că ei sunt interesați de deplasarea reală a electronilor în substanțe. Aceste preferințe sunt culturale, în sensul că unele grupuri de oameni au găsit avantaje notării curgerii curentului fie real fie convențional. Prin faptul că majoritatea analizelor circuitelor electrice nu depinde de o descriere exactă din punct de vedere tehnic a deplasării electronilor, alegerea dintre cele două notații este (aproape) arbitrară.

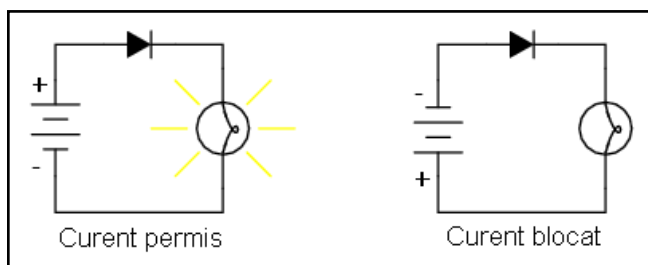
## Dispozitive polarizate și dispozitive nepolarizate

Multe dispozitive electrice suportă curenți electrici în ambele direcții fără nicio diferență de funcționare. Becurile cu incandescență, de exemplu, produc lumină cu aceeași eficiență indiferent de sensul de parcurgere al curentului prin ele. Funcționează chiar foarte bine în curent alternativ, acolo unde direcția se modifică rapid în timp. Conductorii și întrerupătoarele sunt de asemenea exemple din această categorie. Termenul tehnic pentru această „indiferență” la curgere este de dispozitive nepolarizate. Invers, orice dispozitive ce funcționează diferit în funcție de direcția curentului se numesc dispozitive polarizate.

Există multe astfel de dispozitive polarizate folosite în circuitele electrice. Multe dintre ele sunt realizate din substanțe denumite semiconductoare. Ca și în cazul întrerupătoarelor, becurilor sau bateriilor, fiecare din aceste dispozitive este reprezentat grafic de un simbol unic. Simbolurile dispozitivelor polarizate conțin de obicei o săgeată, undeva în reprezentarea lor, pentru a desemna sensul preferat sau unic al direcției curentului. În acest caz, notația convențională și cea reală contează cu adevărat. Deoarece inginerii din trecut au adoptat notația convențională ca și standard, și pentru că inginerii sunt cei care au inventat dispozitivele electrice și simbolurile lor, săgețile folosite în aceste reprezentări, indică sensul convențional de deplasare al electronilor, și nu cel real. Ce vrem să spunem este că toate aceste dispozitive nu indică în simbolurile lor deplasarea reală a electronilor prin ele.



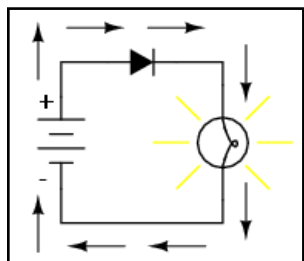
Probabil că cel mai bun exemplu de dispozitiv polarizat o reprezintă dioda. O diodă este o „valvă” electrică cu sens unic. Ideal, dioda oferă deplasare liberă electronilor într-o singură direcție (rezistență foarte mică), dar previne deplasarea electronilor în direcția opusă (rezistență infinită). Simbolul folosit este cel alăturat.



Introdusă într-un circuit cu o baterie și un bec, se comportă astfel.

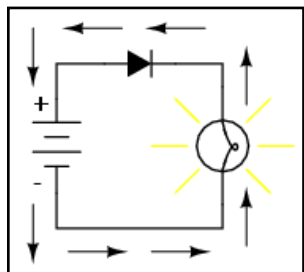
Când dioda este plasată în direcția curgerii curentului, becul se aprinde. Altfel, dioda blochează curgerea electronilor precum oricare altă întrerupere din circuit, iar becul nu va lumina.

### Notăția convențională



Dacă folosim notația convențională, săgeata diodei este foarte ușor de înțeles: triunghiul este așezat în direcția de curgere a curentului, de la pozitiv spre negativ.

### Notăția reală



Pe de altă parte, dacă folosim notația reală de deplasare a electronilor prin circuit, săgeata diodei pare așezată invers.

Din acest motiv simplu, mulți oameni tind să folosească notația convențională atunci când reprezintă direcția sarcinii electrice prin circuit. Dispozitivele semiconductoare precum diodele sunt mai ușor de înțeles astfel în cadrul unui circuit. Totuși, unii aleg să folosească notația reală pentru a nu trebui să-și reamintească lor însuși de fiecare dată faptul că electronii se deplasează de fapt în direcția opusă, atunci când această direcție de deplasare devine importantă dintr-un oarecare motiv.

## 02 - Legea lui Ohm

### 1. Legea lui Ohm

- Tensiunea se măsoară în volți și este simbolizată prin „E” sau „V”
- Curentul se măsoară în amperi și este simbolizat prin „I”
- Rezistența se măsoară în ohmi și este simbolizată prin „R”
- Legea lui Ohm:  $E = IR$ ;  $I = E / R$ ;  $R = E / I$

### Curentul

Un circuit electric este format atunci când este construit un drum prin care electronii se pot deplasa continuu. Această mișcare continuă de electroni prin firele unui circuit poartă numele curent, și adeseori este denumită „curgere”, la fel precum curgerea lichidului dintr-o țeavă.

### Tensiunea

Forța ce menține „curgerea” electronilor prin circuit poartă numele de tensiune. Tensiunea este o mărime specifică a energiei potențiale ce este tot timpul relativă între două puncte. Atunci când vorbim despre o anumită cantitate de tensiune prezentă într-un circuit, ne referim la cantitate de energie potențială existentă pentru deplasarea electronilor dintr-un punct al circuitului într-altul. Fără a face referința la două puncte distincte, termenul de „tensiune” nu are sens.

### Rezistența electrică

Electronii liberi tind să se deplaseze prin conductori cu o anumită rezistență sau opoziție la mișcare din partea acestora. Această opoziție poartă numele de rezistență. Cantitatea de curent disponibilă într-un circuit depinde de cantitatea de tensiune disponibilă pentru a împinge electronii, dar și de cantitatea de rezistență prezentă în circuit. Ca și în cazul tensiunii, rezistența este o cantitate ce se măsoară între două puncte distincte. Din acest motiv, se folosesc termenii de „între” sau „la bornele” când vorbim de tensiunea sau rezistență dintre două puncte ale unui circuit.

### Unitățile de măsură pentru tensiune, curent și rezistență

| Mărime     | Simbol  | Unitate de măsură | Prescurtare |
|------------|---------|-------------------|-------------|
| Curent     | I       | Amper             | A           |
| Tensiune   | E sau V | Volt              | V           |
| Rezistență | R       | Ohm               | $\Omega$    |

Pentru a putea vorbi concret despre valorile acestor mărimi într-un circuit, trebuie să putem descrie aceste cantități în același mod în care măsurăm temperatura, masa, distanță sau oricare altă mărime fizică. Pentru masă, putem folosi „kilogramul” sau „gramul”. Pentru temperatură, putem folosi grade Fahrenheit sau grade Celsius. În tabelul alăturat avem unitățile de măsură standard pentru curentul electric, tensiune electrică și rezistență:

„Simbolul” pentru fiecare mărime este litera din alfabet folosită pentru reprezentarea mărimii respective într-o ecuație algebrică. astfel de litere standard sunt folosite adesea în discipline precum fizica și ingineria, și sunt recunoscute la nivel internațional. „Unitatea de măsură” pentru fiecare cantitate reprezintă simbolul alfabetic folosit pentru a prescurta notația respectivei unități de măsură.

Fiecare unitate de măsură poartă numele unei personalități importante din domeniul electricității: amper-ul după Andre M. Ampere, volt-ul după Alessandro Volta, și ohm-ul după Georg Simon Ohm.

## Valoarea instantanee a curentului și a tensiunii

Toate aceste valori sunt exprimate cu litere de tipar, exceptând cazurile în care o mărime (în special tensiunea sau curentul) este exprimată în funcție de o durată scurtă de timp (numită valoarea instantanee). De exemplu, tensiunea unei baterii, fiind stabilă pe o perioadă lungă de timp, va fi simbolizată prin „E”, pe când tensiunea maximă atinsă de un fulger în momentul lovirii unei linii electrice va fi simbolizată cu litere mici, „e” (sau „v”) pentru a desemna această valoare ca existentă într-un anumit moment în timp. aceeași convenție se folosește și în cazul curentului, litera „i” fiind folosită pentru a reprezenta curentul instantaneu. Majoritatea mărimilor din curent continuu, fiind constante de-a lungul timpului, vor fi simbolizate cu litere mari (de tipar).

## Coulomb-ul și sarcina electrică

O mărime de bază în măsurătorile electrice, predată adesea la începutul cursurilor de electronică dar nefolosită mai târziu, este Coulomb-ul, mărimea sarcinii electrice proporțională cu numărul de electroni în stare de dezechilibru. O sarcină de un Coulomb este egală cu  $6,25 \times 10^{18}$  electroni. Simbolul mărimii sarcinii electrice este litera Q, iar unitatea de măsură, Coulombul, este abreviată prin C. Vedem prin urmare faptul că unitate de măsură pentru deplasarea electronilor, amperul, este egal cu o cantitate de electroni egală cu 1 Coulomb ce se deplasează printr-un punct al circuitului într-un interval de 1 secundă. Pe scurt, curentul este gradul de deplasare al sarcinii electrice printr-un conductor.

## Joule-ul și energia electrică

După cum am mai spus, tensiunea este mărimea energiei potențiale pe unitatea de sarcină disponibilă pentru motivarea electronilor dintr-un punct în altul. Înainte de a putea da o definiție exactă a „volt”-ului, trebuie să înțelegem cum putem măsura această cantitate pe care o numim „energie potențială”. Unitatea generală pentru orice tip de energie este Joule-ul, egal cu lucrul mecanic efectuat de o forță de 1 Newton pentru a deplasa un corp pe o distanță de 1 metru. Definit prin acești termeni științifici, 1 volt este egal cu raportul dintre o energie electrică potențială de 1 Joule și o sarcină electrică de 1 Coulomb. astfel, o baterie de 9 volți eliberează o energie de 9 Jouli pentru fiecare Coulomb de electroni ce se deplasează prin circuit.

## Definirea legii lui Ohm

Aceste simboluri și unități pentru mărimile electrice vor fi foarte importante atunci când vom începe să folosim relațiile dintre ele în cadrul circuitelor. Prima, și poate cea mai importantă, este relația dintre curent, tensiune și rezistență, legea lui Ohm, descoperită de Georg Simon Ohm și publicată în 1827 în lucrarea *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet* (de) (Analiza matematică a circuitului galvanic). Principala descoperire a lui Ohm a fost că, cantitatea de curent printr-un conductor metalic într-un circuit este direct proporțională cu tensiunea aplicată asupra sa, oricare ar fi temperatura, lucru exprimat printr-o ecuație simplă ce descrie relația dintre tensiune, curent și rezistență.

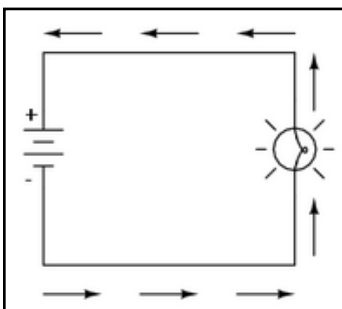
Această relație fundamentală este cunoscută sub numele de legea lui Ohm:

$$E = IR$$

În această expresie algebrică, tensiunea( $E$ ) este egală cu produsul dintre curent( $I$ ) și rezistența( $R$ ). Această formulă poate fi rescrisă sub următoarele forme, în funcție de  $I$ , sau de  $R$ :

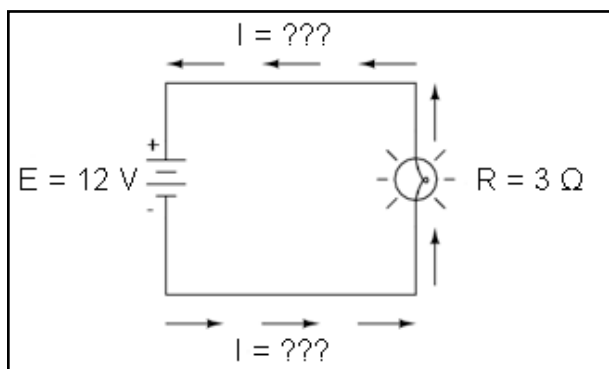
$$I = \frac{E}{R}; R = \frac{E}{I}$$

## Analiza circuitelor simple folosind legea lui Ohm



Să folosim acum aceste ecuații pentru a analiza circuitele simple.

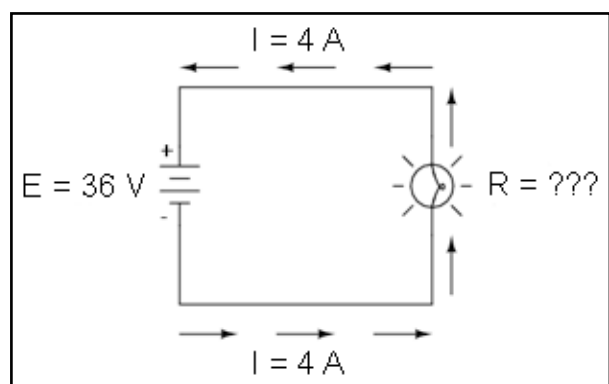
În circuitul alăturat, există doar o singură sursă de tensiune (bateria), și doar o singură rezistență (becul, neglijând rezistența datorată conductorilor). În această situație legea lui Ohm se poate aplica foarte ușor. În cazul în care cunoaștem două din cele trei variabile (tensiune, curent și rezistență) din acest circuit, putem folosi legea lui Ohm pentru determinarea celei de a treia.



În acest prim exemplu, vom calcula cantitatea de curent ( $I$ ) dintr-un circuit, atunci când cunoaștem valorile tensiunii ( $E$ ) și a rezistenței ( $R$ ).

Care este valoarea curentului ( $I$ ) din acest circuit?

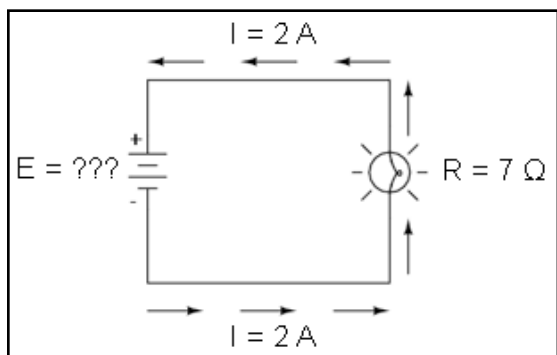
$$I = \frac{E}{R} = \frac{12\text{ V}}{3\ \Omega} = 4\text{ A}$$



În al doilea exemplu, vom calcula valoarea rezistenței ( $R$ ) într-un circuit, atunci când cunoaștem valorile tensiunii ( $E$ ) și a curentului ( $I$ ).

Care este valoarea rezistenței becului în acest caz?

$$R = \frac{E}{I} = \frac{36\text{ V}}{4\text{ A}} = 9\ \Omega$$



În ultimul exemplu, vom calcula valoarea tensiunii generate de baterie ( $E$ ), atunci când cunoaștem valoarea curentului ( $I$ ) și a rezistenței ( $R$ ).

Care este valoarea tensiunii generate de baterie?

$$E = IR = (2\text{ A})(7\ \Omega) = 14\text{ V}$$

## 2. Puterea în circuitele electrice

- Puterea este mărimea lucrului mecanic într-o anumită perioadă de timp.
- Puterea mecanică se măsoară de obicei în „cal putere”.
- Puterea electrică se măsoară aproape tot timpul în „watt” și poate fi calculată cu formula  $P=IE$ .
- Puterea electrică este un produs al tensiunii și al curentului, nu doar al unuia dintre acești termeni
- Calul putere și watt-ul sunt pur și simplu două unități de măsură ce descriu același principiu fizic, un cal putere fiind egal cu 745,7 de Watti

### Definiția puterii electrice

Pe lângă tensiune și curent, mai există o altă mărime a activității electronilor liberi din circuit: puterea. În primul rând trebuie să înțelegem ce este puterea, înainte de a o analiza într-un circuit.

Puterea este mărimea lucrului mecanic ce poate fi efectuat într-o anumită perioadă de timp. Puterea este de obicei definită ca și ridicarea unui corp (greutăți) atunci când asupra acestuia acționează forța gravitației. Cu cât corpul este mai greu și/sau cu cât este ridicat la o înălțime mai mare, cu atât a fost efectuat un lucru mecanic mai mare. Puterea măsoară cât de rapid a fost efectuată o cantitate standard de lucru mecanic.

În cazul automobilelor, puterea unui motor este dată în „cai putere”, termen inventat inițial de producătorii motoarelor cu aburi ca și mijloc de cuantificare a abilității mașinilor lor de a efectua lucru mecanic în relația cu cea mai utilizată sursă de putere din acele vremuri: calul. Puterea unui motor de automobil nu indică mărimea dealului ce-l poate urca sau ce greutate poate transporta, ci indică cât de repede poate urca un anumit deal sau trage o anumită greutate.

Puterea unui motor mecanic depinde atât de viteza motorului cât și de cuplul ce se regăsește pe arbore. Viteza arborelui unui motor se măsoară în rotații pe minut, sau r.p.m. Cuplul este cantitatea de forță de torsiune produsă de motor și se măsoară în Newton-metru (Nm). Dar nici viteza nici cuplul nu măsoară puterea unui motor.

Un motor diesel de tractor de 100 de cai putere, are o viteză de rotație mică, dar un cuplu mare. Un motor de motocicletă de 100 de cai putere, are o viteză de rotație foarte mare, dar un cuplu mic. Ambele produc 100 de cai putere, dar la viteze și cupluri diferite. Ecuația pentru calculul calului putere (CP) este simplă:

$$CP = \frac{2\pi ST}{33.000}$$

unde,

S = viteza arborelui în r.p.m.

T = cuplul arborelui în Nm

$\pi = 3.14$  (constanta pi)

Putem observa că există doar două variabile în partea dreaptă a ecuației, S și T. Toți ceilalți termeni sunt constanți (nu își modifică valoarea în funcție de timp sau de situație). CP (cal putere) variază doar atunci când variază fie viteza fie cuplul și nimic altceva. Putem rescrie ecuația pentru a arăta această relație:

$$CP \propto ST$$

unde,

$\propto$  înseamnă direct proporțional (adesea prescurtat d.p.)

S și T au semnificațiile de mai sus

Deoarece unitatea de măsură „cal putere” nu coincide exact cu viteza în rotații pe minut înmulțită cu, cuplul în Newton-metru, nu putem spune că acesta este egal cu ST. Cu toate acestea, „calul putere” este proporțional cu ST. Valoarea calului putere se va modifica în aceeași proporție cu produsul ST (atunci când acesta variază).

## Puterea în circuitele electrice

Pentru circuitele electrice, puterea este o funcție (depinde) de curent și tensiune. Nu este surprinzător faptul că această relație seamănă izbitor cu formula „proporțională” a calului putere de mai sus:

$$P = IE$$

Totuși, în acest caz, puterea (P) este exact egală curentului (I) înmulțit cu tensiunea (E), și nu este doar proporțională cu acest produs (IE). Când folosim această formulă, unitatea de măsură pentru putere este watt-ul, prescurtat prin litera W.

Trebuie înțeles faptul că nici tensiunea nici curentul nu înseamnă putere ele însele. Puterea este combinația celor două într-un circuit. Rețineți că tensiunea este lucrul specific (sau energia potențială) pe unitate de sarcină, în timp ce curentul este rata de deplasare a sarcinilor electrice printr-un conductor. Tensiunea (lucrul specific) este o mărime analoagă lucrului efectuat în ridicarea unei greutăți atunci când asupra acesteia acționează forța gravitației. Curentul (rata) este analoagă vitezei de ridicare a greutății respective. Împreună ca și produs (înmulțire), tensiunea (lucru) și curentul (rata) constituie puterea.

La fel ca în cazul unui motor diesel de tractor și un motor de motocicletă, un circuit cu o tensiune mare și curent scăzut, poate disipa aceeași putere precum un circuit cu o tensiune scăzută și curent mare. Nici valoarea tensiunii și nici cea a curentului, nu pot să indice singure cantitatea de putere prezentă într-un circuit.

Într-un circuit deschis puterea disipată este zero, indiferent de valoarea tensiunii existente. Din moment ce  $P = IE$  și  $I = 0$ , și înmulțirea cu zero are ca și rezultat tot timpul zero, înseamnă că și puterea disipată în circuit trebuie să fie egală cu zero. Dacă am fi să construim un scurt-circuit cu ajutorul unei bucle din material supraconductor (rezistență zero), am putea obține o situație în care tensiunea de-a lungul buclei să fie egală cu zero, și în acest caz puterea ar fi de asemenea zero, folosind logica de mai sus.



## Relația dintre Watt și cal putere (CP)

Fie că măsurăm puterea în „cal putere” sau în „watt”, vorbim despre același lucru: ce cantitate de lucru poate fi efectuat într-o anumită perioadă de timp. Cele două unități nu sunt egale din punct de vedere numeric, dar exprimă același lucru. Relația dintre cele două puteri este:

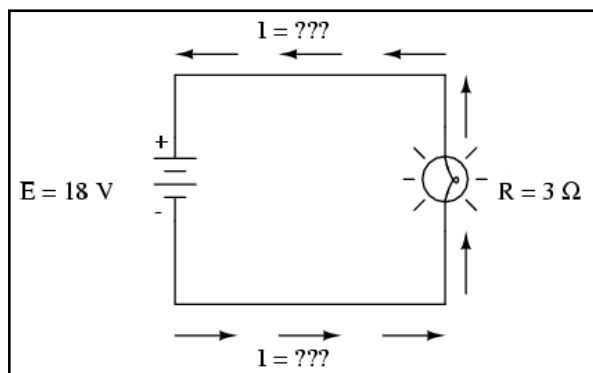
$$1 \text{ CP} = 745,7 \text{ W}$$

Prin urmare, cele două motoare de 100 de cai putere de mai sus pot fi de asemenea notate cu „74570” de Watti, sau „74,57” kW.

## 3. Calcularea puterii electrice

- Puterea se măsoară în Watti, simbolizat prin litera „W”.
- Legea lui Joule (ecuațiile de putere):  $P = I^2 R$  ;  $P = IE$  ;  $P = E^2 / R$

### Exemplu



Am văzut formula pentru determinarea puterii într-un circuit electric: prin înmulțirea curentului (în amperi) cu tensiunea (în volți) ajungem la „watti”. Să aplicăm această formulă unui circuit.

### Calcularea puterii cunoscând tensiunea și curentul

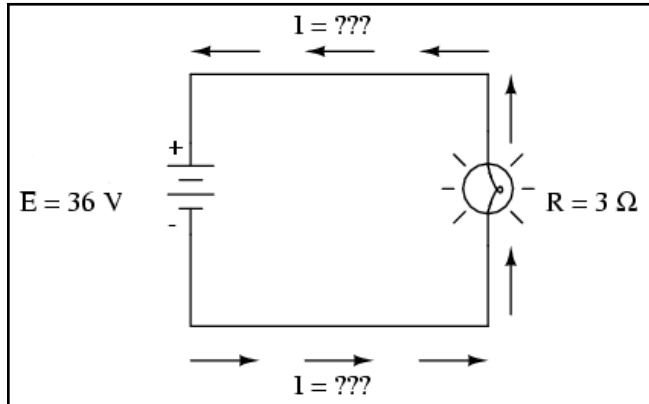
În circuitul de mai sus avem o baterie de 18 V, și un bec cu o rezistență de  $3 \Omega$ . Folosind legea lui Ohm pentru determinarea curentului, obținem:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{18 \text{ V}}{3 \Omega} = 6 \text{ A}$$

După ce am aflat valoarea curentului, putem lua această valoare și să o înmulțim cu cea a tensiunii pentru a determina puterea:

$$P = IE = (6 \text{ A})(18 \text{ V}) = 108 \text{ W}$$

Prin urmare, becul degajă o putere de 108 W, atât sub formă de lumină, cât și sub formă de căldură.



Să încercăm acum să luăm același circuit, dar să mărim tensiunea la bornele bateriei (schimbăm bateria) și să vedem ce sa întâmplă. Intuiția ne spune că va crește curentul prin circuit pe măsură ce tensiunea bateriei crește iar rezistența becului rămâne aceeași. Și puterea va crește de asemenea.

Acum, tensiunea bateriei (tensiunea electromotoare) este de 36 V în loc de 18 V cât era înainte. Becul are o valoare a rezistenței tot de 3 Ω. Curentul este acum:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{36 \text{ V}}{3 \Omega} = 12 \text{ A}$$

Trebuia să ne așteptăm la acest lucru: dacă  $I = E / R$ , și dublăm E-ul pe când R-ul rămâne același, curentul ar trebui să se dubleze. Într-adevăr, asta s-a și întâmplat; acum avem 12 A în loc de 6 A câți aveam înainte. Să calculăm acum și puterea:

$$P = IE = (12 \text{ A})(36 \text{ V}) = 432 \text{ W}$$

Observăm că puterea a crescut precum ne-am fi așteptat, dar a crescut puțin mai mult decât curentul. De ce? Pentru că puterea este funcție de produsul dintre tensiune și curent, iar în acest caz, ambele valori, și curentul și tensiunea, s-au dublat față de valorile precedente, astfel că puterea a crescut cu un factor de  $2 \times 2$ , adică 4. Puteți verifica acest lucru împărțind 432 la 108 și observând că proporția dintre cele două valori este într-adevăr 4.

Folosind reguli algebrice pentru a manipula formulele, putem lua formula originală a puterii și să o modificăm pentru cazurile în care nu cunoaștem și tensiunea și curentul:

### Calcularea puterii cunoscând tensiunea și rezistența

În cazul în care cunoaștem doar tensiunea (E) și rezistența (R):

$$\text{dacă } I = \frac{E}{R} \text{ și } P = IE \text{ atunci}$$

$$P = E \left( \frac{E}{R} \right) \text{ sau } P = \frac{E^2}{R}$$

## Calcularea puterii cunoscând curentul și rezistența

În cazul în care cunoaștem doar curentul ( $I$ ) și rezistența ( $R$ ):

$$\text{dacă } E = IR \text{ și } P = IE \text{ atunci}$$

$$P = I(IR) \text{ sau } P = I^2 R$$

### Notă istorică

James Prescott Joule este cel care a descoperit relația matematică dintre disiparea puterii și curentul printr-o rezistență, nu Georg Simon Ohm. Această descoperire, publicată în 1843 sub forma ultimei ecuații ( $P = I^2 R$ ), este cunoscută ca „Legea lui Joule”. Datorită faptului că aceste ecuații ale puterii sunt strâns legate de ecuațiile legii lui Ohm pentru tensiune, curent și rezistență ( $E=IR$ ;  $I=E/R$ ;  $R=E/I$ ) sunt adesea acreditate lui Ohm.

## 4. Rezistorul

- Dispozitivele numite rezistori sunt construite pentru a asigura cantități precise de rezistență electrică într-un circuit. Rezistorii sunt clasificați atât în funcție de rezistența lor (în ohmi) cât și de capacitatea acestora de a disipa căldura (Watti).
- Rezistența unui rezistor nu poate fi determinată prin mărimea fizică a acestuia, cu toate că valorile aproximative ale puterii pot fi determinate. Cu cât este mai mare un rezistor, cu atât poate disipa mai multă putere sub formă de căldură fără a se distruge.
- Orice dispozitiv electric ce transformă energia într-o manieră practică poartă numele de *sarcină*. De multe ori, într-un circuit electric, se folosește simbolul rezistenței pentru a desemna și alt fel de dispozitive non-specifice, nu neapărat un rezistor propriu-zis.

### Rezistența și rezistorul

Este foarte ușor să confundăm termenii de rezistență și rezistor. Rezistența reprezintă opoziția față de curentul electric, iar rezistorul este un dispozitiv fizic utilizat în circuitele electrice. Este adevărat, rezistorii posedă rezistență electrică, dar trebuie să înțelegem că cei doi termeni nu sunt echivalenți!

### Scopul rezistorilor

Datorită relației dintre tensiune, curent și rezistență în oricare circuit, putem controla oricare variabilă prin simplul control al celorlalte două. Probabil că cea mai ușor de controlat variabilă dintr-un circuit este rezistența.

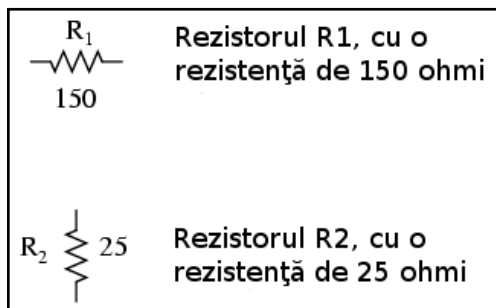
Acest lucru poate fi realizat prin schimbarea materialului, mărimii sau formei componentelor conductive (țineți minte cum filamentul metalic subțire al unui bec crează o rezistență electrică mai mare decât un fir gros?)

Componentele speciale numite rezistori sunt confecționate cu singurul scop de a crea o cantitate precisă de rezistență electrică la introducerea lor în circuit. Sunt construite din fir metalic sau de carbon în general, și realizate astfel încât să mențină o rezistență stabilă într-o gamă largă de condiții externe. Rezistorii nu produc lumină precum este cazul becurilor, dar produc căldură atunci când degajă putere electrică într-un circuit închis în stare de funcționare. În mod normal, totuși, scopul unui rezistor nu este producerea căldurii utile, ci pur și simplu asigurarea unei rezistențe electrice precise în circuit.

## Simbolul rezistorului



Simbolul rezistorului pe care îl vom folosi în circuite este cel în formă de zig-zag.

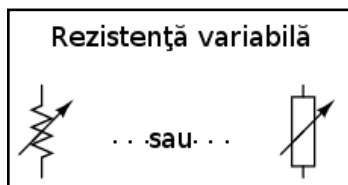


Valorile rezistențelor în ohmi sunt de obicei reprezentate printr-un număr adiacent, iar dacă într-un singur circuit sunt prezenți mai mulți rezistori, fiecare va fi notat cu  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , etc. După cum se poate vedea, simbolurile pentru rezistor pot fi prezentate fie orizontal, fie vertical.



Dacă ne luăm după aparența lor fizică, un simbol alternativ pentru rezistori este cel alăturat (simbolul european).

## Rezistoare cu rezistență variabilă



Rezistoarele pot de asemenea să fie cu rezistență variabilă, nu neapărat fixă. Această proprietate o putem întâlni în cadrul unui rezistor construit chiar pentru acest scop, sau o putem întâlni în cadrul unui component a cărui rezistență este instabilă în timp.

În general, ori de câte ori vedeți simbolul unui component reprezentat cu o săgeată diagonală prin el, acel component are o valoare variabilă și nu statică (fixă). Acest simbol este o convenție electronică standard.

## Disiparea energiei

Deoarece rezistori produc energie sub formă de căldură la trecerea curentului prin ei datorită frecării, aceștia pot fi împărțiți în funcție de cantitatea de căldură ce o pot susține fără a se supra-încălzi și distruge. Această

categorie este specificată în „Watti”. Majoritatea rezistorilor din aparatele electronice portabile sunt în categoria de 1/4 (0.25) watt sau mai puțin. Puterea unui rezistor este aproximativ proporțională cu mărimea sa: cu cât rezistorul este mai mare, cu atât mai mare este puterea sa. De menționat și faptul că rezistența (în ohmi) nu are deloc legătură cu mărimea!

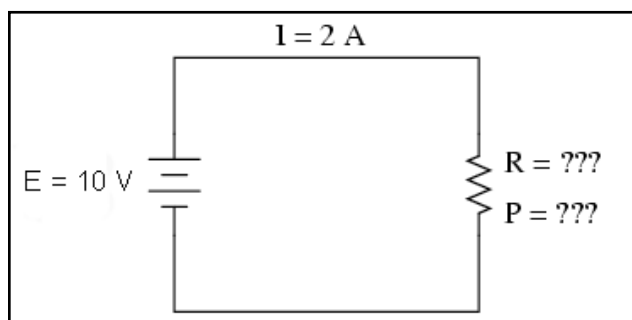
## Rezistorii sunt elemente extrem de importante într-un circuit

Chiar dacă apariția rezistorilor într-un circuit pare pe moment a nu avea niciun sens, aceștia sunt niște dispozitive cu un rol extrem de folositor în cadrul circuitelor (divizoare de tensiune și divizoare de curent, de exemplu). Pentru că sunt atât de simplii și de des utilizați în domeniul electricității și a electronicii, vom dedica o bună bucată de vreme analizei circuitelor compuse doar din rezistențe și baterii.

## Sarcina electrică

În diagramele schematice, simbolul rezistorilor este adesea folosit pentru a indica un dispozitiv general dintr-un circuit electric ce transformă energia electrică primită în ceva folositor (bec, de exemplu). Orice astfel de dispozitiv non-specific într-un circuit electric poartă de obicei denumirea de sarcină electrică, sau scurt, sarcină.

## Analiza unui circuit simplu



Pentru a rezuma ceea ce am spus până acum, vom analiza circuitul alăturat, încercând să determinăm tot ceea ce putem cu ajutorul informațiilor disponibile.

Tot ceea ce cunoaștem în acest circuit este tensiunea la bornele bateriei (10 volți) și curentul prin circuit (2 amperi). Nu cunoaștem rezistența rezistorului în ohmi sau puterea disipată de acesta în Watti. Folosindu-ne însă de ecuațiile lui Ohm, putem găsi două ecuații ce ne pot oferi răspunsuri folosind doar cantitățile cunoscute, tensiunea, respectiv curentul:

$$R = \frac{E}{I} \text{ și } P = IE$$

Introducând cantitățile cunoscute de tensiune (E) și curent (I) în aceste două ecuații, putem determina rezistența circuitului (R), și puterea disipată (P):

$$R = \frac{10 \text{ V}}{2 \text{ A}} = 5 \Omega$$

$$P = (2 \text{ A})(10 \text{ V}) = 20 \text{ W}$$

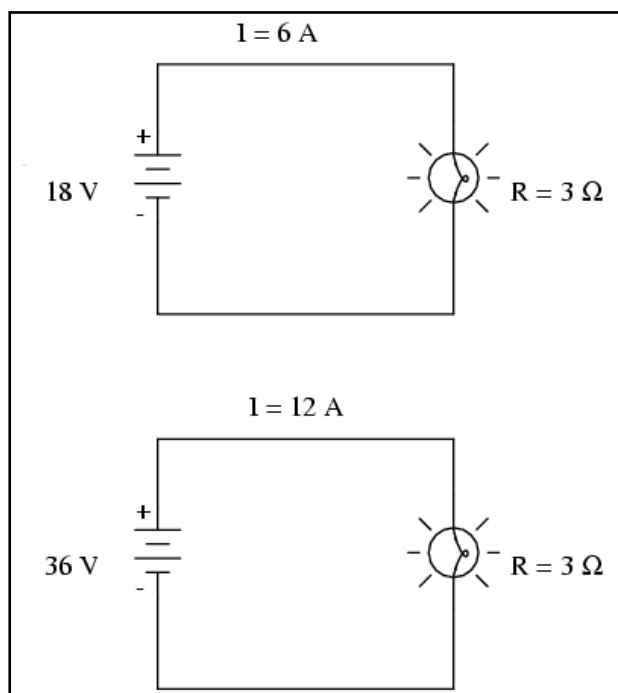
Pentru circuitul de față, în care avem 10 volți și 2 amperi, rezistența rezistorului trebuie să fie de 5 Ω. Dacă ar fi să proiectăm un circuit pentru a opera la aceste valori, ar trebui să folosim un rezistor cu o putere de minim 20 de Watti; în caz contrar, s-ar distruge din cauza supra-încălzirii.

## 5. Conducția neliniară

- Marea majoritatea a materialelor posedă o rezistență stabilă în timp sub diferite condiții de funcționare, dar există și materiale care fac excepție de la această regulă
- Orice funcție care poate fi descrisă pe un grafic printr-o linie dreaptă se numește funcție *liniară*. În cadrul circuitelor cu rezistențe constante, graficul curent-tensiune este liniar ( $I = E / R$ ).
- În circuitele în care rezistența variază odată cu variația tensiunii sau a curentului, graficul curent-tensiune va fi *neliniar*
- Un *varistor* este un component ce-și modifică rezistența cu valoarea tensiunii aplicate la terminalele sale. Cu o tensiunea mică, rezistența sa este mare. Pentru o anumită tensiune de „străpungere”, rezistența sa scade dramatic.
- Rezistență negativă este porțiunea în care curentul printr-un component scade odată cu creșterea tensiunii la bornele sale.

### Rezistența ideală

Legea lui Ohm este un instrument simplu și puternic pentru analiza circuitelor electrice, dar are și unele limitări pe care trebuie să le înțelegem dacă vrem să o aplicăm cu succes circuitelor reale. Pentru majoritatea conductorilor, rezistența este o proprietate aproximativ constantă, neafectată de tensiune și curent. Din acest motiv, considerăm rezistența majorității componentelor dintr-un circuit ca fiind constantă, astfel că tensiunea și curentul sunt în relație directă unul cu celălalt.



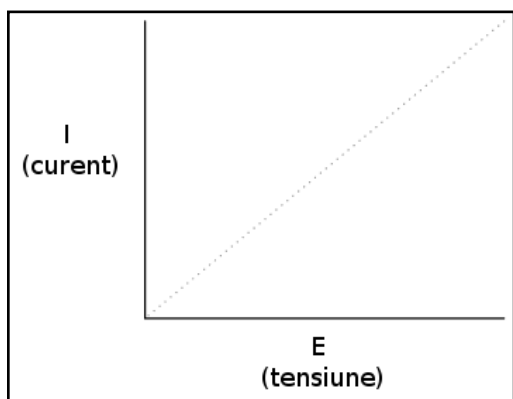
De exemplu, în cazul precedent cu becul de  $3 \Omega$ , am calculat curentul prin circuit împărțind tensiunea la rezistență ( $I=E/R$ ). Cu o baterie de 18 volți, curentul prin circuit a fost de 6 amperi. Dublând tensiunea bateriei la 36 de volți, am dublat și curentul la 12 amperi. Toate acest lucruri sunt evidente, atâta timp cât rezistența becului la deplasarea electronilor rămâne constantă la  $3 \Omega$ .

## Rezistența reală

Totuși, realitatea nu este atât de simplă. Unul din fenomenele prezentate într-un capitol viitor este cel al variației rezistenței odată cu variația temperaturii. Într-un bec incandescent, rezistența filamentului va crește dramatic atunci când aceasta își modifică temperatura de la cea a camerei la temperatura în stare de funcționare. Dacă ar fi să mărim tensiunea furnizată într-un circuit real simplu, creșterea rezultată a curentului electric ar cauza creșterea temperaturii filamentul becului, creștere ce duce la creșterea rezistenței acestuia, fapt ce face posibilă o nouă creștere a curentului prin circuit doar prin creșterea tensiunii furnizate de baterie. Prin urmare, tensiunea și curentul nu se supun ecuației simple  $I=E/R$ , deoarece rezistența filamentului unui bec nu rămâne stabilă odată cu modificarea curenților.

Fenomenul variației rezistenței cu temperatura este caracteristic majorității metalelor din care sunt confecționate firele conductoare. Pentru majoritatea aplicațiilor însă, aceste variații ale rezistenței sunt suficient de mici, astfel încât ele sunt neglijabile și nu sunt luate în considerare. În cazul filamentelor becurilor, variația rezistenței este destul de mare.

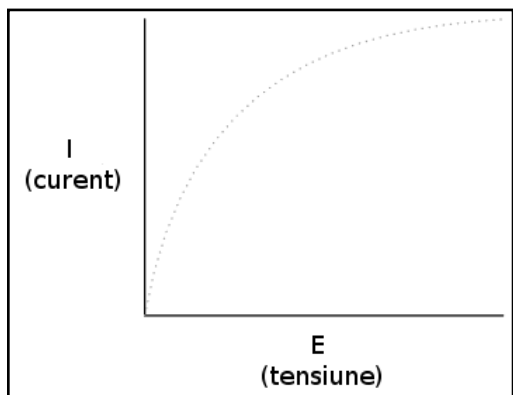
## Variația liniară a curentului cu tensiunea



Acesta este doar un exemplu din domeniul ne-liniarității circuitelor electrice. Dar nu este nicidecum singurul. În matematică, o funcție „liniară” este o funcție reprezentată grafic printr-o linie dreaptă. Versiunea simplificată a circuitului simplu cu bec, cu o rezistență constantă a filamentului de  $3\ \Omega$ , generează un grafic asemănător celui alăturat.

Linia dreaptă de pe grafic desemnează faptul că rezistența este stabilă pentru o varietate de tensiuni și curenți din circuit. Acest lucru se întâmplă însă doar într-un caz ideal. Fiindcă rezistorii sunt construiți astfel încât rezistența lor să fie cât mai stabilă, aceștia se comportă în general conform graficului de mai sus. Matematic, acest comportament se numește liniar.

### Variația neliniară a curentului cu tensiunea



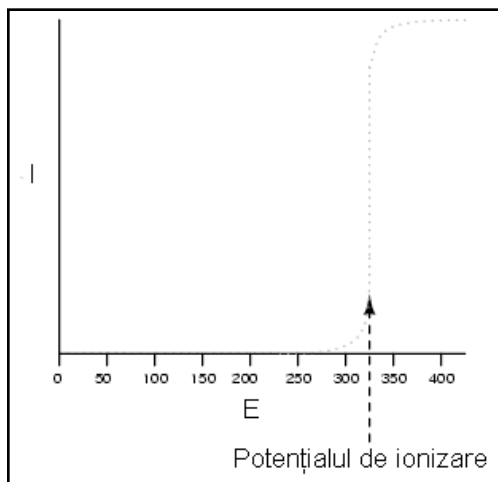
Un exemplu mai realist al unui circuit electric simplu cu bec, atunci când tensiunea la bornele bateriei variază într-un domeniu larg, este reprezentat prin graficul alăturat.

Acest grafic nu mai este o linie dreaptă. Acesta crește brusc în partea stângă, odată cu creșterea tensiunii de la zero la o valoare scăzută. Pe măsură ce tensiunea crește, vedem o creștere din ce în ce mai mică a curentului; astfel că circuitul are nevoie de o creștere din ce în ce mai mare a tensiunii pentru a păstra o creștere egală și constantă a curentului.

Dacă încercăm să aplicăm legea lui Ohm pentru determinarea rezistenței acestui circuit folosind valorile curentului și ale tensiunii din graficul de mai sus, ajungem la mai multe seturi de valori diferite. Putem spune că rezistența este neliniară: crește cu creșterea tensiunii și a curentului. Neliniaritatea este cauzată de efectul temperaturii ridicate a metalului ce compune filamentul becului.

### Ionizarea gazelor și ne-liniaritatea graficului curent-tensiune





Un alt exemplu de ne-liniaritate a curentului este prin gaze precum aerul. La temperaturi și presiuni normale, aerul este un dielectric (izolator) eficient. Totuși, dacă tensiunea dintre doi conductori separați printr-o porțiune de aer crește suficient de mult, moleculele de aer se vor „ioniza”, iar electronii acestora se vor deplasa sub influența forței generate de tensiunea ridicată dintre fire.

Odată ionizate, aerul (și alte gaze) devin bune conductoare de electricitate, permițând curgerea electronilor. Dacă realizăm graficul curent-tensiune precum în circuitul precedent, putem observa foarte clar efectul neliniar al ionizării.

Graficul de mai sus este aproximat pentru o grosime a dielectricului (aer) de 1cm. O eventuală mărire a distanței dintre cei doi conductori ar duce la un potențial de ionizare mai ridicat, dar graficul curbei  $I/E$  ar rămâne similar: practic, nu există curent prin dielectric până în momentul atingerii potențialului de ionizare, dar conducția curentului este foarte bună după acest punct.

Acesta este și motivul pentru care fulgerele există sub forma de șoc de scurtă durată și sub o formă continuă de curgere a electronilor. Tensiunea formată între pământ și nori (sau între diferiți nori) trebuie să crească până la o valoare ce depășește potențialul de ionizare al golului de aer dintre cele două puncte. După atingerea acestui punct, aerul se ionizează suficient de mult pentru a permite curgerea substanțială a electronilor, iar curentul produs va exista prin aerul ionizat până în momentul în care sarcina electrică statică dintre cele două puncte se consumă.

După scăderea sarcinii electrice până în punctul în care tensiunea scade sub un anumit punct de ionizare, aerul dintre cele două puncte (nor și pământ) se de-ionizează și devine din nou un foarte bun dielectric (rezistență ridicată).

## Fenomenul de străpungere dielectrică

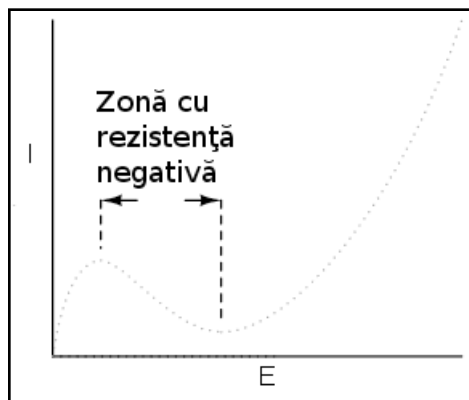
Multe materiale dielectrice solide posedă proprietăți rezistive similare: rezistență extrem de mare la trecerea curentului electric sub o anumită tensiune critică, iar apoi, o rezistență mult diminuată la depășirea acelei valori a tensiunii. Odată ce un material dielectric a trecut prin faza de străpungere (termenul folosit pentru acest fenomen), de cele mai multe ori acesta nu se reîntoarce la faza dielectrică precedentă așa cum o fac majoritatea gazelor. Este posibil ca după străpungere, materialul să se comporte asemenea unui dielectric la tensiuni scăzute, dar valoarea pragului tensiunii de ionizare este mult sub valoarea inițială, ceea ce duce la străpungeri mult mai ușoare pe viitor. Acesta este un mod de defectare des întâlnit în circuitele de tensiune înaltă: distrugerea izolației prin străpungere.

Asemenea defecte pot fi detectate folosind aparate speciale de măsură a rezistenței utilizând tensiuni ridicate (peste 1000 V).

## Varistorul

Există componente de circuit special concepute pentru proprietățile lor rezistive neliniare; unul dintre acestea este varistorul. Confectionat de obicei din oxid de zinc sau carbură de siliciu, aceste dispozitive mențin o rezistență ridicată la bornele lor până în momentul atingerii unei tensiuni de „străpungere” (echivalentă cu „potențialul de ionizare” a golului de aer), moment în care rezistența lor scade dramatic. Dar, față de străpungerea unui izolator, străpungerea unui varistor este repetabilă: adică, design-ul acestuia este de așa natură încât permite străpungeri repetate fără apariția distrugerii fizice a componentului.

## Rezistența negativă



Alte componente electrice posedă curbe de variație curent/tensiune și mai ciudate. Unele dispozitive suferă o descreștere a rezistenței odată cu creșterea tensiunii. Datorită faptului că panta curent/tensiune în acest caz este negativă, fenomenul este cunoscut sub denumirea de rezistență negativă.

## Observație

Pentru simplitatea expunerii totuși, vom considera rezistențele din circuit stabile în timp oricare ar fi condițiile de funcționare, exceptând faptul în care vom preciza altcumva.

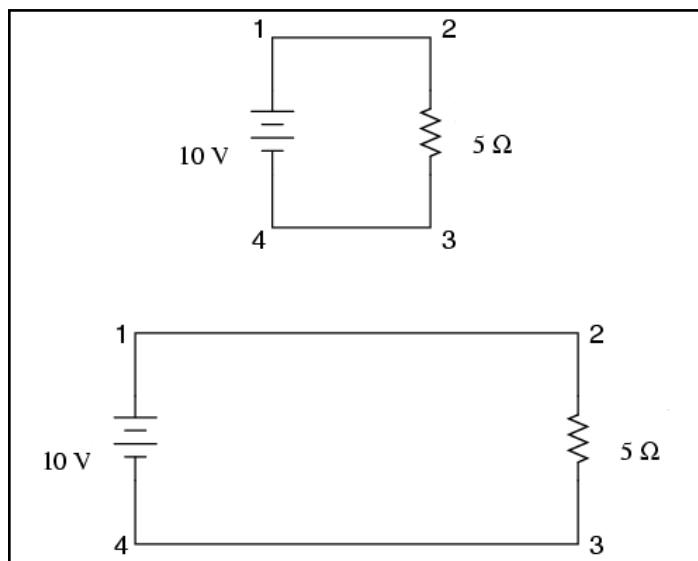
## 6. Conexiunea unui circuit

- Considerăm firele conductoare dintr-un circuit ca având o rezistență zero.
- Firele dintr-un circuit pot fi lungite sau scurtate fără a afecta funcția circuitului - ceea ce este important este ca toate componentele să fie legate unul de celălalt (circuit închis) în aceeași ordine.
- Într-un circuit, punctele direct conectate între ele printr-un fir cu rezistență zero, sunt considerate *comune din punct de vedere electric*

- Între punctele comune, cu rezistență zero între ele, nu va exista cădere de tensiune (0 V), indiferent de valoarea curentului (caz ideal)
- Valorile tensiunii sau curentului între seturi de puncte comune vor fi egale

## Lungimea și modul de așezare a conductorilor în circuit

Până în acest moment am analizat circuite cu o singură baterie și o singură rezistență fără a lua în calcul firele conductoare dintre componente, atâta timp cât am format un circuit complet. Contează lungimea firelor sau „forma” circuitului pentru calculele noastre? Să considerăm câteva configurații de circuite:



Atunci când conectăm două puncte dintr-un circuit printr-un fir conductor, presupunem de obicei că acele fire prezintă o rezistență neglijabilă. Prin urmare, ele nu contribuie într-o măsură hotărâtoare la rezistență totală a circuitului, iar singura rezistență pe care o luăm în calcul este rezistență componentelor din circuit. În circuitele de mai sus, singura rezistență este rezistență de  $5\Omega$  a rezistoarelor, și o vom considera doar pe aceasta în calculele noastre.

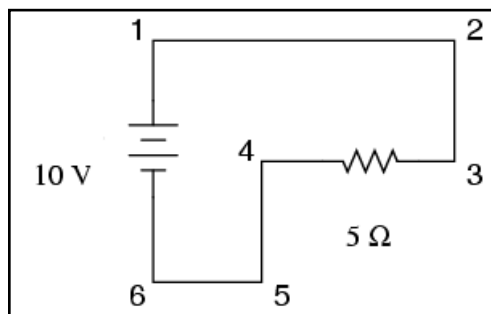
În realitate, firele metalice au o anumită rezistență (precum și sursele de tensiune!), dar acele rezistențe sunt în general mult mai mici decât rezistența prezentă în celelalte componente din circuit încât pot fi neglijate. Excepție fac firele din circuitele de putere (curenți mari), unde chiar și o rezistență foarte mică poate genera căderi de tensiune importante.

## Punctul electric comun

Dacă rezistență firelor conductoare este mică spre zero, putem considera punctele conectate din circuit ca fiind comune din punct de vedere electric. Punctele 1 și 2 din circuitele de mai sus pot exista fizic foarte aproape unul de celălalt sau la o distanță destul de mare pentru că, din punct de vedere al măsurătorilor tensiunii și rezistenței, acest lucru nu contează. Același lucru este valabil și pentru punctele 3 și 4. Este ca și cum capetele rezistorilor ar fi atașate direct la terminalele bateriei din punct de vedere al legii lui Ohm. Este bine de știut acest lucru, pentru că asta înseamnă că putem retrasa circuitul, lungind sau scurtând firele după bunul nostru plac, fără a

afecta funcționarea circuitului în mod decisiv. Tot ceea ce contează este legarea componentelor unul de celălalt în aceeași secvență.

Rezultă și faptul că valorile tensiunii între seturi de puncte „comune” vor fi identice. Adică, tensiunea între punctele 1 și 4 (la bornele bateriei), este aceeași cu tensiunea dintre punctele 2 și 3 (la bornele rezistorului) în circuitul de mai sus.



Să analizăm circuitul alăturat și să vedem care sunt punctele comune.

Aici avem doar două componente fără a lua în considerare și firele: bateria și rezistorul. Cu toate că firele au un drum mai încălțit, ele formează un circuit și există câteva puncte comune din punct de vedere electric în acest circuit, și anume: punctele 1, 2 și 3 pentru că acestea sunt toate conectate între ele printr-un singur fir (fără alt component electric între ele). Același lucru este valabil și pentru punctele 4, 5 și 6.

Tensiunea între punctele 1 și 6 este de 10 volți, direct de la baterie. Dar, pentru că punctele 5 și 4 sunt comune cu 6, iar punctele 2 și 3 sunt comune cu 1, între aceste două grupe de puncte se regăsesc de asemenea 10 volți:

Între punctele 1 și 4 = 10 volți  
Între punctele 2 și 4 = 10 volți  
Între punctele 3 și 4 = 10 volți (direct la bornele rezistorului)  
Între punctele 1 și 5 = 10 volți  
Între punctele 2 și 5 = 10 volți  
Între punctele 3 și 5 = 10 volți  
Între punctele 1 și 6 = 10 volți (direct la bornele bateriei)  
Între punctele 2 și 6 = 10 volți  
Între punctele 3 și 6 = 10 volți

Din moment ce aceste puncte sunt conectate împreună prin fire cu rezistență zero (ideală), căderea de tensiune dintre aceste puncte este zero, indiferent de valoarea curentului prin aceste puncte/fire. Dacă am fi să citim tensiunea între puncte comune, aceasta ar trebui să fie practic zero.

Punctele 1, 2, și 3 sunt comune din punct de vedere electric

Între punctele 1 și 2 = 0 volți  
Între punctele 2 și 3 = 0 volți  
Între punctele 1 și 3 = 0 volți

Punctele 4, 5, și 6 sunt comune din punct de vedere electric

Între punctele 4 și 5 = 0 volți

Între punctele 5 și 6 = 0 volți

Între punctele 4 și 6 = 0 volți

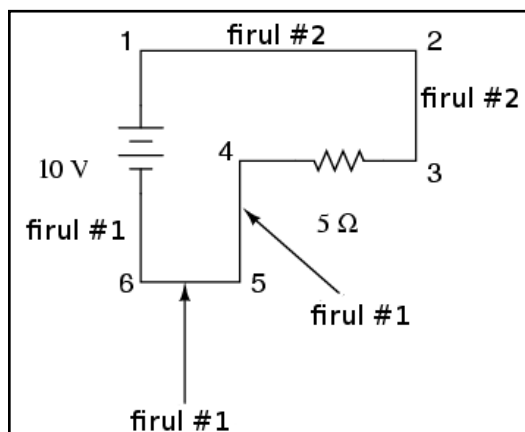
Acest lucru are sens și din punct de vedere matematic. Cu o baterie de 10 volți și un rezistor de 5 curentul va fi de 2 amperi. Rezistența firelor fiind zero, căderea de tensiune pe întregul circuit poate fi determinată cu ajutorul legii lui Ohm, astfel:

$$E = IR$$

$$E = (2 \text{ A})(0 \Omega)$$

$$E = 0 \text{ V}$$

Pentru că punctele comune din punct de vedere electric dintr-un circuit au aceeași tensiune și rezistență relativă, firele ce conectează aceste puncte sunt de obicei desemnate printr-o aceeași notație. Asta nu înseamnă că punctele terminalelor au aceeași denumire, ci doar firele de legătură. De exemplu:

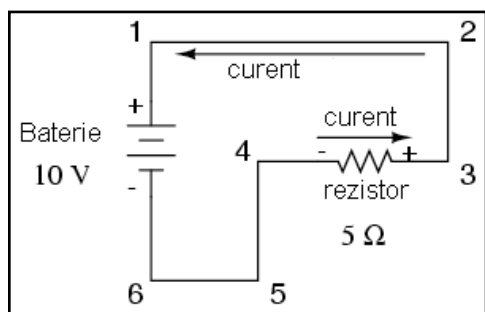


Punctele 1, 2 și 3 sunt comune, prin urmare firul ce conectează punctele 1 și 2 este notat asemenea (**firul #2**) firului ce conectează punctele 2 și 3 (**firul #2**). Într-un circuit real, firul dintre punctele 1 și 2 poate avea culori și mărimi diferite față de firul ce conectează punctele 2 și 3, dar notația lor ar trebui să fie asemănătoare. Același lucru este valabil și pentru firele ce conectează punctele 6, 5 și 4.

## 7. Polaritatea căderilor de tensiune

- Polaritatea căderii de tensiune la bornele oricărui component rezistiv este determinată de direcția de deplasare a electronilor prin acesta, astfel: negativă pentru ieșire, pozitivă pentru intrare.

## Direcția curentului într-un circuit



Putem determina direcția deplasării electronilor într-un circuit, urmărind drumul ce duce de la terminalul negativ (-) la cel pozitiv (+) al bateriei, singura sursă de tensiune din circuit. Observăm că electronii se deplasează contrar acelor de ceasornic, din punctul 6 spre 5, 4, 3, 2, 1 și înapoi la 6.

În momentul în care curentul întâmpină rezistența de  $5\Omega$ , se va înregistra o cădere de tensiune la capetele acesteia. Polaritatea acestei căderi de tensiune este minus (-) la punctul 4 și plus (+) la punctul 3 (țineți minte, tensiunea este o mărime relativă între două puncte). Prin urmare, marcăm polaritatea căderii de tensiune la bornele rezistenței cu aceste simboluri, folosind sensul real de deplasare al electronilor prin circuit, ceea ce înseamnă că borna pe unde curentul intră în rezistor este cea negativă, iar borna (capătul) pe unde curentul iese din rezistor este cea pozitivă.

Între punctele 1 (+) și 4 (-) = 10 volți

Între punctele 2 (+) și 4 (-) = 10 volți

Între punctele 3 (+) și 4 (-) = 10 volți

Între punctele 1 (+) și 5 (-) = 10 volți

Între punctele 2 (+) și 5 (-) = 10 volți

Între punctele 3 (+) și 5 (-) = 10 volți

Între punctele 1 (+) și 6 (-) = 10 volți

Între punctele 2 (+) și 6 (-) = 10 volți

Între punctele 3 (+) și 6 (-) = 10 volți

Chiar dacă pare puțin neinspirată realizarea unui tabel cuprinzând căderile de tensiune în întreg circuitul, acesta este un concept foarte important de ținut minte, pentru că se va folosi la analiza circuitelor mult mai complexe, cuprinzând rezistențe și baterii multiple.

## Observație

Trebuie înțeles faptul că polaritatea nu are nimic de-a face cu legea lui Ohm: nu vom introduce niciodată tensiuni, curenți sau rezistențe negative într-o ecuație a legii lui Ohm! Există într-adevăr alte principii electrice unde folosirea polarității (+ sau -) contează, dar nu este cazul legii lui Ohm.

## 03 - Protecția la electrocutare

### 1. Siguranța în domeniul electric

- Curentul electric poate produce arsuri adânci și puternice asupra corpului datorită disipării puterii asupra rezistenței electrice a acestuia
- Apariția contracției involuntare a mușchilor datorată trecerii unui curent electric extern prin corp poartă denumirea de *tetanos*
- Curentul electric afectează și diafragma toracică, mușchiul responsabil cu buna funcționare a inimii și a plămânilor. Chiar și curenții mult prea slabi pentru a induce în mod normal tetanosul sunt suficienți pentru a da peste cap semnalele celulelor nervoase în așa măsură încât inima să nu mai funcționeze corect ducând la o condiție cunoscută sub numele de fibrilație

#### Arsuri

Pe măsură ce curentul electric „curge” printr-un material, orice opoziție în calea deplasării electronilor (rezistență) are ca rezultat disiparea de energie, de obicei sub formă de căldură. Acesta este efectul principal și cel mai ușor de înțeles al electricității asupra țesutului viu: încălzirea acestuia datorită curentului. În cazul generării unei cantități suficiente de căldură, țesutul poate prezenta arsuri. Fiziologic vorbind, efectul este asemănător celui cauzat de o flacără deschisă sau orice altă sursă de căldură ridicată, doar că electricitatea poate arde țesutul în adâncime, nu doar la suprafața pielii, și poate afecta chiar și organele interne.

#### Sistemul nervos

Un alt efect al curentului electric asupra corpului, probabil cel mai periculos, este cel asupra sistemului nervos. Prin „sistem nervos” înțelegem rețeaua de celule speciale din corp denumite „celule nervoase” sau „neuroni” ce procesează și conduc o multitudine de semnale responsabile pentru controlul unui număr mare de funcții ale corpului. Creierul, coloana vertebrală și organele de simț și motoare funcționează împreună pentru a permite corpului să simtă, să se deplaseze, să răspundă și să gândească.

Comunicarea dintre celulele nervoase este asemenea unor „traductoare”: crează semnale electrice (curenți și tensiuni mici) ca și răspuns la prezența unor compuși chimici numiți neurotransmițători, și eliberează neurotransmițători atunci când sunt stimulați de un curent electric. Dacă printr-un corp viu (uman sau altfel) trece un curent electric suficient de mare, acesta va înlocui impulsurile de intensitate mică generate în mod normal de neuroni, suprasolicitând sistemul nervos și prevenind acționarea mușchilor prin intermediul reflexelor și a

semnalelor voite. În cazul în care mușchii sunt excitați (acționați) de o sursă externă de curent (șoc electric), aceștia se vor contracta involuntar, iar victima nu poate face nimic în această privință.

## **Tetanosul - imposibilitatea victimei de a se elibera de sub tensiune**

Această situație este cu atât mai periculoasă dacă victima strânge conductorul aflat sub tensiune în mâini. Mușchii antebrățelor responsabili pentru mișcare degetelor tind să fie mai bine dezvoltati pentru acei mușchi responsabili cu contractarea degetelor decât pentru întinderea lor; prin urmare, dacă ambele seturi de mușchi sunt excitate la maxim datorită curentului electric prezent prin mâna victimei, mușchii de „contractare” vor câștiga, iar persoana va strânge mâna într-un pumn. În cazul în care conductorul atinge exact palma mâinii, această strângere va forța mâna să prindă strâns firul în mână ducând la o agravare a situației datorită contactului excelent dintre corp și fir prin intermediul mâinii. Victima nu va fi capabilă să lase firul din mână fără un ajutor extern.

Din punct de vedere medical, această condiție de contracție involuntară a mușchilor se numește tetanos, și poate fi întrerupt doar prin oprirea curentului prin victimă.

Chiar și după încetarea curentului, s-ar putea ca victima să nu-și recapete pentru o perioadă de timp controlul voluntar asupra mușchilor, până la revenirea la normal a stării neurotransmițătorilor. Acesta este și principiul aplicat la construcția pistoalelor tip „Taser” ce induc un șoc electric asupra victimei prin intermediul a doi electrozi. Efectul unui șoc electric bine poziționat poate imobiliza temporar (câteva minute) victima.

## **Fibrilația și stopul cardiac**

Dar efectele curentului electric asupra victimei nu se reduc doar la mușchii brațelor. Mușchiul ce controlează plămânii și inima (diafragma toracică) poate fi și el blocat de efectul curentului electric. Chiar și curenții mult prea slabi pentru a induce în mod normal tetanosul sunt suficienți pentru a da peste cap semnalele celulelor nervoase în așa măsură încât inima să nu mai funcționeze corect ducând la o condiție cunoscută sub numele de fibrilație. Inima aflată în fibrilație mai mult trepidează decât bate, și este inefficientă în pomparea sângelui spre organele vitale din organism. În orice caz, în urma unui curent electric suficient de mare prin corp, există posibilitatea decesului prin asfixiere sau stop cardiac. În mod ironic, personalul medical folosește un șoc electric aplicat deasupra pieptului victimei pentru a „porni” inima aflată în fibrilație.

## **Curentul alternativ este mai periculos decât cel continuu**

Modul în care curentul alternativ afectează corpul viu depinde în mare măsură de frecvență. Frecvențele joase (50 și 60 Hz, folosite în Europa, respectiv SUA) sunt mai periculoase decât frecvențele înalte, iar curentul alternativ este de până la cinci ori mai periculos decât curentul continuu la aceeași valoare a curentului și a tensiunii. Curentul alternativ de frecvență joasă produce o contracție îndelungată a mușchilor (tetanie, sau spasm



muscular intermitent) ce blochează mâna pe sursa de curent electric prelungind timpul de expunere la efectele acestuia. Curentul continuu este mult mai probabil să cauzeze doar o singură contracție, ce permite adesea victimei să se îndepărteze de locul pericolului.

Curentul alternativ, prin natura sa, tinde să ducă pacemaker-ul inimii într-o stare de fibrilație, în timp de curentul continuu tinde doar să oprească inima. Odată ce șocul electric încetează, este mult mai ușor de „repornit” o inimă blocată decât una aflată în stare de fibrilație. Acesta este și motivul pentru care echipamentul de „defibrilație” folosit de personalul medical de urgență funcționează: șocul de curent produs de echipament este sub formă de curent continuu și are ca și efect oprirea fibrilației inimii pentru a permite inimii să revină la normal.

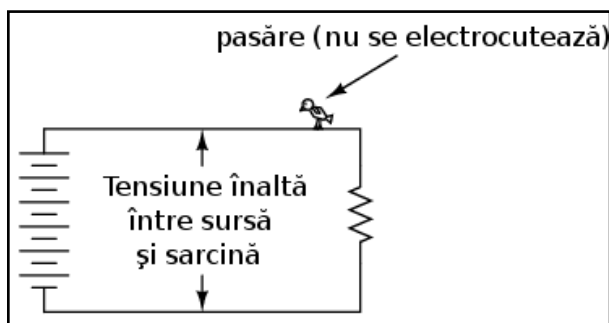
Oricare ar fi cazul, curenții electrici suficienți de mari pentru a cauza contracția involuntară a mușchilor sunt periculoși și trebuie evitați cu orice preț.

## **2. Drumul curentului în cazul electrocutării**

- Electrocutarea poate avea loc doar atunci când există un contact între două puncte din circuit și este aplicată o tensiune electrică asupra corpului victimei
- Circuitele electrice au de obicei un punct special legat la pământ: tije sau plăci metalice îngropate în pământ pentru asigurarea faptului că cel puțin o parte din circuit se află la potențialul pământului (tensiune zero între acel punct și pământ)
- Un defect de împământare este o conexiune accidentală dintre un conductor al circuitului și pământ
- Există echipamente speciale de protecție la lucrul cu tensiuni periculoase, precum încălțăminte și preșuri din cauciuc, dar acestea trebuie menținute într-o stare perfectă de curățenie și uscate pentru a-și dovedi eficiența. Încălțăminte obișnuită nu oferă o protecție suficient de bună la electrocutare prin izolarea purtătorului față de pământ
- Cu toate că pământul este un conductor slab de electricitate, curentul pe care îl poate conduce este suficient pentru accidentarea gravă sau chiar decesul persoanei în cauză

### **Pentru apariția electrocutării sunt necesare două puncte de contact**

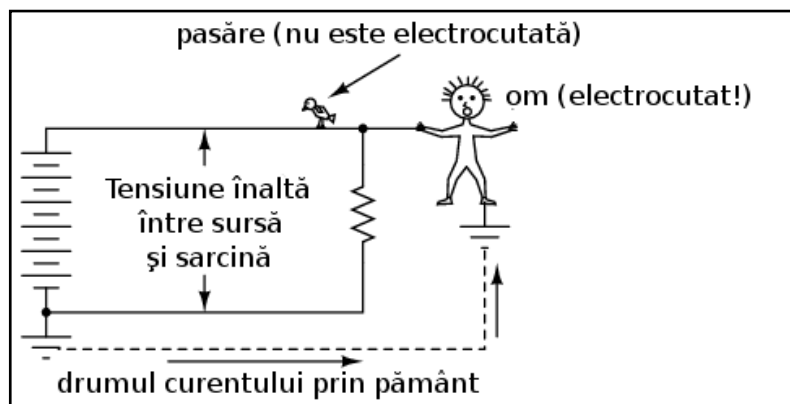
După cum am văzut deja, deplasarea continuă a electronilor necesită prezența unui circuit închis. Acesta este motivul pentru care șocul electric datorat electricității statice este doar de moment: deplasarea electronilor este de scurtă durată, până când se reface echilibrul electric dintre cele două obiecte. Aceste tipuri de șocuri limitate sunt rareori periculoase.



Fără existența a două puncte pe corp necesare intrării și ieșirii curentului, nu există riscul electrocutării. Din acest motiv păsările pot sta pe liniile de înaltă tensiune fără a suferi nicio electrocutare: contactul între acestea și circuit se realizează doar într-un singur punct electric.

Pentru ca electronii să circule printr-un conductor, este necesară prezența unei tensiuni pentru motivarea lor. Tensiunea electrică este tot timpul relativă între două puncte. Nu există tensiune „la” sau „pe” un anumit punct dintr-un circuit; prin urmare, nu există nicio tensiune aplicată păsării ce face contact cu circuitul în exemplul de mai sus într-un singur punct, prin urmare, nu există nici curent. Da, chiar dacă aceasta atinge circuitul cu **ambele** picioare, totuși, ele ating același fir comun din punct de vedere electric. Din moment ce picioarele păsării ating același fir electric comun, nu există diferență de potențial (tensiune) între cele două puncte și nu există nici curent.

## Electrocutarea datorită închiderii circuitului prin împământare



Aceste considerații pot duce la formarea părerii (greșite!) că nu putem fi electrocuțați prin atingerea unui singur fir electric. Spre deosebire de păsări, oamenii stau de obicei pe suprafața pământului atunci când ating un fir prin care trece curent electric.

Adesea, o parte din sistemul de alimentare este conectat intenționat la pământ, iar persoana ce atinge un singur fir, realizează de fapt contactul între două puncte din circuit (firul și împământarea).

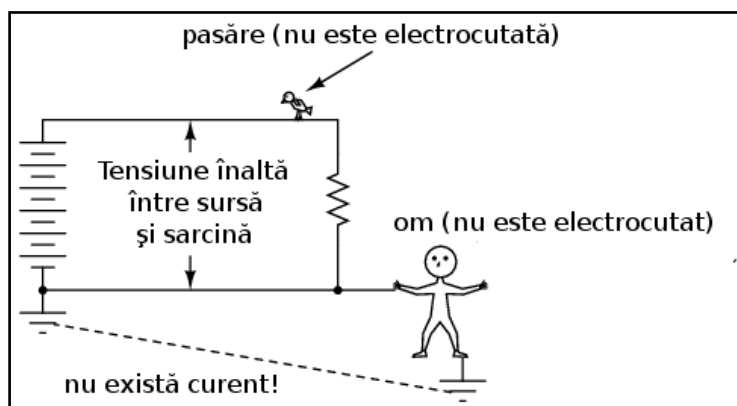
## Împământarea

Simbolul împământării (legării la pământ) este setul de trei linii orizontale cu lungimi descrescătoare, aflat în partea stângă-jos a circuitului de mai sus, precum și la piciorul persoanei curentate. În realitate, sistemul de împământare a sistemelor de alimentare constă dintr-un conductor metallic îngropat în pământ la o adâncime mare pentru un contact maxim cu acesta. Acel conductor este conectat la rândul său într-un punct din circuit. Conectarea victimei la pământ (împământare) se realizează prin piciorul acesteia, datorită faptului că acesta atinge pământul.

Câteva întrebări sunt binevenite:

- Dacă prezența unui punct de împământare în circuit poate duce la electrocutarea unei persoane, de ce îl avem în circuit în primul rând? Nu ar fi mai sigur un circuit fără împământare?
- Persoana electrocutată probabil că nu este desculță. Dacă cauciucul și materialele din care este realizată încălțăminte sunt materiale izolatoare, atunci de ce aceasta nu protejează persoanele electrocutate prin împiedicarea formării unui circuit închis
- Cât de bun conductor electric poate să fie pământul? Dacă putem fi electrocuțați datorită curgerii curentului prin pământ, de ce să nu folosim pământul ca și conductor în circuitele noastre de putere?

## Motivul legării la pământ a circuitelor (împământarea)

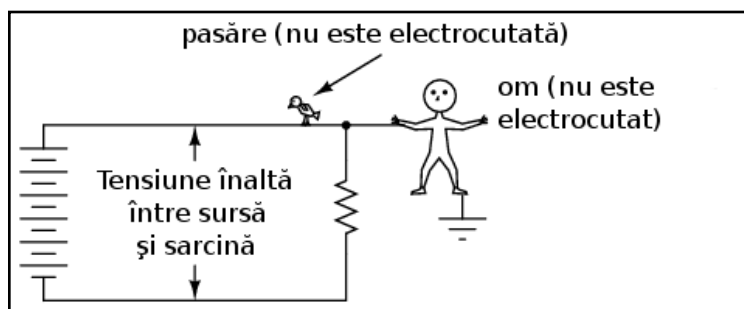


Cât privește prima întrebare, prezența unui punct de împământare „intențional” asigură că cel puțin contactul cu o parte din circuit este sigură. Dacă persoana din cazul precedent ar fi să atingă partea de jos a rezistorului, aceasta nu s-ar electrocuta, chiar dacă picioarele sale vin în contact cu pământul.

Deoarece partea de jos a circuitului este conectată la împământare în partea stângă, conductorul din dreapta jos este comun din punct de vedere electric cu acesta, atunci când este atins precum în figura de mai sus. Din moment ce nu poate exista o diferență de potențial (tensiune) între două puncte comune, asupra persoanei ce vine în contact cu firul nu va fi aplicată nicio tensiune iar aceasta nu va suferi niciun șoc electric.

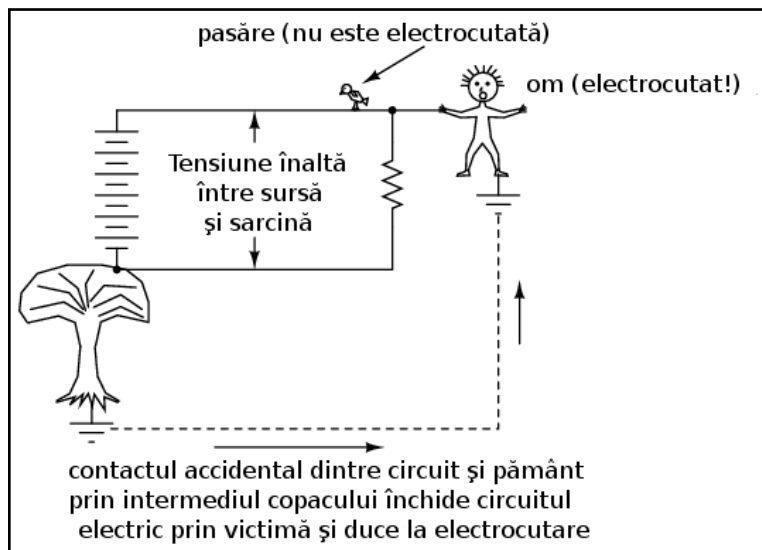
Din același motiv, firul ce conectează circuitul la împământare nu are de obicei izolație; orice obiect metalic ce vine în contact cu acesta se va transforma într-un punct electric comun cu pământul, eliminând orice pericol de electrocutare. Legarea unui circuit la pământ asigură faptul că există cel puțin un punct din circuit care dacă este atins nu duce la electrocutare.

## Defectul de împământare



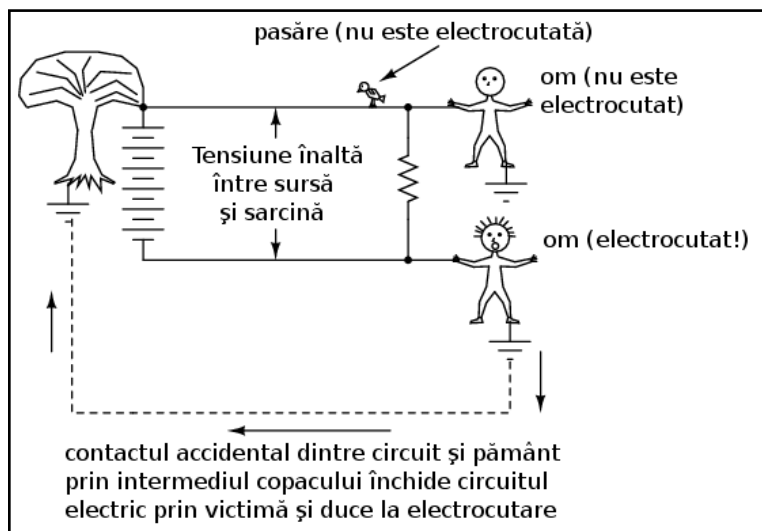
Dar dacă nu am lega circuitul deloc la pământ? Nu ar însemna acest lucru că atingerea oricărui fir ar fi la fel de sigură? Ideal, da. Practic însă, nu. Să observăm ce se întâmplă fără niciun fel de împământare.

În ciuda faptului că picioarele persoanei vin în contact direct cu pământul, atingerea oricărui punct din circuit este sigură. Din moment ce nu se formează un drum complet/închis prin corpul persoanei, nu este posibilă trecerea niciunui curent prin corpul acesteia.

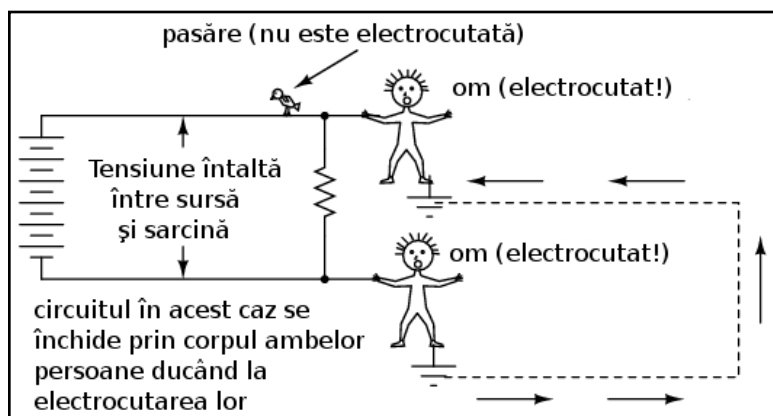


Totuși, toate acestea se pot schimba radical în momentul formării unei legături accidentale cu pământul, precum atingerea liniilor de înaltă tensiune de către o creangă ce duce la formarea unei legături directe cu pământul.

O asemenea conexiune accidentală dintre conductorul circuitului și pământ poartă numele de defect de împământare. Cauzele defectelor de împământare pot fi numeroase și prin urmare nu pot fi luate toate în considerare la proiectarea liniilor electrice.



În cazul copacilor, este imposibil de prezis firul de contact accidental. Dacă contactul se realizează între firul de sus, atunci aceste poate fi atins în siguranță; dacă în schimb contactul se realizează între copac și firul de jos, atunci atingerea acestui fir este cea care nu prezintă riscul electrocutării, adică exact invers față de cazul precedent.



Precum am spus și mai sus, ramurile copacilor sunt doar o sursă potențială ale defectelor de împământare. Să considerăm un circuit neconectat la pământ, fără niciun contact accidental dintre copac și pământ, dar de data aceasta avem doi oameni ce ating circuitul în două puncte cu potențiale diferite.

În acest caz, contactul fiecărei persoane cu pământul asigură închiderea circuitului prin pământ și prin ambele persoane. Chiar dacă fiecare din cele două persoane crede că se află în siguranță în momentul atingerii punctului respectiv din circuit, atingerea lor concomitentă transformă situația de mai sus într-un scenariu periculos. De fapt, una dintre persoane reprezintă defectul de împământare în acest caz, ceea ce face ca atingerea conductorului de către cealaltă persoană să fie periculoasă pentru ambii. Acesta este motivul pentru care circuitele fără împământare sunt periculoase: tensiunea dintre oricare punct din circuit și pământ este imprevizibilă, deoarece este posibilă apariția unui defect de împământare în orice moment în oricare punct al circuitului. În acest scenariu, doar pasărea este sigură, deoarece nu are niciun contact cu pământul. Prin conectarea unui punct din circuit la pământ, putem asigura siguranța atingerii cel puțin în acel punct. Deși nu reprezintă o măsură de siguranță 100%, tot este mai mare decât lipsa completă a împământării.

## Purtarea încălțămintei adecvate

Pentru a răspunde celei de a doua întrebări, încălțămintea cu talpă de cauciuc asigură într-adevăr o anumită protecție la electrocutare prin prevenirea închiderii circuitului între victimă și pământ. Cu toate acestea, majoritatea tipurilor de încălțămintă nu sunt proiectate pentru asigurarea siguranței electrice, având în majoritatea cazurilor o talpă prea subțire sau dintr-un material neadecvat.

De asemenea, orice umezeală, mizerie sau săruri conductive provenite de la transpirație aflate pe suprafață sau ce străpung talpa încălțămintei duc la compromiterea valorii izolației inițiale ale acesteia. Există încălțămintă special concepută pentru lucrul la tensiune înaltă, precum și preșuri din cauciuc pentru stat, dar aceste echipamente speciale de lucru trebuie menținute uscate și într-o stare perfectă de curățenie pentru a-și dovedi eficiența. În concluzie, încălțămintea obișnuită nu este o garanție a protecției la electrocutare atunci când intrăm în contact cu un circuit electric.

Cercetările efectuate asupra rezistenței contactului dintre corpul uman și pământ au relevat aproximativ următoarele valori:

- Contact prin intermediul mâinii sau piciorului protejat prin izolație de cauciuc:  $20 \text{ M } \Omega$

- Contact prin intermediul piciorului protejat cu încălțăminte de piele (uscat): între 100 k $\Omega$  și 500 k $\Omega$
- Contact prin intermediul piciorului protejat cu încălțăminte de piele (ud): între 5 k  $\Omega$  și 20 k $\Omega$

Din cele de mai sus reiese că, față de piele, cauciucul este un material izolator mult mai bun, iar prezența apei într-un material poros precum pielea, reduce semnificativ rezistența electrică a acestuia.

## **Pământul nu este un foarte bun conductor**

Ca să răspundem și la a treia întrebare, pământul nu este un conductor foarte bun, cel puțin nu atunci când este uscat. Acesta este un conductor mult prea slab pentru a putea susține un curent continuu pentru alimentarea unei sarcini. Totuși, pentru accidentarea sau decesul unei persoane este suficientă chiar și o cantitate foarte mică de curent, prin urmare chiar și conductivitatea slabă a pământului poate fi suficientă pentru apariția situațiilor periculoase.

Unele suprafețe de pământ sunt materiale izolatoare mai bune decât altele. Asfaltul de exemplu, fiind o substanță în mare parte uleioasă, prezintă o rezistență mult mai mare decât majoritatea tipurilor de piatră sau pământ. Betonul pe de altă parte, posedă o rezistență electrică mică datorită conținutului său de apă și electrolit.

## **3. Legea lui Ohm (reconsiderare)**

- Efectele nedorite ale șocului electric asupra corpului sunt datorate curentului electric. O tensiune mai mare permite producerea unui curent mai mare și mai periculos. Rezistența se opune curgerii curentului; creșterea rezistenței electrice este o măsură bună de prevenire a șocului electric
- Orice tensiune mai mare de 30 V este capabilă să producă șocuri de curent periculoase
- Nu este indicat să purtăm inele sau brățări atunci când lucrăm cu circuitele electrice. Acestea asigură un contact excelent între corp și circuitul electric, și pot chiar ele să conducă curenți suficienți de mari pentru producerea arsurilor chiar și la tensiuni mici
- Chiar și tensiunile mici pot fi periculoase într-un mod indirect. Acestea pot crea șocuri electrice suficiente pentru a arunca victima într-un loc periculos din încăpere (elicele unui motor, țevi încinse, contact cu substanțe periculoase, etc.)
- Atunci când trebuie neapărat să lucrăm cu un circuit electric alimentat, este indicat să lucrăm doar cu o singură mână pentru a preveni închiderea circuitului prin piept

## **Curentul electric este responsabil de efectele nedorite ale electrocutării**

În cadrul teoriei protecției la electrocutare este rostită adeseori fraza: Nu tensiunea omoară, ci curentul! Deși există o urmă de adevăr în această zicală, trebuie să înțelegem mult mai multe despre pericolul electrocutării decât atât.

Principiul conform căruia „curentul omoară” este în esență corect. Curentul electric este cel responsabil de arderea țesuturilor, blocarea mușchilor și intrarea inimii în fibrilație. Totuși, curentul electric nu poate exista singur: trebuie să existe o anumită cădere de tensiune pentru motivarea deplasării electronilor prin corpul victimei. Corpul persoanei are și el o anumită rezistență electrică, rezistență ce trebuie luată de asemenea în considerare.

Conform legii lui Ohm, curentul este egal cu raportul dintre tensiune și rezistență:

$$I = \frac{E}{R}$$

## **Rezistența corpului poate reduce semnificativ efectele tensiunilor înalte**

Cantitatea de curent printr-un corp este egală cu raportul dintre valoarea tensiunii aplicate între două puncte distincte de pe corp și rezistența electrică oferită de acesta între cele două puncte. Evident, cu cât valoarea tensiunii disponibile pentru „împingerea” electronilor este mai mare, cu atât aceștia se vor deplasa mai ușor (curent mai mare) pentru aceeași valoare a rezistenței. De aici rezultă și pericolul tensiunii înalte: tensiunea înaltă înseamnă un potențial mai mare de trecere a unor cantități mari de curent prin corp. Invers, cu cât corpul oferă o rezistență electrică mai mare împotriva curentului, cu atât deplasarea electronilor este mai lentă (curent mai mic). Pericolul tensiunii se datorează până la urmă valorii rezistenței totale disponibile în circuit pentru împiedicarea transferului de electroni prin corp.

Rezistența corpului nu este nici ea o valoare fixă. Aceasta variază de la o persoană la alta și nu este aceeași de-a lungul timpului. Dintre factorii ce afectează rezistența totală a unei persoane se numără procentul de grăsime și gradul de hidratare al organismului.

Rezistența organismului depinde și de modul de realizare al contactului dintre fir și piele: între cele două mâini, între mână și picior, între cele două picioare, între picior și cot, etc. Sudoarea, fiind un lichid bogat în săruri și minerale, este un conductor excelent de electricitate. La fel este și sângele. Prin urmare, contactul realizat cu o mână transpirată sau o rană deschisă va reduce substanțial valoarea rezistenței disponibile.

Dacă măsurăm rezistența electrică între cele două mâini, valoarea indicată de un multimetru va fi de aproximativ un milion de ohmi (1 MΩ). Când cele două sonde, fiecare într-o mână). Multimetrul indică o rezistență mai mică dacă strângem puternic sondele în mână decât atunci când le ținem ușor.

## **Efectele diferitelor valori ale curenților asupra corpului uman**

Care este valoarea pentru care curentul este periculos? Răspunsul la această întrebare depinde și el de câțiva factori. Fiecare corp este diferit din punct de vedere chimic, iar acest lucru duce la reacții diferite la trecerea

aceluiași curent prin două corpuri diferite. În ciuda acestor diferențe, de-a lungul timpului s-au stabilit unele valori cu ajutorul testelor ce indică efectele curentului electric asupra organismului. Toate valorile curenților sunt date în miliamperi (1 mA = 0.001 A) (C.A. = curent alternativ):

| EFACT ASUPRA CORPULUI                                                  | CURENT CONTINUU                    | C.A (60 Hz)      | C.A. (10 kHz)  |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------|----------------|
| Senzația ușoară de gădilire                                            | Bărbați = 1.0 mA<br>Femei = 0.6 mA | 0.4 mA<br>0.3 mA | 7 mA<br>5 mA   |
| Pragul de percepție                                                    | Bărbați = 5.2 mA<br>Femei = 3.5 mA | 1.1 mA<br>0.7 mA | 12 mA<br>8 mA  |
| Apariția durerii, dar se poate menține controlul voluntar al mușchilor | Bărbați = 62 mA<br>Femei = 41 mA   | 9 mA<br>6 mA     | 55 mA<br>37 mA |
| Apariția durerii, victima nu poate lăsa firul din mână                 | Bărbați = 76 mA<br>Femei = 51 mA   | 16 mA<br>10.5 mA | 75 mA<br>50 mA |
| Durere severă, apar dificultăți de respirație                          | Bărbați = 90 mA<br>Femei = 60 mA   | 23 mA<br>15 mA   | 94 mA<br>63 mA |
| Posibilitatea apariției fibrilației inimii după 3 secunde              | Bărbați = 500 mA<br>Femei = 500 mA | 100 mA<br>100 mA |                |

Atenție, aceste date sunt doar aproximative, pentru că fiecare individ s-ar putea să reacționeze diferit la trecerea curentului prin organism. S-a sugerat chiar, că o valoare a curentului de doar 17 mA (0.017 A!) este suficientă în anumite condiții pentru inducerea fibrilației inimii atunci când este aplicată de-a lungul pieptului.

### Pericolul electrocutării crește odată cu descreșterea rezistenței corpului victimei

Să presupunem de exemplu că am prinde terminalele unei surse de tensiune alternativă la o frecvență de 60 Hz cu ambele mâini. Care este valoarea tensiunii necesare pentru a produce un curent de 20 mA (suficient pentru a face imposibilă desprinderea voluntară de pe fir) în condițiile în care pielea este uscată și curată? Folosim legea lui Ohm pentru a determina această valoare:

$$E = IR$$

$$E = (20 \text{ mA})(1 \text{ M}\Omega)$$



$$E = 20.000 \text{ V} = 20 \text{ kV}$$

Țineți minte că aceasta este situația cea mai favorabilă victimei (piele curată și uscată) din punct de vedere al siguranței electrice, iar valoarea tensiunii de 20 kV este valoarea necesară inducerii tetanosului. Pentru cauzarea unui șoc electric dureros, este suficientă o valoare mult mai mică a tensiunii! De asemenea, țineți minte că efectele fiziologice ale curentului electric variază în mare măsură de la o persoană la alta, iar aceste valori calculate sunt doar aproximații.

### **Transpirația mâinilor scade rezistența electrică a corpului**

Dacă ne udăm pe mâini pentru a încerca să simulăm transpirația, rezistența electrică dintre cele două mâini scade până la o valoare de aproximativ 17.000 de ohmi (~~10~~17 kΩ) (încercați să folosiți un multimetru în diferite scenarii pentru calcularea rezistenței electrice dintre diferite puncte ale corpului dumneavoastră!), atingând cu doar un deget fiecare dintre cele două sonde. O recalculare a tensiunii necesare inducerii unui curent de 20 mA, duce la următorul rezultat:

$$E = (20 \text{ mA})(17 \text{ k}\Omega)$$

$$E = 340 \text{ V}$$

În această situație realistă, este nevoie de o cădere de tensiune de doar 340 de volți între cele două mâini pentru a induce un curent de 20 mA (vedeți tabelul efectelor curentului asupra corpului).

### **Inelele sau brățările purtate pe mână se pot dovedi periculoase**

Totuși, este posibilă apariția unui șoc electric la o tensiune mult mai mică decât aceasta. În cazul în care rezistența electrică a corpului scade și mai mult datorită contactului cu un inel purtat pe deget (un inel din aur în jurul degetului reprezintă un contact excelent pentru apariția șocului electric), sau cu o suprafață de contact cu un corp metalic mare precum o țeavă sau mânerul unei scule de lucru, valoarea rezistenței poate scădea până la valori în jurul a 1.000 de ohmi (1 kΩ), caz în care chiar și o tensiune joasă prezintă un risc crescut de electrocutare:

$$E = (20 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega)$$

$$E = 20 \text{ V}$$

În această situație, sunt suficienți 20 V pentru producerea unui curent de 20 mA prin corpul victimei, suficient pentru inducerea tetanosului. Luând în considerare faptul că, teoretic, 17 mA sunt suficienți pentru inducerea fibrilației inimii, o rezistență electrică de 1 kΩ între cele două mâini face ca o cădere de tensiune de doar 17 V să fie extrem de periculoasă.

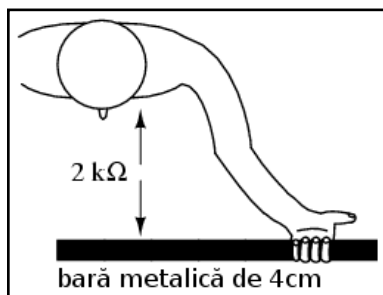
Șaptesprezece volți nu este o valoare foarte mare din punct de vedere al rețelelor electrice. Desigur, aceasta este situația cea mai proastă posibil, cu o tensiune alternativă la 60 Hz și conductivitate excelentă a corpului, dar utilitatea ei constă în exemplificarea faptului că o tensiune foarte mică se poate dovedi periculoasă în anumite condiții și situații.

### „Înghițarea” victimei pe fir agravează efectele electrocutării

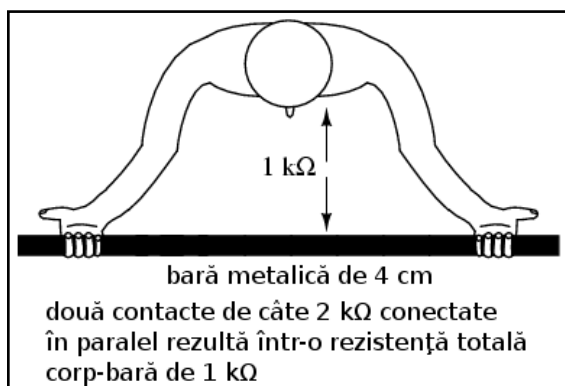
Nu este necesar ca aceste condiții de realizare a rezistenței electrice de 1 k $\Omega$  să fie atât de extreme precum a fost prezentat mai sus. Rezistența corpului poate scădea odată cu aplicarea tensiunii (în special dacă tetanosul face ca victima să strângă și mai bine conductorul în mână), astfel încât cu o tensiune constantă, severitatea unui șoc electric se poate agrava în timp după contactul inițial. Ceea ce începe ca un șoc ușor - suficient pentru a îngheța victima pe fir, astfel încât să nu-l poată lăsa din mână - se poate transforma într-un șoc suficient de sever pentru a cauza decesul pe măsură ce rezistența corpului scade iar curentul corespunzător crește.

Următoarele seturi de date au fost prelevate prin intermediul cercetărilor asupra valorilor rezistenței corpului între diferite puncte și condiții de contact:

| Scenariu                                     | Rezistența electrică<br>(condiții uscate) | Rezistența electrică<br>(condiții umede) |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|
| Fir atins de deget                           | 40 k $\Omega$ - 1 M $\Omega$              | 4 k $\Omega$ - 15 k $\Omega$             |
| Fir prins în mână                            | 15 k $\Omega$ - 50 k $\Omega$             | 3 k $\Omega$ - 5 k $\Omega$              |
| Clești metalici ținuti în mână               | 5 k $\Omega$ - 10 k $\Omega$              | 1 k $\Omega$ - 3 k $\Omega$              |
| Contact cu palma mâinii                      | 3 k $\Omega$ - 8 k $\Omega$               | 1 k $\Omega$ - 2 k $\Omega$              |
| Bară metalică de 4 cm ținută cu o mână       | 1 k $\Omega$ - 3 k $\Omega$               | 0.5 k $\Omega$ - 1,5 k $\Omega$          |
| Bară metalică de 4 cm ținută cu ambele mâini | 0.5 k $\Omega$ - 1,5 k $\Omega$           | 0.25 k $\Omega$ - 0.75 k $\Omega$        |
| Mână introdusă în lichid conductor           | 0.2 k $\Omega$ - 0.5 k $\Omega$           |                                          |
| Picior introdus în lichid conductor          | 0.1 k $\Omega$ - 0.3 k $\Omega$           |                                          |



Observați valorile rezistenței pentru scenariul contactului cu o bară groasă de 4 cm. Rezistența măsurată în cazul contactului cu ambele mâini este exact jumătate din cazul de contact cu o singură mână.



Cu ambele mâini pe bară, suprafața de contact este de două ori mai mare decât cu o singură mână. Aceasta este o lecție importantă de ținut minte: rezistența electrică dintre două puncte de contact scade odată cu creșterea suprafeței contactului, toți ceilalți factori rămânând constanți. Dacă ținem bara metalică cu ambele mâini, electronii au două căi paralele de curgere dinspre bară spre corp și invers.

Conexiunea în paralel rezultă tot timpul într-o rezistență electrică totală mai mică decât oricare dintre rezistențele conectate luate individual.

În industrie, valoarea de 30 V este considerată ca fiind pragul maxim de siguranță; tot ce depășește această valoare reprezintă un potențial pericol de electrocutare.

## Folosiți o singură mână când lucrați cu circuitele electrice

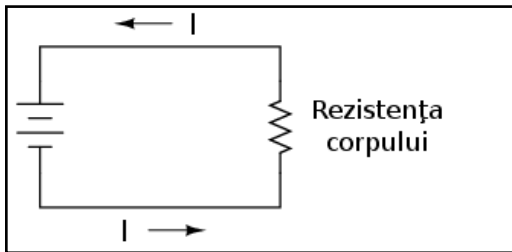
Drumul urmat de curent prin corpul uman este foarte important atunci când vorbim de efectele sale asupra organismului. Curentul afectează orice fel de țesut/mușchi prin care trece, și din moment ce mușchii inimii și ai plămânilor sunt cei mai importanți pentru supraviețuire, șocurile de curent ce traversează pieptul trebuie să fie privite ca fiind cele mai periculoase. Din această cauză, închiderea circuitului prin mâini (electrocutare) este cea mai probabilă cauză a accidentelor și deceselor.

Pentru a veni în întâmpinarea acestor scenarii neplăcute, este indicat să folosim o singură mână atunci când lucrăm cu circuitele electrice alimentate la tensiuni ce pot pune viața în pericol; cealaltă mână se va ține departe de sursa de tensiune, preferabil în buzunar pentru a nu atinge din greșeală circuitul. Evident, cel mai sigur este să lucrăm tot timpul pe un circuit electric nealimentat, dar acest lucru nu este tot timpul practic sau posibil.

Pentru lucrul cu o singură mână, este indicat să folosim mâna dreaptă, și nu cea stângă, din două motive: majoritatea oamenilor sunt dreptaci (prin urmare îndemânarea este mai mare), iar inima este de obicei situată în partea stângă sau la mijlocul pieptului. Desigur, stângacii vor folosi mâna stângă pentru că deși pericolul este mai mare în eventualitatea unui șoc electric, șansele apariției acestuia sunt mai mici datorită coordonării crescute față de mâna dreaptă a acestora.

## Folosiți echipamente și instrumente de lucru izolate electric

## Contact direct

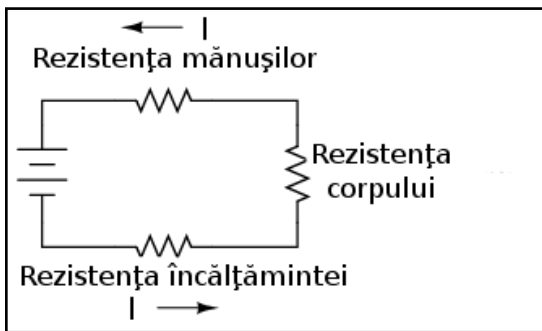


Cea mai bună protecție împotriva electrocutării este rezistența electrică, iar aceasta poate fi adăugată rezistenței corpului prin folosirea instrumentelor de lucru, echipamentelor, mănușilor și încălțămintei izolate electric. Curentul prin circuit (factorul periculos la electrocutare) este raportul dintre tensiunea electrică prezentă și valoarea **totală** a rezistenței în calea curgerii curentului. Valoarea totală a rezistențelor conectate în serie este mai mare decât valoarea oricărei rezistențe luată individual.

Persoanele ce intră în contact direct cu sursele de tensiune: curentul este limitat doar de rezistența corpului:

$$I = \frac{E}{R_{corp}}$$

## Utilizarea echipamentului de protecție



Circuitul echivalent pentru aceeași situație, dar cu persoana în cauză purtând mănuși și încălțămintă de protecție (izolate electric). Persoanele ce poartă mănuși și încălțămintă de protecție: curentul este limitat acum de valoarea totală a rezistenței din circuit:

$$I = \frac{E}{R_{corp} + R_{mănuși} + R_{încălțămintă}}$$

Deoarece curentul trebuie acum să treacă prin încălțămintă, prin corp și prin mănuși pentru a închide circuitul spre baterie, suma tuturor acestor rezistențe se opune trecerii curentului într-o măsură mai mare decât oricare rezistență luată în parte.

## Siguranța liniilor electrice de înaltă tensiune

Siguranța este unul din motivele pentru care conductoarele electrice sunt de obicei acoperite cu izolație de plastic sau cauciuc: pentru a crește substanțial valoarea rezistenței dintre conductori și persoanele ce ar putea veni în contact cu acestea, oricare ar fi motivul. Din păcate, izolarea conductorilor din liniile electrice de înaltă tensiune este mult prea scumpă datorită cantității de izolație necesară pentru protecția în caz de contact accidental; siguranța la electrocutare în acest caz este asigurată prin construirea și menținerea acestora la înălțime (de aici și denumirea de linii electrice aeriene (LEA)), pentru a evita în primul rând contactul accidental dintre acestea și persoanele neautorizate.

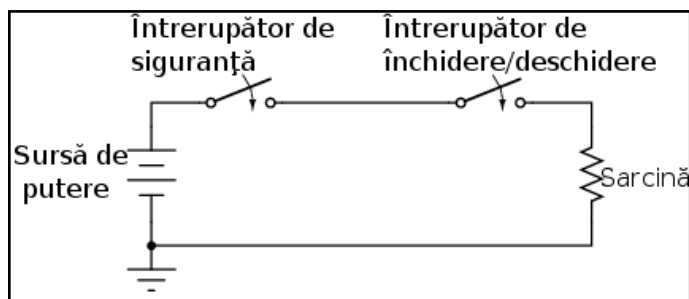
## 4. Practici de bază

- Orice circuit, echipament sau sistem trebuie adus într-o stare de energie zero atunci când se dorește atingerea directă a elementelor acestuia
- Întrerupătoarele de siguranță trebuie să fie prezente în orice circuit electric pentru a putea asigura cu ușurință o situație de energie zero în circuit
- Pentru o siguranță suplimentară, la bornele sarcinii la care se efectuează operații de reparație sau întreținere, se poate conecta o împământare temporară sau un conductor de scurt-circuit între cele două părți cu potențiale diferite ale circuitului
- Verificați întotdeauna dacă circuitul a fost adus într-o stare de energie zero cu ajutorul aparatelor de măsură. Asigurați-vă de funcționalitatea aparatului și înainte și după ce ați verificat circuitul
- După ce toate măsurile de siguranță au fost luate, ultimul pas înaintea contactului propriu-zis cu circuitul este atingerea scurtă și ușoară a acestuia cu partea posterioară a palmei; în cazul apariției șocului electric, reacția mușchilor va îndepărta mâna de pericolul existent

### Opriți alimentarea cu energie electrică înainte de atingerea elementelor de circuit

Dacă este posibil, închideți întotdeauna alimentarea rețelei electrice înainte de atingerea oricăror elemente de circuit. Trebuie de asemenea asigurate toate sursele de energie înainte ca un sistem să poate fi considerat sigur. Asigurarea faptului că în circuit nu se află energie periculoasă (starea de energie zero) se face prin înlăturarea energiei potențiale sau stocate din circuit.

### Asigurarea circuitelor se poate realiza prin intermediul întrerupătoarelor



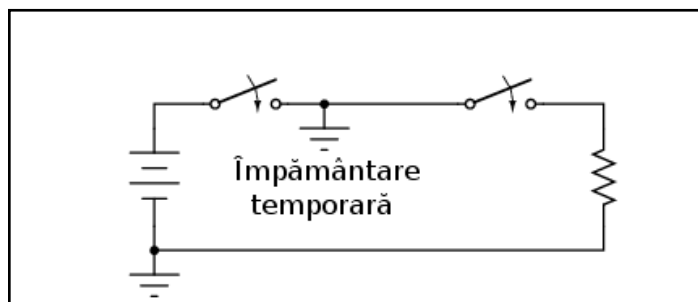
Toate circuitele trebuie prevăzute cu mecanisme de „deconectare” pentru asigurarea tensiunii din circuit. În unele cazuri, aceste dispozitive servesc un scop secundar în circuit, și anume, deschiderea automată a acestuia în cazul în care valoarea curentului depășește valoarea nominală permisă în circuit. În alte situații,

întrerupătoarele de deconectare sunt operate manual, nu automat.

În ambele cazuri, acestea sunt utilizate pentru protecție și este necesară folosirea lor corespunzătoare. Trebuie avut în vedere faptul că aceste dispozitive de deconectare trebuie să fie diferite față de întrerupătoarele ce închid și deschid circuitul în mod normal. Acestea sunt dispozitive de siguranță pentru asigurarea stării de energie zero a circuitului.

Cu întrerupătorul în poziția deschis (precum în figură), continuitatea circuitului este întreruptă și curentul din circuit este zero. Căderea de tensiune pe sarcină este și ea zero, deoarece întreaga tensiune a sursei se regăsește la bornele contactelor întrerupătorului deschis. Observați că nu este nevoie de încă un întrerupător în partea de jos a circuitului. Datorită faptului că acea parte din circuit este conectată la împământare, ea este electric comună cu pământul și nu sunt necesare măsuri suplimentare de siguranță.

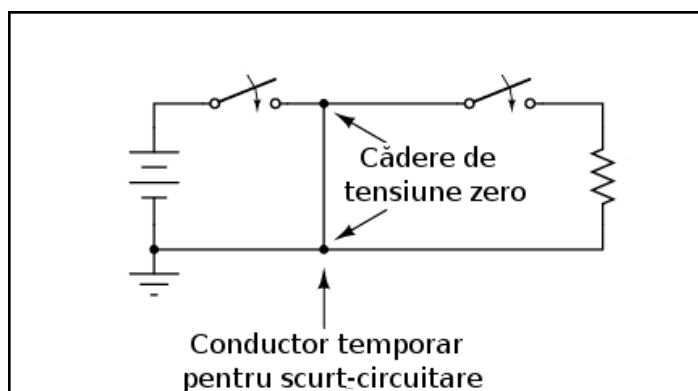
### Pentru o siguranță maximă se pot realiza împământări temporare



Pentru o siguranță maximă a persoanelor ce lucrează pe partea de sarcină a circuitului, se poate stabili o legătură temporară la pământ a părții superioare a circuitului, pentru a ne asigura că nu este posibilă în niciun fel apariția unei căderi de tensiune la bornele sarcinii.

După realizarea împământării temporare, ambele părți ale sarcinii sunt conectate la pământ, asigurând o stare de energie zero la bornele acesteia.

### Asigurarea circuitului prin scurt-circuitarea temporară a sarcinii



Din moment ce existența împământărilor pe ambele părți ale circuitului înseamnă practic scurt-circuitarea sarcinii cu un conductor, putem asigura circuitul prin exact această metodă.

Indiferent de măsura luată, ambele părți ale sarcinii se vor afla la același potențial, cel al pământului, neexistând nicio cădere de tensiune între oricare parte/bornă a sarcinii și persoanele ce lucrează în acel loc prin intermediul pământului. Această tehnică este des întâlnită atunci când se lucrează la întreținerea liniilor electrice de înaltă tensiune din rețeaua de distribuție a energiei electrice.

Chiar și după luarea acestor măsuri de siguranță, trebuie să ne asigurăm că într-adevăr nu există niciun fel de energie electrică prezentă în circuit. O modalitate este să acționăm (închidem) întrerupătorul motorului/becului/sau oricărui alt element din circuit la care lucrăm. Dacă acesta pornește, înseamnă că încă mai există energie în circuit.

## **Folosiți aparatul de măsură pentru asigurarea electrică a circuitului**

În afară de asta, va trebui întotdeauna să ne asigurăm de prezență tensiunilor electrice periculoase din circuit cu ajutorul unui aparat de măsură înainte atingerii directe a oricărui element sau conductor din circuit. Pașii pentru asigurarea circuitului cu ajutorul aparatului de măsură sunt următorii:

- Asigurați-vă că aparatul de măsură folosit indică corect o cădere de tensiune cunoscută; folosiți-l pentru a măsura tensiunea unei baterii, de exemplu
- Folosiți aparatul de măsură pentru determinarea prezenței oricărei tensiuni electrice periculoase din circuit, doar după ce ați urmat pasul de mai sus
- Este important să verificați încă odată funcționalitatea aparatului de măsură pentru a vă asigura că și acum indică valoarea corectă; puteți folosi aceeași baterie și în acest caz

Chiar dacă aceste metode par exagerate sau chiar paranoice, cei trei pași de mai sus sunt o metodă a cărei eficiență a fost demonstrată în practică. Există tot timpul riscul ca aparatul de măsură din dotare să fie defect chiar în momentul în care îl folosiți pentru determinarea tensiunilor potențial periculoase din circuit. Urmând pașii de mai sus, vă puteți asigura că nu sunteți păcăliți de un aparat de măsură stricat. Eventual, folosiți un al doilea aparat de măsură în cazul în care nu sunteți absolut sigur de indicația primului aparat.

## **Atingeți circuitul doar după ce ați luat toate măsurile de siguranță**

Într-un final, după ce toate măsurile de siguranță au fost luate, atingerea directă a elementelor și conductorilor din circuit este permisă. Atenție totuși, chiar și după ce toate măsurile de siguranță au fost urmate, este posibil ca încă să mai existe surse de tensiuni periculoase în circuit (deși este puțin probabil). O ultimă măsură de precauție constă în atingerea ușoară și de scurtă durată a circuitului cu partea anterioară a palmei înainte de prinderea oricărui element de circuit în mână. De ce?

În cazul în care încă mai există tensiune prezentă între acel element și pământ, atingerea acestuia duce la strângerea degetelor în pumn datorită efectului curentului electric asupra mușchilor și la îndepărtarea persoanei de locul periculos. Acesta este însă ultima măsură de siguranță ce trebuie luată și nu prima, și nu trebuie folosită ca și metodă alternativă de verificare a existenței tensiunilor periculoase în circuit.

## **5. Reacția în cazuri de urgență**

- O persoană electrocutată trebuie deconectată de la sursa de energie electrică. Pentru aceasta, se va localiza și acționa cel mai apropiat întrerupător de tensiune. Altfel, dacă este imposibilă localizarea la timp a

dispozitivului de întrerupere, victima poate fi îndepărtată de pe circuit prin dezlipire sau lovire cu un obiect nemetalic, izolator.

- Victimele electrocutărilor necesită asistență medicală de urgență: verificați respirația și pulsul, iar apoi aplicați metodele de resuscitare cardio-pulmonară pentru menținerea oxigenării corpului acesteia
- Dacă victima este conștientă după electrocutare, este totuși necesară supravegherea atentă și îngrijirea acesteia până la apariția personalului medical calificat. Există pericolul instalării șocului fiziologic; asigurați prin urmare victimei un mediu călduros și confortabil
- Victimele electrocutărilor pot prezenta probleme cu inima chiar și după câteva ore de la accident. Pericolul șocului electric nu ia sfârșit după acordarea imediată a asistenței medicale

## **Oprirea alimentării cu energie electrică**

În ciuda tuturor măsurilor de siguranță luate, din când în când au loc și accidente neplăcute. În majoritatea cazurilor acestea sunt urmarea nerespectării procedurilor de siguranță. Dar indiferent de natura lor, este bine ca cei ce lucrează în domeniul sistemelor electrice să cunoască măsurile de prim ajutor ce trebuiesc acordate victimei electrocutării.

Primul lucru atunci când observăm o persoană „înghețată pe circuit” este să oprim alimentarea cu energie electrică de la cel mai apropiat întrerupător. Dacă o a doua persoană vine în contact cu victima, există riscul ca valoarea căderii de tensiune asupra ambelor persoane să fie suficient de mare pentru electrocutarea amândouă, ducând la „înghețarea” ambelor persoane pe circuit, nu doar a victimei inițiale.

Una dintre problemele acestei proceduri este imposibilitatea depistării la timp a sursei de energie electrică pentru salvarea victimei. Dacă funcționarea inimii și respirația victimei electrocutate sunt paralizate de curentul electric, durata de supraviețuire este extrem de limitată. Dacă șocul de curent este suficient de mare, carnea și organele interne ale victimei sunt făcute scrum într-un timp foarte scurt.

## **Îndepărtarea victimei prin smulgere sau lovire**

Dacă nu se poate localiza întrerupătorul circuitului într-un timp suficient de scurt, se poate încerca dezlipirea victimei de pe circuit prin smulgere sau lovire cu ajutorul unui lemn uscat(coadă de mătură, de ex) sau orice alt material non-metalic, izolant, ce poate fi găsit în împrejurime. O metodă bună de îndepărtare a victimei este folosirea unui prelungitor electric plasat în jurul corpului victimei și tragerea acesteia din preajma circuitului. Țineți minte că victima va strânge conductorul cu toată forța, prin urmare tragerea și dezlipirea acesteia de pe circuit nu va fi deloc ușoară!

## **Acordarea ajutorului medical**



După îndepărtarea victimei de la sursa de energie electrică, cea mai mare problemă din punct de vedere medical este respirația și circulația (pulsul). Pentru a preveni dezoxigenarea victimei, se vor aplica metodele de resuscitare cardio-pulmonară (RCP), dacă salvatorul le cunoaște, până la sosirea unui echipaj medical specializat.

Dacă victima este conștientă, aceasta trebuie ținută pe loc până la sosirea unui echipaj medical specializat la locul accidentului. Există posibilitatea căderii victimei într-un șoc fiziologic - o situație în care circulația sângelui nu este suficientă, situație diferită de cea a șocului electric - prin urmare, temperatura și confortul victimei trebuie să fie o prioritate. Este posibil ca un șoc electric inițial insuficient pentru a cauza întreruperea imediată a bătăii inimii, să cauzeze probleme și să ducă la un infarct câteva ore mai târziu; victima va trebui să fie foarte atentă la condiția ei generală după incident, ideal, sub supraveghere.

## **6. Surse potențiale de pericol**

- Condițiile de umezeală sporesc riscul apariției electrocutării prin reducerea rezistenței electrice a pielii
- Scoateți din funcțiune și înlocuiți imediat dispozitivele și aparatele electrice uzate sau defecte. Puteți evita folosirea în necunoștință de cauză a unui prelungitor sau dispozitiv electric prin tăierea capătului cablului de alimentare după scoaterea acestuia din priză
- Liniile electrice aeriene sunt deosebit de periculoase și trebuie evitate sub orice formă. Dacă observați posibilitatea existenței unui punct de contact între o linie electrică și pământ, pentru evitarea riscului electrocutării, stați într-un picior sau alergați (un singur picior atinge pământul în același moment); în acest fel nu va exista o diferență de potențial asupra corpului victimei și nici posibilitatea apariției unui curent periculos

Cu siguranță că există un adevărat pericol de electrocutare atunci când lucrăm într-un circuit electric. Totuși, posibilitatea apariției electrocutării depășește această graniță datorită răspândirii aparatelor electrice în jurul nostru.

După cum am văzut, rezistența electrică a corpului și a pielii este un factor foarte important atunci când vorbim de pericolul electrocutării. Cu cât rezistența corpului este mai mare, cu atât pericolul apariției unui curent periculos pentru aceeași valoare a tensiunii este mai scăzut, și invers.

### **Nu folosiți aparate și dispozitive electrice în baie**

Cea mai sigură modalitate de descreștere a rezistenței pielii este udarea acesteia. Atingerea dispozitivelor electrice cu mâinile sau picioarele ude sau transpirate (apa sărată este un conductor electric mult mai bun decât apa dulce) este periculoasă. În casă, baia este locul cel mai periculos din acest punct de vedere; din aceasta cauză se recomandă ca prizele să fie montate în afara băii iar pentru descurajarea utilizării dispozitivelor electrice deasupra

căzii, chiuvetei sau a dușului. Nu folosiți niciodată telefoane (fixe sau mobile), radiouri, casetofoane, laptop-uri sau orice alte dispozitive electrice, alimentate fie direct de la rețeaua de alimentare sau cu baterii, în incinta băii.

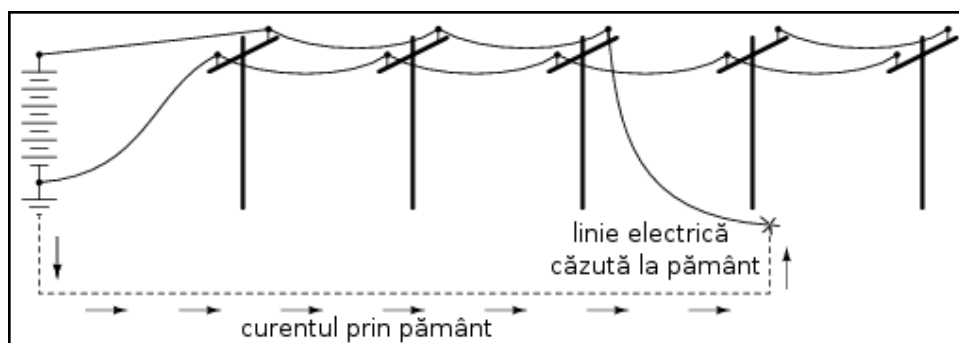
## **Tăiați capătul prelungitoarelor defecte pentru evitarea electrocutărilor**

O altă sursă potențială de pericol o reprezintă prelungitoarele electrice folosite acasă sau în industrie. Toate prelungitoarele trebuie verificate regulat; trebuie să ne asigurăm că izolația acestora nu este deteriorată sau crăpată. O metodă sigură de scoatere din funcțiune a prelungitoarelor deteriorate ce prezintă risc de electrocutare este scoaterea acestora din priză și tăierea prizei mascul (ștecher) ce se conectează în mod normal la priză de alimentare; în acest fel, ne putem asigura că nimeni nu va folosi acel prelungitor până când nu este reparat. Această operație este importantă mai ales în industrie, acolo unde mai mulți oameni folosesc același echipament și nu toți cunosc pericolul la care se pot expune.

## **Nu puneți în funcțiune aparate electrice defecte**

Nu folosiți niciodată un dispozitiv sau aparat electric dacă acesta prezintă probleme electrice de funcționare. Acesta trebuie scos imediat din funcțiune și nu trebuie refolosit până la remedierea situației. La fel ca și în cazul prelungitoarelor, orice dispozitiv electric poate fi scos (temporar) din funcțiune prin tăierea cablului de alimentare după deconectarea din circuit (tăierea ștecherului).

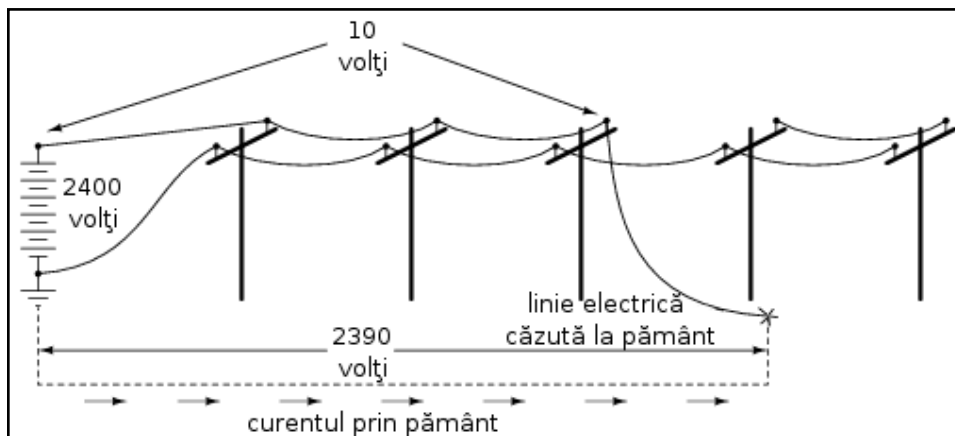
## **Evitați liniile electrice căzute la pământ și stâlpii de înaltă tensiune**



Liniile electrice căzute la pământ sunt un real pericol de electrocutare și trebuie evitate în toate cazurile.

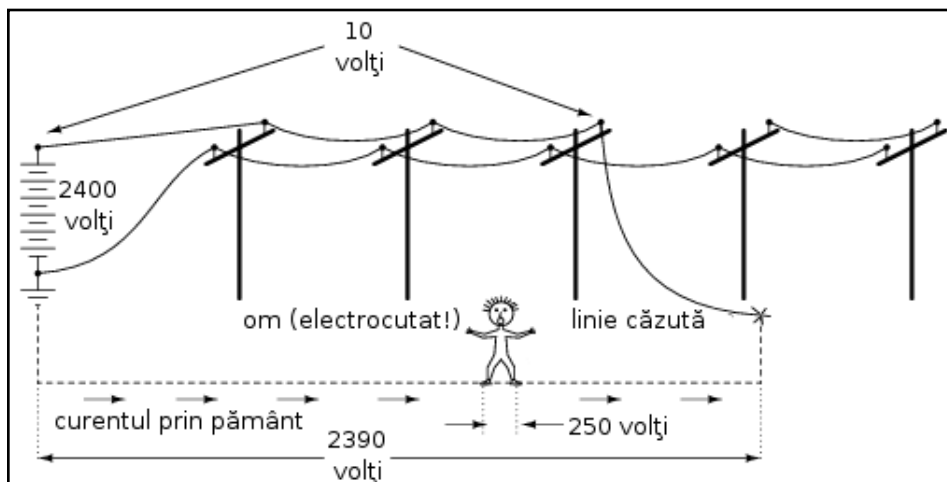
Tensiunile prezente între liniile de alimentare sau între o linie de alimentare și pământ sunt în mod normal foarte mari. Dacă o linie electrică se rupe iar conductorul metalic cade la pământ, rezultatul imediat este producerea arcurilor electrice (scântei) suficient de puternice pentru smulgerea bucăților de ciment sau asfalt. Intrarea în contact cu o linie electrică alimentată căzută la pământ este moarte sigură, dar există și alte pericole ce nu sunt așa de evidente.

Când o linie atinge pământul, circuitul electric se închide prin pământ, ceea ce duce la apariția unui curent prin acesta până la cel mai apropiat punct de împământare din sistem.



Pământul, fiind un conductor (chiar dacă unul prost), va conduce curentul între linia căzută la pământ și cel mai apropiat punct de împământare, reprezentat de un conductor îngropat în pământ pentru un contact cât mai bun.

Datorită faptului că pământul este un conductor electric mult mai slab decât conductoarele electrice de pe stâlpi, majoritatea căderii de tensiune se va regăsi între punctul de contact al cablului căzut la pământ și conductorul folosit pentru împământare; căderea de tensiune în lungul cablului electric va fi mult mai mică (cifrele din figură sunt foarte aproximative).



Dacă distanța dintre punctul de contact al liniei cu pământul și locul împământării este mică, atunci va exista o cădere mare de tensiune pe o distanță relativ scurtă.

Prin urmare, o persoană ce stă pe pământ între aceste două puncte este în pericol de electrocutare datorită diferenței de potențial dintre picioarele sale (Curentul „alege” calea cea mai puțin rezistentă din punct de vedere electric).

Din nou, aceste cifre sunt foarte aproximative, dar ilustrează foarte bine principiul conform căruia o persoană poate deveni victimă a electrocutării datorită unei linii electrice căzute la pământ fără să intre în contact direct cu aceasta!

## Contactul cu pământul

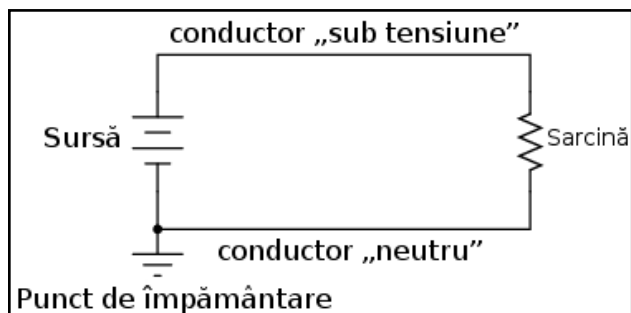
Un mod de a evita acest tip de electrocutare este ca atunci când observăm o linie electrică căzută la pământ să facem contact cu pământul doar într-un singur punct; acest lucru îl putem realiza alergând (când alergăm, doar un singur picior atinge pământul deodată), sau, dacă nu avem unde fugi, să stăm într-un singur picior. Desigur, dacă putem să o facem, alegatul este cea mai bună opțiune. Eliminând contactul în două puncte cu pământul, nu va exista

o diferență de potențial și nici o cădere de tensiune asupra corpului pentru apariția unui potențial curent periculos prin organism.

## 7. Proiectarea aparatelor electrice

- Sistemele de alimentare au adesea conectată o parte a sursei de tensiune la împământare pentru asigurarea împotriva electrocutării în acel punct
- Conductorul conectat la împământare într-un sistem de alimentare poartă numele de conductor neutru, iar celălalt conductor se numește fază
- Împământarea sistemelor de alimentare se realizează pentru prevenirea electrocutărilor și nu afectează performanța circuitului și a sarcinii
- Siguranța în utilizare a aparatelor electrice poate fi îmbunătățită prin folosirea prizelor și conectorilor polarizați, a izolației duble sau a prizelor cu împământare
- Întrerupătoarele automate pot detecta diferența de curent dintre fază și neutru; în cazul în care această diferență este prea mare, circuitul se deschide automat pentru a preveni pericolul apariției electrocutării

### Conductorul de fază și conductorul neutru



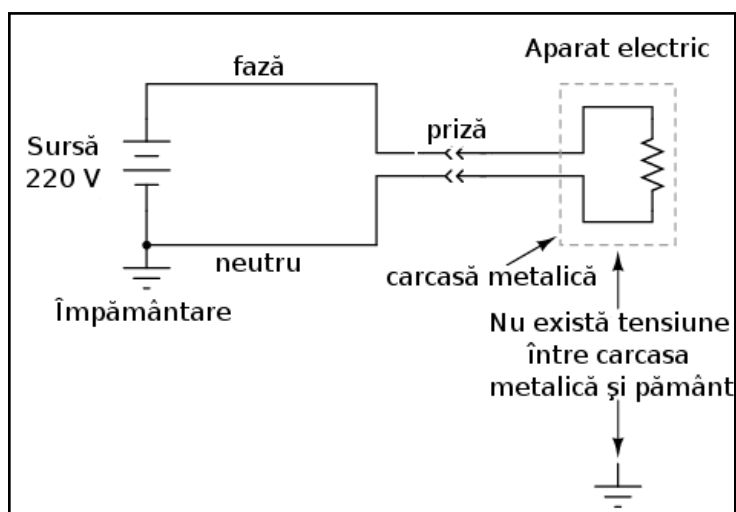
Odată cu realizarea împământării circuitului, cel puțin un punct din circuit este comun cu pământul și prin urmare nu prezintă niciun risc de electrocutare. Într-un sistem electric simplu, format din două fire, conductorul conectat la împământare se numește neutru, iar conductorul aflat sub tensiune se numește fază.

### Atingerea neutrului și a fazei

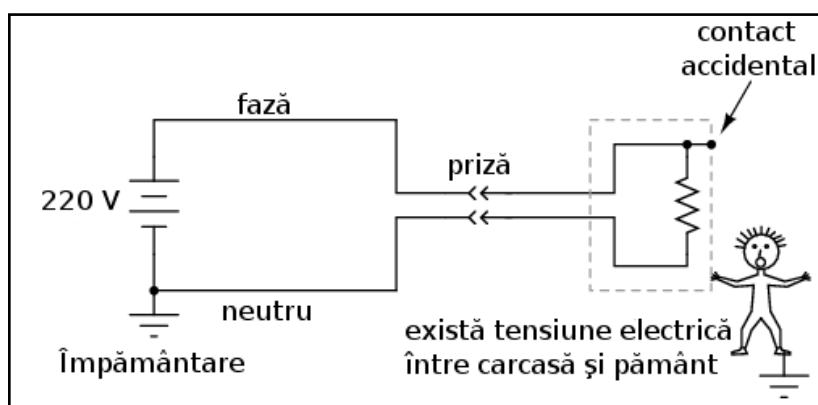
În ceea ce privește sursa de alimentare și sarcina propriu-zisă, existența punctului de împământare nu are niciun efect asupra funcționării circuitului. Acesta există doar pentru siguranța persoanelor ce intră în contact cu circuitul, și înseamnă o cădere de tensiune de 0 volți între circuit și pământ, tensiune la care atingerea circuitului este sigură. Conductorul aflat sub tensiune, în schimb, poate produce electrocutarea persoanelor ce vin în contact cu acesta în cazul în care alimentarea cu energie electrică nu este întreruptă în prealabil.

Este bine de înțeles această diferență de pericole între cei doi conductori într-un circuit electric simplu. Următoarele ilustrații sunt realizate pe baza unui circuit electric de apartament/casă tipic (folosind curentul continuu în acest caz pentru simplitatea prezentării, și nu curent alternativ).

## Carcase metalice neconectate la împământare

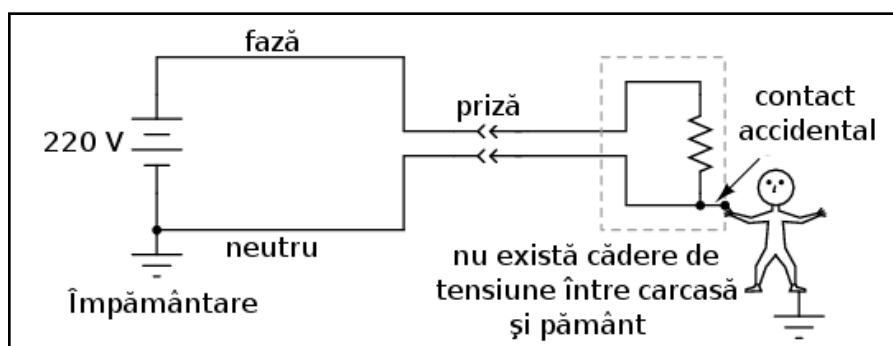


Dacă luăm, de exemplu, un aparat electric, precum un prăjitor de pâine, cu o carcasă metalică, putem observa că teoretic acesta nu ar trebui să prezinte niciun pericol de electrocutare în cazul în care funcționează corespunzător. Firele metalice din interiorul aparatului ce conduc curentul spre elementul de încălzire sunt izolate față de carcasa metalică, precum și între ele, cu un material plastic sau de cauciuc.



Totuși, în cazul în care unul dintre firele existente în interiorul aparatului vine în contact direct cu carcasa metalică, potențialul electric al acesteia va fi egal cu cel al firului, iar atingerea carcasei va fi în acest caz la fel de periculoasă precum atingerea directă a firului. Dacă aceasta situație duce sau nu la electrocutare depinde

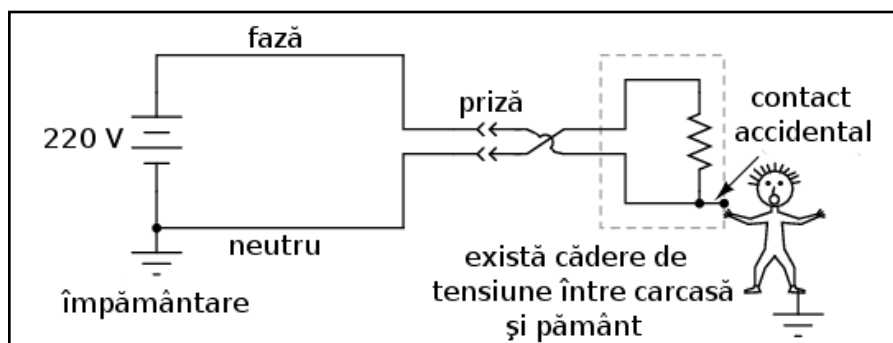
de natura firului ce atinge carcasa.



În cazul în care firul ce intră în contact cu carcasa metalică este faza (firul aflat „sub tensiune”), utilizatorul aparatului se află într-un real pericol. Pe de altă parte, dacă neutru este cel ce atinge carcasa metalică, nu există niciun pericol de

electrocutare.

## Utilizarea prizelor polarizate



Pentru a se asigura că primul caz este mai puțin probabil decât celălalt, se încearcă în general proiectarea aparatelor electrice astfel încât riscul ca faza să intre în contact direct cu carcasa metalică să fie minim.

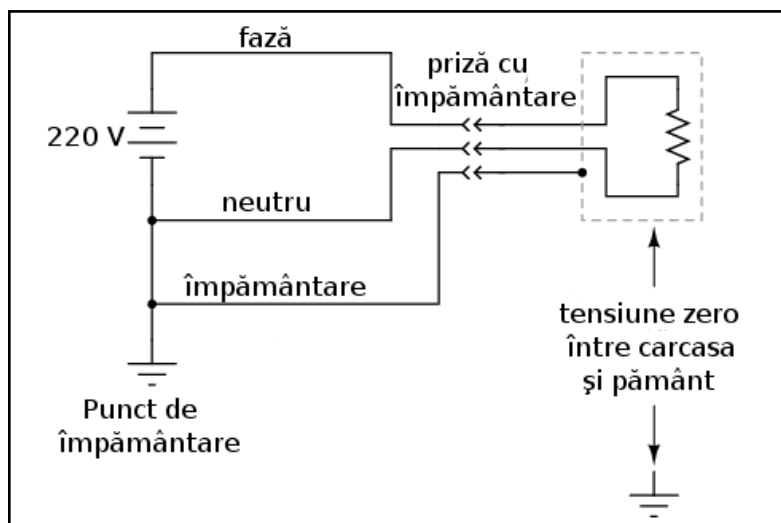
Totuși, această măsură preventivă este eficientă doar în cazurile în care polaritatea prizei poate fi garantată. Dacă polaritatea acesteia poate fi inversată, atunci firul ce intră în contact cu carcasa poate la fel de bine să fie cel aflat sub tensiune.

Aparatele electrice proiectate astfel se folosesc la prizele polarizate, un picior al conectorului fiind mai lat iar celălalt mai îngust (prizele sunt și ele construite în acest fel). Prin urmare, conectorul nu poate fi introdus „invers” în priză, iar identitatea firelor din interiorul aparatului poate fi asigurată în acest fel. Acest lucru nu are niciun efect asupra funcționării aparatului, ci servește doar ca și mijloc de siguranță în utilizare.

## Aparate electrice dublu izolate

O altă metodă este realizarea carcasei exterioare a aparatului dintr-un material non-conductor. Astfel de aparate se numesc dublu-izolate, deoarece carcasa servește ca și izolație adițională pe lângă cea oferită de conductori. Dacă se întâmplă ca un fir din interiorul aparatului să intre în contact cu carcasa, aceasta nu prezintă niciun pericol de electrocutare pentru utilizator.

## Conectarea directă a carcasei metalice la împământare

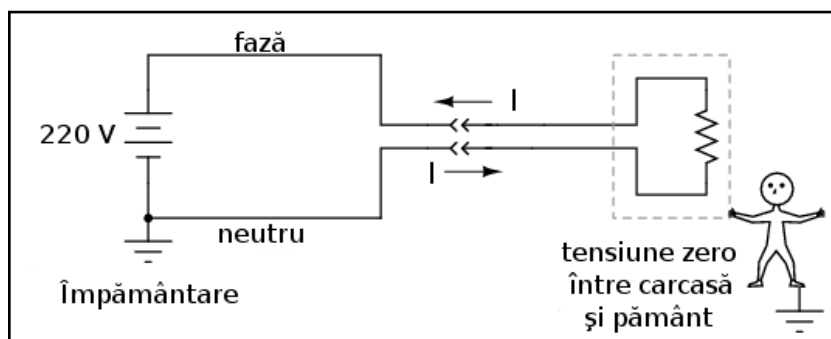


Iar o altă metodă constă în menținerea carcasei metalice, dar și adăugarea unui al treilea conductor între punctul de împământare și carcasa metalică pentru asigurarea unei legături directe și sigure între aceasta și pământ.

Al treilea contact al conectorului prezent la capătul cablului de alimentare asigură o conexiune directă între carcasa metalică a aparatului și pământ. Cele două puncte fiind în acest caz electric comune, nu poate exista nicio cădere de tensiune între ele. Dacă firul aflat sub tensiune (fază) atinge accidental carcasa metalică, se va produce un scurt-circuit prin sursa de tensiune și firul de împământare, scurt-circuit ce va declanșa dispozitivele de protecție la supracurent. Utilizatorul aparatului se va afla în siguranță în tot acest timp.

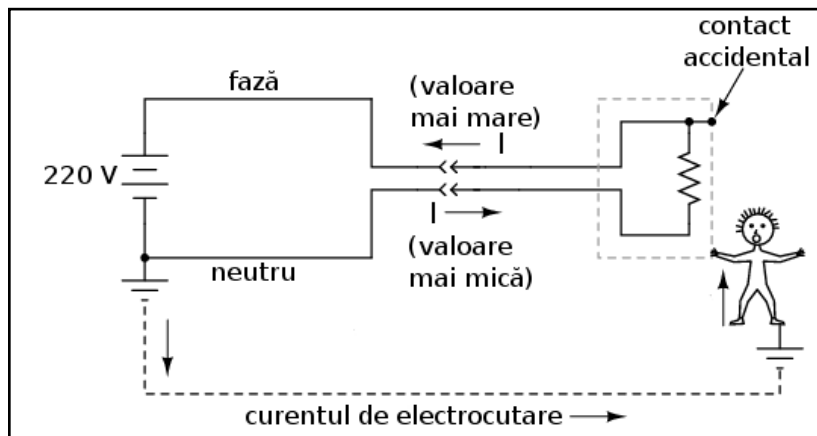
Datorită acestui lucru, nu îndepărtați niciodată al treilea contact al prizei în cazul în care doriți să introduceți un conector fără împământare într-o priză cu împământare. Aparatul va funcționa în continuare fără nicio problemă, dar, prin îndepărtarea acestui contact, nu va mai exista nicio legătură directă între carcasa metalică a aparatului și pământ, existând astfel un real pericol de electrocutare pentru persoanele ce vin în contact direct cu carcasa aparatului în cazul apariției defectelor.

### Detectarea diferenței de curent între fază și neutru

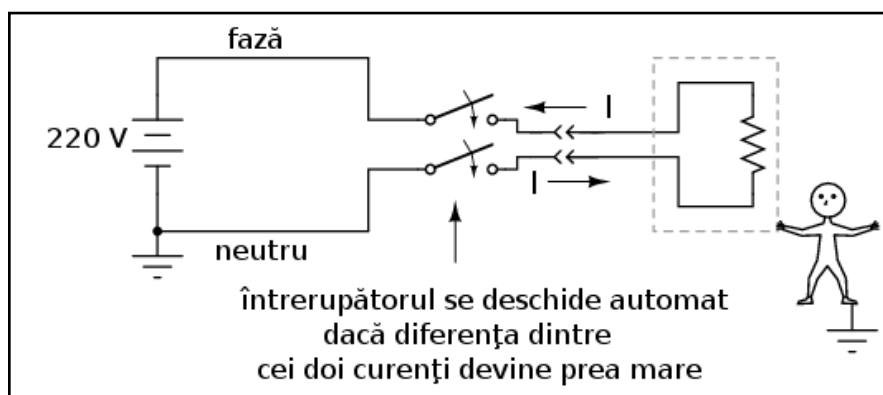


Asigurarea împotriva electrocutării se poate realiza și în altă parte, nu doar asupra aparatului electric.

În cazul unui aparat electric ce funcționează corespunzător, precum în figura de mai sus, valoarea curentului măsurat prin fază ar trebui să fie exact aceeași cu valoarea curentului măsurat prin neutru, datorită faptului că există o singură cale pentru deplasarea electronilor. Dacă nu există nicio defecțiune în interiorul aparatului, nu există niciun pericol de electrocutare.



În schimb, dacă faza atinge accidental carcasa metalică, va exista un curent prin persoana electrocutată și prin pământ, ce reduce curentul prin neutru și amplifică valoarea sa prin fază, ducând la o diferență de curent între cele două.



Diferența de curent între cei doi conductori, fază și neutru, va exista doar în cazul existenței unui curent prin împământare, caz în care există o defecțiune în sistem.

O astfel de diferență a valorilor curenților poate fi folosită pentru detectarea defecțiunilor și a existenței pericolului de electrocutare. Dacă folosim un dispozitiv pentru măsurarea diferenței de curent dintre cei doi conductori, existența acesteia poate fi folosită pentru deschiderea unui întrerupător și „închiderea,, alimentării cu energie electrică de la rețea și prevenirea electrocutării.

## 8. Utilizarea aparatelor de măsură - multimetrul

- Multimetrul este un aparat de măsură capabil să măsoare tensiunea, curentul și rezistența

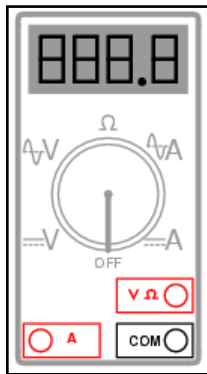
### Multimetrul

Utilizarea corectă și în condiții de siguranță a unui aparat de măsură este o deprindere extrem de importantă pentru orice electrician sau electronist. Această utilizare prezintă un anumit risc de electrocutare datorită tensiunilor și curenților prezenți în circuitul de măsurat. Din această cauză, trebuie acționat foarte atent atunci când utilizăm aparatele de măsură.

Cel mai utilizat aparat de măsură electric poartă numele de multimetru. Denumirea vine de la faptul că aceste aparate sunt capabile să măsoare o plajă largă de variabile, precum tensiune, curent, rezistență și altele. În mâinile unei persoane competente, multimetrul reprezintă un instrument de lucru eficient dar și un dispozitiv de protecție. În mâinile unei persoane ignorante sau neatențe, acesta poate deveni o reală sursă de pericol la conectarea într-un circuit alimentat.

### Prezentarea generală a unui multimetru

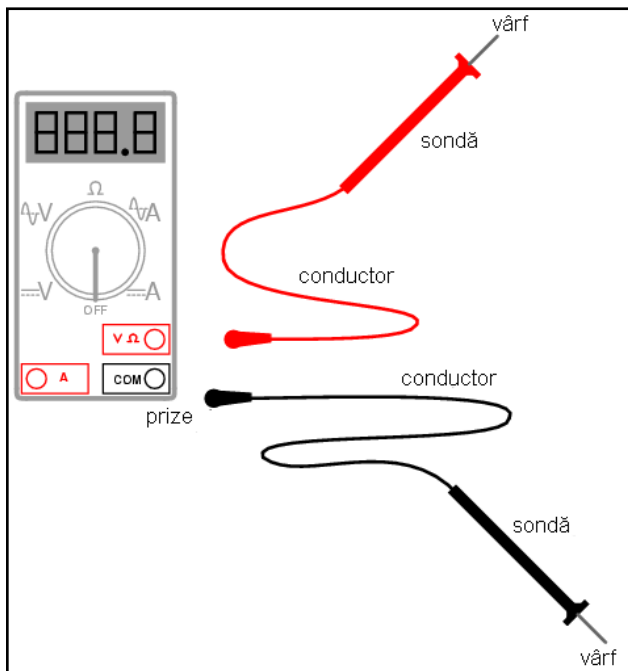




Cu siguranță că există o multitudine de modele, fiecare cu caracteristici diferite, totuși, multimetrul prezentat aici este unul general, utilizat pentru prezentarea principiilor sale de bază. Putem observa că afișajul este digital, din acest motiv, acest tip de multimetru mai poartă numele de multimetru digital.

Selectorul rotativ (setat pe poziția Off (închis) în acest caz) se poate găsi în 5 poziții diferite: 2 poziții „V” (tensiune), 2 poziții „A” (curent), și o poziție Ω (rezistență). De asemenea, poziția marcată cu o pereche de linii orizontale, paralele, una continuă și cealaltă întreruptă, reprezintă curentul continuu, iar poziția reprezentată cu ajutorul unei forme de undă sinusoidale, reprezintă curentul alternativ.

Cu alte cuvinte, intern, multimetrul utilizează metode diferite pentru măsurarea curentului și a tensiunii în curent continuu respectiv curent alternativ, de aici și necesitatea existenței a două poziții pentru fiecare dintre cele două variabile.

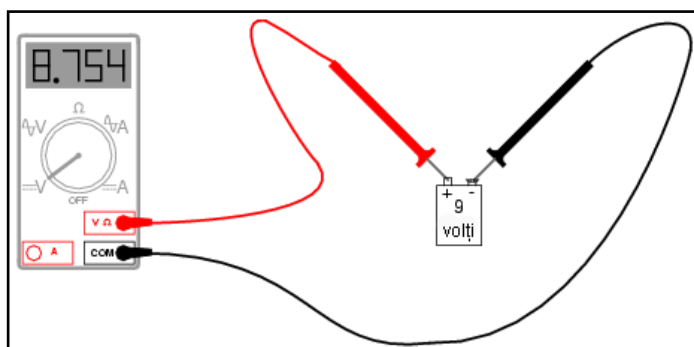


Pe suprafața multimetrului există trei prize în care putem introduce sondele de test. Sondele nu sunt altceva decât conductori speciali utilizați pentru realizarea legăturii dintre circuit și multimetru. Conductorii sunt acoperiți de o izolație colorată, neagră sau roșie, pentru a preveni contactul direct, iar vârfurile sunt ascuțite și rigide.

Sonda neagră va fi tot timpul introdusă în priza neagră a multimetrului, cea marcată cu „COM” (comun). Sonda roșie va fi introdusă fie în priza marcată pentru tensiune și rezistență (V Ω) sau în cea pentru curent (A), în funcție de ce variabilă dorim să măsurăm.

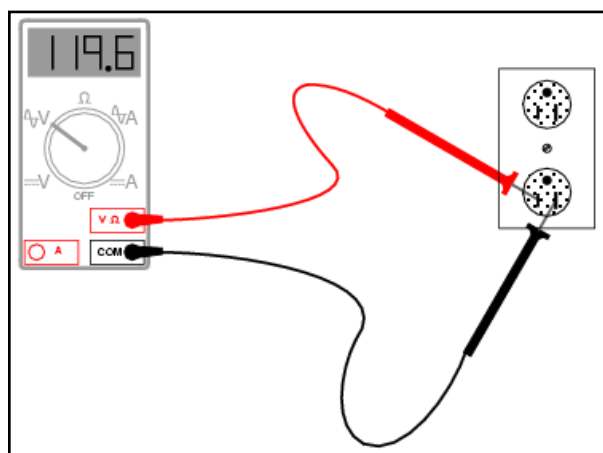
## Utilizarea multimetrului – exemple

### Măsurarea unei tensiuni de curent continuu



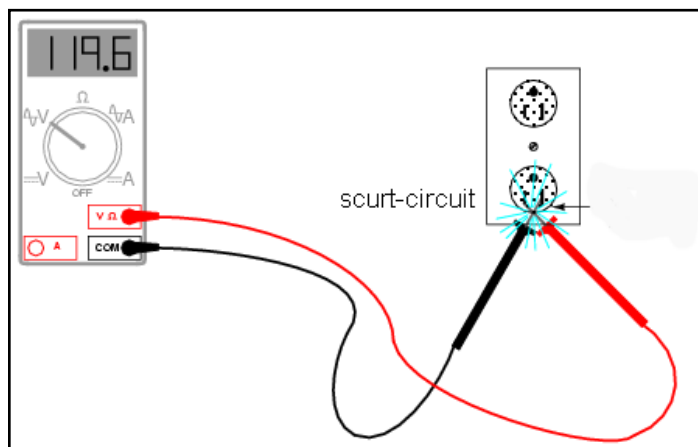
Primul exemplu constă din măsurarea unei tensiuni de c.c. la bornele unei baterii. Observați prizele la care sunt conectate cele două sonde ale multimetrului (V Ω și COM) și faptul că selectorul este setat pe „V” în curent continuu.

## Măsurarea unei tensiuni de curent alternativ



Singura diferență constă în schimbarea poziției selectorului pe poziția „V” în curent alternativ. Din moment ce efectuăm tot o măsurătoare de tensiune, sondele multimetrului vor rămâne conectate în aceleași prize.

## Surse de pericol



În ambele cazuri de mai sus, este extrem de important să nu atingem vârfurile celor două sonde între ele, atunci când acestea se află în contact cu punctele lor respective din circuit. Dacă acest lucru are loc, se va forma un scurt-circuit, lucru pe care nu-l dorim.

Măsurarea tensiunilor este probabil cea mai utilizată funcție a unui multimetru. Este cu siguranță cea mai folosită metodă pentru asigurarea împotriva electrocutărilor, și din acest motiv, trebuie foarte bine înțeleasă de către utilizatorul acestuia. Fiindcă tensiunea este tot timpul relativă între două puncte, aparatul de măsură trebuie să fie conectat între două puncte din circuit pentru a putea oferi un rezultat satisfăcător. Acest lucru înseamnă că ambele sonde trebuie ținute de mâinile utilizatorului pentru crearea contactelor. Dar știm deja că cea mai periculoasă cale pentru curent, în cazul electrocutărilor, este între cele două mâini, deoarece curentul în acest caz trece direct prin inimă; din această cauză, o astfel de măsurătoare reprezintă tot timpul un potențial pericol.

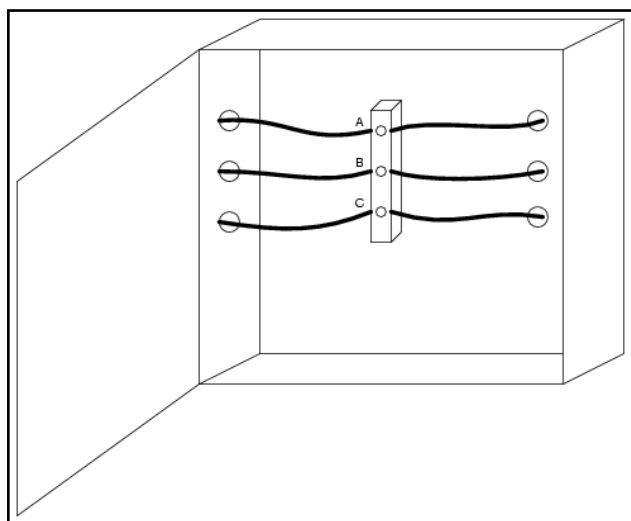
Dacă izolația sondelor este deteriorată sau crăpată, degetele utilizatorului pot intra în contact direct cu conductorii de curent în timpul măsurătorilor. Dacă putem folosi doar o singură mână pentru ambele sonde, aceasta ar fi cea mai sigură metodă de efectuare a măsurătorilor. Câteodată este posibilă „agățarea” uneia dintre sonde pe circuit, nefiind nevoiți să o mai ținem în mână; acest lucru reprezintă o reducere a pericolului electrocutării. Pentru această operație, există accesorii speciale ce pot fi atașate pe vârful sondelor.

Țineți minte că sondele aparatului de măsură sunt parte integrantă a aparatului însuși. Dacă aveți nevoie de accesorii speciale pentru sonde, consultați catalogul producătorului aparatului de măsură sau cataloagele altor producători de echipamente de măsură. Nu încercați să vă construiți propriile sonde! Proiectarea sau realizarea lor defectuoasă vă pot pune într-un real pericol atunci când lucrați într-un circuit alimentat!

De asemenea, trebuie ținut minte că multimetrele digitale realizează diferența dintre c.c. și c.a. După cum am văzut mai devreme, atât tensiunile de curent continuu cât și cele de curent alternativ se pot dovedi periculoase; prin urmare, când folosiți un multimetru pentru asigurarea unui circuit împotriva electrocutării, fiți siguri că ați efectuat măsurătorile atât în c.c. cât și în c.a., chiar dacă nu v-ați aștepta să le găsiți pe amândouă!

### Numărul măsurărilor necesare

Atunci când verificăm prezența unor posibile tensiuni periculoase, trebuie să luăm în calcul toate punctele din scenariul respectiv.



De exemplu, să presupunem că deschidem un panou electric și găsim trei conductori ce alimentează o sursă în curent alternativ. Oprim alimentarea prin intermediul întrerupătorului, încercăm să pornim sarcina pentru a verifica absența oricărei tensiuni și vedem că nu se întâmplă nimic. Următorul pas îl reprezintă măsurarea tensiunii cu ajutorul aparatului de măsură.

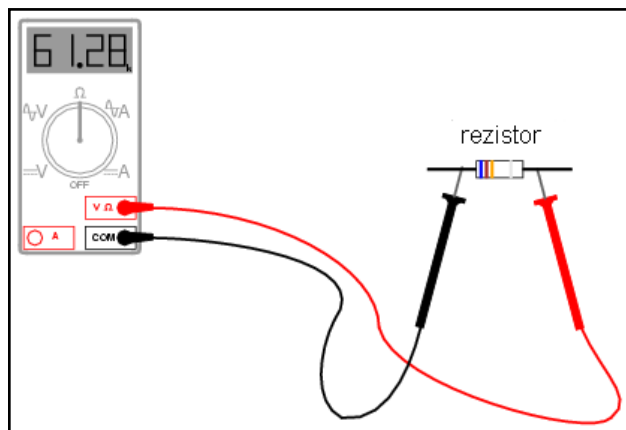
Prima dată verificăm aparatul de măsură asupra unei surse de tensiune cunoscute, pentru a ne asigura de funcționarea sa corectă (priză de c.a., de exemplu). Facem acest lucru și observăm ca multimetrul funcționează corect. Apoi, trebuie să măsurăm căderea de tensiune dintre aceste fire ale panoului. Dar tensiunea reprezintă o valoare între două puncte, prin urmare, ce puncte trebuie să luăm în considerare?

Adevărul este că trebuie să măsurăm căderea de tensiune între toate combinațiile posibile, A cu B, B cu C și A cu C. Dacă măsurăm o cădere de tensiune diferită de zero, în oricare din aceste scenarii, circuitul nu se află într-o stare de energie zero. Dar asta nu e tot. Un multimetru nu va înregistra tensiunile de c.c. atunci când selectorul este poziționat pe c.a. și invers; prin urmare, trebuie să mai efectuăm un set de trei măsurători pentru fiecare din cele două stări.

Totuși, nici în acest caz nu am reușit să acoperim toate posibilitățile. Țineți minte că tensiunile periculoase pot să apară între oricare dintre conductori și pământ (în cazul de față, carcasa metalică a panoului electric). Prin urmare, trebuie să măsurăm căderile de tensiune și între fiecare din cele trei puncte și pământ, atât în c.c. cât și în

c.a. Acest lucru duce numărul măsurătorilor la 12, pentru un scenariu aparent simplu. Desigur, după ce toate măsurătorile au fost încheiate, trebuie să re-testăm funcționarea corectă a multimetrului, prin măsurarea unei căderi de tensiune cunoscute (priza, de exemplu).

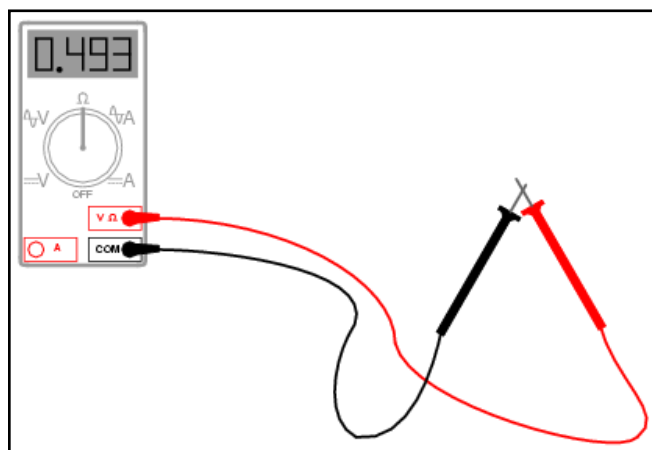
### Măsurarea rezistențelor



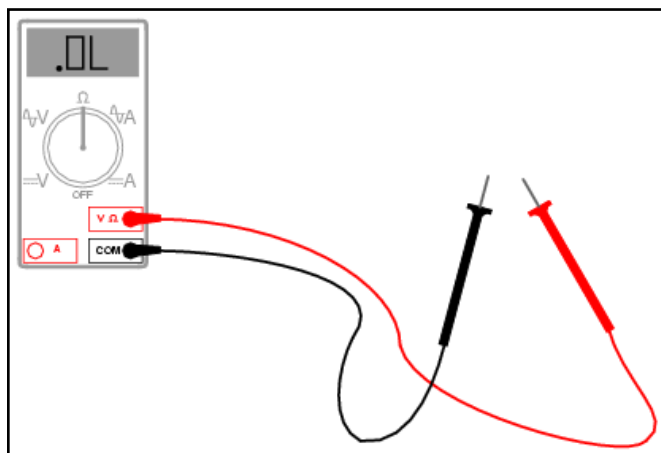
În cazul măsurării rezistențelor, sondele vor rămâne conectate în aceleași prize ale multimetrului ca și în cazul măsurătorilor de tensiune, dar selectorul trebuie poziționat pe  $\Omega$  (vezi figura). Măsurătoarea se realizează simplu, prin poziționarea vârfurilor celor două sonde pe capetele libere ale rezistorilor.

Atenție însă, măsurarea rezistențelor se face doar asupra componentelor nealimentate! Atunci când multimetrul se află în modul „rezistență”, acesta se folosește de o mică baterie internă pentru generarea unui curent mic prin componentul de măsurat. Prin sesizarea dificultății de trecere a curentului prin component, se poate determina rezistența acestuia. Dacă există o sursă adițională de tensiune în circuitul format din aparatul de măsură și componentul în cauză, măsurătorile realizate vor fi greșite. În cel mai rău caz, prezența unei surse adiționale de tensiune în circuit, poate duce la deteriorarea aparatului de măsură.

### Continuitatea firelor

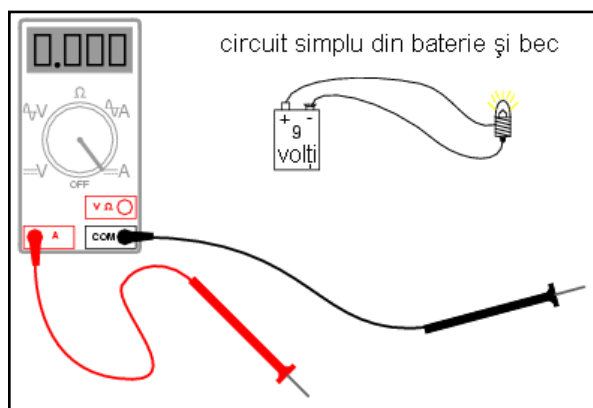


Modul „rezistență” a unui multimetru este foarte folositor și pentru determinarea continuității conductorilor. Atunci când există un contact bun între vârfurile sondelor, aparatul va indica o valoare aproximativ egală cu  $0\Omega$ . Dacă sondele nu ar prezenta nicio rezistență internă, această măsurătoare ar da exact  $0\Omega$ .



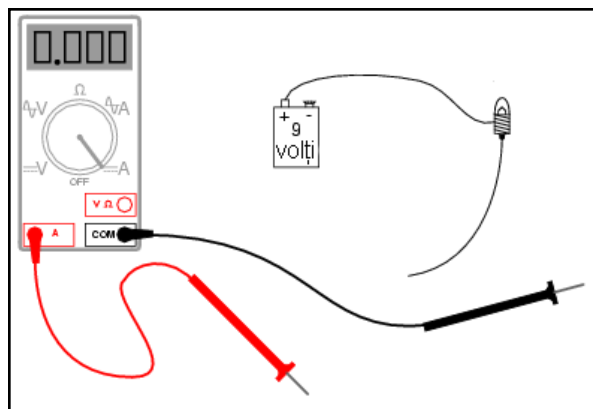
Dacă sondele nu se află în contact direct una cu cealaltă, sau dacă sunt conectate la capetele opuse ale unui conductor întrerupt, acesta va indica o rezistență infinită, reprezentată de obicei pe afișajul multimetrului prin prescurtarea „O.L.” (open loop (eng.) - circuit deschis).

### Măsurarea curentului cu ajutorul multimetrului

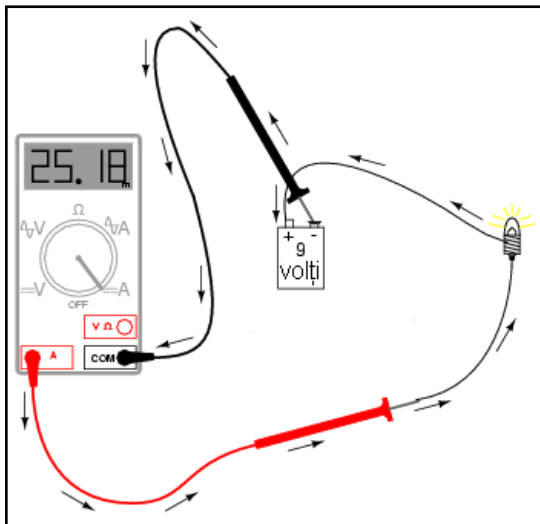


Aceasta reprezintă cea mai complexă și periculoasă aplicație a multimetrului. Motivul este destul de simplu: curentul de măsurat trebuie să treacă prin aparatul de măsură, ceea ce înseamnă că multimetrul trebuie integrat în circuit.

Pentru a realiza acest lucru, circuitul inițial trebuie oprit, iar multimetrul conectat între cele două puncte ale circuitului deschis. Pentru realizarea propriu-zisă a măsurătorii, selectorul trebuie să se afle în poziția „A”, fie în c.a., fie în c.c., iar sonda roșie trebuie introdusă în priza marcată cu „A” (vezi figura).



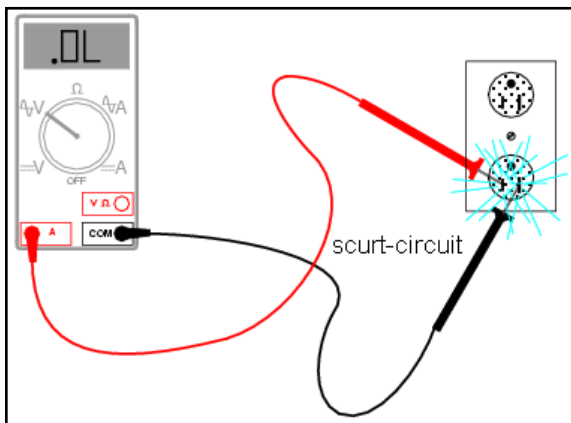
Următorul pas este deschiderea circuitului pentru a putea conecta multimetrul.



Închiderea circuitul se realizează apoi prin multimetru, astfel: conectăm vârful sondelor la capetele libere ale circuitului deschis, sonda neagră la terminalul negativ al bateriei de 9 V, iar sonda roșie la capătul conductorului liber ce duce la bec.

Deși acest circuit, cu o sursă de 9 V, este sigur din punct de vedere al electrocutărilor, în circuitele de putere această metodă reprezintă o adevărată sursă de pericol.

### Selectarea curentului sau a tensiunii



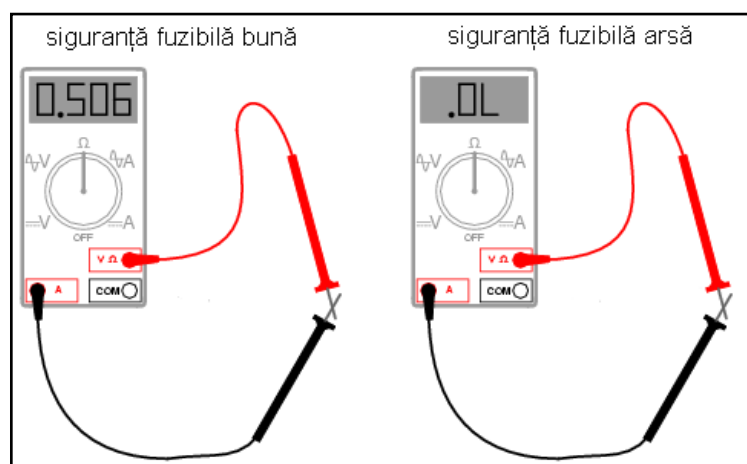
La modificarea poziției multimetrului din modul „curent” (ampermetru) în modul „tensiune” (voltmetru), se întâmplă adesea să schimbăm poziția de pe „A” pe „V” dar să uităm sonda roșie în priza „A” și nu în priza (V  $\Omega$ ).

Dacă aparatul de măsură este apoi conectat la bornele unei surse de tensiune suficient de mari, rezultatul va fi un scurt-circuit prin aparatul de măsură.

Atunci când multimetrul se află în poziția „A”, acesta este proiectat pentru o rezistență între vârful sondelor ce tinde practic la 0  $\Omega$ . În poziția „V”, lucrurile stau exact invers, rezistența dintre vârful sondelor este de ordinul mega-ohmilor (M $\Omega$ ).

Pentru a preveni acest lucru, majoritatea multimetrelor produc un avertisment sonor în cazul în care sonda este introdusă în priza „A” iar selectorul este poziționat pe „V”.

### Verificarea siguranței fuzibile interne



Toate multimetrele de calitate sunt echipate cu siguranțe fuzibile interne, siguranțe ce se ard la trecerea unui curent excesiv prin ele, precum este cazul exemplului anterior.

La fel ca toate dispozitivele de siguranță, și aceste siguranțe sunt proiectate în primul rând pentru protecția echipamentului și doar apoi pentru protecția utilizatorului.

Un multimetru poate fi utilizat pentru verificarea propriei siguranțe prin setarea pe poziția „Ω”, iar sondele pe poziția „A” respectiv „V Ω”. Verificarea se realizează prin contactul direct al celor două sonde.

O siguranța bună va indica o rezistență foarte mică, pe când o siguranța arsă va indica tot timpul un circuit deschis (O.L.). Valoarea măsurătorii nu este de o importanță foarte mare, atâta timp cât este mica.

## 04 - Notăția științifică și prefixe metrice

### 1. Notăția științifică

- Orice valoare poate fi reprezentată prin intermediul cifrelor sale semnificative și o putere a lui zece

#### Scopul notației științifice

În multe discipline științifice și ingineresti, trebuie să lucrăm adesea cu valori foarte mari sau foarte mici. Unele dintre aceste cantități sunt foarte greu de reprezentat, fiind extrem de mari sau extrem de mici. Să luăm ca și exemplu masa protonului, una dintre particulele nucleului atomului:

$$\text{masa protonului} = 0,000000000000000000000000167 \text{ grame}$$

Sau, numărul de electroni ce trec printr-un punct al unui circuit în fiecare secundă, sub influența unui curent de 1 Amper:

$$1 \text{ Amper} = 6.250.000.000.000.000.000 \text{ electroni pe secundă}$$

În ambele cazuri, avem de a face cu mulți de zero. Evident, este destul de incomod să lucrăm cu atât de multe cifre, chiar și cu ajutorul calculatoarelor.

#### Cifrele semnificative

În cazul celor două valori de mai sus, putem observa că există relativ puține cifre diferite de zero în componența acestora. În cazul masei protonului, avem doar „167” precedat de 23 de zero înainte de virgula decimală. Pentru numărul de electroni pe secundă într-un Amper, avem „625” urmat de 16 zerouri. Numim aceste cifre diferite de zero (de la prima la ultima), plus oricare zerouri ce se află între aceste limite, „cifrele semnificative” ale oricărui număr.

Cifrele semnificative rezultate în urma unei măsurători reale indică de obicei acuratețea acelei măsurători. De exemplu, dacă spunem că o mașină cântărește 1.000 kg, probabil că nu dorim să fim foarte exacți referitor la greutatea acesteia, ci am făcut o rotunjire aproximativă și comodă. Această valoare conține doar o cifră semnificativă, și anume, „1”-ul din față, zerourile fiind folosite în acest caz doar pentru a indica un multiplu al primei cifre, și nu „posedă” nicio valoare propriu-zisă. Totuși, dacă am spune că mașina cântărește 1.005 kg, atunci valoarea ar avea 4 cifre semnificative, și anume „1.005”, iar în acest caz, zerourile sunt parte componentă a mărimii măsurate.



În aceeași ordine de idei, numerele cu mai mulți de zero nu sunt neapărat reprezentative pentru o anumită cantitate reală până la punctul decimal. În acest caz, un asemenea număr poate fi scris printr-o prescurtarea matematică pentru a fi mai ușor de citit. Prescurtarea poartă denumirea de notația științifică.

### **Scrierea numerelor mari folosind notația științifică**

Folosind notația științifică, un număr poate fi scris prin intermediul cifrelor semnificative ca și o valoare între 1 și 10 (sau -1 și -10 pentru numerele negative), iar zerourile sunt reprezentate ca și puteri ale lui 10. De exemplu:

$$1 \text{ Amper} = 6.250.000.000.000.000 \text{ electroni pe secundă}$$

poate fi scris sub forma

$$1 \text{ Amper} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ electroni pe secundă}$$

10 la puterea 18 ( $10^{18}$ ) înseamnă 10 înmulțit cu el însuși de 18 ori, sau, un 1 urmat de 18 zerouri. Înmulțit cu 6,25, rezultă „625” urmat de 16 zerouri (luăm 6,25 și mutăm virgula cu 18 locuri spre dreapta). Avantajele notației științifice sunt evidente: numărul nu mai este atât de „imposibil” de scris iar cifrele semnificative sunt foarte ușor de identificat.

### **Scrierea numerelor mici folosind notația științifică**

Ce putem face însă în cazul numerelor foarte mici, precum masa protonului în grame? Putem folosi și în acest caz notația științifică, doar că puterile lui 10 vor fi negative în acest caz, și nu pozitive, ceea ce se traduce printr-o deplasare a virgulei decimale înspre stânga și nu înspre dreapta, precum în cazul precedent.

$$\text{masa protonului} = 0,000000000000000000000000167 \text{ grame}$$

poate fi scris sub forma

$$\text{masa protonului} = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ grame}$$

10 ridicat la puterea -24 ( $10^{-24}$ ) înseamnă inversa ( $1/x$ ) lui 10 înmulțit cu el însuși de 24 de ori, sau, un 1 precedat de o virgulă decimale și de 23 de zerouri. Înmulțit cu 1,67, rezultatul este „167” precedat de virgula decimale și 23 de zerouri. La fel ca și în cazul numerelor foarte mari, notația prescurtată este mult mai ușor de utilizat. Și în acest caz, cifrele semnificative sunt exprimate clar.

Revenind la exemplul precedent, putem exprima valoarea de 1.000 kg cu ajutorul notației științifice, astfel:

$$\text{greutatea} = 3 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

În cazul în care mașina ar cântări 1.005 kg, notația științifică ar fi următoarea:

$$greutatea = 3,005 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

## 2. Aritmetica notației științifice

- Înmulțirea numerelor sub forma notației științifice se realizează înmulțind cele două cifre semnificative și adunând exponenții puterilor lui zece
- Împărțirea numerelor sub forma notației științifice se realizează împărțind cele două cifre semnificative și scăzând exponenții puterilor lui zece

### Înmulțirea numerelor sub forma notației științifice

Beneficiile notației științifice nu se opresc doar la ușurința scrierii numerelor. O asemenea notație este ușor de folosit în cazul înmulțirii și împărțirii numerelor. Să presupunem, de exemplu, că vrem să aflăm numărul de electroni ce trec printr-un anumit punct al unui circuit ce transportă un curent de 1 A într-o perioadă de 25 de secunde. Dacă știm numărul de electroni pe secundă din circuit (ceea ce cunoaștem), tot ceea ce trebuie să facem este să înmulțim acea cantitate cu numărul de secunde (25) pentru aflarea răspunsului:

$$6.250.000.000.000.000.000 \cdot 25 = 156.250.000.000.000.000.000$$

Utilizând notația științifică putem reformula problem astfel:

$$6,25 \cdot 10^{18} \cdot 25$$

Dacă luăm „6,25” și îl înmulțim cu 25, obținem 156,25. Prin urmare, răspunsul poate fi scris astfel:

$$156,25 \cdot 10^{18} \text{ electroni}$$

Totuși, dacă dorim să menținem convenția standard a notației științifice, trebuie să reprezentăm cifrele semnificative ca și numere între 1 și 10. În cazul de față, „1,5625” înmulțit cu o anumită putere a lui 10. Pentru a obține 156,25 din 156,25, trebuie să trecem virgula decimală cu două poziții în stânga. Acest lucru se realizează astfel:

$$156,25 = 1,5625 \cdot 10^2$$

Adică, mutăm virgula decimală cu două poziții în stânga, dar în același timp înmulțim numărul nou format cu 10 la puterea 2 (numărul de poziții). Rezultatul final arată acum astfel (înmulțim numărul de mai sus cu  $10^{18}$ ):

$$1,5625 \cdot 10^{20} \text{ deoarece}$$

$$10^a \cdot 10^b = 10^{a+b})$$

Dacă am dori în schimb să aflăm numărul de electroni ce trec într-un interval de o oră (3.600 secunde)? În acest caz, putem trece și timpul sub forma notației științifice:

$$6,25 \cdot 10^{18} \cdot 3,6 \cdot 10^3$$

Pentru realizarea acestui produs, înmulțim cele două cifre semnificative între ele (6,25 și 3,6), precum și cele două puteri ale lui zece între ele, astfel:

$$6,25 \cdot 3,6 = 22,5$$

$$10^{18} \cdot 10^3 = 10^{21}$$

Ceea ce înseamnă:

$$22,5 \cdot 10^{21} \text{ electroni}$$

sau

$$2,25 \cdot 10^{22} \text{ electroni}$$

### Împărțirea numerelor sub forma notației științifice

Pentru ilustrarea operației de împărțire cu numere sub forma notației științifice, putem să luăm exemplul de mai sus invers, și anume, să aflăm cât timp le-ar trebui acelui număr de electroni ( $2,25 \times 10^{22}$ ) să treacă prin circuit, în cazul unui curent de 1 A:

$$\frac{2,25 \cdot 10^{22} \text{ electroni}}{6,25 \cdot 10^{18} \text{ electroni pe secundă}}$$

La fel ca și în cazul înmulțirii, putem realiza calculele separat pentru cifrele semnificative și pentru puterile lui zece:

$$\begin{aligned} \frac{2,25}{6,25} \cdot \frac{10^{22}}{10^{18}} &= 0,36 \cdot 10^4 \text{ secunde} \\ &= 3,6 \cdot 10^3 \text{ secunde} \end{aligned}$$

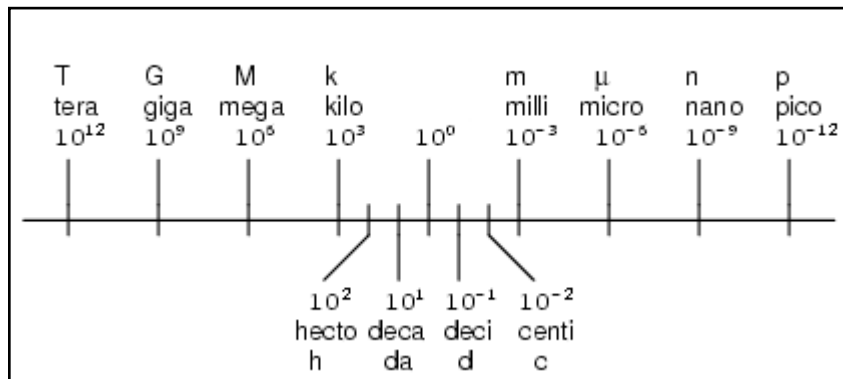
Putem vedea că am ajuns la aceeași valoarea, 3.600 secunde ( $3,6 \times 10^3$ ).

### 3. Notația metrică

- Față de notația științifică, notația metrică utilizează prefixe alfabetice în loc de puteri ale lui zece

## Scop și prezentare

Sistemul metric, pe lângă faptul că reprezintă o colecție de unități de măsură pentru diferite mărimi fizice, este structurat în jurul conceptului de notație metrică. Diferența față de notația științifică o reprezintă faptul că puterile lui zece sunt reprezentate cu ajutorul prefixelor alfabetice.



În imaginea alăturată sunt prezentate câteva dintre cele mai uzuale prefixe alături de reprezentarea lor sub forma puterilor lui zece. Pentru o descriere completă a tuturor prefixelor metrice utilizate, vedeți intrarea de pe Wikipedia, aici.

Urmărind această scală, putem vedea că, de exemplu, 2,5 G (giga) înseamnă de fapt  $2,5 \times 10^9$ , sau 2,5 miliarde. De asemenea, 3,21 pA (picoamperi) înseamnă  $3,21 \times 10^{-12}$  Amperi.

Deoarece majoritatea prefixelor în sistemul metric se referă la puteri ale lui 10 ce sunt multiplii de 3, notația metrică diferă de notația științifică prin faptul că cifrele semnificative se pot regăsi oriunde în intervalul 1 - 1000, în funcție de prefixul ales. De exemplu, pentru o greutate de 0,000267 grame, cele două notații arată astfel:

$$2,67 \cdot 10^{-4} \text{ g (notația științifică)}$$

$$267 \text{ } \mu\text{g (notația metrică)}$$

$$0,267 \text{ (notația metrică)}$$

## Conversia prefixelor metrice

Pentru a exprima o cantitate printr-un prefix metric diferit față de cel inițial, trebuie doar să mutăm virgula decimală spre stânga sau spre dreapta, în funcție de caz.

De exemplu, să exprimăm 0,000023 A (amperi) în mA (microamperi). Putem observa că 0,000023 A nu utilizează niciun prefix metric, ci reprezintă doar unitatea de măsură „pură”. Din graficul de mai sus, vedem că micro ( $\mu$ ) reprezintă  $10^{-6}$ , prin urmare, trebuie să deplasăm virgula decimală cu 6 poziții spre dreapta, iar rezultatul arată astfel:

$$0,000023 \text{ A} = 23 \text{ } \mu\text{A}$$

Un alt exemplu: dorim să exprimăm 304.212 V (volți) în kV (kilovolți). Din nou, putem observa că acest număr nu are momentan niciun prefix. Astfel, dacă dorim să trecem de la  $10^0$  (vezi graficul de mai sus) la  $10^3$  (kilo) în stânga, trebuie să mutăm virgula decimală cu 3 poziții spre stânga:

$$304,212 \text{ V} = 304,212 \text{ kV}$$

Să presupunem acum că dorim să transformăm 50,3  $\text{M}\Omega$  (megaohmi) în  $\text{m}\Omega$  (miliohmi). 50,3  $\text{M}\Omega$  înseamnă  $50,3 \times 10^6 \Omega$ . Uitându-ne pe graficul de mai sus, observăm că de la Mega la mili există o diferență de 9 puteri ale lui zece (de la  $10^6$  la  $10^{-3}$ , de la stânga la dreapta), prin urmare, trebuie să deplasăm virgula decimală cu 9 poziții spre dreapta:

$$50,3 \text{ M}\Omega = 50.300.000.000 \text{ m}\Omega$$

## 05 - Circuite serie și paralel

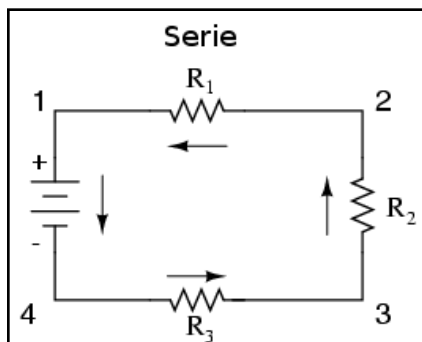
### 1. Ce sunt circuitele „serie” și „paralel”

- Într-un circuit serie, toate componentele sunt conectate unul în continuarea celuilalt, formând o singură cale pentru curgerea electronilor.
- Într-un circuit paralel, toate componentele sunt conectate la același capăt, formând exact un set de două puncte electric comune.
- O „ramură” într-un circuit paralel este o cale pentru curgerea curentului formată din cel puțin o sarcină (rezistență) din circuit.

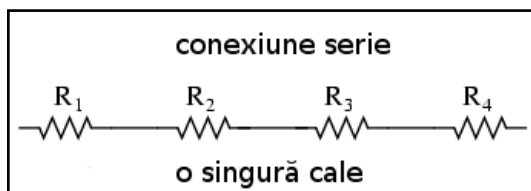
Circuitele formate dintr-o singură baterie și o singură rezistență sunt foarte ușor de analizat, dar nu sunt foarte des întâlnite în practică. De obicei circuitele conțin mai mult de două componente conectate între ele.

#### Conexiunea serie

Există două modalități de bază în care putem conecta mai mult de două componente într-un circuit: serie și paralel. Mai jos avem un exemplu de circuit serie:



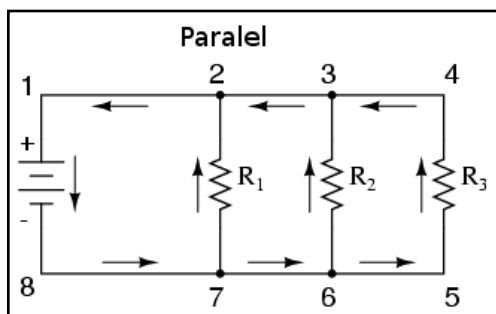
În acest circuit avem 3 rezistori ( $R_1$ ,  $R_2$  și  $R_3$ ) conectați într-un singur lanț de la un terminal al bateriei la celălalt. Caracteristica principală a unui circuit serie este existența unei singure căi pentru curgerea electronilor.



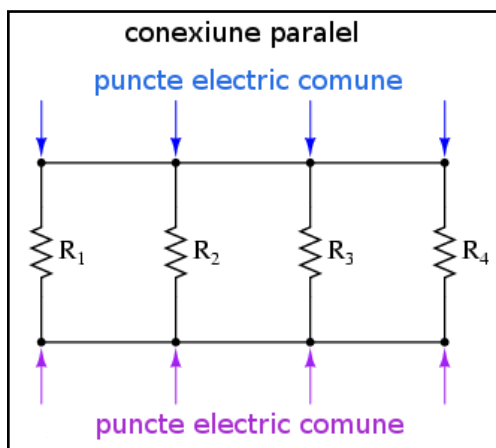
Idea de bază într-o conexiune serie este conectarea componentelor de la un capăt la altul într-o linie dreaptă.

#### Conexiunea paralel

Să ne uităm acum și la celălalt tip de circuit, cel paralel:



Și în acest caz avem tot 3 rezistori, dar de data această există mai multe căi pentru curgerea electronilor. Există o cale de la 8 la 7, 2, 1 și înapoi la 8. Mai există una de la 8 la 7, 6, 3, 2, 1 și înapoi la 8. Și mai există o a treia cale de la 8 la 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 și înapoi la 8. Fiecare cale individuală (prin  $R_1$ ,  $R_2$  și  $R_3$ ) poartă denumirea de ramură.

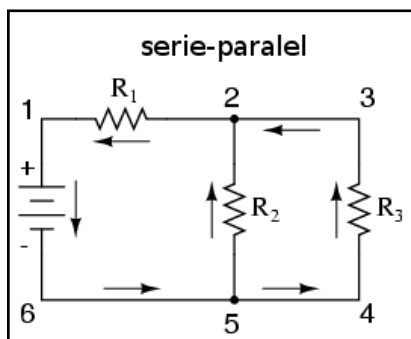


Caracteristica definitorie pentru un circuit paralel este faptul că toate componentele sunt conectate electric între aceleași seturi de puncte. În circuitul de mai sus, punctele 1, 2, 3 și 4 sunt toate comune din punct de vedere electric. La fel și punctele 8, 7, 6 și 5. Toate rezistoarele, precum și bateria, sunt conectate între aceste două puncte.

Într-un circuit pur paralel, nu există niciodată mai mult de două puncte comune, indiferent de numărul componentelor din circuit conectate. Există mai mult de o singură cale pentru deplasarea electronilor, dar o singură cădere de tensiune asupra tuturor componentelor.

## Circuite serie-paralel combinate

Desigur, complexitatea nu se oprește nici la circuite serie sau paralel! Putem avea de asemenea circuite ce sunt o combinație dintre acestea două:



În acest circuit, avem două ramuri prin care electronii pot să circule: una de la 6 la 5, 2, 1 și înapoi la 6, iar altă ramură de la 6 la 5, 4, 3, 2, 1 și înapoi la 6. Observați cum ambele drumuri trec prin  $R_1$  (de la punctul 2 spre punctul 1). În această configurație, spunem că  $R_1$  și  $R_2$  sunt paralele între ele, în timp ce  $R_1$  este în serie cu combinația paralelă  $R_1$  și  $R_2$ .

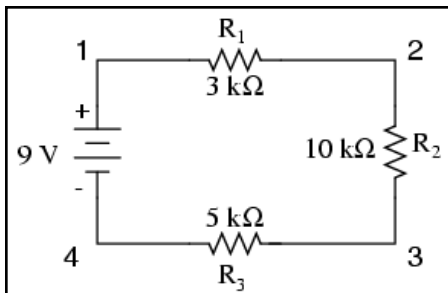
Cele două tipuri de configurații, serie și paralel, prezintă proprietăți electrice total diferite.

## 2. Circuite serie simple

- Într-un circuit serie, rezistența totală este egală cu suma rezistențelor individuale a tuturor rezistorilor din circuit:  $R_{\text{Total}} = R_1 + R_2 + \dots R_n$
- Într-un circuit serie, curentul este același prin fiecare component:  $I_{\text{Total}} = I_1 = I_2 = \dots I_n$
- Într-un circuit serie, tensiunea totală este egală cu suma căderilor individuale de tensiune pe fiecare component în parte:  $E_{\text{Total}} = E_1 + E_2 + \dots E_n$

### Curentul într-un circuit serie

Să începem cu un circuit electric format dintr-o baterie și trei rezistori:

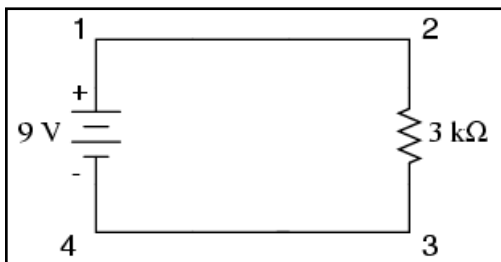


Primul principiu pe care trebuie să-l înțelegem legat de circuitele serie este păstrarea constantă a valorii curentului în întreg circuitul, și prin urmare, prin fiecare component (prin fiecare component va trece aceeași cantitate de curent electric). Acest lucru se datorează existenței unei singure căi pentru trecerea electronilor, iar dacă privim circuitul ca un tub cu mărgele, putem înțelege de ce rata de deplasare a mărgelilor trebuie să fie aceeași în

orice punct al tubului (circuitului).

### Legea lui Ohm într-un circuit simplu

După modul în care este așezată bateria de 9 volți în circuit, ne putem da seama că deplasarea electronilor se va realiza în sens invers acelor de ceasornic (atenție, folosim sensul real de deplasare al electronilor în circuit), de la punctul 4 la 3, 2, 1 și înapoi la 4. Totuși, avem o singură sursă de tensiune și trei rezistori. Cum putem aplica legea lui Ohm în acest caz?



Un principiu important de ținut minte legat de legea lui Ohm, este relația dintre tensiune, curent și rezistență între aceleași două puncte din circuit. De exemplu, în cazul unei singure baterii și a unui singur rezistor în circuit, putem calcula foarte ușor valorile curentului, pentru că acestea se referă la aceleași două puncte din circuit.

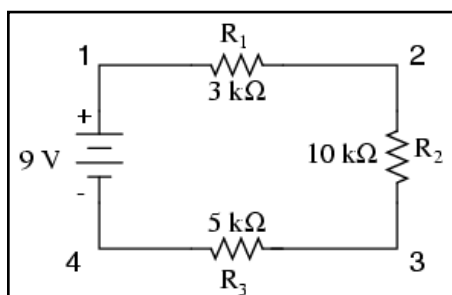
$$I = \frac{E}{R} = \frac{9\text{ V}}{3\text{ k}\Omega} = 3\text{ mA}$$



Din moment ce punctele 1 și 2 sunt conectate împreună printr-un fir de o rezistență neglijabilă (la fel și punctele 3 și 4), putem spune că punctele 1 și 2 sunt comune, precum și că punctele 3 și 4 sunt comune între ele. De asemenea, știm faptul că avem o tensiune de 9 volți între punctele 1 și 4 (direct asupra bateriei), și pentru că punctele 1 și 2 cu punctele 3 și 4 sunt comune, trebuie de asemenea să avem tot 9 volți între punctele 2 și 3 (direct asupra rezistorului).

Prin urmare, putem aplica legea lui Ohm ( $I=E/R$ ) asupra curentului prin rezistor, pentru că știm tensiunea ( $E$ ) la bornele rezistorului precum și rezistența acestuia. Toți termenii ( $E$ ,  $I$ ,  $R$ ) se aplică în cazul acelorași două puncte din circuit, asupra aceluiași rezistor, prin urmare putem folosi legea lui Ohm fără nicio problemă.

## Circuite cu mai mult de un rezistor



Totuși, în circuitele ce conțin mai mult de un singur rezistor, trebuie să fim atenți cum aplicăm legea lui Ohm. În exemplul de jos cu trei rezistori în circuit, știm că avem 9 volți între punctele 1 și 4, valoarea reprezentând forța electromotoare disponibilă pentru împingerea electronilor prin conexiunea serie realizată din rezistorii  $R_1$ ,  $R_2$  și  $R_3$ . Nu putem însă împărți cei 9 volți la  $3k\Omega$ ,  $10k\Omega$  sau  $5k\Omega$  pentru a găsi valoarea curentului, pentru că nu cunoaștem de fapt valoarea tensiunii pe fiecare din rezistori în parte, ci cunoaștem valoarea tensiunii pe întreg ansamblul de rezistori.

Valoarea de 9 volți reprezintă o cantitate totală a circuitului, pe când valorile de  $3k\Omega$ ,  $10k\Omega$  și  $5k\Omega$ , reprezintă cantități individuale. Dacă ar fi să folosim în cadrul legii lui Ohm o valoare totală (tensiunea în acest caz) concomitent cu o valoare individuală (rezistența în acest caz), rezultatul nu va fi același pe care îl vom regăsi într-un circuit real.

În cazul lui  $R_1$ , legea lui Ohm se va folosi specificând tensiunea și curentul la bornele rezistorului  $R_1$ , și valoarea rezistenței lui,  $3k\Omega$ :

$$I_{R1} = \frac{E_{R1}}{3 k\Omega}$$

$$E_{R1} = I_{R1} \cdot 3 k\Omega$$

Dar din moment ce nu cunoaștem tensiunea la bornele lui  $R_1$  (doar tensiunea totală pe toți cei trei rezistori conectați în serie), și nu cunoaștem nici curentul prin  $R_1$  (curentul prin întreg circuitul de fapt, deci și prin ceilalți doi rezistori), nu putem realiza niciun calcul cu niciuna dintre formule. Același lucru este valabil și pentru  $R_2$  și  $R_3$ .

Prin urmare, ce putem face? Dacă am cunoaște valoarea totală a rezistenței din circuit, atunci am putea calcula valoarea totală a curentului pentru cantitatea totală a tensiunii ( $I=E / R$ ).

## Rezistența totală într-un circuit serie

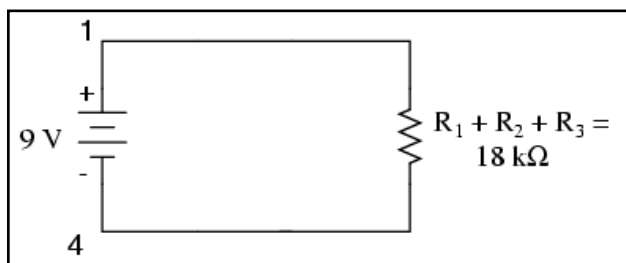
Cu această observație putem enunța al doilea principiu al circuitelor serie: în oricare circuit serie, rezistența totală a circuitului este egală cu suma rezistențelor individuale a fiecărui rezistor, prin urmare, cu cât avem mai multe rezistențe în circuit, cu atât mai greu le va fi electronilor să se deplaseze prin circuit:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

În exemplul nostru, avem trei rezistori în serie, de 3 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , respectiv 5 k $\Omega$ , ceea ce rezultă într-o rezistență totală de 18 k $\Omega$ :

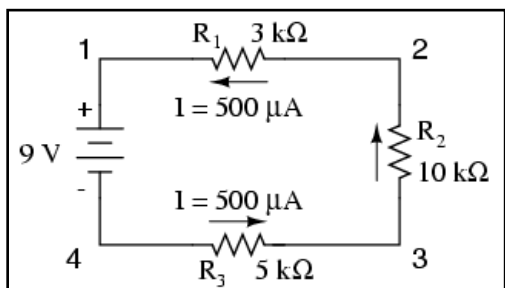
$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 = 3 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega = 18 \text{ k}\Omega$$

Ceea ce am făcut de fapt, a fost să calculăm rezistența echivalentă a rezistorilor de 3 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  și 5 k $\Omega$  luați împreună. Cunoscând acest lucru, putem redesena circuitul cu un singur rezistor echivalent reprezentând combinația serie a celor trei rezistori  $R_1$ ,  $R_2$  și  $R_3$ .



Acum avem toate informațiile necesare pentru calcularea curentului prin circuit, deoarece avem tensiunea între punctele 1 și 4 (9 volți), precum și rezistența între punctele 1 și 4 (18 k $\Omega$ ):

$$I_{total} = \frac{E_{total}}{R_{total}} = \frac{9 \text{ V}}{18 \text{ k}\Omega} = 500 \mu\text{A}$$



Cunoscând faptul că prin fiecare component curentul este același (circuit serie), și cunoscând valoarea curentului total în cazul de față, putem reveni la circuitul inițial pentru a nota valoarea curentului prin fiecare component în parte.

## Tensiunea totală într-un circuit serie

Întrucât valoarea curentului prin fiecare rezistor este acum cunoscută, putem folosi legea lui Ohm pentru determinarea căderilor de tensiune pe fiecare component în parte:

$$E_{R1} = I_{R1} R_1 = 500 \mu\text{A} \cdot 3 \text{ k}\Omega = 1,5 \text{ V}$$

$$E_{R2} = I_{R2} R_2 = 500 \mu\text{A} \cdot 10 \text{ k}\Omega = 5 \text{ V}$$

$$E_{R3} = I_{R3} R_3 = 500 \mu\text{A} \cdot 5 \text{ k}\Omega = 2,5 \text{ V}$$

Putem observa căderea de tensiune pe fiecare rezistor în parte și faptul că suma acestor căderi de tensiune (1,5 V + 5 V + 2,5 V) este egală cu tensiunea la bornele bateriei, 9 V. Acesta reprezintă al treilea principiu al circuitelor serie: tensiune electromotoare (a bateriei) este egală cu suma căderilor de tensiune pe fiecare component în parte:

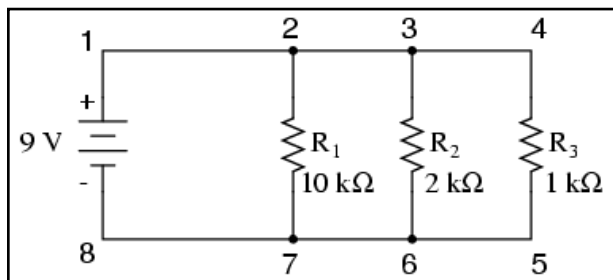
$$E_{total} = E_1 + E_2 + \dots + E_n$$

Circuitele serie sunt folosite ca și divizoare de tensiune.

### 3. Circuite paralel simple

- Într-un circuit paralel, căderea de tensiune pe fiecare component este aceeași:  $E_{Total} = E_1 = E_2 = \dots E_n$
- Într-un circuit paralel, curentul total este egal cu suma curenților individuali prin fiecare ramură:  $I_{Total} = I_1 + I_2 + \dots I_n$ .
- Într-un circuit paralel, rezistența totală este mai *mică* decât rezistențele oricărui rezistor luat în parte:  $R_{Total} = 1 / (1/R_1 + 1/R_2 + \dots 1/R_n)$

#### Căderea de tensiune într-un circuit paralel



Să considerăm un circuit paralel format din trei rezistori și o singură baterie.

Primul principiu pe care trebuie să-l înțelegem despre circuitele paralele este legat de faptul că într-un circuit paralel, tensiunea este egală la bornele tuturor componentelor. Acest lucru se datorează existenței a unui număr de numai două seturi de puncte comune din punct de vedere electric într-un circuit paralel, iar tensiunea măsurată între seturi de puncte comune trebuie să fie tot timpul aceeași.

Prin urmare, în circuitul de mai sus, tensiunea la bornele rezistorului  $R_1$  este egală cu tensiunea la bornele rezistorului  $R_2$ , egală cu tensiunea (căderea de tensiune) la bornele rezistorului  $R_3$  și de asemenea egală cu tensiunea (electromotoare) la bornele bateriei:

$$I_{R1} = \frac{E_{R1}}{R_1} = \frac{9\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = 0,9\text{ mA}$$

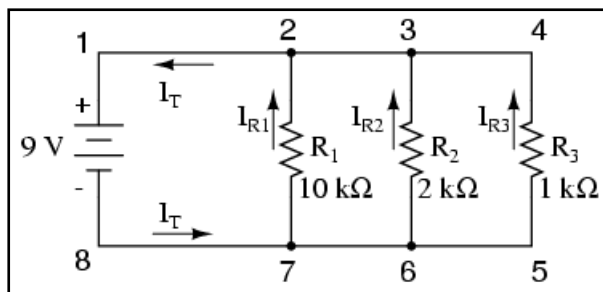
$$I_{R2} = \frac{E_{R2}}{R_2} = \frac{9\text{ V}}{2\text{ k}\Omega} = 4,5\text{ mA}$$

$$I_{R1} = \frac{E_{R1}}{R_1} = \frac{9 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 9 \text{ mA}$$

Ca și în cazul circuitelor serie, dacă dorim aplicarea legii lui Ohm, valorile tensiunii, curentului și ale rezistenței trebuie să fie în același context (total sau individual) pentru a obține rezultate reale prin aplicarea formulelor. Totuși, în circuitul de mai sus, putem aplica de la început legea lui Ohm fiecărui rezistor în parte, pentru că se cunoaște tensiunea la bornele fiecărui rezistor (9 volți) precum și rezistența fiecărui rezistor.

## Curentul total într-un circuit paralel

Până în acest moment, nu cunoaștem valoarea totală a curentului, sau rezistența totală a acestui circuit paralel, astfel că nu putem aplica legea lui Ohm pentru a afla valoarea totală a curentului prin circuit (între punctele 1 și 8 de exemplu).



Totuși, putem observa că valoarea totală a curentului prin circuit trebuie să fie egală cu suma valorilor curenților prin fiecare ramură (fiecare rezistor în parte).

$$I_t = I_{R1} + I_{R2} + I_{R3} = 0,9 \text{ mA} + 4,5 \text{ mA} + 9 \text{ mA} = 14,4 \text{ mA}$$

Pe măsură ce curentul iese prin terminalul negativ (-) al bateriei la punctul 8 și se deplasează prin circuit, o parte din această cantitate se împarte în două la punctul 7, o parte mergând spre  $R_1$ . La punctul 6 o parte din cantitate se va îndrepta spre  $R_2$ , iar ceea ce mai rămâne va curge spre  $R_3$ . Același lucru se întâmplă pe partea cealaltă, la punctele 4, 3 și 2, numai că de această dată curenții se vor aduna și vor curge împreună spre terminalul pozitiv al bateriei (+), la punctul 1. Cantitatea de electroni (curentul) ce se deplasează din punctul 2 spre punctul 1 trebuie să fie egală cu suma curenților din ramurile ce conțin rezistorii  $R_1$ ,  $R_2$  și  $R_3$ .

Acesta este al doilea principiu al circuitelor paralele: valoarea totală a curentului prin circuit este egală cu suma curenților de pe fiecare ramură în parte:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

## Rezistența totală într-un circuit paralel

Și, în sfârșit, aplicând legea lui Ohm pe întreg circuitul, putem calcula valoarea totală a rezistenței prezentă în circuit:

$$R_{total} = \frac{E_{total}}{I_{total}} = \frac{9 \text{ V}}{14,4 \text{ mA}} = 625 \Omega$$

Trebuie să observăm un lucru foarte important în acest caz. Valoarea rezistenței totale este de numai 625  $\Omega$ : mai puțin decât valoarea oricărei rezistențe luate separat. În cazul circuitelor serie, unde rezistența totală este egală cu suma tuturor rezistențelor individuale, suma totală a fost mai mare decât valoarea oricărei rezistențe luate separat. În cadrul circuitelor paralel, este exact invers. Acesta este al treilea principiu al circuitelor electrice paralel, iar matematic, această relație între rezistența totală și rezistențele individuale din circuit poate fi exprimată astfel:

$$R_{total} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

#### 4. Conductanța electrică

- Conductanța este opusul rezistenței și reprezintă *ușurința* electronilor la curgerea printr-un circuit/component.
- Simbolul conductanței este litera „G”, iar unitatea de măsură este „Siemens”.
- Matematic, conductanța este inversul rezistenței:  $G=1/R$

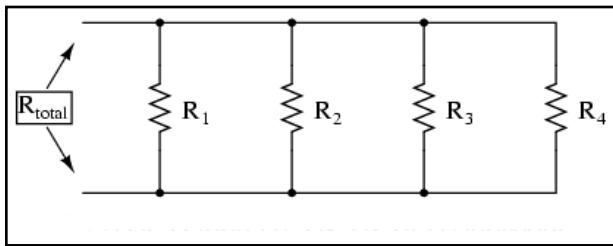
#### Conductanța reprezintă inversa rezistenței

Prin definiție, rezistența este mărimea ce măsoară frecarea întâmpinată de electroni atunci când se deplasează prin componentul respectiv (rezistor). Totuși, putem să ne gândim și la inversa acestei mărimi electrice: ușurința deplasării electronilor printr-un component. Denumirea acestei mărimi este conductanța electrică, în opoziție cu rezistența electrică.

Matematic, conductanța este inversa rezistenței:

$$\text{conductanța} = \frac{1}{\text{rezistența}}$$

Cu cât valoarea rezistenței este mai mare, cu atât mai mică va fi cea a conductanței și invers. Simbolul folosit pentru desemnarea conductanței este G, iar unitatea de măsură este Siemens, abreviat prin S.

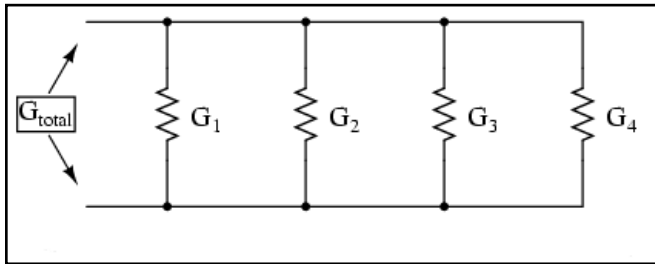


Întorcându-ne la circuitul paralel studiat, putem vedea că existența mai multor ramuri în circuit reduce rezistența totală a circuitului, pentru că electronii sunt capabili să curgă mult mai ușor prin circuit atunci când există mai multe ramuri decât atunci când există doar una.

În termeni de rezistență, ramurile în plus duc la o rezistență mai scăzută. Dacă folosim însă termenul de conductanță, ramurile adiționale din circuit duc la o conductanță (totală) mai mare.

Rezistența totală paralelă este mai mică decât oricare dintre rezistențele ramurilor luate individual ( $R_{total}$  mai mică decât  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  sau  $R_4$  luate individual).

## Conductanța totală



Conductanța paralelă este mai mare decât oricare dintre conductanțele ramurilor luate individual, deoarece rezistorii paraleli conduc mai bine curentul electric decât o fac fiecare luat în parte ( $G_{total}$  mai mare decât  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  sau  $G_4$  luate individual).

Matematic, această relație se exprimă astfel:

$$G_{total} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4$$

Cunoscând relația matematică inversă dintre conductanță și rezistență ( $1/x$ ), putem transforma fiecare din termenii formulei de mai sus în rezistențe:

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

Rezolvând ecuația de mai sus pentru  $R_{total}$ , ajungem la următoarea formulă:

$$R_{total} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

..formula rezistenței totale a circuitelor paralele.

## 5. Calcularea puterii

- Indiferent de configurația circuitelor rezistive, puterea totală este suma puterilor individuale de pe fiecare component:  $P_{total} = P_1 + P_2 + \dots + P_n$

## Ecuațiile puterii

La calcularea puterii disipate pe componentele rezistive, putem folosi oricare dintre ecuațiile de putere în funcție de mărimile cunoscute: tensiune, curent și/sau rezistență pe fiecare component:

$$P = IE$$

$$P = \frac{E^2}{R}$$

$$P = I^2 R$$

| Mărime | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | Total | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|-------|---------|
| E      |                |                |                |       | V       |
| I      |                |                |                |       | A       |
| R      |                |                |                |       | Ω       |
| P      |                |                |                |       | W       |

Acest lucru este mult mai ușor de realizat prin simpla adăugare a unui rând adițional în tabelul tensiunilor, curenților și a rezistențelor. Indiferent de coloană, puterea se va afla folosind ecuația corespunzătoare a legii lui Ohm.

## Puterea totală este aditivă

O regulă interesantă pentru puterea totală vizavi de puterea individuală, este că aceasta este aditivă indiferent de configurația circuitului în cauză: serie, paralel, serie-paralel sau altfel. Fiind o expresie a lucrului mecanic efectuat, configurația circuitului nu are niciun efect asupra calculelor matematice dacă luăm în considerare și faptul că puterea disipată trebuie să fie egală cu puterea totală introdusă de către sursă în circuit (conform legii conservării energiei).

## Observație

Atenție, cele de mai sus se aplică doar în cazul calculării puterilor în circuitele pur rezistive (ce conțin doar rezistori).

## 6. Aplicarea corectă a legii lui Ohm

- Folosind metoda tabelului, vom aplica legea lui Ohm vertical, pe fiecare coloană din tabel
- Folosind metoda tabelului, vom aplica regulile circuitelor serie/paralel pe fiecare linie

**Variabilele utilizate se referă la același set de puncte**

Una dintre cele mai frecvente greșeli ale începătorilor în aplicarea legii lui Ohm constă în utilizarea greșită a mărimilor pentru tensiune, curent și rezistență. Cu alte cuvinte, se poate întâmpla ca în aplicarea legii să se utilizeze valoarea curentului  $I$  printr-un rezistor și valoarea căderii de tensiune  $U$  (sau  $E$ ) pe un set de rezistori interconectați, cu speranța că rezistența totală astfel calculată este egală cu rezistența reală a configurației în cauză. Acest lucru este însă incorect!

Rețineți acest principiu extrem de important: variabilele utilizate în ecuațiile legii lui Ohm trebuie să corespundă tot timpul aceluiași set de două puncte a circuitului analizat.

Cu alte cuvinte, dacă luăm în considerare o rezistență  $R_{AB}$  aflată între două puncte din circuit, desemnate prin  $A$  și  $B$ , atunci și curentul  $I_{AB}$  cât și căderea de tensiune  $U_{AB}$  trebuie să se refere exact la aceleași puncte pentru a putea aplica corect legea lui Ohm. Această observație este extrem de importantă în special în circuitele combinate serie-paralel, acolo unde componente adiacente pot avea valori diferite atât pentru tensiune cât și pentru curent.

### Aplicarea corectă a legii folosind metoda tabelului

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| $E$    |       |       |       |       | $V$      |
| $I$    |       |       |       |       | $A$      |
| $R$    |       |       |       |       | $\Omega$ |
| $P$    |       |       |       |       | $W$      |

Utilizând metoda tabelului, putem să ne asigurăm de aplicarea corectă a legii lui Ohm considerând ca și coloane doar rezistori individuali și nu seturi de rezistori conectați în combinații serie, paralel sau serie-paralel. Vom folosi această metodă mai târziu pentru rezolvarea unor circuite mai complicate.

Astfel, în cazul circuitelor serie, coloana total poate fi foarte ușor calculată utilizând regulile circuitelor serie, și anume: căderea totală de tensiune este egală cu suma căderilor individuale pe fiecare component, curentul total este egal cu valoarea curentului prin oricare component, rezistența totală este egală cu suma rezistențelor individuale, iar puterea totală este și ea egală cu suma puterilor individuale.

Pentru circuitele paralel, coloana total se calculează astfel: căderea de tensiune totală este aceeași cu tensiunea de pe fiecare component, curentul total este egal cu suma curenților individuali, rezistența totală se calculează cu formula rezistenței totale a circuitelor paralele, iar puterea totală este egală cu suma puterilor individuale.

## 7. Analiza circuitelor la defect

- Pentru determinarea efectelor unui component defect asupra funcționării circuitului, redeseñați circuitul inițial înlocuind rezistența inițială a componentului cu rezistența echivalentă după defect și reanalizați circuitul
- Un component scurt-circuitat este un component al cărei rezistență a scăzut dramatic (spre zero)
- Un component deschis este un component al cărei rezistență a crescut dramatic (spre infinit)



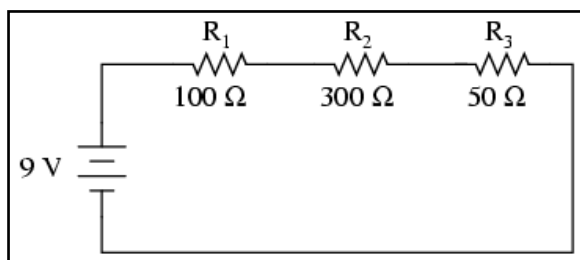
- Defectarea rezistorilor constă cel mai adesea în deschiderea acestora, nu în scurt-circuitarea lor, iar acest lucru nu se întâmplă decât dacă sunt supuși unui stres fizic sau electric peste limitele normale de funcționare

## Introducere

Sarcina unui tehnician presupune adesea localizarea și remedierea sau înlocuirea componentelor dintr-un circuit defect. Identificarea componentelor defecte presupune un efort considerabil, necesitând o foarte bună înțelegere a principiilor de bază, abilitatea de a formula ipoteze, de a judeca valoarea acestora bazându-se pe probabilități și creativitate în aplicarea unei soluții pentru remedierea problemei. Deși este posibilă trasarea unor metode științifice în jurul acestor abilități, majoritatea tehnicienilor cu experiență văd această activitate ca pe o artă ce necesită ani de experiență pentru a o deprinde.

O abilitate esențială este înțelegerea rapidă și intuitivă a modului în care defectarea componentelor afectează comportamentul circuitului în ansamblul său, indiferent de configurația acestuia. Vom explora unele dintre aceste efecte atât în cazul circuitelor serie cât și în cazul circuitelor paralele.

## Analiza defectelor într-un circuit serie simplu

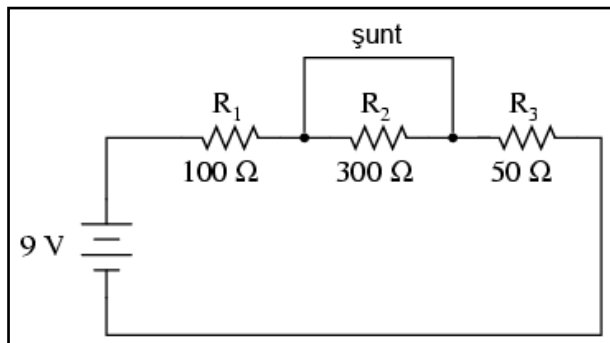


Să considerăm circuitul alăturat.

| Mărimă | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 2     | 6     | 1     | 9     | V        |
| I      | 20 m  | 20 m  | 20 m  | 20 m  | A        |
| R      | 100   | 300   | 50    | 450   | $\Omega$ |

Atunci când toate componentele acestui circuit funcționează la parametri normali, putem determina pe cale matematică toți curenții și căderile de tensiune din circuit.

## Șuntarea rezistorului



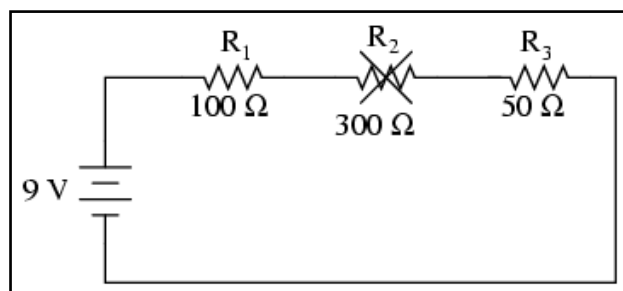
Să presupunem acum că rezistorul  $R_2$  este scurt-circuitat; acest lucru înseamnă de fapt că, în locul rezistorului avem un simplu fir ce prezintă o rezistență aproape nulă. Practic, în circuitul alăturat, spunem că am realizat o șuntare a rezistorului  $R_2$  iar firul utilizat poartă numele de conductor de șuntare, sau simplu, șunt.

| Mărimă | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 6     | 0     | 3     | 9     | V        |
| I      | 60 m  | 60 m  | 60 m  | 60 m  | A        |
| R      | 100   | 0     | 50    | 150   | $\Omega$ |

curentului total.

Odată cu creșterea curentului de la 20 mA la 60 mA, căderea de tensiune pe rezistorii  $R_1$  și  $R_3$  (a căror rezistență nu s-a modificat) crește și ea, astfel încât căderea de tensiune totală pe cele două componente rămase va fi de tot 9 V. Rezistorul  $R_2$ , fiind șuntat de rezistența foarte mică a conductorului de șuntare, este practic eliminat din circuit, rezistența dintre cele două capete ale conductorului fiind practic zero. Din această cauză, căderea de tensiune pe rezistorul  $R_2$  este de zero V, chiar dacă valoarea totală a curentului din circuit a crescut.

### Înlăturarea rezistorului din circuit

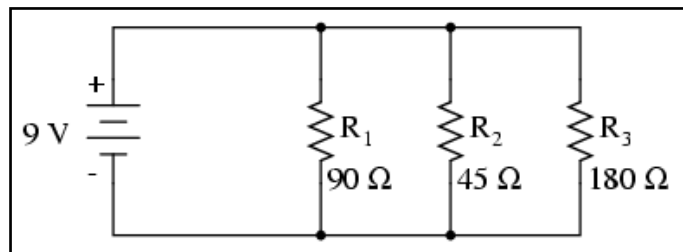


Pe de altă parte, dacă defectul suferit de rezistorul  $R_2$  este de așa natură încât circuitul va rămâne deschis în acel punct - rezistența dintre cele două capete libere ale conductorilor rămași crește practic spre infinit - efectele asupra circuitului inițial vor fi diferite, dar la fel de radicale.

| Mărimă | $R_1$ | $R_2$    | $R_3$ | Total    | Unitate  |
|--------|-------|----------|-------|----------|----------|
| E      | 0     | 9        | 0     | 9        | V        |
| I      | 0     | 0        | 0     | 0        | A        |
| R      | 100   | $\infty$ | 50    | $\infty$ | $\Omega$ |

Cu  $R_2$  având o rezistență infinită, iar rezistența totală într-un circuit serie fiind dată de suma tuturor rezistențelor individuale, rezistența totală crește spre infinit iar curentul total spre zero amperi. În această situație, nu va mai exista nicio deplasare a electronilor prin circuit, deplasare necesară producerii unor căderi de tensiune pe rezistorii  $R_1$  sau  $R_3$ . În schimb, întreaga cădere de tensiune dezvoltată de baterie se va regăsi pe terminalii rezistorului  $R_2$ .

### Analiza defectelor într-un circuit paralel simplu

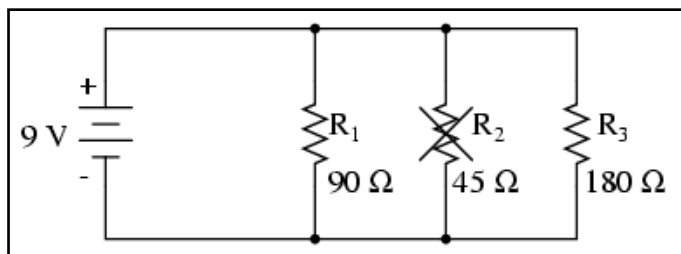


Putem aplica aceleași metode și în cazul unui circuit paralel.

| Mărimă | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 9     | 9     | 9     | 9     | V        |
| I      | 100 m | 200 m | 50 m  | 350 m | A        |
| R      | 90    | 45    | 180   | 25,71 | $\Omega$ |

Să observăm prima dată comportamentul unui circuit paralel „sănătos”.

### Înlăturarea rezistorului



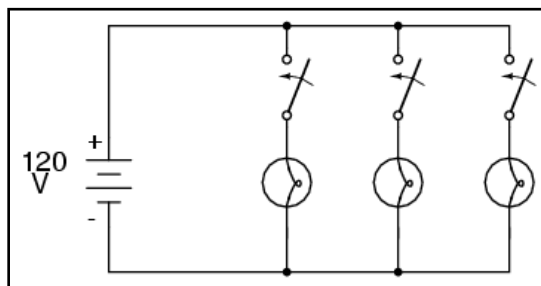
Să presupunem acum deschiderea rezistenței  $R_2$  în acest circuit paralel.

| Mărimă | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 9     | 9     | 9     | 9     | V        |
| I      | 100 m | 0     | 50 m  | 150 m | A        |
| R      | 90    | 45    | 180   | 60    | $\Omega$ |

Efectele acestui defect le putem observa în tabelul alăturat.

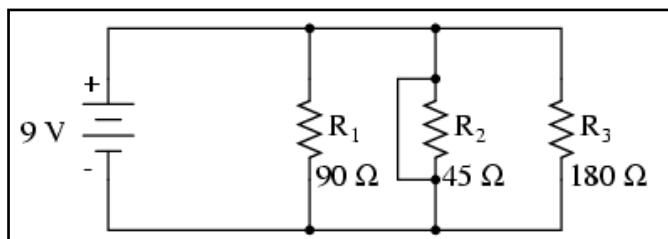
În cazul acestui circuit paralel, deschiderea unei ramuri afectează doar curentul prin acea ramură precum și curentul total din circuit. Căderea de tensiune, fiind egală pe toate componentele va rămâne neschimbată pe toți rezistorii.

Datorită tendinței sursei de alimentare de menținere constantă a tensiunii de alimentare, aceasta nu se va modifica, și datorită faptului că este conectată în paralel cu toți rezistorii, căderea de tensiune pe fiecare dintre ei, după apariția defectului, rămâne egală cu 9 V. Din această cauză (rezistența constantă, căderea de tensiune constantă) curentul prin ceilalți doi rezistori nu se modifică nici ei.



Același lucru îl putem observa și într-un circuit casnic: toate becurile sunt conectate în paralel. La pornirea sau oprirea unui bec (o ramură din circuitul paralel se închide și se deschide), funcționarea celorlalte becuri nu este afectată; singurul lucru care se modifică este curentul prin acel bec (circuit de ramură) și curentul total din circuit.

## Șuntarea rezistorului



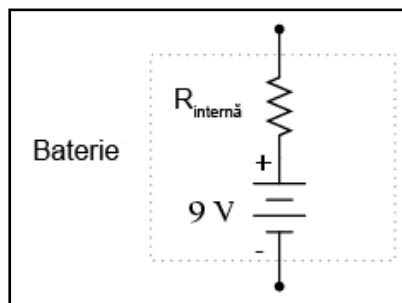
observa din exemplul alăturat.

| Mărimă | $R_1$ | $R_2$    | $R_3$ | Total    | Unitate  |
|--------|-------|----------|-------|----------|----------|
| E      | 9     | 9        | 9     | 9        | V        |
| I      | 100 m | $\infty$ | 50 m  | $\infty$ | A        |
| R      | 90    | 0        | 180   | 0        | $\Omega$ |

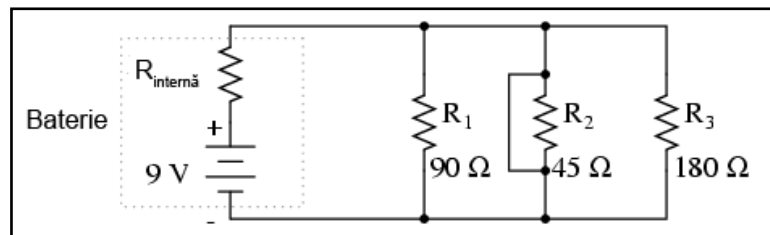
Un rezistor scurt-circuitat (rezistența de  $0 \Omega$ ) va permite, teoretic, trecerea unui curent infinit de la orice sursă finită de tensiune ( $I = E / 0$ ). În acest caz, rezistența nulă a rezistorului  $R_2$  descrește rezistența totală a circuitului la zero  $\Omega$ , ducând la creșterea valorii curentului spre infinit.

Atâta timp cât tensiunea sursei rămâne constantă la 9 V, curenții prin celelalte ramuri ale circuitului ( $I_{R1}$  și  $I_{R3}$ ) rămân neschimbați.

Ipoteza critică pe care ne-am asumat-o în această situație este că tensiunea de alimentare rămâne constantă pentru un curent infinit introdus în circuit. Acest lucru nu este însă deloc realist. Chiar dacă scurt-circuitul prezintă o rezistență mică (față de o rezistență egală cu zero), nicio sursă reală de tensiune nu poate genera un supra-curent extrem de mare în același timp cu menținerea valorii tensiunii la un nivel constant.



Acest lucru se datorează rezistenței interne caracteristice tuturor surselor de putere electrice, rezistențe datorate proprietăților intrinseci ale materialelor din care sunt construite.



Aceste rezistențe interne, oricât de mici, transformă circuitul paralel de mai sus într-o combinație serie-paralel.

De obicei, rezistențele interne ale surselor de putere sunt suficient de mici pentru a putea fi ignorate fără nicio problemă, dar odată cu apariția curenților foarte mari datorită componentelor scurt-circuitate, efectelor lor nu mai pot fi neglijate.

În acest caz, scurt-circuitarea rezistenței  $R_2$  va duce la situația în care întreaga cădere de tensiune se va regăsi pe rezistența internă a bateriei, căderile de tensiune pe  $R_1$ ,  $R_2$  și  $R_3$  fiind aproape de zero.

| Mărime | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | Total | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|-------|---------|
| E      | mică           | mică           | mică           | Mică  | V       |
| I      | mic            | mare           | mic            | mare  | A       |
| R      | 90             | 0              | 180            | 0     | Ω       |

## Concluzie

Scurt-circuitarea intenționată a terminalilor surselor de alimentare, indiferent de tipul acestora, trebuie evitată cu orice preț. Chiar și în cazul în care curenții mari dezvoltăți (căldură, scântei, explozii) nu duc la rănirea niciunei persoane din apropiere, sursa de tensiune va suferi cu siguranță unele defecte în cazul în care nu este proiectată a rezista la curenți de scurt-circuit, iar majoritatea surselor de tensiune nu sunt prevăzute cu o astfel de protecție.

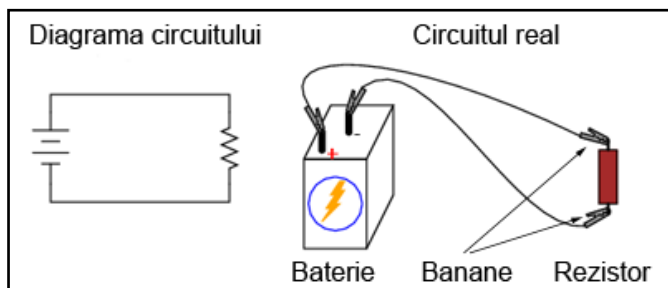
## 8. Realizarea practică a circuitelor simple

- Pentru realizarea practică a circuitelor se pot utiliza placi de teste, reglete de conexiuni sau plăci imprimare

## Scop

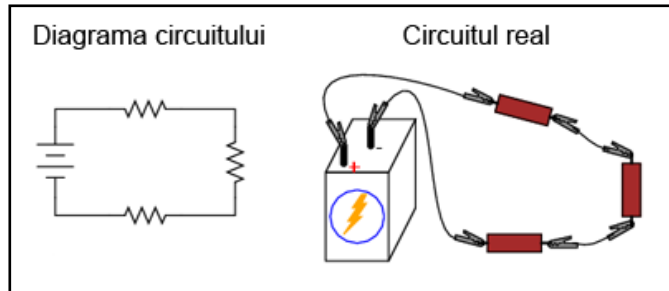
Pe măsura studierii circuitelor electrice, vom dori probabil la un moment dat să construim propriile circuite utilizând baterii și rezistori (becuri, de exemplu). Există câteva opțiuni pentru realizarea acestor circuite, unele mai simple decât altele, opțiuni pe care le vom prezenta în acest capitol.

### Utilizarea conductorilor cu banane/crocodili



Dacă dorim realizarea unui circuit simplu cu o sursă de tensiune și un singur rezistor, putem foarte bine să utilizăm conductori cu cleme (crocodil/banană).

Astfel de conductori, prevăzuți cu banane pe capete, reprezintă o metodă practică și sigură din punct de vedere electric pentru conectarea componentelor între ele.

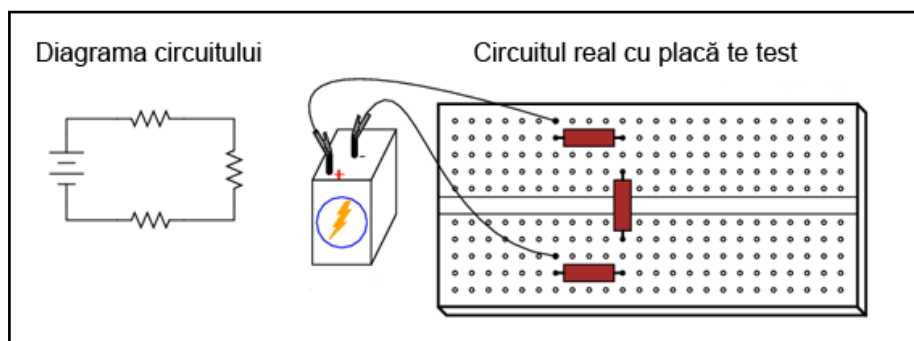


Dacă am dori să realizăm un circuit simplu cu o baterie și trei rezistori, putem utiliza aceeași metodă de conectare a conductorilor.

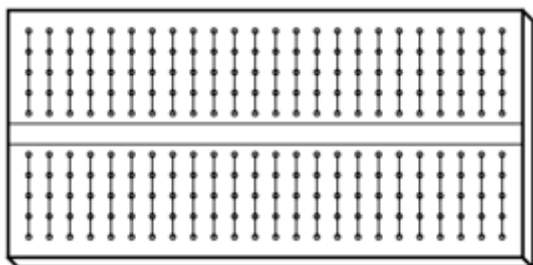
## Placa electronică de test



Totuși, această tehnică se dovedește a nu fi practică atunci când avem de a face cu circuite mult mai complicate decât cele de mai sus. O metodă mult mai practică de realizare a circuitelor temporare este utilizarea unei plăci de test (solderless breadboard), un dispozitiv realizat din plastic ce permite realizarea ușoară a unui număr relativ mare de conexiuni între componente.



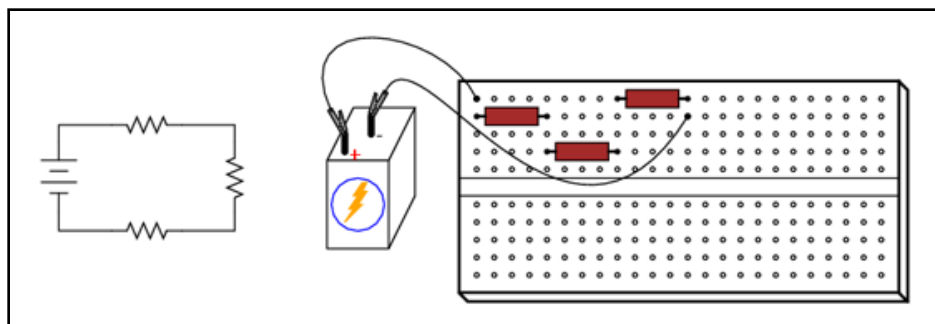
Alăturat este un exemplu de circuit realizat cu ajutorul plăcii de test.



Sub fiecare cavitate există un arc metalic ce prinde orice conductor sau terminal al componentelor introduse în acesta. Aceste arcuri metalice sunt conectate între ele pe spatele plăcii, realizând astfel conexiuni între conductorii inserați prin partea superioară. Modelul plăcii este astfel încât, există o serie de cinci astfel de cavități unite

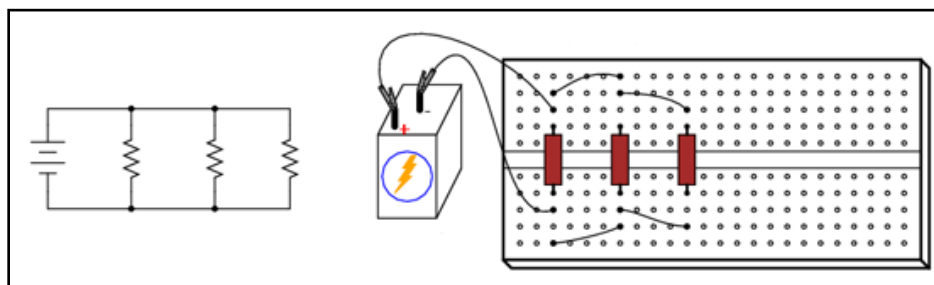
vertical între ele, conform figurii alăturate.

Astfel că, atunci când inserăm un conductor într-una dintre cavități, există încă o serie de patru astfel de cavități pe aceeași coloană, ce sunt comune din punct de vedere electric cu prima. Introducerea unui terminal sau conductor în oricare dintre aceste puncte comune este identică din punct de vedere electric cu conectarea directă între ei a terminalilor sau conductorilor celor două componente. Rezultatul este o platformă extrem de flexibilă pentru realizarea circuitelor electrice sau electronice temporare.



De exemplu, circuitul electric de mai sus, format din trei rezistori, poate fi construit cu ajutorul unei plăci de test conform figurii alăturate.

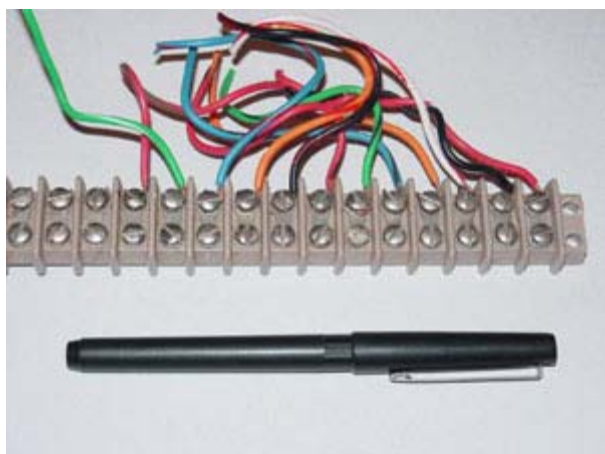
Un alt exemplu, de această dată a unui circuit paralel cu trei rezistori, este prezentat în figura alăturată.



Acest plăci de test au totuși unele neajunsuri. În primul rând, scopul lor sunt doar circuitele temporare. Dacă întoarcem placa și o scuturăm, componentele s-ar putea să cadă din locațiile lor respective. De asemenea, plăcile sunt limitate la curenți destul de mici (sub 1 A). Acele arcuri metalice au o suprafață de contact destul de mică, prin urmare, nu pot suporta curenți mari fără încălzirea lor excesivă.

## Regleta de conexiuni

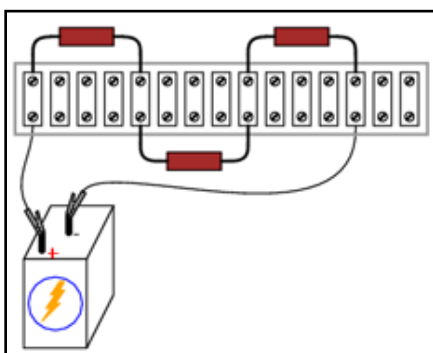
O metodă alternativă constă în utilizarea unei reglete de conexiuni (regletă de borne). Acestea sunt compuse dintr-un material izolator prevăzut cu spații metalice pentru prinderea conductorilor cu ajutorul unor șuruburi; acest procedeu este similar modului de conectare al prizelor sau întrerupătoarelor casnice.



Un exemplu de astfel de regletă, având o serie de conductori atașați, este prezentat în poza alăturată.



O altă variantă este cea din poza alăturată. Această variantă, denumită și „europeană” are șuruburile introduse într-un canal pentru a preveni scurt-circuitarea accidentală între terminali prin intermediul unei șurubelnițe sau al unui alt obiect metalic.



În figura alăturată, este prezentat un circuit serie compus dintr-o singură baterie și trei rezistori folosind o regletă de conexiuni.

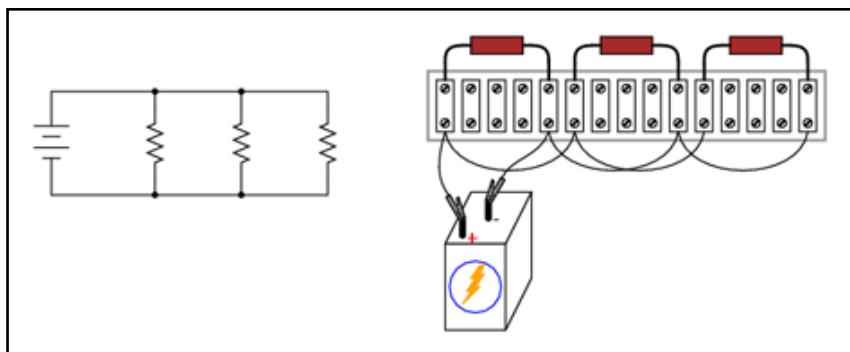
Conexiunile realizate cu ajutorul unei reglete sunt robuste și pot fi prin urmare folosite atât pentru circuitele temporare cât și pentru construcția circuitelor permanente.

## Citirea și punerea în practică a schemelor electrice

Una dintre deprinderile esențiale ale celor care vor să pună în practică lecțiile învățate despre circuitele electrice și electronice, este „traducerea” unei diagrame într-un circuit real. Diagramele circuitelor sunt de obicei

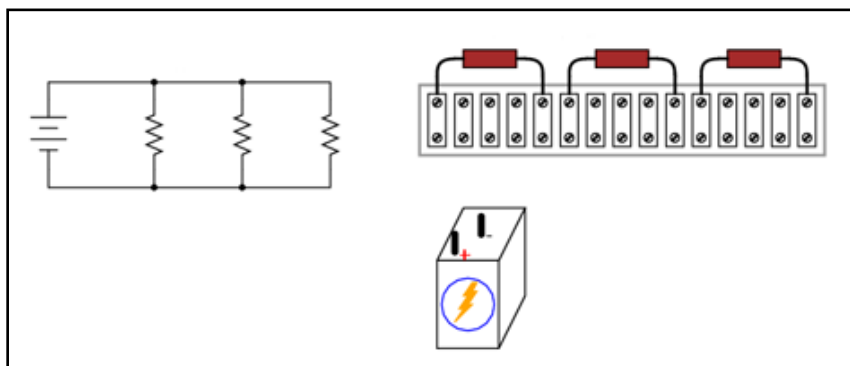


realizate pentru a facilita citirea lor cu ușurință, dar circuitele practice au de cele mai multe ori o orientare complet diferită.

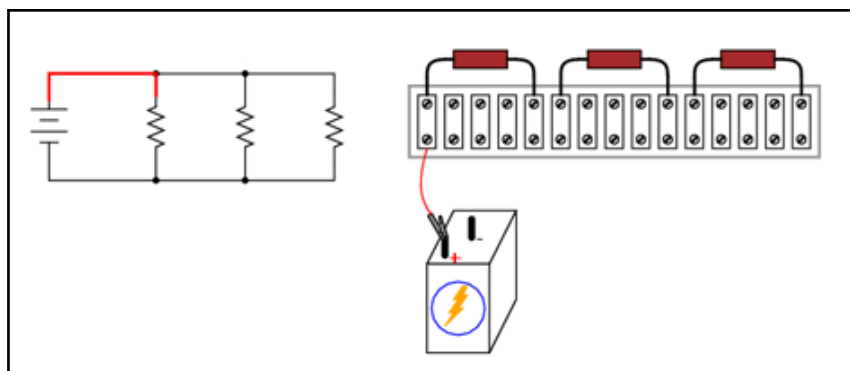


Să luăm ca și exemplu un circuit paralel format dintr-o singură baterie și trei rezistori.

Trecerea de la diagrama circuitului la realizarea propriu-zisă a acestuia - mai ales atunci când rezistori ce trebuie conectați sunt aranjați liniar (asemănător circuitelor serie, nu paralel) pe regletă - nu este chiar așa de evidentă, prin urmare, vom prezenta procesul pas cu pas în cele ce urmează.



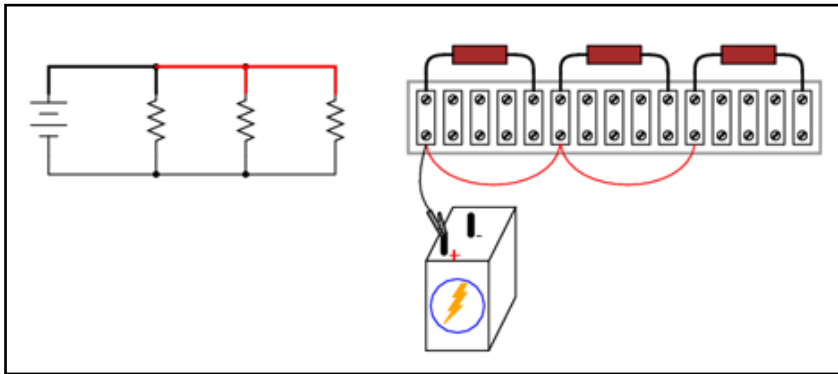
Pentru început, considerăm diagrama inițială a circuitului și toate componentele prinse pe regleta de conexiuni dar fără niciun conductor electric între ele.



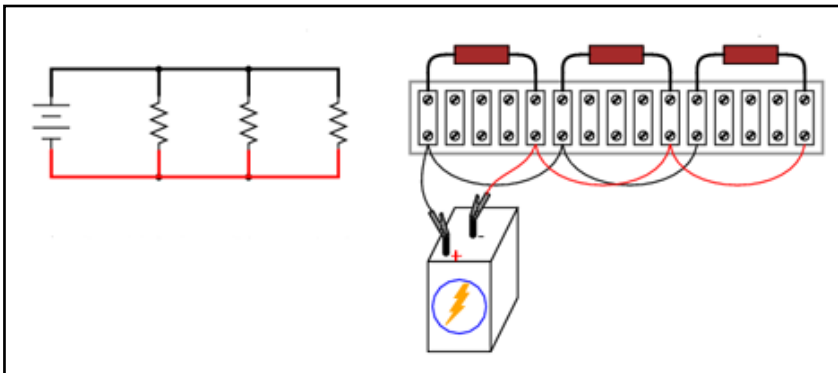
Apoi, urmărim conductorul dinspre terminalul pozitiv al bateriei spre primul component al diagramei, realizând în același timp o legătură fizică, prin intermediul unui conductor, între aceste două puncte pe circuitul real. Dacă ne este mai ușor, putem trasa o linie de o

culoare diferită pe diagramă, pentru a reprezenta ce tip de conexiuni au fost deja realizate în circuitul real.

Continuăm acest proces, fir cu fir, până în momentul în care întreaga schemă electrică (diagramă) a circuitului este acoperită.

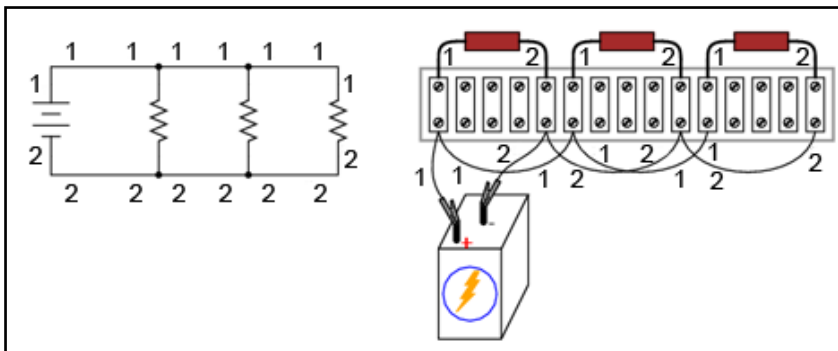


Următorul pas, așadar, constă în conectarea bornelor superioare a celor doi rezistori rămași.

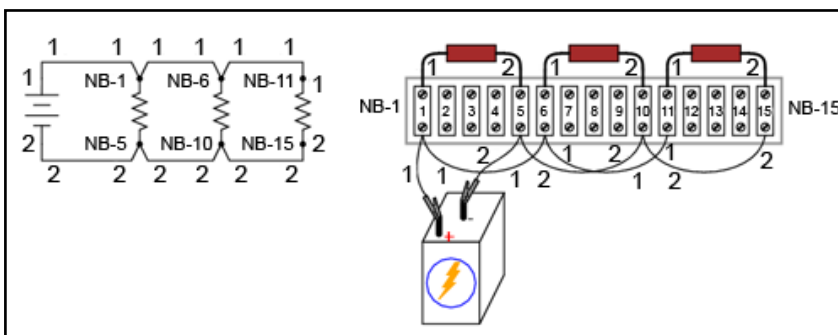


Având toate bornele superioare ale tuturor rezistorilor din circuit conectate la borna pozitivă a bateriei, următorul pas este să conectăm bornele inferioare ale acestora la borna negativă a bateriei.

## Marcarea conductorilor electrici



În mod normal, în circuitele practice folosite în industrie, toate firele sunt marcate; conductorii comuni din punct de vedere electric posedă același număr de marcaj. În exemplu nostru, am marcat conductorii cu 1 și 2.



O altă convenție constă în modificarea ușoară a diagramei inițiale pentru a indica punctul de contact propriu-zis al conductorului pe regletă. Acest lucru necesită un sistem de marcaj al regletei: „NB” (numărul blocului), urmat de un număr ce reprezintă fiecare conexiune

metalică de pe regletă.

În acest mod, diagrama poate fi utilizată ca și o „hartă” pentru localizarea punctelor dintr-un circuit real, indiferent cât de încălzit și de complex este în realitate. Această metodă poată părea exagerată pentru circuitul simplu cu trei rezistori de mai sus, dar aceste detalii sunt absolut necesare pentru realizarea și întreținerea circuitelor mari, în special ale acelor care se întind pe distanțe considerabile, folosind mai multe reglete localizate în puncte diferite.

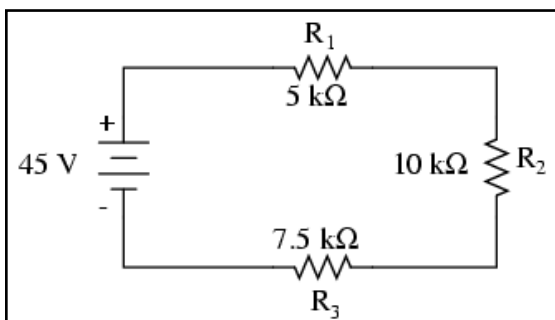
Pentru circuite permanente, se pot folosi plăci imprimate, un subiect destul de vast în ale cărui detalii nu vom intra aici.

## 06 - Circuite divizoare și legile lui Kirchhoff

### 1. Circuite divizoare de tensiune

- Circuitele serie propoționează, sau *divizează*, cantitatea totală de tensiune pe fiecare component în parte, aceste proporții depinzând strict de rezistori:  $E_{Rn} = E_{Total} (R_n / R_{Total})$ .

#### Analiza unui circuit serie simplu (divizor de tensiune)



Să analizăm un circuit electric serie simplu, determinând căderile de tensiune pe fiecare rezistor în parte.

| Mărimă | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | Total | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|-------|---------|
| E      |                |                |                | 45    | V       |
| I      |                |                |                |       | A       |
| R      | 5k             | 10k            | 7.5k           |       | Ω       |

Vom introduce valorile cunoscute precum și cele ce le vom afla prin aplicarea formulelor într-un tabel ce cuprinde tensiunea (E), curentul (I) și rezistența (R), precum și suma acestora în întreg circuitul. Valorile sunt exprimate în volți (V), amperi (A), respectiv ohmi (Ω).

| Mărimă | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | Total | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|-------|---------|
| E      |                |                |                | 45    | V       |
| I      |                |                |                |       | A       |
| R      | 5k             | 10k            | 7.5k           | 22.5k | Ω       |

Folosind valorile individuale ale rezistențelor, putem determina valoarea rezistenței totale din circuit, cunoscând că valoarea totală este suma rezistențelor individuale în cazul circuitelor serie.

| Mărimă | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | Total | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|-------|---------|
| E      |                |                |                | 45    | V       |
| I      | 2m             | 2m             | 2m             | 2m    | A       |
| R      | 5k             | 10k            | 7.5k           | 22.5k | Ω       |

De aici, putem folosi legea lui Ohm ( $I = E / R$ ) pentru determinarea valorii totale a curentului, ce va fi aceeași cu valoarea curentului prin fiecare rezistor, curenții fiind egali în toate componentele într-un circuit serie.

**Căderea de tensiune pe fiecare rezistor este direct proporțională cu rezistența sa**

Cunoscând valoarea curentului (2 mA), putem folosi legea lui Ohm ( $E = IR$ ) pentru calcularea căderilor de tensiune pe fiecare rezistor în parte.

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 10    | 20    | 15    | 45    | V        |
| I      | 2m    | 2m    | 2m    | 2m    | A        |
| R      | 5k    | 10k   | 7.5k  | 22.5k | $\Omega$ |

Putem observa că valoarea căderilor de tensiune pe fiecare rezistor este proporțională cu rezistența, datorită faptului că valoarea curentului este aceeași prin toți rezistorii (circuit serie).

De asemenea, căderea de tensiune pe rezistorul  $R_2$  este dublă față de căderea de tensiune pe rezistorul  $R_1$ , la fel precum rezistența  $R_2$  este dublă față de rezistența  $R_1$ .

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 40    | 80    | 60    | 180   | V        |
| I      | 8m    | 8m    | 8m    | 8m    | A        |
| R      | 5k    | 10k   | 7.5k  | 22.5k | $\Omega$ |

Dacă ar fi să modificăm valoarea totală a tensiunii din circuit, vom vedea că proporționalitatea a căderilor de tensiune rămâne constantă.

Căderea de tensiune pe  $R_2$  este în continuare exact dublul căderii de pe  $R_1$ , în ciuda modificării tensiunii sursei. Proporționalitatea căderilor de tensiune este strict în funcție de valoarea rezistențelor.

Devine aparent faptul că pe fiecare rezistor, căderea de tensiune este o fracțiune fixă din valoarea tensiunii totale a sursei. Tensiunea pe  $R_1$  de exemplu, era 10 volți atunci când valoarea tensiunii sursei era de 45 de volți. Atunci când am crescut tensiunea bateriei până la 180 de volți (de 4 ori mai mult), căderea de tensiune pe  $R_1$  a crescut de asemenea de 4 ori (de la 10 la 40 de volți). Raportul dintre căderea de tensiune pe  $R_1$  și căderea de tensiune totală a rămas același:

$$\frac{E_{R1}}{E_{total}} = \frac{10 \text{ V}}{45 \text{ V}} = \frac{40 \text{ V}}{180 \text{ V}} = 0,22$$

De asemenea, nici raporturile dintre căderile de tensiune pe celelalte două rezistențe și tensiunea totală a bateriei nu s-au modificat:

$$\frac{E_{R2}}{E_{total}} = \frac{20 \text{ V}}{45 \text{ V}} = \frac{80 \text{ V}}{180 \text{ V}} = 0,44$$

$$\frac{E_{R3}}{E_{total}} = \frac{15 \text{ V}}{45 \text{ V}} = \frac{60 \text{ V}}{180 \text{ V}} = 0,33$$

## Formula divizorului de tensiune

$$E_n = I_n R_n - \text{căderea de tensiune pe oricare dintre rezistori}$$

$$I_{total} = \frac{E_{total}}{R_{total}} - \text{curentul total într – un circuit serie}$$

înlocuind  $I_n$  cu  $\frac{E_{total}}{R_{total}}$  în prima ecuație obținem

$$E_n = \frac{E_{total}}{R_{total}} R_n - \text{căderea de tensiune pe oricare dintre rezistori}$$

sau

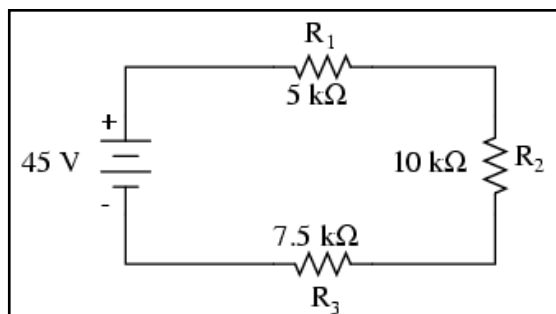
$$E_n = E_{total} \frac{R_n}{R_{total}}$$

Din această cauză, un circuit serie poartă adesea numele de divizor de tensiune, pentru abilitatea sa de divizare a tensiunii totale în fracții proporționale cu o valoare constantă. Matematic, aceasta se poate exprima astfel:

În cadrul unui circuit divizor de tensiune, raportul dintre rezistențele individuale și cea totală este același ca și raportul dintre căderile de tensiune individuale și tensiunea totală a sursei. Această formulă poartă denumirea de formula divizorului de tensiune, și este o metodă mai rapidă de aflare a căderilor de tensiune într-un circuit serie față de folosirea repetată a legii lui Ohm

## Reanalizarea circuitului

Folosind această formulă, putem reanaliza circuitul de mai sus folosind mai puțini pași:

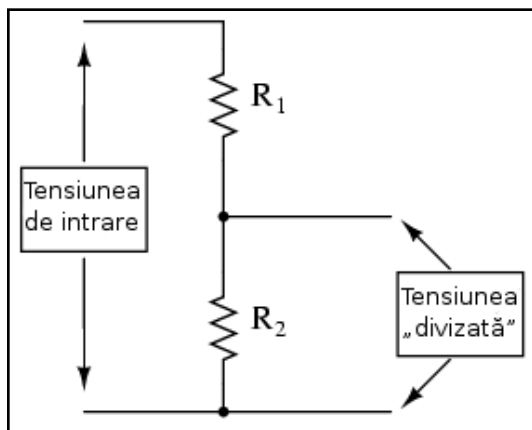


$$E_{R1} = 45 \text{ V} \frac{5 \text{ k}\Omega}{22,5 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ V}$$

$$E_{R2} = 45 \text{ V} \frac{10 \text{ k}\Omega}{22,5 \text{ k}\Omega} = 20 \text{ V}$$

$$E_{R3} = 45 \text{ V} \frac{7,5 \text{ k}\Omega}{22,5 \text{ k}\Omega} = 15 \text{ V}$$

## Aplicații

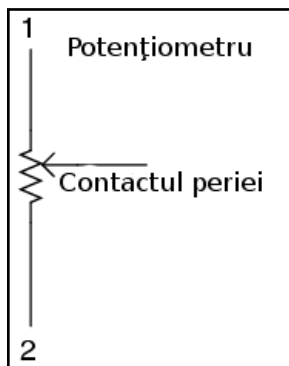


Circuitele divizoare de tensiune se folosesc acolo unde o combinație specifică de rezistori serie este folosită pentru a „diviza” tensiunea în cantități precise (în cazul aparatelor de măsură, de exemplu).

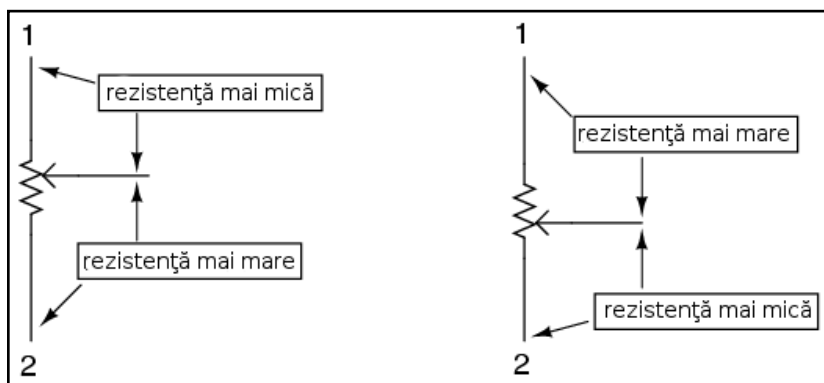
## 2. Potențiometrul

- Un potențiomtru este o dispozitiv rezistiv variabil cu trei puncte de conectare, folosit frecvent pe post de divizor de tensiune ajustabil.

### Potențiometrul este un divizor de tensiune



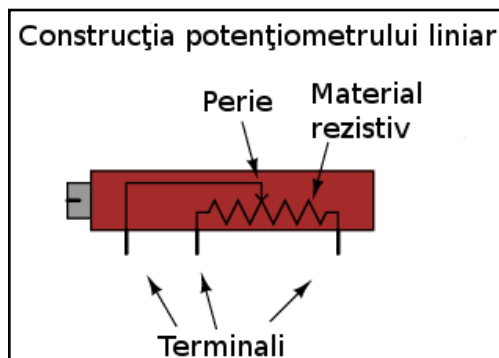
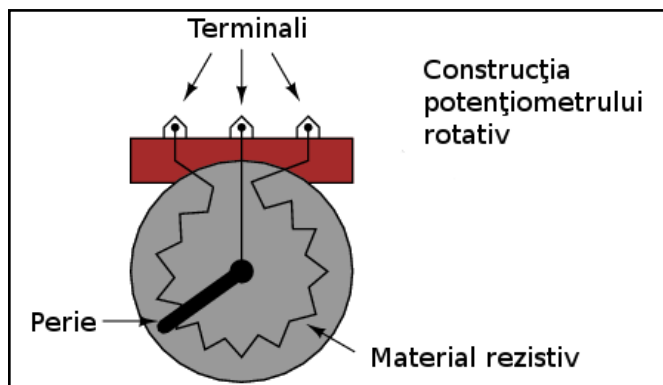
Unul dintre dispozitivele folosite frecvent ca și divizor de tensiune este potențiometrul, un rezistor cu un element mobil poziționat cu ajutorul unei manete. Elementul mobil, denumit și perie, face contact cu un material rezistiv dezizolat, în oricare dintre punctele selectate manual.



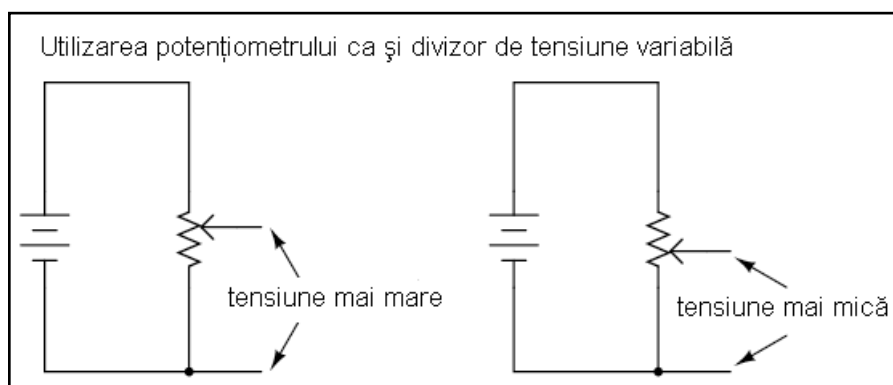
Pe măsură ce contactul periei se apropie de terminalul 1 și se îndepărtează de terminalul 2, rezistența spre terminalul 1 scade iar cea către terminalul 2 crește. Dacă apropiem contactul de terminalul 2, vom obține efectul contrar. Rezistența între cele două puncte (1 și 2) este constantă indiferent de poziția contactului periei.

## Potențiometre rotative și potențiometre liniare

Mai jos sunt ilustrate două tipuri de potențiometre, rotative și liniare:

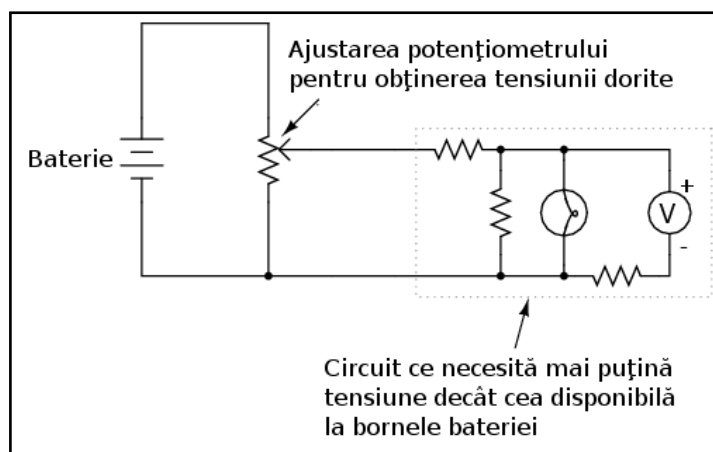


## Raportul de divizare



Dacă aplicăm o tensiune constantă între cei doi terminali de la extremități, poziția periei va „lua” doar o fracțiune din tensiunea aplicată, măsurată între contactul periei și oricare dintre ceilalți doi terminali.

Valoarea acestei fracții depinde în întregime de poziția fizică a periei. Ca și în cazul unui divizor de tensiune fix, coeficientul de divizare este strict o funcție de rezistență și nu depinde de valoarea tensiunii aplicate. Cu alte cuvinte, dacă maneta potențiometrului este deplasată la exact jumătatea distanței dintre cei doi terminali externi, căderea de tensiune între perie și oricare dintre cei doi terminali este exact jumătate ( $1/2$ ) din valoarea tensiunii aplicate, indiferent de valoarea acesteia sau de rezistența totală a potențiometrului.



Cu alte cuvinte, un potențiometru acționează precum un divizor variabil de tensiune, iar coeficientul de diviziune este stabilit de poziția periei.

Această aplicație a potențiometrului este una foarte folosită pentru obținerea unei tensiuni variabile cu ajutorul unei surse fixe de tensiune precum bateria.

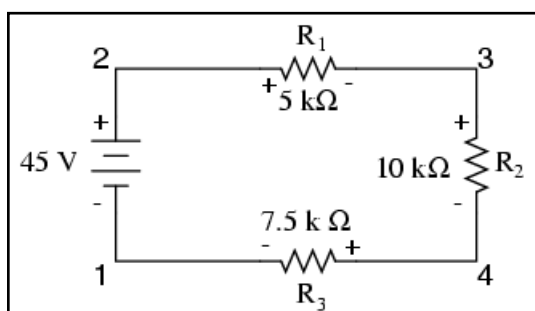


Dacă circuitul ce-l construim necesită o anumită valoare a tensiunii mai mică decât valoarea tensiunii la bornele bateriei, putem conecta terminalii externi ai potențiometrului la baterie iar sarcina (bec, de exemplu) o conectăm între terminalul periei și oricare dintre cei doi terminali externi (vezi și exemplul alăturat):

### 3. Legea lui Kirchhoff pentru tensiune

- Suma algebrică a tuturor căderilor de tensiune dintr-o buclă trebuie să fie egală cu zero

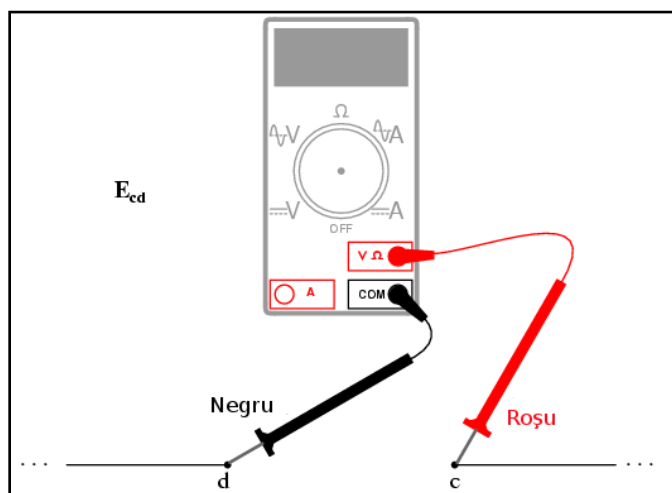
#### Analiza unui circuit serie simplu



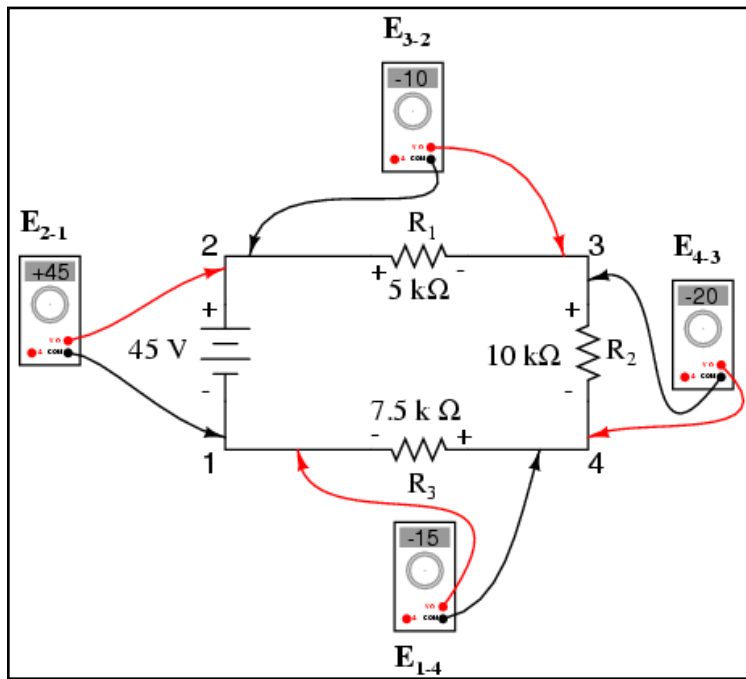
Să luăm un circuit serie cu trei rezistori și să notăm punctele din circuit.

Dacă ar fi să conectăm un voltmetru între punctele 2 și 1, sonda roșie la punctul 2 și sonda neagră la punctul 1, voltmetru va indica valoarea de +45 V. În mod normal, semnul „+” nu este arătat, ci este implicit în cazul citirii aparatelor de măsură digitale.

$$E_{2-1} = +45 \text{ V}$$



Când o tensiune este exprimată cu indice dublu („2-1” în cazul notației „ $E_{2-1}$ ”), înseamnă ca tensiunea este măsurată între cele două puncte. O tensiune exprimată prin „ $E_{cd}$ ” ar însemna că tensiunea măsurată este cea indicată de un voltmetru cu sonda roșie conectată la punctul „c” și sonda neagră la punctul „d”.



Dacă ar fi să luăm același voltmetru și să măsurăm căderea de tensiune de pe fiecare rezistor, parcurgând circuitul în sensul acelor de ceasornic, cu sonda roșie în față și cu cea neagră în spate, am obține/citi următoarele valori:

$$E_{3-2} = -10 \text{ V}$$

$$E_{4-3} = -20 \text{ V}$$

$$E_{1-4} = -15 \text{ V}$$

Suntem deja familiarizați cu conceptul general al circuitelor serie, și anume: suma căderilor de tensiune individuale este egală cu tensiunea totală aplicată. Dar, măsurând căderile de tensiune în acest fel și ținând cont de polaritatea („+” sau „-”) citirilor, descoperim o altă variantă a acestui principiu: suma tensiunilor măsurată în acest fel este zero:

$$E_{2-1} + E_{3-2} + E_{4-3} + E_{1-4} = +45 \text{ V} - 10 \text{ V} - 20 \text{ V} - 15 \text{ V} = 0 \text{ V}$$

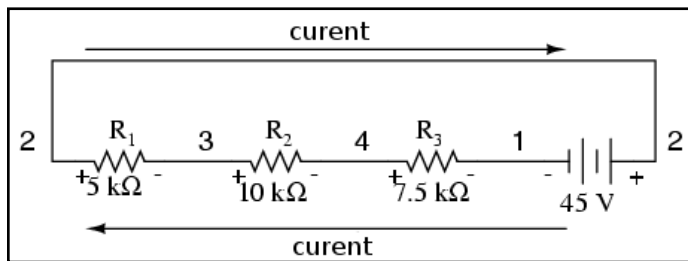
## Definiție

Acest principiu este cunoscut sub denumirea de legea lui Kirchhoff pentru tensiune (descoperit în 1847 de către Gustav R. Kirchhoff), și poate fi exprimat astfel:

**Suma algebrică a tuturor căderilor de tensiune dintr-o buclă trebuie să fie egală cu zero.**

Termenul de sumă algebrică este folosit pentru a desemna faptul că trebuie luate în considerare semnele (polaritățile) tensiunilor din circuit pe lângă valorile acestora. Prin buclă se înțelege orice drum prin circuit ce începe și se termină în același punct. În exemplul de mai sus, bucla s-a format între punctele 1-2-3-4-1, în exact această ordine. Nu contează punctul din care începem sau direcția pe care o urmăm (în sensul acelor de ceasornic, sau invers), suma căderilor de tensiune va fi tot zero. Pentru a demonstra acest lucru, putem „modifica” bucla astfel (3-2-1-4-3):

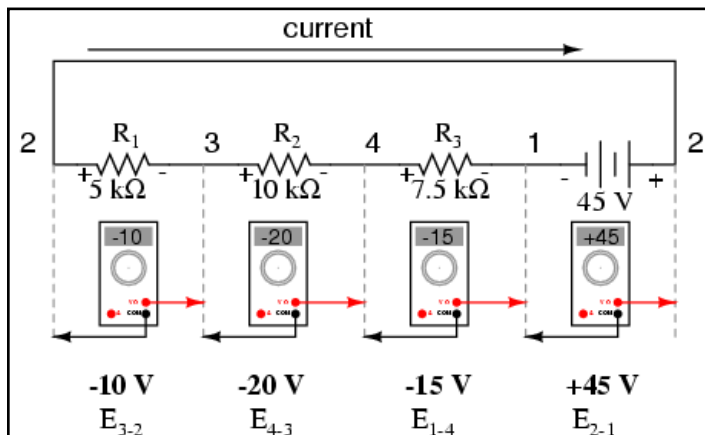
$$E_{2-3} + E_{1-2} + E_{4-1} + E_{3-4} = +10 \text{ V} - 45 \text{ V} + 15 \text{ V} + 20 \text{ V} = 0 \text{ V}$$



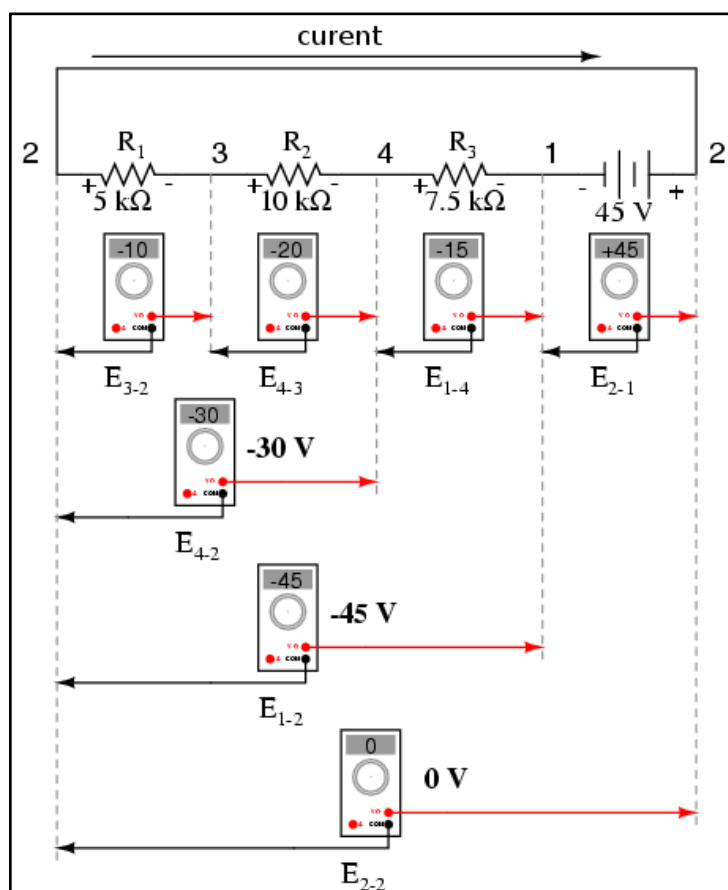
Pentru o mai bună vizualizare, putem redesena circuitul serie de mai sus, astfel încât toate componentele să se regăsească pe aceeași linie dreaptă:

Este exact același circuit, doar că aranjamentul componentelor este diferit. Observați polaritatea căderilor de tensiune de pe rezistori în comparație cu cea a bateriei: tensiunea bateriei este negativă în stânga și pozitivă în dreapta, pe când tensiunile la bornele rezistorilor sunt orientate în sens opus: pozitivă în stânga și negativă în dreapta. Acest lucru se datorează faptului că rezistorii întâmpină o rezistență în fața curegerii electronilor împinși de baterie. Cu alte cuvinte, rezistența împotriva curgerii electronilor trebuie să fie direcționată în direcție opusă sursei de tensiune electromotoare.

### Verificarea legii lui Kirchhoff pentru tensiune cu ajutorul voltmetrului



Dacă am fi să introducem un voltmetru (sau mai multe voltmetre simultan) în circuit, indicațiile acestuia ar fi următoarele (sonda neagră în stânga, cea roșie în dreapta).



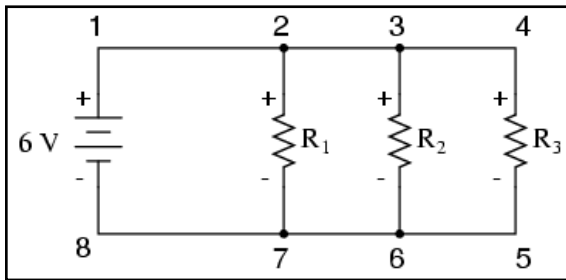
Dacă am fi să luăm același voltmetru pentru a citi căderile de tensiune pentru combinațiile componentelor din circuit începând cu  $R_1$ , putem observa adunarea algebrică a tensiunilor (spre zero).

În cadrul măsurătorilor de mai sus, putem observa importanța polarității căderilor de tensiune atunci când le adunăm. Citind rezultatele măsurătorilor tensiunii la bornele lui  $R_1$ ,  $R_1$ -- $R_2$  și  $R_1$ -- $R_2$ -- $R_3$  (folosim simbolul „--” pentru a desemna conexiunea „serie” între cei trei rezistori  $R_1$ ,  $R_2$  și  $R_3$ ) vedem că suma căderilor de tensiune are valori tot mai mari (deși negative), deoarece polaritatea căderilor de tensiune pe fiecare component are aceeași orientare (stânga pozitiv, dreapta negativ).

Suma căderilor de tensiune pe  $R_1$ ,  $R_2$  și  $R_3$  este de 45 de volți, aceeași cu tensiunea la ieșirea bateriei, cu observația că polaritatea bateriei este opusă față de cea a rezistorilor (stânga negativ, dreapta pozitiv) și prin urmare rezultatul final este o măsurătoare de 0 volți pe toate cele patru componente luate la un loc.

O un alt mod de a privi acest circuit este de a observa că partea stânga a circuitului (stânga rezistorului  $R_1$ : punctul 2) este conectată direct la partea dreapta a circuitului (dreapta bateriei: punctul 2), pas necesar pentru închiderea circuitului. Din moment ce aceste două puncte sunt conectate direct, acestea sunt electric comune și prin urmare, căderea de tensiune dintre cele două trebuie să fie zero.

## Analiza unui circuit paralel simplu



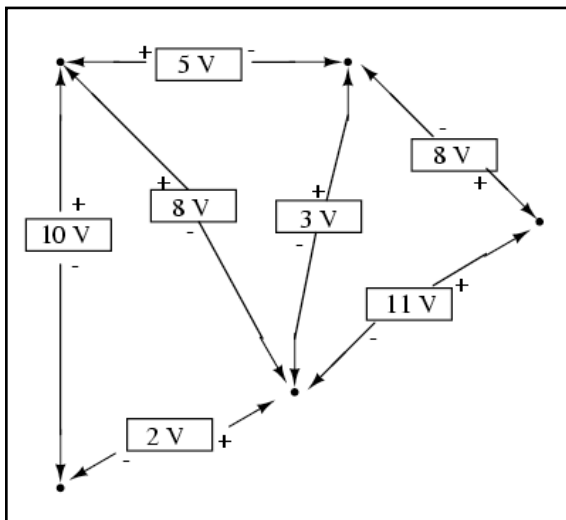
Legea lui Kirchhoff pentru tensiune (prescurtat LKT) funcționează pentru orice configurație a circuitului, nu doar pentru cele serie. Să considerăm prin urmare un circuit paralel simplu.

Fiind un circuit paralel, căderile de tensiune pe fiecare rezistor în parte sunt egale cu tensiunea sursei de alimentare: 6 volți. Măsurând tensiunile în bucla 2-3-4-5-6-7-2, obținem:

$$E_{3-2} + E_{4-3} + E_{5-4} + E_{6-5} + E_{7-6} + E_{2-7} = 0 \text{ V} + 0 \text{ V} - 6 \text{ V} + 0 \text{ V} + 0 \text{ V} + 6 \text{ V} = 0 \text{ V}$$

Observați notația căderii de tensiune totale (sume) cu  $E_{2-2}$ . Din moment ce am început măsurătorile buclei la punctul 2 și am terminat tot la punctul 2, suma algebrică a tuturor căderilor de tensiune va fi aceeași cu tensiunea măsurată între același punct ( $E_{2-2}$ ), care, desigur, trebuie să fie zero.

### Legea lui Kirchhoff este universal valabilă



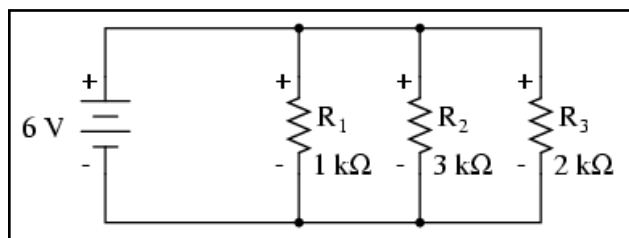
Faptul că acest circuit este paralel și nu serie, nu încurcă cu nimic aplicarea legii lui Kirchhoff pentru tensiune. Din punctul nostru de vedere, întregul circuit ar putea să fie o „cutie neagră” - configurația componentelor să fie complet ascunsă și să avem la dispoziție doar un set de puncte unde să putem măsura tensiunea - și legea lui Kirchhoff tot ar fi valabilă.

Dacă încercăm orice combinație de pași, pornind de la oricare terminal în diagrama de mai sus, completând o buclă astfel încât să ajungem la punctul de plecare, vom vedea că suma algebrică a tuturor căderilor de tensiune va fi tot timpul egală cu zero.

## 4. Circuite divizoare de curent

- Circuitele paralel împart cantitatea totală de curent pe fiecare ramură în parte, proporțiile fiind strict dependente de valorile rezistențelor:  $I_n = I_{\text{Total}} (R_{\text{Total}} / R_n)$

## Analiza unui circuit paralel simplu



Să analizăm un circuit paralel simplu, determinând valorile curenților prin fiecare ramură, respectiv prin fiecare rezistor în parte.

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 6     | 6     | 6     | 6     | V        |
| I      |       |       |       |       | A        |
| R      | 1k    | 3k    | 2k    |       | $\Omega$ |

Cunoscând faptul că pe fiecare component în parte căderea de tensiune este aceeași, putem completa tabelul tensiune/curent/rezistență astfel (mărimile sunt exprimate în volți, amperi și ohmi).

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 6     | 6     | 6     | 6     | V        |
| I      | 6m    | 2m    | 3m    |       | A        |
| R      | 1k    | 3k    | 2k    |       | $\Omega$ |

Folosind legea lui Ohm ( $I = E / R$ ) putem calcula curentul prin fiecare ramură.

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 6     | 6     | 6     | 6     | V        |
| I      | 6m    | 2m    | 3m    | 11m   | A        |
| R      | 1k    | 3k    | 2k    |       | $\Omega$ |

Știind că în circuitele paralele suma curenților de pe fiecare ramură reprezintă curentul total, putem completa tabelul cu valoarea totală a curentului prin circuit, 11 mA.

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total  | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|--------|----------|
| E      | 6     | 6     | 6     | 6      | V        |
| I      | 6m    | 2m    | 3m    | 11m    | A        |
| R      | 1k    | 3k    | 2k    | 545.45 | $\Omega$ |

Ultimul pas este calcularea rezistenței totale, folosind legea lui Ohm ( $R = E / I$ ), sau folosind formula rezistențelor în paralel; indiferent de metoda folosită, rezultatul este același.

## Prin fiecare rezistor, curentul depinde strict de rezistența acestuia

Ar trebui să fie evident deja faptul că prin fiecare rezistor, curentul depinde de rezistența acestuia, știind că valoarea tensiunii prin toți rezistorii este aceeași. Această relație nu este una direct proporțională, ci invers proporțională. De exemplu, curentul prin  $R_1$  este dublu față de curentul prin  $R_3$ , iar rezistența lui  $R_3$  este de două ori cea a rezistorului  $R_1$ .

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total  | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|--------|----------|
| E      | 24    | 24    | 24    | 24     | V        |
| I      | 24m   | 8m    | 12m   | 44m    | A        |
| R      | 1k    | 3k    | 2k    | 545.45 | $\Omega$ |

Dacă ar fi să schimbăm sursa de tensiune din acest circuit, am descoperi că acest raport nu se modifică.

Curentul prin  $R_1$  este și de data aceasta dublu curentului prin  $R_3$ , cu toate că valoarea tensiunii de alimentare (tensiunea bateriei) s-a modificat. Proportionalitatea curenților între diferite ramuri ale circuitului depinde de rezistență.

De asemenea, ca și în cazul circuitelor divizoare de tensiune, curenții ramurilor reprezintă fracțiuni fixe din curentul total. Cu toate că tensiunea sursei a crescut de patru ori, raportul dintre curentul ramurii și curentul total a rămas același:

$$\frac{I_{R1}}{I_{total}} = \frac{6 \text{ mA}}{11 \text{ mA}} = \frac{24 \text{ mA}}{44 \text{ mA}} = 0,545$$

$$\frac{I_{R2}}{I_{total}} = \frac{2 \text{ mA}}{11 \text{ mA}} = \frac{8 \text{ mA}}{44 \text{ mA}} = 0,181$$

$$\frac{I_{R3}}{I_{total}} = \frac{3 \text{ mA}}{11 \text{ mA}} = \frac{12 \text{ mA}}{44 \text{ mA}} = 0,272$$

## Formula divizorului de curent

Din acest motiv, un circuit paralel este denumit adesea un divizor de curent pentru abilitatea sa de divizare a curentului total în fracții. Putem determina o formulă pentru calculul curentului prin rezistorii paraleli, atunci când cunoaștem curentul total, rezistența totală și rezistențele individuale:

$$I_n = \frac{E_n}{R_n} - \text{curentul printr} - \text{un rezistor oarecare}$$

$$E_{total} = E_n = I_{total} R_{total} - \text{tensiunea într} - \text{un circuit paralel}$$

înlocuind  $E_n$  cu  $I_{total} R_{total}$  în prima ecuație obținem

$$I_n = \frac{I_{total} R_{total}}{R_n} - \text{curentul printr} - \text{un rezistor oarecare}$$

sau

$$I_n = I_{total} \frac{R_{total}}{R_n}$$

Raportul dintre rezistența totală și rezistența individuală este același ca și între curentul individual (pe ramură) și cel total. Această formulă poartă denumirea de formula divizorului de curent, și este o metodă mai scurtă de determinare a curenților prin ramură într-un circuit paralel atunci când se cunoaște curentul total.

## Recalcularea circuitului paralel inițial

$$I_{R1} = 11 \text{ mA} \frac{545,45 \Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 6 \text{ mA}$$

$$I_{R2} = 11 \text{ mA} \frac{545,45 \Omega}{3 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

$$I_{R3} = 11 \text{ mA} \frac{545,45 \Omega}{2 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

Folosind circuitul paralel original ca și exemplu, putem recalcula curentul prin ramuri folosind această formulă, dacă începem prin a cunoaște valoarea totală a curentului și a rezistenței:

### Comparație între formula divizorului de curent și cea a divizorului de tensiune

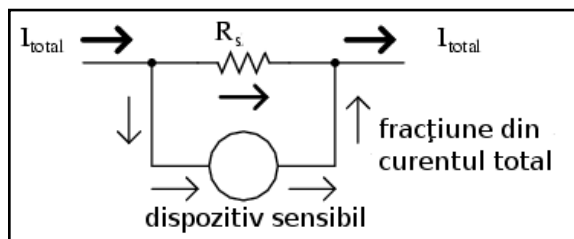
$$E_n = E_{total} \frac{R_n}{R_{total}} - \text{formula divizorului de tensiune}$$

$$I_n = I_{total} \frac{R_{total}}{R_n} - \text{formula divizorului de curent}$$

Dacă facem o comparație între cele două formule divizoare, putem observa că sunt extrem de asemănătoare. Putem observa totuși, că în cazul divizorului de tensiune, raportul este  $R_n$  (rezistență individuală) la  $R_{total}$ , iar în cazul divizorului de curent, raportul este chiar invers  $R_{total}$  la  $R_n$ :

Este foarte ușor să încurcăm cele două ecuații prin inversarea raportului rezistențelor. O modalitate simplă de memorare a formei corecte este să ținem minte că ambele raporturi dintre cele două ecuații trebuie să reprezinte un număr subunitar (între 0 și 1). Dacă raportul este inversat, vom obține o valoare mai mare decât unu, prin urmare greșită. Cunoscând faptul că rezistența totală într-un circuit serie (divizor de tensiune) este tot timpul mai mare decât oricare dintre rezistențele luate separat, putem să deducem că raportul corect este  $R_n/R_{total}$ . La fel, cunoscând faptul că rezistența totală într-un circuit paralel (divizor de curent) este tot timpul mai mică decât valoarea oricărei rezistențe luate individual, putem să deducem raportul corect,  $R_n/R_{total}$ .

### Aplicații ale divizorului de curent



Circuitele divizoare de curent își găsesc aplicație (de exemplu) în circuitele de măsură, acolo unde o fracție din curentul de măsurat trebuie să fie redirecționat spre un dispozitiv sensibil de

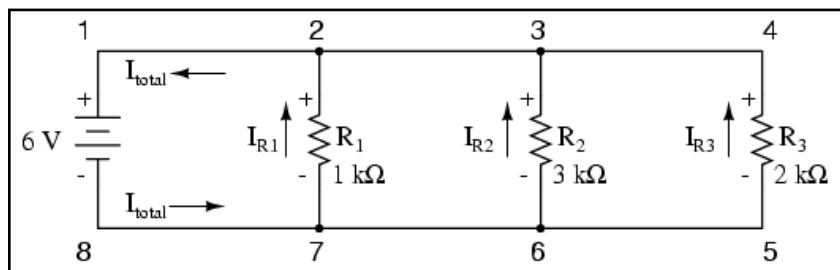


deteție. Folosind formula rezistorului de curent, se poate afla valoarea exactă a rezistenței folosită pe post de șunt pentru a „devia” cantitatea precisă de curent prin dispozitiv în orice situație.

## 5. Legea lui Kirchhoff pentru curent

- Suma algebrică a tuturor curenților ce intră și ies dintr-un nod trebuie să fie egală cu zero

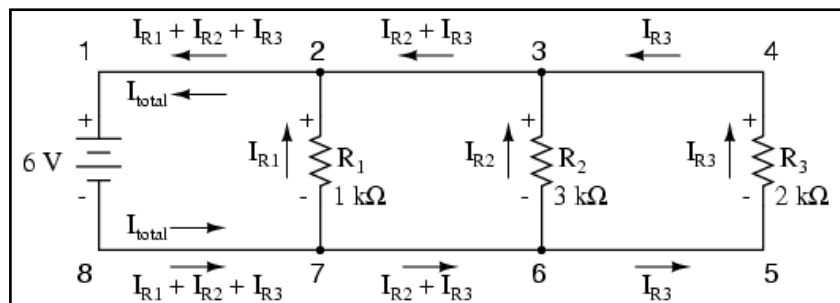
### Analiza unui circuit paralel simplu



Să considerăm următorul circuit paralel.

| Marime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | Total  | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|--------|----------|
| E      | 6     | 6     | 6     | 6      | V        |
| I      | 6m    | 2m    | 3m    | 11m    | A        |
| R      | 1k    | 3k    | 2k    | 545,45 | $\Omega$ |

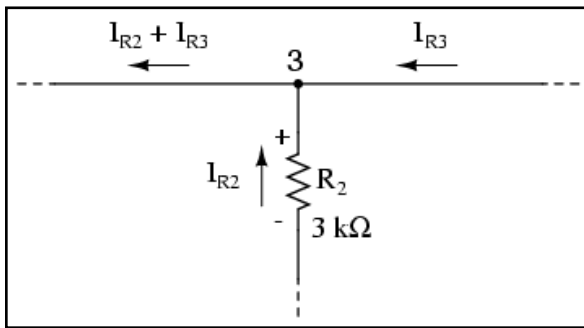
Calculând toate valorile tensiunilor și curenților din acest circuit, obținem tabelul alăturat.



În acest moment cunoaștem valorile curenților din fiecare ramură precum și valoarea totală a curentului din circuit.

Cunoaștem faptul că valoarea totală a curentului dintr-un circuit paralel trebuie să fie egală cu suma curenților de pe fiecare ramură, dar mai putem observa un principiu foarte important în acest circuit.

Să observăm așadar ce se întâmplă la fiecare nod (locul de întâlnire a cel puțin trei ramuri).



Pe ramura negativă de jos (8-7-6-5), la fiecare nod curentul principal se divide pe fiecare ramură succesivă spre rezistori. Pe ramura pozitivă de sus (1-2-3-4) curentul de pe fiecare ramură se „alătură” curentului principal. Dacă ne uităm mai atent la un anumit nod, precum 3, observăm că valoarea curentului ce intră într-un nod este egală cu valoarea curentului ce părăsește acel nod.

## Definiție

Avem doi curenți care intră în nodul 3, din partea dreaptă și de jos. Din partea stângă avem un singur curent care iese din nod, egal ca și valoare cu suma celor doi curenți care intră. Acest lucru este valabil pentru oricare nod, indiferent de numărul ieșirilor/intrărilor. Matematic, putem exprima această observație astfel:

$$I_{intrare} = I_{ieșire}$$

O altă formă ușor diferită dar echivalentă din punct de vedere matematic este următoarea:

$$I_{intrare} - I_{ieșire} = 0$$

Pe scurt, legea lui Kirchhoff pentru curent sună astfel:

**„Suma algebrică a tuturor curenților ce intră și ies dintr-un nod trebuie să fie egală cu zero”**

Adică, dacă notăm polaritatea fiecărui curent, cu „+” dacă intră într-un nod și cu „-” dacă iese, suma lor va da tot timpul zero.

În cazul nodului 3 de mai sus, putem determina valoarea curentului ce iese din nod prin partea stângă folosind legea lui Kirchhoff pentru curent astfel:

$$I_2 + I_3 + I = 0$$

$$2 \text{ mA} + 3 \text{ mA} + I = 0$$

$$I = -2 \text{ mA} - 3 \text{ mA} = -5 \text{ mA}$$

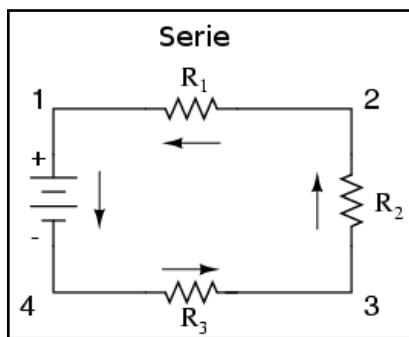
Semnul negativ (-) pentru valoarea de 5 mA ne spune faptul că, curentul iese din acest nod, în contradicție cu cei doi curenți de 2 mA și 3 mA ce sunt cu semnul pozitiv (+), și prin urmare intră în nod. Cele două notații („+” și „-”) pentru intrarea, respectiv ieșirea curentului din nod sunt pur arbitrare, atâta timp cât reprezintă semne diferite pentru direcții diferite și prin urmare putem aplica legea lui Kirchhoff pentru curenți.

## 07 - Circuite serie-paralel combinate

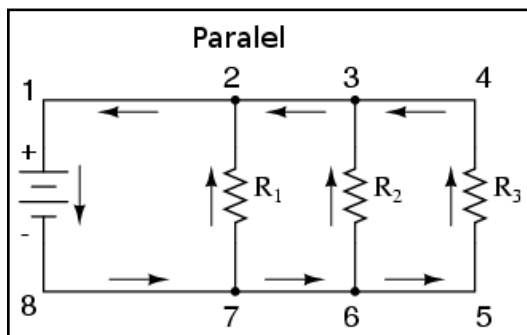
### 1. Ce este un circuit serie-paralel

- Regulile circuitelor serie și paralel trebuie să fie aplicate selectiv atunci când aveți de a face cu un circuit combinat serie-paralel

#### Circuitele serie simple și circuitele paralel simple



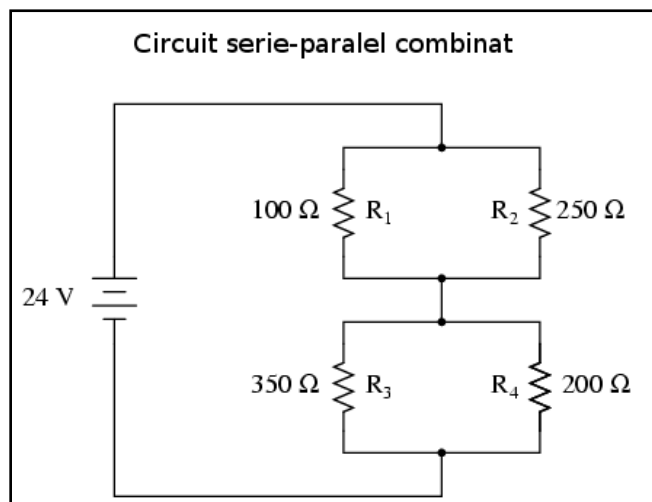
În cazul circuitelor serie simple, toate componentele sunt legate cap la cap și formează o singură cale pentru curgerea electronilor prin circuit.



În cazul circuitelor paralel simple, toate componentele sunt legate între același set de puncte comune din punct de vedere electric, formându-se astfel mai multe căi pentru curgerea electronilor de la un capăt la celălalt al bateriei.

În ambele cazuri, avem de a face cu anumite seturi specifice de reguli pentru relațiile dintre tensiune, curent și rezistență (vezi circuitele serie și circuitele paralel).

## Identificarea părților serie și paralel



Dar, în cazul în care o parte dintre componente sunt legate în serie și o altă parte a componentelor în paralel, nu este posibilă aplicarea unei singure reguli pentru întreg circuitul, sau pentru fiecare parte constituantă. În schimb, vom încerca identificarea părților serie din circuit și a părților paralele, ca mai apoi să aplicăm regulile necesare în funcție de tipul circuitului. Să vedem un exemplu.

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $R_4$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      |       |       |       |       | 24    | V        |
| I      |       |       |       |       |       | A        |
| R      | 100   | 250   | 350   | 200   |       | $\Omega$ |

Acesta nu este nici un circuit serie simplu nici unul paralel simplu, ci conține elementele din ambele tipuri. Curentul iese prin partea de jos a bateriei, se împarte (ramifică) pe cele două ramuri spre  $R_3$  și  $R_4$ , se reîntâlnește, se ramifică încă odată spre  $R_1$  și  $R_2$ , se reîntâlnește din nou și

se reîntoarce la baterie. Există mai mult de un singur drum pentru circulația curentului (nu este serie), dar totuși, există mai mult de două seturi de puncte electric comune (nu este paralel).

Dacă putem distinge care părți din circuit sunt serie și care paralel, putem analiza circuitul în mai multe etape, fiecare etapă pe rând, folosind regulile corecte pentru determinarea relațiilor dintre tensiune, curent și rezistență.

## 2. Metode de analiză a circuitelor serie-paralel

Pașii pentru analiza unui circuit serie-paralel combinat sunt următorii:

- Reducerea circuitului original la un singur rezistor echivalent, cu redesenarea circuitului la fiecare pas, un pas însemnând reducerea conxiunilor serie sau paralel la un singur rezistor echivalent
- Calcularea rezistenței totale
- Calcularea curentului total
- Determinarea căderilor de tensiune pe fiecare rezistor echivalent și curenții pe fiecare ramură la fiecare pas, un pas însemnând „dezvoltarea” circuitului redus spre forma inițială

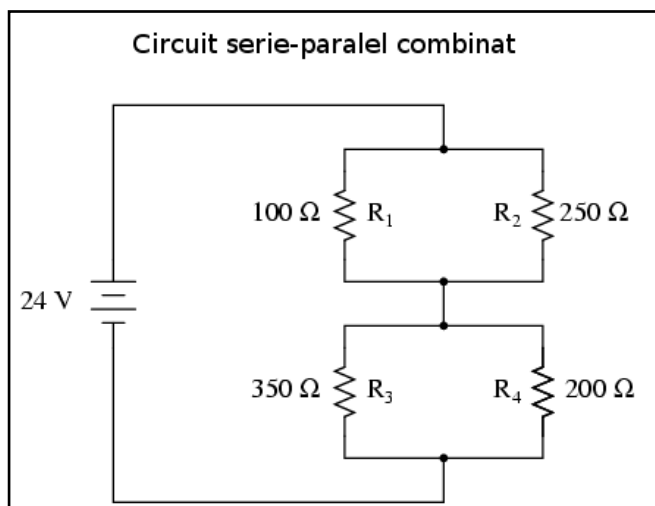
### Pașii necesari pentru rezolvarea unui circuit serie-paralel

Scopul analizei circuitului serie-paralel este determinarea tuturor căderilor de tensiune, curenților și puterilor disipate în circuit. Strategia generală pentru atingerea acestui scop este următoarea:

1. Determinăm conexiunile existente din circuit: care rezistori sunt legați în serie și care în paralel
2. Redesenăm circuitul, înlocuind fiecare din combinațiile serie sau paralel din circuit identificate la primul punct, cu un singur rezistor echivalent. Dacă folosim un tabel pentru scrierea valorilor, atunci vom realiza o nouă coloană în tabel pentru fiecare rezistență echivalentă
3. Repetăm pașii 1 și 2 până ce întreg circuitul este redus la un singur rezistor echivalent
4. Calculăm curentul total cunoscând tensiunea și rezistența totală utilizând legea lui Ohm ( $I = E / R$ )
5. Folosind valorile totale ale tensiunii și ale curentului, mergem un pas înapoi, spre ultima reducere echivalentă din circuit și inserăm valorile în locurile necesare
6. Cunoscând rezistențele și tensiunea totală / curentul total de la pasul 5, folosim legea lui Ohm pentru calcularea valorilor necunoscute (tensiuni sau curenți) ( $E = IR$  sau  $I = E / R$ )
7. Repetăm pașii 5 și 6 până când toate valorile tensiunilor și ale curenților sunt cunoscute în configurația inițială a circuitului. Practic, mergem pas cu pas de la versiunea simplificată a circuitului spre versiunea originală, complexă a acestuia, introducând valorile tensiunii și ale curentului acolo unde este necesar, până când toate valorile tensiunilor și curenților sunt cunoscute
8. Calculăm puterile disipate în circuit din valorile cunoscute ale tensiunilor, curenților și/sau rezistențelor.

## Analiza unui circuit serie-paralel combinat

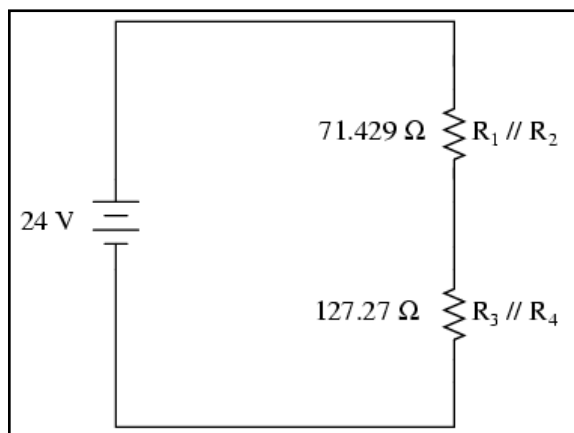
Deși sună destul de complicat, vom înțelege întregul proces mult mai ușor dacă luăm un exemplu practic:



| Mărimă | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $R_4$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      |       |       |       |       | 24    | V        |
| I      |       |       |       |       |       | A        |
| R      | 100   | 250   | 350   | 200   |       | $\Omega$ |

### Simplificarea circuitului

În exemplul de mai sus, rezistorii  $R_1$  și  $R_2$  sunt conectați în paralel; la fel și  $R_3$  cu  $R_4$ . Pentru că am identificat acest tip de conexiune ca fiind una paralelă, putem înlocui fiecare din cele două combinații printr-o singură rezistență echivalentă. Circuitul redesenat arată astfel:



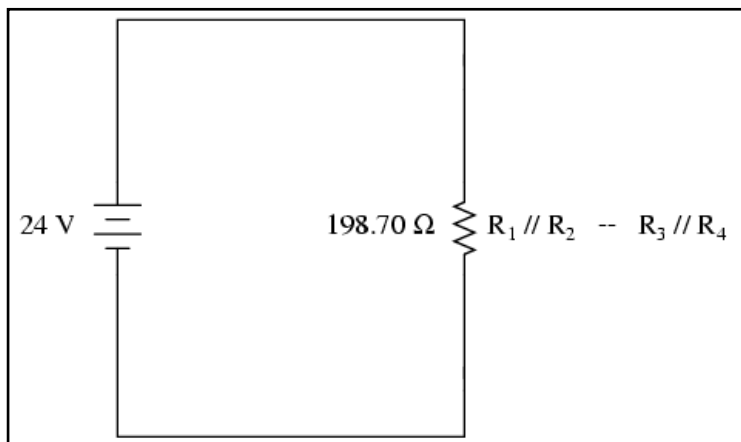
Simbolul (//) este folosit pentru a reprezenta faptul că valoarea celor două rezistoare a fost obținută cu ajutorul formulei  $1/(1/R)$ . Rezistorul de  $71.429 \Omega$  de sus este echivalentul celor doi rezistori  $R_1$  și  $R_2$  legați în paralel. Rezistorul de  $127.27 \Omega$  de jos este echivalentul celor doi rezistori  $R_3$  și  $R_4$  legați în paralel.

Tabelul valorilor poate fi mărit cu două coloane pentru a include și valorile acestor doi rezistori echivalenți:

| Mărimă | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $R_4$ | $R_1 // R_2$ | $R_3 // R_4$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------------|-------|----------|
| E      |       |       |       |       |              |              | 24    | V        |
| I      |       |       |       |       |              |              |       | A        |
| R      | 100   | 250   | 350   | 200   | 71,429       | 127,27       |       | $\Omega$ |

Ar trebui să devină aparent că circuitul a fost redus la o configurație serie simplă ce conține doar doi rezistori (echivalenți).

Pasul final în reducerea circuitului este adunarea acestor două rezistențe și aflarea rezistenței totale a circuitului. Rezultatul acestei adunări este  $198.7\Omega$ . Acum putem re-desena circuitul cu o singură rezistență echivalentă. Adăugăm, de asemenea, încă o coloană în tabel, coloană ce se va suprapune cu „Total”. Notația coloanei este  $(R_1//R_2--R_3//R_4)$  pentru a indica modul inițial de conectare al rezistențelor în circuit. Simbolul „--” reprezintă conexiune „serie”, iar simbolul „//” reprezintă conexiune „paralel”.



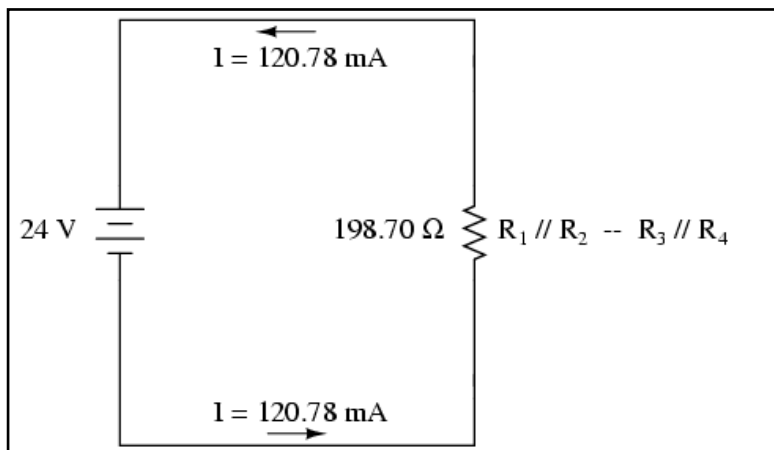
| Mărimē | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>1</sub> // R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> // R <sub>4</sub> | R <sub>1</sub> // R <sub>2</sub> -- R <sub>3</sub> // R <sub>4</sub> (Total) | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------|
| E      |                |                |                |                |                                  |                                  | 24                                                                           | V       |
| I      |                |                |                |                |                                  |                                  |                                                                              | A       |
| R      | 100            | 250            | 350            | 200            | 71,429                           | 127,27                           | <b>198,70</b>                                                                | Ω       |

### Determinarea curentului total din circuit

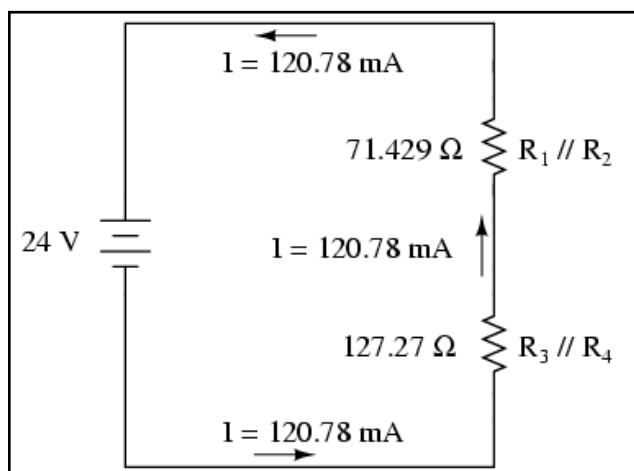
În acest moment, putem folosi legea lui Ohm ( $I = E / R$ ) pentru determinarea curentului total prin circuit și completarea coloanei corespunzătoare din tabel:

| Mărimē | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>1</sub> // R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> // R <sub>4</sub> | R <sub>1</sub> // R <sub>2</sub> -- R <sub>3</sub> // R <sub>4</sub> (Total) | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------|
| E      |                |                |                |                |                                  |                                  | 24                                                                           | V       |
| I      |                |                |                |                |                                  |                                  | <b>120,78</b>                                                                | A       |
| R      | 100            | 250            | 350            | 200            | 71,429                           | 127,27                           | 198,70                                                                       | Ω       |

Reîntorcându-ne la diagrama circuitului, valoarea totală a curentului este momentan singura ce apare pe desen:



## Revenirea la forma inițială



Acum putem începe să ne re-întoarcem la pașii anteriori în simplificarea circuitului spre configurația originală. Pasul următor este să ne întoarcem la circuitul în care  $R_1//R_2$  și  $R_3//R_4$  sunt în serie.

## Valoarea curentului prin ambele seturi de rezistori echivalenți este aceeași

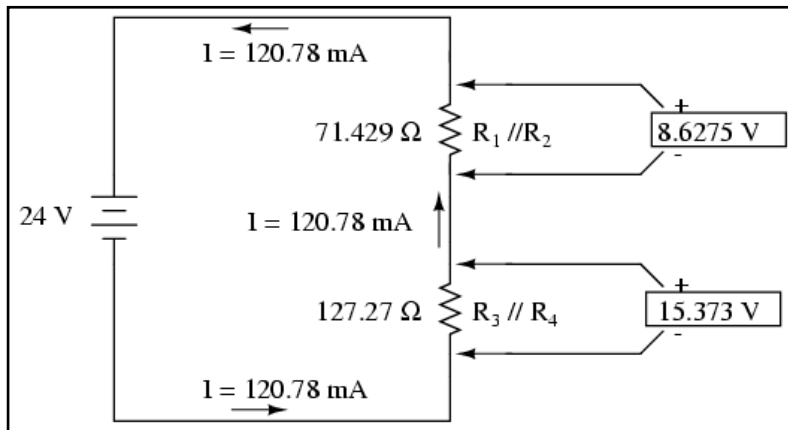
Din moment ce  $R_1 // R_2$  și  $R_3 // R_4$  sunt în serie, curentul prin ambele seturi de rezistențe echivalente este același. Mai mult decât atât, valoarea curentului prin ele trebuie să fie egală cu valoarea curentului total; putem completa coloana curent total din tabel cu valoarea curentului total pentru fiecare din cele două grupuri de rezistori echivalenți:

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $R_4$ | $R_1 // R_2$ | $R_3 // R_4$ | $R_1 // R_2 -- R_3 // R_4$ (Total) | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------------|------------------------------------|----------|
| E      |       |       |       |       |              |              | 24                                 | V        |
| I      |       |       |       |       | 120,78       | 120,78       | 120,78                             | A        |
| R      | 100   | 250   | 350   | 200   | 71,429       | 127,27       | 198,70                             | $\Omega$ |

## Determinarea căderilor de tensiune pe fiecare grup echivalent

Cunoscând curentul prin rezistențele echivalente  $R_1//R_2$  și  $R_3//R_4$ , putem aplica legea lui Ohm ( $E=IR$ ) pentru aflarea căderilor de tensiune pentru fiecare grup în parte, completând și tabelul:

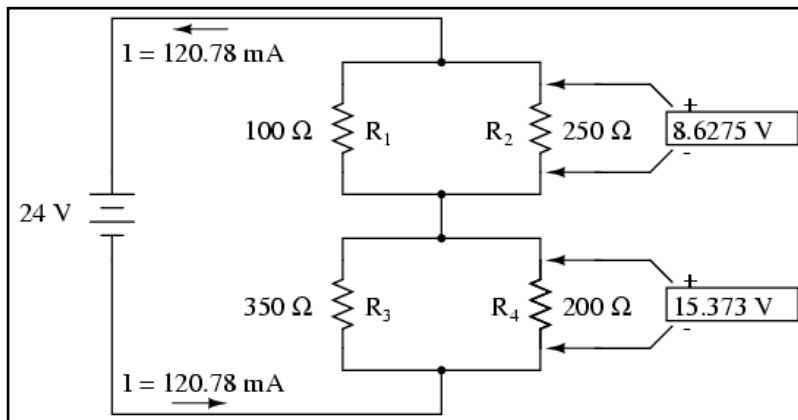




| Mărimă | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>1</sub> // R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> // R <sub>4</sub> | R <sub>1</sub> // R <sub>2</sub> -- R <sub>3</sub> // R <sub>4</sub> (Total) | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------|
| E      |                |                |                |                | 8,6275                           | 15,373                           | 24                                                                           | V       |
| I      |                |                |                |                | 120,78                           | 120,78                           | 120,78                                                                       | A       |
| R      | 100            | 250            | 350            | 200            | 71,429                           | 127,27                           | 198,70                                                                       | Ω       |

### Determinarea tuturor căderilor de tensiune

Știm că  $R_1 // R_2$  și  $R_3 // R_4$  sunt de fapt conexiuni echivalente paralele, iar căderile de tensiune în circuitele paralele sunt egale. Cu alte cuvinte, putem să mai facem un pas înapoi spre configurația inițială a circuitului și să completăm tabelul cu valorile calculate:



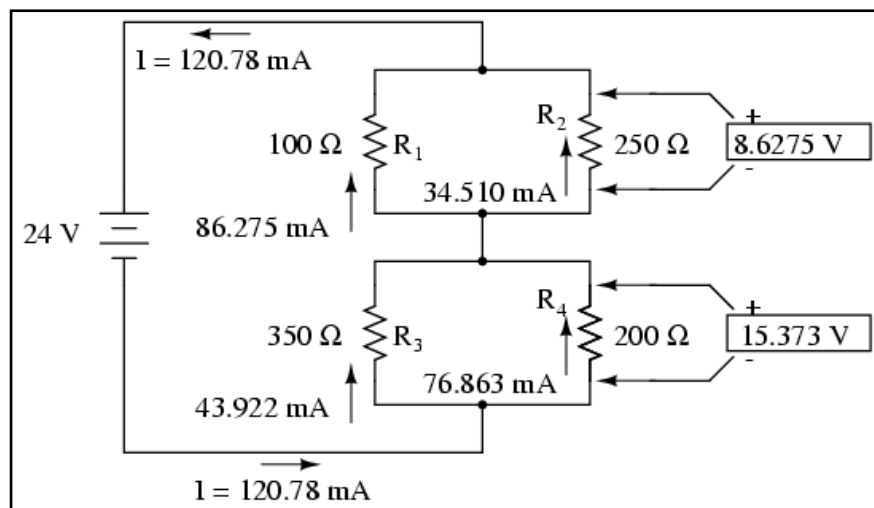
| Mărimă | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>1</sub> // R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> // R <sub>4</sub> | R <sub>1</sub> // R <sub>2</sub> -- R <sub>3</sub> // R <sub>4</sub> (Total) | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------|
| E      | 8,6275         | 8,6275         | 15,373         | 15,373         | 8,6275                           | 15,373                           | 24                                                                           | V       |
| I      |                |                |                |                | 120,78                           | 120,78                           | 120,78                                                                       | A       |
| R      | 100            | 250            | 350            | 200            | 71,429                           | 127,27                           | 198,70                                                                       | Ω       |

### Determinarea tuturor curenților din circuit

Secțiunea originală a tabelului pentru rezistori este acum completată (coloana  $R_1$  la  $R_4$ ). Aplicând legea lui Ohm pentru celelalte valori rămase necompletate ( $I=E/R$ ), putem determina valorile prin  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  și  $R_4$ :

| Mărime | $R_1$   | $R_2$   | $R_3$   | $R_4$   | $R_1 // R_2$ | $R_3 // R_4$ | $R_1 // R_2 -- R_3 // R_4$ (Total) | Unitate  |
|--------|---------|---------|---------|---------|--------------|--------------|------------------------------------|----------|
| E      | 8,6275  | 8,6275  | 15,373  | 15,373  | 8,6275       | 15,373       | 24                                 | V        |
| I      | 86,275m | 34,510m | 43,922m | 76,863m | 120,78       | 120,78       | 120,78                             | A        |
| R      | 100     | 250     | 350     | 200     | 71,429       | 127,27       | 198,70                             | $\Omega$ |

Circuitul inițial cu toate valorile tensiunilor, curenților și a rezistențelor arată astfel:



## **08 - Aparate de măsură**

### **01. Ce este un aparat de măsură**

- Mecanismul de afișaj al unui aparat de măsură analogic presupune deplasarea unui ac indicator pe o scală gradată
- Aparatele de măsură electromagnetice funcționează pe principiul generării unui câmp magnetic la trecerea unui curent electric printr-un conductor
- Aparatele de măsură electrostatice funcționează pe principiul generării unei forțe fizice datorate câmpului electric dintre două plăci
- Tuburile catodice utilizează un câmp electrostatic pentru devierea unui fascicol de electroni

#### **Definiția aparatului de măsură**

Un aparat de măsură este orice dispozitiv special realizat pentru afișarea unei mărimi electrice într-un format ce poate fi interpretat de către un operator uman. De obicei, acest format este sub formă vizuală: deplasarea unui indicator pe o scală, o serie de dispozitive luminoase aranjate sub forma unui bargraph, sau un afișaj format din cifre.

În analiza și testarea circuitelor, există dispozitive proiectate pentru realizarea măsurătorilor mărimilor electrice de bază, și anume, tensiune, curent și rezistență. Există multe alte tipuri de aparate de măsură, dar în acest capitol ne vom concentra atenția, în principal, pe modul de funcționare al acestora trei.

Majoritatea aparatelor de măsură moderne sunt digitale, folosind un afișaj numeric. Modelele mai vechi de aparate de măsură sunt însă mecanice, utilizând un indicator mecanic pentru afișarea mărimii măsurate. În ambele cazuri, este nevoie de o setare a aparatului pentru indicarea corespunzătoare a mărimilor măsurate. În acest capitol ne vom referi exclusiv asupra principiilor de funcționare ale aparatelor de măsură analogice (mecanice).

#### **Aparate de măsură electromagnetice**

Majoritatea aparatelor de măsură analogice se bazează pe principiul electromagnetismului, și anume, pe faptul că trecerea unui curent printr-un conductor produce un câmp magnetic perpendicular pe axa de deplasare a electronilor. Cu cât valoarea curentului este mai mare, cu atât mai mare va fi câmpul magnetic produs. Dacă acest câmp magnetic produs de conductor este liber să interacționeze cu un alt câmp magnetic, vom asista la dezvoltarea unei forțe fizice între cele două surse ale câmpurilor magnetice. Dacă una dintre aceste surse este liberă să se deplaseze față de cealaltă sursă, aceasta se va deplasa pe măsură ce curentul trece prin conductor, deplasarea fiind direct proporțională cu valoarea curentului.

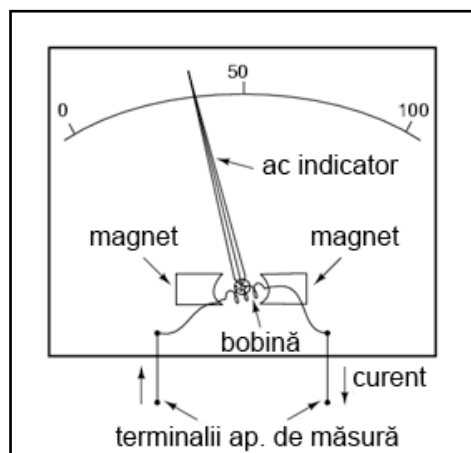
## Galvanometrul



Primele astfel de aparate de măsură construite erau cunoscute sub numele de galvanometre, fiind recunoscute pentru precizia lor. Un model foarte simplu de galvanometru constă dintr-un ac magnetizat (asemenea celui folosit la compas) suspendat la capătul unui fir și poziționat în interiorul unei înfășurări conductoare. La trecerea curentului prin această înfășurare, se va produce un câmp magnetic ce va modifica poziția inițială a acului. Un astfel de aparat antic este prezentat în figura alăturată.

Astfel de aparate nu mai sunt însă practice în prezent, fiind extrem de sensibile la orice tip de mișcare și la interferențele datorate câmpului magnetic al pământului. Singurul lor scop rămâne prezentarea conceptelor de bază ale dispozitivelor experimentale. În prezent, termenul de „galvanometru” este utilizat pentru desemnarea oricărui tip de aparat de măsură de o precizie excepțională, nefiind neapărat un dispozitiv ca cel prezentat mai sus.

## Aparate de măsură cu magnet permanent

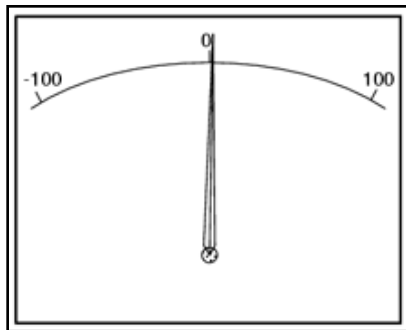


Aparatele de măsură electromagnetice sunt realizate în prezent dintr-o bobină suspendată într-un câmp magnetic, protejată de majoritatea influențelor externe. Astfel de dispozitive sunt cunoscute sub numele de aparate de măsură cu magnet permanent.

În figura de mai sus, acul indicator este poziționat aproximativ la 35% pe scala gradată, zero fiind în stânga iar valoarea maximă regăsindu-se în partea dreaptă. O creștere a curentului de măsurat va duce la o deplasare a acului indicator spre dreapta iar o descreștere a lui va duce la o deplasare a acului spre stânga. Afișajul aparatului de măsură conține o scală gradată cu cifre pentru indicarea valorilor mărimii de măsurat, indiferent de tipul acesteia.

Cu alte cuvinte, dacă este necesară o valoare de  $50 \mu\text{A}$  pentru deplasarea maximă a acului indicator (spre capătul din dreapta), scala va avea scrisă o valoare de  $0 \mu\text{A}$  în partea stângă și o valoare de  $50 \mu\text{A}$  în partea dreaptă; mijlocul va fi desigur  $25 \mu\text{A}$ .

În exemplul din figură, acul ar indica în acest caz ipotetic o valoare a curentului de  $17,5 \mu\text{A}$ . De obicei, scala este împărțită în gradații mult mai mici, din 5 în  $5 \mu\text{A}$ , sau chiar la  $1 \mu\text{A}$ , pentru a permite o citire mult mai precisă a indicației acului.

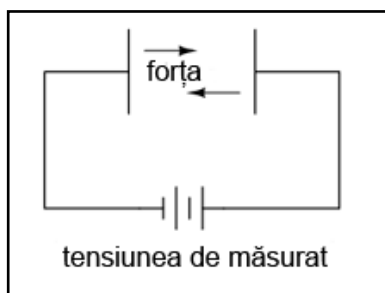


Majoritatea aparatelor pot detecta polaritatea curentului, o direcție a acestuia ducând la deplasarea acului într-un anumit sens, iar direcția opusă a curentului ducând la o deplasare în sens contrar al acului indicator. Modele D'Arsonval și Weston sunt de acest tip.

Există însă și aparate care nu sunt sensibile la modificarea sensului curentului prin circuit, bazându-se pe atragerea unui cursor mobil de fier, nemagnetizat, către conductorul de curent fix pentru deplasarea acului indicator. Astfel de aparate sunt folosite pentru măsurător în curent alternativ. Un dispozitiv sensibil la variația polarității curentului, ar vibra pur și simplu înainte și înapoi fără a putea da o indicație practică a mărimii de măsurat.

## Aparate de măsură electrostatice

Deși majoritatea aparatelor de măsură analogice se bazează pe principiul electromagnetismului, câteva dintre ele se bazează pe electrostatică, cu alte cuvinte, pe forța de atracție sau de respingere generată de sarcinile electrice în mediul dintre ele.

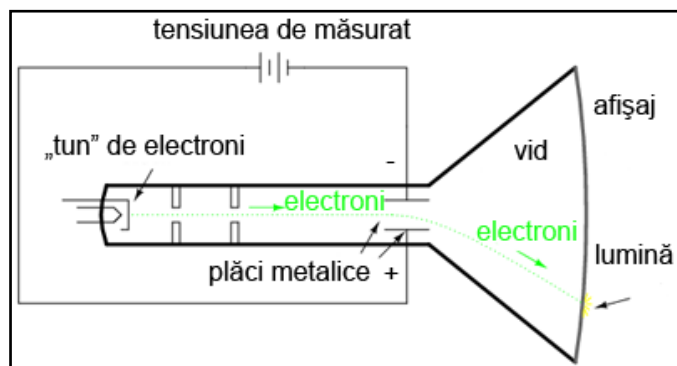


Dacă aplicăm o tensiune între două suprafețe conductoare separate printr-un dielectric format din aer, va exista o forță fizică de atracție între cele două suprafețe, forța capabilă să indice valoarea tensiunii. Această forță este direct proporțională cu tensiunea aplicată între plăci și invers proporțională cu pătratul distanței dintre ele. De asemenea, forța nu depinde de polaritate, rezultând astfel un dispozitiv insensibil la variația polarității tensiunii.

Din păcate, forța generată de atracția electrostatică este foarte mică în cazul tensiunilor normale, astfel încât aceste tipuri de aparate de măsură nu sunt practice pentru instrumentele de test normale. Astfel de aparate electrostatice sunt folosite pentru măsurarea tensiunilor înalte, de ordinul miilor de volți.

Unul dintre cele mai mari avantaje ale aparatelor electrostatice constă în rezistența electrică extrem de mare, față de aparatele electromagnetice care au o rezistență electrică mult mai mică. După cum vom vedea în cele ce urmează, o rezistență electrică mare, rezultând într-un curent mult mai mic prin dispozitiv, este absolut necesară pentru realizarea unui voltmetru profesional.

## Tubul catodic (CRT)



O aplicație mult mai întâlnită a dispozitivelor electrostatice este tubul catodic. Acestea sunt tuburi speciale din sticlă, similare celor întâlnite la televizoarele clasice. Într-un astfel de tub, un fascicol de electroni ce se deplasează prin vid, este deviat prin intermediul unei tensiuni existente între două plăci metalice așezate de o parte și de cealaltă a tubului.

Datorită faptului că electronii posedă o sarcină electrică negativă, aceștia tind să fie respinși de placa negativă și atrași de placa pozitivă. O inversare a polarității tensiunii dintre cele două plăci va duce la modificarea în sens contrar al traseului fascicolului de electroni, acest dispozitiv fiind prin urmare sensibil la polaritate.

Electronii, având o greutate mult mai mică decât plăcile metalice, se deplasează mult mai ușor sub acțiunea forței dintre cele două plăci decât plăcile propriu-zise. Traseul lor deviat poate fi detectat pe măsură ce aceștia se lovesc de afișajul din sticla de la capătul tubului, unde întâlnesc un strat subțire de fosfor; rezultatul este emiterea unei unde luminoase ce poate fi observată din exteriorul tubului. Cu cât tensiunea dintre cele două plăci este mai mare, cu atât electronii vor fi deviați mai puternic de la traseul lor inițial, punctul luminos de pe afișaj regăsindu-se la o distanță mai mare față de centrul acestuia.

Într-un tub real există două perechi de plăci metalice pentru deviația electronilor, nu doar una singură, pentru a putea acoperi întreaga arie a afișajului de sticlă din capătul dispozitivului.

Cu toate că aceste dispozitive pot înregistra tensiuni mici cu o precizie ridicată, ele sunt totuși greoaie, fragile și necesită putere electrică pentru funcționare, spre deosebire de dispozitivele electromagnetice ce sunt mult mai compacte și sunt alimentate direct de semnalul de măsurat ce se regăsește la bornele lor.

De obicei, tuburile catodice sunt folosite în combinație cu circuite externe precise pentru formarea unui echipament de test mult mai mare, și anume, osciloscopul. Acest din urmă dispozitiv poate indica variația tensiunii cu timpul, o abilitate extrem de importantă în cazul circuitelor cu tensiuni și curenți variabili în timp.

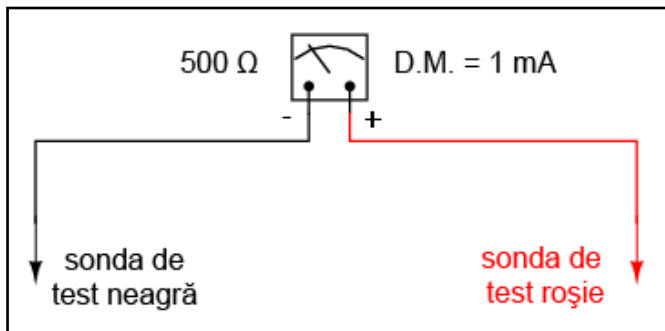
## 02. Voltmetrul

- Măsurarea căderilor de tensiune din circuite se realizează cu ajutorul voltmetrului
- Voltmetrul se conectează tot timpul în paralel

## Limitări ale circuitelor de măsură

Majoritatea aparatelor de măsură sunt dispozitive foarte sensibile. Unele modele, precum D'Arsonval, necesită un curent de doar  $50\ \mu\text{A}$  pentru a duce acul indicator în poziția maximă a scalei de valori; rezistența internă a acestor tipuri de aparate nu este mai mare de  $1000\ \Omega$ . Consecință, un astfel de voltmetru poate măsura o tensiune maximă de doar  $50\ \text{mV}$  ( $50\ \mu\text{A} \times 1000\ \Omega$ ), pentru că la această valoare, acul indicator este în poziția sa maximă (dreapta) și nu se mai poate deplasa. Pentru a putea realiza voltmetre practice, cu capabilități de măsurare a unor tensiuni mult mai mari, folosind aceste dispozitive sensibile, trebuie găsită o metodă de reducere a deplasării acului indicator.

## Modelul D'Arsonval



Să luăm ca și prim exemplu un dispozitiv tip D'Arsonval, cu o rezistență internă a bobinei de  $500\ \Omega$ , și a cărei deplasare maximă (D.M.) se realizează pentru un curent de  $1\ \text{mA}$ .

Aplicând legea lui Ohm, putem determina tensiunea necesară deplasării acului indicator la valoarea maximă:

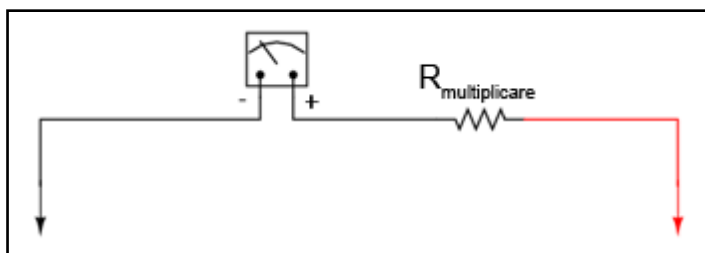
$$E = IR$$

$$E = (1\ \text{mA})(500\ \Omega)$$

$$E = 0,5\ \text{V}$$

Dacă am dori să folosim acest aparat pentru măsurarea tensiunilor ce nu depășesc o jumătate de volt, această configurație ar fi mai mult decât suficientă. Dar pentru a măsura tensiuni peste această valoare, trebuie să aducem unele modificări. Pentru a obține o deplasare observabilă a acului pentru o valoare a tensiunii de peste  $0,5\ \text{V}$ , este nevoie ca doar o parte din tensiunea de măsurat să se regăsească pe bobina internă. Desigur, va trebui să modificăm și scala aparatului de măsură, astfel încât să existe o legătură directă între deplasarea acului indicator și valoarea reală a tensiunii măsurate.

## Introducerea unui divizor de tensiune



Această operație se poate realiza foarte ușor cu ajutorul unui divizor de tensiune. Știind că un divizor de tensiune se realizează cu ajutorul rezistorilor conectați în serie, tot ceea ce trebuie să facem este să conectăm un rezistor în serie cu rezistența internă a

configurației inițiale (inclusă în dispozitiv), rezultatul fiind un divizor de tensiune format din doi rezistori.

Rezistorul serie poartă numele de „rezistor de multiplicare” datorită faptului că multiplică valoarea tensiunii ce poate fi măsurată. Determinarea valorii rezistenței este ușoară dacă suntem familiarizați cu analiza circuitelor serie. De exemplu, să determinăm valoarea  $R_{\text{multiplicare}}$  pentru ca dispozitivul de mai sus (1 mA, 500  $\Omega$ ) să poată măsura tensiuni de până la 10 V.

| Mărime | Deplasare | $R_{\text{multiplicare}}$ | Total | Unitate  |
|--------|-----------|---------------------------|-------|----------|
| E      |           |                           |       | V        |
| I      |           |                           |       | A        |
| R      |           |                           |       | $\Omega$ |

Putem folosi metoda tabelului pentru a ne ușura calculele.

| Mărime | Deplasare  | $R_{\text{multiplicare}}$ | Total      | Unitate  |
|--------|------------|---------------------------|------------|----------|
| E      |            |                           | <b>10</b>  | V        |
| I      | <b>1 m</b> | <b>1 m</b>                | <b>1 m</b> | A        |
| R      | <b>500</b> |                           |            | $\Omega$ |

Cunoscând faptul că deplasarea va fi maximă pentru un curent de 1 mA, precum și faptul că tensiunea la care dorim ca acest lucru să se întâmple este de 10 V (circuit serie, valoare totală), putem completa tabelul astfel.

| Mărime | Deplasare | $R_{\text{multiplicare}}$ | Total       | Unitate  |
|--------|-----------|---------------------------|-------------|----------|
| E      |           |                           | 10          | V        |
| I      | 1 m       | 1 m                       | 1 m         | A        |
| R      | 500       | <b>9,5 k</b>              | <b>10 k</b> | $\Omega$ |

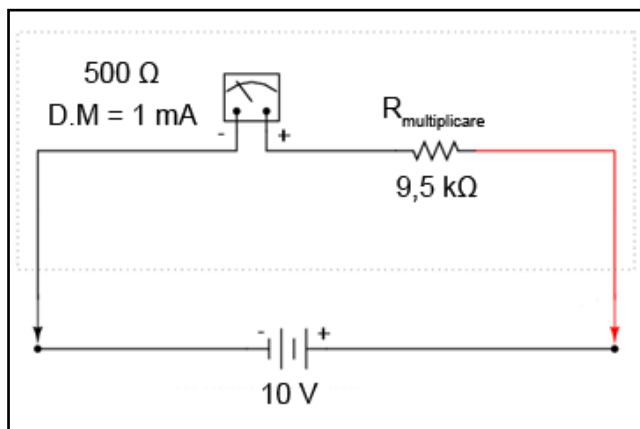
Există mai multe metode de determinare a rezistenței de multiplicare. O variantă presupune determinarea rezistenței totale a circuitului aplicând legea lui Ohm pe coloana „total” ( $R = E / I$ ), scăzând apoi valoarea de ~~500~~ a deplasării pentru a obține valoarea  $R_{\text{multiplicare}}$ .

O a doua metodă constă în determinarea căderii de tensiune pe rezistența internă atunci când deplasarea acului indicator este maximă ( $E = IR$ ), căderea de tensiune pe rezistorul de multiplicare fiind egală cu diferența dintre căderea de tensiune totală și căderea de tensiune pe rezistența internă.

| Mărime | Deplasare  | $R_{\text{multiplicare}}$ | Total | Unitate  |
|--------|------------|---------------------------|-------|----------|
| E      | <b>0,5</b> | <b>9.5</b>                | 10    | V        |
| I      | 1 m        | 1 m                       | 1 m   | A        |
| R      | 500        | 9,5 k                     | 10 k  | $\Omega$ |

Ultimul pas constă în aplicarea legii lui Ohm ( $R = E / I$ ) pentru determinarea rezistenței rezistorului de multiplicare.





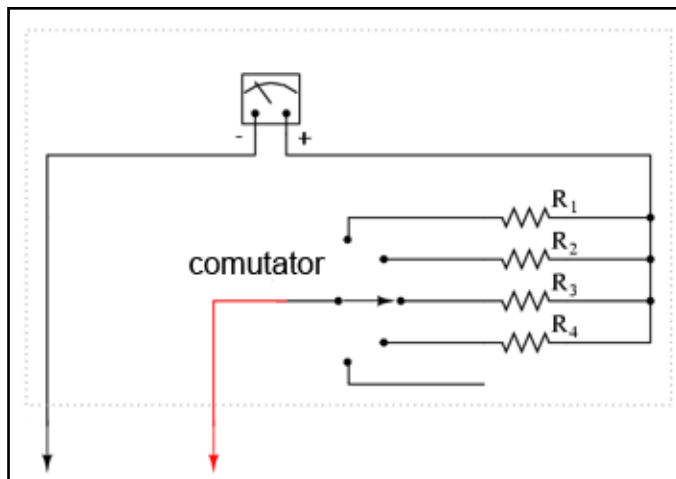
Indiferent de metoda folosită, răspunsul final este același (9,5 kΩ). Putem aplica ambele metode, pentru a ne asigura că rezultatul final este corect.

Cu o cădere de tensiune de exact 10 V între terminalii aparatului de măsură, curentul prin bobina internă va fi de exact 1 mA, acest curent fiind limitat de rezistorul de multiplicare și de rezistența internă a bobinei. Căderea de tensiune pe bobină va fi de exact 0,5 V, iar deplasarea acului indicator va fi maximă (spre dreapta).

Dacă am modifica și scala astfel încât valorile acestuia să fie cuprinse între 0 și 10 V (în loc de 0 și 1 mA), orice persoană care va citi indicația aparatului o va interpreta ca fiind 10 V. Nu este necesar ca utilizatorii voltmetrului să cunoască faptul că aparatul folosește doar o fracțiune din tensiunea totală de măsurat (10 V) a sursei externe. Tot ceea ce contează este ca circuitul să funcționeze corect pentru a putea indica tensiunea totală aplicată.

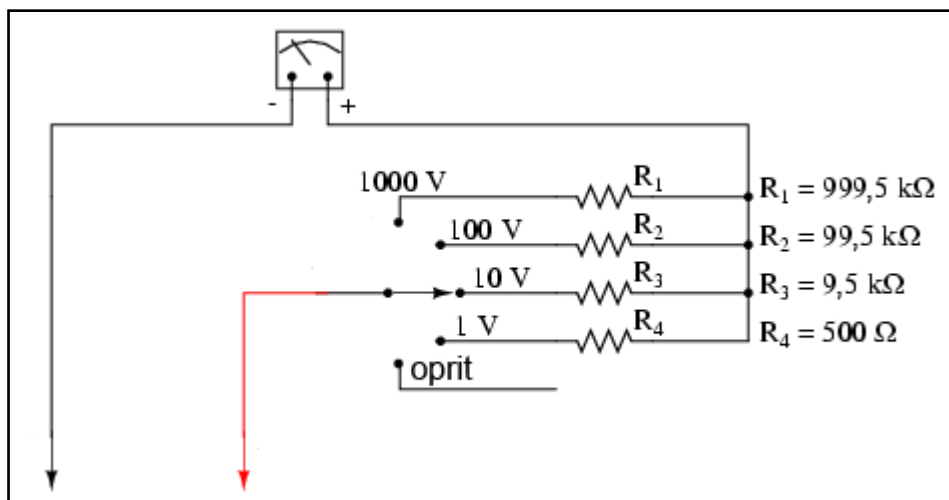
Acesta este într-adevăr și modul de realizare și utilizare al aparatelor de măsură: dispozitivul de detectare al mărimii de măsurat este construit astfel încât să fie necesară doar o cantitate foarte mică de tensiune și de curent pentru funcționarea acestuia, pentru o sensibilitatea cât mai ridicată. Această configurație este apoi conectată la un circuit divizor realizat cu rezistori de precizie, pentru a putea indica o tensiune sau un curent mult mai mari.

### Rezistori de multiplicare și selectorul

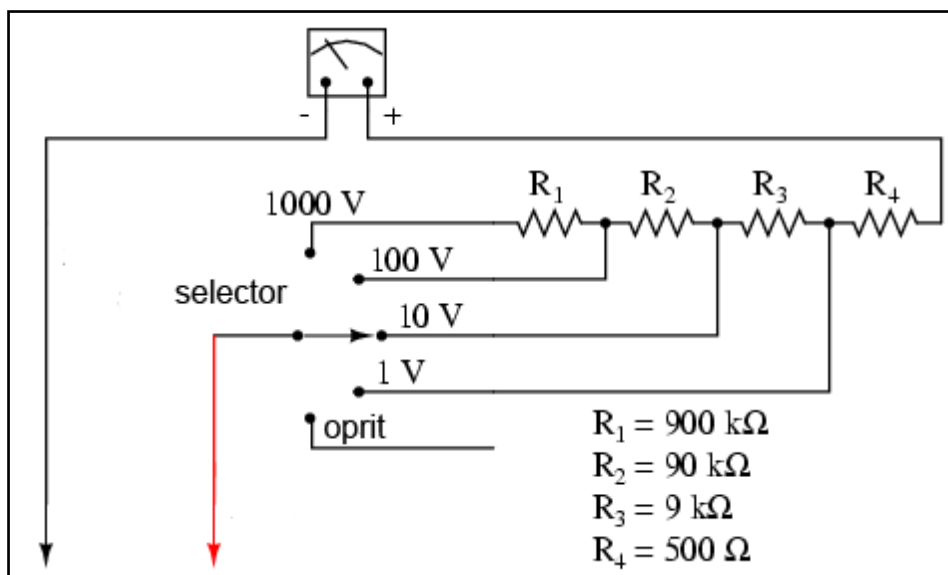


În general, este foarte utilă prezența mai multor astfel de circuite divizoare, pentru a putea măsura o plajă destul de largă de valori folosind același mecanism de bază pentru detectarea semnalului. Acest lucru se poate realiza printr-un comutator multi-polar și câțiva rezistori de multiplicare, fiecare pentru o anumită bandă de tensiuni, conform figurii alăturate.

Comutatorul cu cinci poziții intră în contact doar cu câte un rezistor deodată. În poziția de jos, acesta nu face contact cu niciun rezistor, fiind de fapt în poziția „oprit”. Fiecare rezistor realizează o deplasare maximă diferită a voltmetrului, și toate se bazează pe aceleași caracteristici principale (1 mA, 500 Ω).



Cu o astfel de variantă, valoarea fiecărui rezistor este determinată folosind aceeași metodă utilizată mai sus, cunoscând tensiunea totală necesară în fiecare caz. Pentru un voltmetru cu scala tensiunilor de 1 V, 10 V, 100 V și 1000 V, rezistențele de multiplicare sunt conform figurii alăturate.



Putem observa că valorile rezistorilor de multiplicare sunt puțin ciudate. Este puțin probabil să găsim un rezistor de precizie cu o valoare de 999,5 kΩ, astfel încât suntem nevoiți să folosim o altă configurație.

Cu fiecare pas, tot mai mulți rezistori sunt conectați în circuit prin intermediul comutatorului (selectorului), astfel că rezistența totală va fi egală cu suma rezistențelor individuale. De exemplu, atunci când comutatorul se află în poziția „1000 V”, știm din exemplu precedent că avem nevoie de o rezistență de 999,5 kΩ. Folosind configurația anterioară, aceasta este exact valoarea obținută:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_{total} = 900 \text{ k}\Omega + 90 \text{ k}\Omega + 9 \text{ k}\Omega + 500 \text{ k}\Omega$$

$$R_{total} = 999,5 \text{ k}\Omega$$

Avantajul constă, desigur, în faptul că rezistorii de 900 kΩ, 90 kΩ și 9 kΩ sunt mult mai ușor de procurat decât cei precedenți (999,5 kΩ, 99,5 kΩ și 9,5 kΩ). Din punct de vedere funcțional, nu există nicio diferență între cele două configurații prezentate.

### 03. Impactul voltmetrului asupra circuitului

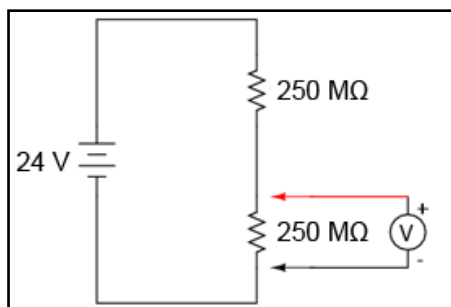
- Un voltmetru ideal posedă o rezistență internă infinită
- Un detector de nul este un dispozitiv pentru determinarea curenților și a tensiunilor. Acesta se evidențiază prin sensibilitatea sa extrem de ridicată

#### Voltmetrul ideal și voltmetrul real

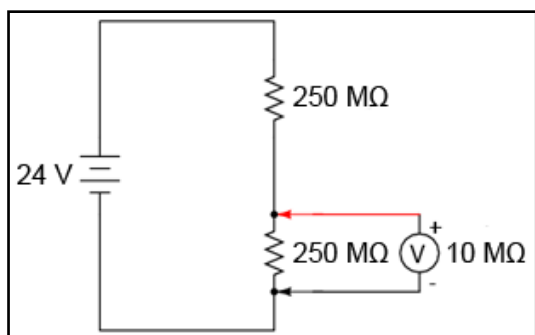
Orice aparat de măsură introdus în circuit modifică comportamentul acestuia din urmă într-o oarecare măsură. Deși impactul este inevitabil, acesta poate fi minimizat printr-o proiectare bună a aparatului de măsură în cauză.

Din moment ce voltmetrele se conectează tot timpul în paralel cu componentul sau componentele aflate sub test, orice curent prin voltmetru va modifica curentul total din circuitul de măsurat, ducând inevitabil și la modificarea tensiunii reale din circuit. Un voltmetru ideal posedă o rezistență internă infinită, astfel încât curentul care trece prin acesta să fie de 0 A pentru a nu afecta circuitul testat. Totuși, astfel de voltmetre nu există decât în paginile cărților, nu și în viața reală!

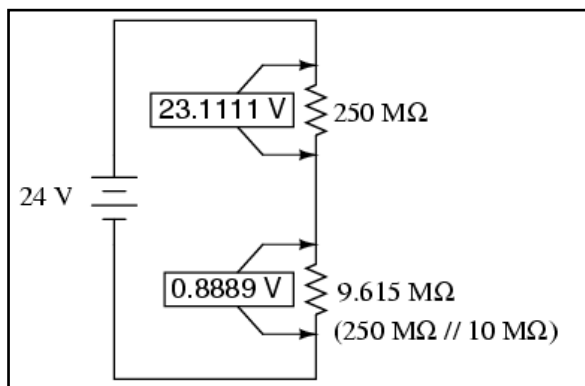
#### Efectul voltmetrului asupra circuitului; exemplu



Să luăm ca și exemplu circuitul divizor de tensiune din figura alăturată, ca și un exemplu extrem al efectelor unui voltmetru asupra circuitului de măsurat.



Atunci când voltmetrul nu este conectat în circuit, vom avea o cădere de tensiune de exact 12 V pe fiecare dintre cei doi rezistori. Totuși, dacă voltmetrul considerat în acest exemplu posedă o rezistență internă între cele două sonde de  $10\text{ M}\Omega$  (valoare normală pentru un voltmetru digital), aceasta va crea un sub-circuit paralel cu rezistorul inferior al divizorului.



Acest lucru duce la scăderea rezistenței inferioare de la 250 MΩ la 9,61 MΩ (circuit paralel), modificând fundamental căderile de tensiune din circuit.

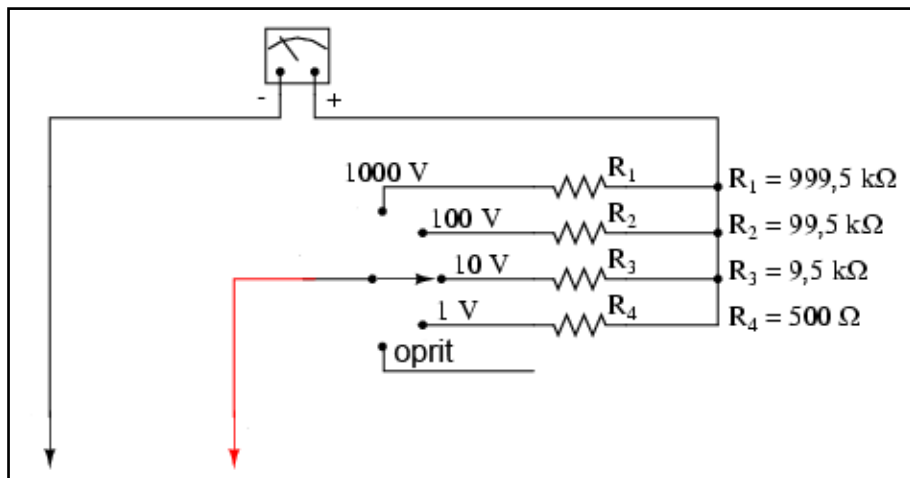
Un divizor de tensiune cu rezistențele de 250 MΩ, respectiv 9,61 MΩ va diviza o tensiune de 24 V în 23,11 V, respectiv 0,88 V. Din moment ce voltmetrul face parte din rezistența de 9,61 MΩ aceasta este și valoarea pe care o va indica: 0,88 V.

Voltmetrul poate indica doar căderea de tensiune dintre punctele în care este conectat. Acesta nu poate „știi” că înainte de introducerea sa în circuit, în acea locație exista o cădere de tensiune de 12 V și nu de 0,88 V. Conectarea aparatului de măsură în circuit modifică rezistența circuitului și prin urmare și valoarea căderii de tensiune măsurate, aceasta nefiind prin urmare cea reală.

Acest efect este prezent, într-o anumită măsură, ori de câte ori folosim un voltmetru. Scenariul prezentat mai sus este unul extrem, cu o rezistență a voltmetrului mult mai mică decât rezistența divizorului de tensiune. Din aceste motive, cu cât rezistența internă a voltmetrului este mai mare, cu atât efectul acestuia asupra circuitului de măsurat va fi mai mic. Din această cauză, un voltmetru ideal posedă o rezistență infinită. Dar, indiferent de valoarea acestei rezistențe, efectul considerat mai sus va fi tot timpul prezent într-un circuit.

## Sensibilitatea voltmetrelor

Impactul creat de voltmetrele electromecanice asupra circuitelor este desemnat prin numărul de ohmi prezenți între terminalii aparatului pentru fiecare domeniu de tensiune (poziții diferite ale selectorului). Practic, acesta este un număr exprimat în Ω/V. Voltmetrele digitale posedă de obicei o rezistență constantă între sond



aparaturii indiferent de domeniu de tensiune ales.

Să reluăm exemplul din secțiunea precedentă. Pe domeniul 1000 V, rezistența totală este de Ω M (999,5 kΩ + 500Ω), ceea ce înseamnă 1 MΩ / 1000 V, sau 1 kΩ/V. Această sensibilitate rămâne constantă indiferent de domeniul ales.

domeniul 100 V; sensibilitatea:  $100 \text{ k}\Omega / 100 \text{ V} = 1 \text{ k}\Omega / \text{V}$

domeniul 10 V; sensibilitatea:  $10 \text{ k}\Omega / 10 \text{ V} = 1 \text{ k}\Omega / \text{V}$

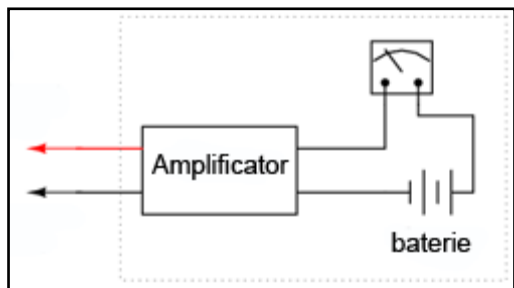
domeniul 1 V; sensibilitatea:  $1 \text{ k}\Omega / 1 \text{ V} = 1 \text{ k}\Omega / \text{V}$

Astfel, valoarea exprimată în ohm/volt este o caracteristică principală a voltmetrului, și nu depinde de domeniul selectat. Dacă suntem foarte atenți, putem observa că această valoare este determinată de un singur factor: curentul necesar pentru deplasarea maximă a acului indicator, în acest caz, 1 mA. „Ohm/volt” este inversa matematică a raportului „volt/ohm”, ceea ce conform legii lui Ohm, este chiar curentul ( $I = E / R$ ).

Prin urmare, curentul necesar deplasării maxime dictează sensibilitatea ohm/volt a aparatului, indiferent de domeniile de tensiune disponibile și de valorile rezistorilor de multiplicare. În cazul nostru particular, o deplasare maximă pentru valoarea de 1 mA rezultă într-o sensibilitate de  $1000 \Omega/\text{V}$ , indiferent de modul de aranjare al rezistorilor de multiplicare.

Pentru minimizarea efectelor asupra circuitelor, curentul de deplasare maximă trebuie să fie prin urmare cât mai mic. Acest lucru se poate realiza prin reproiectarea aparatului pentru o sensibilitate maximă (un curent mai mic pentru o deflecție maximă). Variabila ce trebuie luată însă în considerare este robustețea aparatului: cu cât deplasarea este mai sensibilă, cu cât acesta tinde să fie mai fragil.

## Amplificarea curentului

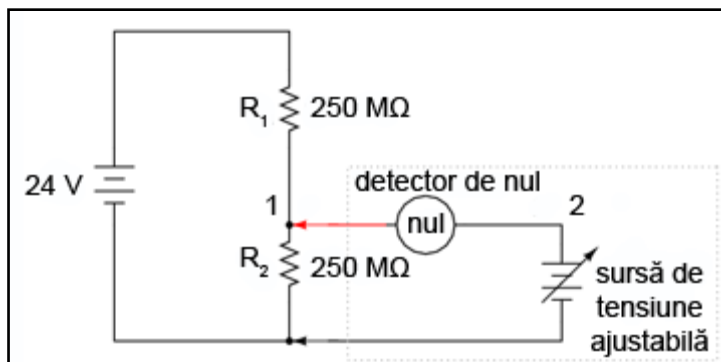


O altă modalitate constă în amplificarea electronică a curentului necesar deplasării, astfel încât curentul ce este absorbit de către aparat din circuit să fie cât mai mic. Acest tip de circuit electronic poartă numele de amplificator.

Nu vom intra în detaliile modului de funcționare al amplificatorului aici, dar putem spune că circuitul permite tensiunii de măsurat să controleze valoarea curentului prin ampermetru. Astfel, curentul necesar deplasării acului indicator este generat de o baterie internă și nu de circuitul exterior. Și în acest caz există un anumit curent absorbit de aparat din circuitul măsurat, dar acesta este de sute sau mii de ori mai mic decât curentul absorbit în mod normal de un astfel de aparat fără amplificare.

## Detectorul de nul

O ultimă soluție, și una foarte ingenioasă, la problema efectului introdus de voltmetru în circuit, îl constituie detectorul de nul. Acesta nu necesită un circuit complicat, dar este nevoie de multă pricepere din partea utilizatorului.



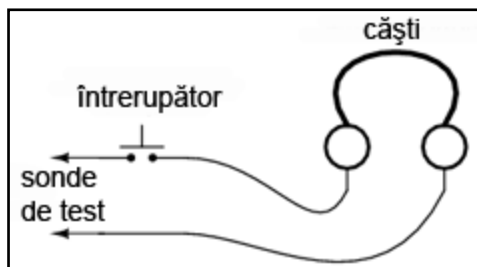
Într-un detector de nul, o sursă de tensiune de precizie, ajustabilă, este comparată cu tensiunea de măsurat iar aparatul indică diferența de tensiune dintre cele două. În cazul în care indicația este zero (nulă), căderea de tensiune din circuitul de test este egală cu tensiunea sursei de tensiune de precizie, iar curentul absorbit din circuit va fi zero. În unele situații, aparatul este prevăzut cu un potențiomtru

de precizie pentru reglarea fină a tensiunii.

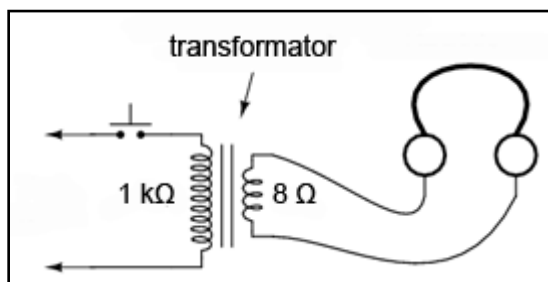
Deoarece scopul unui detector de nul este indicarea precisă a condiției de zero (volți), și nu indicarea unei valori specifice diferite de zero, scala de valori folosită este irelevantă. Aceste dispozitive sunt proiectate a fi cât mai sensibile cu putință.

### Detector de nul realizat cu căști audio

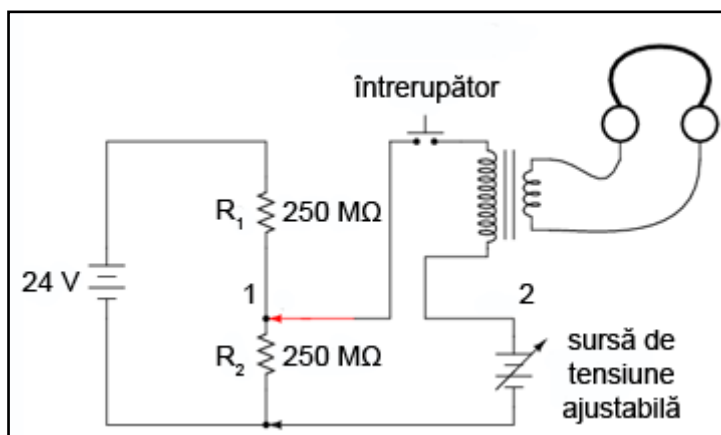
Un detector de nul extrem de simplu constă dintr-un set de căști, utilizând difuzoarele pe post de „ac indicator”. Dacă aplicăm o tensiune de c.c. unui difuzor, curentul rezultat va deplasa conul acestuia, iar difuzorul va produce un „clic” scurt. Un alt „clic” se poate auzi la deconectarea sursei de c.c.



Luând în considerare acest principiu, un detector de nul sensibil poate fi realizat dintr-o simplă pereche de căști și un întrerupător.

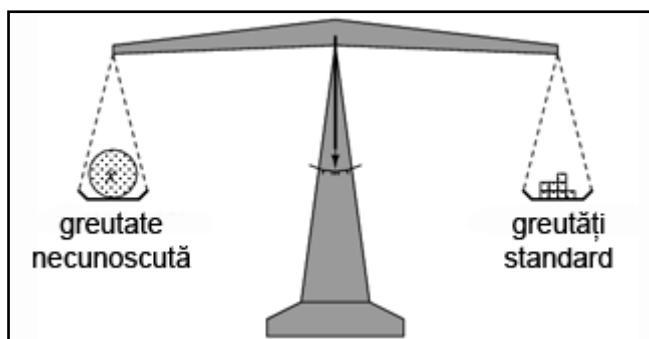


Dacă folosim o pereche de căști de  $\text{8 } \Omega$ , sensibilitatea aparatului poate fi crescută prin conectarea sa la un transformator coborâtor de tensiune. La închidere/deschiderea întrerupătorului, curentul mic de la intrare va avea o valoare mult mai mare la ieșirea transformatorului. Rezultatul este un „clic” mai puternic și mai ușor de sesizat, chiar și pentru curenți mult mai mici.



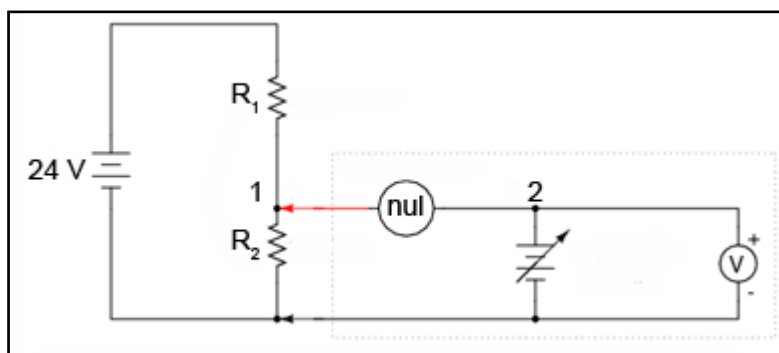
Conectat în circuitul cu detector de nul prezentat mai sus, configurația arată precum în figura alăturată.

### Principiul detectorului de nul



Scopul oricărui detector de nul este să se comporte precum o balanță de laborator, indicând condiția de egalitate ale celor două tensiuni, sau, altfel spus, lipsa unei căderi de tensiune între cele două puncte (1 și 2). O astfel de balanță nu măsoară de fapt nimic, ci doar indică egalitatea între o greutate necunoscută și un set de greutăți calibrate standard.

Asemănător, detectorul de nul indică pur și simplu momentul în care căderea de tensiune între punctele 1 și 2 este egală (potențialul celor două puncte este egal). Conform legii lui Kirchhoff pentru tensiune, acest lucru se va întâmpla atunci când sursa de tensiune ajustabilă este egală cu căderea de tensiune pe rezistorul  $R_2$ .



Pentru a utiliza acest instrument, trebuie să ajustăm manual sursa de tensiune prin intermediul unui potențiometru, acționând de fiecare dată întrerupătorul, până în momentul în care detectorul de nul va indica o condiție de zero.

Circuitul este echilibrat atunci când, în urma acționării întrerupătorului, nu se va mai auzi nici un sunet la căști. Valoarea căderii de tensiune pe  $R_2$  va fi citită de pe un voltmetru conectat la sursa de tensiune de precizie.

Voltmetrul utilizat la bornele sursei de tensiune de precizie nu trebuie neapărat să aibă o sensibilitate  $\Omega/V$  foarte ridicată, deoarece curentul necesar funcționării acestuia va fi generat de către sursă. Atâta timp cât căderea de tensiune pe detectorul de nul este zero, nu va exista niciun curent între punctele 1 și 2, impactul voltmetrului asupra circuitului fiind inexistent.

## Observații

Merită să reamintim faptul că această metodă, executată perfect, aproape că nu introduce nicio rezistență suplimentară în circuitul de măsurat. Ideal, această rezistență ar fi zero, dar pentru atingerea acestui scop, căderea de tensiune pe detectorul de nul ar trebui să fie exact zero volți. Acest lucru ar fi posibil doar prin intermediul unei metode de detectare infinit sensibile și o tensiune la fel de precisă din partea sursei de tensiune de precizie. Totuși, în ciuda acestui „neajuns”, un astfel de circuit reprezintă o metodă excelentă de măsurare a căderilor de tensiune. Și, comparată cu soluția amplificatorului, ce rezolvă această problemă cu ajutorul tehnologiei avansate, soluția de față rezolvă problema aproape perfect utilizând o lege fundamentală a circuitelor electrice (legea lui Kirchhoff pentru tensiune).

## 04. Ampermetrul

- Măsurarea curentului din circuitele electrice se realizează cu ampermetrul
- Ampermetrul se conectează tot timpul în serie
- Curentul poate fi măsurat și cu ajutorul voltmetrului, atunci când în circuit este introdus un rezistor de șunt; căderea de tensiune pe șunt măsurată de voltmetru este în acest caz direct proporțională cu valoarea curentului prin șunt

## Definiție

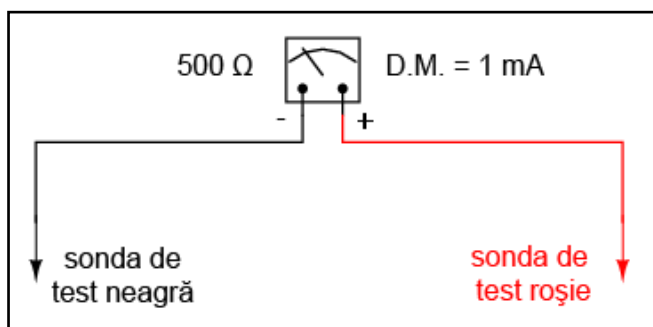
Un aparat de măsură conceput special pentru măsurarea valorii curentului electric (în amperi), poartă numele de ampermetru.

## Introducerea rezistorilor de șunt

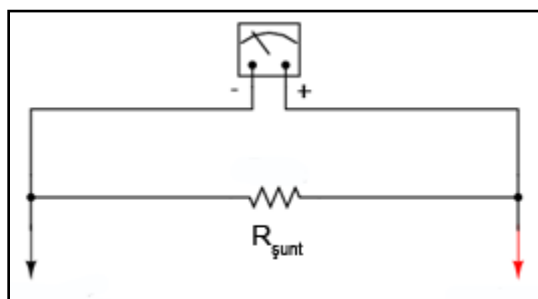
La proiectarea ampermetrelor, rezistorii de multiplicare (rezistori de șunt în acest caz) se vor conecta în paralel și nu în serie, precum era cazul voltmetrelor. Asta datorită faptului că dorim o divizare a curentului, nu a tensiunii, iar un divizor de curent se realizează prin rezistori conectați în serie.

Considerând aceiași deplasare precum în cazul voltmetrului, putem observa că un astfel de aparat este destul de limitat, deplasarea maximă realizându-se pentru un curent de doar 1 mA.





Odată cu extinderea plajei de valori ale aparatului de măsură, trebuie să modificăm și scala valorilor pentru a reflecta această modificare. De exemplu, pentru un ampermetru a cărei valoare maximă măsurată poate atinge 5 A, deplasarea indicatorului fiind aceeași, va trebui să modificăm marcajul astfel: 0 A în partea stângă și 5 A în partea dreaptă, în loc de 0 mA și 1 mA.



După ce ne-am hotărât ca vrem să extindem domeniul maxim la 5 A, vom trece la determinarea rezistenței de șuntare. Aceasta va asigura o valoare maximă a curentului prin dispozitivul de detectare propriu-zis de maxim 1 mA și nu de 5 A (în situația în care curentul printre cele două sonde nu depășește nici el valoarea de 5 A).

| Mărime | Deplasare | $R_{\text{șunt}}$ | Total | Unitate  |
|--------|-----------|-------------------|-------|----------|
| E      |           |                   |       | V        |
| I      | 1 m       |                   | 5     | A        |
| R      | 500       |                   |       | $\Omega$ |

Putem introduce datele cunoscute într-un tabel, pentru ușurarea calculelor.

| Mărime | Deplasare | $R_{\text{șunt}}$ | Total | Unitate  |
|--------|-----------|-------------------|-------|----------|
| E      | 0,5       |                   |       | V        |
| I      | 1 m       |                   | 5     | A        |
| R      | 500       |                   |       | $\Omega$ |

Din valorile cunoscute, putem determina căderea de tensiune pe aparatul de măsură, aplicând legea lui Ohm ( $E = IR$ ).

| Mărime | Deplasare | $R_{\text{șunt}}$ | Total | Unitate  |
|--------|-----------|-------------------|-------|----------|
| E      | 0,5       | 0,5               | 0,5   | V        |
| I      | 1 m       |                   | 5     | A        |
| R      | 500       |                   |       | $\Omega$ |

Circuitul de față este un circuit paralel, prin urmare, căderile de tensiune pe șunt, pe sistemul de detectare a deplasării, precum și între cele două sonde ale aparatului de măsură, trebuie să fie egale.

| Mărime | Deplasare | $R_{\text{șunt}}$ | Total | Unitate  |
|--------|-----------|-------------------|-------|----------|
| E      | 0,5       | 0,5               | 0,5   | V        |
| I      | 1 m       | 4,99              | 5     | A        |
| R      | 500       |                   |       | $\Omega$ |

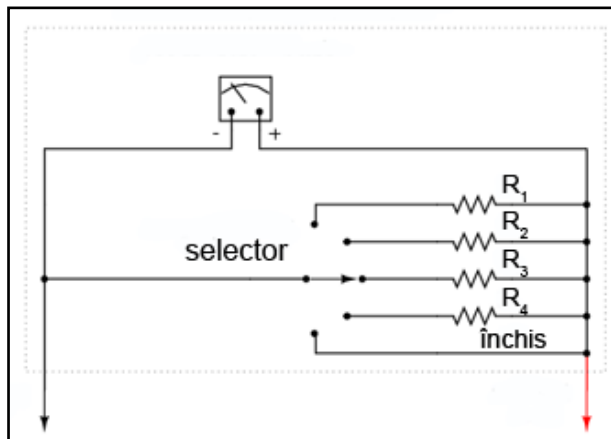
Știm de asemenea ca prin șunt, curentul trebuie să fie egal cu diferența dintre curentul total (5 A) și curentul deplasării (1 mA), datorită adunării curenților de ramuri în configurația paralel.

| Mărime | Deplasare | $R_{\text{șunt}}$ | Total      | Unitate  |
|--------|-----------|-------------------|------------|----------|
| E      | 0,5       | <b>0,5</b>        | <b>0,5</b> | V        |
| I      | 1 m       | 4,99              | 5          | A        |
| R      | 500       | <b>100,02 m</b>   |            | $\Omega$ |

Aplicând apoi legea lui Ohm ( $R = E / I$ ), determinăm rezistența de șunt necesară.

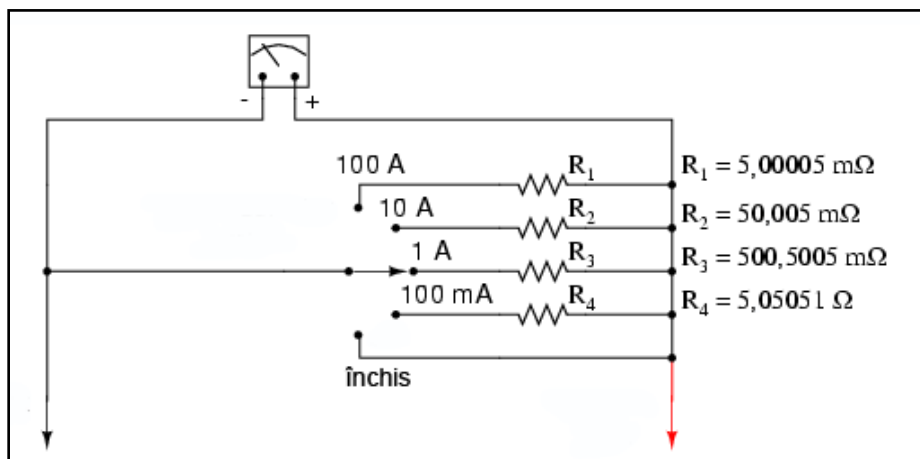
Desigur, în realitate, rezistența de șunt se regăsește în interiorul aparatului de măsură.

## Selectarea domeniului de valori



La fel ca și în cazul voltmetrelor, pot exista mai multe valori ale curenților de deplasare maximă. Acest lucru se realizează prin introducerea în circuit a unui număr suplimentar de rezistori de șunt. Selectarea lor se realizează printr-un comutator (selector) multi-polar.

Observăm că rezistorii sunt conectați în paralel cu aparatul de măsură, și nu în serie precum în cazul voltmetrului. Selectorul cu cinci poziții realizează contact doar cu câte un rezistor pe rând. Mărimea fiecărui rezistor este diferită și conformă cu deplasarea maximă a domeniului respectiv de valori, bazându-se pe caracteristicile sistemului de detectare al deplasării (1 mA, 500  $\Omega$ ).



Valoarea fiecărui rezistor se determină prin aceeași metodă, luând în considerare curentul total, deplasarea maximă și rezistența internă. Pentru un ampermetru cu un domeniu de valori maxim de 100 mA, 1 A, 10 A, respectiv 100A, rezistențele de șunt sunt conform figurii alăturate.

Aceste rezistențe de șunt sunt extrem de mici! Pentru a atinge astfel de rezistențe, rezistori de șunt ai ampermetrelor trebuie realizați de cele mai multe ori printr-o comandă specială din conductori cu diametru relativ mare sau din plăci metalice solide.

Trebuie să fim atenți însă la puterea disipată în această situație. Față de voltmetru, curentul prin rezistorii unui ampermetru sunt destul de mari. Dacă acei rezistori nu sunt proiectați corespunzător, se pot încălzi și distruge, sau, în cel mai „fericit” caz, își pot pierde acuratețea prin încălzire excesivă. Pentru exemplul precedent, puterea disipată pentru valoarea maximă a deplasării, în valori aproximative, este următoarea:

$$P_{R1} = \frac{E^2}{R_1} = \frac{0,5^2}{5,00005} = 50 \text{ W}$$

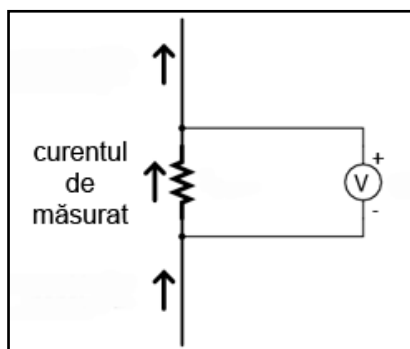
$$P_{R2} = \frac{E^2}{R_2} = \frac{0,5^2}{50,005} = 5 \text{ W}$$

$$P_{R3} = \frac{E^2}{R_3} = \frac{0,5^2}{500,5} = 0,5 \text{ W}$$

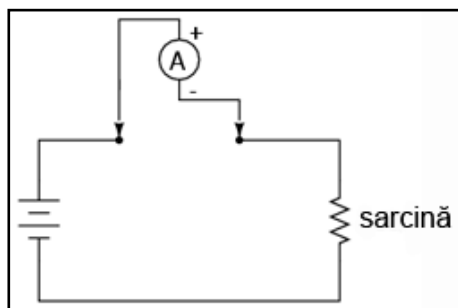
$$P_{R4} = \frac{E^2}{R_4} = \frac{0,5^2}{5,05} = 49,5 \text{ mW}$$

Un rezistor de 1/8 W este suficient pentru  $R_4$ , unul de 1/2 W pentru  $R_3$  și unul de 5 W pentru  $R_2$ . Totuși, rezistorii își mențin acuratețea pentru o perioadă mult mai îndelungată de timp dacă nu funcționează foarte aproape de valoarea maximă admisă; prin urmare, o supra-dimensionare a rezistorilor  $R_2$  și  $R_3$  ar fi binevenită. Dar, rezistorii de precizie cu o putere nominală de 50 W sunt extrem de rari și de scumpi. Singura modalitate este realizarea la comandă a acestora.

## Măsurarea curentului cu voltmetrul



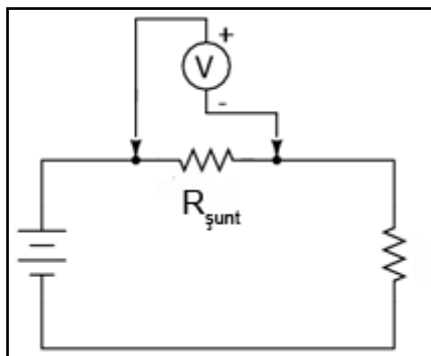
În unele cazuri, rezistorii de șunt sunt utilizați în combinație cu voltmetre cu rezistența de intrare ridicată pentru măsurarea curentilor. Curentul prin voltmetru va fi suficient de mic pentru a-l putea neglija, iar rezistența de șunt poate fi dimensionată în funcție de numărul de volți sau milivolți produși pentru fiecare amper de curent.



De exemplu, dacă rezistorul de șunt din figura de mai sus ar fi dimensionat la o valoare de exact 1  $\Omega$ , pentru fiecare creștere de un amper, căderea de tensiune la bornele acestuia va crește cu un volt. Indicația voltmetrului va putea fi considerată ca fiind direct legată de valoarea curentului prin șunt.

Pentru valori foarte mici ale curentului, rezistența de șunt trebuie să fie mare pentru a putea genera tensiuni mai mari pentru fiecare unitate de curent, extinzând astfel gama valorilor măsurate cu voltmetrul spre mărimi foarte mici. Această metodă de măsurare este des întâlnită în aplicațiile industriale. Desigur, în acest caz, scala voltmetrului poate fi modificată/înlocuită pentru a putea citi direct valorile curentului.

Utilizarea unui rezistor de șunt în combinație cu un voltmetru poate simplifica operațiile de măsurare ale curenților, atunci când acestea sunt dese. În mod normal, atunci când măsurăm curentul dintr-un circuit cu ampermetrul, circuitul trebuie întrerupt (deschis), iar ampermetrul conectat între cele două capete libere închizând astfel din nou circuitul.



Dacă avem un circuit în care această operație trebuie realizată des, sau dacă dorim simplificarea procesului de măsură, putem plasa permanent un rezistor de șunt între cele două capete rămase libere după deschiderea circuitului. Curentul poate fi măsurat de acum încolo cu ajutorul unui voltmetru, fără a necesita întreruperea circuitului la fiecare măsurătoare.

Desigur, dimensiunea șuntului trebuie să fie suficient de mică pentru a nu afecta funcționarea normală a circuitului în care este introdus. Va exista o mică eroare de măsură datorită prezenței șuntului, dar aceasta se încadrează în limite acceptabile.

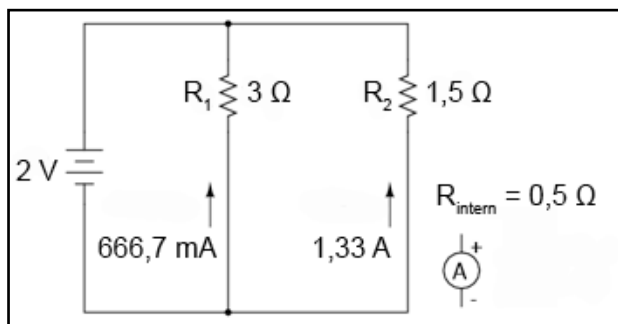
## 05. Impactul ampermetrului asupra circuitului

- Rezistența unui ampermetru ideal este zero
- Un clampmetru măsoară valoarea curentului prin determinarea câmpului magnetic din jurul conductorului

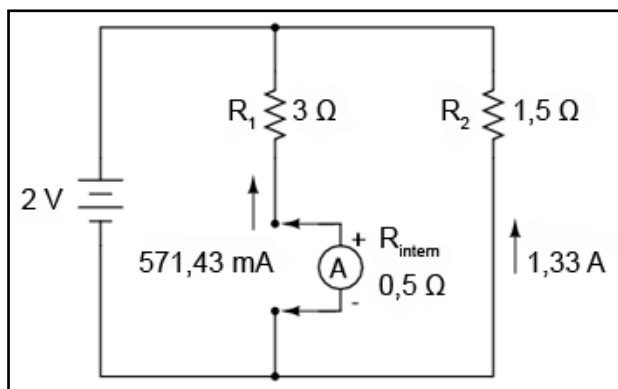
### Ampermetrul ideal

Asemenea voltmetrelor, și ampermetrele tind să influențeze cantitatea de curent din circuitele în care sunt conectate. Totuși, spre deosebire de voltmetrul ideal, rezistența internă a ampermetrului ideal este zero. Motivul îl reprezintă o cădere de tensiune cât mai mică la bornele acestuia. Observați că acest lucru este exact opus voltmetrului (curent cât mai mic consumat din circuit).

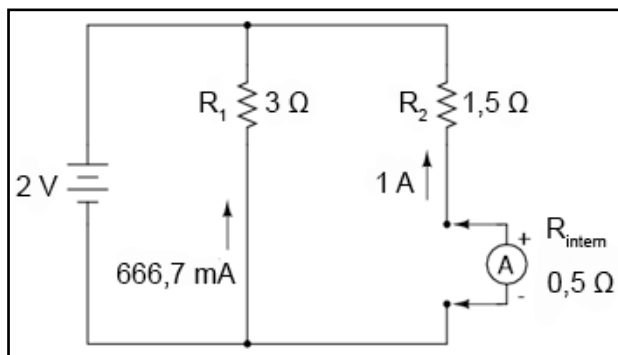
## Efectul ampermetrului asupra circuitului; exemplu



Să vedem un exemplu pentru identificarea efectelor unui ampermetru asupra circuitului. Atunci când ampermetrul nu este introdus în circuit, curentul prin rezistorul de  $3\Omega$  este de 666,7 mA, iar curentul prin rezistorul de  $1,5\Omega$  este de 1,33 A.



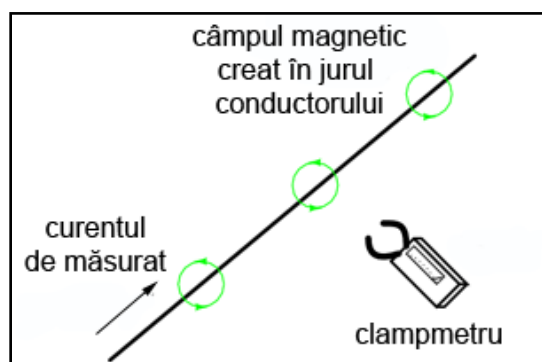
Dacă ampermetrul cu care efectuăm măsurătorile are o rezistență internă de  $0,5\Omega$ , introducerea acestuia într-una din ramurile circuitului va afecta puternic circuitul. Modificând practic rezistența ramurii din stânga de  $3\Omega$  la  $3,5\Omega$ , ampermetrul va indica un curent de 571,43 mA în loc de 666,7 mA.



Introducerea ampermetrului în ramura din dreapta va avea un efect și mai mare asupra curentului din aceasta. În acest caz, curentul de ramură va fi de 1 A, în loc de 1,33 A, din cauza creșterii rezistenței prin introducerea ampermetrului.

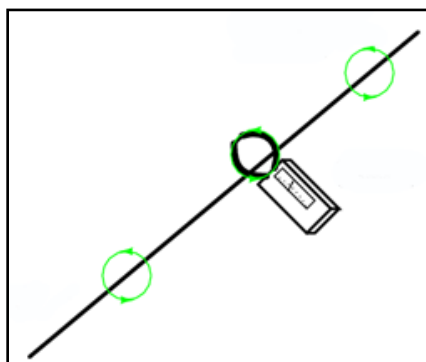
La utilizarea ampermetrelor standard, ce se conectează în serie cu circuitul de măsurat, reproiectarea aparatului pentru o rezistență mai mică între cele două terminale, nu este practică sau poate chiar imposibilă. Totuși, dacă măsurăm curentul cu ajutorul unui voltmetru și a unui rezistor de șunt, cel mai indicat lucru este să alegem o rezistență cât mai mică. Orice rezistență adițională introdusă în circuitul inițial, va duce la modificarea comportamentului acestuia.

## Cleștele ampermetric (clampmetrul)



O metodă ingenioasă de reducere a impactului pe care îl are un aparat de măsură asupra circuitului, este utilizarea conductorului ca parte integrantă a ampermetrului. Toți conductorii produc un câmp magnetic în jurul lor la trecerea curentului prin ei; valoarea acestui câmp magnetic este direct proporțională cu valoarea curentului prin conductor. Construind un instrument pentru măsurarea puterii acelui câmp magnetic, se poate evita contactul direct și întreruperea circuitului. Un astfel de ampermetru poartă numele de clampmetru

sau clește ampermetric.



Acesta constă practic din doi clești ce se pun în jurul conductorului. Cu ajutorul acestor dispozitive se pot realiza măsurători rapide și sigure, în special în cazul circuitelor de putere. Datorită faptului că acest clampmetru nu introduce nicio rezistență suplimentară în circuitul de test, nu va exista practic nicio eroare de măsurătoare în acest caz.

## 06. Ohmmetrul

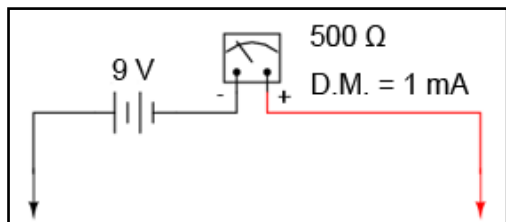
### Scopul ohmmetrului

Chiar dacă ohmmetrele mecanice (analogice) sunt folosite destul de rar astăzi, fiind înlocuite de instrumentele digitale, modul lor de funcționare este foarte interesant și merită prin urmare studiat.

Scopul unui ohmmetru este, desigur, măsurarea rezistenței conectată între bornele sale. Citirea valorii rezistenței se face prin observarea deplasării unui mecanism de măsură acționat de un curent electric. Prin urmare, ohmmetrul trebuie echipat cu o sursă internă de tensiune pentru a crea curentul necesar acționării deplasării. Avem nevoie, de asemenea, de rezistențe suplimentare pentru a permite trecerea unui curent necesar și suficient prin mecanismul de deplasare, pentru oricare valoare a rezistenței de măsurat.

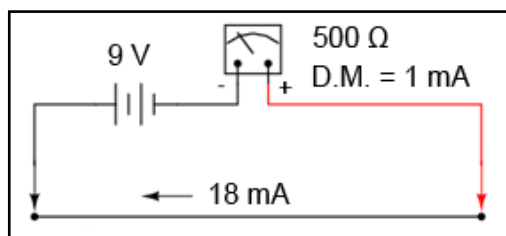
### Realizarea unui ohmmetru simplu

Începem cu un circuit simplu, format din mecanismul de măsură și o baterie:



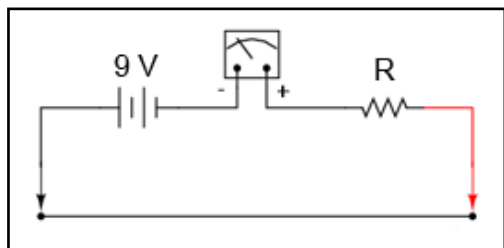
Când avem o rezistență infinită (nu există continuitate între cele două sonde), curentul prin circuitul intern al ohmmetrului este zero. În acest caz, nu avem nicio deplasare, iar acul indicator este poziționat în partea stângă a scalei de valori. Din acest punct de vedere, indicația ohmmetrului este chiar „inversă”, deoarece valoarea maximă (infinit) este la stânga scalei. Indicația voltmetrelor și ampermetrelor este chiar inversă.

Dacă sondele acestui ohmmetru sunt conectate împreună (scurt-circuitate, rezistența  $0\Omega$ ), curentul prin aparatul de măsură va fi maxim. Valoarea acestui curent este limitată doar de tensiunea bateriei și de rezistența internă a mecanismului de măsură.



Cu o tensiune a bateriei de 9 V și o rezistență internă a mecanismului de deplasare de doar  $500\Omega$ , curentul prin circuit va fi de 18 mA. Această valoare este mult peste deplasarea maximă (D.M. = 1 mA) permisă de dispozitivul nostru. Un asemenea exces va duce cu siguranță la distrugerea aparatului.

Pe lângă aceste aspecte, dispozitivul de mai sus nu va fi nici foarte practic. Dacă partea din stânga a scalei reprezintă o rezistență infinită, atunci partea din dreapta (deplasare maximă) ar trebui să reprezinte  $0\Omega$ . Trebuie să ne asigurăm de faptul că deplasarea acului indicator este maximă spre dreapta doar când sondele sunt conectate împreună (scurt-circuitate).



Acest lucru se realizează prin adăugarea unei rezistențe serie în circuitul aparatului de măsură.

Pentru determinarea valorii lui R, calculăm rezistența totală din circuit necesară pentru a limita curentul la 1 mA (curentul necesar pentru deplasarea maximă). Știm de asemenea că avem o diferență de potențial de 9 V, dinspre baterie. Valoarea rezistenței pe care o căutăm va fi diferența dintre această rezistență totală și rezistența internă a aparatului de măsură:

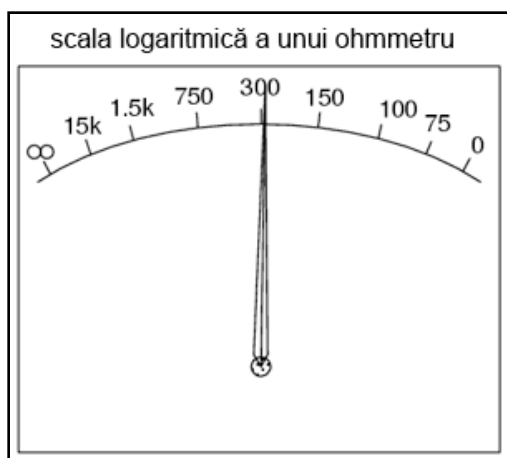
$$R_{total} = \frac{E}{I} = \frac{9\text{ V}}{1\text{ mA}} = 9\text{ k}\Omega$$

$$R = R_{total} - 500\Omega = 8,5\text{ k}\Omega$$

## Împărțirea scalei

Acum că avem valoarea corectă a rezistorului  $R$ , mai avem o problemă: scala aparatului de măsură. După cum se știe deja, în stânga scalei avem infinit, iar în dreapta zero. În afara faptului că această scală este inversă față de cea a voltmetrelor și ampermetrelor, mai are o ciudățenie: valorile între care se face citirea se află între două extreme (infinit și zero). În cazul celorlalte aparate de măsură, valorile citite se află între zero și o anumită valoare (10 V, 1 A, etc.). Prin urmare, ce valoare reprezintă mijlocul scalei?! Ce valoare se află exact între infinit și zero?

Răspunsul acestui paradox poartă numele de „scală ne-liniară”. Pe scurt, scala unui ohmmetru nu reprezintă o trecere liniară de la zero spre infinit, pe măsură ce acul indicator se deplasează dinspre dreapta spre stânga. Inițial, indicația este maximă spre dreapta (rezistența zero), iar valorile rezistențelor se adună din ce în ce mai rapid una lângă cealaltă pe măsură ce trecem înspre partea stângă a scalei:



Nu ne putem apropia de infinit printr-o manieră liniară, pentru că nu am ajunge niciodată acolo! Cu o scală ne-liniară, cantitatea de rezistență acoperită de o anumită distanță crește pe măsură ce scala se apropie de infinit. În acest caz, putem spune că infinitul este o „valoare” ce poate fi atinsă.

Mai există totuși încă o nelămurire legată de scala noastră. Care este valoarea necesară a rezistenței dintre sonde, astfel încât acul indicator să se regăsească la jumătatea scalei? Cunoaștem că deplasarea maximă este 1 mA. Atunci, 0,5 mA (500  $\mu$ A) este valoare curentului necesar pentru această deplasare la mijlocul scalei. Păstrând bateria de 9 V în circuit, obținem următorul rezultat:

$$R_{total} = \frac{E}{I} = \frac{9 \text{ V}}{500 \mu\text{A}} = 18 \text{ k}\Omega$$

Cu o rezistență internă de 500  $\Omega$ , și un rezistor serie de 8,5  $\text{k}\Omega$ , ne mai rămân 9  $\text{k}\Omega$  pentru o rezistență de test externă (conectată între sonde), pentru o deplasare la jumătate a scalei. Cu alte cuvinte, rezistența de test necesară unei deplasări la jumătatea scalei a acului indicator, este egală în valoare cu rezistența serie internă totală a aparatului de măsură. Aplicând din nou legea lui Ohm, putem determina valoarea rezistenței de test pentru o deplasare la 1/4 și 3/4 a scalei:

Deplasare la 1/4 (0,25 mA):

$$R_{total} = \frac{E}{I} = \frac{9 \text{ V}}{250 \mu\text{A}} = 36 \text{ k}\Omega$$



$$R_{test} = R_{total} - R_{intern}$$

$$R_{test} = 36 \text{ k}\Omega - 9 \text{ k}\Omega = 27 \text{ k}\Omega$$

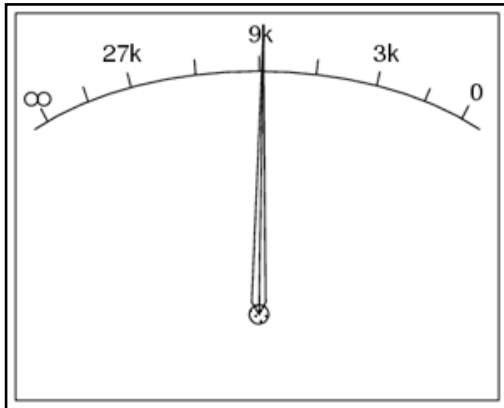
Deplasare la 3/4 (0,75 mA):

$$R_{total} = \frac{E}{I} = \frac{9 \text{ V}}{750 \text{ }\mu\text{A}} = 12 \text{ k}\Omega$$

$$R_{test} = R_{total} - R_{intern}$$

$$R_{test} = 12 \text{ k}\Omega - 9 \text{ k}\Omega = 3 \text{ k}\Omega$$

Prin urmare, scala finală a ohmmetrului arată astfel:



## Dezavantajele metodei de mai sus

O problemă majoră a acestui aranjament constă în necesitatea utilizării unei baterii precise. În caz contrar, valorile citite nu vor fi reale. Dacă tensiunea bateriei scade (acest lucru se întâmplă cu toate bateriile chimice), ohmmetrul va pierde din precizie. Cu rezistorul de scală conectat în serie și la o valoare constantă de  $9 \text{ k}\Omega$ , o descrescere a tensiunii bateriei va însemna că deplasarea acului indicator nu se va realiza înspre poziția dreaptă-maximă la conectarea sondelor împreună ( $0 \Omega$ ). Identic, o rezistență de test de  $9 \text{ k}\Omega$  nu va reuși să deplaseze acul indicator la exact jumătatea scalei de măsură, dacă tensiunea bateriei scade.

Desigur, există metode de compensare a acestei pierderi de tensiune a bateriei. Aceste „artificii” însă nu rezolvă în totalitate problema, și sunt considerate în cel mai bun caz doar aproximații. Din acest motiv, și datorită scalei neliniare, acest tip de ohmmetru nu poate fi în niciun caz considerat un instrument de precizie.

## Observație asupra utilizării ohmmetrelor

Mai există încă o particularitate a ohmmetrelor ce trebuie menționată: acestea funcționează corect doar atunci când măsoară o rezistență ce nu este alimentată de o sursă de curent sau de tensiune. Cu alte cuvinte, nu

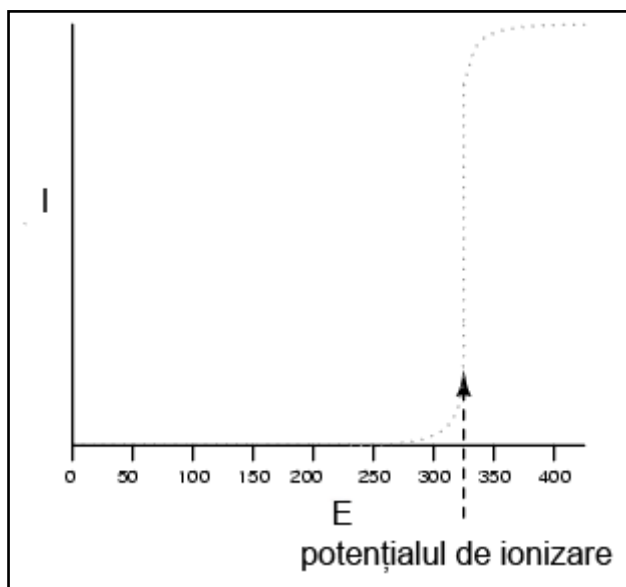
putem măsura rezistența cu un ohmmetru, atunci când circuitul este alimentat (conectat la o sursă de tensiune). Motivul este simplu: indicația precisă a ohmmetrului se bazează pe faptul că singura sursă de tensiune din circuit este propria sa baterie internă. Prezența unei alte căderi de tensiune la bornele componentului supus măsurătorii va da peste cap funcționarea corectă a ohmmetrului. Dacă această cădere de tensiune este suficient de mare, poate duce chiar la distrugerea acestuia.

## 07. Ohmmetre cu tensiuni înalte

### Limitările ohmmetrelor de joasă tensiune

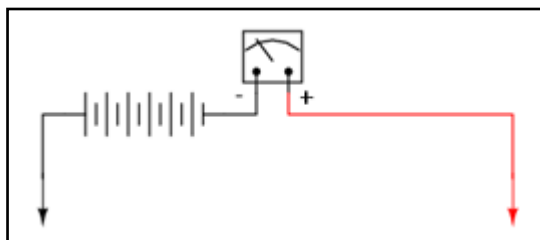
Majoritatea ohmmetrelor de tipul celui prezentat în secțiunea precedentă folosesc o baterie cu o tensiune relativ mică, de 9 V sau chiar mai puțin. Acest lucru este suficient pentru măsurarea rezistențelor cu valori mai mici de câțiva mega-ohmi ( $M\Omega$ ). Pentru a măsura însă rezistențe extrem de mari, o baterie de 9 V nu este suficientă pentru generarea unui curent necesar acționării mecanismului electromecanic de deplasare.

De asemenea, după cum am discutat deja, rezistența nu este tot timpul o valoare stabilă (liniară). Acest lucru este valabil în special în cazul materialelor ne-metalice. Un dielectric format dintr-o mică porțiune de aer, prezintă (aproximativ) următorul grafic curent-tensiune:

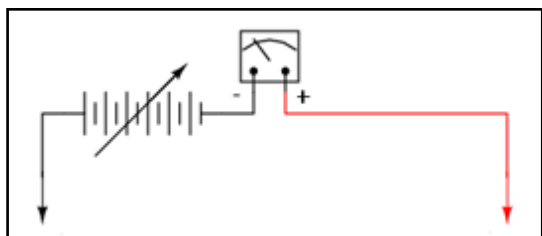


Deși acesta este un exemplu extrem de conducție non-liniară, aceleași proprietăți izolatoare/conductoare se regăsesc și în cazul altor substanțe când sunt supuse tensiunilor înalte. Evident, un ohmmetru echipat cu o baterie de tensiune joasă ca și sursă de putere, nu poate măsura rezistența gazului în zona potențialului de ionizare, sau la punctul de străpungere a unui dielectric. Dacă este necesară măsurarea unor astfel de rezistențe, avem nevoie de un ohmmetru echipat cu o sursă de tensiune înaltă.

## Modul de proiectare al ohmmetrelor de tensiune înaltă



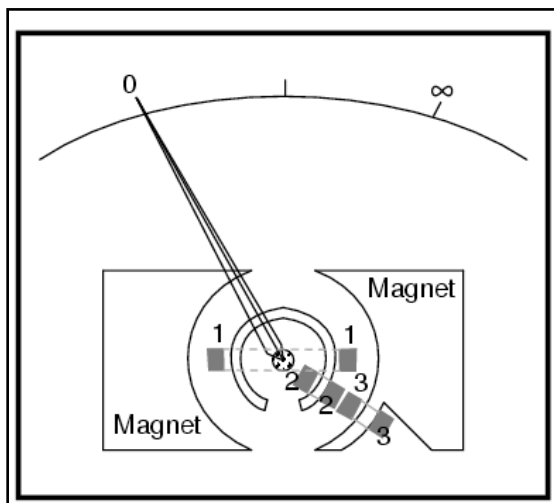
Metoda cea mai directă de măsurare a rezistențelor folosind tensiuni înalte, constă în simpla înlocuire a bateriei, păstrând structura precedentă a ohmmetrului neschimbată.



Totuși, cunoscând faptul că rezistența unora dintre materiale tinde să se modifice odată cu variația tensiunii aplicate, ar fi avantajos dacă am putea selecta tensiunea de funcționare a ohmmetrului în funcție de condițiile de realizare a măsurătorii:

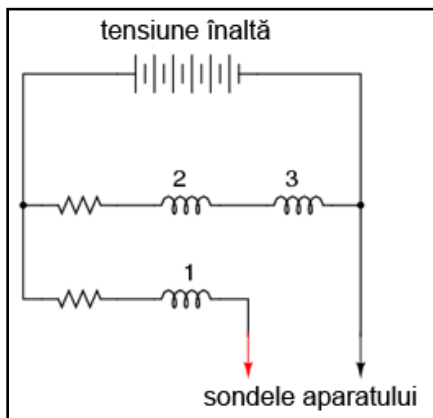
Din păcate, această situație crează o problemă de calibrare a ohmmetrului. Dacă deplasarea acului indicator este maximă cu o anumită valoare a curentului prin aparat, scala aparatului de măsură (în ohmi) se va modifica odată cu variația tensiunii sursei de alimentare. Imaginați-vă că am conecta o rezistență stabilă la bornele ohmmetrului, variind tensiunea sursei de alimentare: pe măsură ce tensiunea crește, curentul prin aparat va fi din ce în ce mai mare; deplasarea acului indicator va fi la rândul ei din ce în ce mai mare.

## Megohmmetrul

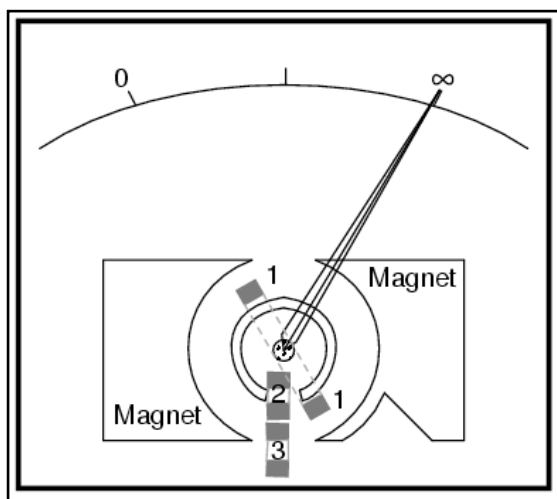


Avem nevoie prin urmare de un sistem electromecanic ce produce o deplasare stabilă, indiferent de rezistența de măsurat și de tensiunea aplicată. Această nevoie poate fi îndeplinită folosind un sistem electromecanic special, sistem tipic megohmmetrelor.

Blocurile rectangulare numerotate din figura de mai sus reprezintă secțiuni transversale ale bobinelor. Toate cele trei bobine se deplasează odată cu acul indicator. Nu există niciun arc care să readucă acul la poziția inițială. Când aparatul nu este alimentat, acul indicator va „pluti” într-o poziție aleatoare.



Electric, bobinele sunt conectate conform figurii alăturată.



Când avem o rezistență infinită între cele două sonde (circuit deschis, precum în figura de sus), singurul curent existent în circuit va fi prin bobinele 2 și 3, dar nu și prin bobina 1. Când sunt alimentate, aceste bobine încearcă să se alinieze în spațiul liber dintre cei doi poli magnetici. Acul indicator se va deplasa spre dreapta scalei (infinit).

Existența unui curent prin bobina 1 (printr-o rezistență de măsurat conectată între cele două sonde de măsură) tinde să ducă acul indicator spre stânga scalei (zero). Valorile rezistențelor interne ale sistemului de măsură sunt calibrate astfel încât, în cazul în care sondele sunt scurt-circuitate, acul indicator indică exact 0  $\Omega$ .

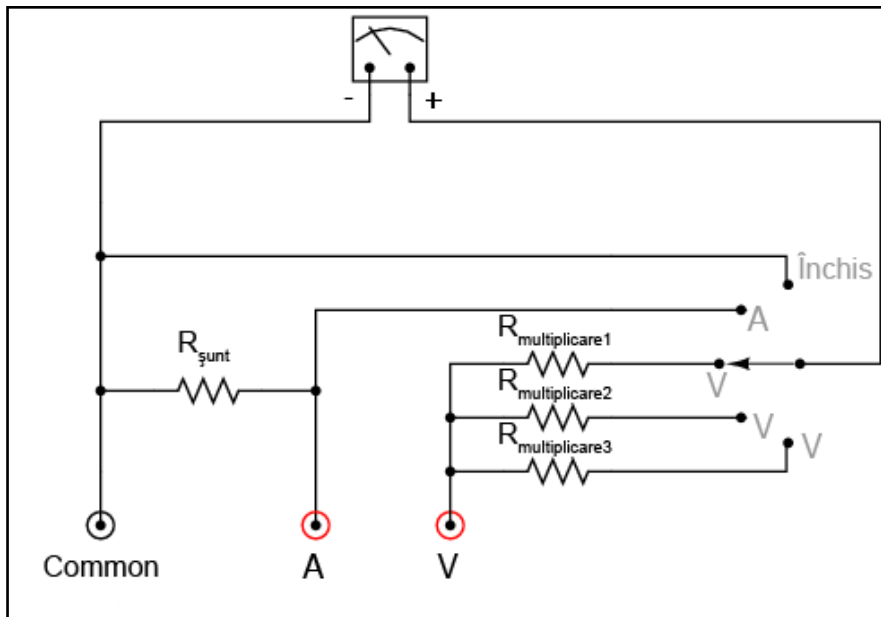
Datorită faptului că orice variație a tensiunii bateriei interne va afecta cuplul generat de *ambele* seturi de bobine (bobinele 2 și 3, ce deplasează acul indicator spre dreapta, și bobina 1 ce deplasează acul spre stânga), aceste variații nu vor avea niciun efect asupra setării deplasării. Cu alte cuvinte, precizia sistemului de măsură a acestui ohmmetru nu este afectată de tensiunea bateriei: o anumită valoare a rezistenței de măsurat va produce o anumită deplasare a acului indicator, indiferent de valoarea tensiunii produsă de baterie.

## 08. Multimetrul

Am văzut modul în care un sistem electromecanic poate funcționa pe post de voltmetru, ampermetru sau ohmmetru prin simpla conectare a unor rețele externe de rezistori. Ne putem gândi că am putea realiza un aparat de măsură universal (multimetru), în care să fie încorporate toate funcțiile de mai sus. Acest lucru se realizează practic prin utilizarea corespunzătoare a contactelor și a rezistorilor.

### Voltmetru/ampermetru analogic

Schema de principiu a unui voltmetru/ampermetru analogic simplu, arată astfel:

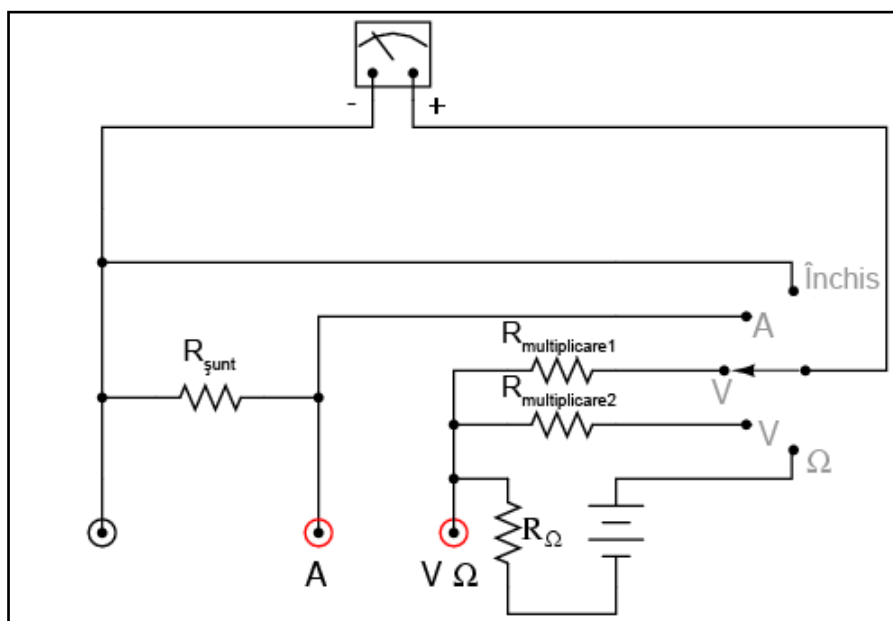


În cele trei poziții de jos ale comutatorului, mecanismul de detecție al aparatului este conectat la prizele „common” și V printr-unul din cei trei rezistori serie ( $R_{\text{multiplicare}}$ ). În acest caz, aparatul se comportă precum un voltmetru. În cea de a patra poziție, mecanismul de deplasare este conectat în paralel cu rezistorul de șunt ( $R_{\text{șunt}}$ ).

Astfel, aparatul este în acest caz un ampermetru. Curentul intră pe la priza „common” și iese pe la priza A. În ultima poziție, mecanismul de deplasare este deconectat de la ambele prize roșii (V și A), dar scurt-circuitat prin intermediul comutatorului.

### Adăugarea unui ohmmetru

Dacă dorim și adăugarea unui ohmmetru aparatului de măsură de mai sus, putem înlocui una din cele trei poziții ale voltmetrului, astfel:

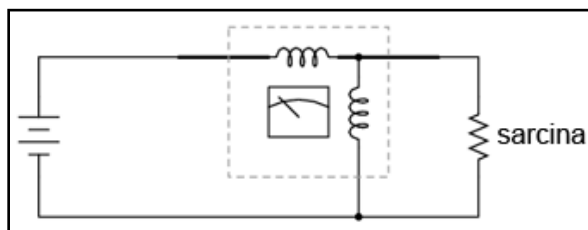


Cu toate cele trei funcții disponibile, acest multimetru mai este cunoscut și sub numele de volt-ohm-miliampermetru.

## 09. Wattmetrul

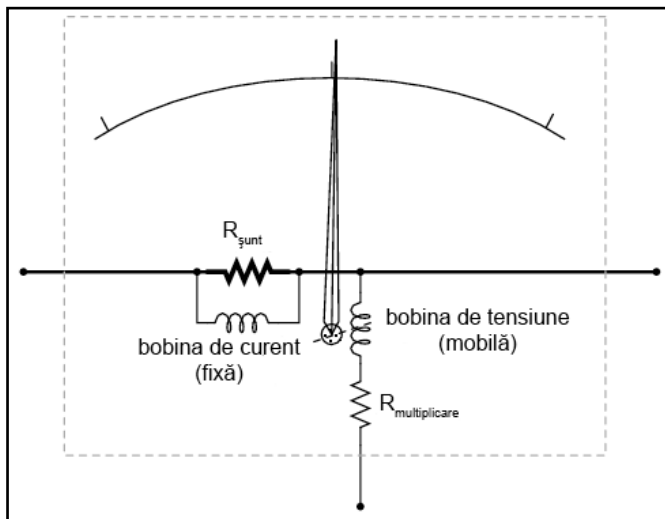
Puterea într-un circuit electric este produsul dintre tensiune și curent. Prin urmare, orice aparat de măsură a puterii trebuie să poată măsura ambele variabile.

Un mecanism de deplasare proiectat special pentru măsurarea puterii este mecanismul de tip dinamometru. Structura acestuia este similară modelelor D'Arsonval și Weston, cu diferența că se utilizează o bobină (staționară) în locul unui magnet permanent pentru generarea câmpului magnetic. Bobina mobilă este în general alimentată de la tensiunea circuitului, iar bobina staționară este alimentată de curentul circuitului. Într-un circuit, o astfel de structură arată astfel:



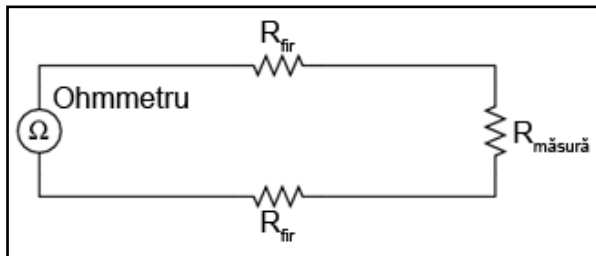
Bobina de sus (orizontală) măsoară curentul, în timp ce bobina de jos (verticală) măsoară căderea de tensiune. La fel ca în cazul voltmetrelor, deplasarea dinamometrului este de obicei conectată în serie cu un rezistor pentru a nu aplica întreaga cădere de tensiune pe mecanism.

Asemănător, bobina (staționară) de curent va fi prevăzută cu rezistori de șunt pentru a diviza curentul în jurul acesteia. Totuși, de multe ori nu este nevoie de rezistori de șunt, deoarece grosimea conductorului din care este realizată bobina staționară poate fi oricât de mare (pentru reducerea curentului), fără a influența răspunsul aparatului de măsură. Bobina mobilă nu se poate bucura de această „libertate”, deoarece ea trebuie realizată din conductori cât mai ușori pentru a o inerție minimă.



## 10. Terminali tip Kelvin și rezistori de precizie

### Măsurarea rezistențelor aflate la distanță



Să presupunem că vrem să măsurăm rezistența unui anumit component ce se află la o distanță destul de mare de aparatul nostru de măsură (ohmmetru). Un asemenea scenariu va crea probleme, deoarece ohmmetrul măsoară rezistența totală din bucla de circuit. Aici este inclusă și rezistența conductorilor ( $R_{fir}$ ) ce realizează conexiunea ohmmetrului cu rezistența de

măsurat ( $R_{măsură}$ ).

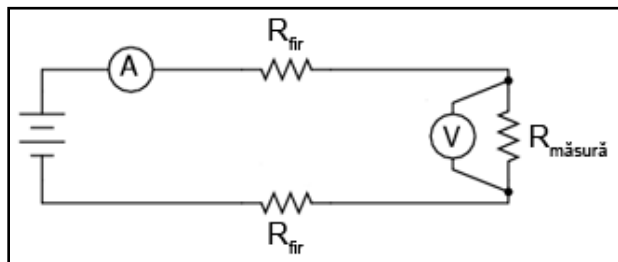
În mod normal, rezistența firelor conductoare este foarte mică. Dar, dacă firele conductoare sunt foarte lungi, sau în cazul în care componentul de măsurat are o rezistență foarte mică, eroarea de măsură introdusă de conductori poate fi substanțială:

$$\text{indicația ohmmetrului} = R_{fir} + R_{măsură} + R_{fir}$$

### Măsurarea rezistenței cu o combinație ampermetru-voltmetru

O metodă ingenioasă de măsurare a unei rezistențe în acest caz, presupune utilizarea împreună a unui ampermetru și a unui voltmetru. Știm din legea lui Ohm că rezistența este egală cu raportul dintre tensiune și curent

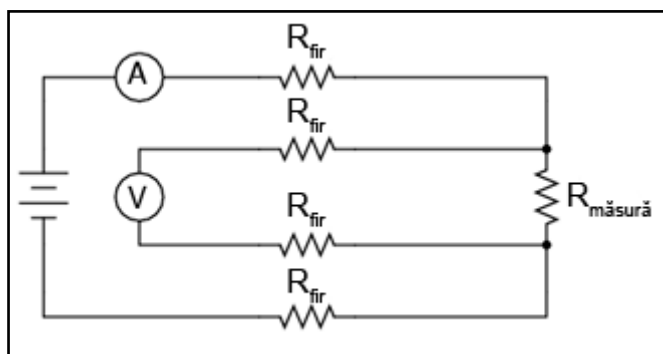
( $R = E / I$ ). Putem determina prin urmare rezistența componentului dacă măsurăm curentul ce trece prin el și căderea de tensiune la bornele sale:



Valoarea curentului este aceeași în întreg circuitul, deoarece este un circuit serie. Întrucât măsurăm doar căderea de tensiune la bornele rezistenței de măsurat (și nu pe rezistențele conductorilor), rezistența calculată cu ajutorul legii lui Ohm reprezintă doar rezistența componentului în cauză.

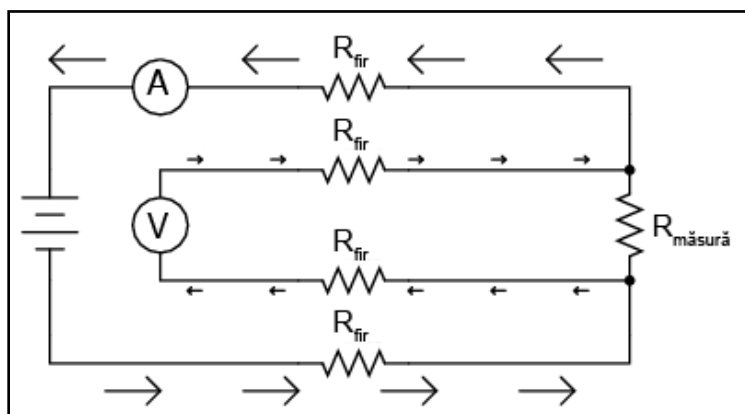
$$R_{\text{măsură}} = \text{indicația voltmetrului} / \text{indicația ampermetrului}$$

Dar, voltmetrul se află în apropierea componentului de măsurat, ceea ce este imposibil în situația de față (am convenit că dorim să măsurăm rezistența componentelor aflate la o distanță apreciabilă față de aparatele noastre de măsură). Prin urmare, dacă ar fi să conectăm voltmetrul la o distanță apreciabilă față de component, vom introduce din nou rezistența „parazită” a firelor conductoare în circuit. Ce este de făcut în acest caz?



Dacă suntem puțin mai atenți, putem observa că nu există nicio problemă legată de căderea de tensiune în lungul conductorilor, deoarece valoarea curentului prin conductorii voltmetrului este minusculă.

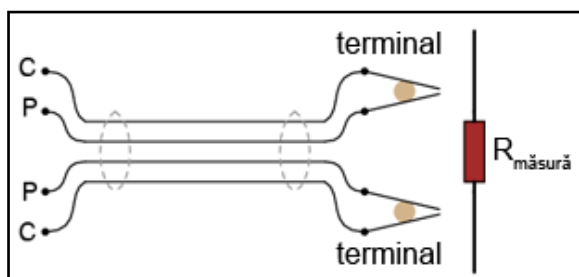
Prin urmare, căderea de tensiune în lungul conductorilor este neglijabilă. Indicația voltmetrului este aproape identică în cele două cazuri: voltmetru conectat în apropierea componentului de măsurat și voltmetru conectat la o distanță apreciabilă.



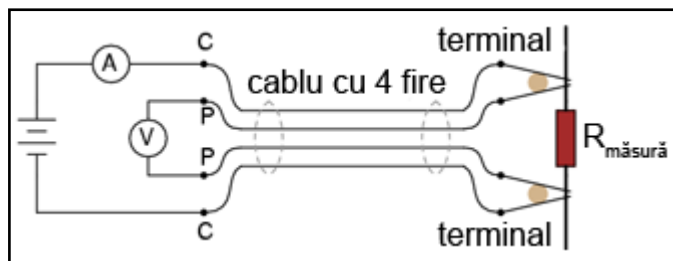
Orice cădere de tensiune existentă pe conductorii principali nu va fi măsurată de voltmetru. Precizia măsurătorii poate fi îmbunătățită dacă reducem curentul prin voltmetru la o valoare minimă, fie folosind un aparat de măsură de calitate (curent mic pentru deplasare maximă), fie un sistem cu detector de nul.



## Metoda Kelvin (metoda celor patru conductori)



Această metodă de măsurare ce evită erorile cauzate de rezistența conductorilor poartă numele de metoda Kelvin, sau metoda celor patru conductori. Există anumiți terminali speciali, denumiți terminali Kelvin, ce sunt special realizați pentru a facilita acest tip de măsurători.



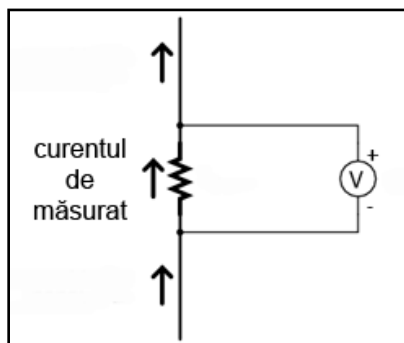
Terminalii/clemele tip crocodil (banane) au ambele jumătăți ale brațului comune din punct de vedere electric (de obicei în zona articulației). În cazul terminalilor Kelvin însă, cele două jumătăți sunt izolate între ele în zona articulației. Singurul contact se realizează în zona

vârfurilor ce se „prind” pe conductorul sau pe terminalul componentului de măsurat. Astfel, curentul prin brațele „C” (curent) nu trece prin brațele „P” (potențial, sau tensiune) și nu va exista o cădere de tensiune în lungul lor care să ducă la erori de măsură.

## Rezistori de șunt de precizie înaltă

Același principiu de utilizare a diferitelor puncte de contact pentru măsurarea curentului și a tensiunii poate fi folosit în cazul rezistorilor de șunt de precizie pentru măsurarea valorilor mari de curent. După cum am mai discutat, rezistorii de șunt sunt folosiți pe post de dispozitive de măsură de curent.

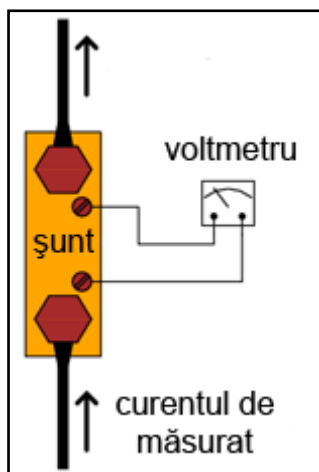
Căderea de tensiune la bornele acestora depinde strict de valoare curentului ce-i străbate, această cădere de tensiune fiind măsurată cu un voltmetru. În acest caz, un șunt de precizie „transformă” valoarea curentului în tensiune. Curentul poate fi măsurat cu o precizie ridicată prin măsurarea căderii de tensiune la bornele șuntului:



Măsurarea curentului cu ajutorul unui rezistor de șunt și un voltmetru este indicată în aplicațiile de curent înalt. În astfel de cazuri, rezistența șuntului are valori de ordinul miliohmilor sau microhmilor.

Căderea de tensiune la bornele sale va fi foarte mică, chiar și pentru o valoare maximă a curentului de măsurat. O rezistență așa de mică este comparabilă cu rezistența firelor conductoare. Acest lucru înseamnă că

tensiunea măsurată la bornele unui astfel de șunt trebuie măsurată astfel încât să se evite introducerea unei erori de măsură datorate căderilor de tensiune din lungul conductorilor dintre voltmetru și șunt.

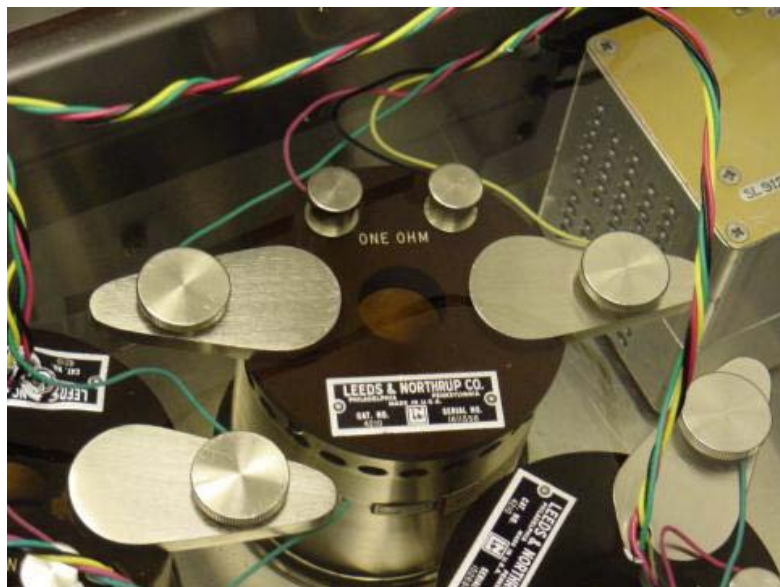


Pentru ca voltmetrul să măsoare doar căderea de tensiune la bornele șuntului, fără nicio altă cădere de tensiune parazită datorată firelor conductoare, șunturile sunt adesea prevăzute cu *patru* terminali.

## Rezistori de precizie cu patru terminali

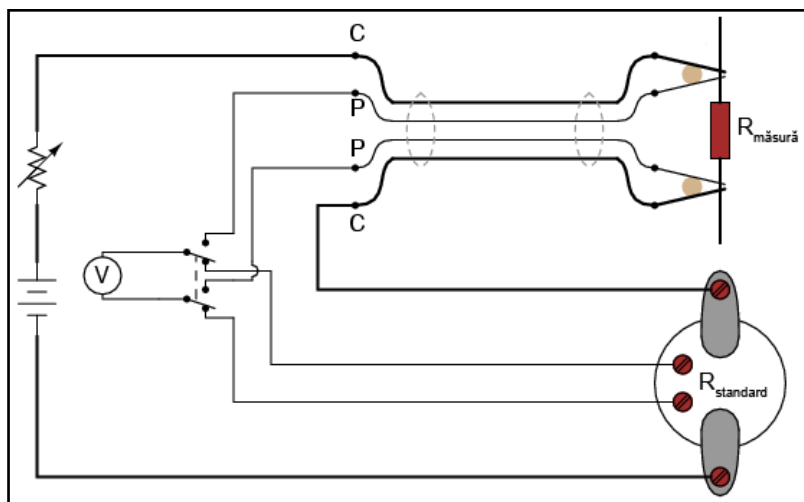
În aplicații metrologice (metrologie = "știință măsurătorilor"), unde acuratețea este de o importanță crucială, rezistorii „standard” de precizie sunt prevăzuți de asemenea cu patru terminali: doi pentru transportul curentului de măsurat, și doi pentru măsurarea căderii de tensiune cu ajutorul voltmetrului. În acest mod, voltmetrul măsoară doar căderea de tensiune pe rezistorul de precizie, fără introducerea altor tensiuni parazite datorită firelor conducătoare sau a rezistențelor datorate contactelor dintre fire și terminale.

Observați că rezistorul de precizie standard de  $0.1\ \Omega$  din figura de mai jos are patru terminali: cei doi terminali mari pentru curent și cei doi terminali mai mici pentru tensiune:



Trebuie să facem observația că rezistența măsurată astfel, folosind atât un voltmetru cât și un ampermetru, este supusă unei erori compuse. Datorită faptului că rezultatul final depinde de precizia de măsură a ambelor instrumente, precizia măsurătorii finale s-ar putea să fie mai mică decât cea a fiecărui instrument individual. De exemplu, dacă precizia ampermetrului este de  $\pm 1\%$ , iar cea a voltmetrului este și ea de  $\pm 1\%$ , orice măsurătoare ce depinde de indicația ambelor instrumente are o precizie de  $\pm 2\%$  (valoarea reală este mai mică sau mai mare cu  $2\%$  decât valoarea măsurată).

O precizie sporită poate fi obținută prin înlocuirea ampermetrului cu un rezistor de precizie standard, folosit pe post de șunt de măsurare a curentului. Și în acest caz va exista o eroare compusă din eroarea rezistorului cu cea a voltmetrului utilizat pentru măsurarea căderii de tensiune. Această eroare va fi însă mai mică decât eroare prezentă în cazul utilizării unui aranjament voltmetru + ampermetru, datorită faptului că precizia unui rezistor standard este mult mai mare decât precizia unui ampermetru obișnuit. Folosind terminali de tip Kelvin pentru realizarea contactelor cu rezistența de măsură, circuitul arată astfel:



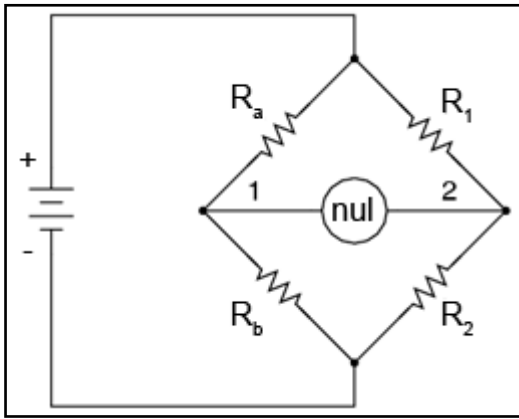
Toți conductorii din figura alăturată prin care trece curent sunt reprezentați cu linie îngroșată, pentru a face distincție între conductori.

## 11. Circuite în punte - puntea Wheatstone și Thomson

Circuitele în punte se folosesc de un detector de nul pentru a compara două tensiuni. Principiul este asemănător unei balanțe de laborator ce compară două greutăți pentru a indica egalitatea lor. Spre deosebire de circuitul „potențiometric” utilizat pentru a măsura pur și simplu o cădere de tensiune necunoscută, circuitele în punte pot fi folosite pentru a măsura o varietate de mărimi electrice, una din ele fiind rezistența.

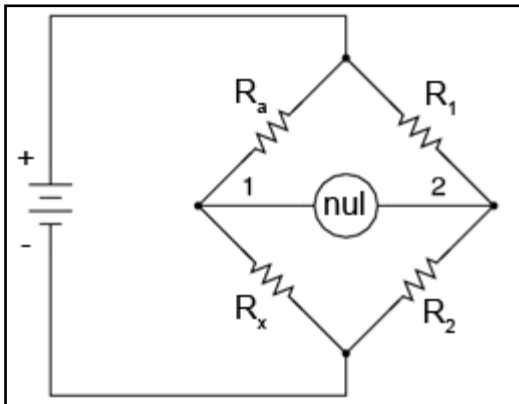
### Puntea Wheatstone

Circuitul în punte standard, numit adesea și punte Wheatstone, arată astfel:



Atunci când căderea de tensiune între punctul 1 și borna negativă a bateriei este egală cu tensiunea dintre punctul 2 și borna negativă a bateriei, detectorul de nul va indica valoarea zero. În acest caz spunem că puntea este „echilibrată”. Starea de echilibru a „balanței” este dependentă de raporturile  $R_a / R_b$  și  $R_1 / R_2$  și este independentă de tensiunea de alimentare (a bateriei).

Pentru măsurarea rezistențelor folosind puntea Wheatstone, rezistența necunoscută se conectează în locul rezistorului  $R_a$  sau  $R_b$ . Celelalte trei componente sunt dispozitive de precizie, a căror rezistență este cunoscută. Oricare din cei trei rezistori poate fi înlocuit sau ajustat, astfel încât puntea să fie echilibrată. Când se ajunge la echilibru, valoarea rezistorului necunoscut se determină din raporturile rezistențelor cunoscute.



O cerință a acestui sistem de măsură constă în existența unor seturi de rezistori variabili de precizie. Din moment ce rezistența acestora este cunoscută, pot fi folosiți ca și referință. De exemplu, dacă folosim o punte Wheatstone pentru a măsura o rezistență necunoscută  $R_x$ , va trebui să cunoaștem valorile exacte ale celorlalți trei rezistori în starea de echilibru, dacă dorim să determinăm valoarea lui  $R_x$ .

Ecuția de echilibru a punții Wheatstone este următoarea:

$$\frac{R_a}{R_x} = \frac{R_1}{R_2}$$

Fiecare din cei patru rezistori a unei punți poartă numele de braț. Rezistorul conectat în serie cu rezistența necunoscută  $R_x$  ( $R_a$  în figura de mai sus) poartă de obicei numele de reostat de reglaj. Din fericire, rezistențele standard precise și stabile nu sunt așa de greu de realizat.

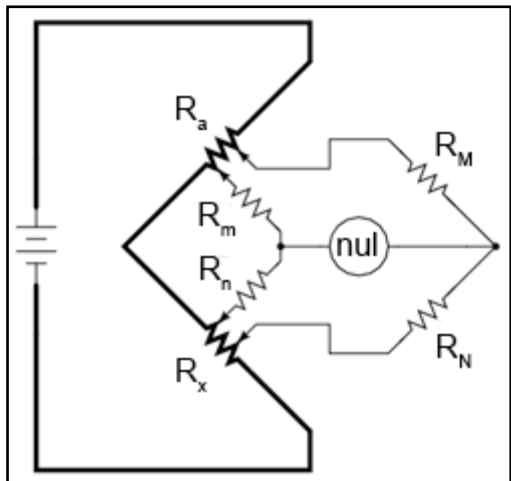
Punțile Wheatstone sunt considerate superioare circuitelor de măsură standard prezentate în secțiunea precedentă din punct de vedere al măsurării rezistențelor. Spre deosebire de acele circuite, punțile Wheatstone sunt liniare și extrem de precise.

Având la dispoziție rezistențe standard de o precizie ridicată și un detector de nul cu o sensibilitate suficientă, putem măsura rezistențe cu o precizie de cel puțin  $\pm 0,05\%$ . Această metodă este preferată și indicată pentru măsurarea rezistențelor de laborator datorită preciziei ridicate.

Există multe variații a circuitului în punte Wheatstone de bază. Majoritatea circuitelor în punte de curent continuu sunt folosite pentru măsurarea rezistenței. Dar circuitele alimentate în curent alternativ pot fi folosite pentru a măsura diferite mărimi electrice precum inductanță, capacitate și frecvență.

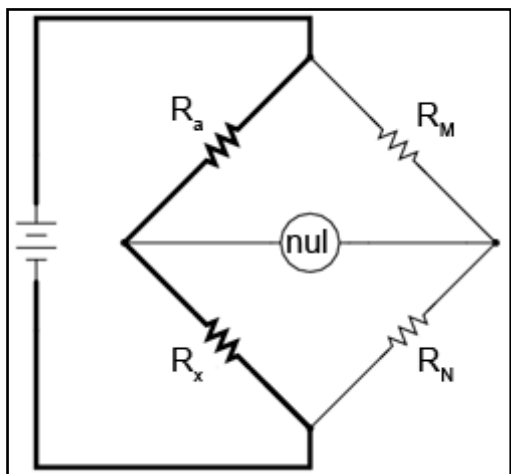
### Puntea Thomson (puntea Kelvin dublă)

O variantă interesantă a punții Wheatstone o reprezintă puntea dublă Kelvin, cunoscută și sub numele de punte Thomson. Acest circuit este utilizat pentru măsurarea rezistențelor extrem de mici (sub 1/10 ohmi):

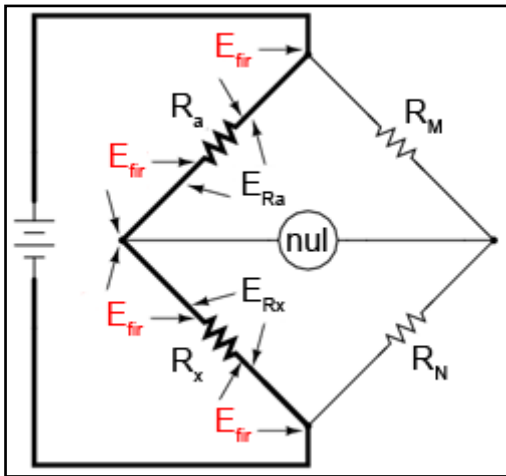


Rezistorii de valoare mică sunt reprezentați prin simboluri cu linie îngroșată, la fel și conductorii (prin care trece un curent mare) la care sunt conectați. Această punte „ciudată” poate fi cel mai bine înțeleasă dacă reluăm puntea Wheatstone standard pentru măsurarea rezistențelor mici, pentru a ajunge apoi, pas cu pas (datorită problemelor întâmpinate), la forma finală a punții Thomson.

Dacă am dori să folosim o punte Wheatstone standard pentru a măsura rezistențe de o valoare foarte mica, circuitul ar arăta astfel:

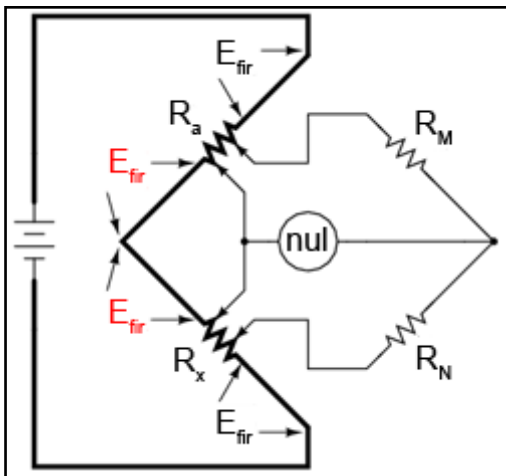


Când detectorul de nul indică o tensiune zero, știm că puntea este echilibrată iar raporturile  $R_a / R_b$  și  $R_M / R_N$  sunt egale. Cunoscând valorile rezistorilor  $R_a$ ,  $R_M$  și  $R_N$  putem determina  $R_x$ ...aproximativ.

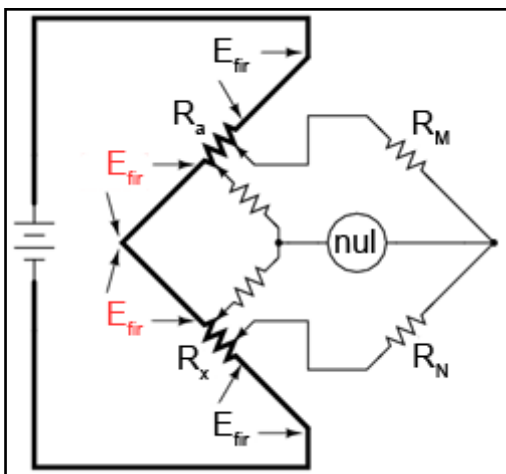


Avem totuși o problemă: contactele și firele conductoare dintre  $R_a$  și  $R_x$  prezintă și ele o anumită rezistență. Aceste rezistențe parazite pot fi substanțiale în comparație cu rezistențele mici  $R_a$  și  $R_x$ . De asemenea, căderea de tensiune pe aceste rezistențe parazite va fi suficient de mare, ducând la un curent mare prin ele. Toate aceste lucruri vor afecta indicația detectorului de nul, și prin urmare, starea de echilibru a punții.

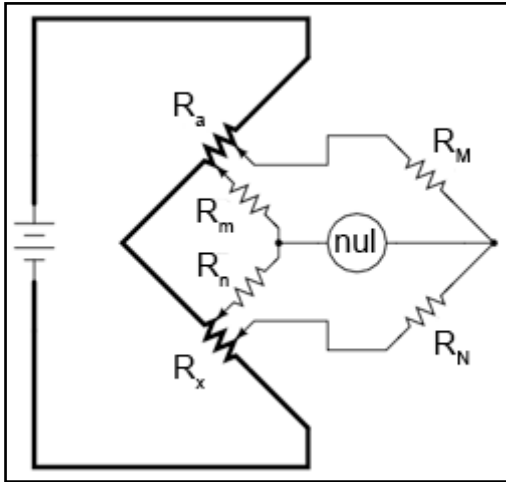
Din moment ce nu dorim măsurarea acestor rezistențe parazite, ci doar a rezistenței  $R_x$ , trebuie găsită o modalitate de corectare a detectorului de nul astfel încât acesta să nu fie influențat de căderile de tensiune din lungul acestor rezistențe parazite. În cazul în care conectăm detectorul de nul și brațele  $R_M / R_N$  direct la bornele rezistorilor  $R_a$  și  $R_x$ , ne vom apropia de o soluție mai practică:



În această configurație, cele două căderi de tensiune  $E_{fir}$  din partea de sus și de jos nu au niciun efect asupra detectorului de nul și nu vor influența precizia măsurătorii lui  $R_x$ . Totuși, celelalte două căderi de tensiune  $E_{fir}$  vor cauza probleme.



Cunoscând faptul că partea stângă a detectorului de nul trebuie conectată la cele două borne ale rezistorilor  $R_a$  și  $R_x$  pentru evitarea introducerii căderilor de tensiune  $E_{fir}$  în bucla detectorului de nul, și că orice conductor ce face legătura cu cele două terminale va conduce el însuși un curent substanțial (ce va duce la căderi de tensiune parazite adiționale), singura soluție în această situație este realizarea unui drum puternic rezistiv între partea de jos a rezistorului  $R_a$  și partea de sus a rezistorului  $R_x$ .



Putem controla căderile de tensiune parazite între  $R_a$  și  $R_x$  prin dimensionarea celor doi rezistori noi, astfel încât raportul celui de sus cu cel de jos să fie egal cu raportul celor două brațe de pe partea cealaltă a detectorului de nul. Acesta este și motivul pentru care acești rezistori au fost denumiți  $R_m$  și  $R_n$  în schema inițială a punții Thomson: pentru a scoate în evidență proporționalitatea lor cu rezistorii  $R_M$  și  $R_N$ .

Raportul  $R_m / R_n$  fiind egal cu raportul  $R_M / R_N$ , brațul  $R_a$  (reostatul) este ajustat până în momentul în care detectorul de nul indică echilibrul punții. În acest moment putem spune că  $R_a / R_x$  este egal cu  $R_M / R_N$ . Putem calcula  $R_x$  cu următoarea ecuație:

$$R_x = R_a \frac{R_N}{R_M}$$

De fapt, ecuația de echilibru a punții Thomson este următoarea:

$$\frac{R_x}{R_a} = \frac{R_N}{R_M} + \frac{R_{fir}}{R_a} \left( \frac{R_m}{R_m + R_n + R_{fir}} \right) \left( \frac{R_N}{R_M} - \frac{R_n}{R_m} \right)$$

unde  $R_{fir}$  este rezistența firului conductor gros dintre rezistența standard de jos  $R_a$  și rezistența de test  $R_x$ .

Atâta timp cât raportul dintre  $R_M$  și  $R_N$  este egal cu raportul dintre  $R_m$  și  $R_n$ , ecuația de echilibru nu este mai complexă decât cea a punții Wheatstone normale.  $R_x / R_a$  va fi egal cu  $R_N / R_M$ , deoarece ultimul termen al ecuației va fi zero, anulând efectele tuturor rezistorilor cu excepția lui  $R_x$ ,  $R_a$ ,  $R_M$  și  $R_N$ .

## Observații asupra punții Thomson

În multe cazuri,  $R_M = R_m$  și  $R_N = R_n$ . Totuși, cu cât rezistențele  $R_m$  și  $R_n$  sunt mai mici, cu atât detectorul de nul va fi mai sensibil, deoarece rezistența conectată în serie cu el va fi mai mică. Creșterea sensibilității detectorului este un lucru bun, deoarece permite detectarea unor dezechilibre mult mai mici, și prin urmare, atingerea unei situații de echilibru mult mai precise. Din această cauză, unele punți Thomson folosesc rezistori  $R_m$  și  $R_n$  a căror valori sunt spre 1/100 din raportul brațelor opuse ( $R_M$  și  $R_N$ ).

Din păcate totuși, cu cât valorile rezistorilor  $R_m$  și  $R_n$  sunt mai mici, cu atât vor conduce un curent mai mare, ceea ce va duce la creșterea efectului oricăror rezistențe prezente la joncțiunea dintre acestea și rezistorii  $R_a$  și  $R_x$ . După cum se poate vedea, instrumentele de precizie înalta necesită luarea în considerare a tuturor factorilor

susceptibili de a produce erori de măsură. De cele mai multe ori, cea mai bună soluție reprezintă un compromis între două sau mai multe tipuri diferite de erori.

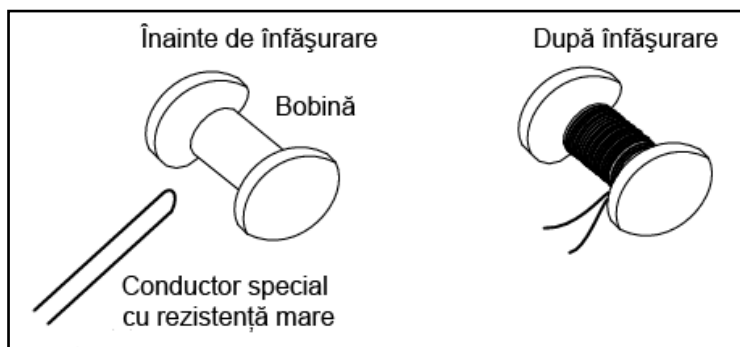
## 12. Realizarea practică a rezistorilor de calibrare

De multe ori, în cazul realizării circuitelor de măsură, avem nevoie de rezistențe precise pentru a obține circuitul dorit. În majoritatea cazurilor însă, valorile necesare ale rezistorilor nu se găsesc pe piață. În acest caz, ne vedem nevoiți să ne construim proprii noștri rezistori.

### Realizarea unei înfășurări bifilare

O soluție a acestei dileme este realizarea rezistorilor dintr-un conductor special cu rezistență mare. Putem folosi o mică „bobină” ca și suport pentru înfășurarea rezultată. Înfășurarea este astfel realizată încât să elimine orice efecte electromagnetice: lungimea dorită a firului conductor este împărțită în două, și înfășurată apoi în jurul bobinei. Astfel, curentul se deplasează în sensul acelor de ceasornic pentru o jumătate din lungimea conductorului și în sens invers acelor de ceasornic pentru cealaltă jumătate.

O astfel de înfășurare poartă numele de înfășurare bifilară. Orice câmp magnetic generat de trecerea curentului prin conductor este anulat. De asemenea, un câmp magnetic extern nu poate induce o cădere de tensiune în lungul conductorului:

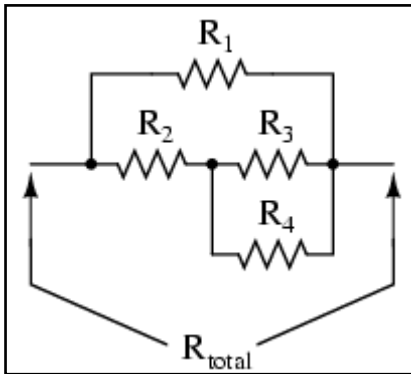


După cum vă puteți imagina, această muncă se poate dovedi extrem de laborioasă, îndeosebi în cazul în care avem nevoie de mai mulți rezistori.

### Conectarea rezistorilor în combinații serie-paralel

O soluție mai ușoară a acestei probleme constă în conectarea mai multor rezistori cu rezistențe cunoscute într-o combinație serie-paralel pentru a obține valoarea dorită a rezistenței. Această soluție, deși necesită un timp îndelungat pentru găsirea combinației perfecte, poate fi duplicată mult mai ușor pentru crearea unor rezistențe multiple cu aceeași valoare:





Dezavantajul ambelor metode constă în faptul că ambele rezistențe rezultate au o valoare fixă. Într-o lume perfectă, mecanismele de deplasare ale aparatelor de măsură nu-și pierd niciodată puterea magnetică a magneților permanenți din componență, temperatura și timpul nu au niciun efect asupra rezistențelor componentelor, iar firele conductoare și contactele păstrează pentru totdeauna o rezistență zero.

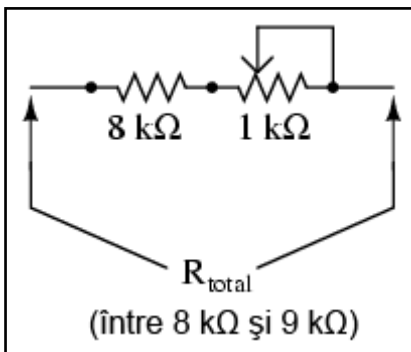
În această „lume perfectă”, rezistorii cu valori fixe sunt suficienți. Dar, în realitate, abilitatea de ajustare sau *calibrare* a instrumentelor în viitor este necesară.

## Utilizarea potențiometrelor

Ne-am putea gândi ca în acest caz să folosim potențiometre (conectate ca și reostate, de obicei) ca și rezistențe variabile. Potențiometrul ar putea fi montat în interiorul aparatului de măsură, astfel încât doar o persoană autorizată să-i poată modifica valoarea.

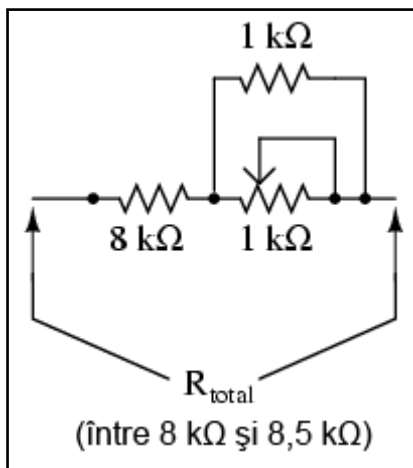
Totuși, rezistența majorității potențiometrelor variază prea mult pentru o deplasarea mică a manetei și nu pot fi ajustate cu foarte mare precizie. Să presupunem că am dori o rezistență de  $8,335 \text{ k}\Omega \pm 1 \text{ }\Omega$ , și folosim un potențiometru de  $10 \text{ k}\Omega$  pentru obținerea ei. O precizie de  $1 \text{ }\Omega$  în cazul unui potențiometru de  $10 \text{ k}\Omega$  reprezintă 1 parte din 10.000, sau 0,01% din deplasarea maximă a potențiometrului. Un astfel de rezultat este aproape imposibil de atins folosind un potențiometru standard. Prin urmare, cum putem obține valoarea rezistenței dorite dar cu posibilitatea ajustării ei în viitor?

Soluția problemei constă în utilizarea unui potențiometru ca parte a unei combinații mai mari de rezistori. Acest lucru va crea un domeniu limitat de selecție. Să luăm următorul exemplu:



În acest caz, potențiometrul de  $1 \text{ k}\Omega$ , conectat ca și reostat, introduce în circuit o rezistență variabilă între  $0 \text{ }\Omega$  și  $1 \text{ k}\Omega$ . Conectat în serie cu rezistorul de  $8 \text{ k}\Omega$ , rezistența totală din circuit poate fi ajustată între  $8 \text{ k}\Omega$  și  $9 \text{ k}\Omega$ . O precizie de  $\pm 1 \text{ }\Omega$  reprezintă 1 parte din 1.000, sau 0,1 % din deplasarea maximă a potențiometrului. Precizia ajustării este de 10 ori mai bună decât în cazul precedent unde am folosit un potențiometru de  $10 \text{ k}\Omega$ .

Dacă dorim să mărim și mai mult precizia ajustării - pentru a realiza o rezistență de  $8,335 \text{ k}\Omega$  cu o precizie și mai bună - putem reduce impactul potențiometrului asupra valorii totale a rezistenței circuitului prin conectarea unui rezistor de valoare fixă în paralel:



Acum, ajustarea rezistorului se poate face doar în limita a  $500\ \Omega$ , de la  $8\text{ k}\Omega$  la  $8,5\text{ k}\Omega$ . O precizie de  $\pm 1\ \Omega$  este egală cu 1 parte din 500, sau 0,2 %. Sensibilitatea ajustării este în acest caz de două ori mai bună decât înainte. Ajustarea nu va fi totuși liniară, poziționarea deplasării potențiometrului la mijloc nu va rezulta într-o rezistență totală de  $8,25\text{ k}\Omega$ , ci de  $8,333\text{ k}\Omega$ .

Totuși, aceasta este o îmbunătățire a sensibilității circuitului, și reprezintă o soluție practică pentru problema construirii unei rezistențe ajustabile pentru un instrument de precizie.

## **09 - Semnale electrice de instrumentație**

### **1. Semnale analogice și semnale digitale**

- Un semnal este orice tip de cantitate ce poate fi detectată și folosită ca și informație
- Un semnal analogic este un semnal ce poate fi variat continuu sau infinit pentru a reprezenta o variație oricât de mică a unei mărimi
- Un semnal digital este un semnal ce poate fi variat doar în trepte. Scara acestuia este finită
- Conceptul de zero real se referă la o scară de măsură analogică în care o cantitate diferită de zero este folosită pentru reprezentarea valorii de 0% din variabila de măsurat, astfel încât orice defect al sistemului să poate fi ușor detectabil.

### **Definiția instrumentației**

Instrumentația este un domeniu bazat pe măsurarea și controlul proceselor fizice. Aceste procese fizice includ presiunea, temperatura, rata de curgere și consistența chimică, printre altele. Un instrument este un dispozitiv ce măsoară și/sau controlează orice tip de proces fizic. Datorită faptului că valorile și cantitățile de tensiune, curent și rezistență sunt ușor de măsurat, manipulat și de transmis pe distanțe mari, acestea sunt adesea folosite pentru reprezentarea acestor tipuri de variabile fizice și transmiterea lor la distanță.

### **Ce este un semnal**

Un semnal este orice tip de cantitate fizică ce transmite o informație. Vorbitorul este cu siguranță un tip de semnal, întrucât transmite gândurile (informații) de la o persoană la alta fizic, prin intermediul sunetului. Gesturile sunt de asemenea informații transmise cu ajutorul luminii. Textul este un alt tip de semnal. În acest capitol, cuvântul semnal va fi folosit pentru a reprezenta o cantitate fizică.

### **Diferența dintre semnalele analogice și cele digitale**

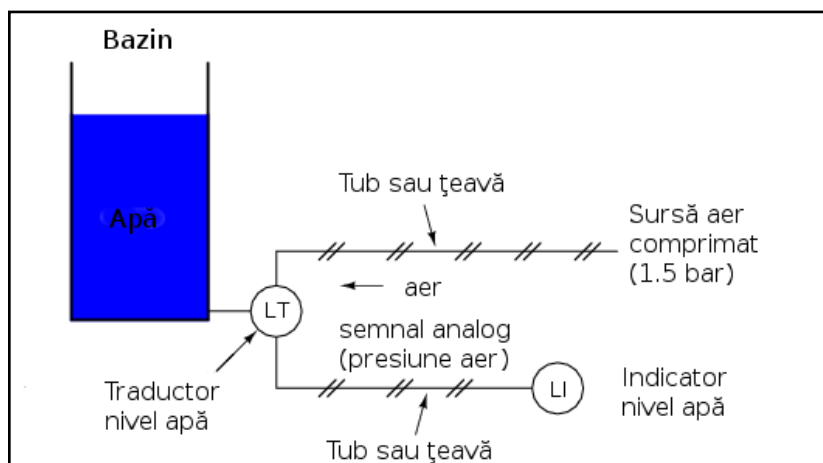
Un semnal analog este un semnal cu o variație continuă, în contradicție cu cel digital, ce are o variație în trepte. Un exemplu bun de analog vs. digital este cazul ceasurilor: cele analogice posedă ace indicatoare și practic nu au o limită de precizie în ceea ce privește indicarea exactă a orei; cele digitale în schimb, nu pot indica intervale de timp sub capacitatea lor de afișaj, ceea ce în multe cazuri se reduce la secunde; această proprietate poartă numele de rezoluție.

Ambele tipuri de semnale, atât analogice cât și digitale, își găsesc aplicația în sistemele electronice moderne, iar distincția dintre aceste două tipuri de informație va fi reluată în capitolele viitoare. Acum însă, ne vom concentra atenția în special pe semnalele analogice, întrucât sistemele ce utilizează aceste tipuri de semnale au de obicei un design mai simplu.

Marea majoritate a cantităților fizice de măsurat (temperatură, umiditate, viteză, etc.) posedă o variabilitate analogică. Dacă o astfel de cantitate fizică este utilizată pe post de canal de comunicație, reprezentarea informației va avea practic o rezoluție nelimitată.

## Scurtă istorie a instrumentației industriale

La începutul instrumentației industriale, aerul comprimat era folosit în scopul transmiterii informației de la aparatele de măsură și controlul acestora. Nivelul presiunii aerului se regăsea în valoarea variabilei de măsurat, oricare era aceea. Aerul curat și uscat la o presiune de aproximativ 1,5 bar era furnizat de un compresor de aer prin intermediul unor tuburi spre instrumentul de măsură, ce modifica la rândul său valoarea presiunii în funcție de cantitatea de măsurat producând astfel un semnal de ieșire.



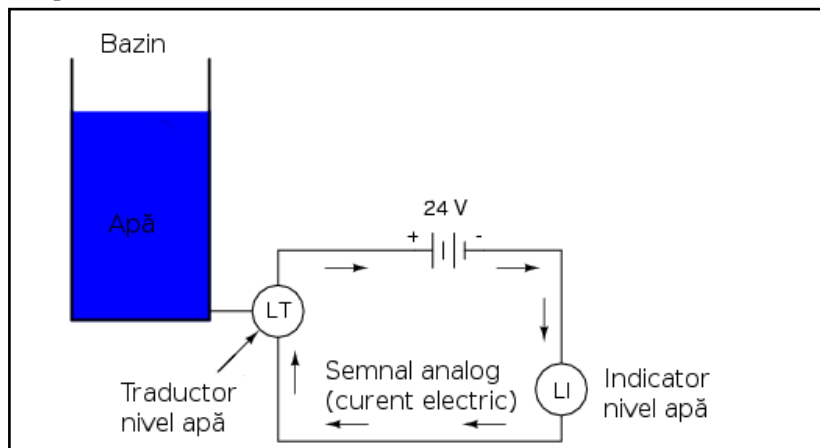
De exemplu, un dispozitiv pneumatic destinat măsurării înălțimii coloanei de apă dintr-un bazin (variabila procesului) va furniza o presiune scăzută a aerului atunci când bazinul este gol, una medie când bazinul este parțial plin și o presiune ridicată atunci când bazinul este plin.

Indicatorul nivelului de apă este de fapt un aparat de măsură a presiunii din tubul de aer. Această presiune a aerului, fiind un semnal, reprezintă nivelul apei din bazin. Orice variație a nivelului apei este reprezentată printr-o variație a presiunii semnalului măsurat. Acest semnal pneumatic are, cel puțin teoretic, o rezoluție infinită, putând reprezenta orice variație cât de mică a nivelului din bazin, și este prin urmare un semnal analog în adevăratul sens al cuvântului.

Oricât de primitiv ar părea, aceste tipuri de sisteme pneumatice au stat la baza multor sisteme industriale de măsură și control peste tot în lume, și mai sunt și acum folosite datorită simplității, siguranței și fiabilității lor. Semnalele ce folosesc aerul comprimat sunt ușor de transmis prin tuburi ieftine, ușor de măsurat și ușor de manipulat cu ajutorul dispozitivelor mecanice. Pe lângă aceasta, acest tip de semnal poate fi folosit nu doar pentru măsurarea proceselor fizice, dar și pentru controlul lor. Cu ajutorul unui piston suficient de mare, un semnal slab poate fi folosit pentru generarea unei forțe mecanice suficient de mari pentru acționarea unei valve sau controlul

unui dispozitiv. Au fost create chiar și sisteme automate complete de control folosind presiunea aerului ca și canal de comunicație. Sunt simple și relativ ușor de înțeles. Totuși, limitele practice pentru precizia semnalului comprimat nu sunt suficiente în unele cazuri, mai ales atunci când aerul comprimat nu este curat și uscat, sau atunci când există posibilitatea apariției spărturilor în țevi.

Odată cu avansul amplificatoarelor din domeniul electronicii semiconductoarelor, folosirea mărimilor de curent și tensiune în instrumentație a devenit practică. În locul utilizării presiunii aerului pentru măsurarea gradului de umplere al unui bazin cu apă, s-a început folosirea semnalelor electrice pentru furnizarea aceleiași informații prin intermediul firelor conductoare (în loc de tuburi) fără a mai fi necesară utilizarea unui echipament scump, precum compresoarele de aer.



Deși semnalele electronice analogice încep să fie înlocuite de cele digitale, este bine să avem o bună înțelegere a principiilor de bază din spatele acestui mod de transmitere a informației.

## Conceptul de „zero real”

Un concept important aplicat în instrumentația semnalelor analogice este cel de „zero real”, un principiu standard de utilizare a semnalelor astfel încât valoarea zero (bazin de apă gol) să nu fie confundată cu defectul sistemului în cauză. De exemplu, în cazul sistemului pneumatic de mai sus, dacă scala valorilor pentru presiune este între 1 și 2 bar (1, 1,1, 1,2...2), cu 1 bar (presiunea aerului din mediul înconjurător) reprezentând 0% din valoarea măsurii de măsurat și 2 bar reprezentând 100% din aceeași valoare, dacă indicatorul va afișa 1 bar, acest lucru ar putea să însemne că bazinul de apă este într-adevăr gol, sau ar putea la fel de bine indica faptul că sistemul nu funcționează (compresorul de aer este oprit, țeava este spartă, traductorul este stricat, etc.).

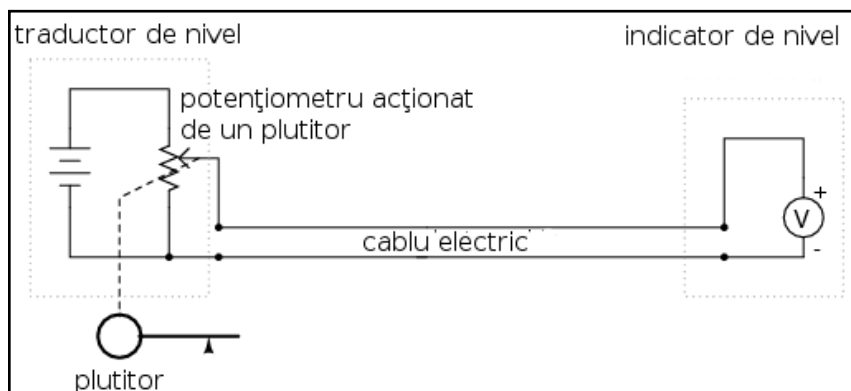
În schimb, dacă am calibra (seta) instrumentele (traductorul și indicatorul) pentru scara de 1.1 - 2 bar (1,1, 1,2, 1,3...2), astfel încât 1.1 bar să reprezinte 0% iar 2 bar 100%, orice tip de defect sau ne-funcționare a sistemului va rezulta într-o presiune de 1 bar, și orice tip de măsurători efectuate se vor realiza doar pentru intervalul 1.1 - 2 bar.

## 2. Sisteme cu semnale de tensiune

- Tensiunea poate fi folosită ca și semnal analogic pentru transmiterea informației
- Un mare dezavantaj în utilizarea tensiunii pe post de informație constă în posibilitatea ca tensiunea la bornele aparatului indicator (voltmetru) să fie mai mică decât căderea de tensiune la bornele sursei de tensiune datorită rezistenței cablurilor și utilizării unei cantități de curent de către voltmetru
- Căderea de tensiune din lungul cablurilor electrice constituie o eroare de măsură

### Măsurarea înălțimii apei dintr-un bazin

Utilizarea tensiunii variabile pentru semnalele de instrumentație pare o soluție bună în acest caz. Să vedem așadar cum am putea folosi un semnal de tensiune pentru a măsura cantitatea de apă dintr-un bazin:

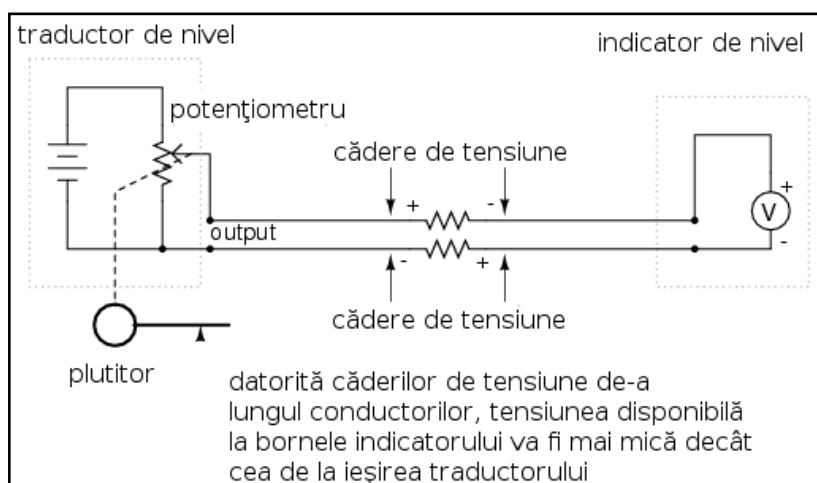


Traductorul din diagrama alăturată conține propria sursă de tensiune, iar potențiometrul este acționat de un plutitor ce se află în interiorul bazinului, poziția acestuia depinzând de nivelul apei. Indicatorul nu este nimic altceva decât un voltmetru cu o scală calibrată (modificată) pentru citirea unei anumite

înălțimi a apei (cm, m, etc.) în loc de volți.

Pe măsură ce nivelul apei suferă modificări, plutitorul se va mișca și el. Această mișcare a plutitorului va modifica poziția periei potențiometrului, modificând astfel căderea de tensiune dintre cele două puncte la care este conectat voltmetrul. Prin urmare, tensiunea măsurată de voltmetru va depinde de nivelul apei din bazin.

Acest sistem elementar traductor/indicator este fiabil și ușor de înțeles, însă are unele neajunsuri. Probabil că cel mai mare dintre ele este influența pe care o poate avea rezistența cablurilor electrice asupra mărimii de măsurat. Voltmetrele reale utilizează valori foarte mici ale curentului datorită rezistenței lor interne, deși, ideal ar fi ca acest curent să fie zero. În acest caz, va exista o cantitate mică de curent prin cele două cabluri conductoare. Cablul având la rândul lui o valoare a rezistenței diferită de zero, va prezenta și o cădere de tensiune în lungul lui, ca și în cazul unui rezistor; căderea de tensiune la bornele voltmetrului va fi astfel mai mică decât tensiunea totală generată de traductor prin intermediul potențiometrului. Această pierdere de tensiune, oricât de mică, constituie o eroare de măsură:



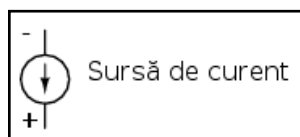
În figura alăturată au fost adăugate simbolurile rezistorului pentru cablurile electrice pentru a indica ceea ce se întâmplă de fapt într-un sistem real. Valorile acestor rezistențe pot fi reduse folosind cabluri electrice mai groase (și mai scumpe) și/sau putem evita efectele lor cu ajutorul unui voltmetru cu o rezistență internă foarte mică (complexitate sporită).

În ciuda acestui dezavantaj, semnalele de tensiune sunt încă folosite în multe aplicații datorită design-ului lor extrem de simplu. Un standard des folosit este de 0-10 volți, unde 0 volți reprezintă 0% din valoarea de măsurat, 10 volți 100%, 5 volți 50%, etc. Un alt domeniu folosit este cel de 1-5 V, ce utilizează conceptul de zero real pentru detectarea cazurilor de defect.

### 3. Sisteme cu semnale de curent

- O *sursă de curent* este un dispozitiv, de obicei constituit din mai multe componente electrice, ce păstrează o valoare constantă a curentului prin circuit precum o sursă de curent (baterie ideală) păstrează o valoare constantă a tensiunii la bornele sale
- Un sistem de instrumentație pe bază de curent exploatează principiul conexiunii serie a circuitelor conform căruia curentul este același prin toate componentele; acest fapt ajută la eliminarea erorilor de măsură datorate rezistenței conductorilor
- Cel mai utilizat standard pentru curentul analogic este bucla de curent de 4-20 miliamperi

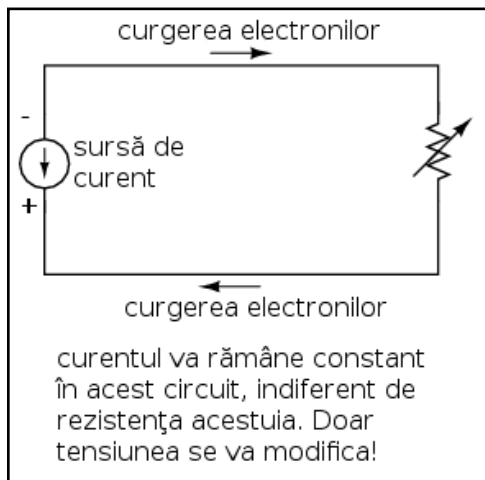
#### Sursa de curent



Folosind amplificatoare electronice putem construi circuite a căror ieșire să fie o cantitate constantă de curent în loc de o cantitate constantă de tensiune, precum în cazul bateriei de exemplu. Aceste componente folosite împreună poartă denumirea de sursă de

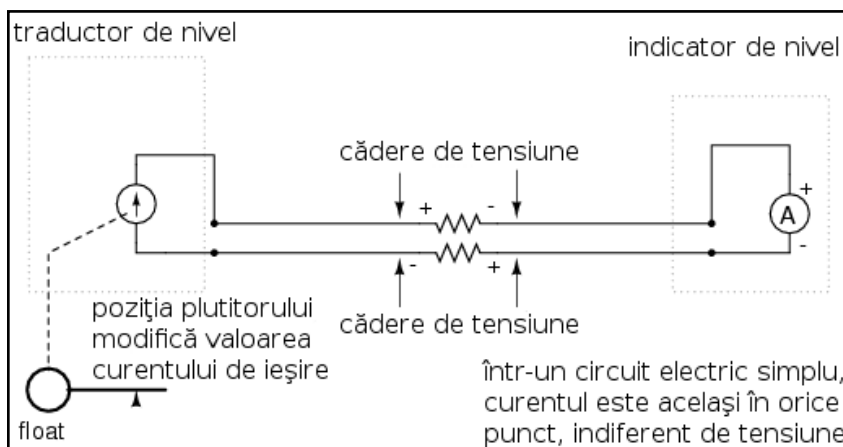
curent, iar simbolul este cel alăturat.

O sursă de curent generează o valoare a tensiunii suficient de mică sau de mare astfel încă să producă o cantitate constantă de curent la bornele sale. Acest lucru este exact opusul unei surse de tensiune (o baterie ideală), ce va furniza o cantitate mai mică sau mai mare de curent în funcție de cerințele circuitului la care este legată.



Întrucât folosim notația reală de deplasare a electronilor prin circuit, săgeata simbolului va fi orientată contrar direcției de curgere.

## Măsurarea înălțimii apei dintr-un bazin



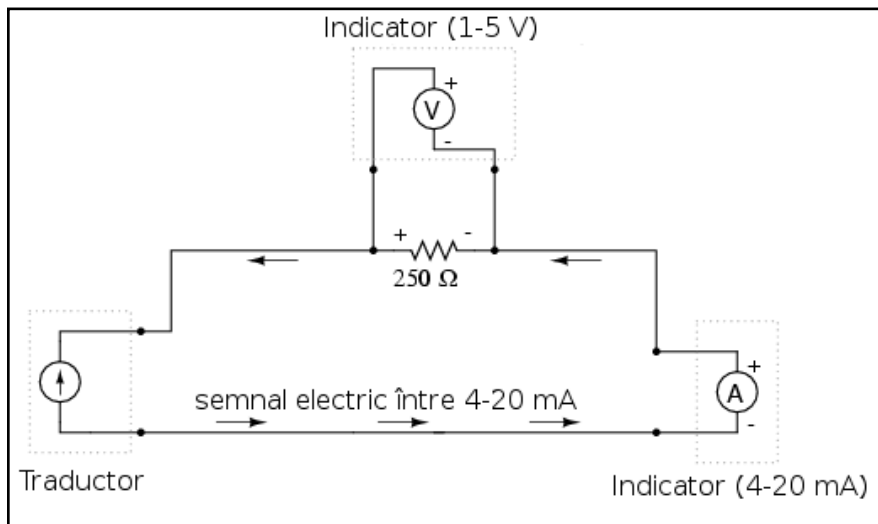
Sursele de curent pot fi construite ca și dispozitive variabile, la fel ca și sursele de tensiune, producând valori foarte precise de curent electric. Dacă am construi un traductor cu o sursă de curent variabilă în loc de o sursă de tensiune, am putea realiza un sistem de instrumentație bazat pe curent în loc de tensiune.

Momentan nu ne interesează construcția internă a sursei de curent din interiorul traductorului, ci doar faptul că ieșirea acestuia variază în funcție de poziția plutitorului, la fel ca în cazul potențimetrului din sistemul de instrumentație bazat pe tensiune.

Indicatorul utilizat în acest caz nu mai este un voltmetru, ci un ampermetru a cărui scară a fost modificată pentru afișarea valorilor în centimetri, metri sau orice altă mărime utilizată pentru reprezentarea înălțimii apei din rezervor. Datorită faptului că sistemul este un circuit serie (punând la socoteală și rezistența conductorilor), curentul va fi exact același prin toate componentele. Cu sau fără rezistența conductorilor, curentul prin indicator este același ca și curentul prin traductor și prin urmare nu avem de a face cu nicio eroare de măsură precum în cazul tensiunii. Acesta este un mare avantaj față de sistemul precedent.

## Standardul pentru semnalul de curent este 4 - 20 mA





Cel mai folosit standard pentru semnalul de curent este de 4 - 20 miliamperi, unde 4 mA reprezintă 0% din cantitatea de măsurat și 20 mA reprezintă 100% (12 mA, 50%, etc.).

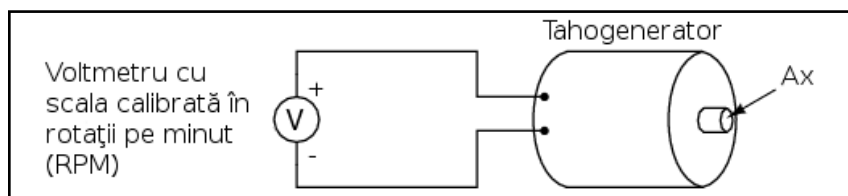
Un avantaj pentru utilizarea acestor valori o constituie ușurința folosirii instrumentelor de măsură pentru valorile de 1-5 V. Un simplu rezistor de precizie de 250 ohm conectat în serie cu acest circuit va produce o

cădere de tensiune de 1 V la 4 mA și 5 V la 20 mA.

| Procentajul măsurătorii | Semnal de 4-20 mA | Semnal de 1-5 V |
|-------------------------|-------------------|-----------------|
| 0                       | 4.0 mA            | 1.0 V           |
| 10                      | 5.6 mA            | 1.4 V           |
| 20                      | 7.2 mA            | 1.8 V           |
| 25                      | 8.0 mA            | 2.0 V           |
| 30                      | 8.8 mA            | 2.2 V           |
| 40                      | 10.4 mA           | 2.6 V           |
| 50                      | 12.0 mA           | 3.0 V           |
| 60                      | 13.6 mA           | 3.4 V           |
| 70                      | 15.2 mA           | 3.8 V           |
| 75                      | 16.0 mA           | 4.0 V           |
| 80                      | 16.8 mA           | 4.2 V           |
| 90                      | 18.4 mA           | 4.6 V           |
| 100                     | 20.0 mA           | 5.0 V           |

## 4. Tahogeneratorul

### Generarea energiei electrice din energie mecanică



Un generator electromecanic este un dispozitiv capabil să genereze putere electrică folosind energie mecanică, de obicei prin intermediul unui ax.

Atunci când nu sunt conectate la o sarcină (rezistență), generatoarele vor produce o tensiune electrică aproximativ proporțională cu viteza axului. Cu un design și construcție precisă, aceste dispozitive pot fi construite astfel încât să genereze tensiuni exacte pentru anumite viteze ale axului; din această cauză pot fi folosite ca și instrumente de măsură în cadrul echipamentelor mecanice. Un generator special construit pentru această utilizare se numește tahometru sau tahogenerator.

### Aplicații ale tahogeneratorului

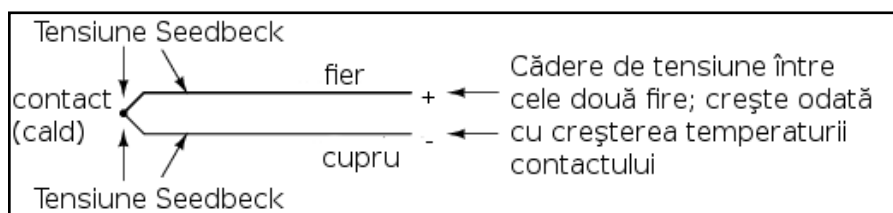
Măsurând tensiunea produsă de un tahogenerator putem determina viteza de rotație a dispozitivului conectat la bornele acestuia.

Tahogeneratoarele pot fi folosite și pentru a indica direcția de rotație prin intermediul polarității („+” sau „-”) tensiunii de ieșire. În sisteme de măsură și control unde direcția de rotație este importantă, tahogeneratorul este o metodă ușoară de determinare a acestui lucru. Tehogeneratoarele sunt frecvent utilizate pentru determinarea vitezei motoarelor electrice

## 5. Termocupla

- Efectul Seebeck constă în producerea unei căderi de tensiune între două metale disimilare conectate împreună, temperatură direct proporțională cu temperatura acestui contact
- În oricare circuit cu termocuple, există două contacte echivalente formate între două metale diferite. Contactul plasat la locul de măsurare se numește contact de măsură, iar celălalt contact (singur sau echivalent) este numit contact rece

### Efectul Seebeck



Un fenomen interesant utilizat în domeniul instrumentației este „efectul Seebeck”, ce constă în producerea unei căderi de tensiune între două fire datorită diferenței de

temperatură dintre acestea.

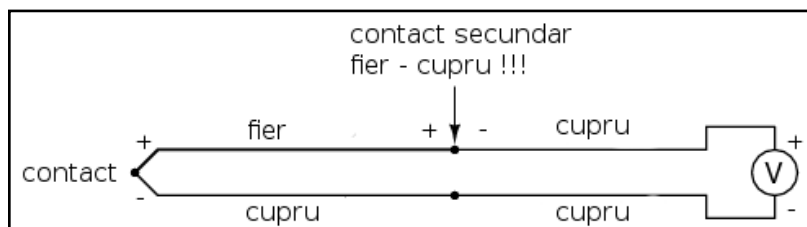
Acest efect este cel mai ușor de observat și de aplicat cu ajutorul unui contact dintre două metale diferite, fiecare metal producând un potențial electric diferit de-a lungul său, ceea ce se traduce printr-o tensiune electrică diferită între capetele libere ale celor două fire. Aproape orice pereche de metale diferite produce o cantitate de tensiune măsurabilă atunci când contactul lor este încălzit, unele combinații producând o cantitate mai mare decât altele.

Efectul Seebeck este destul de liniar, însemnând că tensiunea produsă de contactul încălzit dintre două fire este direct proporțională cu temperatura. Acest lucru înseamnă ca putem determina temperatura contactului măsurând tensiunea produsă. Prin urmare, efectul Seebeck constituie o metodă electrică de determinare a temperaturii.

## Termocupla

Când o combinație de materiale diferite sunt conectate împreună pentru a măsura temperatura, dispozitivul format poartă numele de termocuplă. Termocuplele folosite pentru instrumentație folosesc metale de o puritate superioară pentru a păstra relația temperatură/tensiune cât mai liniară și previzibilă cu putință.

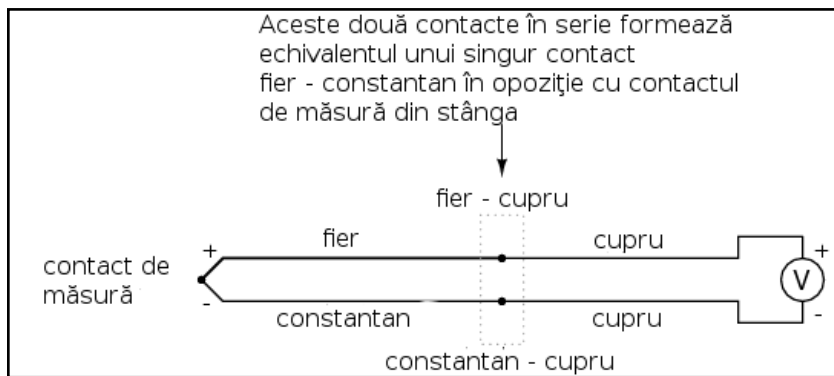
Tensiunile Seebeck sunt destul de mici, de ordinul milivolților (mV) pentru majoritatea temperaturilor. Din acest motiv sunt destul de greu de folosit pentru măsurători precise.



De asemenea, faptul că orice contact dintre oricare două metale diferite produce o cădere de tensiune variabilă cu temperatură constituie o problemă la conectarea unui voltmetru la termocuplă pentru închiderea

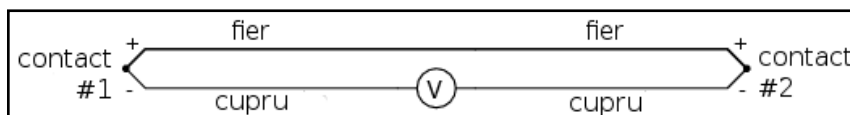
circuitului.

## Contactul de referință, sau contactul rece



Contactul secundar fier - cupru format prin conexiunea dintre termocuplă și aparatul de măsură din firul de sus va produce o diferență de potențial dependentă de temperatură, de polaritate diferită față de tensiunea produsă de punctul de contact inițial (de măsură).

Acest lucru înseamnă că tensiunea de la bornele voltmetrului va depinde de diferența de temperatură dintre cele două contacte, și nu doar de temperatura de la contactul de măsură. Chiar și în cazul termocuplelor ce nu folosesc cuprul pentru contact, combinația celor două contacte metalice adiționale (trei, cu cel de măsură), formează un contact echivalent contactului de măsură.



Acest contact secundar se numește contact de referință sau contact rece, pentru a face distincția între acesta și

contactul de măsură. Nu putem evita un astfel de contact într-un circuit ce utilizează termocupla. În unele aplicații, este necesară măsurarea diferenței de temperatură dintre două puncte, caz în care efectul de mai sus poate fi exploatat prin construirea unui sistem foarte simplu de măsură.

Totuși, în marea parte a aplicațiilor scopul este măsurarea temperaturii doar într-un singur punct, caz în care cel de al doilea contact devine un rău necesar în funcționarea termocuplei.

## Compensarea tensiunii generate de contactul rece

Compensarea pentru tensiunea generată de contactul rece se poate realiza cu un circuit construit special pentru măsurarea temperaturii în acel punct care să producă o tensiune proporțională și inversă pentru anularea efectelor contactului. Sigur, ne putem întreba, „Dacă trebuie să folosim o altă formă de măsurare a temperaturii pentru contracararea efectelor nedorite ale termocuplei, de ce nu am folosi acest mod de măsurare în primul rând, în locul contactului termocuplei?”.

Raspunsul este acesta: pentru că celelalte forme de măsurare a temperaturii disponibile nu sunt le fel de robuste și universale precum aceasta, dar pot face foarte bine măsurători la temperatura camerei. De exemplu, contactul termocuplei poate fi introdus într-un furnal la temperaturi de 1.000 °C, pe când contactul rece poate sta la câțiva zeci de metri distanță într-un loc special amenajat, la temperatura camerei, temperatura acestuia fiind măsurată de un dispozitiv ce nu ar putea niciodată supraviețui căldurii excesive sau mediului coroziv existent într-un furnal.

## Un singur contact poate dezvolta curenți foarte mari

Tensiunea produsă de contactul termocuplei este stric dependentă de temperatură. Orice curent existent în circuitul termocuplei este o funcție a rezistenței din circuit opusă acestei tensiuni ( $I = E / R$ ). Cu alte cuvinte, relația dintre temperatură și tensiunea Seebeck este fixă, pe când relația dintre temperatură și curent este variabilă, depinzând de rezistența totală din circuit. În cazul în care conductorii termocuplei sunt suficient de groși (rezistență mică), putem genera curenți de sute de amperi dintr-un singur contact!

### **Ideal, curentul prin circuit ar trebui să fie zero**

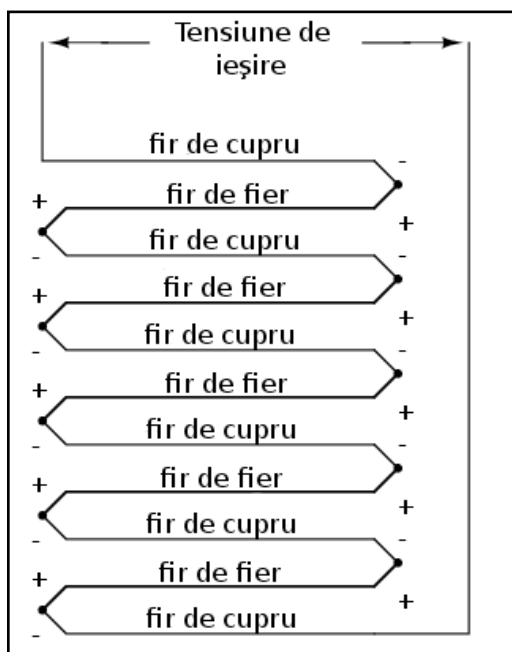
Pentru creșterea preciziei măsurărilor, voltmetrul folosit într-un circuit cu termocuplă este construit cu o rezistență foarte mare pentru evitarea căderilor de tensiune de-a lungul firelor termocuplei. Problema căderilor de tensiune de-a lungul firelor este și mai gravă în acest caz față de semnalele de tensiune discutate anterior, pentru că în acest caz, contactul termocuplei produce o tensiune de doar câțiva milivolți. Nu ne putem permite să avem nici măcar o cădere de tensiune de un singur milivolt (mV) pe conductorii fără a induce erori serioase de măsurare a temperaturii.

În mod ideal, prin urmare, curentul printr-un circuit al termocuplei ar trebui să fie zero. Instrumentele moderne folosesc amplificatoare cu semiconductori pentru a permite semnalului de tensiune al termocuplei să acționeze asupra aparatului de măsură cu un curent foarte mic prin circuit sau chiar zero.

## **6. Termopila**

- Două contacte de termocuplă pot fi poziționate în opoziție unul față de celălalt pentru a genera un semnal de tensiune proporțional cu diferența de temperatură dintre ele. Un set de astfel de contacte folosite în scopul producerii curentului electric poartă numele de termopilă
- Atunci când electronii se deplasează prin contactul unei termopile, există un transfer de energie sub formă de căldură de la un set de contacte la celălalt. Acesta este cunoscut ca și efectul Peltier
- Mai multe contacte de termocuplă pot fi așezate în paralel pentru a genera o cădere de tensiune ce reprezintă media temperaturilor măsurate de fiecare contact în parte.
- Este absolut necesar ca prin circuitul termocuplei curentul să fie menținut la o valoare cât mai mică posibil pentru acuratețea măsurărilor

### **Generarea puterii electrice folosind termocuple legate în serie**



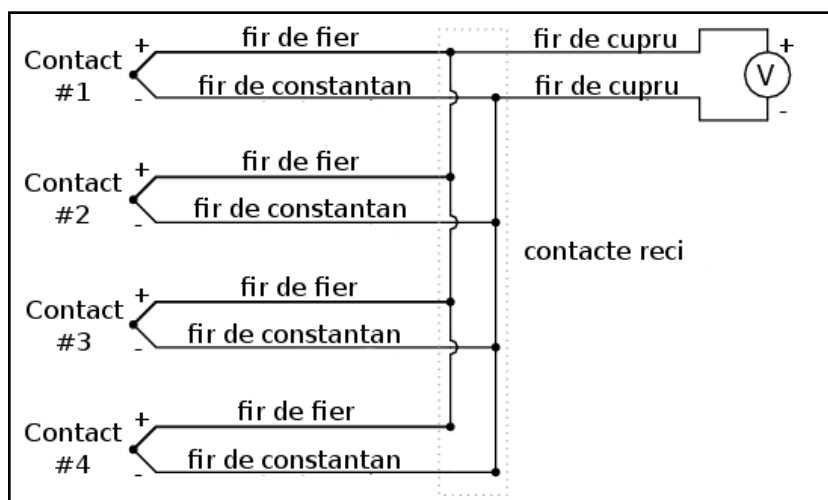
Termocuplele pot fi confecționate din conductori foarte groși pentru rezistență scăzută și conectate în așa fel încât să genereze curenți mari pentru alt scop decât măsurarea temperaturii. O astfel de aplicație este generarea puterii electrice. Conectând mai multe termocuple în serie și alternând temperaturile cald/rece cu fiecare contact, putem construi un dispozitiv numit termopilă cu scopul producerii unor cantități mari de tensiune și curent.

Dacă setul contactelor din stânga și setul contactelor din dreapta sunt menținute la aceeași temperatură, tensiunea generată de fiecare contact va fi aceeași dar de semn contrar astfel încât căderea de tensiune per ansamblu va fi egală cu zero. Dacă în schimb, încălzim contactele din stânga și le răcim pe cele din dreapta, căderea de tensiune pe fiecare contact din stânga va fi mai mare decât căderea de tensiunea pe fiecare contact din dreapta, rezultând o cădere de tensiune per ansamblu ce se traduce prin suma tuturor diferențelor căderilor de tensiune dintre contacte. Acest lucru este aplicat în cazul unei termopile. În acest caz aplicăm o sursă de căldură (combustie, substanțe radioactive, căldură solară, etc.) unui set de contacte iar celălalt set este ținut la temperatură cât mai joasă (răcit cu aer sau apă).

## Efectul Peltier

Și mai interesant este faptul că, în timp ce electroni se deplasează printr-un circuit electric extern conectat termopilei, există un transfer de energie sub formă de căldură dinspre contactele calde spre cele reci, demonstrând un alt efect termoelectric, efectul Peltier, și anume, transferul căldurii prin intermediul curentului electric, și invers.

## Măsurarea temperaturii medii între mai multe locații



O altă aplicație a termocuplelor este măsurarea temperaturii medii între mai multe locații. Cel mai ușor mod de realizare a acestei măsurători este prin conectarea câtorva termocuple în paralel, astfel încât se va face o medie a tuturor semnalelor de ordinul milivolților la punctul de contact dintre termocuple.

Din păcate, media dintre aceste tensiuni Seebeck este precisă doar dacă rezistența firelor fiecărei termocuple este egală. Dacă termocuplele sunt amplasate în locații diferite iar firele lor conectate în paralel se întâlnesc într-o singură locație, este puțin probabil ca lungimile acestora să fie egale. Termocupla cu cea mai mare lungime a firelor din punctul de măsură la conexiunea paralel va tinde să aibă și cea mai mare rezistență și prin urmare cel mai mic efect asupra mediei finale a tensiunii produse.

Pentru compensarea acestui fenomen, se pot adăuga rezistențe suplimentare fiecărei termocuple din conexiunea paralel pentru a aduce rezistențele tuturor la o valoare cât mai apropiată. Dacă nu este posibilă instalarea unor rezistori diferiți, specifici fiecărei ramuri (pentru ca toate rezistențele termocuplelor să fie egale), se pot instala totuși rezistori cu valori egale, dar mult peste cele ale termocuplei astfel încât impactul rezistenței firelor asupra măsurătorii să fie cât mai mic posibil.

## 10 - Analiza rețelelor de curent continuu

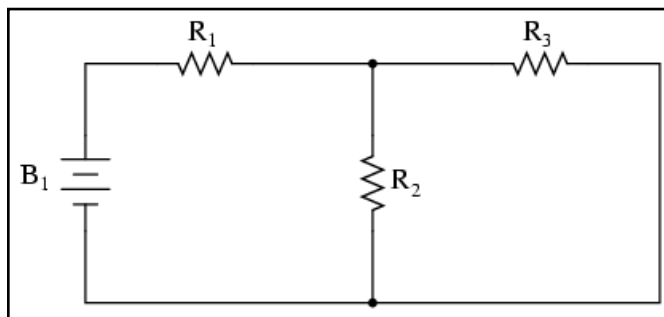
### 01. Ce este analiza unei rețele electrice

- Unele configurații de rețea (circuite) nu pot fi rezolvate prin reducerea conform regulilor circuitelor serie-paralel datorită existenței necunoscutelor multiple.
- Pentru rezolvarea acestor tipuri de probleme se pot folosi sistemele de ecuații.

General vorbind, analiza rețelei este o metodă matematică folosită pentru analiza unui circuit electric. În multe cazuri, vom întâlni circuite ce conțin surse de putere multiple sau configurații ale componentelor ce nu se pot simplifica prin metodele de analiză serie-paralel. În aceste cazuri este necesară utilizarea altor mijloace. Acest capitol prezintă câteva tehnici folosite pentru analiza unor astfel de circuite complexe.

#### Imposibilitatea reducerii circuitului la o combinație serie-paralel

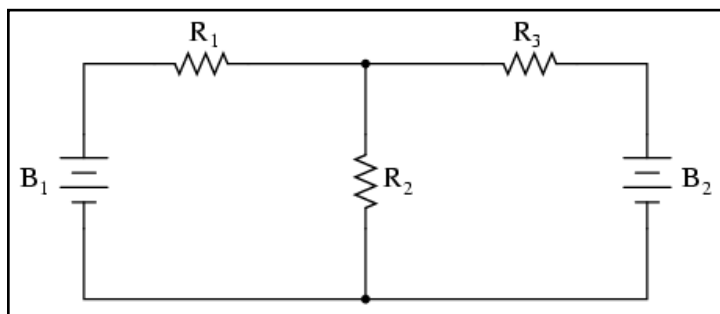
Pentru ilustrarea faptului că un circuit relativ simplu poate fi imposibil de redus în sub-circuite serie sau paralel, să luăm următorul circuit serie-paralel ca și exemplu:



Pentru analiza circuitului alăturat, pașii sunt următorii: găsirea rezistenței echivalente pentru  $R_2$  și  $R_3$  în paralel; adăugarea rezistorului  $R_1$  în serie pentru aflarea rezistenței echivalente totale; cunoscând tensiunea bateriei  $B_1$  și rezistența totală a circuitului, putem afla curentul total folosind legea lui Ohm ( $I = E / R$ ); folosirea valorii curentului pentru calcularea căderilor de

tensiune din circuit. O procedură destul de simplă până la urma.

Totuși, dacă adăugăm o singură baterie în circuit, problema analizei circuitului se complică:



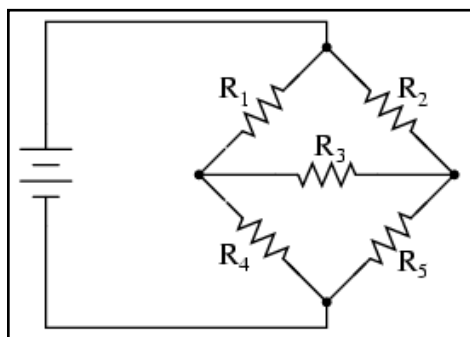
Rezistorii  $R_2$  și  $R_3$  nu mai sunt conectați în paralel unul cu celălalt, pentru că bateria  $B_2$  a fost introdusă în ramura de circuit a lui  $R_3$ .



Dacă suntem și mai atenți, putem observa că în acest circuit nu există doi rezistori legați direct în serie sau paralel unul cu celălalt. Aceasta reprezintă de fapt dificultatea problemei: în analiza circuitelor serie-paralel, primul pas era identificarea rezistorilor în serie sau în paralel, reducându-i la o rezistență echivalentă la următorul pas. Dar dacă niciun rezistor nu este legat în serie sau paralel cu un altul, ce putem face?

## Analiza unei punți dezechilibrate

Este evident faptul că reducerea acestui circuit relativ simplu, cu doar trei rezistori, este imposibil de realizat prin metoda analizei circuitelor serie-paralel. Totuși, acesta nu este singurul tip de circuit ce sfidează analiza serie-paralel.



În acest caz avem un circuit în punte; pentru simplitatea exemplului presupunem că nu este echilibrat (raportul  $R_1/R_4$  nu este egal cu raportul  $R_2/R_5$ ). Dacă puntea ar fi echilibrată, curentul prin  $R_3$  ar fi zero, prin urmare circuitul s-ar putea reduce la o combinație serie-paralel ( $(R_1--R_4 // R_2--R_5)$ ).

Din păcate, orice curent prin  $R_3$  face imposibilă aplicarea analizei serie-paralel. Rezistorul  $R_1$  nu este în serie cu  $R_4$  datorită existenței unei alte căi pentru curgerea electronilor, prin  $R_3$ . Dar nici  $R_2$  nu este în serie cu  $R_5$  din aceleași motive. De asemenea,  $R_1$  nu este în paralel cu  $R_2$  pentru că existența rezistorului  $R_3$  separă terminalii celor doi rezistori în partea de jos. Nici  $R_4$  nu este în paralel cu  $R_5$ .

## Imposibilitatea aflării tuturor necunoscutelor implicate

Deși s-ar putea să nu fie evident în acest moment, problema o reprezintă existența prea multor variabile necunoscute. Într-o combinație serie-paralel cel puțin, exista o metodă de aflare a căderii de tensiune și a rezistenței totale, calcularea curentului fiind apoi posibilă utilizând acest valori. În cazul circuitelor de mai sus, există mai mult de o singură variabilă (parametru) necunoscută în cea mai simplă configurație a circuitului posibilă.

În cazul unui circuit cu două baterii, este imposibil să ajungem la valoarea „rezistenței totale”, datorită existenței a două surse de putere ce furnizează tensiune și curent (am avea nevoie de două rezistențe „totale” pentru a continua cu aplicarea legii lui Ohm). În cazul punții dezechilibrate, există o rezistență totală la bornele bateriei, dar curentul total se împarte în proporții necunoscute în cadrul punții, astfel că nu putem aplica legea lui Ohm pentru aflarea celorlalte valori din circuit.

## Utilizarea sistemelor de ecuații

Prin urmare, ce putem face în astfel de cazuri? Un prim răspuns este utilizarea unui proces matematic cunoscut sub numele de ecuații simultane sau sisteme de ecuații. Într-un scenariu cu o singură necunoscută, este suficientă existența unei singure relații pentru aflarea necunoscutei. Totuși, atunci când dorim o rezolvare pentru mai multe necunoscute simultan, avem nevoie de un număr de ecuații egal cu numărul necunoscutelor. Rezolvarea unor astfel de ecuații se poate dovedi destul de dificilă în unele cazuri. Din fericire, în cele ce urmează, vom prezenta unele metode de analiză a circuitelor pentru evitarea folosirii acestor sisteme de ecuații.

## 02. Metoda ramurii de curent

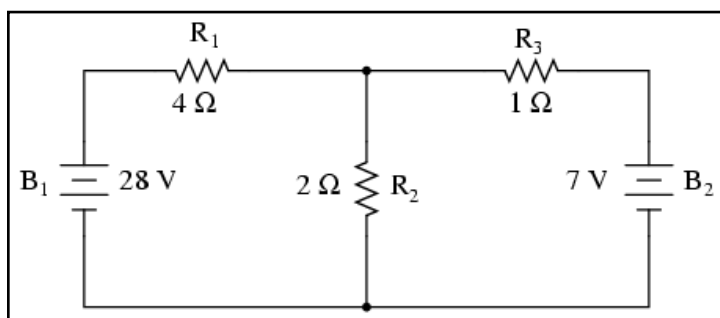
Pașii pentru aplicarea metodei ramurii de curent:

- Alegerea unui nod și a direcțiilor curenților (aleator)
- Scrierea ecuației legii lui Kirchhoff pentru curent pentru acel nod
- Notarea polarităților căderilor de tensiune în funcție de direcția aleasă a curenților
- Scrierea ecuațiilor legii lui Kirchhoff pentru fiecare buclă din circuit, înlocuind căderea de tensiune de pe fiecare rezistor ( $E$ ) cu produsul  $IR$  în fiecare ecuație
- Aflarea curenților necunoscuți de pe fiecare ramură (rezolvarea sistemului de ecuații)
- Dacă oricare dintre soluții este negativă, atunci direcția pe care am intuit-o la punctul 1 este greșită!
- Calcularea căderilor de tensiune la bornele tuturor rezistorilor ( $E = IR$ )

### Definiție

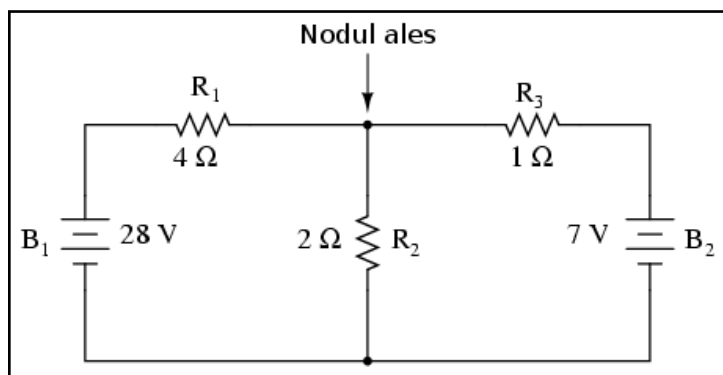
Folosind aceasta metodă, presupunem și indicăm un sens al curenților prin circuit și scriem apoi ecuațiile ce descriu relațiile dintre aceștia folosind legile lui Ohm și Kirchhoff. În momentul în care avem câte o ecuație pentru fiecare curent necunoscut, putem rezolva sistemul de ecuații pentru determinarea tuturor curenților și prin urmare a tuturor căderilor de tensiune din rețea.

### Exemplu



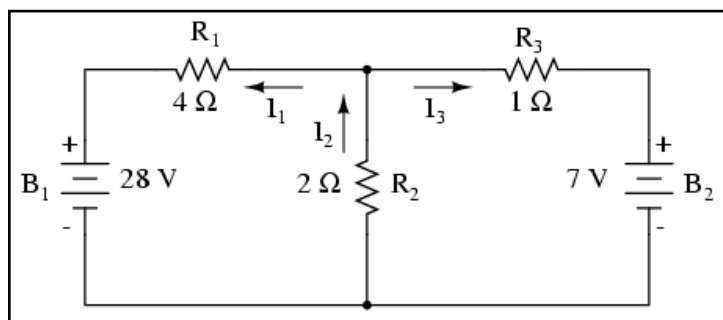
Să folosim următorul circuit pentru ilustrarea metodei.

## Alegerea nodului de referință



Primul pas este alegerea unui nod din circuit (loc de întâlnire a cel puțin trei ramuri) ca și punct de referință pentru curenții necunoscuți.

## Alegerea aleatoare a direcției curenților prin nodul de referință



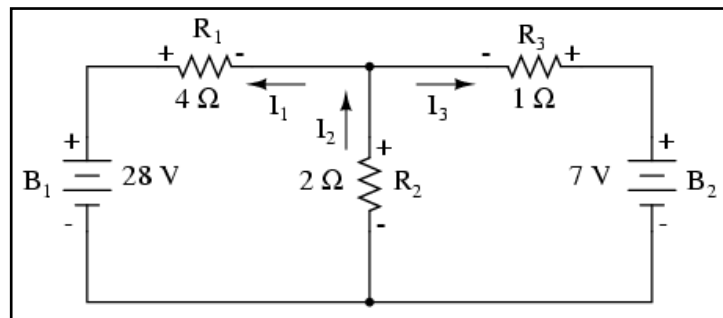
Ghicim apoi direcția curenților din acest nod, notând curenții cu  $I_1$ ,  $I_2$  și  $I_3$ . Nu este neapărat ca direcțiile acestea să fie cele corecte (reale), în acest moment acestea sunt pur speculative. Vom ști dacă intuiția noastră a fost greșită în momentul rezolvării ecuațiilor matematice pentru curenți; orice direcție greșită va apărea în ecuații cu semnul minus.

## Aplicarea legii lui Kirchhoff pentru curenți

Legea lui Kirchhoff pentru curenți (LKC) spune că suma algebrică a tuturor curenților ce intră și ies dintr-un nod de rețea trebuie să fie egală cu zero, prin urmare putem introduce curenții  $I_1$ ,  $I_2$  și  $I_3$  într-o singură ecuație. Vom nota toți curenții ce intră într-un nod cu semnul pozitiv și toți curenții ce ies dintr-un nod cu semnul negativ (aceasta este doar o convenție; inversând semnele, rezultatul final va fi exact același):

$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

## Notarea polarităților tuturor căderilor de tensiune din circuit



Pasul următor este notarea tuturor semnelor căderilor de tensiune în funcție de sensul presupus al curenților. Țineți minte că partea din „amonte” a rezistorului va fi tot timpul negativă, iar partea din „aval” tot timpul pozitivă întrucât electronii posedă o sarcină negativă.

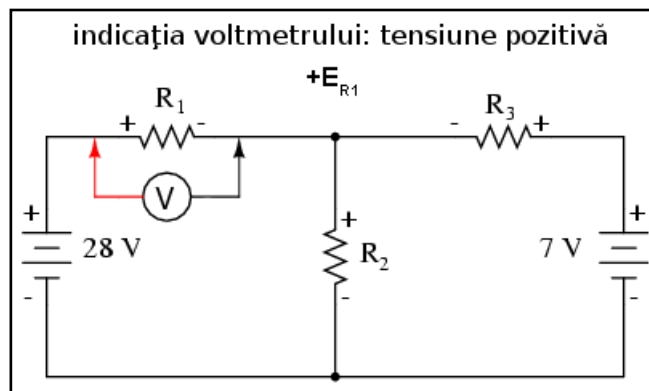
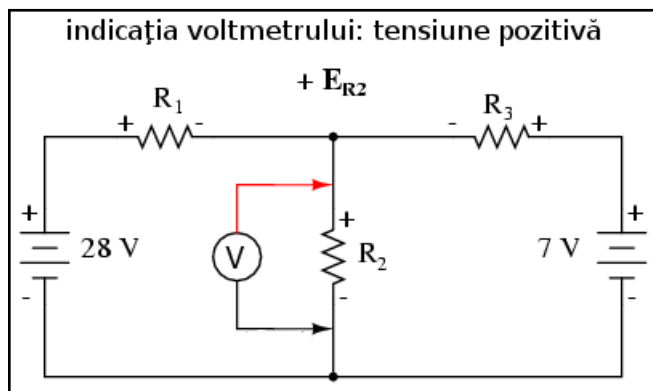
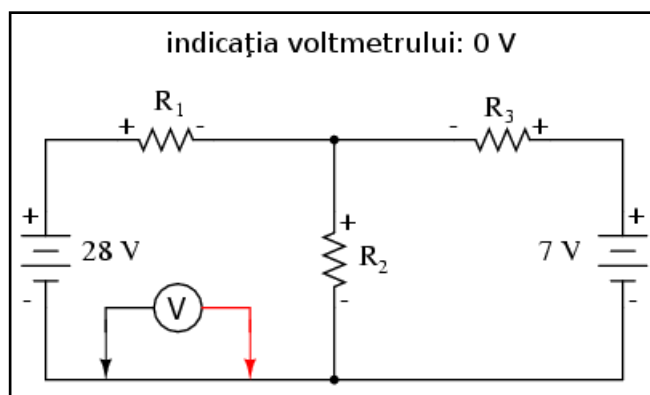
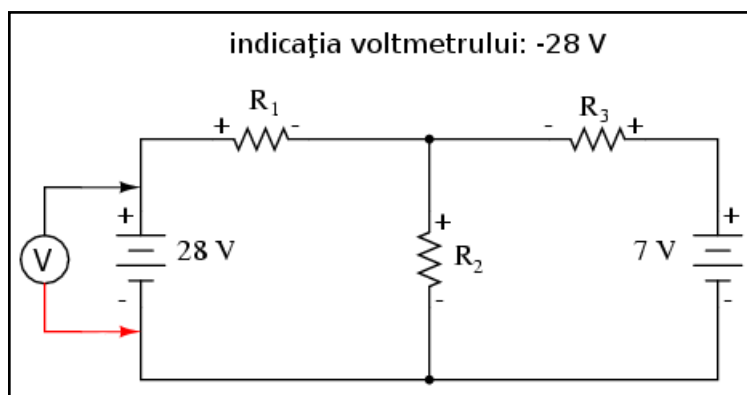
Desigur, polaritatea bateriilor rămâne aceeași. Nu este nicio problemă dacă polaritatea rezistorului nu se „asortează” cu cea a bateriei atât timp cât polaritatea rezistorului este bazată pe direcția presupusă de curgere a curentului prin acesta. Toate calculele efectuate de acum încolo se vor baza pe direcția presupusă a curenților prin nodul ales.

## Aplicarea legii lui Kirchhoff pentru tensiune

Legea lui Kirchhoff pentru tensiune (LKU) spune că suma algebrică a tuturor căderilor de tensiune dintr-o buclă de rețea trebuie să fie egală cu zero. Pentru a obține ecuațiile folosind LKU, trebuie să introducem valorile căderilor de tensiune ca și cum le-am fi măsurat cu un voltmetru real.

### Parcurerea buclei din stânga

Putem începe parcurerea buclei din orice punct dorim; în cazul de față începem de la bornele bateriei și continuăm în sens invers acelor de ceasornic până ajungem în punctul de unde am plecat:



După ce am parcurs întreaga buclă din stânga, adunăm toate aceste valori ale tensiunii pentru a forma o ecuație:

$$-28 + 0 + E_{R2} + E_{R1} = 0$$

Evident, nu cunoaștem încă valoarea căderilor de tensiune la bornele rezistorilor  $R_1$  și  $R_2$  așa că nu putem introduce valorile lor reale în ecuație în acest moment. Totuși, știm faptul că suma tuturor acestor căderi de tensiune trebuie să fie egală cu zero, prin urmare ecuația este adevărată și o putem folosi mai departe în analiza noastră. Putem dezvolta ecuația înlocuind tensiunile necunoscute cu produsul dintre curenții necunoscuți,  $I_1$  și  $I_2$ , și valoarea rezistorilor prin care aceștia trec, folosind legea lui Ohm ( $E = IR$ ). Eliminăm de asemenea și valoarea 0 din sumă:

$$-28 + E_{R2} + E_{R1} = 0$$

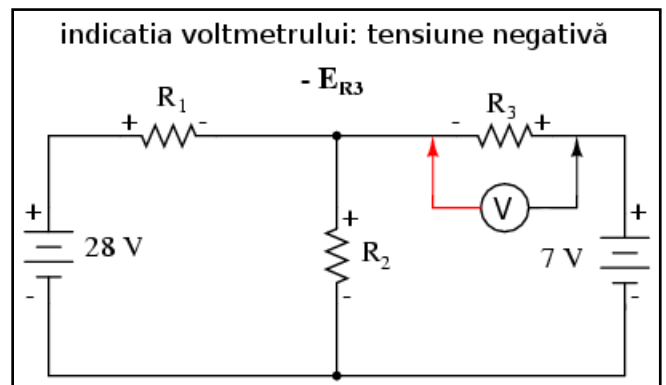
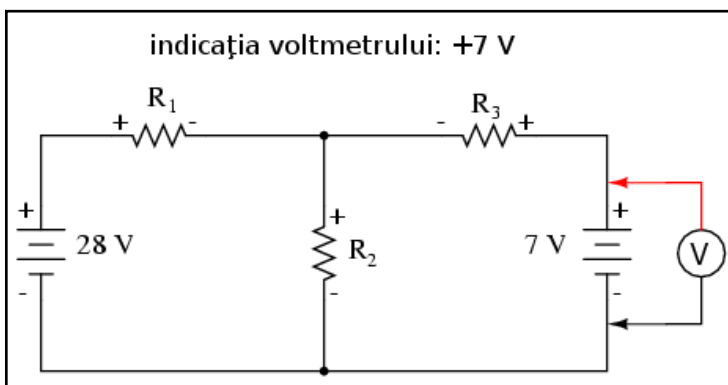
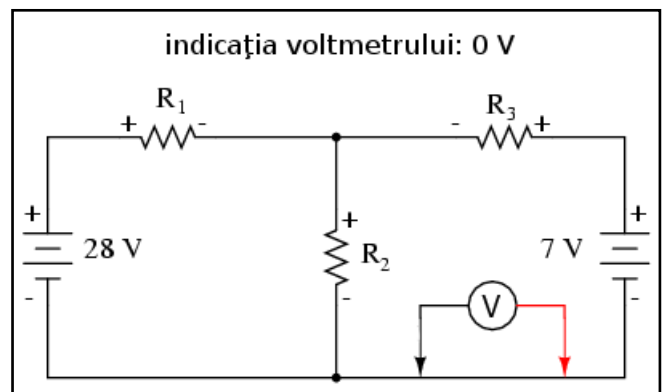
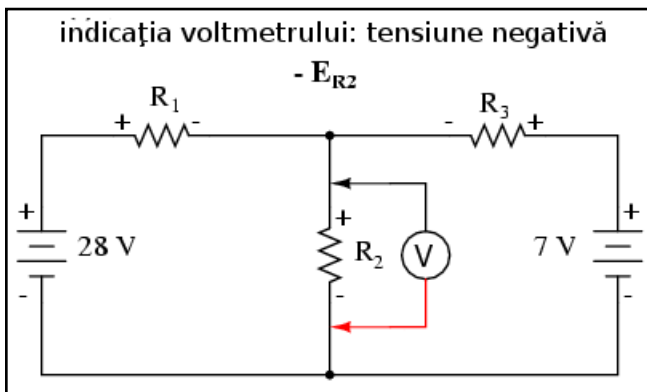
$$E = IR - 28 + I_2 R_2 + I_1 R_1 = 0$$

Din moment ce cunoaștem valorile tuturor rezistorilor în ohmi, putem înlocui aceste valori în ecuație pentru a ne ușura calculele:

$$-28 + 2I_2 + 4I_1 = 0$$

Motivul pentru care am redus ecuația în acest fel (până la urmă, avem tot două necunoscute) este folosirea aceluiași variabile necunoscute ce le-am folosit și în ecuația LKC de mai sus. Acest pas este necesar pentru aflarea soluției sistemului final de ecuații.

### Parcursul buclei din dreapta



Aplicând aceeași pași și pentru bucla din dreapta, obținem o altă ecuație:

$$-E_{R2} + 0 + 7 - E_{R3}$$

Cunoscând faptul că tensiunea de pe fiecare rezistor poate fi exprimată ca și produsul dintre curent și rezistența fiecărui rezistor, putem rescrie ecuația de mai sus astfel:

$$-2I_2 + 7 - I_3 = 0$$

### Formarea și rezolvarea sistemului de ecuații

În acest moment avem un sistem matematic format din trei ecuații (o ecuație LKC și două ecuații LKT) și trei necunoscute:

$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$-28 + 2I_2 + 4I_1 = 0$$

$$-2I_2 + 7 - I_3 = 0$$

Putem rescrie ecuațiile de mai sus trecând în dreapta valorile cunoscute (constantele ecuațiilor) și lăsând în partea stângă valorile necunoscute ( $I_1$ ,  $I_2$  și  $I_3$ ), trecând explicit toți coeficienții pentru claritate. Putem observa că toate cele trei variabile sunt prezente în toate cele trei ecuații:

$$-1I_1 + 1I_2 - 1I_3 = 0$$

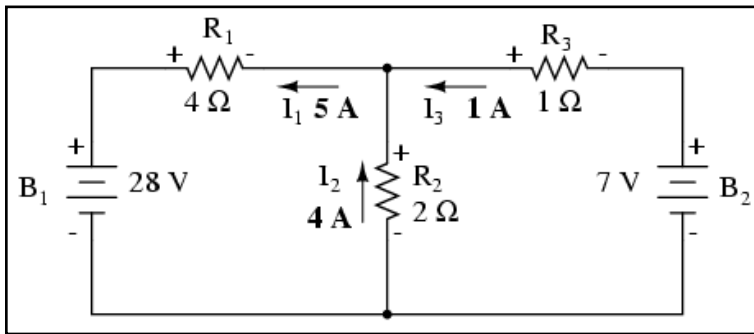
$$4I_1 + 2I_2 - 0I_3 = 28$$

$$0I_1 - 2I_2 - 1I_3 = -7$$

Rezolvând ecuațiile de mai sus, ajungem la soluția ecuațiilor, reprezentată prin cele trei valori ale curenților:

$$I_1 = 5 \text{ A}; I_2 = 4 \text{ A}; I_3 = -1 \text{ A};$$

### Revenirea la circuitul inițial



Prin urmare, valoarea curentului  $I_1$  este de 5 A,  $I_2$  de 4 A iar  $I_3$  de -1 A. Dar ce înseamnă curent „negativ”? În acest caz, înseamnă că intuiția noastră cu privire la direcția curentului  $I_3$  a fost greșită. Revenind la circuitul inițial, putem reface schema acestuia schimbând direcția curentului  $I_3$  și schimbând în același timp și

polaritatea căderii de tensiune de pe rezistorul  $R_3$ .

Observăm faptul că, prin bateria  $B_2$  curentul circulă în sens invers datorită tensiunii mai ridicate a bateriei  $B_1$ . În ciuda faptului că polaritatea bateriei încercă să împingă electronii prin acea ramură de circuit, electronii sunt de fapt forțați să se deplaseze în sens contrar datorită tensiunii superioare a bateriei  $B_1$ . Înseamnă acest lucru că întotdeauna bateria mai puternică va „câștiga” iar curentul prin bateria mai slabă va fi forțat în sens contrar? Nu neapărat. Acest lucru depinde de fapt atât de diferența de tensiune dintre cele două baterii cât și de valoarea rezistorilor din circuit. Singura metodă sigură de aflare a comportamentului circuitului este analiza matematică a acestuia.

### Aflarea căderilor de tensiune pe toate componentele

Cunoscând acum valoarea tuturor curenților din circuit, putem calcula căderile de tensiune la bornele tuturor rezistorilor folosind legea lui Ohm ( $E = IR$ ):

$$E_{R1} = I_1 R_1 = 20 \text{ V}$$

$$E_{R2} = I_2 R_2 = 8 \text{ V}$$

$$E_{R3} = I_3 R_3 = 1 \text{ V}$$

## 03. Metoda buclei de curent

Pașii pentru aplicarea metodei buclei de curent:

- Trasarea buclelor de curent în circuit astfel încât să fie cuprinse toate componentele
- Notarea polarității căderilor de tensiune de pe rezistori în funcție de direcțiile curenților de bucla aleși
- Scrierea ecuațiilor legii lui Kirchhoff pentru tensiune în cazul fiecărei bucle din circuit, înlocuind tensiunea ( $E$ ) cu produsul dintre curent și rezistență ( $IR$ ) pentru fiecare rezistor din ecuație. Acolo unde doi curenți de

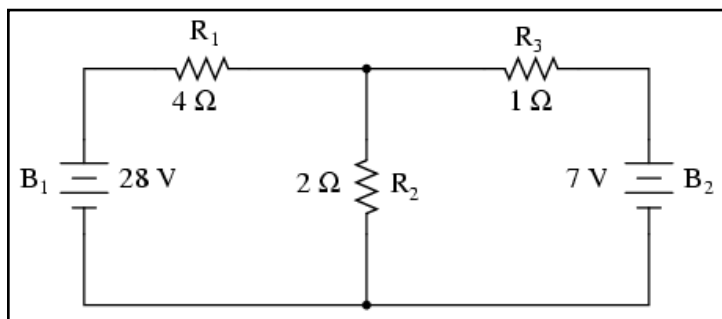
bucă se intersectează unul cu celălalt printr-un component, curentul se exprimă ca și sumă algebrică dintre cei doi curenți (ex.  $I_1 + I_2$ ) dacă au aceeași direcție prin component; în caz contrar, curentul se va exprima ca și diferență ( $I_1 - I_2$ )

- Rezolvare sistemului de ecuații rezultat și aflarea curenților de buclă
- Dacă oricare dintre soluții este negativă, înseamnă că direcția inițială presupusă pentru curent este greșită!
- Adunarea algebrică a curenților de buclă pentru aflarea curenților prin componentele prin care trec mai mulți curenți de buclă
- Aflarea căderilor de tensiune pe toți rezistorii ( $E = IR$ )

## Definiție

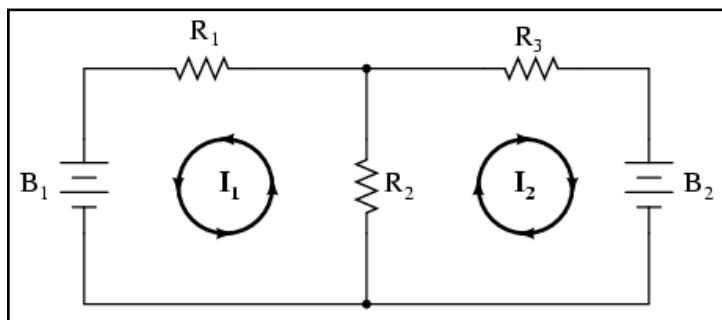
Metoda buclei de curent sau metoda ochiului de curent este asemănătoare metodei ramurii de curent prin faptul că folosește un sistem de ecuații descris de legea lui Kirchhoff pentru tensiune și legea lui Ohm pentru determinarea curenților necunoscuți din circuit. Diferă de metoda ramurii de curent prin faptul că nu utilizează legea lui Kirchhoff pentru curent și de obicei este nevoie de mai puține variabile și ecuații pentru rezolvare, ceea ce reprezintă un avantaj.

## Exemplu



Să vedem cum funcționează această metodă folosind același circuit.

### Trasarea buclor din circuit



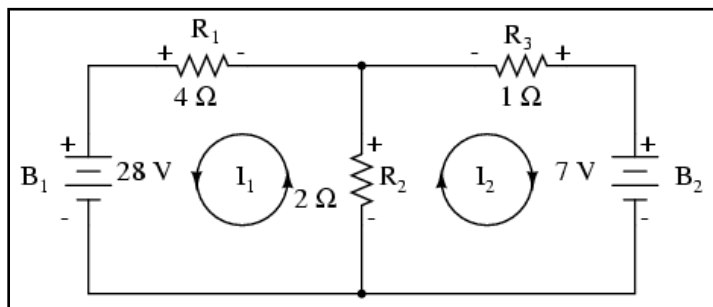
Primul pas în metoda buclei este identificarea „buclelor” din circuit astfel încât să cuprindem toate componentele. În circuitul de mai sus, prima buclă va fi cea formată de  $B_1$ ,  $R_1$ , și  $R_2$ , iar cea de a doua din  $B_2$ ,  $R_2$ , și  $R_3$ . Partea cea mai ciudată a acestei metode este imaginarea circulației curenților prin fiecare dintre aceste bucle.



## Alegerea aleatoare a direcției curenților din circuit

Alegerea direcției fiecărui curent este complet arbitrară precum în cazul metodei ramurii de curent, dar ecuațiile rezultate sunt mai ușor de rezolvat dacă avem aceeași direcție prin componentele aflate la intersecția celor două bucle formate (putem observa faptul că atât curentul  $I_1$  cât și  $I_2$  trec prin rezistorul  $R_2$  de jos în sus în locul în care se intersectează). Dacă direcția curentului presupusă inițial se dovedește a fi greșită, acest lucru se va observa în soluția finală prin faptul că valoarea va fi negativă.

## Notarea polarităților tuturor căderilor de tensiune din circuit



Următorul pas este notarea tuturor polarităților căderilor de tensiune la bornele rezistorilor în funcție de direcția curenților indicată de bucle. Țineți minte că partea din „amonte” a rezistorului va fi tot timpul negativă, iar partea din „aval” tot timpul pozitivă întrucât electronii posedă o sarcină negativă. Polaritățile bateriei depind desigur de orientarea lor

în diagramă și pot să corespundă sau să nu corespundă polarităților rezistorilor.

## Aplicarea legii lui Kirchhoff pentru tensiune

Utilizând legea lui Kirchhoff pentru tensiune, putem parcurge fiecare dintre cele două bucle, generând ecuații în funcție de căderile de tensiune ale componentelor și de polarități. La fel ca în cazul metodei ramurii de curent, vom desemna căderea de tensiune a unui rezistor ca produsul dintre rezistența acestuia (în ohmi) și curentul buclei respective ( $I_1$  sau  $I_2$  în acest caz), a cărei valoare nu este cunoscută în acest moment.

Când cei doi curenți se intersectează (cazul rezistenței  $R_2$ ), vom scrie acel termen al ecuației ca produsul dintre căderea de tensiune pe acel component și suma celor doi curenți ai buclelor ( $E_{R2} \cdot (I_1 + I_2)$ ).

### Parcursarea buclei din stânga

Începem cu bucla din stânga și parcurgem întregul ochi de rețea în direcția inversă acelor de ceasornic (direcția este pur arbitrară), obținând următoarea ecuație:

$$-28 + 2(I_1 + I_2) + 4I_1 = 0$$

Observați faptul că prin rezistorul  $R_2$  curentul care trece este de fapt suma curenților celor două bucle ( $I_1$  și  $I_2$ ). Acest lucru se datorează faptului că ambii curenți trec prin  $R_2$  în aceeași direcție. Simplificând ecuația obținem:

$$-28 + 6I_1 + 2I_2 = 0$$

### Parcurerea buclei din dreapta

În acest moment avem o singură ecuație cu două necunoscute. Acest lucru înseamnă **ca** mai avem nevoie de încă o ecuație pentru a determina curenții buclelor. Această ecuație o obținem prin parcurerea buclei din dreapta a circuitului, și obținem:

$$-2(I_1 + I_2) + 7 - I_2 = 0$$

Simplificând ecuația cum am făcut și înainte, obținem:

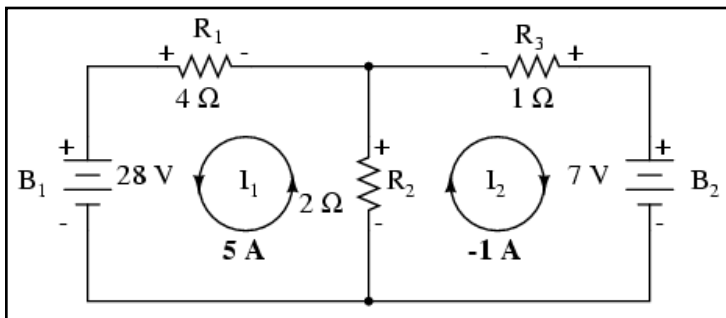
$$-2I_1 - 3I_2 + 7 = 0$$

### Rezolvarea sistemului de ecuații și determinarea curenților de buclă

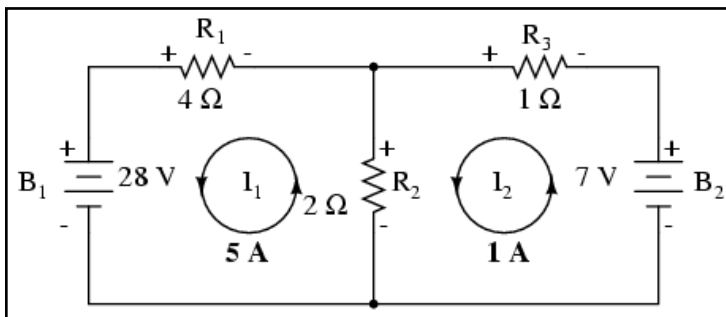
Având două ecuații putem folosi metode matematice pentru determinarea necunoscutelor  $I_1$  și  $I_2$ :

$$I_1 = 5 \text{ A}; \quad I_2 = -1 \text{ A}$$

### Revenirea la circuitul inițial



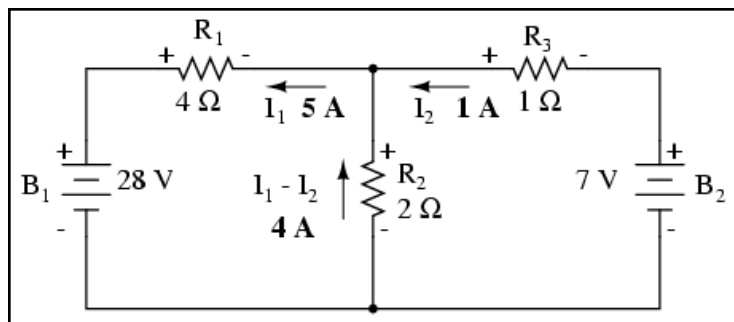
Dar, atenție, aceste valori ale curenților sunt valabile pentru bucle și nu sunt curenții efectivi ai ramurilor. Să ne întoarcem la circuitul inițial pentru a vedea care este relația dintre ei.



Rezultatul de -1 A pentru curentul buclei  $I_2$  înseamnă că direcția indicată inițial (aleator) este incorectă. În realitate, direcția curentului  $I_2$  este contrară direcției inițiale (observați modificarea sensului buclei pe desen!).

## Determinarea valorii curenților și a căderilor de tensiune prin fiecare component

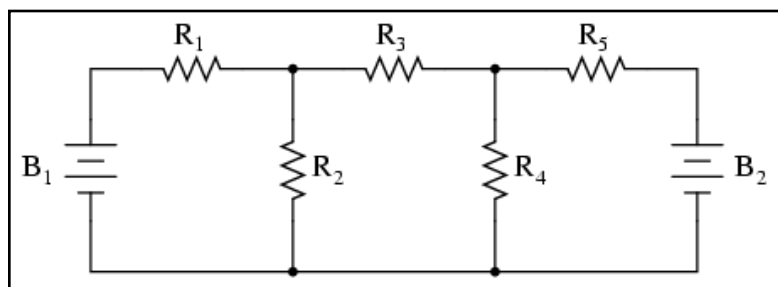
Această modificare a direcției curentului față de ceea ce am presupus inițial va modifica polaritatea căderilor de tensiune pe rezistorii  $R_2$  și  $R_3$  datorită curentului  $I_2$ . De aici putem deduce curentul prin  $R_1$ , 5 A și căderea de tensiune ( $I \cdot R$ ), 20 V. De asemenea, curentul prin  $R_3$  este 1 A, cu o cădere de tensiune de 1 V. Dar ce se întâmplă în cazul rezistorului  $R_2$ ?



Curentul de buclă  $I_1$  trece prin  $R_2$  de jos în sus, iar curentul  $I_2$  de sus în jos. Pentru a determina curentul real prin  $R_2$ , trebuie să observăm foarte atent interacțiunea dintre curenții celor două bucle,  $I_1$  și  $I_2$  (în acest caz sunt în opoziție); valoarea finală va fi suma algebrică a celor doi.

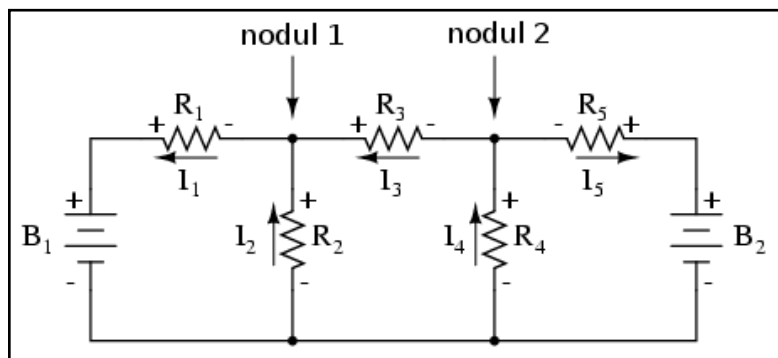
Din moment ce  $I_1$  are 5 A într-o direcție și  $I_2$  1 A în direcția opusă, curentul *real* prin  $R_2$  este diferența celor doi, adică 4 A și trece prin  $R_2$  de jos în sus. Cu un curent de 4 A prin  $R_2$  rezultă o cădere de tensiune de 8 V.

## Avantajul utilizării metodei buclei de curent



Principalul avantaj al metodei buclei de curent este că în general soluția unei rețele mari poate fi găsită cu relativ puține ecuații și puține necunoscute.

Pentru circuitul analizat de noi a fost nevoie de 3 ecuații folosind metoda ramurii de curent și doar două folosind metoda buclei de curent. Acest avantaj crește semnificativ atunci când rețeaua crește în complexitate.



Pentru rezolvarea acestui circuit folosind metoda ramurii de curent, am avea nevoie de 5 variabile pentru fiecare curent posibil din circuit (de la  $I_1$  la  $I_5$ ) și prin urmare 5 ecuații pentru aflarea soluției, două pentru LKC și trei pentru LKT:

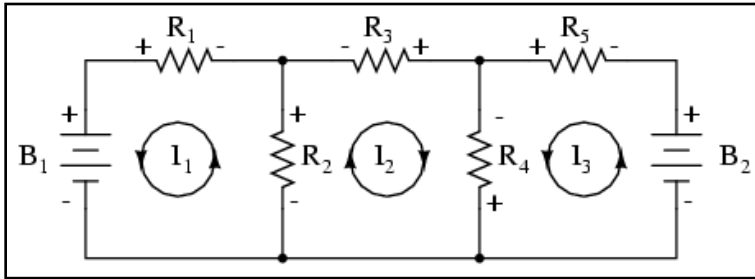
$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$-I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

$$-E_{B1} + I_2 R_2 + I_1 R_1 = 0$$

$$-I_2 R_2 + I_4 R_4 + I_3 R_3 = 0$$

$$-I_4 R_4 + E_{B2} - I_5 R_5 = 0$$



În schimb, folosind metoda buclei de curent avem doar trei necunoscute și prin urmare doar trei ecuații de rezolvat pentru rezolvarea rețelei, ceea ce constituie un avantaj.

$$-E_{B1} + R_2(I_1 + I_2) + I_1 R_1 = 0$$

$$-R_2(I_2 + I_1) - R_4(I_2 + I_3) - I_2 R_3 = 0$$

$$R_4(I_3 + I_2) + E_{B2} + I_3 R_5 = 0$$

## 04. Metoda nodului de tensiune

Pașii pentru aplicarea metodei ramurii de curent:

- Înlocuirea surselor de tensiune conectate în serie cu un rezistor cu o sursă de curent conectată în paralel cu un rezistor. Cele două reprezentări sunt echivalente
- Schimbarea valorilor rezistorilor cu conductanțe
- Selectarea unui nod de referință ( $E_0$ )
- Atribuirea de tensiuni necunoscute ( $E_1$ )( $E_2$ ) ... ( $E_n$ ) nodurilor rămase
- Scrierea legii lui Kirchhoff pentru curent pentru fiecare din nodurile 1, 2, ... N. Coeficientul pozitiv al primei tensiuni din prima ecuație reprezintă suma conductanțelor legate la acel nod. Coeficientul pozitiv al celei de a doua tensiuni, din ecuația a doua, este suma conductanțelor conectate la acel nod. Același lucru este valabil și pentru coeficientul celei de a treia tensiuni din ecuația a treia, precum și pentru toate celelalte ecuații. Toți coeficienții se regăsesc pe diagonala principală
- Toți ceilalți coeficienți ale celorlalte ecuații sunt negativi și reprezintă conductanțele dintre noduri. În prima ecuație, al doilea coeficient reprezintă conductanța dintre nodul 1 și nodul 2; coeficientul al treilea

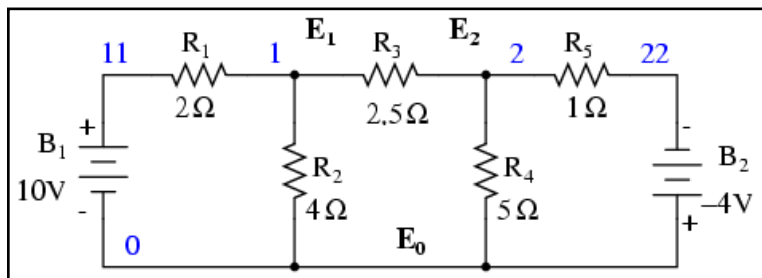
reprezintă conductanța dintre nodul 1 și nodul 3. Același lucru este valabil pentru toți ceilalți coeficienți ai tuturor ecuațiilor

- Termenii din partea dreaptă a ecuației reprezintă sursele de curent conectate la nodurile respective
- Se rezolvă sistemul de ecuații pentru aflarea tensiunilor de nod necunoscute

## Definiție

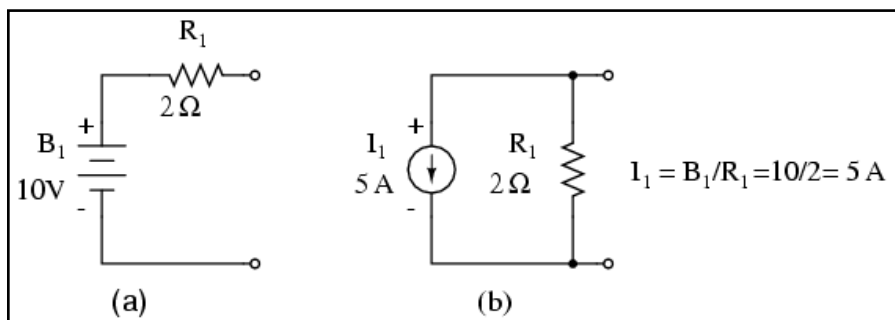
Metoda nodului de tensiune pentru analiza circuitelor determină tensiunea nodurilor în funcție de ecuațiile legii lui Kirchhoff pentru curent (LKC). Această analiză arată puțin ciudat pentru că necesită înlocuirea surselor de tensiune cu surse echivalente de curent. De asemenea, valorile rezistorilor în ohmi sunt înlocuite prin conductanțele echivalente în Siemens,  $G = 1/R$ . Unitatea de măsură pentru conductanță este Siemens-ul,  $S = \Omega^{-1}$ .

## Alegerea punctului de referință



Începem cu un circuit ce conține surse de tensiune convenționale. Un punct comun  $E_0$  este ales ca și punct de referință. Tensiunile pentru celelalte noduri,  $E_1$  și  $E_2$  sunt calculate în funcție de acest punct.

## Înlocuirea surselor de tensiune cu surse de curent



O sursă de tensiune în serie cu o rezistență trebuie să fie înlocuită de o sursă de curent echivalentă în paralel cu o rezistență. Circuitul modificat arată astfel.

## Scrierea ecuațiilor legii lui Kirchhoff pentru curent

Vom scrie apoi ecuațiile LKC pentru fiecare nod. Partea dreaptă a ecuației reprezintă valoarea sursei de curent ce alimentează nodul respectiv:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1} = \frac{10}{2} = 5 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_5} = \frac{4}{1} = 4 \text{ A}$$

## Înlocuirea rezistențelor cu conductanțe

Înlocuim rezistența rezistorilor în ohmi cu conductanța acestora în Siemens:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{2} \Omega = 0,5 \text{ S}$$

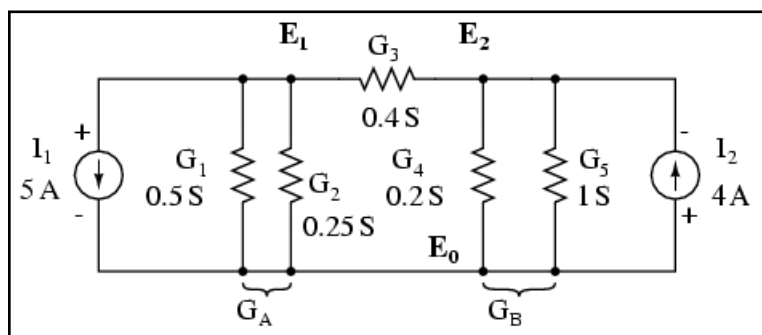
$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{4} \Omega = 0,25 \text{ S}$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{2,5} \Omega = 0,4 \text{ S}$$

$$G_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{5} \Omega = 0,2 \text{ S}$$

$$G_5 = \frac{1}{R_5} = \frac{1}{1} \Omega = 1 \text{ S}$$

## Aflarea conductanțelor echivalente



Conductanțele paralele (rezistorii) pot fi combinați prin adunarea conductanțelor. Deși nu vom redesena circuitul, putem deja aplica metoda nodului de tensiune:

$$G_A = G_1 + G_2 = 0,5 \text{ S} + 0,25 \text{ S} = 0,75 \text{ S}$$

$$G_B = G_4 + G_5 = 0,2 \text{ S} + 1 \text{ S} = 1,2 \text{ S}$$

## Formarea sistemului de ecuații

Pentru dezvoltarea unei metode generale, vom scrie ecuațiile LKC în funcție de tensiunile necunoscute ale nodurilor 1 și 2,  $V_1$  și  $V_2$  de această dată.

$$(1) G_A E_1 + G_3 (E_1 - E_2) = I_1$$

$$(2) G_B E_2 + G_3 (E_1 - E_2) = I_2$$

$$(1) (G_A + G_3)E_1 - G_3E_2 = I_1$$

$$(2) -G_3E_1 + (G_B + G_3)E_2 = I_2$$

Pentru figura de mai sus, ecuațiile arată astfel:

$$(0,5 + 0,25 + 0,4)E_1 - 0,4E_2 = 5$$

$$-0,4E_1 + (0,4 + 0,2 + 1)E_2 = -4$$

$$1,15E_1 - 0,4E_2 = 5$$

$$-0,4E_1 + 1,6E_2 = -4$$

$$E_1 = 3,80$$

$$E_2 = -1,54$$

Suma conductanțelor conectate la primul nod este coeficientul pozitiv al primei tensiuni din ecuația (1). Suma conductanțelor conectate la cel de al doilea nod este coeficientul pozitiv al celei de a doua tensiuni din ecuația (2). Ceilalți coeficienți sunt negativi, reprezentând conductanțele dintre noduri. Pentru ambele ecuații, partea dreaptă a ecuației este egală cu sursa de curent respectivă conectată la nod.

## Reguli pentru aplicarea metodei nodului de tensiune

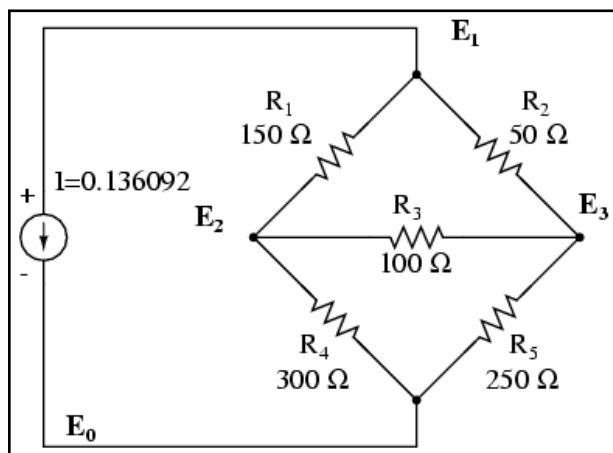
Această metodă ne permite să scriem rapid ecuațiile prin inspecție și duce la următoarele reguli pentru aplicarea metodei nodului de tensiune:

- Înlocuirea surselor de tensiune în serie cu un rezistor cu o sursă echivalentă de curent și un rezistor în paralel
- Schimbarea valorilor rezistorilor în conductanțe
- Selectarea unui nod de referință ( $E_0$ )
- Desemnarea unor tensiuni necunoscute pentru nodurile rămase, ( $E_1$ )( $E_2$ ) ... ( $E_N$ )
- Scrierea unei ecuații LKC pentru fiecare nod, 1, 2, ... N. Coeficientul pozitiv a primei tensiuni din prima ecuație este suma conductanțelor conectate la primul nod. Coeficientul pentru a doua tensiune din a doua ecuație este suma conductanțelor conectate la acel nod. Același lucru este valabil și pentru a treia tensiune în ecuația a treia și pentru celelalte ecuații. Acești coeficienți se găsesc pe o diagonală.

- Toți ceilalți coeficienți ai ecuației sunt negativi, reprezentând conductanțele dintre noduri. În prima ecuație, coeficientul al doile reprezintă conductanța dintre nodul 1 și nodul 2, al treilea coeficient reprezintă conductanță dintre nodul 1 și nodul 3. Același lucru este valabil și pentru celelalte ecuații
- Partea din dreapta a ecuațiilor reprezintă sursa de curent conectată la nodurile respective
- Rezolvarea sistemului de ecuații și aflarea tensiunilor nodurilor necunoscute

### Analiza unei punți dezechilibrate folosind metoda nodului de tensiune

Circuitul de mai jos are trei noduri. Conductanțele nu apar pe desen, dar  $G_1=1/R_1$ , etc.



Există trei noduri pentru care putem scrie ecuații. Coeficienții sunt pozitivi pentru  $E_1$  (ecuația 1),  $E_2$  (ecuația 2) și  $E_3$  (ecuația 3). Acestea sunt sumele tuturor conductanțelor conectate la nodurile respective. Toți ceilalți coeficienți sunt negativi, reprezentând conductanța între noduri. Partea din dreapta a ecuației reprezintă sursa de curent, 0.136092 amperi, singura sursă pentru nodul 1. Celelalte ecuații au zero în partea dreapta datorită lipsei unei surse de tensiune.

$$\begin{aligned}(G_1 + G_2)E_1 - G_1E_2 - G_2E_3 &= 0,13 \\ -G_1E_1 + (G_1 + G_3 + G_4)E_2 - G_3E_3 &= 0 \\ -G_2E_1 - G_3E_2 + (G_2 + G_3 + G_5)E_3 &= 0\end{aligned}$$

Diagonala matricii formate are coeficienți pozitivi. Toți ceilalți coeficienți sunt negativi. Soluția sistemului de ecuații este:

$$E_1 = 24 \text{ V}; E_2 = 17,65 \text{ V}; E_3 = 19,31 \text{ V}$$

### 05. Teorema lui Millman

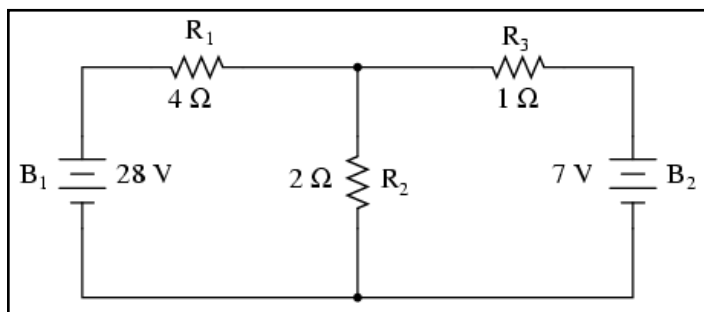
- Teorema lui Millman consideră circuitul o rețea paralelă de ramuri.
- Toate tensiunile introduse și aflate din teorema lui Millman au ca referință unul și același punct din circuit (de obicei latura de jos a circuitului)



## Definiție

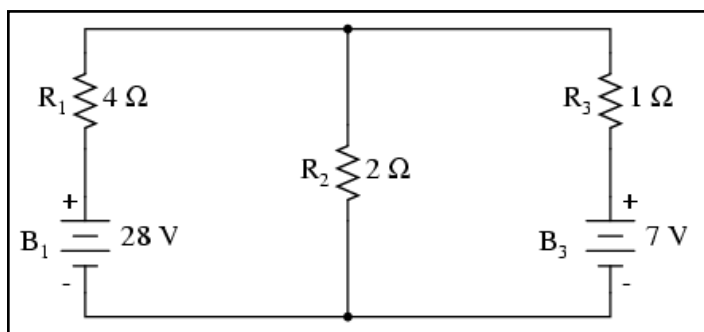
Prin intermediul teoremei lui Millman, circuitul este redesenat ca și o rețea de ramuri paralele, fiecare ramură conținând un rezistor sau o combinație serie baterie/rezistor. Această teoremă se poate aplica doar în cazul circuitelor ce pot suferi această modificare.

## Exemplu



Avem (din nou) circuitul alăturat.

## Redesenarea circuitului



Același circuit redesenat pentru aplicarea teoremei lui Millman (cele două circuite sunt echivalente).

Luând în considerare rezistența și tensiunea furnizată în fiecare ramură, putem folosi teorema lui Millman pentru aflarea căderilor de tensiune în toate ramurile. Chiar dacă nu există bateria  $B_2$ , notația  $B_3$  pentru bateria din dreapta este pentru a scoate în evidență faptul că aceasta aparține ramurii 3 din circuit

## Ecuția teoremei lui Millman

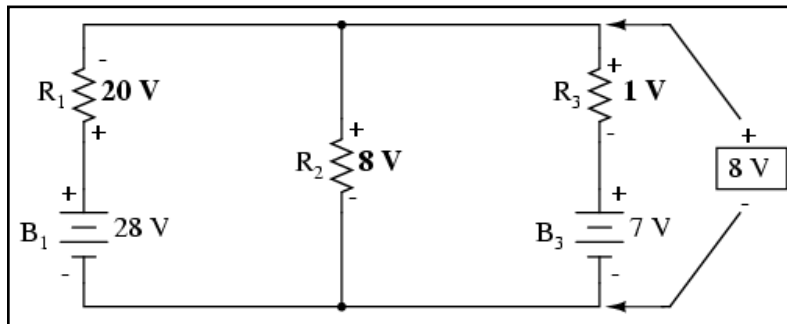
Teorema nu este altceva decât o ecuație lungă aplicabilă oricărui circuit ce poate fi redesenat ca și ramuri paralele, fiecare ramură cu propria sa sursă de tensiune și rezistență în serie:

$$\frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \text{căderea de tensiune pe toate ramurile}$$

### Aflarea căderii de tensiune pe ramuri

Înlocuind valorile din exemplul de mai sus ajungem la următorul rezultat:

$$\frac{\frac{28 \text{ V}}{4 \Omega} + \frac{0 \text{ V}}{2 \Omega} + \frac{7 \text{ V}}{1 \Omega}}{\frac{1}{4 \Omega} + \frac{1}{2 \Omega} + \frac{1}{1 \Omega}} = 8 \text{ V}$$



Valoarea rezultatului, 8 V, reprezintă căderea de tensiune pe toate ramurile.

Polaritățile tuturor tensiunilor au ca și referința același punct. În exemplul de mai sus, firul de jos este folosit ca și punct de referință, prin urmare tensiunile pentru fiecare ramură au fost introduse în ecuație ca fiind pozitive (28 pentru  $R_1$ , 0 pentru  $R_2$  și 7 pentru  $R_3$ ).

### Aflarea căderilor de tensiune pe fiecare rezistor

Pentru aflarea căderilor de tensiune pe fiecare rezistor, tensiunea Millman (8 V în acest caz) trebuie comparată cu tensiunea fiecărei surse din fiecare ramură, folosind principiul aditivității tensiunilor în serie:

$$E_{R1} = 8 \text{ V} - 28 \text{ V} = -20 \text{ V (negativ sus)}$$

$$E_{R2} = 8 \text{ V} - 0 \text{ V} = 8 \text{ V (pozitiv sus)}$$

$$E_{R3} = 8 \text{ V} - 7 \text{ V} = 1 \text{ V (pozitiv sus)}$$

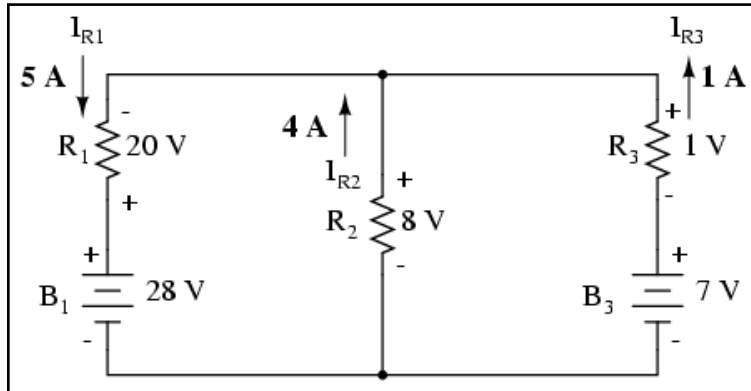
### Determinarea curenților pe fiecare ramură

Pentru aflarea curenților prin fiecare ramură, aplicăm legea lui Ohm ( $I = E/R$ ):

$$I_{R1} = \frac{20 \text{ V}}{4 \Omega} = 5 \text{ A}$$

$$I_{R2} = \frac{8 \text{ V}}{2 \Omega} = 4 \text{ A}$$

$$I_{R3} = \frac{1 \text{ V}}{1 \Omega} = 1 \text{ A}$$



Direcția curentului prin fiecare rezistor este determinată de polaritatea fiecărui rezistor și nu de polaritatea bateriei, curentul putând fi forțat să se deplaseze invers printr-o baterie, precum în cazul bateriei B<sub>3</sub>.

Acest lucru este bine de ținut minte fiindcă teorema lui Millman nu ne oferă niciun indiciu cu privire la posibilitatea unei direcții greșite a curenților precum este cazul metodelor ramurii de curent și a buclei de curent. Trebuie să fim atenți la polaritatea căderii de tensiune la bornele rezistorilor, determinând de acolo direcția de curgere a curentului.

## 06. Teorema superpoziției

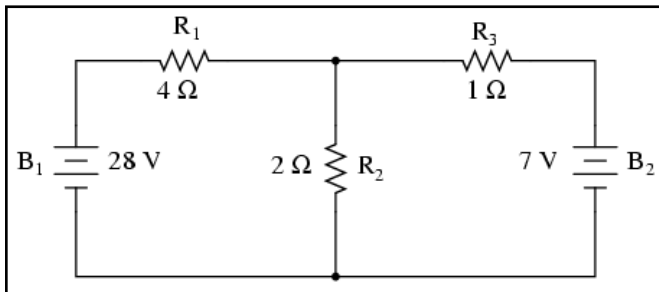
- Conform teoremei superpoziției, un circuit poate fi analizat considerând funcționarea unei singure surse de putere odată; valorile tensiunilor și curenților pentru fiecare caz în parte se adună pentru aflarea soluției finale, atunci când în circuit funcționează toate sursele de putere
- Pentru a scoate toate sursele de putere din circuit exceptând una singură, toate sursele de tensiune se înlocuiesc cu un scurt-circuit, și toate sursele de curent cu un circuit deschis.

### Definiție

Teorema superpoziției reprezintă acea viziune de geniu ce transformă un subiect complex într-o versiune simplă și ușor de înțeles.

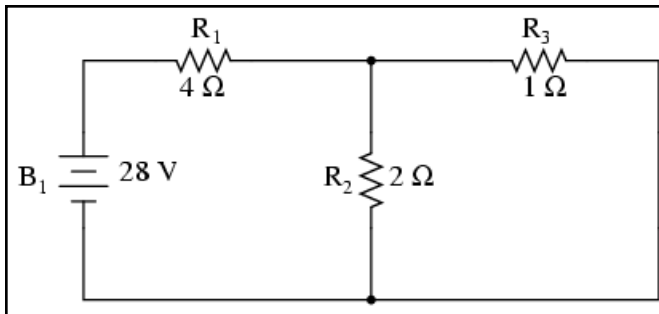
Strategia constă în eliminarea rând pe rând a tuturor surselor de putere din circuit exceptând una singură, utilizând analiza serie/paralel pentru determinarea căderilor de tensiune și a curenților din rețeaua modificată pentru fiecare sursă de putere separat. Apoi, după ce toate căderile de tensiune și curenții au fost determinați pentru fiecare sursă de tensiune funcționând separat/independent în rețea, valorile sunt suprapuse una peste cealaltă (adunare algebrică) pentru determinarea efectivă a curenților și tensiunilor atunci când în circuit funcționează toate sursele de putere împreună.

## Exemplu

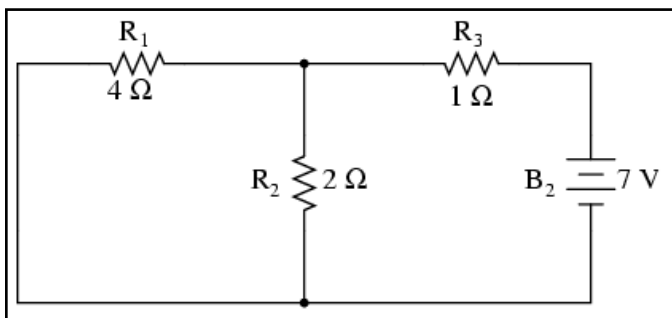


Să luăm același circuit ca și exemplu.

## Împărțirea circuitului în funcție de sursele de putere



Din moment ce avem două surse de putere în acest circuit, va trebui să calculăm două seturi de date pentru căderile de tensiune și curent, un set pentru circuitul funcționând doar cu sursa de tensiune de 28 de V...



...celălalt pentru circuitul funcționând doar cu bateria de 7 V.

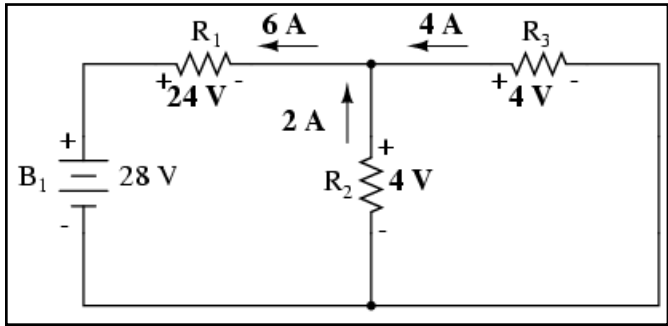
Atunci când redesenăm un circuit pentru analiza serie/paralel cu o singură sursă, toate celelalte surse de tensiune sunt înlocuite de fire (scurt-circuit), și toate sursele de curent sunt înlocuite de circuite deschise. Din

moment ce avem doar surse de tensiune (baterii) în circuitul de mai sus, toate sursele de putere inactive vor fi înlocuite de fire.

### Primul (sub)circuit

| Mărire | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>2</sub> // R <sub>3</sub> | R <sub>1</sub> + R <sub>2</sub> // R <sub>3</sub> (total) | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------|
| E      | 24             | 4              | 4              | 4                                | 28                                                        | V       |
| I      | 6              | 2              | 4              | 6                                | 6                                                         | A       |
| R      | 4              | 2              | 1              | 0.667                            | 4.667                                                     | Ω       |

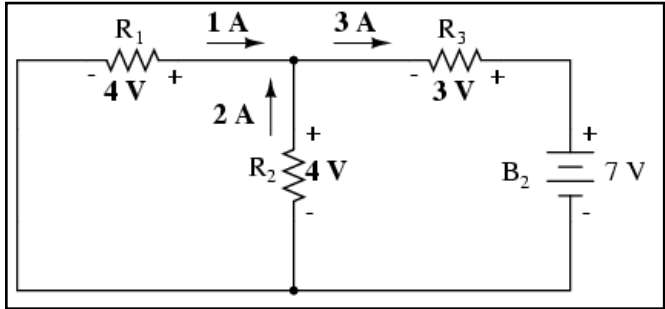
Analizând circuitul în care acționează doar bateria de 28 V, obținem următoarele valori pentru tensiune și curent.



### Al doilea (sub)circuit

| Mărire | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>1</sub> // R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> + R <sub>1</sub> // R <sub>2</sub> (total) | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------|
| E      | 4              | 4              | 3              | 4                                | 7                                                         | V       |
| I      | 1              | 2              | 3              | 3                                | 3                                                         | A       |
| R      | 4              | 2              | 1              | 1,333                            | 2,333                                                     | Ω       |

Analizând circuitul în care acționează doar bateria de 7 V, obținem următoarele valori pentru tensiune și curent.

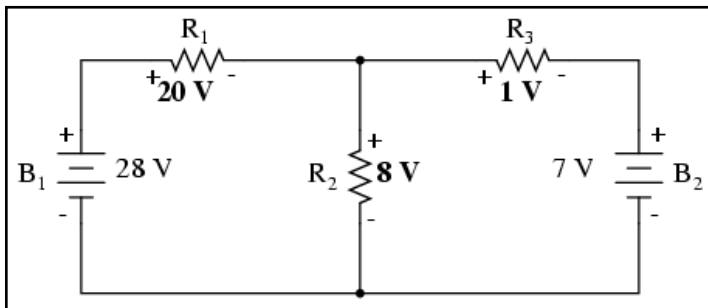


### Suprapunerea (sub)circuitelor

Atunci când realizăm suprapunerea, trebuie să fim foarte atenți la polaritatea căderilor și la direcția or, pentru că aceste valori se adună algebric.

### Aflarea căderilor de tensiune din circuit

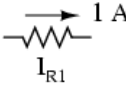
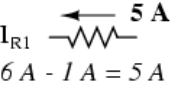
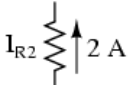
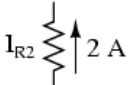
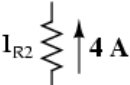
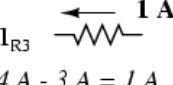
| Cu bateria de<br>28 V                                                                         | Cu bateria de<br>7 V                                                                         | Cu ambele baterii                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\begin{array}{c} 24 \text{ V} \\ + \text{---} \text{---} \text{---} - \\ E_{R1} \end{array}$ | $\begin{array}{c} 4 \text{ V} \\ - \text{---} \text{---} \text{---} + \\ E_{R1} \end{array}$ | $\begin{array}{c} 20 \text{ V} \\ + \text{---} \text{---} \text{---} - \\ E_{R1} \end{array}$<br>$24 \text{ V} - 4 \text{ V} = 20 \text{ V}$ |
| $\begin{array}{c} + \\   \\ E_{R2} \text{ --- } 4 \text{ V} \\   \\ - \end{array}$            | $\begin{array}{c} + \\   \\ E_{R2} \text{ --- } 4 \text{ V} \\   \\ - \end{array}$           | $\begin{array}{c} + \\   \\ E_{R2} \text{ --- } 8 \text{ V} \\   \\ - \end{array}$<br>$4 \text{ V} + 4 \text{ V} = 8 \text{ V}$              |
| $\begin{array}{c} 4 \text{ V} \\ + \text{---} \text{---} \text{---} - \\ E_{R3} \end{array}$  | $\begin{array}{c} 3 \text{ V} \\ - \text{---} \text{---} \text{---} + \\ E_{R3} \end{array}$ | $\begin{array}{c} 1 \text{ V} \\ + \text{---} \text{---} \text{---} - \\ E_{R3} \end{array}$<br>$4 \text{ V} - 3 \text{ V} = 1 \text{ V}$    |

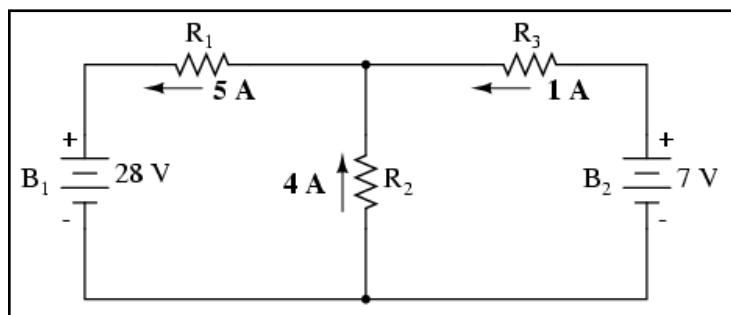


Aplicând aceste valori, rezultatul final arată astfel.

### Aflarea valorilor curenților din circuit

Același lucru este valabil și în cazul curenților.

| Cu bateria de 28 V                                                                            | Cu bateria de 7 V                                                                             | Cu ambele baterii                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>$I_{R1}$ | <br>$I_{R1}$ | <br>$I_{R1}$<br>$6 A - 1 A = 5 A$ |
| <br>$I_{R2}$ | <br>$I_{R2}$ | <br>$I_{R2}$<br>$2 A + 2 A = 4 A$ |
| <br>$I_{R3}$ | <br>$I_{R3}$ | <br>$I_{R3}$<br>$4 A - 3 A = 1 A$ |



Folosind valorile aflate după aplicarea superpoziției, circuitul arată astfel.

## Concluzii și restricții de aplicabilitate

Simplu și elegant în același timp. Totuși, teorema superpoziției poate fi aplicată doar circuitelor ce pot fi reduse la combinații de circuite serie/paralel pentru fiecare sursă de putere în parte (nu poate fi folosită, de exemplu, pentru analiza unei punți dezechilibrate), și doar atunci când ecuațiile folosite sunt liniare. Acest lucru înseamnă ca teorema nu poate fi folosită decât pentru determinare tensiunii și a curentului nu și a puterii! Puterile disipate în circuit, fiind funcții neliniare, nu pot fi adunate algebric atunci când se consideră doar o sursă de putere. aceeași nevoie de liniaritate înseamnă ca teorema este inutilă în circuitele în care rezistența componentelor se modifică odată cu tensiunea sau temperatura, ca de exemplu becuri incandescente sau varistoare.

O altă condiție este ca toate componentele să fie „bilaterale”, însemnând faptul că trebuie să se comporte exact la fel indiferent care este direcția de deplasare a electronilor prin ele. Rezistențele îndeplinesc această cerință, precum și toate circuitele studiate până acum.

Teorema superpoziției se folosește și în studiul circuitelor de curent alternativ și circuitele cu amplificatoare semiconductoare, acolo unde de multe ori curentul alternativ este mixat (suprapus) peste curentul continuu. În astfel de cazuri putem analiza circuitul când doar sursa de curent continuu este prezentă în circuit și atunci când doar cea de curent alternativ este prezentă; rezultatul final este superpoziția celor două cazuri. Până una

alta, folosind teorema superpoziției, nu mai suntem nevoiți să folosim sistemele de ecuații pentru analiza circuitelor.

## 07. Teorema lui Thevenin

- Teorema lui Thevenin este o modalitate de reducere a unei rețele la un circuit echivalent compus dintr-o singură sursă de tensiune, o rezistență serie și rezistența de sarcină

Pașii pentru aplicarea teoremei lui Thevenin:

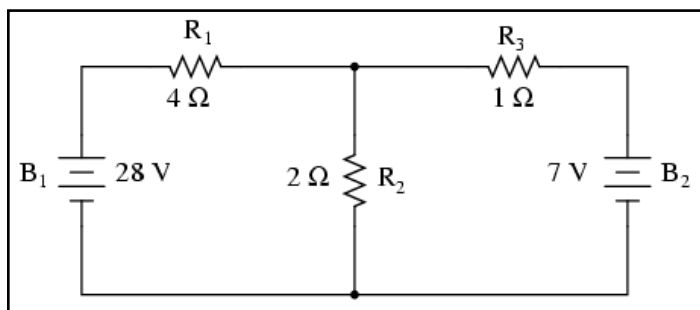
- Găsirea sursei de tensiune Thevenin prin îndepărtarea sarcinii din circuitul original și calcularea căderii de tensiune dintre punctele în care se afla sarcina inițial
- Găsirea rezistenței Thevenin prin îndepărtarea tuturor surselor de putere din circuitul original și calcularea rezistenței totale dintre cele două puncte
- Desenarea circuitului Thevenin echivalent, cu sursa de tensiune și rezistența Thevenin în serie. Rezistorul de sarcină se reintroduce între cele două puncte (deschise) din circuit
- Aflarea căderii de tensiune și a curentului prin rezistorul de sarcină folosind regulile circuitelor serie

### Definiție

Teorema lui Thevenin susține că orice circuit liniar poate fi simplificat, indiferent de complexitatea sa, la un circuit echivalent cu doar o singură sursă de tensiune și o rezistență legată în serie. Semnificația termenului „liniar” este aceeași ca și în cazul teoremei superpoziției, unde toate ecuațiile folosite trebuie să fie liniare. Dacă avem de a face cu componente pasive (rezistori, bobine și condensatori) această condiție este îndeplinită. Dar, există unele componente, precum cele semiconductoare, ce sunt neliniare. Aceste circuite le vom numi prin urmare circuite neliniare.

Teorema lui Thevenin este folosită în special pentru analiza sistemelor de putere și ale circuitelor în care rezistorul de sarcină (sau simplu, sarcina) este supusă modificărilor; recalcularea circuitului fiind necesară cu fiecare valoare a rezistenței de sarcină pentru determinarea tensiunii și curentului prin aceasta.

### Exemplu

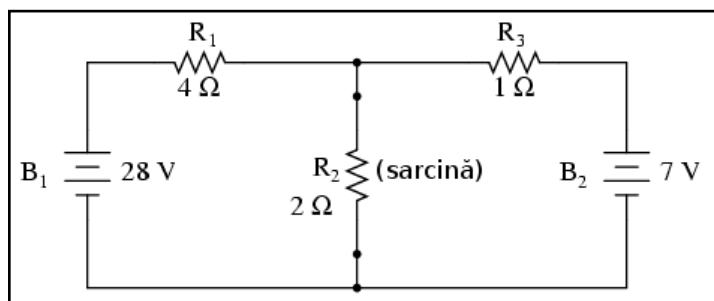


Să reluăm circuitul studiat până acum cu celelalte metode.



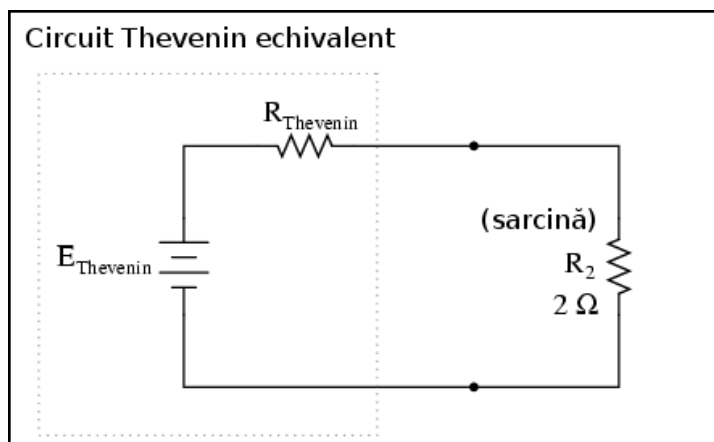
Să presupunem că rezistorul  $R_2$  este sarcina din acest circuit. Avem deja la dispoziție patru metode pentru determinarea tensiunii și curentului prin  $R_2$ , dar niciuna dintre aceste metode nu este eficientă din punct de vedere al timpului de lucru. Imaginați-vă că ați folosi aceste metode de fiecare dată când valoarea sarcinii variază (variația rezistenței sarcinii este un lucru foarte des întâlnit în sistemele de putere). Această situație ar presupune multă muncă!

## Circuitul Thevenin echivalent



întreaga rețea ca și cum nu ar fi decât un simplu circuit serie.

Teorema lui Thevenin înlătură temporar sarcina din circuitul inițial transformând ceea ce rămâne într-un circuit echivalent compus dintr-o singură sursă de tensiune și rezistențe în serie. Rezistența de sarcină poate fi apoi reconectată în acest „circuit Thevenin echivalent” și se pot continua calculele pentru

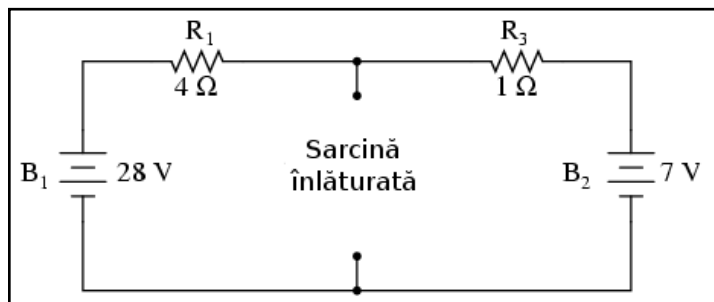


După conversia circuitului vom avea circuitul alăturat.

„Circuitul Thevenin echivalent” este echivalentul electric al surselor și rezistorilor  $B_1$ ,  $R_1$ ,  $R_3$  și  $B_2$  văzute din cele două puncte de contact al rezistorului de sarcină  $R_2$ . Acest circuit echivalent, dacă este dedus corect, se va comporta exact ca și circuitul original. Cu alte cuvinte, curentul și tensiunea sarcinii ( $R_2$ ) ar trebui să fie exact

aceeași în ambele circuite. Rezistența  $R_2$  nu poate face diferența dintre rețeaua originală și circuitul echivalent, atâta timp cât  $E_{\text{Thevenin}}$  și  $R_{\text{Thevenin}}$  au fost calculate corect.

## Înlăturarea temporară a sarcinii din circuit



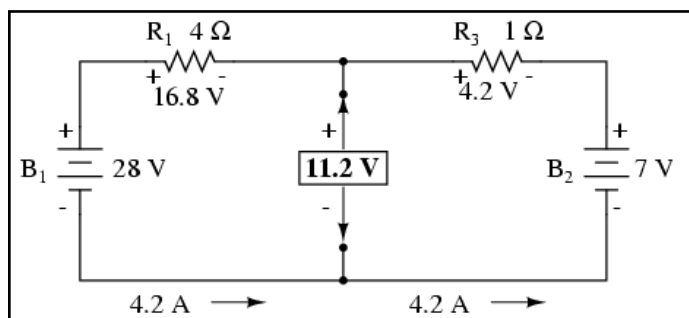
Avantajul transformării constă în ușurința calculului pentru circuitul simplificat, mult mai ușor decât în cazul circuitului original. Primul pas este înlăturarea rezistenței de sarcină din circuitul original și înlocuirea acesteia cu un circuit deschis.

## Determinarea căderii de tensiune Thevenin

| Mărimă | $R_1$ | $R_3$ | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 16.8  | 4.2   | 21    | V        |
| I      | 4.2   | 4.2   | 4.2   | A        |
| R      | 4     | 1     | 5     | $\Omega$ |

Apoi determinăm căderea de tensiune între punctele „fostei” sarcini, folosind orice metode disponibile. În acest caz, circuitul original, mai puțin sarcina, nu este altceva decât un circuit serie simplu cu două baterii; putem aplica prin urmare regulile circuitelor serie, legea lui Ohm și legea lui Kirchhoff pentru

tensiune.

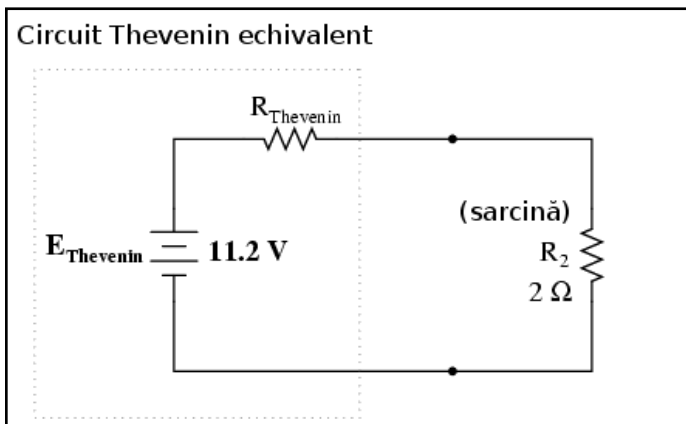


Căderea de tensiune între cele două puncte ale sarcinii poate fi dedusă din tensiunea uneia dintre baterii și căderea de tensiune pe unul dintre rezistori, astfel:

$$E_{\text{Thevenin}} = E_{B1} - U_{R1} = 28 \text{ V} - 16,8 \text{ V} = 11,2 \text{ V}$$

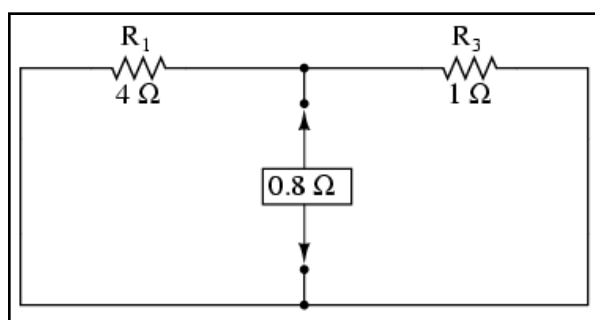
sau

$$E_{\text{Thevenin}} = E_{B2} - U_{R3} = 7 \text{ V} - 4,2 \text{ V} = 11,2 \text{ V}$$



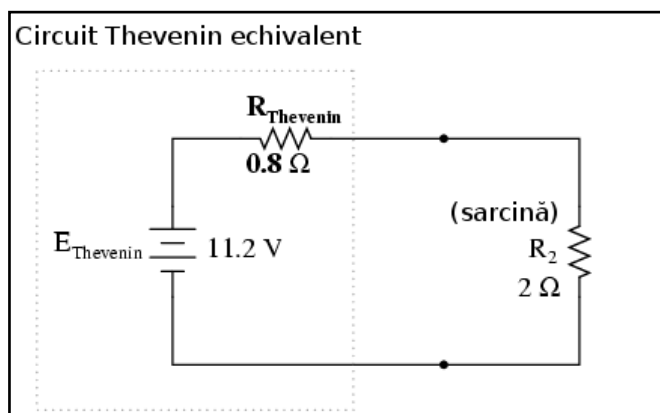
Această tensiune de 11,2 V este tensiunea Thevenin,  $E_{\text{Thevenin}}$  din circuitul echivalent.

### Determinarea rezistenței (echivalente) Thevenin



După înlăturarea celor două baterii, rezistența totală măsurată în această locație este egală cu rezistențele  $R_1$  și  $R_3$  în paralel: 0,8  $\Omega$ . Aceasta reprezintă rezistența Thevenin ( $R_{\text{Thevenin}}$ ) pentru circuitul echivalent.

Pentru aflarea rezistenței serie din circuitul echivalent, trebuie să luăm circuitul original, mai puțin sarcina, să înlăturăm sursele de putere (la fel ca în cazul teoremei superpoziției) și să determinăm rezistența de la un terminal la celălalt.



### Determinarea căderii de tensiune și a curentului prin sarcină

| Mărime | $R_{\text{Thevenin}}$ | $R_{\text{sarcină}}$ | Total | Unitate  |
|--------|-----------------------|----------------------|-------|----------|
| E      | 3,2                   | 8                    | 11,2  | V        |
| I      | 4                     | 4                    | 4     | A        |
| R      | 0,8                   | 2                    | 2,8   | $\Omega$ |

Cunoscând valoarea rezistorului (2) dintre cele două puncte de conexiune, putem determina căderea de tensiune și curentul prin acesta, ca și cum întregul circuit nu ar fi altceva decât un simplu circuit serie.

Putem observa că valorile pentru curent și tensiune (4 A, 8 V) sunt identice cu valorile găsite aplicând celelalte metode de analiză. De asemenea, valorile tensiunilor și curenților pentru rezistența serie și sursa Thevenin

echivalente nu se aplică componentelor din circuitul original. Teorema lui Thevenin este folosită doar pentru determinarea comportamentului unui singur rezistor din rețea: sarcina.

## 08. Teorema lui Norton

- Teorema lui Norton este o metodă de reducere a rețelei la un circuit echivalent compus dintr-o singură sursă de curent, un rezistor în paralel și o sarcină în paralel.

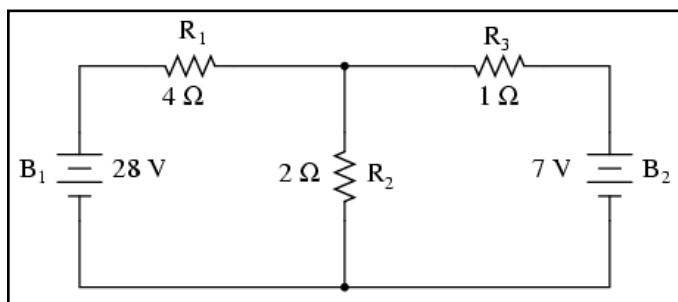
Pașii pentru implementarea teoremei lui Norton:

- Găsirea sursei Norton de curent prin îndepărtarea tuturor rezistorilor din circuitul inițial și calcularea curentului prin scurt-circuitul creat între punctele de contact ale fostei sarcini a circuitului (scurt-circuit)
- Aflarea rezistenței Norton prin îndepărtarea tuturor surselor de putere din circuit și calcularea rezistenței totale dintre punctele de contact ale fostei sarcini a circuitului (circuit deschis)
- Realizarea circuitului Norton echivalent, cu sursa de curent și rezistorul Norton în paralel. Rezistorul de sarcină se reintroduce între cele două puncte deschise ale circuitului echivalent
- Aflarea tensiunii și curentului prin sarcină aplicând regulile circuitelor paralele

### Definiție

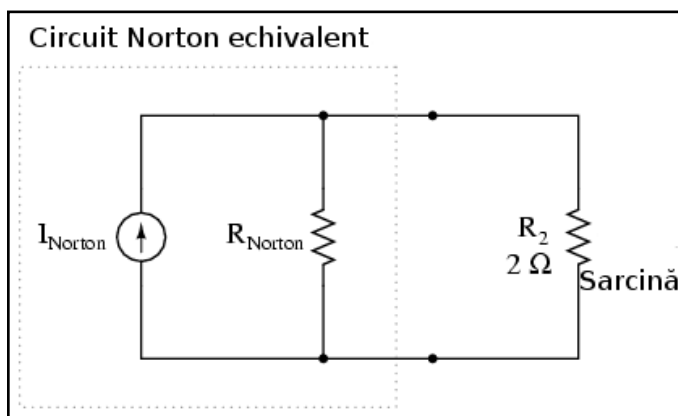
Conform teoremei lui Norton este posibilă simplificarea oricărui circuit liniar, indiferent de complexitate, la un circuit echivalent dotat cu o singură sursă de curent și o rezistență paralelă, ambele conectate la o sarcină. La fel ca în cazul teoremei lui Thevenin, termenul „liniar” are semnificația teoremei superpoziției: ecuațiile implicate trebuie să fie liniare.

### Exemplu



Circuitul inițial este cel folosit și în exemplele precedente.

### Principiul teoremei lui Norton

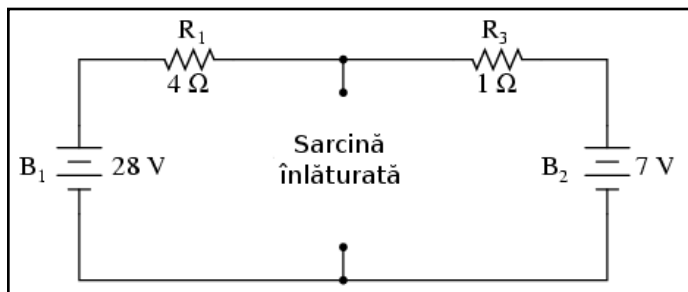


Circuitul echivalent după aplicarea teoremei lui Norton va fi cel alăturat.

Sursa de curent este un component a cărui scop este furnizarea unei valori constante de curent, indiferent de valoarea tensiunii.

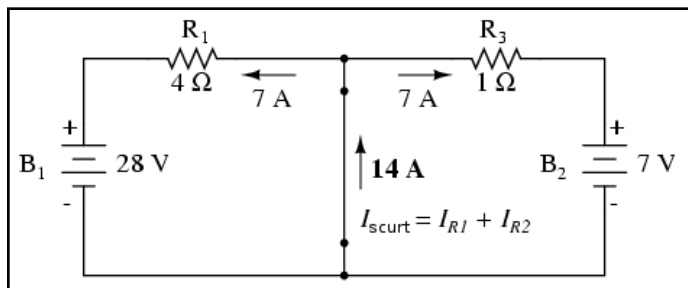
La fel ca în cazul teoremei lui Thevenin, întreg circuitul original, în afară de rezistența de sarcină, a fost redus la un circuit echivalent ce este mult mai ușor de analizat. Pașii folosiți pentru calcularea sursei de curent,  $I_{Norton}$ , și a rezistenței Norton,  $R_{Norton}$ , sunt de asemenea similari teoremei precedente.

### Înlăturarea temporară a sarcinii din circuit

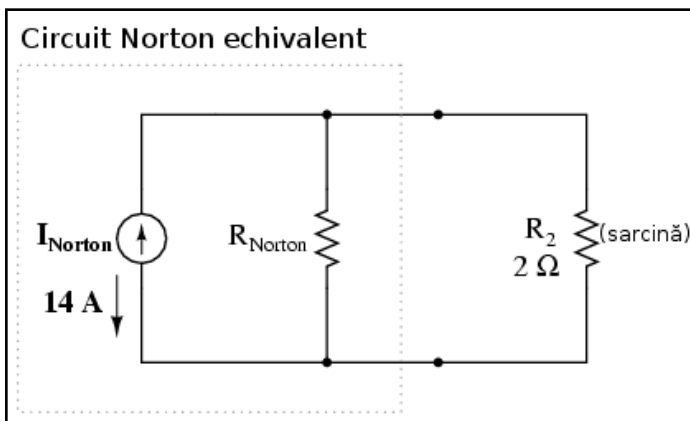


Primul pas este identificarea rezistenței de sarcină și înlăturarea acesteia din circuitul original.

### Calcularea curentului Norton



Pentru aflarea curentului Norton, plasăm un fir (scurt-circuit) între cele două puncte ale sarcinii și determinăm curentul rezultat. Observați că acest pas este exact invers în teorema lui Thevenin, unde am înlocuit sarcina cu un circuit deschis.

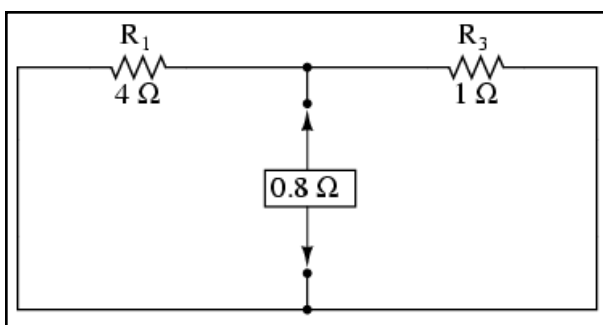


Acum că avem o cădere de 0 V între punctele de conexiune a sarcinii (înlăturate), înseamnă că valoarea curentului prin  $R_1$ , în partea stângă a circuitului, depinde doar de tensiunea bateriei  $B_1$  și de valoarea rezistorului  $R_1$ : 7 A ( $I = E / R$ ).

Același lucru este valabil și în partea dreapta a circuitului, unde curentul este tot 7 A. Prin urmare, curentul total prin scurt-circuitul sarcinii este de 14 A și reprezintă curentul sursei Norton ( $I_{\text{Norton}}$ ).

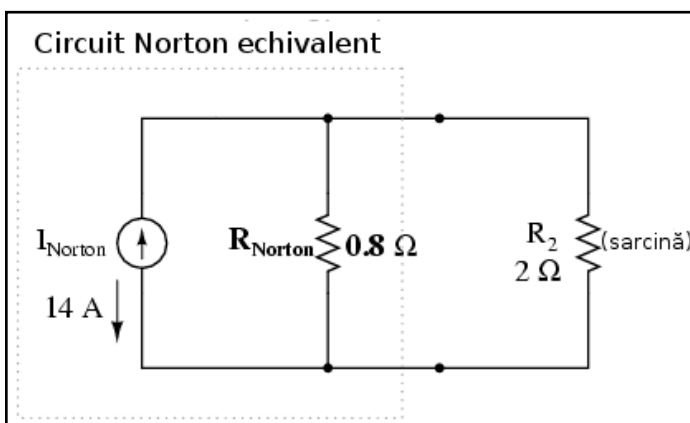
Din nou, direcția săgeții unei surse de curent este contrară deplasării reale a electronilor printr-un circuit, notație ce o folosim în această carte.

### Calcularea rezistenței Norton



Pentru calcularea rezistenței Norton, procedăm precum în cazul teoremei lui Thevenin: luăm circuitul original, fără rezistența de sarcină, îndepărtăm sursele de putere conform principiului aplicat în cadrul teoremei superpoziției (sursele de tensiune le înlocuim cu scurt-circuit iar sursele de tensiune cu circuit deschis) și aflăm apoi rezistența totală dintr-un punct al sarcinii la celălalt (cei doi rezistori legați în paralel).

### Circuitul Norton echivalent



Reconectând rezistența de sarcină inițială ( $2\Omega$ ), vom analiza circuitul Norton precum o conexiune paralelă simplă. În acest moment circuitul Norton echivalent arată astfel.

| Mărime | $R_{\text{Norton}}$ | $R_{\text{sarcină}}$ | Total | Unitate |
|--------|---------------------|----------------------|-------|---------|
| E      | 8                   | 8                    | 8     | V       |
| I      | 10                  | 4                    | 14    | A       |

|   |     |   |     |          |
|---|-----|---|-----|----------|
| R | 0,8 | 2 | 0,5 | $\Omega$ |
|---|-----|---|-----|----------|

## Observații

La fel cum am văzut și în cazul teoremei lui Thevenin, singurele informații utile din această analiză sunt valoarea tensiunii și a curentului prin rezistența de sarcină  $R_2$ ; celelalte informații cu privire la circuit sunt irelevante. Avantajul constă în simplitatea analizei circuitului atunci când avem mai multe valori ale rezistenței de sarcină pentru care vrem să aflăm tensiunea și curentul.

## 09. Echivalența teoremelor Thevenin-Norton

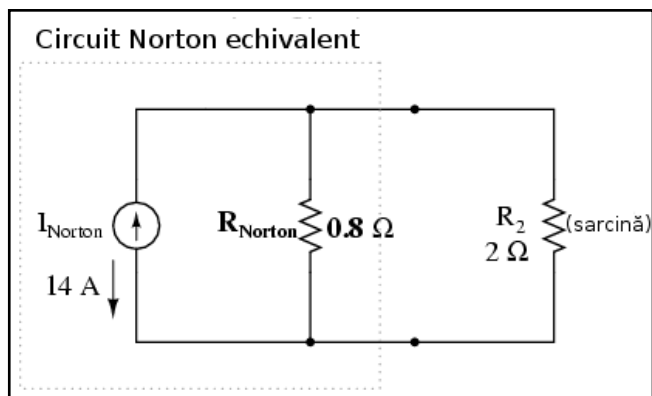
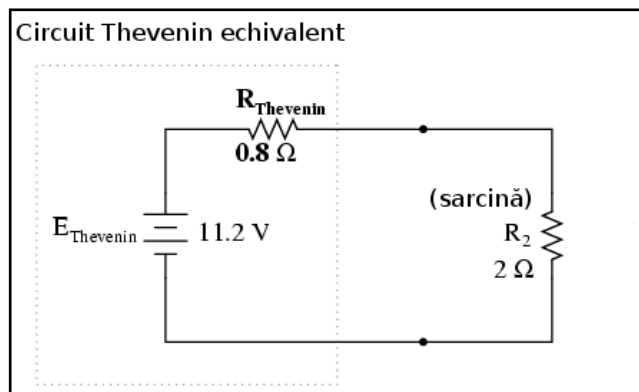
- Rezistențele Thevenin și Norton sunt egale
- Tensiunea Norton este egală produsul dintre curentul și rezistența Norton
- Curentul Norton este egal cu raportul dintre tensiunea și rezistența Thevenin

## Scop

Din moment ce ambele teoreme, atât Thevenin cât și Norton, reprezintă metode valide de reducere a rețelelor complexe spre circuite mult mai simple și ușor de analizat, trebuie să existe un procedeu de transformare a unui circuit Thevenin echivalent într-unul Norton echivalent.

## Rezistențele echivalente Thevenin și Norton sunt egale

Metoda de calculare a rezistenței este aceeași în ambele cazuri: îndepărtarea tuturor surselor de putere și determinarea rezistenței între punctele de conexiune rămase libere.



Cele două rezistențe sunt prin urmare egale:

$$R_{Thevenin} = R_{Norton}$$

## Relația dintre tensiunea Thevenin și curentul Norton

Luând în considerare faptul că ambele circuite echivalente sunt gândite să se comporte asemenea rețelei originale în ceea ce privește alimentarea sarcinii cu tensiune și curent electric, circuitele Thevenin și Norton ar trebui și ele să se comporte identic.

Acest lucru se traduce prin faptul că ambele circuite ar trebui să producă aceeași cădere de tensiune între punctele de contact ale sarcinii, atunci când aceasta nu este prezentă în circuit. Pentru circuitul Thevenin, căderea de tensiune pentru circuitul deschis trebuie să fie egală cu sursa de tensiune Thevenin, 11,2 V în acest caz. În cazul circuitului Norton, toți cei 14 A generați de sursa de curent trebuie să treacă prin rezistența de ~~0,8~~ producând prin urmare o cădere de tensiune de 11,2 V ( $E = IR$ ). Putem susține astfel că tensiunea Thevenin este egală cu produsul dintre curentul Norton și rezistența Norton:

$$E_{Thevenin} = I_{Norton} R_{Norton}$$

Transformarea unui circuit Norton într-un circuit Thevenin se realizează folosind aceeași valoare a rezistenței și calculând tensiunea Thevenin cu ajutorul legii lui Ohm.

În aceeași ordine de idei, atât circuitul Thevenin cât și circuitul Norton ar trebui să genereze aceeași cantitate de curent printr-un scurt-circuit între terminalii sarcinii, atunci când aceasta nu este prezentă în circuit. În circuitul Norton, curentul de scurt-circuit este exact curentul sursei (de curent), 14 A în acest caz. În circuitul Thevenin, întreaga cădere de tensiune de 11,2 V se regăsește la bornele rezistorului de 0,8  $\Omega$ , ceea ce produce exact același curent prin scurt-circuit, 14 A ( $I = E / R$ ). Putem susține astfel că, curentul Norton este egal cu raportul dintre tensiunea Thevenin și rezistența Thevenin:

$$I_{Norton} = \frac{E_{Thevenin}}{R_{Thevenin}}$$

Vom utiliza relația de echivalență dintre cele două teoreme în următoarea secțiune.

## 10. Teorema lui Millman revizuită

### Ecuția teoremei lui Millman

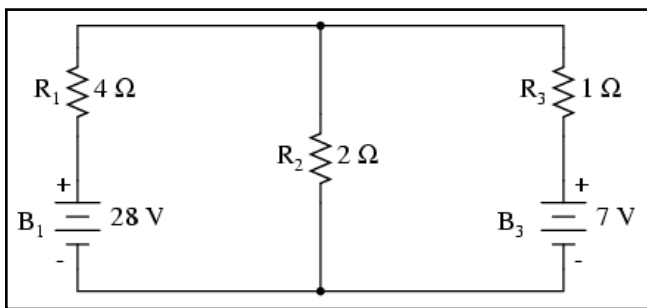


$$\frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = E_{total}$$

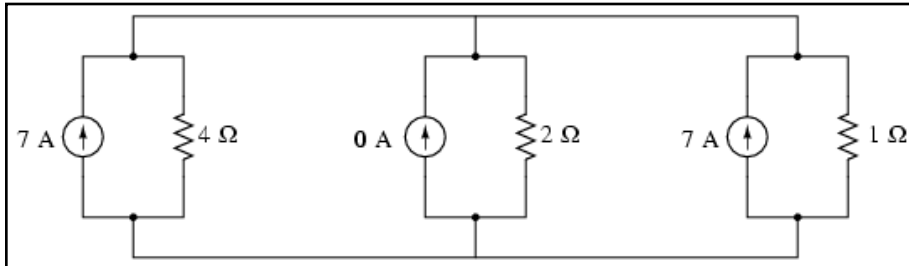
Revenim acum asupra teoremei lui Millman pentru a elucida forma „ciudată” a ecuației și proveniența acesteia.

Numitorul ecuației seamănă cu numitorul ecuației pentru calculul rezistenței paralele, iar termenii E/R ai numărătorului reprezintă valori ale curentului, conform legii lui Ohm ( $I = E / R$ ).

### Utilizarea echivalenței Thevenin-Norton



Pentru înțelegerea acestei ecuații folosim echivalența Thevenin-Norton discutată în secțiunea precedentă. Ecuația Millman consideră că fiecare ramură reprezintă de fapt un circuit Thevenin echivalent; fiecare ramură este apoi transformată într-un circuit Norton echivalent.



În circuitul de mai sus, bateria  $B_1$  și rezistorul  $R_1$  sunt văzute ca și o sursă Thevenin potrivite pentru transformarea într-o sursă Norton de 7 A ( $28 \text{ V} / 4 \Omega$ ) în paralel cu un rezistor de 4  $\Omega$ . Ramura din dreapta se transformă într-o sursă de curent de 7 A ( $7 \text{ V} / 1 \Omega$ ) și un rezistor de 1  $\Omega$  conectat în paralel. Ramura din centru, ne-ținând nicio sursă de tensiune, se transformă într-o sursă de curent Norton de 0 A în paralel cu un rezistor de 2  $\Omega$ .

### Determinarea curentului total prin circuit

Din moment ce valorile surselor de curent sunt aditive algebric, curentul total prin circuit este de 7 A + 0 A + 7 A, adică 14 A. Această adunare a curenților surselor Norton se regăsește la numărătorul ecuației Millman:

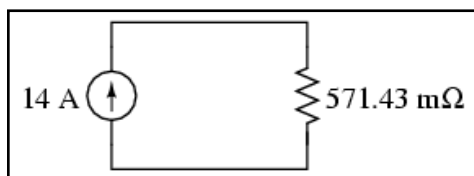
$$I_{total} = \frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3} \rightarrow \frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

## Determinarea rezistenței totale a circuitului

$$R_{total} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \rightarrow \frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Toate rezistențele Norton sunt conectate în paralel. Acest lucru se regăsește la numitorul ecuației lui Millman.

## Redesenarea circuitului echivalent

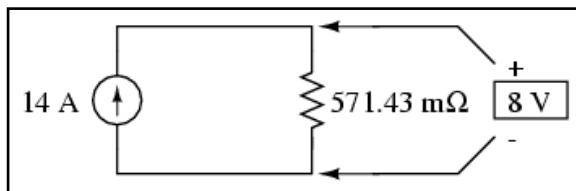


În cazul de față, rezistența totală este de 571.43 mΩ. Circuitul echivalent se poate acum redesena și conține doar o sursă (de curent) Norton și o singură rezistență Norton.

Folosim legea lui Ohm pentru aflarea căderii de tensiune pe aceste două componente ( $E = IR$ ):

$$E_{total} = 14 \text{ A} \cdot 571,43 \text{ m}\Omega$$

$$E_{total} = 8 \text{ V}$$



## Determinarea ecuației lui Millman

Pe scurt, știm despre acest circuit că valoarea totală a curentului este dată de raportul dintre suma tuturor tensiunilor pe ramuri și curenții lor respectivi. Știm de asemenea că rezistența totală este inversul sumei inversului tuturor rezistențelor ramurilor. Și, trebuie să luăm în considerare faptul că putem afla tensiunea totală pe toate ramurile prin înmulțirea curentului total cu rezistența totală ( $E = IR$ ). Tot ce trebuie să facem acum este să punem împreună cele două ecuații pentru curentul și rezistența totală, mai exact, putem afla tensiunea totală prin înmulțirea lor:

$$I_{total} R_{total} = E_{total} - \text{legea lui Ohm}$$

$$\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \text{tensiunea totală}$$

sau

$$\frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = E_{\text{total}} \text{ (tensiunea totală)}$$

În acest moment, putem realiza faptul că ecuația lui Millman nu este nimic altceva decât o transformare Thevenin-Norton și o aplicare a formulei rezistenței paralele pentru determinarea căderii de tensiune pe toate ramurile circuitului.

## 11. Teorema transferului maxim de putere

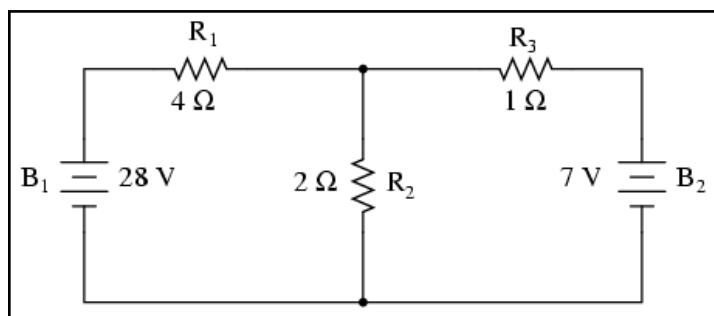
- Conform teoremei transferului maxim de putere, cantitatea de putere disipată pe o sarcină este maximă atunci când valoarea acestei rezistențe este egală cu rezistența Thevenin sau Norton a rețelei de alimentare a sarcinii

### Definiție

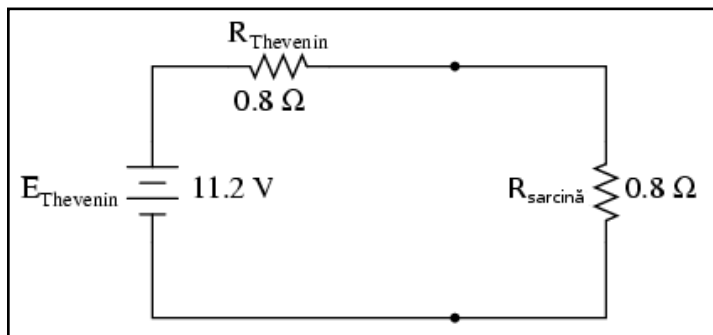
Teorema transferului maxim de putere nu este neapărat o metodă de analiza a rețelelor ci este folosită pentru optimizarea proiectării sistemelor. Pe scurt, puterea disipată pe o rezistență este maximă atunci când valoarea rezistenței este egală cu rezistența Thevenin/Norton a rețelei de alimentare. Dacă rezistența sarcinii este mai mare sau mai mică decât rezistența Thevenin/Norton, puterea disipată de aceasta nu va atinge valoarea maximă (eficiență scăzută).

Acest lucru se urmărește în realizarea unui sistem stereo, unde dorim ca impedanță difuzorului să fie aceeași cu impedanța amplificatorului pentru puterea de ieșire (sunet) maximă. Impedanța este asemănătoare rezistenței, doar că implică și efectele curentului alternativ pe lângă cel continuu. O valoare a impedenței prea mare va rezulta într-o putere de ieșire scăzută. O impedanță prea mică, pe de altă parte, va rezulta de asemenea într-o putere de ieșire scăzută dar și într-o posibilă încălzire excesivă a amplificatorului.

### Exemplu



Revenind la circuitul studiat până acum...



...conform teoremei transferului maxim de putere, valoarea rezistenței de sarcină pentru disiparea puterii maxime din circuit, trebuie să fie egală cu rezistența Thevenin ( $0,8 \Omega$ , în acest caz).

### Calcularea puterii disipate totale pe sarcină

| Mărimă | $R_{\text{Thevenin}}$ | $R_{\text{sarcină}}$ | Total | Unitate  |
|--------|-----------------------|----------------------|-------|----------|
| E      | 5,6                   | 5,6                  | 11,2  | V        |
| I      | 7                     | 7                    | 7     | A        |
| R      | 0,8                   | 0,8                  | 1,6   | $\Omega$ |
| P      | 39,2                  | 39,2                 | 78,4  | W        |

Cu această valoare a rezistenței, puterea disipată va fi de 39,2 W.

### Micșorarea valorii rezistenței de sarcină

| Mărimă | $R_{\text{Thevenin}}$ | $R_{\text{sarcină}}$ | Total | Unitate  |
|--------|-----------------------|----------------------|-------|----------|
| E      | 6,892                 | 4,308                | 11,2  | V        |
| I      | 8,615                 | 8,615                | 8,615 | A        |
| R      | 0,8                   | 0,5                  | 1,3   | $\Omega$ |
| P      | 59,38                 | 37,11                | 96,49 | W        |

Dacă valoarea rezistenței de sarcină scade (la  $0,5 \Omega$  în loc de  $0,8 \Omega$ , de exemplu), scade și puterea disipată pe sarcină.

### Creșterea valorii rezistenței de sarcină

| Mărimă | $R_{\text{Thevenin}}$ | $R_{\text{sarcină}}$ | Total | Unitate  |
|--------|-----------------------|----------------------|-------|----------|
| E      | 4,716                 | 6,484                | 11,2  | V        |
| I      | 5,895                 | 5,895                | 5,895 | A        |
| R      | 0,8                   | 1,1                  | 1,9   | $\Omega$ |
| P      | 27,80                 | 38,22                | 66,02 | W        |

Dacă valoarea rezistenței sarcinii crește (la  $1,1 \Omega$  în loc de  $0,8 \Omega$ , de exemplu), puterea disipată va fi de asemenea mai mică decât valoarea acesteia pentru  $0.8 \Omega$ .

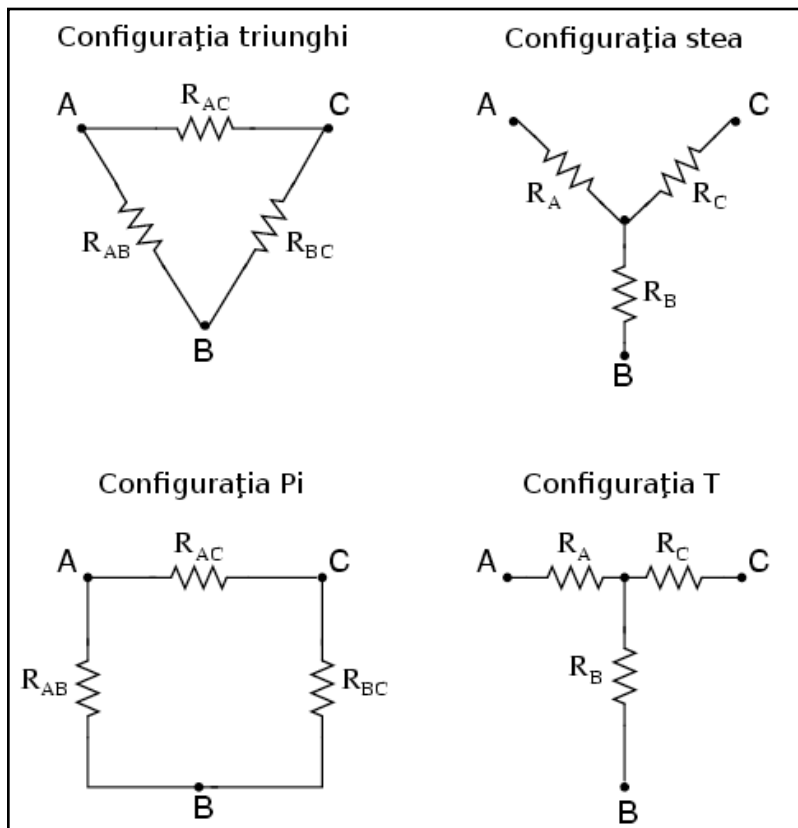
### Utilizare

Această teoremă este foarte folositoare atunci când dezvoltăm un circuit electric pentru folosirea (disiparea) puterii maxime pe sarcină.

## 12. Transformarea triunghi-stea și stea-triunghi

- Configurațiile  $\Delta$  (triunghi) mai sunt cunoscute și sub numele de  $\pi$  (Pi)
- Configurațiile Y (stea) mai sunt cunoscute și sub numele de T
- Atât configurațiile  $\Delta$  cât și Y pot fi transformate (transfigurate) în complementele lor echivalente cu ajutorul formulelor corecte ale rezistențelor. Prin „echivalent”, se înțelege faptul că cele două rețele sunt electric identice atunci când sunt măsurate de la cele trei terminale (A, B și C)
- O punte poate fi simplificată la un circuit serie/paralel prin transformarea unei jumătăți din circuit din  $\Delta$  în Y. Valorile căderilor de tensiune din circuitul Y sunt aceleași și în circuitul  $\Delta$  între punctele A, B și C

### Conexiunile triunghi și stea



De multe ori componentele sunt conectate într-o rețea cu trei terminale, astfel: conexiunea triunghi ( $\Delta$ ) cunoscută și sub numele de delta sau Pi ( $\pi$ ) și configurația stea (Y) cunoscută și sub numele de T. Ne putem da seama de unde vine numele acestora urmărind desenele alăturate.

Este posibilă calcularea reală a valorilor rezistorilor necesari pentru formarea unui tip de configurație ( $\Delta$  sau Y) bazându-ne pe valorile rezistorilor celeilalte configurații, prin simpla analiză a conexiunilor terminalilor. Pe scurt, dacă avem două rețele de rezistori, una  $\Delta$  și una Y, în cadrul căror rezistorii nu sunt vizibili dar avem la dispoziție trei terminali (A, B și C), rezistorii pot fi proiectați pentru ambele rețele astfel încât nu am putea face

diferența dintre cele două rețele din punct de vedere electric. Cu alte cuvinte, configurațiile echivalente  $\Delta$  și Y se comportă identic.

## Ecuatiile de transfigurare

Există câteva ecuații pentru transformare unei rețele în celelalte:

### Transformarea $\Delta$ -Y

$$R_A = \frac{R_{AB}R_{AC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

$$R_B = \frac{R_{AB}R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

$$R_C = \frac{R_{AC}R_{BC}}{R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}}$$

### Transformarea Y- $\Delta$

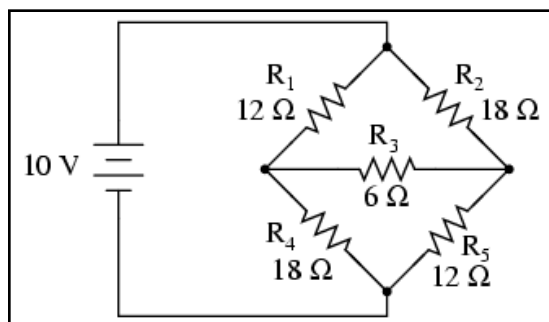
$$R_{AB} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_C}$$

$$R_{BC} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_A}$$

$$R_{AC} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_B}$$

Acest tip de configurații sunt frecvent întâlnite în sistemele de putere trifazate de curent alternativ, dar acestea sunt de obicei rețele echilibrate (toți rezistorii au aceeași valoare) și prin urmare calculele nu sunt atât de complexe.

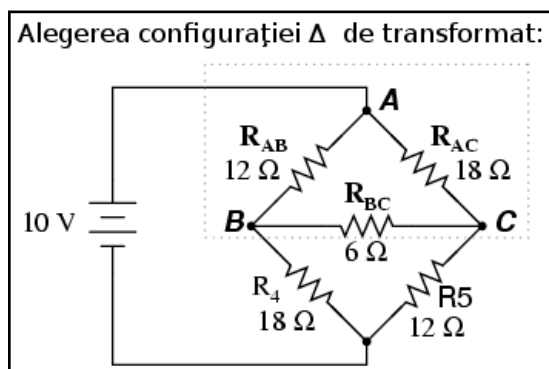
## Aplicarea transformării $\Delta$ -Y punților dezechilibrate



O aplicație a transformării  $\Delta$ -Y se găsește în cadrul circuitelor punte dezechilibrate, precum cel alăturat.

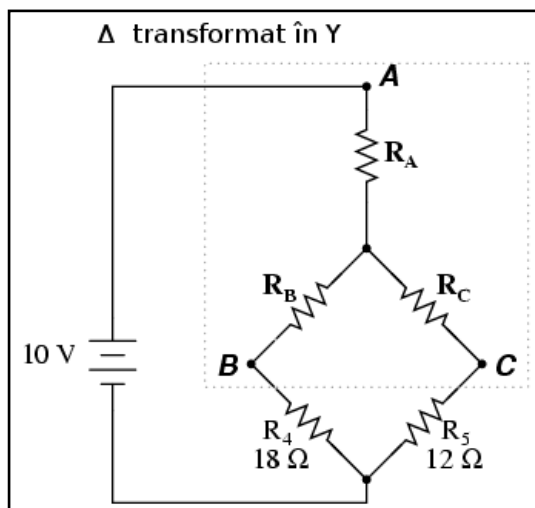
Rezolvarea acestui circuit folosind analiza curentului de ramură sau buclei de curent este destul de laborioasă, iar fiindcă există doar o singură sursă de putere, nici teoremele lui Millman sau superpoziției nu ne sunt de prea mare ajutor în acest caz. Putem folosi teorema lui Thevenin sau Norton considerând  $R_3$  rezistorul de sarcină, dar acest lucru nu ne-ar ajuta foarte mult.

### Alegerea configurației triunghi de transformat



În schimb, putem considera că rezistorii  $R_1$ ,  $R_2$  și  $R_3$  sunt conectați în  $\Delta$  (respectiv  $R_{ab}$ ,  $R_{ac}$  și  $R_{bc}$ ); generăm apoi o rețea Y echivalentă pentru înlocuirea lor și transformăm prin acest pas puntea într-un circuit combinat (mai simplu) serie/paralel.

### Aplicarea transformării



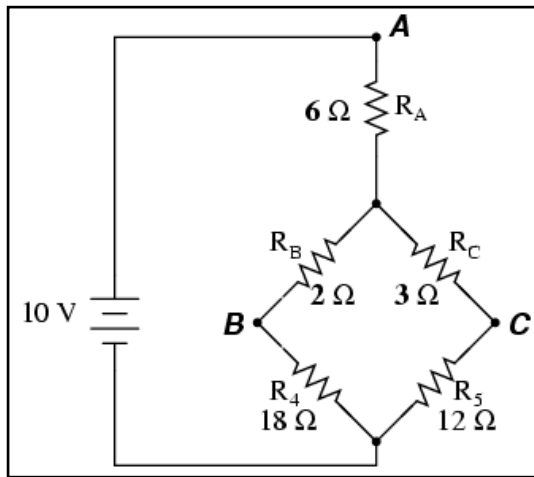
### Determinarea valorilor rezistențelor

După efectuarea corectă a calculelor, căderile de tensiune între punctele A, B și C vor fi aceleași în ambele circuite:

$$R_A = \frac{12\ \Omega \cdot 18\ \Omega}{12\ \Omega + 18\ \Omega + 6\ \Omega} = \frac{216\ \Omega^2}{36\ \Omega} = 6\ \Omega$$

$$R_B = \frac{12\ \Omega \cdot 6\ \Omega}{12\ \Omega + 18\ \Omega + 6\ \Omega} = \frac{72\ \Omega^2}{36\ \Omega} = 2\ \Omega$$

$$R_C = \frac{18 \Omega \cdot 6 \Omega}{12 \Omega + 18 \Omega + 6 \Omega} = \frac{108 \Omega^2}{36 \Omega} = 3 \Omega$$



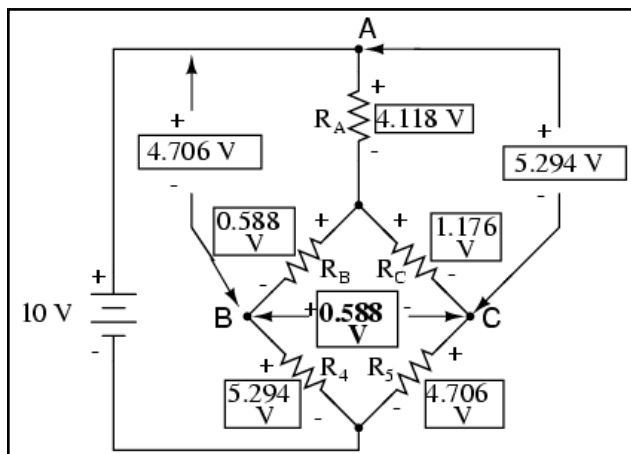
### Analiza circuitului echivalent rezultat

Desigur, valorile rezistorilor  $R_4$  și  $R_5$  rămân aceleași,  $18\Omega$  respectiv  $12\Omega$ . Acum putem analiza circuitul precum o combinație serie/paralel, obținând următoarele rezultate:

| Mărime | $R_A$ | $R_B$ | $R_C$ | $R_4$ | $R_5$ | Unitate  |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| E      | 4,118 | 0,588 | 1,176 | 5,294 | 4,706 | V        |
| I      | 0,686 | 0,294 | 0,392 | 0,294 | 0,392 | A        |
| R      | 6     | 2     | 3     | 18    | 12    | $\Omega$ |

| Mărime | $R_B + R_4$ | $R_C + R_5$ | $R_B + R_4 // R_C + R_5$ | Total  | Unitate  |
|--------|-------------|-------------|--------------------------|--------|----------|
| E      | 5,882       | 5,882       | 5,882                    | 10     | V        |
| I      | 0,294       | 0,392       | 0,686                    | 0,686  | A        |
| R      | 20          | 15          | 8,571                    | 14,571 | $\Omega$ |

### Determinarea căderilor de tensiune între punctele A, B și C



Folosim valorile căderilor de tensiune din tabelul de mai sus pentru determinarea căderilor de tensiune între punctele A, B și C, fiind atenți la adunarea sau scăderea lor (precum este cazul tensiunii între punctele B și C).

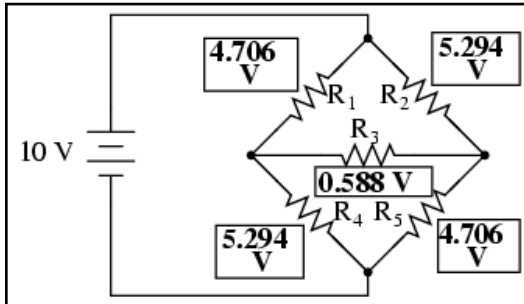


$$E_{A-B} = 4,70 \text{ V}$$

$$E_{A-C} = 5,29 \text{ V}$$

$$E_{B-C} = 0,58 \text{ V}$$

### Revenirea la circuitul inițial



Cu valorile acestor căderi de tensiune aflate, putem trece la circuitul original unde aceste căderi de tensiune sunt aceleași (între aceleași puncte).

Desigur, căderile de tensiune pe rezistorii  $R_4$  și  $R_5$  sunt aceleași ca și în cazul circuitului transformat (Y). Acum putem determina curenții prin rezistori folosind valorile acestor tensiuni și aplicând repetat legea lui Ohm ( $I = E / R$ ):

$$I_{R1} = \frac{4,79 \text{ V}}{12 \Omega} = 0,39 \text{ A}$$

$$I_{R2} = \frac{5,29 \text{ V}}{18 \Omega} = 0,29 \text{ A}$$

$$I_{R3} = \frac{0,58 \text{ V}}{6 \Omega} = 0,09 \text{ A}$$

$$I_{R4} = \frac{5,29 \text{ V}}{18 \Omega} = 0,29 \text{ A}$$

$$I_{R5} = \frac{4,70 \text{ V}}{12 \Omega} = 0,39 \text{ A}$$

## **11 - Baterii și surse de alimentare**

### **1. Legătura chimică**

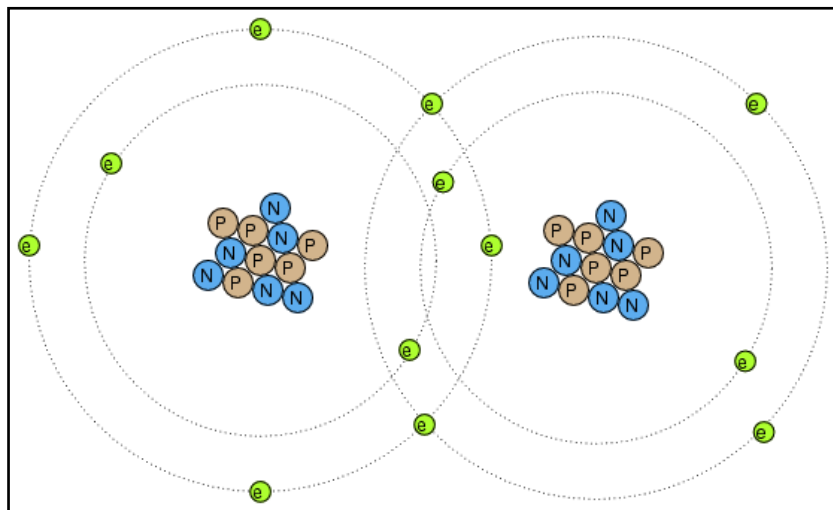
Până în acest moment nu am discutat în detaliu modul de funcționare al bateriilor, ci am presupus pur și simplu că acestea produc o tensiune constantă la bornele lor printr-un proces „misterios”. În cele ce urmează vom explora procesul în mare urmând să facem niște precizări cu privire la utilizarea reală a bateriilor în sistemele electrice.

#### **Principii de bază**

Am discutat în primul capitol despre conceptul de atom. Atomii sunt compuși din părți mai mici denumite particule. Particulele elementare dintr-un atom sunt electronii, protonii și neutronii. Fiecare dintre aceste particule joacă rolul ei în comportamentul atomului. Activitatea electrică implică mișcarea electronilor, iar identitatea chimică (ce determină în mare tipul de material: conductor/izolator) este determinată de numărul protonilor din nucleu.

Dislocarea protonilor din nucleul atomului este foarte greu de realizat, de aici și stabilitatea identității chimice a atomilor în general. Îndepărtarea electronilor, în schimb, este mult mai ușor de realizat. După cum am văzut, frecarea este unul dintre procedeele prin care electronii pot fi „mutați” de pe un material pe altul, la fel este și căldura, procedeu evidențiat în cazul termocuplei.

## Legătura covalentă



Electronii pot servi însă și unui alt scop: legarea atomilor între ei. Această legare a atomilor prin intermediul electronilor poartă numele de legătură chimică.

O reprezentare simplificată a unei asemenea legături dintre doi atomi este cea alăturată.

Există mai multe tipuri de legături chimice, cea de sus fiind o legătură covalentă, caracterizată prin împărțirea electronilor de către atomi. Deoarece aceste legături sunt bazate pe legături formate de electroni, ele nu pot fi mai puternice decât gradul de imobilitate al electronilor constituenți. Ceea ce vrem să spunem este că aceste legături chimice pot fi create sau desfăcute de aceleași forțe ce induc deplasarea electronilor: căldura, lumina, frecarea, etc.

## Formarea moleculelor

Atunci când atomii sunt legați între ei prin legături chimice, aceștia formează materiale cu proprietăți unice numite molecule. Desenul de mai sus, cu doi atomi de același tip legați, este un exemplu de moleculă simplă. Majoritatea moleculelor sunt formate însă din tipuri diferite de atomi. Chiar și moleculele formate din atomi de același tip pot prezenta proprietăți fizice radical diferite.

## Legătura ionică

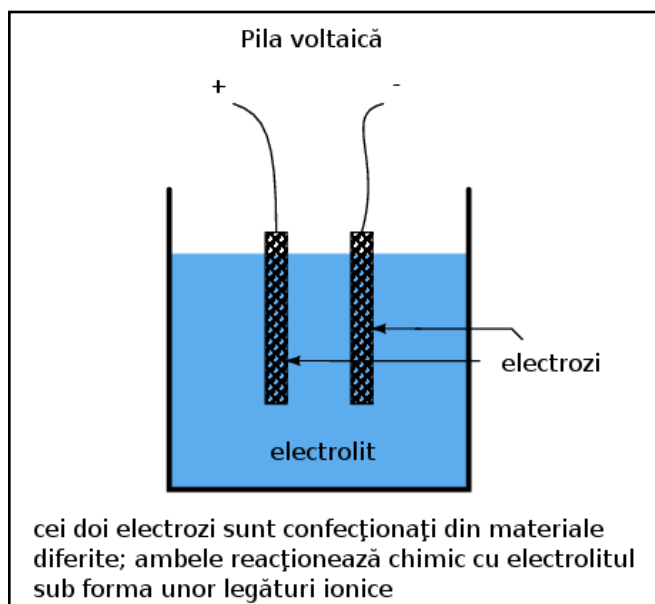
Însă, pentru studierea bateriilor, trebuie să introducem un alt tip de legătură chimică, cea ionică. Aceasta diferă față de legătura covalentă prin faptul că un atom al moleculei posedă un exces de electroni iar celălalt atom posedă un deficit de electroni; în acest caz, legătura dintre atomi este rezultatul atracției electrostatice dintre cele două sarcini diferite („+” și „-”). Atunci când legăturile ionice iau naștere din atomi neutrii, există de fapt un transfer de electroni între atomii pozitivi și negativi din punct de vedere electric. Este bine de știut faptul că moleculele conțin de obicei ambele tipuri de legături chimice. Hidroxidul de sodiu (NaOH) este format dintr-o legătură ionică dintre atomul de sodiu (pozitiv) și ionul hidroxil (negativ). Ionul hidroxil formează o legătură covalentă (simbolizată prin bară) între hidrogen și atomii de oxigen:



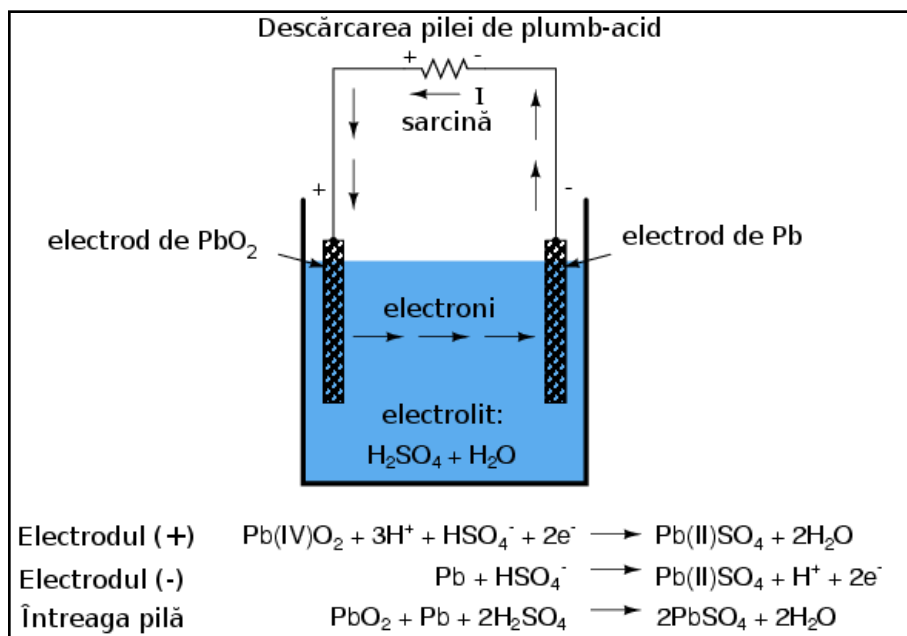
Sodiul pierde doar un electron, sarcina lui fiind +1 în exemplul de mai sus. Dacă un atom pierde mai mult de un electron, sarcina rezultată poate fi desemnată prin +2, +3, +4, etc. sau printr-o cifră romană în paranteze ce desemnează starea sa de oxidare (pierderea electronilor), astfel: (I), (II), (IV), etc. Unii atomi pot avea mai multe stări de oxidare, și este bine să precizăm starea de oxidare în formula moleculară pentru evitarea confuziilor.

## 2. Pila voltaică

### Principiul de funcționare



Formarea ionilor și a legăturilor ionice din atomii neutrii sau molecule (sau invers) presupune transferul de electroni. Acest transfer poate fi folosit pentru generarea curentului electric. Un dispozitiv construit special în acest scop poartă denumirea de pilă voltaică sau, pe scurt, pilă; aceasta este de obicei formată din doi electrozi metalici introduși într-o substanță chimică denumită electrolit, substanță special concepută pentru facilitarea unei astfel de reacții electrochimice (oxidare/reducere).



### Reacțiile chimice ale unei pile de plumb-acid

Pila folosită pentru automobile este de obicei cea de „plumb-acid”. Electrocul negativ este confecționat din plumb (Pb), iar cel pozitiv din dioxid de plumb (IV) ( $\text{PbO}_2$ ), ambele substanțe fiind metalice. Soluția de electrolit este o soluție

diluată de acid sulfuric ( $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ).

Dacă electrozii pilei sunt conectați la un circuit extern, astfel încât să fie posibilă deplasarea electronilor de la un electrod la celălalt, atomii de plumb (IV) din electrodul pozitiv ( $\text{PbO}_2$ ) vor câștiga fiecare câte doi electroni pentru a produce  $\text{Pb(II)O}$ . Atomii de oxigen rezultați se vor combina cu ionii pozitivi de hidrogen ( $\text{H}^+$ ) pentru formarea apei ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Această deplasare a electronilor spre electrodul  $\text{PbO}_2$  îi conferă o sarcină pozitivă. Atomii de plumb din electrodul negativ cedează fiecare câte doi electroni pentru a produce plumb  $\text{Pb(II)}$ , care în combinație cu ionii de sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), produși prin disociația ionilor de hidrogen ( $\text{H}^+$ ) din acidul sulfuric ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), formează sulfatul de plumb ( $\text{PbSO}_4$ ). Deplasarea electronilor dinspre electrodul de plumb îi conferă sarcina electrică negativă. Aceste reacții sunt reprezentate alăturat.

## Descărcarea pilei voltaice

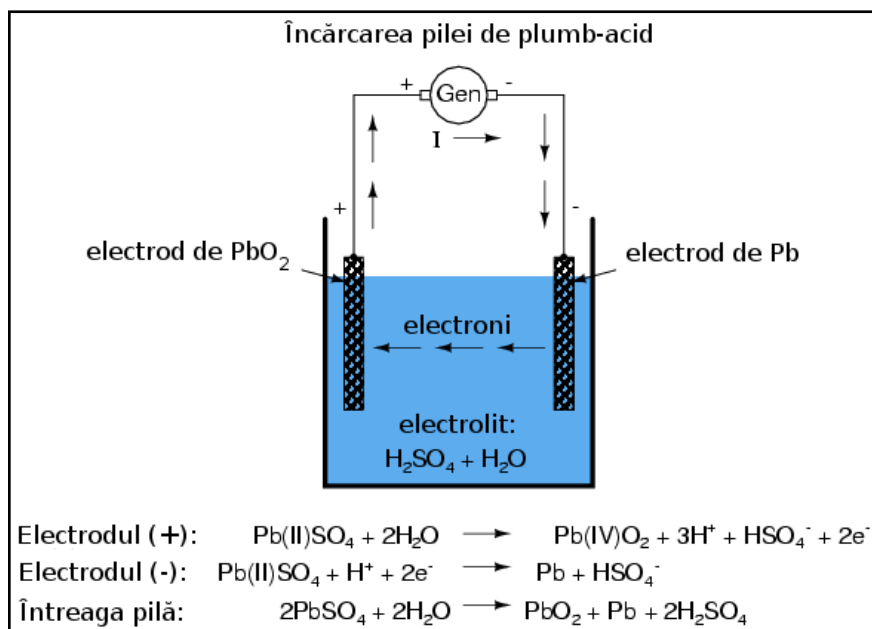
Acest proces prin care pila produce energie pentru alimentarea sarcinii se numește descărcare și provine de la faptul că aceasta își epuizează rezervele chimice interne în urma acestui proces. Teoretic, după ce întreaga cantitate de acid sulfuric se consumă, din pilă mai rămân cei doi electrozi de sulfat de plumb ( $\text{PbSO}_4$ ) și o soluție electrolitică de apă pură ( $\text{H}_2\text{O}$ ); această situație nu mai permite formarea legăturilor ionice adiționale. În acest moment, pila se spune că este complet descărcată. Stadiul de încărcare poate fi determinat în acest caz de concentrația soluției acide.

## Comportamentul pilei depinde de materialele din care este confecționată

Nu toate pilele voltaice sunt construite pe baza acelorași reacții chimice, dar lucrul cel mai important de reținut este că electronii sunt „motivați” să se deplaseze între cei doi electrozi de către reacțiile ionice dintre moleculele electrozilor și moleculele electrolitului. Reacția este activată atunci când există un drum exterior închis (complet) pentru formarea curentului electric. La întreruperea acestui circuit, reacțiile chimice încetează.

Valoarea tensiunii generate de o celulă depinde de tipul reacțiilor chimice ce au loc în interiorul acesteia, mai bine spus, de configurația chimică a celulei. În exemplul de mai sus, pila de plumb-acid prezintă la bornele sale o tensiune nominală de 2,04 V, atunci când este încărcată la maxim (concentrația de acid ridicată). Pila Edison, confecționată din oxid de nickel (electrodul pozitiv) și fier (electrodul negativ), cu o soluție electrolitică de hidroxid de potasiu generează o tensiune nominală de 1,2 V.

## Încărcarea pilei voltaice



În cazul anumitor tipuri de pile, reacțiile chimice pot fi inversate forțând curgerea curentului în sens invers prin pilă. Acest proces poartă denumirea de încărcare. O astfel de pilă re-încărcabilă se numește pilă secundară. O pilă a cărei compoziții chimice nu poate fi readusă la starea inițială se numește pilă primară.

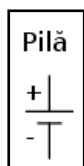
Încărcarea unei pile de plumb-acid printr-o sursă de curent externă duce la inversarea reacțiilor chimice din interiorul acesteia.

### 3. Bateriile electrice

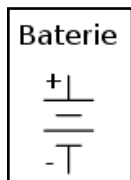
#### Definiție

Cuvântul baterie înseamnă pur și simplu un grup de componente similare aduse împreună. O baterie electrică este un set de pile voltaice realizate cu scopul generării unei valori a tensiunii și curentului mai mari decât este posibil cu doar o singură pilă.

#### Simbolul bateriei electrice

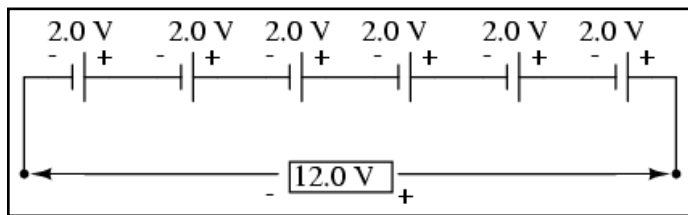


Simbolul unei pile constă din două linii paralele, una mai scurtă și una mai lungă, conectate la capete cu câte un fir.

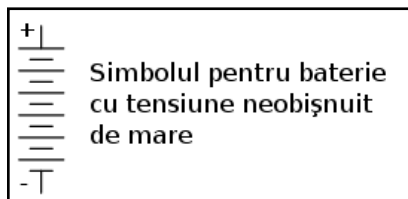


În aceeași ordine de idei, simbolul bateriei constă din mai multe pile conectate în serie.

După cum am mai spus, tensiunea produsă de un anumit tip de pilă depinde doar de compoziția ei chimică, mărimea pilei este irelevantă în acest caz. Pentru obținerea unei tensiuni mai mari prin urmare, trebuie să conectăm mai multe pile în serie. Tensiunea totală la bornele unei baterii este suma tuturor tensiunilor pilelor.



O baterie tipică plumb-acid instalată pe un automobil generează o tensiune nominală de 12,0 V (6 x 2,0 V).

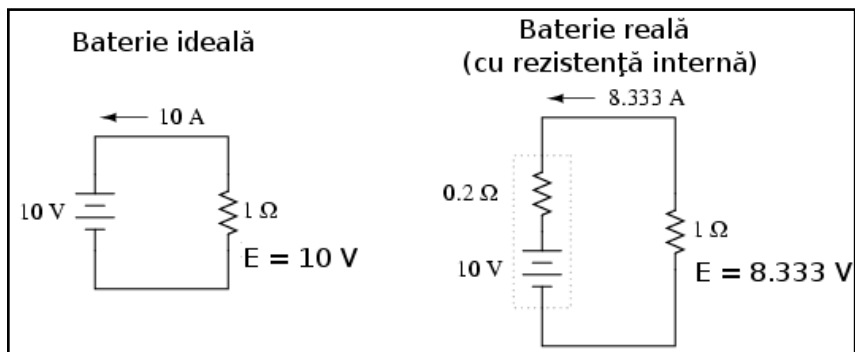


Ca și convenție, simbolul bateriei este desenat de obicei cu doar patru linii lungi/scurte, chiar dacă bateria reală este compusă din mai mult de patru pile. Totuși, se poate ca în unele cazuri să întâlnim un simbol al bateriei cu foarte multe linii lungi/scurte; folosim acest simbol pentru reprezentarea unei baterii

cu o tensiune neobișnuit de mare.

## Rezistența internă a bateriei

Deși mărimea fizică a unei pile nu are nicio relevanță cu privire la valoarea tensiunii generate, are totuși importanță atunci când luăm în considerare rezistența acesteia și prin urmare determină cantitatea maximă de curent ce o poate genera în circuit. Orice celulă voltaică posedă o anumită rezistență internă datorată electrozilor și soluției electrolitice. Cu cât pila este mai mare, cu atât este mai mare suprafața de contact a electrozilor cu electrolitul, ceea ce se traduce printr-o rezistență internă mai scăzută.



Deși în mod normal considerăm că bateria se comportă ca o sursă perfectă de tensiune (absolut constantă) într-un circuit, considerând curentul ce-o străbate ca depinzând strict de rezistența externă a circuitului de care este atașată, acest lucru nu se întâmplă de fapt în

realitate. Deoarece fiecare baterie sau pilă posedă o anumită rezistență internă, aceasta afectează valoarea curentului în oricare circuit.

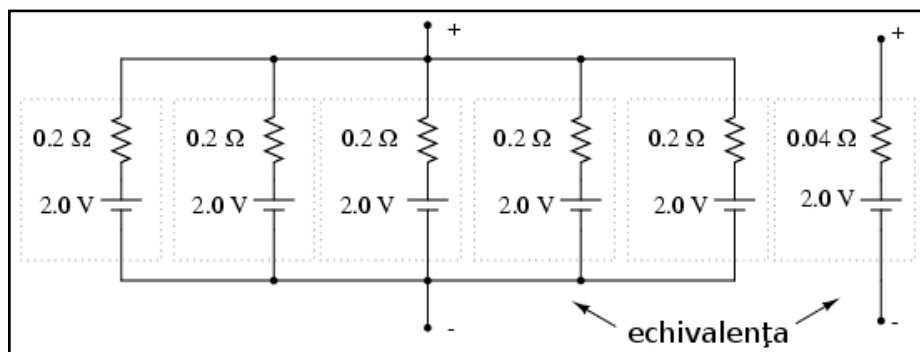
Bateria reală de mai sus posedă o rezistență internă de 0,2 Ω; acest lucru afectează performanța bateriei atunci când alimentează sarcina de 1 Ω. Bateria ideală din stânga nu are rezistență internă, și din această cauză, aplicarea legii lui Ohm ( $I = E / R$ ) rezultă într-o valoare a curentului de 10 A pentru o rezistență de 1 Ω și 10 V tensiune de alimentare. Dar, bateria reală are o rezistență în plus ce se opune și ea deplasării electronilor, curentul generat în circuit în acest caz este de numai 8333 A pentru aceeași valoare a sarcinii.

Bateria ideală în scurt-circuit (rezistență de 0 Ω a sarcinii) generează un curent infinit. Pe de altă parte, bateria reală, poate genera doar 50 A ( $10 \text{ V} / 0,2 \text{ } \Omega$ ) într-un scurt-circuit de 0 Ω datorită rezistenței interne. Ca să nu existe nicio confuzie, reacțiile chimice interne produc o tensiune tot de 10 volți și în cazul bateriei reale, dar o parte

din aceasta cade pe rezistența internă a bateriei și prin urmare căderea de tensiune pe sarcina circuitului nu este 100% din valoarea totală a tensiunii generate de baterie.

În mod normal bateriile sunt folosite în circuite în care rezistențele lor interne sunt neglijabile în comparație cu rezistențele sarcinilor (curentul de scurt-circuit este mult mai mare decât curentul normal prin sarcină), comportamentul lor în acest caz este foarte apropiat de cel al bateriilor reale.

## Conectarea în paralel a pilelor voltaice



Dacă totuși avem nevoie de o baterie cu rezistență internă mult mai mică (pentru curenți mai mari) decât cea a unei singure pile, putem conecta mai multe pile în paralel.

Circuitul Thevenin echivalent al celor cinci pile în paralel este un circuit cu o singură sursă de tensiune și un rezistor în serie. Acest circuit are aceeași valoare a tensiunii (2,0 V) dar o rezistență mai mică (0,04Ω) decât oricare dintre rezistențele individuale ale pilelor (0,2 Ω).

## 4. Capacitatea bateriilor (Ah)

Datorită faptului că bateriile dau naștere unei curgeri de electroni prin circuit prin intermediul reacțiilor chimice (schimb de electroni), și, datorită faptului că numărul de molecule dintr-o baterie este limitat, trebuie să existe o limită a cantității totale de electroni dintr-o baterie ce sunt „împinși” în circuit, înainte ca rezervele de energie a acesteia să se termine. Am putea măsura capacitatea unei baterii referindu-ne la numărul total de electroni, dar această cifră ar fi extrem de mare. Am putea folosi Coulomb-ul (egal cu  $6,25 \times 10^{18}$  electroni), astfel încât cantitățile cu care lucrăm să fie mult mai practice.

### Amper-oră (Ah)



Totuși, în practică, nu se utilizează mărimile de mai sus, ci se lucrează cu amper-oră (Ah). Din moment ce un amper reprezintă o curgere de un Coulomb de electroni pe secundă, iar într-o oră sunt 3.600 de secunde, putem exprima o relație directă între numărul de Coulombi (numărul de electroni) și amperi-oră: 1 Ah - 3600 C.

O baterie cu o capacitate de 1 Ah poate alimenta o sarcină cu un curent continuu de 1 A pentru o perioadă de 1 oră, sau 2 A pentru o jumătate de oră, etc. După această perioadă, spunem că bateria este descărcată. În cazul unei baterii ideale, relația dintre curentul continuu și timpul de descărcare este stabilă și absolută. Bateriile reale nu au însă acest comportament. Din acest motiv, atunci când se specifică numărul de amperi-oră pentru o baterie, acest număr este specificat fie pentru o anumită valoare a curentului, fie a timpului, fie se presupune că este dat pentru o perioadă de 8 ore (în cazul în care nu este inclus alt factor de limitare).

În cazul acumulatorilor, notația amper-oră specifică de fapt timpul necesar de încărcare pentru o anumită valoare a curentului de încărcare. De exemplu, o baterie auto de 70 Ah, complet descărcată, va necesita o perioadă de încărcare de 10 ore la un curent de încărcare constant de 7 A ( $70 / 7$ ).

## Descărcarea bateriilor

De exemplu, o baterie auto tipică poate avea o capacitate de 70 Ah, specificată pentru un curent de 3,5 A. Acest lucru înseamnă că bateria ar putea genera un curent de 3,5 A pentru o perioadă de 20 de ore ( $70 / 3,5$ ). Dar, să presupunem că am conecta o sarcină cu o rezistență mai mică la bornele bateriei, sarcină ce consumă un curent de 70 A. Ecuația noastră ne-ar spune că în acest caz, bateria ar funcționa pentru exact o oră ( $70 / 70$ ), dar acest lucru nu este neapărat valabil în realitate. În cazul unor curenți mai mari, bateria va disipa o căldură mai mare pe rezistența sa internă. Efectul constă în modificarea reacțiilor chimice ce au loc în interiorul acesteia. Realitatea este că, bateria se va descărca în mai puțin de o oră.

Invers, dacă ar fi să conectăm o sarcină ușoară (1 mA) la bornele bateriei, ecuația ne-ar spune că bateria ar trebui să genereze putere pentru o perioadă de 70.000 de ore, puțin sub 8 ani. Totuși, sunt foarte mari șanse ca energia chimică a unei baterii reale să se consume datorită altor factori, precum evaporarea electrolitului, deteriorarea electrozilor sau scurgeri de curent în interiorul bateriei, înainte de perioada de 8 ani calculată mai sus.

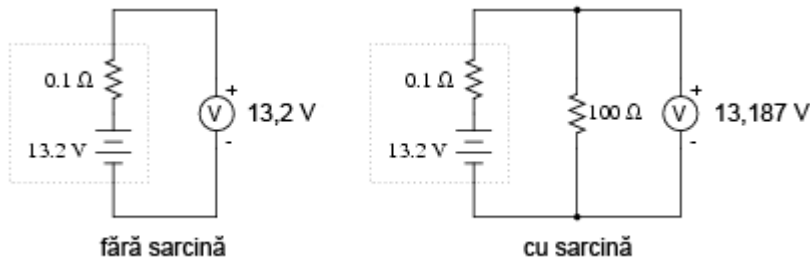
În concluzie, relația amper-oră este doar o aproximare ideală a unei baterii reale. Aceasta trebuie luată în considerare doar pentru valori apropiate de curent sau de timp specificate de producător. Unii producători specifică însă factori de reducere a capacității totale pentru funcționarea la curenți și/sau temperaturi diferite de cele standard.

## Verificarea stării de încărcare a unei baterii

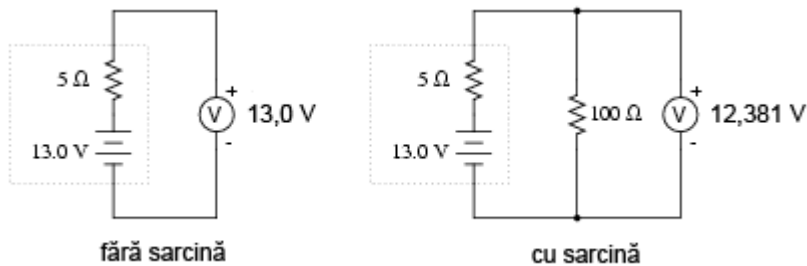
Pe măsură ce o baterie se descarcă, pe lângă diminuarea stocului de energie internă, crește și rezistența internă a acesteia. Electrolitul devine din ce în ce mai puțin conductiv iar tensiunea bateriei scade pe măsură ce substanțele chimice devin din ce în ce mai diluate. Cel mai înșelător efect al unei baterii care se descarcă este creșterea rezistenței.

Cea mai bună metodă de verificare a stării unei baterii constă în măsurarea căderii de tensiune la bornele sale când aceasta se află *conectată în circuit* și generează un curent electric considerabil. Altfel, o simplă conectare a voltmetrului la bornele bateriei poate indica eronat o baterie „sănătoasă” (tensiune corespunzătoare), chiar dacă rezistența sa internă a crescut considerabil. Curentul electric „considerabil” este determinat de parametrii de proiectare a fiecărei baterii în parte. O cădere de tensiune prea mică (indicată de voltmetru), va indica, evident, o baterie descărcată. Să luăm câteva exemple.

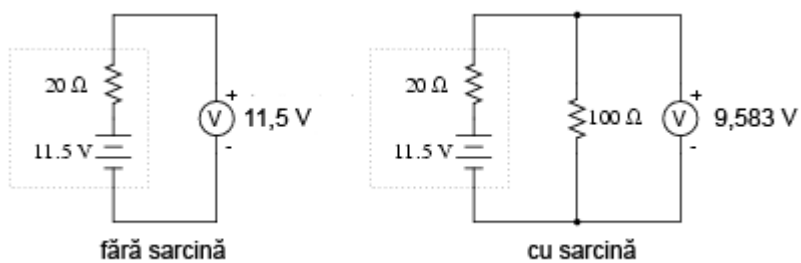
Scenariul pentru o baterie complet încărcată arată aproximativ astfel:



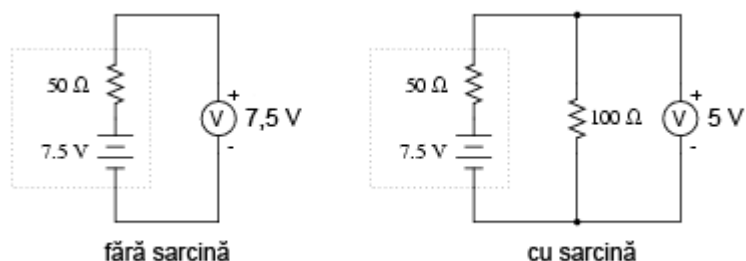
Dacă bateria se descarcă puțin:



Apoi puțin mai mult:



Și încă puțin până când este complet descărcată:

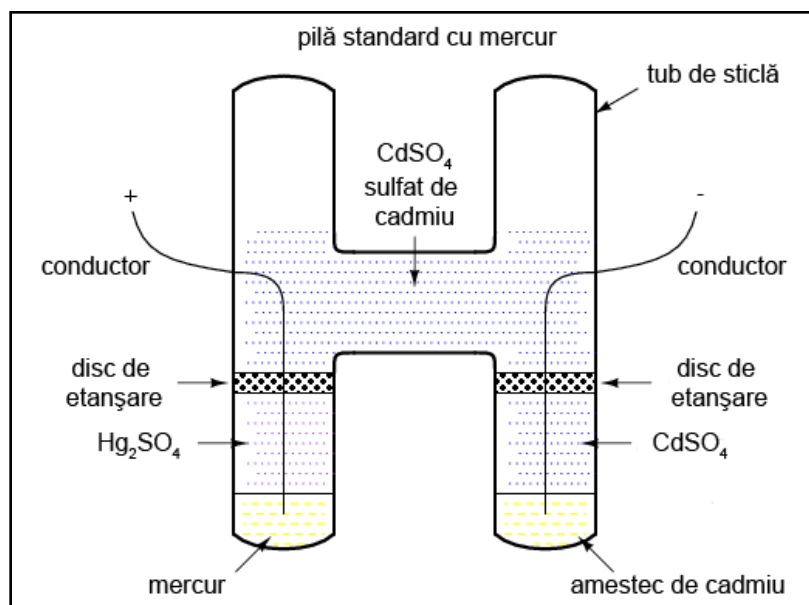


Observați diferența dintre valoarea tensiunii măsurată cu ajutorul voltmetrului în funcție de conectarea sau neconectarea bateriei la o sarcină. Înseamnă oare acest lucru că este inutil să verificăm o baterie doar cu ajutorul unui voltmetru (fără sarcină)? Nu chiar. Dacă un voltmetru simplu indică o valoare de doar 7,5 V pentru o baterie de 13,2 V, putem deduce fără urmă de îndoială că aceasta este descărcată.

Totuși, dacă voltmetrul ar indica 12,5 V, bateria este aproape încărcată. Atenție însă, mărimea rezistorului folosit pe post de sarcină trebuie să corespundă puterii maxime disipate de baterie. Pentru verificarea bateriilor mari, precum bateriile auto (12 V) de plumb-acid, acest lucru înseamnă că va trebui să folosim un rezistor ce poate suporta o putere de câteva sute de W (watt).

## 5. Baterii speciale

### Pila standard cu mercur



Pe vremuri, un tip special de baterie, cunoscută sub numele de pilă standard cu mercur, era folosită ca și etalon (standard) pentru calibrarea tensiunilor. Ieșirea unei pile cu mercur este între 1,0184 și 1,0194 V c.c. (în funcție de tipul pilei), fiind extrem de stabilă în timp. Variația tensiunii este în jurul valorii de 0,004% pe an. Alternativ, pilele cu mercur erau cunoscute și sub numele de pile cu cadmiu sau pile Weston. Structura unei astfel de pile este prezentată în figura alăturată.

Din păcate, pilele cu mercur sunt intolerante la „scurgerile” de curent și nu pot fi măsurate cu un voltmetru analogic fără a compromite acuratețea măsurătorii. Producătorii menționau un curent nu mai mare de 0,1 mA prin pilă, dar chiar și această cifră era considerată de moment, sau instantanee maximă. Prin urmare, pilele standard nu puteau fi măsurate decât cu un dispozitiv potențiometric (detector de nul), pentru care curentul de funcționare este zero. Scurt-circuitarea unei pile cu mercur este stric interzisă. După scurt-circuitare, pila nu mai poate fi folosită ca și dispozitiv standard. Pilele cu mercur sunt de asemenea susceptibile la variații mici de tensiune în cazul „bruscării” lor fizice sau termice.

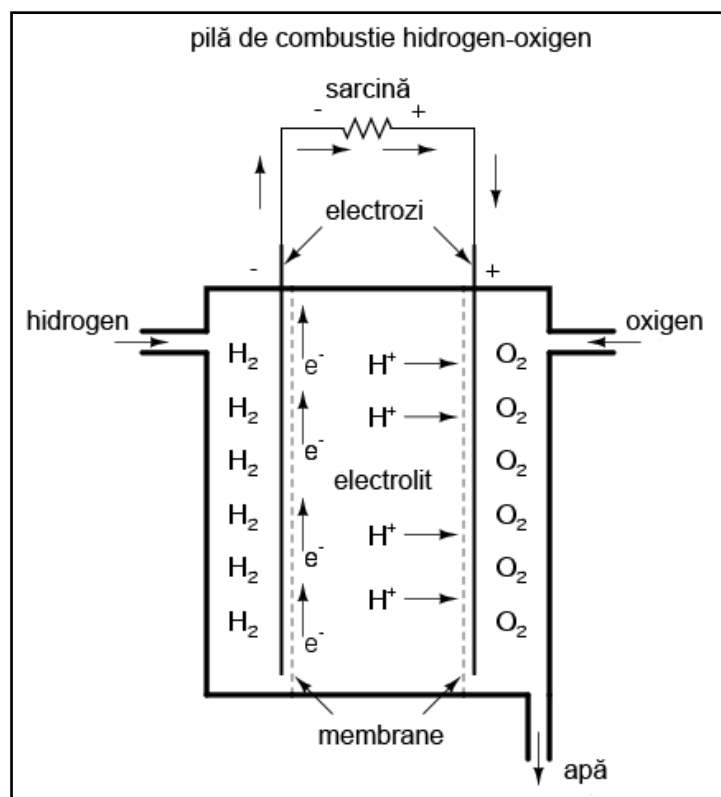
Există două tipuri de pile standard cu mercur, în funcție de nevoile de calibrare: saturate și nesaturate. Pilele standard saturate oferă cea mai bună stabilitate a tensiunii în timp, suferind în schimb de o instabilitate termică. Cu alte cuvinte, variația tensiunii este neglijabilă în timp (o variație de doar câțiva microvolți în decurs de 10 ani!), dar este mare la schimbările de temperatură (zeci de microvolți per grad Celsius). Aceste pile funcționează cel mai bine în medii de laborator controlate din punct de vedere termic, și unde stabilitatea tensiunii este de o importanță crucială.

Pilele nesaturate oferă o foarte bună stabilitate termică în dauna stabilității lor în timp. Tensiunea rămâne practic constantă odată cu variația temperaturii, dar scade constant cu aproximativ 100  $\mu\text{V}$  pe an. Acest celule erau utilizate cel mai adesea ca și dispozitive de calibrare „de teren”. Temperatura ambiantă nu poate fi controlată precis în aceste situații. Tensiunea nominală a unei pile saturate este de 1,0186 V, iar a celei nesaturate de 1,019 V.

Dispozitivele de calibrare semiconductoare moderne au înlocuit în totalitate pilele standard ca și referințe de laborator sau „de teren” pentru tensiuni.

## Pila de combustie

Un dispozitiv fascinant, foarte asemănător pilei voltaice, este pila de combustie. Acest dispozitiv utilizează



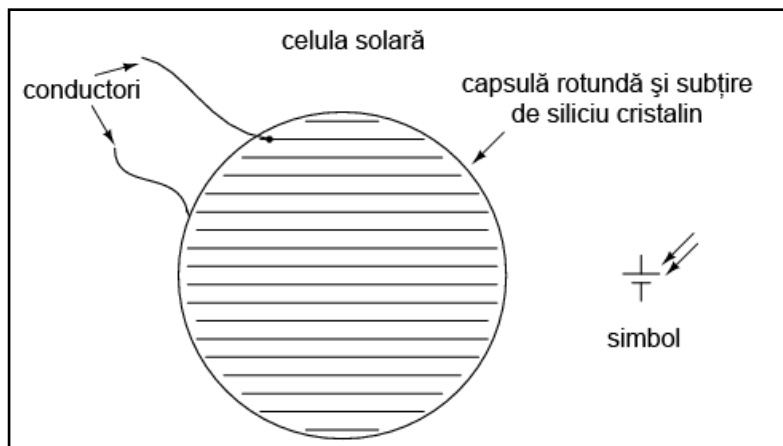
reacția chimică de combustie (ardere) pentru generarea unui curent electric. Procesul de oxidare chimică (formarea legăturilor ionice ale oxigenului cu alte elemente) poate produce o deplasare de electroni între doi electrozi asemănător unei combinații de metale și electroliti. O pilă de combustie este practic o baterie alimentată de la o sursă externă de energie chimică.

Pe măsură ce „arde” hidrogen, singurele emisii ale unei pile de combustie sunt apă și o cantitate mică de căldură. Eficiența transformării energiei chimice în energie electrică, în cazul unei pile de combustie,

este mult mai mare decât limita de eficiență Carnot pentru orice motor cu ardere (combustie) internă.

## Celula solară

Un alt tip de „baterie” este celula (pila) solară, un produs al electronicii (semiconductori). Efectul fotoelectric, conform căruia electronii sunt „smulși” din atomi sub influența luminii, este pus în aplicare pentru generarea de curent electric prin intermediul luminii. Eficiența celulelor solare este destul de mică, dar beneficiile utilizării acestora ca și sursă de energie sunt nenumărate: nu există părți mobile, zgomot, poluare sau emisii și au o viață practic infinită:



## Pila chimică de detecție

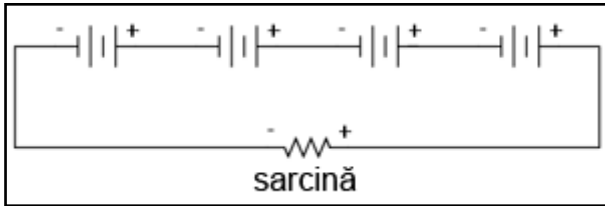
Un alt tip de „baterie” specială este pila chimică de detecție. Pe scurt, aceste pile reacționează chimic cu o substanță specifică din mediul lor ambiant (din aer) pentru a crea o cădere de tensiune proporțională cu concentrația substanței respective. O aplicație practică a unei pile chimice de detecție constă în detecția și măsurarea concentrației de oxigen. Majoritatea analizatoarelor de oxigen sunt construite în jurul acestor mici pile. Pila chimică trebuie astfel proiectată încât să corespundă substanței(lor) ce se doresc a fi detectate. Aceste pile tind să se uzeze, pe măsură ce materialele chimice din componența lor se epuizează sau se contaminatează în decursul utilizării.

## 6. Considerații practice (baterii)

La conectarea bateriilor în serie sau paralel, trebuie să fim atenți la caracteristicile fiecărei baterii în parte, pentru a nu cauza probleme.

### Conectarea în serie a bateriilor

Să luăm pentru început cazul conectării bateriilor în serie pentru obținerea unei tensiuni mai mari:

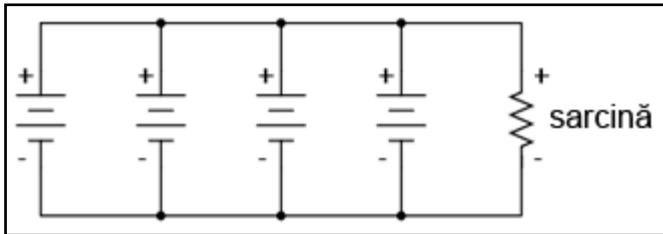


Cunoaștem faptul că valoarea curentului într-un circuit serie este aceeași în toate punctele. Oricare ar fi valoarea curentului în circuit, aceasta trebuie să fie aceeași prin fiecare baterie. Din acest motiv, toate bateriile trebuie să fie egale din punct de vedere al valorii amper-oră (Ah). În caz contrar, unele

baterii se vor goli mai repede decât celelalte, iar capacitatea întregului circuit va fi compromisă. Capacitatea amper-oră totală a acestui circuit serie nu este afectată de numărul de baterii conectate.

### Conectarea în paralel a bateriilor

Să luăm cazul conectării bateriilor în paralel pentru creșterea curentului în circuit (rezistență internă mai mică), sau creșterea capacității amper-oră:

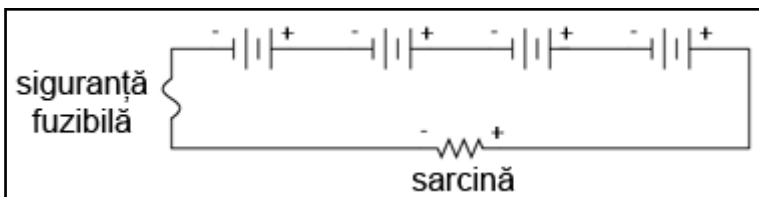


Cunoaștem faptul că într-un circuit paralel, căderea de tensiune este egală pe toate ramurile. Trebuie să ne asigurăm așadar că tensiunea acestor baterii este egală. În caz contrar, vor exista curenți relativ mari de la o baterie spre alta, bateriile cu o tensiune mai mare

dominând bateriile cu tensiune mai mică. Acest lucru nu este de dorit.

### Protejarea bateriilor cu siguranțe fuzibile

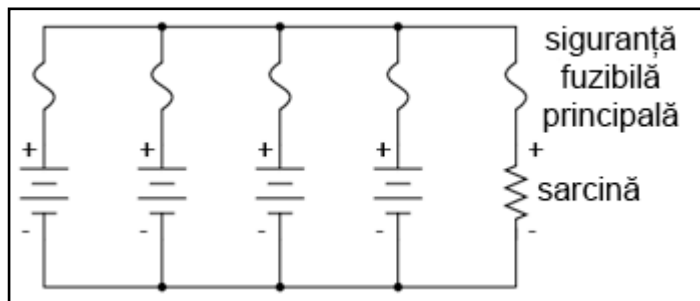
În aceeași ordine de idei, trebuie să ne asigurăm că orice elemente de protecție la supracurent (siguranțe fuzibile sau întrerupătoare automate) sunt instalate astfel încât să fie eficiente. Pentru circuitul serie de mai sus, o singură siguranță fuzibilă este suficientă pentru protecția la supracurent a conductorilor, din moment ce orice deschidere a circuitului va opri curentul în întreg circuitul:



În cazul unor baterii conectate în paralel însă, o singură siguranță fuzibilă este insuficientă

pentru protejarea conductorilor la supracurent (conectată între sarcină și bateriile conectate în paralel). În acest caz, avem și alte situații pe care trebuie să le luăm în considerare.

Se știe faptul că, în cazul bateriilor, pot apărea scurt-circuite interne datorită „defectării” mediului de separare dintre electrozi. Bateriile bune vor domina bateriile defecte (tensiune mică), ducând la apariția unor curenți relativ mari pe aceste ramuri. Pentru a ne proteja de un astfel de eveniment, fiecare baterie trebuie protejată la supracurent printr-o siguranță fuzibilă individuală, pe lângă siguranța fuzibilă principală:



### Alte observații legate de baterii și acumulatori

Atunci când avem de a face cu acumulatori, trebuie să fim atenți la modul lor de încărcare. În funcție de tipul și modul de construcție, acumulatorii au nevoi diferite când vine vorba de încărcarea lor. De obicei, producătorii oferă unele recomandări cu privire la modul de proiectare și de menținere a unui sistem electric ce utilizează acumulatori.

Există două probleme principale: iterarea și supraîncărcarea. Iterarea se referă la procesul de încărcare și descărcare a unui acumulator. Toți acumulatorii au un anumit număr de iterații permise. Supraîncărcarea reprezintă condiția în care curentul continuă să fie forțat în sens invers prin acumulator, dincolo de punctul în care acesta a tins încărcarea maximă. În cazul bateriilor de plumb-acid în special, supraîncărcarea duce la electroliza apei („fierberea” apei în afara bateriei) și la scurtarea vieții bateriei.

Toate bateriile care conțin apă în electrolit produc hidrogen datorită electrolizei. Acest lucru este în special valabil în cazul bateriilor de plumb-acid, dar nu numai. Hidrogenul este un gaz extrem de inflamabil, în special în prezența oxigenului liber creat de același proces de electroliză, inodor și incolor. Asemenea baterii reprezintă un real pericol de explozie chiar și în condiții normale de funcționare, și trebuie tratate cu mare grijă. Autorul a fost martorul exploziei unei baterii de plumb-acid. O singură scânteie creată de îndepărtarea unei surse de curent continuu pentru încărcarea unei baterii auto a dus la aprinderea hidrogenului din interiorul carcasei bateriei. Partea superioară a bateriei s-a desprins, împrăștiind acid sulfuric peste tot. Din fericire, personalul purta ochelari și echipament de protecție. În caz contrar, s-ar fi putut produce arsuri grave.

La conectarea și deconectarea echipamentului de încărcare a unei baterii, asigurați-vă că ultima conexiune (sau prima întrerupere a circuitului) se realizează la o distanță suficientă față de baterie, astfel încât, orice scânteie rezultată să nu conducă la aprinderea hidrogenului.

## **12 - Conductori și dielectrics**

### **1. Fizica conductorilor și a dielectricilor**

- Conductibilitatea electrică a materialelor este determinată de configurația electronilor în cadrul atomilor și moleculelor materialului respectiv
- Electronii ce se deplasează printr-un conductor determină o cădere de tensiune în lungimea acelui conductor

#### **Definiția conductorilor și a dielectricilor**

Ar trebui să fiți deja familiarizați cu legătura ce există între conductivitatea electrică și tipul materialului. Acele materiale ce permit trecerea ușoară a electronilor liberi, poartă numele de conductori, pe când cele ce se opun trecerii electronilor prin ele, poartă numele de materiale dielectrice.

#### **Explicația științifică a comportamentului materialelor**

Din păcate, teoriile științifice ce explică motivul pentru care unele materiale sunt conductoare iar altele nu, sunt destul de complexe, și conțin explicații despre modul de aranjare al electronilor în jurul nucleelor atomilor.



Contrar modelului „planetar” atât de răspândit, conform căruia electronii se deplasează în jurul nucleului atomului precum niște bucăți de materie sub forma orbitelor eliptice, electronii nu se comportă deloc precum niște bucăți de materie.

De fapt, electronii posedă atât caracteristici ale particulelor cât și ale undelor, comportamentul lor fiind determinat de plasarea lor în zona distincte din jurul nucleului, zone denumite straturi sau substraturi. Electronii pot ocupa aceste zone doar într-o anumită bandă de energie, în funcție de zona respectivă și de prezența altor electroni. Dacă electronii s-ar comporta într-adevăr precum niște planete ținute pe orbita nucleului de către atracția electrostatică, iar comportamentul lor fiind descris în acest caz de aceleași legi ce descriu mișcarea planetelor adevărate, atunci nu ar exista nicio distincție reală între materialele conductoare și dielectrice, iar legăturile chimice dintre atomi nu ar exista sub forma pe care o cunoaștem în acest moment. Aceste fenomene se datorează prin urmare naturii discrete, cuantificate a energiei electronilor și poziționării acestora, așa cum sunt ele descrise de fizica cuantică.

### **Nivele energetice**

Atunci când un electron este liber să treacă într-o stare energetică mai mare în jurul nucleului atomului (datorită plasării acestuia într-un anumit strat), acesta este liber să se „desprindă” de atomul său și să constituie o parte a curentului electric prin substanța din care face parte atomul respectiv. Acest scenariu este tipic materialelor conductoare. Dacă limitările cuantice impuse unui electron nu-i permit această liberare, se consideră că electronul este „legat” și nu se poate desprinde de atom (cel puțin, nu ușor) pentru a lua parte la curentul total din substanță. Acest scenariu este tipic materialelor dielectrice (izolatoare).

### **Stratul de valență**

În unele texte de specialitate este afirmat faptul că atât conductivitatea cât și non-conductivitatea unui element este determinată exclusiv de numărul electronilor din stratul de valență (stratul exterior al atomului). Această explicație este însă o simplificare exagerată, fapt ce devine aparent în momentul în care consultăm tabelul periodic al elementelor și comparăm conductivitatea materialelor cu numărul electronilor de valență (numărul electronilor de pe ultimul strat). Adevărata complexitate a problemei este scoasă la lumină atunci când luăm în considerare conductivitatea moleculelor (mai mulți atomi legați între ei prin intermediul activității electronilor).

### **Exemplu**

Un exemplu pertinent în acest sens este carbonul, ce formează două materiale de conductivități total diferite: grafitul și diamantul. Grafitul este un conductor mediu de electricitate, pe când diamantul este practic un dielectric; tehnic însă, diamantul este clasificat ca și semiconductor - material ce se comportă precum un dielectric în forma sa pură, dar poate conduce la temperaturi înalte sau/și sub influența impurităților. Atât grafitul cât și diamantul sunt compuse din exact aceleași tipuri de atomi, și anume, din atomi de carbon ce conțin 6 protoni, 6

neutroni și 6 electroni fiecare. Diferența fundamentală dintre cele două tipuri de materiale o constituie modul de aranjare al atomilor de carbon pentru formarea structurii.

Dacă atomii de carbon formează compuși cu alte tipuri de atomi, conductivitatea electrică este din nou afectată. Carbura de siliciu (SiC), un compus al carbonului cu siliciul, prezintă un comportament neliniar: rezistența sa electrică descrește odată cu creșterea tensiunii aplicate (rezistență negativă). Compușii pe bază de hidrocarburi, precum produsele petroliere, sunt în general dielectrice foarte buni.

După cum putem vedea, simpla numărare a electronilor de valență a unui atom nu este un indicator foarte bun pentru conductivitatea electrică a materialului în cauză.

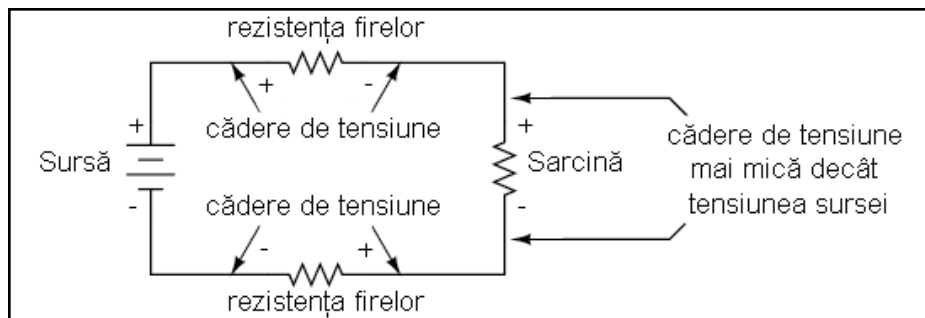
## Toate metalele sunt bune conductoare de electricitate

Toate elementele metalice sunt bune conductoare de electricitate, datorită tipului de legături dintre atomi. Electronii atomilor metalelor sunt liberi să se deplaseze între nivelurile energetice, astfel că aceștia „plutesc” liber între diferitele nuclee din componența substanței, fiind „motivați” foarte ușor de prezența unui câmp electric. De fapt, electronii sunt într-atât de mobili încât ne putem imagina că nucleele atomilor „plutesc într-o mare de electroni”. Această mobilitate este răspunzătoare și de alte proprietăți bine cunoscute ale metalelor: conductivitate termică, maleabilitate și ductilitate.

Din fericire, fizica din spatele tuturor acestor fenomene este în mare parte irelevantă pentru scopul acestei cărți, deși o înțelegere a principiilor fizice ce stau la baza funcționării circuitelor electrice sau electronice reprezintă un atu extrem de important în orice împrejurare.

## Rezistența conductorilor și căderea de tensiuni în lungul acestora

Un pas important în „stăpânirea” curentului electric, este construirea căilor conductoare necesare deplasării electronilor și controlul acestora prin intermediul rezistențelor. De asemenea, este la fel de importantă prevenirea deplasării electronilor în locuri nedorite, folosind materiale dielectrice. Totuși, nu toți conductorii sunt la fel; același lucru este valabil și în cazul dielectricilor. Trebuie să înțelegem prin urmare unele caracteristici principale ale conductorilor și dielectricilor, pentru a le putea aplica în circuitele reale.



Aproape toți conductorii posedă o anumită rezistență măsurabilă (în afară de supraconductoare). În mod normal, presupunem că rezistența conductorilor dintr-un circuit este zero, iar curentul ce trece prin ei nu prezintă nicio

cădere de tensiune. În realitate, va exista tot timpul o cădere de tensiune în lungul conductorilor, fie că o dorim sau nu.

Pentru a putea calcula aceste căderi de tensiune în oricare circuit, trebuie să putem determina rezistența oricăror conductori, cunoscând materialul din care este confecționat, diametrul precum și lungimea acestuia, lucru ce-l vom explora în următoarele capitole.

## 2. Mărimea și amperajul conductorilor

- Deplasarea electronilor se realizează mai ușor prin conductori cu diametru mare decât prin conductori cu diametru mic, datorită ariei secțiunii transversale prin care trebuie să treacă
- Amperajul unui conductor reprezintă curentul maxim pe care un conductor îl poate susține, fără a duce la distrugerea acestuia

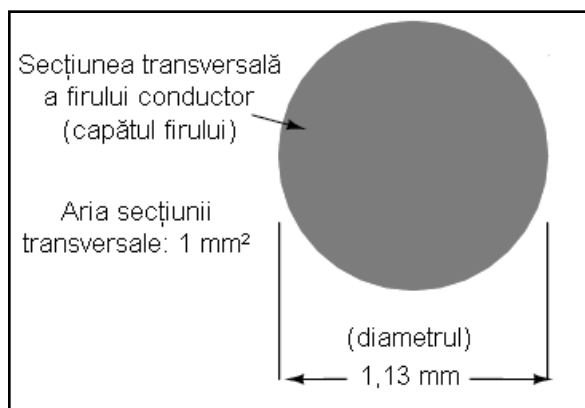
### Diametrul conductorilor și deplasarea electronilor

Ar trebui să ne putem da seama de faptul că lichidele ce curg prin conducte cu diametru mare trec mai ușor decât lichidele ce curg prin conducte de diametru mic (ca și exemplu practic, încercați să beți un lichid folosind paie de diametre diferite). Același principiu general se aplică și în cazul deplasării electronilor prin conductori: cu cât secțiunea transversală a conductorului (grosimea) este mai mare, cu atât există mai mult loc pentru deplasarea electronilor, prin urmare, o rezistență electrică mai mică.

### Conductoare solide și răsucite

Conductoarele electrice sunt de obicei rotunde, deși există câteva excepții de la această regulă, și se confecționează în două variante de bază: solid și răsucit. Conductoarele de cupru solide sunt exact asta: un singur fir de cupru pe toată lungimea cablului. Cele răsucite sunt formate din mai multe fire solide de cupru răsucite împreună pentru a forma un singur conductor mai mare.

Cel mai mare avantaj al cablurilor răsucite constă în flexibilitatea lor mecanică, fiind capabile să suporte îndoituri și răsuciri repetate mult mai bine decât un singur fir de cupru; acesta din urmă tinde să „îmbătrânească” și să se deterioreze (rupă) cu timpul.



### Mărimea conductorilor - aria secțiunii transversale

Mărimea firelor poate fi măsurată în mai multe moduri. Am putea vorbi despre diametrul firului, dar, din moment ce

elementul cel mai important legat de deplasarea electronilor este de fapt aria secțiunii transversale, cel mai corect este să desemnăm mărimea unui fir prin intermediul acestei arii.

Desigur, secțiunea transversală a firului de sus nu este reprezentată la scară. Diametrul firului este de 1,13 mm. Calculând aria secțiunii transversale cu formula de mai jos, obținem rezultatul de 1 mm<sup>2</sup>:

$$A = \pi r^2 = 3,14 \cdot \left(\frac{1,13}{2}\right)^2 = 1 \text{ mm}^2$$

## **Bare metalice conductoare**

Pentru anumite aplicații ce utilizează curenți mari, dimensiunea maximă practică a firelor circulare nu este suficientă. În aceste situații se folosesc bare metalice pe post de conductori. Acestea sunt realizate în general din cupru sau aluminiu, și de cele mai multe ori nu sunt izolate. Cea mai întâlnită formă este cea rectangulară, dar nu este singura.

## **Amperajul conductorilor**

Cu cât aria secțiunii transversale a conductorului este mai mică, cu atât este mai mare rezistența sa pentru aceeași lungime, toți ceilalți factori fiind constanți. Un conductor cu o rezistență mai mare va disipa o cantitate mai mare de energie sub formă de căldură, oricare ar fi valoarea curentului, puterea fiind egală cu  $P = I^2 R$ .

Puterea disipată într-o rezistență se manifestă sub formă de căldură, iar căldura excesivă poate distruge conductorul, cât și obiectele din jurul acestuia, și în special materialul izolant ce se poate topi și chiar arde. Conductorii mai subțiri, prin urmare, vor tolera un curent de o valoare mai mică decât conductorii groși, toți ceilalți factori rămânând constanți. Curentul maxim pe care un conductor îl poate susține, fără a duce la distrugerea acestuia, poartă numele de amperaj.

Tabelele tipice pentru amperajul cablurilor descriu curenții maximi pentru diferite valori și aplicații ale acestora. Deși punctul de topire al cuprului impune o limită amperajului conductorului, materialele folosite de obicei la izolarea acestora posedă puncte de topire mult sub această temperatură; prin urmare, limitările amperajului iau practic în calcul limitele termice ale izolației. Căderea de tensiune datorată rezistenței excesive a conductorului este de asemenea un factor în alegerea tipului de conductori dintr-un circuit, dar această valoare se calculează prin alte metode specifice.

## **3. Siguranțe fuzibile**

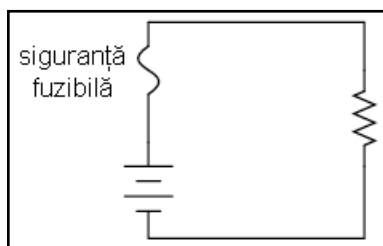
- Siguranța fuzibilă este un conductor electric subțire, proiectat a se topi și separa în două părți, cu scopul de a deschide un circuit în cazul apariției unor supra-curenți
- Întrerupătorul automat este un întrerupător special conceput pentru deschiderea automată a circuitului în cazul apariției unui supra-curent. Aceștia se pot reutiliza prin re-închiderea circuitului
- Dispozitivele de siguranță într-un circuit cu împământare se instalează pe faza acestuia și nu pe neutru

În mod normal, amperajul unui conductor reprezintă o limită a circuitului electric ce nu trebuie depășită intenționat. Siguranțele fuzibile sunt proiectate tocmai pentru a acționa în cazul unor astfel de „supra-curenți”. O siguranță fuzibilă nu este altceva decât un fir conductor scurt, proiectat astfel încât, în situația unui curent excesiv, acesta să se separe prin topire, deschizând circuitul.

## Modul de conectare în circuit

Siguranțele fuzibile se conectează tot timpul în serie cu componentul sau componentele ce necesită o protecția la supra-curent, astfel încât, în cazul deschiderii circuitului prin topirea siguranței, curentul prin toate componentele să scadă la zero. Desigur, o siguranță fuzibilă conectată pe o ramură a unui circuit paralel, nu va afecta curentul prin celelalte ramuri.

## Simbol și prezentare



Simbolul siguranței fuzibile pe care îl vom folosi, este cel în formă de „S”, precum în figura alăturată.

În mod normal, firul conductor este acoperit de un înveliș protector pentru minimizarea pericolelor arcului electric în cazul deschiderii bruște a circuitului. În cazul siguranțelor din locuință clasice, „lițele” sunt protejate de un patron din ceramică. Siguranțele fuzibile folosite în cazul autoturismelor sunt transparente, astfel încât elementul fuzibil poate fi observat direct.

Deoarece siguranțele fuzibile sunt proiectate pentru a se „defecta” în cazul în care limita maximă de curent din circuit este depășită, este ideal ca acestea să poată fi îndepărtate și înlocuite cu ușurință din circuit. Acest lucru înseamnă că siguranțele fuzibile vor fi introduse într-o cutie de siguranțe și nu vor fi lipite sau prinse direct pe circuit.

## Întrerupătoare automate

Înterupătoarele automate sunt cele mai utilizate dispozitive pentru protecția la supra-curent. Aceste dispozitive sunt niște întrerupătoare proiectate special pentru deschiderea automată și oprirea alimentării cu energie electrică în cazul apariției unui supra-curent. Întrerupătoarele automate mici, precum cele din locuințe, comerciale și pentru iluminat, funcționează pe bază termică. Acestea conțin o bandă bimetalică (o bandă subțire formată din două metale puse cap la cap). La trecerea curentului din circuit prin aceasta, banda bimetalică se curbează sub acțiunea căldurii disipate.

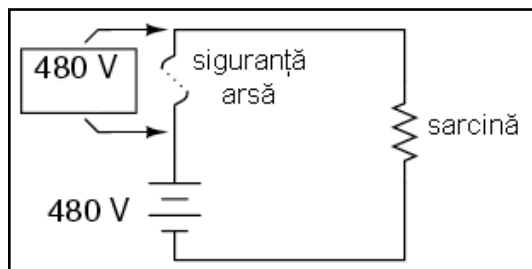
Atunci când forța generată de bandă este suficient de mare (datorită supra-curentului ce o încălzește), mecanismul de întrerupere este acționat iar întrerupătorul va deschide circuitul. Întrerupătoarele automate mai mari, sunt acționate de forța câmpului magnetic produs de conductoarele străbătute de curent din interiorul acestuia, sau pot fi acționate de dispozitive exterioare (relee de protecție) ce monitorizează curentul din circuit. În ambele cazuri, dispozitivul nu se distruge, ci doar se deschide; acesta poate fi reînchis prin acționarea unei manete și nu necesită nicio înlocuire precum este cazul siguranțelor fuzibile.

## Rezistența electrică a siguranțelor fuzibile

Siguranțele fuzibile sunt catalogate după curentul maxim admis prin ele, și anume, în amperi. Cu toate că funcționarea acestora depinde de generarea căldurii în cazul curenților excesivi de către propria lor rezistență, acestea sunt construite astfel încât să contribuie cu o rezistență adițională neglijabilă în circuitul protejat. Acest lucru se realizează printr-un fir conductor cât mai scurt posibil.

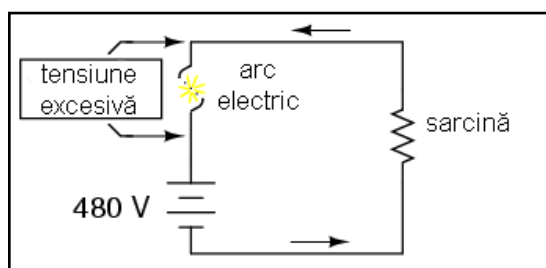
La fel cum amperajul unui conductor nu depinde de lungimea sa, un fir folosit pentru construirea siguranței fuzibile se va topi la un anumit curent indiferent de lungimea acestuia. Din moment ce lungimea nu reprezintă un factor pentru capacitatea maximă în curent a siguranței, cu cât această lungime este mai mică, cu atât rezistența dintre cele două capete ale firului va fi mai mică.

## Apariția arcului electric



Totuși, trebuie luată în considerare și situația în care o siguranță fuzibilă se topește („sare”): capetele libere ale firului conductor vor fi separate în acest caz de un spațiu liber și o diferență de potențial (tensiune) între acestea.

Dacă firul nu este destul de lung, într-un circuit de tensiune înaltă, este posibilă ionizarea aerului dintre capete și re-închiderea circuitului prin acest mediu. Atunci când siguranța se arde, întreaga cădere de tensiune a sursei de alimentare se va regăsi pe aceasta, iar curentul din circuit va fi zero.



În cazul în care căderea de tensiune la bornele unei siguranțe fuzibile topite este suficient de mare, este posibilă apariția arcului electric ce duce la apariția unui curent în circuit, lucru pe care nu-l dorim.

Prin urmare, siguranțele fuzibile sunt catalogate atât în funcție de curentul de „deschidere” cât și în funcție de tensiunea de străpungere a dielectricului existent între cele două capete după arderea acestuia.

## Siguranțe fuzibile cu temporizare

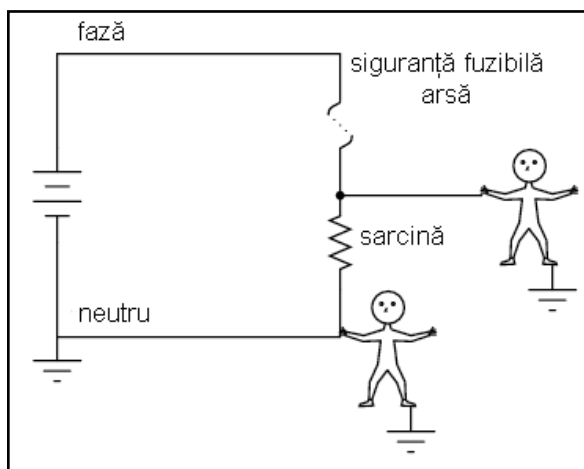
La apariția unui curent de 35 A printr-o siguranță fuzibilă de 30 A, aceasta se poate arde instant sau poate prezenta o anumită durată de timp până la topirea conductorului metalic, în funcție de tipul dispozitivului. Unele siguranțe sunt proiectate să se ardă extrem de repede, pe când altele necesită un timp mai îndelungat de „deschidere”, sau chiar amânarea deschiderii, în funcție de aplicație. Acestea din urmă poartă denumirea de siguranțe fuzibile lente, spre deosebire de celelalte, ce pot fi catalogate drept siguranțe fuzibile rapide.

O aplicație clasică a siguranțelor fuzibile lente este în cazul protecției motoarelor electrice, unde curenții de pornire pot ajunge până la valori de zece ori mai mari decât curenții normali de funcționare. Dacă ar fi să folosim cele rapide, nu am putea porni motorul în primul rând, deoarece curenții de pornire foarte mari ar duce la distrugerea imediată a siguranței fuzibile. În cazul siguranțelor lente, elementul fuzibil este astfel proiectat încât să prezinte o masă mai mare (dar nu și amperaj mai mare) decât o siguranță rapidă, ceea ce înseamnă că încălzirea acestuia va dura un timp mai îndelungat, ajungând până la urmă la aceeași temperatură, indiferent de valoarea curentului.

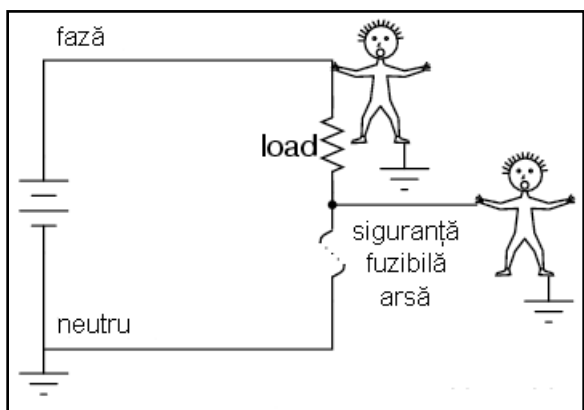
Pe de altă parte, există siguranțe fuzibile semiconductoare, proiectate pentru o deschidere extrem de rapidă în cazul apariției unei situații de supra-curent. Dispozitivele semiconductoare, precum tranzistorii, tind să fie foarte sensibile la supra-curenți, prin urmare, în cazul acestora este nevoie de dispozitive de o protecție rapidă în circuitele de putere mare.

## Introducerea corectă în circuit a siguranțelor fuzibile

Siguranțele fuzibile trebuie poziționate pe faza circuitului, în cazul circuitelor cu împământare. Scopul este oprirea curentului prin sarcini în cazul în care siguranța se deschide. Putem face o comparație între cele două figuri de mai jos, pentru a vedea diferența dintre utilizarea unei siguranțe pe fază și utilizarea aceleiași siguranțe pe neutru.



În acest caz, când siguranța este introdusă în faza circuitului, la deschiderea acesteia, căderea de tensiune între oricare punct al sarcinii și pământ va fi zero. Atingerea circuitului este sigură în acest caz, eliminând practic pericolul electrocutării.



În cazul în care siguranța fuzibilă este introdusă pe neutrul circuitului, în cazul deschiderii acesteia, va exista o tensiune periculoasă între oricare punct al sarcinii și pământ. Atingerea circuitului în acest caz se poate dovedi periculoasă din punct de vedere al electrocutării.

Indiferent dacă folosim siguranțe fuzibile simple sau întrerupătoare automate, poziționarea corectă a acestora în circuit se face conform celor spuse mai sus, și anume: dispozitivul de siguranța trebuie plasat pe partea de putere a circuitului și nu conectat la pământ.

## Observații

Cu toate că protecția la supra-curent a circuitelor poate oferi într-o oarecare măsură o anumită siguranță la electrocutare în anumite condiții, trebuie înțeles faptul că aceste dispozitive nu sunt concepute în acest scop. Nici siguranțele fuzibile și nici întrerupătoarele automate nu au fost proiectate cu scopul deschiderii în cazul electrocutării persoanei care atinge circuitul, ci, sunt proiectate pentru deschiderea în cazul supra-încălzirii conductorilor circuitului. Dispozitivele de protecție la supra-curent, protejează în principal conductorii de la distrugerea prin supra-încălzire și a pericolelor asociate cu conductori foarte încinși, și în alt doilea rând, protejează anumite echipamente precum sarcini și generatoare.

Din moment ce valorile curenților necesari pentru electrocutare sunt mult mai mici decât curenții normali a sarcinilor din circuit, o condiție de supra-curent nu indică neapărat un pericol de electrocutare, ci aceasta poate apărea chiar și atunci când circuitul funcționează la parametrii normali. Desigur, există dispozitive special concepute pentru protecția la electrocutare (detectoare de curenți de defect), dar aceste dispozitive sunt utilizate stric pentru acel scop și nu au nicio legătură cu protecția conductorilor la supra-încălzire.

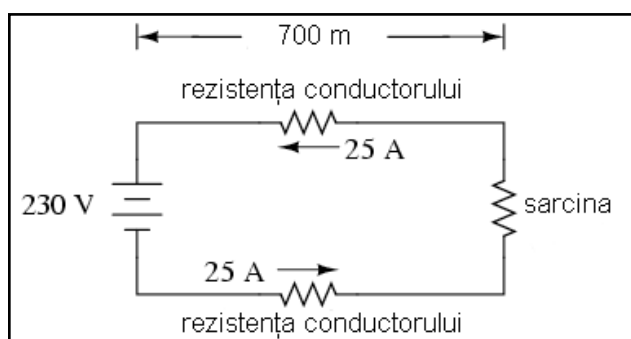


## 4. Rezistivitatea electrică

- Rezistența unui conductor crește odată cu creșterea lungimii sale și descreșterea ariei secțiunii transversale, toți ceilalți factorii fiind constanți
- Rezistivitatea electrică ( $\rho$ ) este o proprietate a ~~oricui~~ material conductor, o mărime utilizată pentru determinarea rezistenței dintre cele două capete ale unui conductor, atunci când se cunosc lungimea și aria secțiunii transversale cu formula:  $R = \rho l/A$
- Conductivitatea electrică caracterizează capacitatea unui material de a permite deplasarea electronilor prin acesta

Amperajul unui conductor, bazat pe potențialul curentului de a distruge conductorul, nu este cea mai bună metodă de reprezentare a rezistenței acestuia. Există situații în care căderea de tensiune creată de rezistența unui conductor în lungul acestuia duce la apariția altor probleme decât evitarea incendiilor.

### Exemplu



De exemplu, să presupunem că proiectăm un circuit unde căderea de tensiune la bornele unui anumit component este extrem de importantă și nu trebuie să scadă sub o anumită limită. Dacă acest lucru se întâmplă, căderea de tensiune datorată rezistenței conductorului poate duce la apariția unei probleme tehnice a aplicației în cauză.

În circuitul alăturat, sarcina necesită o cădere de tensiune de cel puțin 220 V în cazul unei surse de tensiune este de 230 V. În acest caz, trebuie să ne asigurăm de faptul că rezistența conductorilor nu va genera o cădere de tensiune mai mare de 10 V în lungul acestora. Luând în considerare ambii conductori (dus și întors), căderea de tensiune maximă admisă în lungul unui conductor este de 5 V. Utilizând legea lui Ohm, putem determina rezistența maximă admisă pentru fiecare conductor în parte:

$$R = \frac{E}{I} = \frac{5 \text{ V}}{25 \text{ A}} = 0,2 \Omega$$

### Formula de calcul a rezistenței conductorului

Știm că lungimea fiecărui conductor este de 700 m, dar cum putem determina valoarea rezistenței pentru o anumită lungime și diametru al firului. Pentru acest lucru avem nevoie de o altă formulă, și anume:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Prin urmare, rezistența electrică a unui conductor depinde de rezistivitatea acestuia, simbolizată prin litera grecească  $\rho$  (ro), de lungimea conductorului ( $l$ ) și de aria secțiunii transversale ( $A$ ). Urmărind ecuația de mai sus, putem trage concluzia (deja știută) că rezistența conductorului crește odată cu lungimea acestuia și scade odată cu creșterea ariei secțiunii transversale. Rezistivitatea este o proprietate specifică unui anumit material de a se opune trecerii curentului prin acesta, iar unitatea sa de măsură este ohm-metru ( $\Omega \cdot m$ ).

### Tabelul rezistivităților

| Material   | Element / Aliaj | Rezistivitatea ( $10^{-8} \Omega \cdot m$ ) |
|------------|-----------------|---------------------------------------------|
| Nicrom     | Aliaj           | 112,2                                       |
| Nicrom V   | Aliaj           | 108,2                                       |
| Manganină  | Aliaj           | 48,21                                       |
| Constantan | Aliaj           | 45,38                                       |
| Oțel       | Aliaj           | 16,62                                       |
| Platină    | Element         | 10,5                                        |
| Fier       | Element         | 9,61                                        |
| Nickel     | Element         | 6,93                                        |
| Zinc       | Element         | 5,90                                        |
| Molibden   | Element         | 5,34                                        |
| Tungsten   | Element         | 5,28                                        |
| Aluminiu   | Element         | 2,65                                        |
| Aur        | Element         | 2,21                                        |
| Cupru      | Element         | 1,67                                        |
| Argint     | Element         | 1,58                                        |

Rezistivitatea câtorva tipuri de materiale conductoare, la temperatura de  $20^{\circ} C$  este dată în tabelul alăturat. Putem observa că printre cele mai scăzute valori (ceea ce se traduce printr-o rezistență scăzută) o are cuprul, imediat după argint.

Revenind la circuitul din exemplul de mai sus, am calculat o rezistență de  $0,2\Omega$  pentru o lungime de 700 m. Presupunând că materialul folosit este cupru (cel mai utilizat material pentru confecționarea conductorilor electrici), putem determina aria secțiunii transversale necesare pentru conductorii din circuit:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$A = \rho \frac{l}{R} = 1,67 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \cdot \frac{700 m}{0,2 \Omega} = 58,4 mm^2$$

O secțiune transversală de  $54,4 mm^2$ , se traduce printr-un diametru al conductorului circular de 8,6 mm. Dacă luăm un tabel al conductorilor, putem observa că cea mai apropiată valoare mai mare decât  $54,4$  este  $70 mm^2$ , iar rezistența conductorului la o lungime de 1.000 m este de  $0,268\Omega$ . Pentru exemplu nostru, la o lungime de 700 m, aceasta înseamnă o rezistență a conductorului de  $0,182\Omega$ , sub valoarea maximă impusă de  $0,2\Omega$ ; conductorul ales este prin urmare potrivit pentru aplicația dată.

### Conductivitatea electrică

Conductivitatea electrică, denumită și conductibilitate electrică, caracterizează capacitatea unui material de a permite deplasarea electronilor prin acesta. Simbolul matematic este  $\sigma$  (sigma), iar unitatea ~~dăsură~~ este Siemens pe metru ( $S \cdot m^{-1}$ ). Practic, conductivitatea electrică este inversa rezistivității electrice:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

## 5. Coeficientul de temperatură al rezistenței

- Rezistența majorității materialelor conductoare variază odată cu variația temperaturii de operare
- Coeficientul variației cu temperatura ( $\alpha$ ) reprezintă factorul de variație pe grad Celsius al rezistenței materialelor conductoare
- Formula pentru determinarea rezistenței unui conductor aflat la o temperatură diferită față de temperatura de referință specificată în tabel, este următoarea:  $R = R_{ref}[1 + \alpha(T - T_{ref})]$

Tabelul rezistivităților diferitelor materiale, prezentat în secțiunea precedentă, s-a referit doar la temperatura de 20°. Prin urmare, după cum ați putut bănuî, rezistivitatea electrică a materialelor depinde de temperatură.

### Formula de calcul a rezistenței

Valorile rezistențelor conductorilor aflați la temperaturi diferite față de temperatura standard (20° tipic), din tabelul rezistivităților, se calculează printr-o altă formulă decât formula anterioară, și anume:

$$R = R_{ref}[1 + \alpha(T - T_{ref})]$$

unde,

$R$  = rezistența conductorului la temperatura „ $T$ ”

$R_{ref}$  = Rezistența conductorului la temperatura de referință,  $T_{ref}$ , egală cu 20°C în mod uzual, dar poate fi și 0°C

$\alpha$  = coeficientul de temperatură al rezistenței specific pentru materialul conductor

$T$  = temperatura conductorului (°C)

$T_{ref}$  = temperatura de referință pentru care  $\alpha$  este specificat

Se poate observa din relația de mai sus, că în cazul în care temperatura la care se află conductorul este exact temperatura de referință (20°C), atunci rezistența conductorului este exact rezistența de referință așa cum este ea calculată din tabelul rezistivităților materialelor cu formula:  $R = \rho l/A$ .

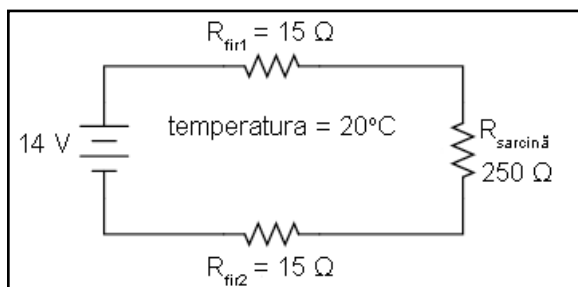
## Definirea coeficientului de temperatură

Constanta  $\alpha$ , poartă numele de coeficientul de temperatură al rezistenței, și simbolizează variația rezistenței cu temperatura; acest coeficient este specific fiecărui tip de material. Pentru metale pure este un număr pozitiv, ceea ce înseamnă că rezistența crește odată cu creșterea temperaturii. Pentru carbon, siliciu și germaniu, acest coeficient este negativ, ceea ce înseamnă că rezistența scade odată cu creșterea temperaturii. Pentru anumite aliaje, coeficientul de temperatură al rezistenței este foarte apropiat de valoarea zero, ceea ce înseamnă că rezistența aproape că nu se modifică odată cu variația temperaturii.

| Material   | Element / Aliaj | $\alpha$       |
|------------|-----------------|----------------|
| Nichel     | Element         | 0.005866       |
| Fier       | Element         | 0.005671       |
| Molibden   | Element         | 0.004579       |
| Tungsten   | Element         | 0.004403       |
| Aluminiu   | Element         | 0.004308       |
| Cupru      | Element         | 0.004041       |
| Argint     | Element         | 0.003819       |
| Platină    | Element         | 0.003729       |
| Zinc       | Element         | 0.003847       |
| Aur        | Element         | 0.003715       |
| Oțel       | Aliaj           | 0.003000       |
| Nicrom     | Aliaj           | 0.000170       |
| Nicrom V   | Aliaj           | 0.000130       |
| Manganină  | Aliaj           | $\pm 0.000015$ |
| Constantan | Aliaj           | - 0.000074     |

În tabelul alăturat sunt prezentate câteva valori ale coeficientului  $\alpha$  pentru câteva metale uzuale, pure sau aliaje, pentru temperatura de referință ( $T_{\text{ref}}$ ) de 20°C

## Exemplu



Să luăm un circuit practic pentru a vedea efectele temperaturii asupra rezistenței și implicit asupra performanței circuitului.

| Mărime | Fir <sub>1</sub> | Fir <sub>2</sub> | Sarcină | Total | Unitate |
|--------|------------------|------------------|---------|-------|---------|
| E      | 0,75             | 0,75             | 12,5    | 14    | V       |
| I      | 50 m             | 50 m             | 50 m    | 50 m  | A       |
| R      | 15               | 15               | 250     | 280   | Ω       |

Rezistența totală a conductorilor din acest circuit este de 30 Ω ( $R_{\text{fir1}} + R_{\text{fir2}}$ ) la temperatura standard de 20°C. Folosind metoda tabelului pentru analiza circuitului, obținem valorile alăturate.

La 20°C, obținem o cădere de tensiune de 12,5 V la bornele sarcinii și o cădere de tensiune totală de 1,5 V (0,75 V + 0,75 V) în lungul conductoarelor datorită rezistenței acestora.

Dacă temperatura ar crește la 35°C, putem vedea ce se întâmplă cu rezistențele fiecărui conductor. Presupunând că materialul conductor este cupru ( $\alpha = 0,004041$ ), obținem următorul rezultat:

$$R = R_{\text{ref}}[1 + \alpha(T - T_{\text{ref}})] = 15 \Omega[1 + 0,004041(35^\circ - 20^\circ)] = 15,9 \Omega$$

| Mărime | Fir <sub>1</sub> | Fir <sub>2</sub> | Sarcină | Total   | Unitate |
|--------|------------------|------------------|---------|---------|---------|
| E      | 0,79             | 0,79             | 12,42   | 14      | V       |
| I      | 49,67 m          | 49,67 m          | 49,67 m | 49,67 m | A       |
| R      | 15,9             | 15,9             | 250     | 281,82  | Ω       |

Reanalizând circuitul de mai sus cu noile valori, putem vedea efectele creșterii temperaturii asupra circuitului.

După cum se poate observa, tensiunea la bornele sarcinii a scăzut de la 12,5 V la 12,42 V, iar căderea de tensiune în lungul conductorilor a crescut de la 0,75 V la 0,79 V ca și consecință a creșterii temperaturii.

Chiar dacă variațiile par mici, acestea se pot dovedi semnificative în cazul liniilor electrice de transport ce se pot întinde pe kilometri întregi între centralele electrice și stațiile de transformare respectiv între stațiile de transformare și consumatori.

## 6. Supraconductibilitatea

- Materialele supraconductoare sunt materiale ce o rezistență electrică de exact zero ohmi
- Toate materialele supraconductoare trebuie supra-răcite pentru a-și manifesta proprietatea de rezistență zero. Aceste temperaturi sunt în jurul valori de zero absolut (aproximativ -273°C)
- Temperatura de tranziție, sau temperatura critică, este temperatura minimă la care trebuie adus materialul supraconductor pentru a intra în faza de supraconducție

În cazul răcirii la temperaturi extrem de scăzute, temperaturi apropiate de zero absolut (aproximativ - 273°C), rezistența conductorilor electrici scade la zero. Trebuie înțeles faptul că supraconductibilitatea nu este o extensie a tendinței conductorilor de pierdere a rezistenței cu descreșterea temperaturii, ci reprezintă o modificare cuantică bruscă a rezistivității de la o valoare finită la zero. Un material supraconductor prezintă o rezistență electrică de exact 0  $\Omega$ , nu doar o valoare foarte mică.

## **Scurt istoric**

Acest fenomen a fost descoperit în 1911 de către H. Kamerlingh Onnes. Cu doar trei ani înainte, Onnes a dezvoltat o metodă de lichefiere a heliului, ce a permis existența unui mediu pentru supra-răcirea experimentală a diferitelor obiecte cu doar câteva grade peste nivelul de zero absolut. Investigând variația rezistenței electrice a mercurului atunci când este încălzit la această temperatură joasă, Onnes a descoperit că rezistența acestuia scade la zero aproximativ sub de punctul de fierbere al heliului.

## **Explicația supraconductibilității**

Nu este încă înțeles exact motivul pentru care materialele supraconductoare se comportă în acest fel. Una dintre teorii susține că electronii se deplasează în grupuri (grupuri Cooper) prin conductor și nu individual cum este cazul deplasării normale ale electronilor; acest lucru ar avea o legătură directă cu deplasarea lor fără frecare. Este interesant de menționat faptul că și în cazul fluidelor există un fenomen similar, denumit suprafluiditate, rezultând într-o curgere fără frecare a moleculelor, în special în cazul heliului lichid.

## **Utilitatea supraconductorilor**

Supraconductibilitatea promite un comportament ieșit din comun al circuitelor electrice. Dacă rezistența conductorilor ar putea fi eliminată complet, nu ar mai există pierderi de putere sau ineficiențe în sistemele de putere datorate rezistențelor parazite. Eficiența motoarelor electrice ar putea crește spre 100%. Componente precum condensatorul sau bobina, ale căror caracteristici sunt „stricate” de rezistența inherentă a conductorilor din care sunt construite, ar putea fi considerate ideale în adevăratul sens al cuvântului. Deși există astfel de aplicații, utilitatea lor practică este destul de scăzută datorită problemelor întâmpinate cu menținerea temperaturilor extrem de scăzute.

## **Temperatura de tranziție**

Pragul de temperatură la care materialul trece din faza de conductibilitate normală la supraconductibilitate, poartă numele de temperatură de tranziție, sau temperatură critică. Pentru supraconductorii „clasici”, temperatura de tranziție se situează în jurul valorii de zero absolut. Ideal, un supraconductor ar trebui să funcționeze la

temperatura camerei, sau cel puțin la o temperatură suficient de „ridică” încât să poată fi menținută cu echipamente de răcire relativ ieftine.

| Material        | Element / Aliaj | Temperatura critică (°C) |
|-----------------|-----------------|--------------------------|
| Aluminiu        | Element         | -271,8                   |
| Cadmiu          | Element         | -272,44                  |
| Plumb           | Element         | -265,8                   |
| Mercur          | Element         | -268,84                  |
| Niobiu          | Element         | -264,3                   |
| Toriu           | Element         | -271,63                  |
| Staniu          | Element         | -269,28                  |
| Titaniu         | Element         | -272,61                  |
| Uraniu          | Element         | -272                     |
| Zinc            | Element         | -272,09                  |
| Niobiu / Staniu | Aliaj           | -254,9                   |

Temperaturile critice pentru câteva substanțe uzuale sunt prezentate în tabelul alăturat.

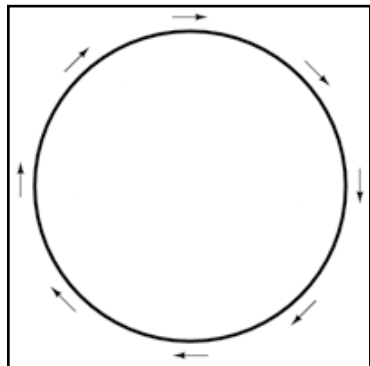
## Efectul Meissner

Materialele supraconductoare interacționează într-un mod interesant cu câmpurile magnetice. Atunci când se află în stare de supraconducție, materialele supraconductoare tind să excludă toate câmpurile magnetice, fenomen cunoscut sub numele de efect Meissner. Totuși, în cazul în care intensitatea câmpului magnetic depășește o anumită valoare critică, materialul își va pierde proprietățile supraconductoare, indiferent de temperatură. De fapt, prezența oricărui câmp magnetic în preajma acestora, tinde să scadă temperatura critică a materialului.

Acest lucru este încă un inconvenient din punct de vedere practic, din moment ce curentul electric prin orice conductor produce un câmp magnetic. Cu toate că un fir supraconductor nu posedă rezistență electrică la trecerea curentului, există o limită a valorii curentului prin acesta datorită limitei câmpului magnetic generat.

## Bucula supraconductoare

Lipsa rezistenței electrice într-un circuit supraconductor conduce la efecte unice. Într-un astfel de circuit, menținerea curenților mari este posibilă fără aplicarea niciunei tensiuni externe.



S-a demonstrat pe cale experimentală faptul că inele din materiale supraconductoare pot susține curenți prin ei ani la rând, fără aplicarea unei tensiuni. Practic, nu există o limită teoretică a perioadei de timp pentru care acești curenți pot fi susținuți într-un circuit supraconductor.

Acest efect pare a fi o formă de mișcare perpetuă. De fapt, nu există nicio lege a fizicii care să nu permită existența acestui tip de mișcare, ci doar o lege a fizicii care spune că un sistem nu poate genera mai multă energie decât consumă. În cel mai bun caz, o „mașină de mișcare perpetuă” poate doar să stocheze energie, nu să o și genereze.

## 7. Străpungerea dielectrică

- Tensiunea de străpungere sau rigiditatea dielectricului este tensiunea la care un dielectric permite trecerea unui curent, acesta comportându-se precum un conductor; spunem în acest caz ca s-a produs o străpungere a dielectricului

### Definiția străpungerii dielectrice

Electronii din interiorul atomilor materialelor dielectrice nu se pot deplasa la fel de ușor precum în cazul materialelor conductoare. Totuși, nici materialele dielectrice nu pot rezista unor tensiuni infinite de mari. Atunci când tensiunea aplicată este suficient de mare, dielectricul va ceda până la urmă „presiunii” electrice iar deplasarea electronilor va avea eventual loc prin material. Spunem în acest caz că a avut loc o străpungere a dielectricului. Față de conductori, unde curentul este direct proporțional cu tensiunea aplicată, atunci când valoarea rezistenței este fixă, curentul printr-un dielectric este neliniar: pentru tensiuni aflate sub un anumit prag, nu va exista practic nicio deplasare de electroni, dar, dacă tensiunea depășește acest prag, curentul crește extrem de rapid.

După străpungere, în funcție de material, acesta poate să nu-și mai recapete funcția de dielectric (izolator), datorită modificării structurii sale moleculare. De obicei, există un „punct critic” ce desemnează locul prin care a avut loc deplasarea electronilor în momentul străpungerii.

### Rigiditatea dielectrică

| Material              | Rigiditatea dielectrică (MV / m) |
|-----------------------|----------------------------------|
| Vid                   | 0,08                             |
| Aer                   | 0,08 - 0,3                       |
| Porțelan              | 0,16 - 0,8                       |
| Parafină              | 0,8 - 1,2                        |
| Ulei de transformator | 1,6                              |
| Bachelită             | 1,2 - 2,2                        |
| Cauciuc               | 1,8 - 2,8                        |



|        |        |
|--------|--------|
| Șelac  | 3,6    |
| Hârtie | 5      |
| Teflon | 6      |
| Sticlă | 8 - 12 |
| Mică   | 20     |

Grosimea materialului joacă un rol important în determinarea tensiunii sale de străpungere, tensiune cunoscută și sub numele de rigiditate dielectrică. Alături este prezentat un tabel cu cele mai uzuale materiale folosite pe post de dielectric în cadrul circuitelor și

dispozitivelor electrice. Rigiditatea dielectrică este exprimată în MV / m ( $10^6 \text{V} / \text{m}$ ).

## 13 - Condensatorul și câmpul electric

### 1. Câmpul, forța și fluxul magnetic și electric

- În spațiul liber dintre două sarcini electrice va exista tot timpul un câmp electric
- În spațiul liber dintre doi magneți (permanenți sau nu), va exista tot timpul un câmp magnetic
- Forța reprezintă cantitatea de împingere pe care un câmp îl exercită la o anumită distanță
- Fluxul reprezintă cantitatea totală, sau efectul, câmpului prin spațiu

#### Definiție

Atunci când între doi conductori există o tensiune electrică, spunem că există un câmp electric în spațiul dintre ei. Vorbind de câmpuri ne referim de fapt la interacțiunile ce au loc în spațiul dintre și din jurul conductorilor și nu în interiorul acestora.

Conceptul de „câmp” este cu siguranță unul destul de abstract. Cel puțin în cazul curentului electric ne putem imagina, fără prea mare dificultate, existența unor particule minuscule, denumite electroni, ce se deplasează între atomii conductorilor. Dar un „câmp” nu are nici măcar masă și poate să nu existe deloc în materie.

## Magneți și câmpuri magnetice

În ciuda aspectului abstract, putem da un exemplu destul de practic cu care majoritatea dintre noi suntem familiarizați, și anume magneții. Deși aparent nu există nicio legătură directă între două bucăți separate de magnet, există cu siguranță o forță de atracție sau de respingere în funcție de orientarea lor relativă. Această „forță” nu are nici culoare, nici masă, nici miros, iar dacă nu am observa interacțiunile dintre ei, nici nu am ști că există. În cadrul fizicii, interacțiunile ce au loc în spațiul dintre magneți poartă numele de câmpuri magnetice. Dacă plasăm pilitură de fier în jurul unui magnet, putem observa (re)orientarea acesteia în jurul liniilor de câmp; în acest fel putem avea o indicație vizuală a prezenței câmpului magnetic.

Subiectul acestui capitol sunt câmpurile electrice și condensatoarele ce utilizează acest principiu nu câmpurile magnetice, dar există multe asemănări între cele două.

## Câmpuri electrice

Mai mult ca sigur că sunteți familiarizați și cu câmpurile electrice. Un exemplu a fost dat în primul capitol, atunci când am explicat electricitatea statică și modul în care materiale precum parafina și lâna se atrag după ce au fost în prealabil frecate una de cealaltă. Din nou, fizicienii includ aceste interacțiuni în domeniul câmpurilor electrice generate de două corpuri ca rezultat al dezechilibrului de electroni dintre ele. Este suficient să spunem că prezența unei diferențe de potențial (tensiuni) între două puncte duce la apariția unui câmp electric în spațiul liber dintre acestea.

## Forța și fluxul

Câmpurile au două caracteristici principale: forța și fluxul. Forța reprezintă cantitatea de împingere pe care un câmp îl exercită la o anumită distanță, **iar** fluxul reprezintă cantitatea totală, sau efectul, câmpului prin spațiu. Forța și fluxul câmpului sunt aproximativ similare tensiunii (împingere) și curentului (curgere) printr-un conductor. Fluxul unui câmp poate întâmpina rezistență în spațiu precum un curent întâmpină rezistență într-un conductor. Cantitatea fluxului dezvoltat în spațiu este proporțională cu valoarea forței aplicate împărțită la valoarea opoziției fluxului. În cazul curentului, tipul de material conductor determină rezistența specifică la curgerea acestuia; similar,

în cazul fluxului, tipul materialului dielectric (izolator) ce separă cele două conductoare determină opoziția specifică.

## 2. Condensatorul

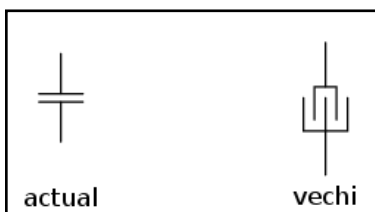
- Condensatorii reacționează împotriva variației tensiunii prin generarea sau utilizarea de curent în/din circuit în direcția necesară opunerii variației
- Când tensiunea la bornele unui condensator crește (alimentat de o baterie, de ex), aceasta se comportă precum o sarcină
- Când tensiunea la bornele unui condensator scade (conectat la o sarcină, de ex), aceasta se comportă precum o *sursă*
- Proprietatea condensatorului de a stoca energie sub formă de câmp electric (și prin urmare de a se opune variației tensiunii) poartă numele de *capacitate*. Unitatea de măsură este Farad-ul (F)
- Denumirea nouă pentru *condensator* este *capacitor*

### Definiție

În mod normal, electronii nu pot intra într-un conductor decât dacă există o cantitate egală de electroni ce părăsesc exact același conductor (analogia tubului cu mărgele). Din această cauză, conductorii trebuie conectați împreună pentru a forma un drum complet (circuit) pentru deplasarea continuă a electronilor. Ciudat este totuși faptul că, electroni adiționali pot fi „îngrămădiți” într-un conductor, fără existența unui drum de ieșire, dacă este posibilă/permisă formarea unui câmp electric în spațiul liber dintre acest conductor și un alt conductor. Numărul electronilor adiționali din conductor (sau numărul de electroni pierduți) este direct proporțional cu valoarea fluxului câmpului dintre cei doi conductori.

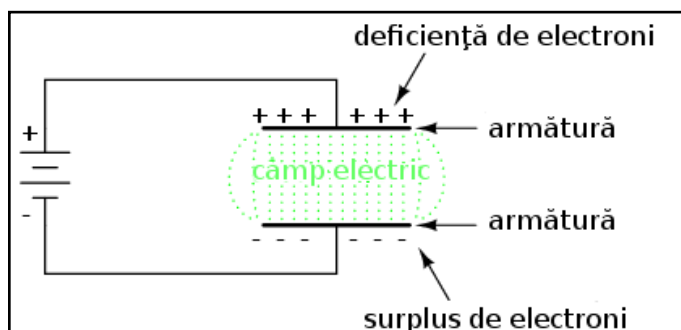
Condensatoarele sunt componente ce utilizează acest fenomen electric în funcționarea lor. Acestea sunt realizate din două armături (plăci) metalice conductoare plasate una în apropierea celeilalte, separate printr-un dielectric. Există totuși o multitudine de tipuri și moduri de construcție a condensatoarelor, în funcție de aplicația necesară.

### Simbolul condensatorului



Simbolul electric al condensatorului este prezentat în figura alăturată.

## Modul de funcționare al condensatorului



Atunci când la bornele condensatorului aplicăm o tensiune electrică, între cele două armături ia naștere un câmp electric ce permite existența unei diferențe semnificative de electroni liberi (sarcină) între cele două armături.

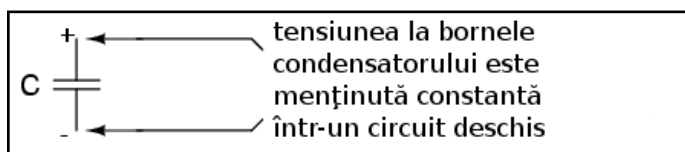
Pe măsura formării câmpului electric datorită aplicării tensiunii, electronii liberi vor fi forțați să se „adune” la terminalul negativ fiind „furați” de pe terminalul pozitiv. Această diferență de sarcină se traduce prin apariția unui stoc de energie electrică în condensator și reprezintă sarcina potențială a electronilor dintre cele două armături. Cu cât diferența numerică a electronilor între cele două armături ale unui condensator este mai mare, cu atât mai mare este fluxul câmpului și cu atât mai mare „stocul” de energie din condensator.

Deoarece condensatorii stochează energie potențială sub formă de câmp electric, comportamentul lor într-un circuit este fundamental diferit de cel al rezistorilor, cei din urmă disipând pur și simplu putere în circuit sub formă de căldură. Energia stocată într-un condensator depinde de tensiunea dintre armături precum și de alți factori pe care îi vom lua imediat în considerare. Abilitatea acestora de a stoca energie în funcție de tensiune se traduce printr-o tendință de menținere a tensiunii la un nivel constant. Cu alte cuvinte, condensatoarele tind să se opună variației căderii de tensiune. Atunci când modificăm tensiunea la bornele unui condensator, fie o mărim, fie o scădem, acesta tinde să se opună schimbării folosind curent de la sau generând curent spre sursa de variație a tensiunii, în opoziție cu variația.

## Creșterea energiei potențiale stocate de condensator

Pentru a stoca mai multă energie într-un condensator, trebuie mărită valoarea tensiunii la bornele sale. Acest lucru presupune o înmulțire a electronilor pe armătura negativă și o diminuare a lor pe cea pozitivă, lucru ce necesită existența unui curent în acea direcție. Dimpotrivă, pentru a elibera energie dintr-un condensator, trebuie scăzută valoarea tensiunii la bornele sale. Acest lucru presupune o diminuare a electronilor pe armătura negativă prin deplasarea lor spre cea pozitivă; această deplasare dă naștere, evident, unui curent în acea direcție (opusă).

Asemenea legii de mișcare a lui Isaac Newton (un obiect aflat în mișcare, tinde să rămână în mișcare; un obiect aflat în repaus tinde să rămână în repaus) ce descrie tendința obiectelor de a se opune variațiilor de viteză, putem descrie tendința unui condensator de a se opune variației tensiunii astfel: „Un condensator încărcat tinde să rămână încărcat; un condensator descărcat tinde să rămână descărcat.”

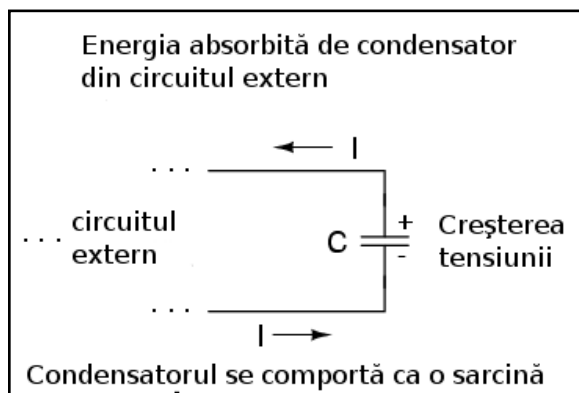


Ipoteză, un condensator (încărcat sau descărcat) lăsat neatins își va menține la infinit starea sa inițială. Doar o sursă (sau un canal) exterior de curent poate modifica

valoarea energiei stocate (implicit și a tensiunii la bornele sale) de către un condensator perfect.

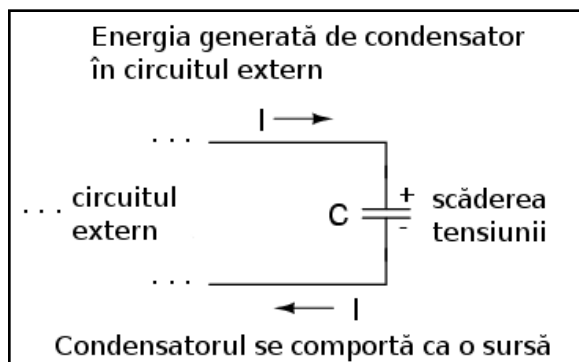
Practic, condensatoarele își vor pierde tensiunea stocată datorită imperfecțiunilor interne ce permit electronilor să se deplaseze de pe o armătură pe cealaltă. În funcție de tipul specific de condensator, timpul de „golire” poate fi foarte lung, de până la câțiva ani, pentru condensatoarele ce nu sunt deloc folosite.

## Încărcarea condensatorului; condensatorul ca o sarcină



Când tensiunea la bornele condensatorului crește, acesta utilizează curent din circuit; în acest caz condensatorul se comportă ca o sarcină și spunem că se încarcă. Observați direcția de deplasare a electronilor (curentul) față de polaritatea tensiunii.

## Descărcarea condensatorului; condensatorul ca o sursă de putere



Invers, atunci când tensiunea la bornele condensatorului scade, acesta introduce/generează curent în circuitul extern; în acest caz condensatorul se comportă ca o sursă de putere și spunem că se descarcă.

Stocul de energie din câmpul electric este direcționat către restul circuitului. Observați direcția de deplasare a electronilor (curentul) față de polaritatea tensiunii.

## Observație

Dacă introducem brusc o sursă de tensiune la bornele unui condensator descărcat (o creștere bruscă de tensiune), acest va utiliza curent din circuitul exterior, reprezentat în acest caz de sursa respectivă, până în momentul în care tensiunea la bornele sale este egală cu tensiunea sursei. După atingerea acestui punct de încărcare, curentul scade spre zero (condensator încărcat). Invers, dacă o rezistență de sarcină este conectată la bornele unui condensator încărcat, acesta va genera curent spre sarcină până în momentul epuizării energiei stocate, iar tensiunea sa va scădea spre zero. După atingerea acestui punct de descărcare, curentul scade spre zero (condensator descărcat). Putem să ne gândim la condensatoare ca la un fel de baterii secundare prin modul de încărcare și descărcare al lor.

## **Dielectricul**

Precum am mai spus, alegerea materialului izolant dintre plăci are o importanță capitală în comportamentul condensatorului, mai bine spus, în mărimea fluxului electric și implicit a tensiunii dintre armături. Datorită rolului acestui material în comportamentul fluxului, i s-a dat un nume special: dielectric. Nu toate materialele dielectrice sunt identice, ci sunt diferențiate printr-o valoare fizică numită permitivitatea dielectricului.

## **Capacitatea electrică(C)**

Mărimea pentru volumul de energie stocat de un condensator, atunci când se aplică o anumită tensiune la bornele sale, poartă denumirea de capacitate electrică. Simbolic, se notează cu  $C$  și se măsoară în Farad, prescurtat F.

Există o anumită convenție atunci când vine vorba de notația condensatoarelor, și anume, valorile acestora se exprimă adesea în mircoFarad ( $\mu\text{F}$ ).

## **Condensator vs. capacitor**

Aparent, denumirea de condensator este învechită și nu mai este folosită în lucrările de specialitate, fiind înlocuită cu cea de capacitor. Întrucât în literatura de specialitate de la noi din țară se folosește încă termenul de condensator, îl vom folosi și noi în această carte.

### **3. Relația tensiune-curent a condensatorului**

- Curentul printr-un condensator depinde de capacitatea acestuia precum și de variația căderii de tensiune cu timpul la bornele sale

## **„Legea lui Ohm” pentru condensatori**

Condensatorii nu au o rezistență stabilă precum este cazul rezistorilor. Totuși, relația tensiune-curent a condensatorului este una precisă, și anume:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

unde,

$i$  = curentul instantaneu prin condensator

$C$  = capacitatea condensatorului (F)

$dv / dt$  = variația instantanee a tensiunii la bornele condensatorului (V / s)

## Derivata unei funcții

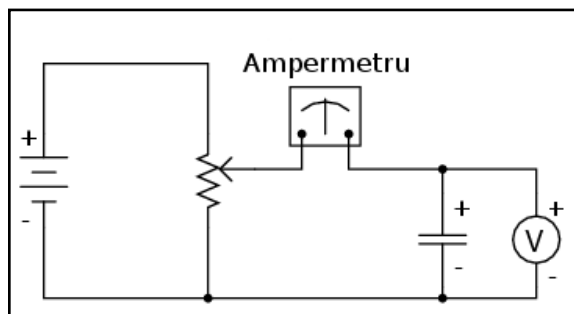
Litera „ $i$ ” semnifică curentul instantaneu, adică valoarea curentului la un anumit moment din timp. Acest lucru este în contrast cu valoarea constantă a curentului, sau curentul mediu („ $I$ ”) pe o perioadă de timp nedefinită. Expresia „ $dv/dt$ ” reprezintă derivata vitezei în raport cu timpul, expresie aparținând analizei matematice și semnificând rata de variație instantanee a tensiunii cu timpul, sau rata de variație a tensiunii (creștere sau descreștere în volt pe secundă) la un anumit moment în timp, același la care se referă și curentul instantaneu. Observați că notația tensiunii în acest caz este  $v$  și nu  $e$  !

Analiza matematică introduce de fapt conceptul de rată de variație pentru o varietate de funcții. Derivata unei funcții, un principiu de bază al analizei matematice, este expresia variației unei variabile în funcție de o altă, în cazul nostru, variația tensiunii în funcție de timp. Mai simplu spus, curentul printr-un condensator este direct proporțional cu viteza de variație a tensiunii la bornele acestuia.

## Variabila timp

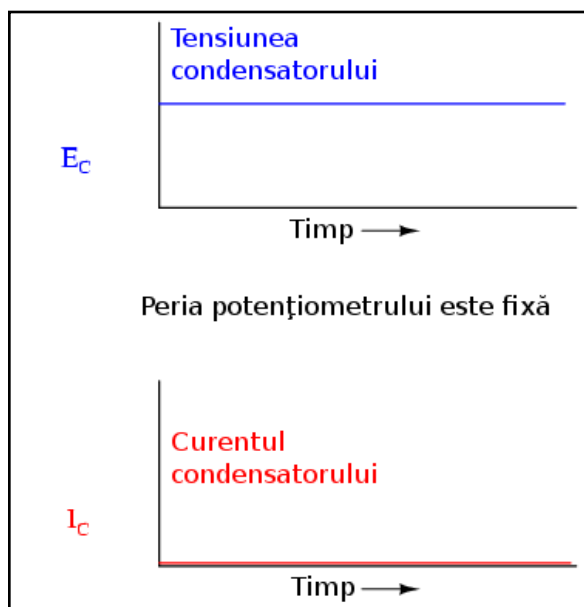
Până în acest moment nu am mai întâlnit variabila timp în studiul circuitelor electrice. Atunci când am vorbit de valori ale tensiunilor, curenților și rezistențelor rezistorilor, ne-a fost indiferent dacă măsurătorile au fost făcute pe o perioadă de timp nespécificată ( $E = IR$ ;  $V = IR$ ) sau la un anumit moment din timp ( $e = ir$ ;  $v = ir$ ). Formulele folosite sunt exact aceleași, și asta pentru că timpul nu afectează valoarea tensiunii, a curentului sau a rezistenței într-un component precum rezistorul.

În cazul unui condensator pe de altă parte, timpul este o variabilă esențială, deoarece curentul depinde de rapiditatea variației tensiunii în timp. Pentru a înțelege pe deplin acest lucru, vom lua câteva exemple.



Să presupunem că un condensator este conectat la o sursă de tensiune variabilă construită dintr-o baterie și un potențiomtru.

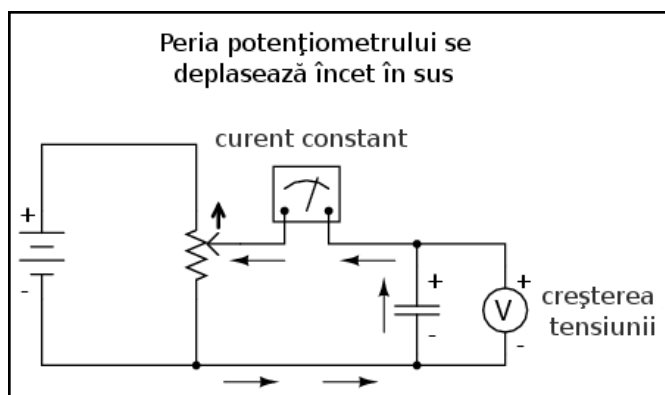
## Peria potențiometrului este fixă



Dacă potențiometrul rămâne în aceeași poziție (peria este fixă), voltmetrul conectat la bornele condensatorului va înregistra o tensiune constantă iar ampermetrul va înregistra 0 A.

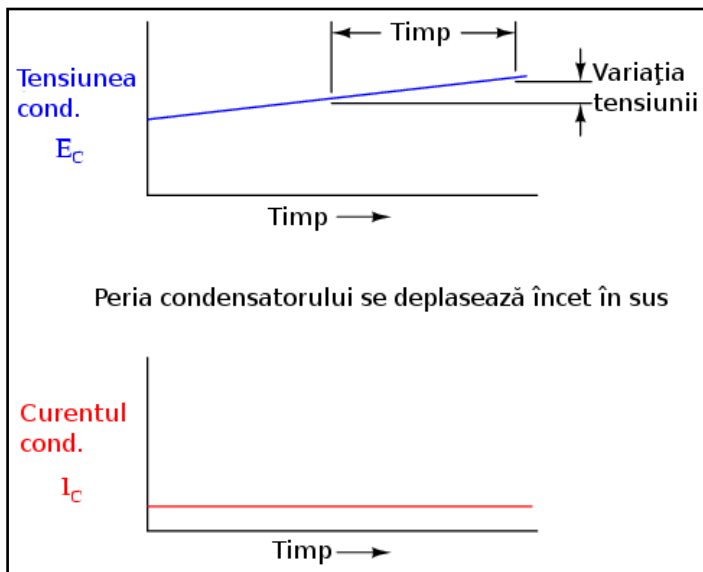
În acest caz, variația instantanee a tensiunii ( $dv / dt$ ) este egală cu zero, deoarece tensiunea nu se modifică. Ecuația ne spune că având o rată de variație de 0 V / s pentru  $dv/dt$ , curentul instantaneu ( $i$ ) trebuie să fie egal cu zero. Fizic, fără existența unei variații de tensiune, nu există nicio deplasare a electronilor de pe o armătură a condensatorului pe alta, și prin urmare nu există nici curent.

## Peria potențiometrului își modifică poziția



Dacă în schimb, peria potențiometrului se deplasează în mod constant în „sus” (spre borna pozitivă), căderea de tensiune pe condensator va fi din ce în ce mai mare. Voltmetrul înregistrează o creștere constantă a tensiunii indicate.

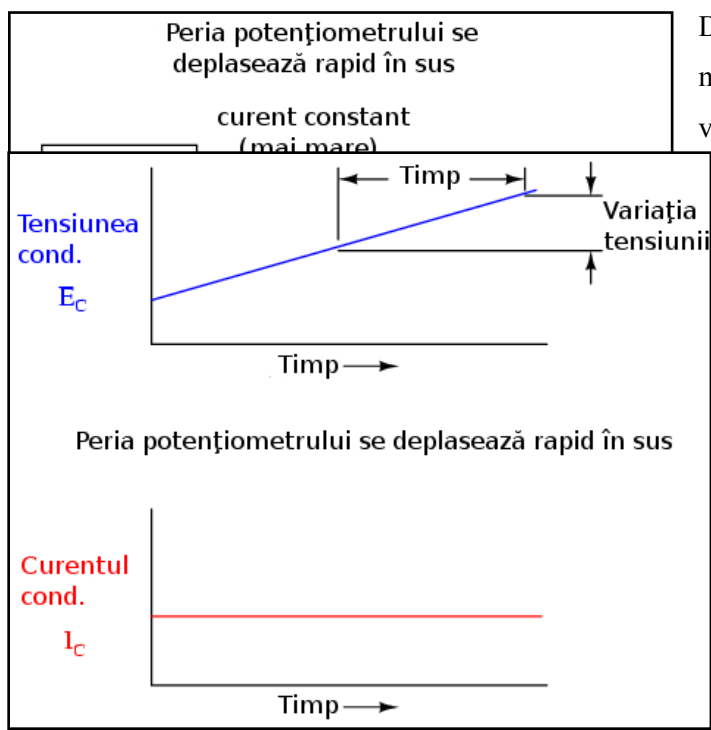




Dacă presupunem că deplasarea periei condensatorului în „sus” se realizează astfel încât există o rată constantă de creștere a tensiunii la bornele condensatorului (de ex., 2 volți pe secundă), termenul  $dv / dt$  din formula de mai sus va avea o valoare fixă.

Ecuția ne spune în acest caz că, valoarea fixă a lui  $dv/dt$  (2 V/s) înmulțită cu capacitatea condensatorului în Farad, de asemenea o valoare fixă, duce la o valoare fixă (constantă) a curentului. Fizic, o creștere a tensiunii la bornele condensatorului presupune o creștere a sarcinii diferențiale (creșterea diferenței numărului de electroni) între cele două armături. Pentru o creștere constantă a tensiunii, trebuie să existe prin urmare și o creștere constantă a sarcinii acumulate în condensator, ceea ce se traduce de fapt printr-o deplasare constantă a electronilor între armături, adică existența unui curent constant. În această situație, condensatorul se comportă precum o sarcină: electronii intră pe armătura negativă și ies din armătura pozitivă, acumulând energie sub formă de câmp electric.

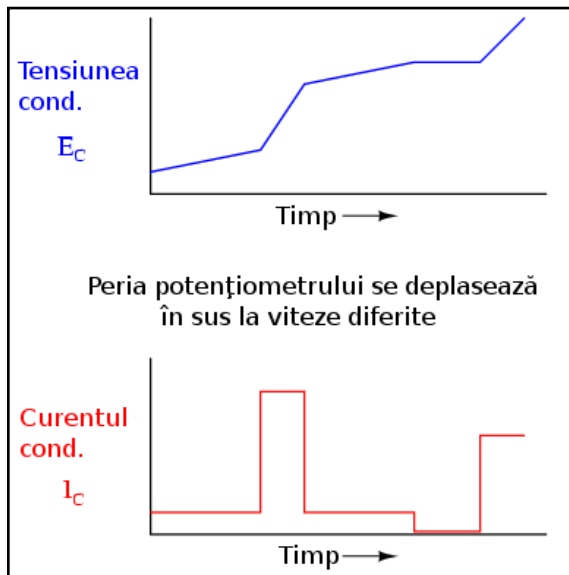
### Creșterea ratei de deplasare a periei potențiometrului



Dacă repetăm scenariul de mai sus, doar că în acest caz, mărim rata de deplasare a periei condensatorului, variația tensiunii ( $dv / dt$ ) va avea o valoare mai mare;

curentul prin condensator va fi și el mai mare în acest caz.

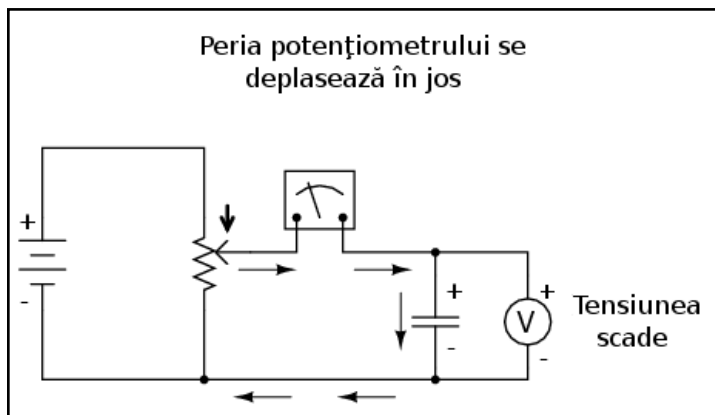
### Deplasarea variabilă a periei potențiometrului



Să luăm acum un alt exemplu. Dacă de data aceasta deplasăm peria potențiometrului în aceeași direcție ca și înainte („sus”) dar nu constant ci la viteze (rate de variație) diferite. În acest caz obținem un grafic al variației tensiunii și curentului ce arată aproximativ precum în figura alăturată.

Putem observa de pe grafic că tot timpul curentul prin condensator este proporțional cu rata de variație sau panta tensiunii condensatorului. Când graficul tensiunii crește rapid (pantă mare), curentul este de asemenea mare. Când panta tensiunii este mai mică, și curentul este mai mic. La un moment dat, panta tensiunii este zero (linie orizontală), datorită faptului că peria potențiometrului nu s-a deplasat deloc în acest interval de timp; în acest caz, curentul prin condensator este zero (vezi graficul).

### Deplasarea în jos a periei potențiometrului



Dacă deplasăm în schimb peria potențiometrului în „jos”, tensiunea la bornele condensatorului va scădea. Din nou, condensatorul reacționează la această variație de tensiune prin producerea unui curent în sens contrar de această dată.

O descreștere a tensiunii unui condensator presupune că diferența de sarcină dintre armăturile condensatorului se reduce, singurul mod în care acest lucru se poate întâmpla este dacă electronii își schimbă direcția de deplasare; condensatorul în acest caz se descarcă. În acest caz, în care electronii ies de pe armătura negativă și intră pe cea pozitivă, condensatorul se comportă precum o sursă de energie/putere (ex, o baterie), eliberând în circuitul extern energia stocată sub formă de câmp electric.

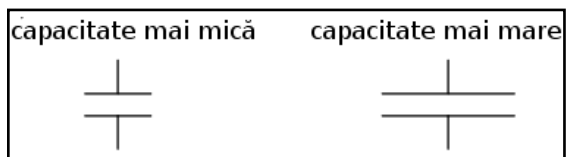
Din nou, cantitatea de curent prin condensator este direct proporțională cu rata de variație a tensiunii la bornele sale. Singura diferență între scăderea și creșterea tensiunii este direcția de deplasare a electronilor (direcția curentului). Pentru o aceeași rată de variație a tensiunii cu timpul, valoarea absolută (sau amplitudinea) curentului este exact aceeași. Matematic, o descreștere a tensiunii se traduce printr-o valoare negativă a raportului  $dv/dt$ . Acest lucru se traduce printr-un curent cu semn negativ, indicând de fapt direcția de deplasare a electronilor la descărcarea condensatorului, în sens opus față de încărcarea acestuia.

#### 4. Factori ce afectează capacitatea electrică

- Capacitatea condensatorului crește odată cu creșterea ariei armăturilor, și invers
- Capacitatea condensatorului scade odată cu creșterea distanței dintre armături, și invers
- Capacitatea condensatorului crește odată cu creșterea permitivității materialului dielectric dintre armături, și invers

Există trei factori de bază în construcția condensatoarelor ce afectează valoarea capacității electrice astfel create. Toți acești factori afectează valoarea fluxului de câmp (diferența relativă de electroni între armături) dezvoltat între armături pentru o anumită valoare a forței câmpului electric.

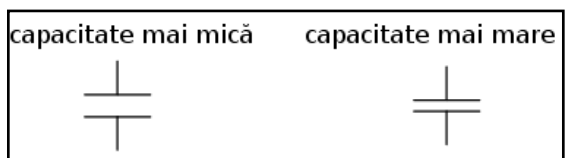
##### Aria armăturilor



Toți ceilalți factori fiind egali, o arie mai mare a armăturilor se traduce printr-o capacitate mai mare a condensatorului; o arie mai mică înseamnă o valoare mai mică a capacității.

Explicația constă în faptul că o arie mai mare poate susține un flux mai mare al câmpului (sarcină colectată pe armături) pentru o anumită valoare a forței câmpului (tensiunea dintre armături).

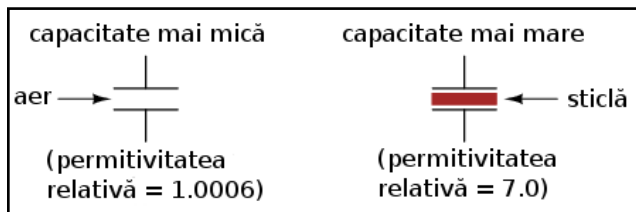
## Distanța dintre armături



Toți ceilalți factori fiind egali, o distanță mai mare între armături se traduce printr-o capacitate mai mică a condensatorului; o distanță mai mică între armături înseamnă o capacitate mai mare.

Explicația constă în faptul că o distanță mai mică duce la o forță mai mare a câmpului (tensiunea dintre armături împărțită la distanța dintre ele), ce rezultă într-un flux mai mare al câmpului (sarcină colectată pe armături), oricare ar fi valoarea tensiunii aplicate pe armături.

## Materialul dielectric



Toți ceilalți factori fiind egali, o permitivitate mai mare a materialului dielectric se traduce printr-o capacitate mai mare a condensatorului; o valoare mai mică a permitivității înseamnă o capacitate mai mică.

Deși explicația este puțin mai complicată, unele materiale oferă o opoziție mai mică fluxului pentru o anumită valoare a forței câmpului electric. Materialele cu o permitivitate mai ridicată permit existența unui flux mai mare (oferă mai puțină opoziție), și prin urmare sarcina colectată pe armături poate fi mai mare, oricare ar fi valoarea forței câmpului (tensiunea aplicată la bornele condensatorului).

În acest context, „relativ” se referă la permitivitatea materialului relativ la permitivitatea vidului. Cu cât numărul este mai mare, cu atât este mai mare permitivitatea materialului. Sticla, de exemplu, cu permitivitatea relativă 7, are de șapte ori permitivitatea vidului și va permite prin urmare stabilirea unui câmp electric (flux) de șapte ori mai puternic decât este posibil în vid, toți ceilalți factori fiind egali.

## Formula de calcul a capacității electrice a condensatorului

O valoare aproximativă pentru capacitatea unui condensator poate fi calculată cu următoarea formulă:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

unde,

C = capacitatea condensatorului (F)

$\varepsilon$  = permitivitatea absolută a dielectricului (F/m)

A = aria de suprapunere a armăturilor (m<sup>2</sup>)

d = distanța dintre armături (m)

## Permitivitățile relative ale unor materiale uzuale

În următorul tabel sunt prezentate permitivitățile relative (cunoscută și sub numele de constanta dielectrică) ale unor materiale obișnuite:

| Material               | Permitivitatea relativă (constanta dielectrică) |
|------------------------|-------------------------------------------------|
| Vid                    | 1.0000                                          |
| Aer                    | 1.0006                                          |
| PTFE, FEP ("Teflon")   | 2.0                                             |
| Polipropilenă          | 2.20 - 2.28                                     |
| Rășini ABS             | 2.4 - 3.2                                       |
| Polistiren             | 2.45 - 4.0                                      |
| Hârtie ceruită         | 2.5                                             |
| Ulei de transformator  | 2.5 - 4                                         |
| Cauciuc tare           | 2.5 - 4.80                                      |
| Lemn (stejar)          | 3.3                                             |
| Silicon                | 3.4 - 4.3                                       |
| Bachelită              | 3.5 - 6.0                                       |
| Cuarț                  | 3.8                                             |
| Lemn (Arțar)           | 4.4                                             |
| Sticlă                 | 4.9 - 7.5                                       |
| Ulei de castor         | 5.0                                             |
| Lemn (Mesteacăn)       | 5.2                                             |
| Mică, Muscovit         | 5.0 - 8.7                                       |
| Mică, Sticlă           | 6.3 - 9.3                                       |
| Porțelan, Steatit      | 6.5                                             |
| Alumina                | 8.0 - 10.0                                      |
| Apă distilată          | 80.0                                            |
| Titanat-Bariu-Stronțiu | 7500                                            |

## Condensatorul variabil

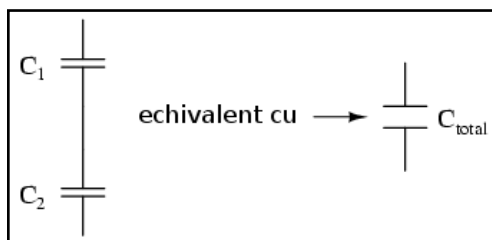
După modul de construire al condensatorului acesta poate fi fix (discutat mai sus), sau poate fi variabil. Cel mai ușor factor de exploatat în cazul celor variabile este aria armăturilor, sau mai bine spus, aria de suprapunere a lor.

Pe măsură ce rotim axul, gradul de suprapunere al armăturilor variază, afectând aria efectivă în care poate exista câmpul electric între cele două armături.

## 5. Conectarea în serie și în paralel a condensatorilor

- Capacitățile condensatorilor se reduc la conectarea în serie
- Capacitățile condensatorilor se adună la conectarea în paralel

### Conectarea în serie



La conectarea condensatorilor în serie, capacitatea totală este mai mică decât capacitatea oricărui condensator individual.

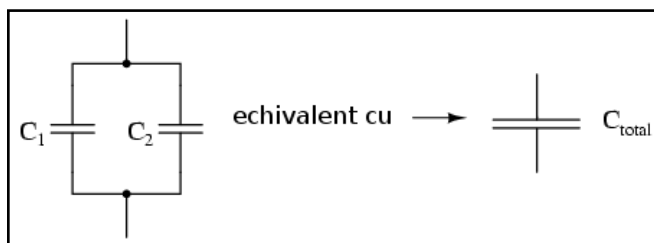
Dacă doi sau mai mulți condensatori sunt conectați în serie, efectul rezultat este cel al unui condensator (echivalent) având distanța dintre armături egală cu suma distanței dintre armăturile tuturor condensatorilor individuali. După cum am văzut în secțiunea precedentă, o creștere a distanței dintre armături, toți ceilalți factorii fiind egali, duce la o scădere a capacității.

### Formula de calcul

Formula pentru calculul capacității serie totale este asemănătoare celei pentru calcularea rezistenței echivalente la conectarea rezistorilor în paralel:

$$C_{total} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

### Conectarea în paralel



Atunci când conectarea condensatorilor se realizează în paralel, capacitatea echivalentă totală este suma capacităților individuale ale condensatorilor.

Dacă doi sau mai mulți condensatori sunt conectați în paralel, efectul rezultat este cel al unui singur condensator (echivalent) având aria armăturilor egală cu suma ariilor armăturilor tuturor condensatorilor. După cum am văzut în secțiunea precedentă, creșterea ariei armăturilor, toți ceilalți factori rămânând neschimbați, duce la o creștere a capacității.

### Formula de calcul

Formula pentru calculul capacității paralel totale este asemănătoare celei pentru calcularea rezistenței echivalente la conectarea rezistorilor în serie:

$$C_{total} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

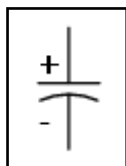
## 6. Considerații practice (condensatorul)

Condensatoarele, la fel ca toate celelalte componente, au unele limite de funcționare și utilizare. Acestea trebuie respectate dacă dorim o funcționare corectă și sigură a circuitelor electrice cu condensatoare.

### Tensiunea maximă, polaritatea și condensatorul electrolitic

Din moment ce condensatoarele nu sunt altceva decât doi conductori separați printr-un mediu dielectric, trebuie să fim atenți la tensiunea maximă admisă la bornele acestora. Dacă aplicăm o tensiune mult prea mare, putem depăși tensiunea de străpungere a dielectricului, rezultând un condensator scurt-circuitat intern.

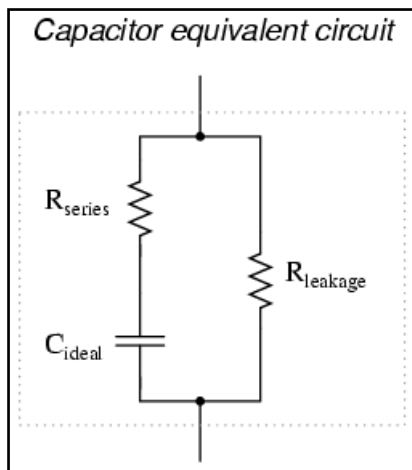
Unele condensatoare sunt construite astfel încât să suporte aplicarea unei tensiuni de o anumită polaritate. Acest lucru se datorează modului lor de realizare: dielectricul reprezintă un strat microscopic de material izolator depus pe una dintre armături prin intermediul unei tensiuni de curent continuu. Aceste condensatoare sunt cunoscute sub numele de condensatoare *electrolitice*, iar polaritatea lor este tot timpul precizată. Simbolul condensatorului electrolitic este prezentat în următoarea figură:



Armătura curbată reprezintă tot timpul armătura negativă. Inversarea polarității unui condensator electrolitic duce la distrugerea aceluia strat foarte subțire de dielectric și prin urmare și a dispozitivului. Totuși, mărimea dielectricului permite valori mari ale capacității relativ la mărimea propriu-zisă a condensatorului. Din același motiv, condensatoarele electrolitice suportă tensiuni mici față de celelalte modele de condensatoare.

### Circuitul echivalent al condensatorului

Din moment ce armăturile unui condensator prezintă o anumită rezistență electrică, și, din moment ce niciun dielectric nu este un izolator perfect, este imposibilă crearea unui condensator ideal. În realitate, un condensator are atât o rezistență serie cât și o rezistență paralel (de scurgere) suprapuse peste caracteristicile sale pur capacitive:



Din fericire, realizarea condensatoarelor cu o rezistență serie foarte mică și rezistență de scurgere foarte mare, este relativ ușoară.

## Mărimea fizică a condensatoarelor

În majoritatea aplicațiilor, mărimea (cât mai mică) joacă un rol ingineresc important. Cu cât componentele sunt mai mici, cu atât pot fi introduse mai multe elemente în circuit, iar greutatea întregului ansamblu scade și ea.

În cazul condensatoarelor, există doi factori importanți ce afectează mărimea unui component: tensiunea de lucru și capacitatea. Acești doi factori tind să fie în opoziție unul cu celălalt. Pentru un anumit dielectric ales, singura modalitate de a crește tensiunea de lucru a unui condensator este creșterea grosimii dielectricului. Totuși, după cum am văzut, această situație duce la descreșterea capacității dispozitivului. Putem readuce capacitatea la valoarea inițială prin creșterea ariei armăturilor.

Dar acest lucru duce la creșterea mărimii fizice a condensatorului. Acesta este motivul pentru care nu putem aprecia capacitatea unui condensator (în Farazi) prin simpla observare a mărimii acestuia. Un condensator de o anumită mărime, poate avea o capacitate mare și o tensiune de lucru mică, sau o capacitate mică și o tensiune de lucru mare, sau un compromis între cele două situații.



## **14 – Electromagnetism**

### **1. Magneți permanenți**

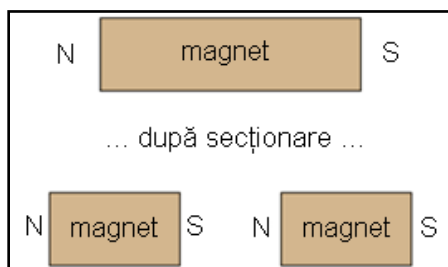
- Magnetul natural sau magnetitul este un magnet permanent natural. Prin permanent se înțelege faptul că materialul poate menține câmpul magnetic fără niciun ajutor extern. Proprietatea oricărui material de a realiza acest lucru se numește *remanență*

- Materialele feromagnetice sunt ușor de magnetizat
- Materialele paramagnetice sunt mai greu de magnetizat
- Materialele diamagnetice tind să respingă câmpurile magnetice prin magnetizarea în direcție opusă

## Scurt istoric

Faptul că unele tipuri de roci minerale posedă proprietăți neobișnuite de atracție atunci când se află în apropierea fierului, a fost descoperit cu secole în urmă. Una dintre aceste minerale speciale, magnetul natural sau magnetitul, este menționat cu aproximativ 2500 de ani în urmă în Europa și chiar mai devreme în Orientul Îndepărtat ca și subiect de curiozitate. Mai târziu este folosit în navigație, utilizând descoperirea că o bucată din acest material neobișnuit tinde să se orienteze pe direcția nord-sud dacă este lăsat să se rotească liber (suspendat la capătul unui fir sau plutind pe apă). În 1269, Pierre de Maricourt întreprinde un studiu științific ce arată că și fierul poate fi „încărcat” în mod similar cu această proprietate prin frecarea acestuia de unul dintre „polii” magnetului.

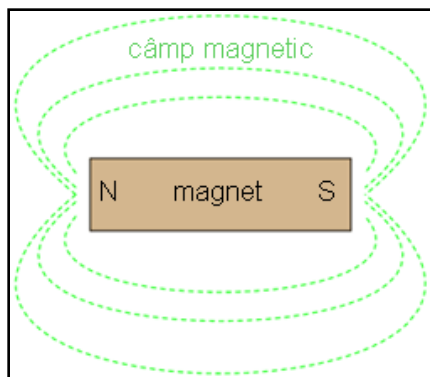
## Polul nord și polul sud al materialelor magnetice



Spre deosebire de sarcinile electrice, materialele magnetice posedă doi poli cu efecte opuse, denumite nord și sud după modul lor de orientare față de pământ. După cum a descoperit și Maricourt, este imposibilă separarea celor doi poli unul de altul prin secționarea magnetului în două: fiecare nouă bucată de material posedă propriul sau set de poli nord și sud.

Asemenea sarcinilor electrice, există doar două tipuri de poli: nord și sud, prin analogie cu sarcinile pozitive și negative. Asemenea sarcinilor electrice, polii asemenea se resping, iar ce opuși se atrag. Această forță, asemenea forței cauzate de electricitatea statică (vezi și câmpul, forța și fluxul magnetic și electric), se extinde invizibil prin spațiu și poate chiar să treacă prin obiecte precum hârtia sau lemnul fără ca intensitatea sa să scadă simțitor.

## Câmpul magnetic



Rene Descartes a fost cel care a făcut observația conform căreia câmpul magnetic „invizibil” poate fi observat plasând un magnet sub o bucată de hârtie/lemn și presărând deasupra pilitură de fier.

Bucățile de fier se vor alinia de-a lungul câmpului magnetic, „desenându-i” practic forma. Rezultatul experimentului arată faptul că liniile de câmp continuă neîntrerupte de la un pol al magnetului spre celălalt.

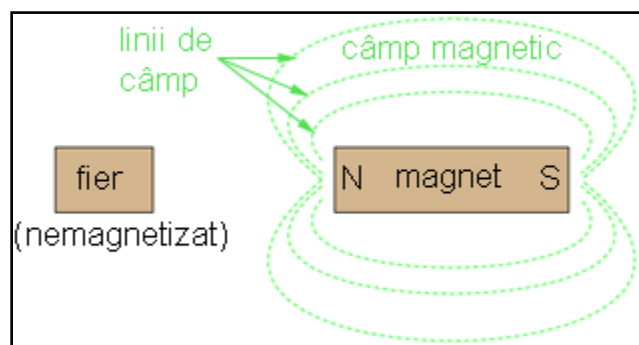
## Forța, fluxul și liniile de câmp

Precum este cazul oricărui tip de câmp (electric, magnetic, gravitațional), cantitatea totală, sau efectul câmpului, este desemnată prin noțiunea de flux, iar „împingerea” ce dă naștere fluxului în spațiu poartă numele de forță. Termenul de „tub” a fost folosit inițial de Michael Faraday pentru desemnarea a ceea ce acum sunt denumite linii de câmp, și anume, succesiunea fluxului magnetic în spațiu, sau mai bine spus, forma sa. Într-adevăr, mărimea câmpului magnetic este adesea definită ca și numărul liniilor de câmp, deși este greu de crezut că asemenea linii discrete și constante există cu adevărat în realitate.

## Producerea câmpului magnetic

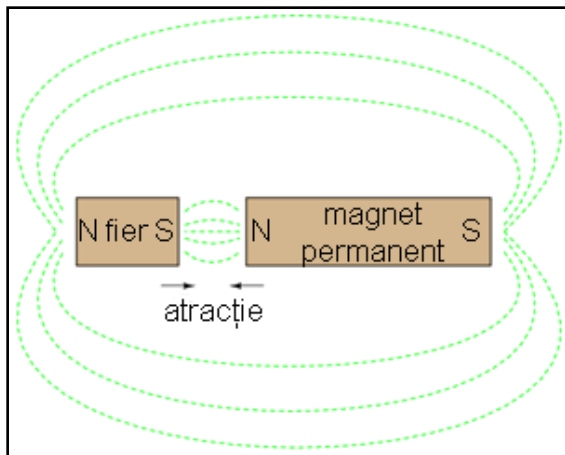
Teoria modernă a magnetismului susține că producerea câmpului magnetic se datorează sarcinii electrice aflate în mișcare; acest lucru ar însemna că acest câmp magnetic „permanent” al magneților este de fapt rezultatul mișcării uniforme în aceeași direcție a electronilor din interiorul atomilor de fier. Un astfel de comportament al electronilor în interiorul atomilor depinde de structura atomică a fiecărui material în parte. Astfel, doar anumite tipuri de substanțe reacționează cu câmpurile magnetice, și un număr și mai mic dintre ele posedă abilitatea de susținere a unui câmp magnetic permanent.

## Magnetizarea materialelor feromagnetice



Fierul este unul dintre materialele ce poate fi ușor magnetizat. Dacă un corp de fier este adus în preajma unui magnet permanent, electronii din interiorul atomilor de fier se reorientează în direcția câmpului produs de magnet iar fierul devine „magnetizat”.

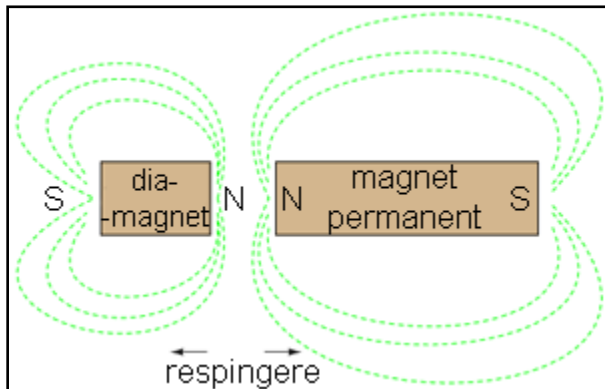
Magnetizarea fierului se realizează astfel încât să încorporeze liniile câmpului magnetic în forma sa, ceea ce se traduce printr-o atracție față de magnetul permanent indiferent de orientarea acestuia față de corpul de fier.



Corpul de fier inițial nemagnetizat devine magnetizat după ce este adus în apropierea magnetului permanent. Indiferent ce pol este adus în apropierea fierului, acesta din urmă se va magnetiza în așa fel încât să fie atras de magnet.

Luând ca și referință proprietățile magnetice naturale ale fierului, numim material feromagnetic acel material care se magnetizează ușor (electronii atomilor săi se aliniază ușor câmpului magnetic extern). Toate materialele sunt magnetice într-o anumită măsură, iar cele care nu sunt considerate feromagnetice sunt clasificate fie ca și materiale paramagnetice (ușor magnetice) sau diamagnetice.

### Magnetizarea materialelor diamagnetice



Dintre cele două, materialele diamagnetice sunt cele mai ciudate. În prezența unui câmp magnetic extern, devin ușor magnetizate în direcție opusă, astfel că resping câmpul magnetic extern!

### Remanența

În cazul în care un material feromagnetic își menține starea de polarizare și după încetarea câmpului magnetic extern, spunem că acest material are remanență (magnetică) bună. Această proprietate este o calitate necesară pentru un magnet permanent.

## 2. Electromagnetism

- La trecerea curentului printr-un conductor, se va produce un câmp magnetic în jurul acestuia

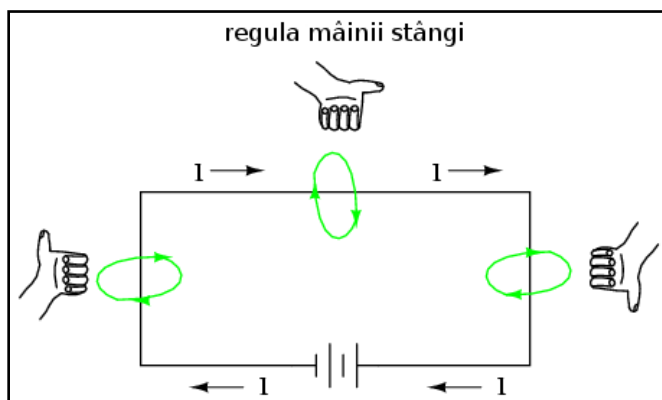
- Regula mâinii stângi spune că liniile câmpului magnetic produse de un conductor traversat de curent electric vor fi orientate în direcția degetelor închise ale mâinii stângi atunci când degetul mare indică direcția deplasării electronilor.
- Forța câmpului magnetic produs de un conductor traversat de curent electric crește atunci când construim firul sub forma unei înfășurări. În acest caz, câmpul magnetic se va orienta de-a lungul lungimii axei înfășurării
- Forță produsă de câmpul magnetic al unui electromagnet (denumită forță magnetomotoare, sau mmf) este proporțională cu produsul dintre curentul ce parcurge electromagnetul și numărul de înfășurări complete formate de conductor

## Scurt istoric

Descoperirea relației dintre magnetism și electricitate a fost făcută, precum multe alte descoperiri științifice, aproape din întâmplare. În 1820, pe când predă un curs despre posibilitatea existenței unei relații dintre electricitate și magnetism, fizicianul danez Hans Christian Oersted a demonstrat până la urmă experimental acest lucru în fața întregii clase!

Introducând un curent electric printr-un fir suspendat deasupra unui compas magnetic, Oersted a reușit să producă o mișcare clară a acului compasului ca și răspuns la trecerea curentului. Ceea ce a început ca și ipoteză la începutul orei s-a transformat în realitate până la sfârșitul ei, iar Oersted a trebuit să-și revizuiască notițele pentru următoarele cursuri! Descoperirea sa accidentală a deschis drumul spre o nouă ramură a științei: electromagnetismul.

## Regula mâinii stângi

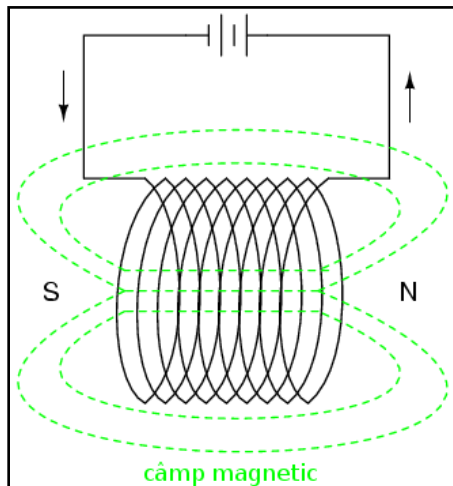


Experimente detaliate au arătat că orientarea câmpului magnetic produs de un curent electric este tot timpul perpendiculară direcției de curgere.

O metodă simplă de exemplificare a acestei relații este regula mâinii stângi. Această regulă spune că liniile câmpului magnetic produs de curentul electric printr-un fir sunt orientate în direcția degetelor de la mâna stângă, atunci când acestea sunt închise iar degetul mare este orientat în direcția curentului.

Liniile câmpului magnetic încercuiesc conductorul de curent și nu au un pol „nord” sau „sud” bine definit. În acest caz însă, forța câmpului este foarte slabă, pentru valori normale ale curentului, fiind capabilă să deplaseze acul unui compas, de exemplu, dar nu mai mult de atât.

### Așezarea conductorului sub formă de bucle



Pentru a crea un câmp magnetic mai puternic (forță și flux mai mare) cu aceeași valoare a curentului electric, putem forma o serie de bucle cu ajutorul firului; în jurul acestuia, câmpurile magnetice se vor uni pentru a forma un câmp magnetic mai puternic cu o polaritate nord-sud bine definită.

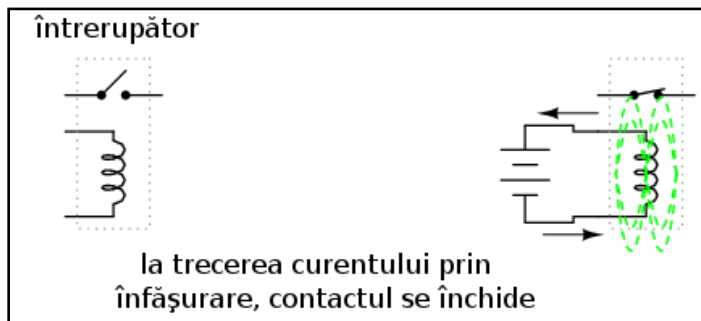
Valoarea forței magnetice generate de o astfel de buclă este proporțională cu produsul dintre valoarea curentului prin fir și numărul efectiv de bucle formate. Această forță este denumită forță magnetomotoare (mmf) și este similară forței electromotoare (E) dintr-un circuit electric.

### Electromagnetul

Un electromagnet este un conductor electric construit special pentru generarea câmpului magnetic la trecerea curentului prin el. Deși toți conductori produc câmp magnetic la trecerea curentului prin ei, un electromagnet este construit special pentru maximizarea efectului și utilizarea acestuia într-un anumit scop. Electromagneții sunt folosiți în industrie, cercetare, aparatură medicală și bunuri de larg consum.

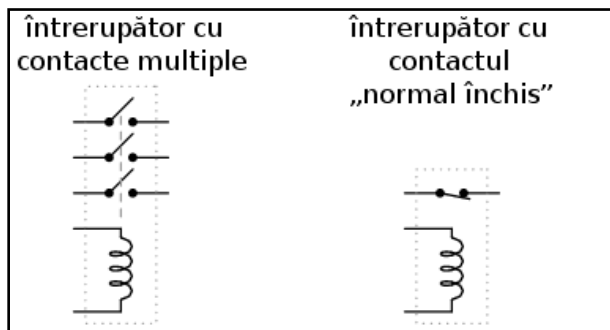
Probabil că cel mai bun exemplu de utilizare al electromagneților este motorul electric.

### Releul



Un alt exemplu este releul, un întrerupător controlat pe cale electrică.

Dacă mecanismul unui întrerupător este construit astfel încât să poată fi acționat (închis și deschis) prin aplicarea unui câmp magnetic, iar electromagnetul este plasat în apropierea acestuia pentru a produce câmpul necesar, este posibilă închiderea și deschiderea întrerupătorului prin aplicarea unui curent prin acesta. În principiu, acesta este un dispozitiv **ce** controlează electricitatea cu ajutorul electricității:



Întrerupătoarele pot fi construite pentru a acționa multiple contacte, sau pentru a funcționa „invers” (deschiderea contactelor la trecerea curentului prin electromagnet și închiderea lor la încetarea câmpului magnetic).

### 3. Unități de măsură ale câmpului magnetic

#### Mărimile câmpului magnetic

În cadrul discuției despre magnetism, vom întâlni următoarele mărimi:

**Forța magnetomotoare** sau **tensiunea magnetomotoare** - Valoarea forței câmpului magnetic, sau „împingerea”, analog tensiunii electrice (forță electromotoare).

**Fluxul câmpului magnetic** - Valoarea efectului total al câmpului magnetic, sau „substanța” câmpului, analog curentului electric.

**Intensitatea câmpului magnetic** - Cantitatea forței magnetomotoare distribuită de-a lungul electromagnetului, cunoscută și sub numele de forță de magnetizare.

**Densitatea fluxului magnetic** - Valoarea fluxului magnetic concentrat pe o anumită suprafață.

**Reluctanța** - Opoziția față de câmpul magnetic al unui anumit volum din spațiu sau al unui material, analog rezistenței electrice.

**Permeabilitatea** - Măsura specifică de acceptare a câmpului magnetic de către un material, analog rezistenței specifice pentru un material conductop)( doar că relația este inversă, o permeabilitate mai mare înseamnă o trecere mai ușoară a liniilor câmpului magnetic.

#### Unitățile de măsură

Mai jos este tabelul cu unitățile de măsură pentru fiecare mărime:

| Cantitate                    | Simbol         | Unitate de măsură              |
|------------------------------|----------------|--------------------------------|
| tensiunea magnetomotoare     | mmf            | Amper (A)                      |
| fluxul magnetic              | $\Phi$         | Weber (Wb)                     |
| intensitatea magnetică       | H              | Amper / metru ( $A\ m^{-1}$ )  |
| densitatea fluxului magnetic | B              | Tesla (T)                      |
| reluctanța                   | $\mathfrak{R}$ | Amper / Weber ( $A\ Wb^{-1}$ ) |
| permeabilitatea              | $\mu$          | Henry / metru ( $H\ m^{-1}$ )  |

## Legea lui Ohm pentru circuite magnetice

Relațiile dintre tensiunea magnetomotoare, fluxul magnetic și reluctanță sunt asemenea relațiilor dintre mărimile electrice precum tensiunea electromotoare, curent și rezistență, și pot fi considerate un fel de legea lui Ohm pentru circuite magnetice:

### Circuite electrice

$$E = IR$$

### Circuite magnetice

$$mmf = \phi \mathfrak{R}$$

Știind faptul că permeabilitatea este asemănătoare rezistenței specifice (inversă), ecuația pentru aflarea reluctanței materialului magnetic este similară celei pentru aflarea rezistenței conductorului:

### Rezistența electrică

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

### Rezistența magnetică

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$$

În fiecare dintre cele două cazuri, pentru o bucată mai lungă din același material opoziția este mai mare, toți ceilalți factorii fiind egali. De asemenea, o secțiune mai mare scade valoarea opoziției (rezistenței electrice și reluctanței magnetice), toți ceilalți factori fiind egali.

Un lucru important de remarcat este că reluctanța unui material la fluxul magnetic este afectată de concentrația liniilor de câmp ce trec prin el. Acest lucru face ca legea lui Ohm pentru circuitele magnetice să aibă

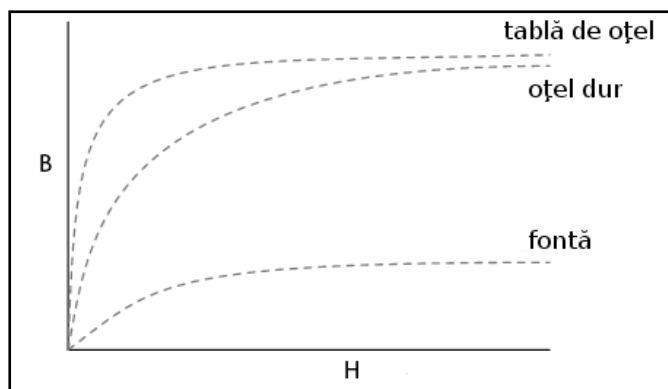


un comportament neliniar, prin urmare este mult mai dificilă de aplicat decât în cazul circuitelor electrice. Acest efect este analog existenței unui rezistor ce și-ar modifica rezistența pe măsura variației curentului ce-l străbate.

#### 4. Permeabilitatea, saturația și curbele de histerezis

- Permeabilitatea unui material depinde de valoarea forței fluxului magnetic prin acesta
- Relația specifică dintre forță și flux (intensitatea câmpului  $H$ , și densitatea fluxului  $B$ ) este trasată pe un grafic denumit curba normală de magnetizare
- Este posibilă aplicarea asupra unui material feromagnetic a unui câmp magnetic atât de intens încât acesta atinge valoarea sa maximă a fluxului. Această condiție este cunoscută sub numele de saturație magnetică
- Când remanența unui material feromagnetic interferă cu remagnetizarea sa în direcția opusă, condiția este cunoscută sub numele de histerezis

##### Graficul variației B-H



Non-liniaritatea permeabilității materialelor (vezi și unități de măsură ale câmpului magnetic) poate fi trasată pe un grafic pentru o mai bună înțelegere a ei. Plasăm intensitatea câmpului ( $H$ ), egală cu raportul dintre tensiunea magnetomotoare ( $tmm$ ) și lungimea materialului, pe axa orizontală. Pe axa verticală, plasăm densitatea fluxului ( $B$ ) egală cu raportul dintre fluxul total și aria secțiunii materialului.

Folosim aceste mărimi ( $H$  și  $B$ ) în loc de tensiunea magnetomotoare ( $tmm$ ) și fluxul total ( $\Phi$ ) (pentru ca alura graficului să rămână independentă de dimensiunile fizice ale materialului supus măsurătorii.

##### Curbe normale de magnetizare; saturația

Aceste curbe poartă denumirea de curbe normale de magnetizare sau curbe B-H, indiferent de material. Putem observa de pe grafic că densitatea fluxului ( $B$ ) pentru oricare din cele trei materiale are o creștere neliniară (puternică la început, apoi din ce în ce mai scăzută) odată cu creșterea valorii intensității câmpului ( $H$ ). Acest efect este cunoscut sub numele de saturație. Când aplicăm o forță magnetică mică ( $H$  mic), doar câțiva atomi sunt aliniați după liniile câmpului, restul fiind ușor de aliniat dacă aplicăm o forță adițională.

Totuși, pe măsura creșterii fluxului magnetic prin aceeași secțiune a materialului feromagnetic, tot mai puțini atomi sunt disponibil pentru alinierea în lungul liniilor de câmp pe măsură ce forța aplicată crește. De aceea, este nevoie de o forță ( $H$ ) din ce în ce mai mare pentru creșterea densității fluxului ( $B$ ) cu pași din ce în ce mai mici.

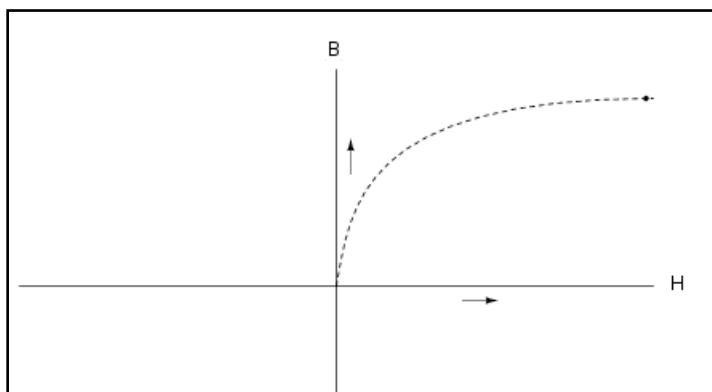
Saturația este un fenomen întâlnit doar în cazul electromagneților cu miez de fier. Electromagneții cu miez de aer nu se saturează, dar, pe de altă parte, nici nu produc valori așa de mari ale fluxului magnetic pentru același număr de spire (bucle) și aceeași valoare a curentului.

## Histerezisul

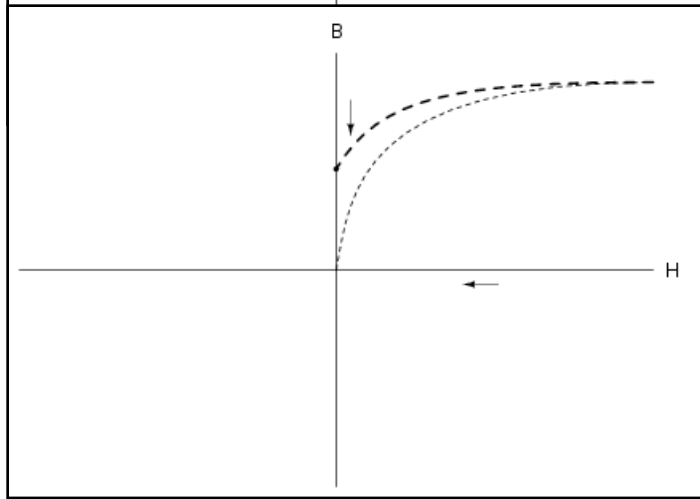
Un alt fenomen al analizei curbelor de magnetizare este cel de histerezis. Ca și termen general, histerezisul înseamnă că ieșirea sistemului nu reflectă instant valorile de intrare; pe scurt, putem spune ca sistemul în cauză posedă memorie. Într-un sistem magnetic, acesta se caracterizează prin faptul că materialul feromagnetic tinde să rămână magnetizat după ce forța magnetică aplicată este îndepărtată (remanență magnetică), dacă polaritatea forței este inversată.

### Construirea pas cu pas a unei curbe de histerezis

#### 1. Aplicarea unui curent prin spirele electromagnetului



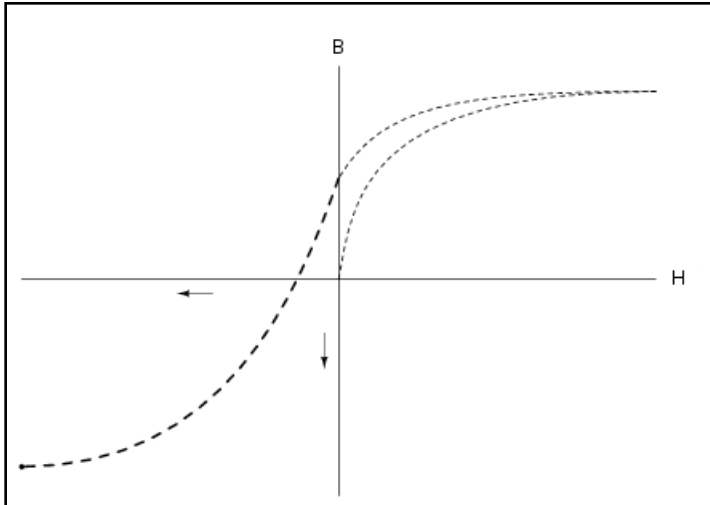
Să folosim același grafic, dar să extindem axele pentru a indica atât valori pozitive cât și negative. Aplicăm întâi o forță magnetică (curent prin spirele electromagnetului) crescătoare. Observăm creșterea densității fluxului după curba normală de magnetizare.



#### 2. Întreruperea curentului prin spire

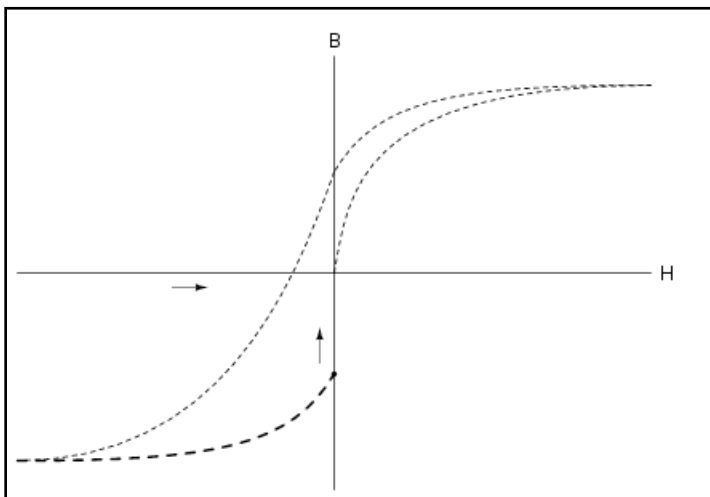
Apoi, oprim curentul prin înfășurarea electromagnetului și observăm ce se întâmplă cu fluxul, lăsând prima curbă pe grafic. Datorită remanenței materialului, vom avea un flux magnetic chiar și fără existența forței aplicate mai înainte (nu există curent prin înfășurare). Electromagnetul se comportă în acest moment precum un magnet permanent.

### 3. Aplicarea unui curent de sens contrar prin spirele electromagnetului



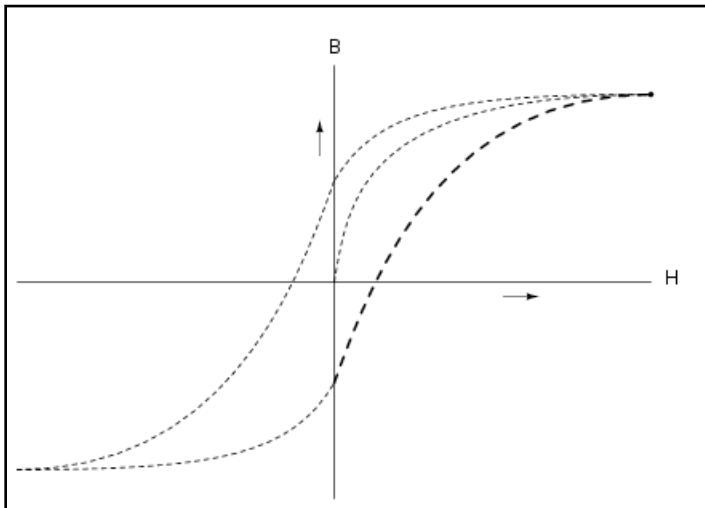
Următorul pas este aplicarea unui câmp magnetic cu aceeași forță dar în direcția opusă. Densitatea fluxului magnetic a atins acum un punct echivalent celui în care se afla în cazul aplicării unei intensități magnetice ( $H$ ) pozitive, doar că se află în direcția opusă, negativă.

### 4. Întreruperea curentului prin înfășurare



Să observăm comportamentul electromagnetului dacă întrerupem din nou curentul prin înfășurare. Din nou, datorită remanenței naturale a materialului, acesta va reține un flux magnetic fără existența unui curent prin înfășurare, doar că de data aceasta se află în direcție opusă față de ultima întrerupere a curentului.

### 5. Închiderea curbei de histerezis



Dacă reintroducem curentul prin electromagnet, vom vedea că densitatea fluxului magnetic atinge din nou punctul maxim inițial (dreapta sus pe grafic).

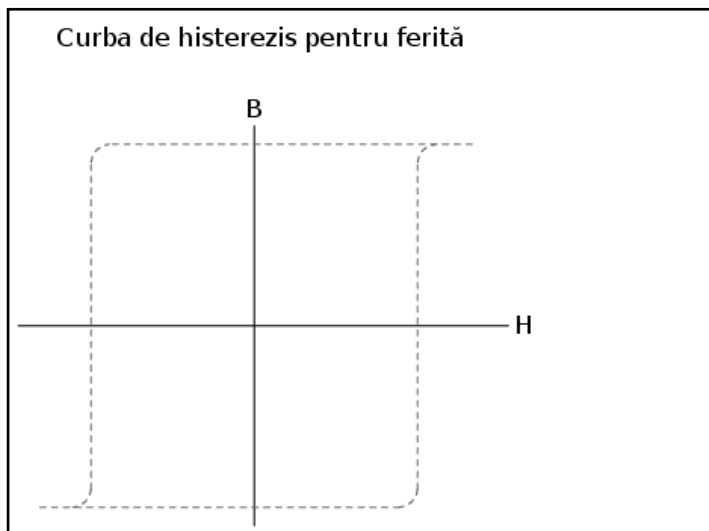
## Pierderile prin histerezis

Această curbă în formă de „S” se numește curba de histerezis a materialului feromagnetic pentru o anumită valoare a intensității câmpului magnetic maxim, respectiv minim (+H și -H). Existența acestui histerezis este de nedorit în cazul proiectării sistemelor ce ar trebui să producă o cantitate fixă de flux în funcție de valoarea curentului, deoarece valoarea densității fluxului va depinde de curent și de starea de magnetizație de dinainte. De asemenea, datorită nevoii de învingere a magnetizației remanente din electromagnet, se va produce o risipă de energie atunci când se folosește curentul alternativ. Putem aproxima cantitatea de energie pierdută în funcție de aria curbei de histerezis.

## Aplicații practice ale histerezisului

În alte cazuri, precum stocarea informațiilor cu ajutorul materialelor magnetice (hard-disk-uri, sau benzi audio și video) curba de histerezis este un lucru de dorit. În aceste cazuri, este de dorit ca magnetizarea unui material magnetic (ferită) să fie de durată (remanență mare) pentru a-și putea „aminti” ultima stare de magnetizare.

O altă aplicație practică este filtrarea „zgomotului” electromagnetic de frecvență înaltă (supratensiuni de valori mari și durate de timp scurte). Energia consumată pentru întâmpinarea histerezisului feritei atenuează forța semnalului de zgomot. Curba de histerezis pentru ferită este destul de extremă:



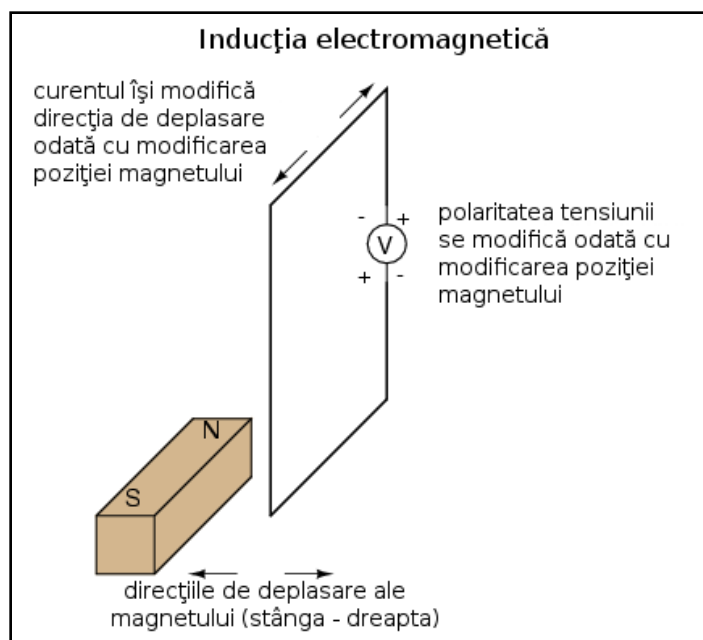
## 5. Inducția electromagnetică

- Un câmp magnetic de intensitate variabilă perpendicular pe un conductor electric va induce o tensiune în lungimea acestui fir. Valoarea tensiunii induse depinde de rata variației fluxului magnetic și de numărul de înfășurări (dacă există) expuse variației fluxului
- Ecuația lui Faraday pentru tensiune indusă este:  $e = N(d\Phi/dt)$
- De-a lungul unui conductor electric străbătut de un curent electric variabil va apărea o tensiune electrică indusă; această variație duce la variația fluxului magnetic perpendicular pe fir, ce induce la rândul său o tensiune electrică pe lungimea firului conform ecuației lui Faraday. Un dispozitiv construit special pentru folosirea acestui principiu/efect se numește *bobină*

### Definiție

Deși Oersted a fost cel care a descoperit existența electromagnetismului, totuși, Michael Faraday a fost cel care a deschis drumul generării electricității prin intermediul inducției electromagnetice. Faraday a descoperit că la expunerea unui conductor electric unui câmp magnetic (flux magnetic) perpendicular pe acesta și de intensitatea variabilă, în lungul firului se va genera o tensiune electrică.

### Utilizarea unui magnet permanent



O modalitate relativ simplă de a crea acest câmp magnetic de intensitate variabilă este prin deplasarea unui magnet permanent în apropierea firului sau a înfășurării. De reținut că intensitatea câmpului trebuie să crească sau să scadă în intensitate perpendicular pe fir (astfel că liniile de câmp să „taie” conductorul); în caz contrar, nu va exista tensiune indusă în fir:

## Ecuția inducției electromagnetice a lui Faraday

Expresia matematică pentru valoarea tensiunii generate în funcție de fluxul câmpului magnetic, expresie dedusă tot de Faraday, este următoarea:

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

unde,

e = tensiunea instantanee indusă (V)

N = numărul spirelor din înfășurare (1, fir simplu)

$\Phi$  = fluxul magnetic (Wb)

t = timpul (s)

## Autoinducția

Dacă luăm în considerare faptul că la trecerea curentului printr-un conductor electric acesta produce un câmp magnetic perpendicular pe fir, și că variația intensității fluxului aceluși câmp magnetic variază cu variația curentului prin fir, putem vedea că un fir este capabil de inducerea unei tensiuni electrice în lungul propriei lungimi prin simpla variație a curentului prin el. Acest efect poartă denumirea de auto-inducție: un câmp magnetic variabil produs de variația curentului printr-un fir ce induce o tensiune electrică de-a lungul aceluiași fir. Dacă fluxul magnetic este mărit prin îndoirea firului sub formă de colac și/sau înfășurarea acestuia în jurul unui material cu permeabilitate ridicată, acest efect de tensiune auto-indusă va fi și mai pronunțat. Un dispozitiv construit special pentru a profita de acest efect este bobina.

## Aplicații practice

Practic, fenomenul este utilizat în construcția generatoarelor electrice, folosind putere mecanică pentru deplasarea unui câmp magnetic prin preajma înfășurărilor (firelor) pentru generarea tensiunii.

## 6. Transformatorul și inductanța mutuală

- Inductanța mutuală reprezintă situația în care câmpul magnetic generat de o înfășurare induce tensiune electrică într-o înfășurare învecinată
- Un *transformator* este un dispozitiv special conceput și format din două sau mai multe înfășurări, una în apropierea celeilalte, ce folosește principiul inductanței mutuale dintre înfășurări
- Transformatoarele pot fi folosite doar în cazul tensiunilor variabile, nu și în cazul celor constante. Din această cauză, ele sunt dispozitive de curent alternativ și nu de curent continuu

### Inductanța mutuală; definiție

Dacă două înfășurări străbătute de curent electric sunt aduse una în vecinătatea celeilalte, astfel încât să existe un cuplaj magnetic între cele două câmpuri, în ce-a de a doua înfășurare se va genera o tensiune electrică. Acest efect se numește inductanță mutuală: aplicarea unei tensiuni asupra unei înfășurări induce o tensiune în cealaltă.

Deoarece tensiunea indusă pe cale magnetică poate fi realizată doar atunci când valoarea fluxului câmpului magnetic este *variabil* față de fir, cuplajul magnetic (prin urmare și inductanța mutuală) dintre două înfășurări poate lua naștere doar în cazul curentului alternativ. Singura aplicație în curent continuu pentru inductanța mutuală este atunci când există o cale de a porni și opri puterea prin înfășurare cu ajutorul unui întrerupător; se crează în acest caz o tensiune de curent continuu pulsatorie, iar tensiunea indusă va atinge valori maxime la fiecare puls.

### Transformatorul

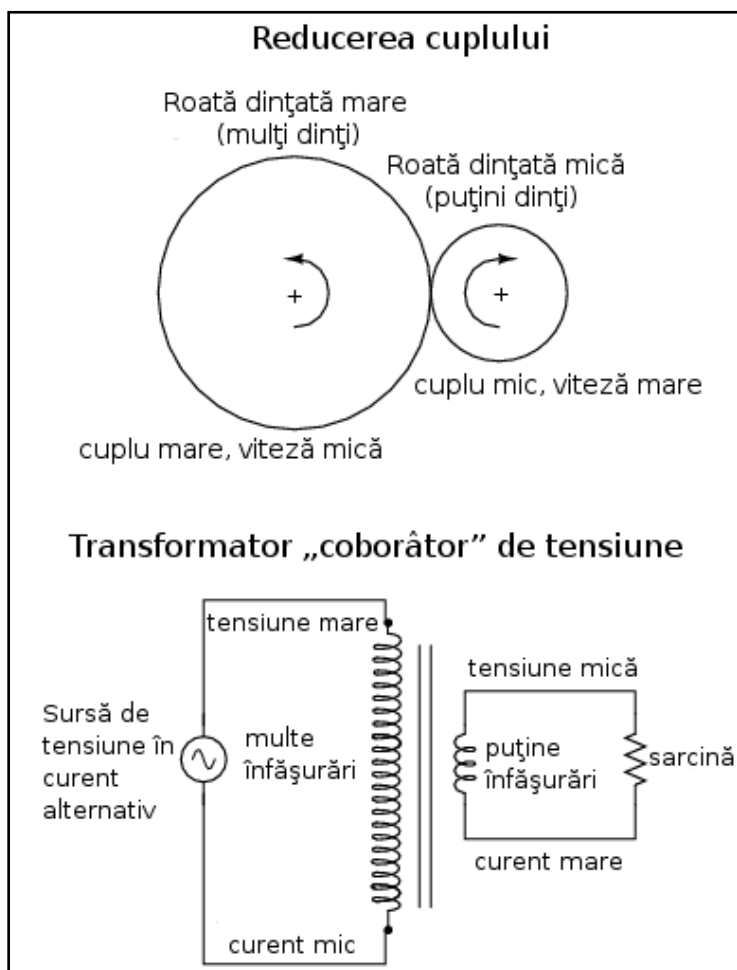
Transformatorul este un dispozitiv special conceput pentru producerea efectului de inductanță mutuală între două sau mai multe înfășurări.

O proprietate extrem de utilă a transformatorului este capacitatea de transformare a valorilor tensiunii și curentului după o regulă simplă, determinată de raportul dintre numărul spirelor celor două înfășurări. Dacă o înfășurare a transformatorului este alimentată în curent alternativ, valoarea tensiunii induse în cealaltă înfășurare, nealimentată, va fi egală cu produsul dintre valoarea tensiunii de alimentare și valoarea raportului dintre numărul spirelor înfășurărilor (primară și secundară), denumit și raport de transformare. De asemenea, curentul prin

înfășurarea secundară se va comporta exact invers: dacă tensiunea de alimentare (din înfășurarea primară) crește, curentul va scădea cu aceeași rată.

Un transformator conceput pentru obținere unei tensiune mai mari la bornele înfășurări secundare (înfășurare nealimentată) față de cea primară (înfășurare alimentată) se numește transformator ridicător de tensiune, iar unul construit pentru a realiza exact opusul se numește transformator coborâtor de tensiune. Valoarea curentului prin fiecare înfășurare este exact inversă față de situația precedentă, cea a tensiunii.

## Analogie



Acest comportament al transformatorului este analog unui angrenaj mecanic.

## 15 - Bobina și câmpul magnetic



## 1. Bobina

- Bobinele reacționează variației curentului ce le străbat generând o cădere de tensiune la borne, de polaritate opusă variației
- Atunci când curentul prin bobină crește, aceasta se comportă precum o sarcină: va exista o cădere de tensiune la bornele sale pe măsură ce absoarbe energie din circuit (negativă la intrarea curentului în bobină și pozitivă la ieșire, precum un rezistor)
- Atunci când curentul prin bobină scade, aceasta se comportă precum o sarcină: crează o tensiune la bornele sale pe măsură ce eliberează energie în circuit (pozitivă la intrarea curentului și negativă la ieșire, precum o baterie)
- Proprietatea unei bobine de a stoca energie sub formă de câmp magnetic (și în consecință de a se opune variației curentului) se numește *inductanță* ( $L$ ). Unitatea sa de măsură este *Henry* ( $H$ )

### Principii de bază

La trecerea unui curent electric printr-un conductor se va forma tot timpul un câmp magnetic în jurul acestuia. Acest efect poartă numele de electromagnetism. Câmpurile magnetice modifică alinierea electronilor din atomi și pot duce la apariția forțelor fizice între atomii, prin spațiul liber dintre ei, la fel ca în cazul câmpurilor electrice ce iau naștere între particulele încărcate electric. Precum câmpurile electrice, cele magnetice pot ocupa spațiul dintre corpuri și pot afecta materia la distanță.

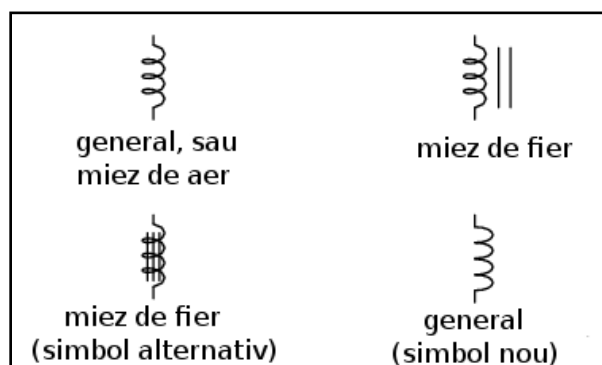
### Inerția electronilor

Pe când un flux electric dintre doi conductori permite acumularea electronilor liberi în cadrul acelor conductori (vezi condensatorul), un flux magnetic permite acumularea unei anumite „inerții” de deplasare a electronilor prin conductorul ce produce câmpul.

### Definiție

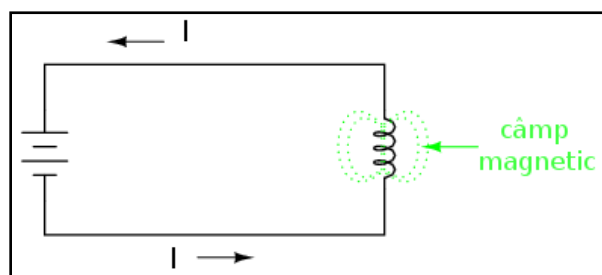
Bobinele sunt componente special concepute, pentru a profita de fenomenul electromagnetismului, sub forma unei înfășurări de material conductor. Această formă suportă un câmp magnetic mai intens decât cel produs de un simplu fir. Unele înfășurări ale bobinelor sunt realizate în jurul unui anumit tip de material, denumit miez. Miezul unei bobine poate fi drept, sau poate forma un drum închis (pătrat, rectangular, circular) pentru menținerea completă a fluxului magnetic. Toate aceste opțiuni de proiectare au efect final asupra performanțelor și caracteristicilor bobinelor.

## Simbolul bobinei



Simbolul unei bobine, precum cel al condensatorului, este simplu, reprezentând înfășurarea conductorului. Deși o înfășurare generală este simbolul oricărei bobine, cele cu miez sunt câteodată deosebite de celelalte prin adăugarea a două linii paralele cu axa sa. Un simbol mai nou pentru bobină nu mai reprezintă înfășurarea propriu-zisă, ci se limitează la reprezentarea câtorva „cocoase” în serie.

## Comportamentul și funcționarea bobinei în circuit



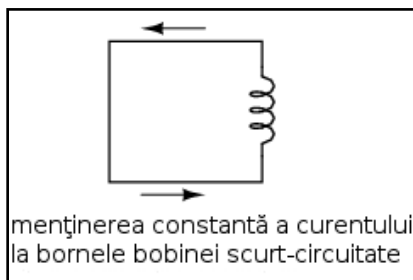
Curentul electric produce un câmp magnetic concentrat în jurul bobinei, iar acest flux magnetic reprezintă o stocare de energie cinetică datorată deplasării electronilor prin înfășurare. Cu cât valoarea curentului prin bobină este mai mare, cu atât va fi mai puternic câmpul magnetic și cu atât mai mare va fi energia stocată de bobină.

Datorită faptului că bobinele stochează energia cinetică a electronilor ce se deplasează prin înfășurare sub forma câmpului magnetic, comportamentul acestor dispozitive este foarte diferit de cel al rezistorilor (care pur și simplu disipă energia sub formă de căldură) dintr-un circuit. Energia stocată dintr-o bobină depinde de cantitatea de curent ce o străbate. Abilitatea unei bobine de a stoca energie în funcție de curent se traduce printr-o tendință de menținere constantă a curentului ce o străbate. Cu alte cuvinte, bobinele tind să se opună variației curentului. Atunci când valoarea curentului printr-o bobină crește sau scade, aceasta „rezistă” variației producând o tensiune la bornele sale de polaritate opusă variației.

## Stocarea și eliberarea energiei

Pentru a stoca energie într-o bobină, curentul prin aceasta trebuie să crească. Acest lucru înseamnă că și câmpul magnetic trebuie să crească în forță, iar această variație a forței câmpului produce la rândul ei o cădere tensiune conform principiului (auto)inducției electromagnetice. De asemenea, pentru a ceda energia stocată într-o bobină, curentul prin aceasta trebuie să scadă. Acest lucru înseamnă că și câmpul magnetic trebuie să scadă în forță, iar această variație a câmpului magnetic auto-induce o cădere de tensiune de polaritate opusă.

## „Legea de mișcare” a bobinei

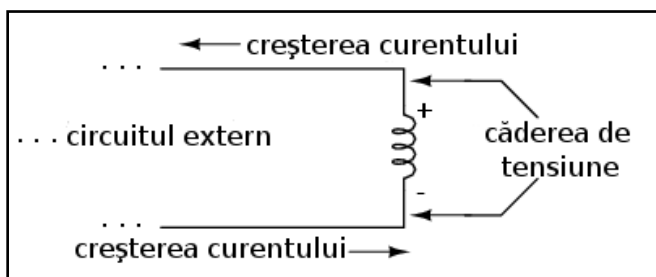


Asemenea legii de mișcare a lui Newton („un obiect în mișcare tinde să rămână în mișcare; un obiect în repaos tinde să rămână în repaos”) ce descrie tendința corpurilor de a se opune variației vitezei, putem defini tendința unei bobine de a se opune variației curentului astfel: „Electronii ce se deplasează printr-o bobină tind să rămână în mișcare; electronii ce se află în repaos într-o bobină tind să rămână în repaos.”.

Teoretic, o bobină scurt-circuitată va menține o valoare constantă a curentului la bornele sale fără niciun ajutor extern

Practic însă, abilitatea unei bobine de susținere individuală a unui curent la bornele sale se poate realiza doar cu ajutorul firelor supraconductoare, deoarece rezistența inerentă oricărui conductor normal este suficientă pentru disiparea rapidă a puterii din circuit și descreșterea curentului, atunci când nu există o sursă de putere în circuit.

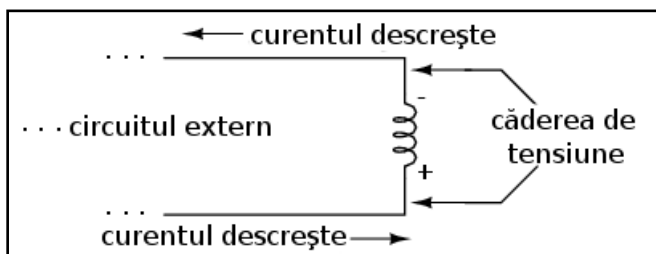
### Încărcarea bobinei; bobina ca o sarcină



Când curentul printr-o bobină crește, aceasta va genera o cădere de tensiune în direcția opusă deplasării electronilor, comportamentul fiind asemenea unei sarcini.

În această situație, spunem că bobina se încarcă, deoarece energie stocată sub formă de câmp magnetic crește. Observați polaritate tensiuni față de direcția curentului.

### Descărcarea bobinei; bobina ca o sursă de putere



Atunci când curentul prin bobină descrește, căderea de tensiune generată de aceasta este îndreptată spre direcția de deplasare a electronilor, comportamentul fiind asemenea unei surse de putere.

În această situație, spunem că bobina se descarcă, deoarece stocul de energie descrește, fiind elibertă în circuitul extern. Observați polaritatea căderii de tensiune față de direcția curentului.

### Inductanța (L)

Măsura capacității unei bobine de stocare a energiei pentru o anumită valoare a curentului poartă numele de inductanță. Inductanța măsoară și intensitatea opoziției variației de curent (valoarea tensiunii autoinduse pentru o anumită rată de variație a curentului). Simbolul acesteia este „L”, iar unitatea de măsură este Henry, prescurtat „H”.

## Observație

Dacă conectăm bursă o bobină nemagnetizată la o sursă de putere, bobina va rezista inițial curgerii electronilor prin generarea unei căderi de tensiune egală cu cea a sursei. Pe măsură ce curentul începe să crească, se va crea un câmp magnetic din ce în ce mai puternic ce absoarbe energie de la sursă. Eventual, curentul atinge valoarea maximă și creșterea sa se oprește. În acest moment, bobina nu mai absoarbe energie de la sursă, iar căderea de tensiune la bornele sale este minimă (tinde spre zero) (curentul rămâne la valoarea sa maximă).

Pe măsura ce o bobină stochează o cantitate mai mare de energie, curentul prin aceasta crește, iar căderea de tensiune scade. Observați că acest comportament este exact opus comportamentului condensatorului, acolo unde stocarea energiei duce la creșterea căderii de tensiune pe component! Condensatoarele stochează energia prin menținerea unei tensiuni statice între armăturile sale, iar bobinele stochează energie prin menținerea unui curent prin înfășurările lor.

## 2. Relația tensiune-curent a bobinei

- Tensiunea la bornele unei bobine depinde de inductanța sa precum și de variația curentului cu timpul la bornele sale

### „Legea lui Ohm” pentru bobine

Bobinele nu au o „rezistență” stabilă precum rezistorii. Totuși, există o relație matematică dintre tensiunea și curentul unei bobine, astfel:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

unde,

$v$  = tensiunea instantanee la bornele bobinei (V)

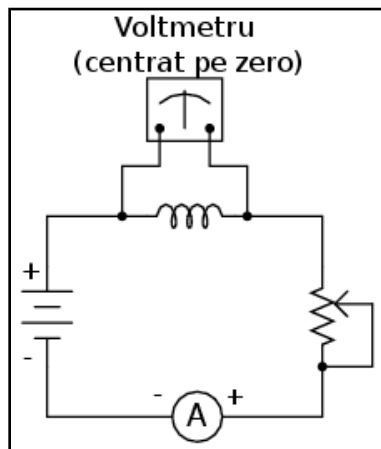
$L$  = inductanța bobinei (H)

$di / dt$  = rata de variație a curentului (A / s)

Forma acestei ecuații este asemănătoare ecuației pentru condensatoare.

Precum este și cazul condensatoarelor, comportamentul bobinelor depinde de variabila timp. Pe lângă rezistența specifică spirelor înfășurării (o vom presupune egală cu zero pentru simplificarea expunerii), căderea de tensiune la bornele unei bobine este strâns legată de viteza (rata) de variație a curentului în timp.

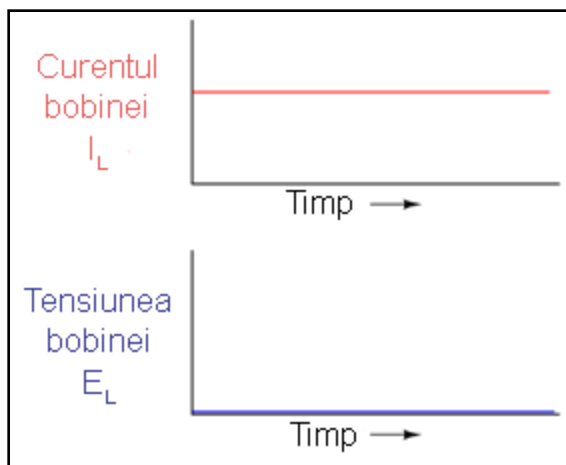
## Exemplificare



Să presupunem o bobină perfectă (rezistență de  $0\ \Omega$  a firelor) introduși într-un circuit în care putem varia cantitatea de curent cu ajutorul unui potențiometru conectat ca și rezistor variabil.

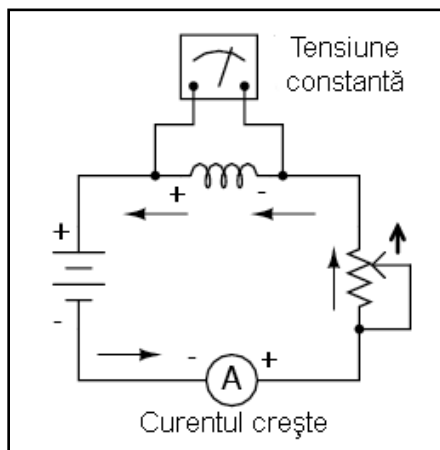
### Potențiometru fix

Dacă mecanismul potențiometrului rămâne într-o poziție fixă (peria nu se deplasează), ampermetrul conectat în serie va citi o valoare constantă a curentului, iar voltmetrul conectat în paralel cu bobina va înregistra 0 V. În acest scenariu, rata instantanee de variație a curentului ( $di / dt$ ) este egală cu zero, deoarece curentul este stabil (constant). Ecuația ne spune că, având o variație de  $0\text{ A} / \text{s}$  (nu există de fapt variație) pentru  $di / dt$ , căderea de tensiune la bornele bobinei trebuie să fie egală cu zero. Din punct de vedere fizic, dacă nu există o variație a curentului, câmpul magnetic generat de bobină va fi constant. Fără o variație a fluxului magnetic ( $d\Phi / dt = \text{Wb} / \text{s}$ ), nu va exista nicio cădere de tensiune în lungul bobinei datorită inducției electromagnetice.



Graficul variației tensiunii și curentului în raportul cu timpul la bornele bobinei în acest caz, arată precum în figura alăturată.

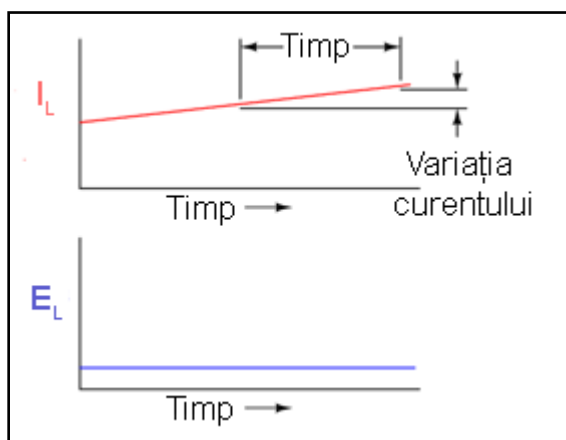
### Potențiometrul variabil cu o viteză constantă (în sus)



Dacă deplasăm ușor peria potențiometrului în „sus”, rezistența sa, „văzută” de circuit, scade. Efectul este creșterea curentului prin circuit, astfel că indicația ampermetrului va crește ușor.

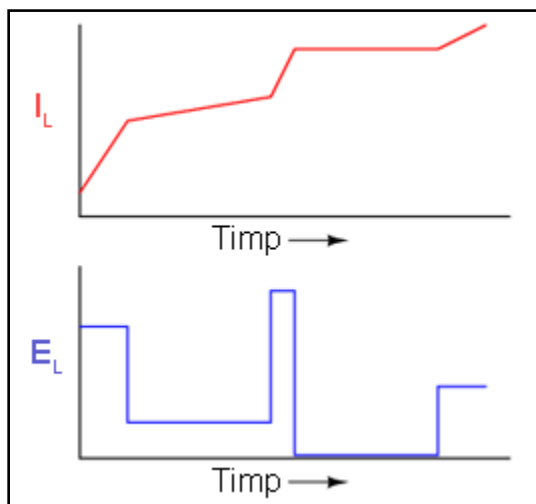
Presupunând că peria potențiometrului se deplasează cu o rată constantă, astfel încât creșterea valorii curentului prin bobină să fie constantă (linie dreaptă pe graficul timp-curent), valoarea termenului  $di/dt$  din formulă va fi una constantă. Această valoare fixă, înmulțită cu inductanța bobinei în Henry (de asemenea fixă), duce la o valoare constantă a tensiunii. Fizic, creșterea progresivă a curentului dă naștere unui câmp magnetic de asemenea în creștere.

Această creștere progresivă a fluxului magnetic la rândul ei, determină inducerea unei tensiuni în bobină așa cum rezultă din ecuația inducției lui Faraday:  $e = N(d\Phi / dt)$ . Polaritatea acestei tensiuni autoinduse de-a lungul bobinei (înfășurării) se opune variației curentului. Cu alte cuvinte, polaritatea tensiunii induse datorată creșterii curentului se va orienta împotriva direcției curentului, încercând să mențină curentul la vechea sa valoare. Acesta este de fapt un principiu mai general expus în Legea lui Lenz, ce spune că un efect indus va fi tot timpul opus cauzei ce-l produce.



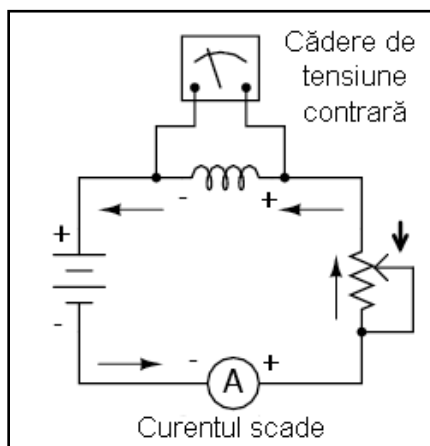
În acest scenariu, bobina se comportă precum o sarcină, cu partea negativă a tensiunii induse ca loc de intrare al electronilor, iar partea pozitivă a tensiunii induse ca loc de ieșire al lor.

### Potențiometrul variabil cu o viteză variabilă



Modificând rata de creștere a curentului prin bobină prin deplasarea în sus a periei potențiometrului la diferite viteze rezultă valori diferite ale căderilor de tensiune la bornele bobinei, cu aceeași polaritate ca și mai înainte (opusă creșterii curentului).

### Potențiometrul variabil (în jos)



Inversând direcția de deplasare a periei potențiometrului („jos”), rezistența sa, „văzută” de circuit, crește. Curentul, prin urmare, va scădea prin circuit (valoare negativă pentru raportul  $di / dt$ ). Bobina, ce se opune tot timpul variației curentului, va produce o cădere de tensiune contrară direcției variației.

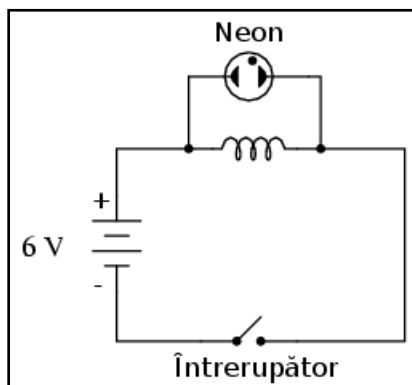
Valoarea tensiunii produse de bobină va depinde de rata (viteza) de descreștere a curentului prin aceasta. Conform legii lui Lenz, tensiunea indusă se va opune variației curentului. Cu un curent ce descrește, polaritatea tensiunii este orientată astfel încât să mențină curentul la valoarea sa precedentă. În acest scenariu, bobina se comportă precum o sursă, cu partea negativă a tensiunii induse la capătul de ieșire al electronilor, iar partea pozitivă la capătul de intrare. Cu cât curentul descrește mai rapid, cu atât bobina va produce o tensiune mai mare, în încercarea sa de menținere constantă a curentului prin eliberarea energiei stocate spre circuit.

## Valoarea absolută a tensiunii

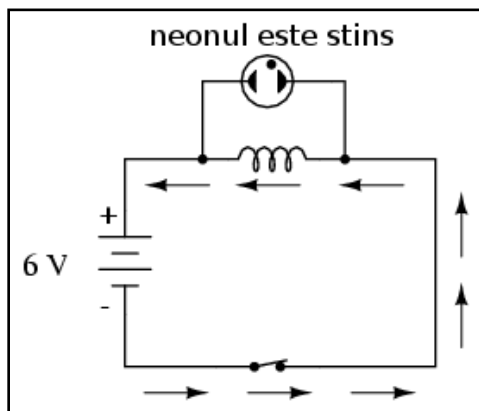
Din nou, cantitatea de tensiune la bornele unei bobine perfecte este direct proporțională cu rata variației curentului prin aceasta. Singura diferență între cazurile de creștere și descreștere ale curentului este polaritatea tensiunii induse. Pentru aceeași rată de creștere sau descreștere (variație) a curentului cu timpul, magnitudinea (valoarea absolută) a tensiunii va fi aceeași. De exemplu, o variație de  $di/dt = 2 \text{ A/s}$  va produce aceeași cantitate de tensiune indusă la bornele unei bobine precum o variație de  $di/dt = -2 \text{ A/s}$ , însă de polaritate diferită.

## Variația foarte rapidă a curentului

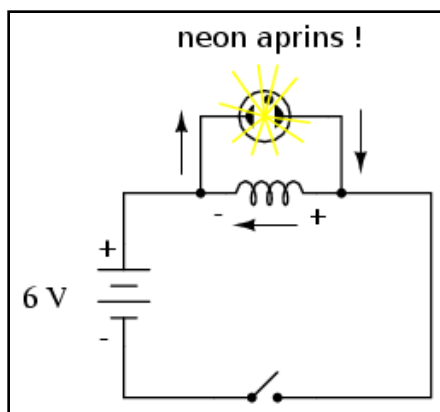
Dacă variația curentului prin circuit este foarte rapidă, se vor produce căderi de tensiuni foarte mari. Să considerăm următorul circuit:



În acest circuit, un neon este conectat la bornele unei bobine. Un întrerupător este folosit pentru controlul curentului din circuit, iar puterea din circuit este generată de o baterie de 6 V. Când întrerupătorul este închis, bobina se va opune pentru scurt timp variației curentului de la 0 A (circuit deschis) la o anumită valoare (circuit închis), dar căderea de tensiune la bornele sale va fi foarte mică.



Pentru ionizarea gazului din interiorul neonului, acesta nu poate fi aprins de cei 6 V produși de baterie, sau de căderea mică de tensiune datorată variației curentului prin bobină la închiderea întrerupătorului.



Când circuitul este deschis însă, întrerupătorul introduce o rezistență extrem de mare în circuit (rezistența aerului dintre contactele sale). Această introducere bruscă a unei rezistențe foarte mari în circuit rezultă în scăderea



aproape instantă a curentului din circuit la valoarea zero. Matematic, termenul  $di / dt$  va avea o valoare foarte mare, negativă.

O asemenea variație puternică a curentului de la o anumită valoare la zero într-un interval de timp foarte scurt, va induce o tensiune foarte mare la bornele bobinei, de polaritate negativă în stânga și pozitivă în dreapta, chiar dacă doar pentru un scurt moment până când curentul scade la zero.

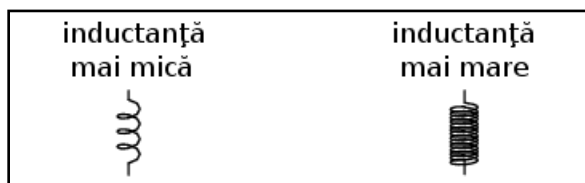
Pentru efect maxim, mărimea bobinei ar trebuie să fie cât mai mare posibil (o inductanță de cel puțin 1 Henry).

### 3. Factori ce afectează inductanța bobinei

- Inductanța bobinei crește odată cu creșterea numărului de spire din înfășurare, și invers
- Inductanța bobinei crește odată cu creșterea ariei înfășurării, și invers
- Inductanța bobinei scade odată cu creșterea lungimii înfășurării, și invers
- Inductanța bobinei crește odată cu creșterea permeabilității magnetice a materialului din care este confecționat miezul acesteia, și invers

Există patru factori de bază în construcția bobinelor ce influențează valoarea inductanței create. Toți acești factori se referă la valoarea fluxului magnetic creat pentru o anumită valoare a forței magnetice:

#### Numărul spirelor din înfășurare



Toți ceilalți factori fiind egali, un număr mai mare de spire în înfășurarea bobinei rezultă într-o valoare mai mare a inductanței, și invers.

Explicație: un număr mai mare de spire se traduce printr-o forță magnetică mai mare (în amperi), pentru o anumită valoare a curentului prin bobină.

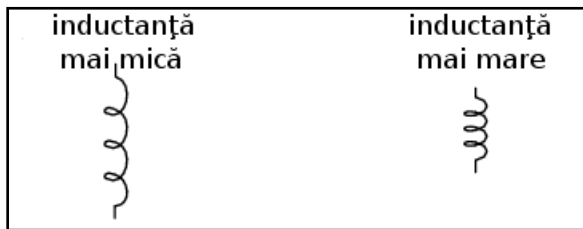
#### Aria înfășurării



Toți ceilalți factorii fiind egali, o arie mai mare a înfășurării (privind în lungul înfășurării la secțiunea transversală a acesteia) rezultă într-o inductanță mai mare, și invers.

Explicație: o arie mai mare a înfășurării prezintă o opoziție mai mică față de formarea fluxului magnetic, pentru o anumită valoare a forței câmpului magnetic.

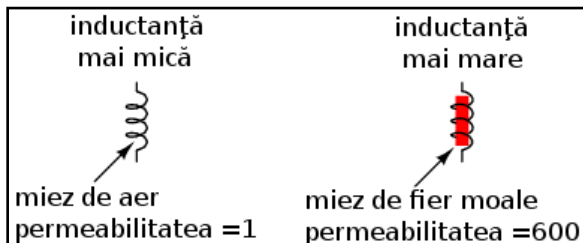
## Lungimea înfășurării



Toți ceilalți factorii fiind egali, cu cât lungimea înfășurării este mai mare, cu atât inductanța este mai mică, și invers.

Explicație: o cale mai lungă pentru fluxul magnetic rezultă într-o opoziție crescută față de formarea acelui flux, pentru o anumită valoare a forței magnetice.

## Materialul miezului



Toți ceilalți factorii fiind egali, cu cât permeabilitatea magnetică a miezului înfășurării este mai mare, cu atât mai mare este inductanța, și invers.

Explicație: un miez dintr-un material cu o permeabilitate magnetică mai mare rezultă într-un flux magnetic mai mare pentru o anumită valoare a forței magnetice.

## Formula inductanței

O aproximare pentru calcularea inductanței oricărei înfășurări se poate obține cu următoarea formulă:

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l}$$

unde,

L - inductanța înfășurării (H)

N - numărul spirelor din înfășurare (1, pentru fir simplu)

$\mu = \mu_r \mu_0$

$\mu$  - permeabilitatea absolută a materialului miezului

$\mu_r$  - permeabilitatea relativă (1, pentru aer)

$\mu_0$  - permeabilitatea vidului ( $1,26 \times 10^{-6}$ )

A - aria înfășurării ( $m^2$ )

l - lungimea medie a înfășurării (m)

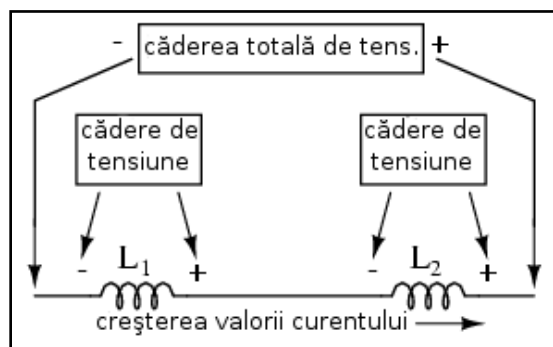
Această formulă este doar aproximativă, deoarece permeabilitatea magnetică variază odată cu variația intensității câmpului magnetic (vezi ne-liniaritatea curbelor „B-H” pentru diferite materiale). Dacă termenul  $\mu$  (permeabilitatea) din ecuația de mai sus nu este stabil, nici inductanța (L) nu va fi perfect stabilă atunci când apar variații ale curentului prin înfășurare. Dacă histerezisul miezului este suficient de mare, acest lucru se va răsfrânge asupra inductanței bobinei. La construcția bobinelor se încercă minimizarea acestor efecte prin realizarea bobinei în așa fel încât densitatea fluxului magnetic nu atinge niciodată nivelul de saturație, iar bobina funcționează în porțiunea mai liniară a curbei de magnetizație B-H.

Bobinele variabile sunt de obicei concepute astfel încât să fie posibilă variația numărului de înfășurări folosite în orice moment, sau prin schimbarea miezului.

#### 4. Conectarea în serie și în paralel a bobinelor

- Inductanțele serie se adună
- Inductanțele paralel sunt mai mici decât inductanțele oricăror bobine individuale

##### Inductanța bobinelor serie



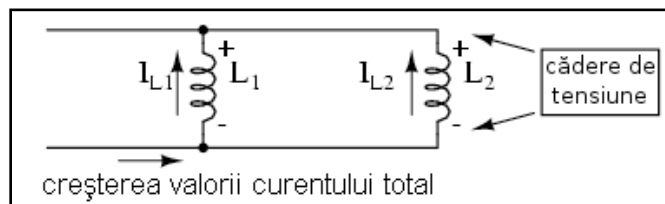
La conectarea bobinelor în serie, inductanța totală este suma inductanțelor individuale ale bobinelor. Acest lucru se datorează faptului că inductanța este valoarea căderii de tensiune pe o bobină în funcție de rata de variație a curentului prin ea.

Dacă bobinele sunt conectate în serie, prin urmare având același curent pe la borne și aceeași rată de variație a acestuia, atunci valoarea totală a căderii de tensiune ca urmare a variației curentului va fi suma căderilor individuale, pe fiecare bobină; se crează astfel o tensiune totală mult mai mare decât este posibilă pe fiecare bobină în parte, dacă aceasta ar fi fost conectată singură în circuit. O valoare mai mare a tensiunii pentru aceeași valoare a variației curentului înseamnă o inductanță mai mare.

Astfel, inductanța totală pentru bobinele serie este mai mare decât inductanțele individuale ale bobinelor. Formula pentru calcularea inductanței serie este asemănătoare celei pentru calculul rezistențelor în serie:

$$L_{total} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

## Inductanța bobinelor paralel



La conectarea bobinelor în paralel, inductanța totală este mai mică decât inductanțele individuale ale bobinelor.

Explicația este asemănătoare celei pentru conectarea bobinelor în serie. Măsura inductanței este valoarea căderii de tensiune pe bobină pentru o anumită rată de variație a curentului prin aceasta. Din moment ce valoarea curentului prin fiecare bobină este doar o fracție din valoarea totală a curentului, iar tensiunea pe fiecare bobină paralelă este egală, o modificare a valorii totale a curentului va duce la o cădere de tensiune pe fiecare bobină în parte mult mai mică decât dacă fiecare bobină ar fi fost considerată separat (legată singură în circuit). O cădere de tensiune mai mică pentru aceeași rată de variație a curentului înseamnă o inductanță mai mică.

Prin urmare, inductanța totală este mai mică decât valoarea inductanței ce ar fi fost posibilă pe fiecare bobină luată în parte. Formula de calcul a inductanței paralele are aceeași formă ca și a rezistențelor conectate în paralel:

$$L_{total} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}}$$

## 5. Considerații practice (bobina)

Bobinele, la fel ca toate celelalte componente, au anumite limite ce trebuie luate în considerare dacă se dorește operarea eficientă și siguranța a circuitelor din care fac parte.

### Curentul maxim printr-o bobină

Bobinele sunt realizate din conductori înfășurați. Orice conductor are o limită maximă a capacității curentului prin el, limită datorată rezistenței și abilității acestuia de a elimina căldura creată. Din această cauză, trebuie să fim atenți la valoarea curentului maxim permisă printr-o bobină.

## **Circuitul echivalent a unei bobine**

Orice conductor din care este realizat bobina prezintă o anumită rezistență electrică. Adeseori, cerințele circuitului impun cea mai mică dimensiune posibilă bobinelor din componență. Din acest motiv, nu există o bobină „ideală”. Conductorii bobinelor prezintă de obicei o rezistență electrică serie substanțială. Distanța foarte mică dintre doi conductori adiacenți ai înfășurării dă naștere unei capacități parazite. Toate aceste lucruri interacționează cu caracteristicile pur inductive ale tuturor bobinelor.

Spre deosebire de condensatoare, ce sunt relativ ușor de confecționat pentru obținerea unor efecte parazite neglijabile, bobinele sunt greu de găsit în forma lor „pură”. În unele aplicații, aceste caracteristici nedorite pot pune serioase probleme ingineresti.

## **Mărimea fizică a bobinelor**

Fizic, bobinele tind să fie mult mai mare decât condensatoarele, pentru aceeași valoare a energiei stocate. Acest lucru este cu atât mai adevărat dacă luăm în considerare condensatoarele electrolitice, ce permit stocarea unei energii (capacitive) mari într-un spațiu relativ mic. Dacă dorim stocarea unei energii mari într-un volum mic, într-un anumit circuit pe care-l proiectăm, dacă putem alege între o bobină și un condensator, de cele mai multe ori alegerea corectă o reprezintă condensatorul.

O excepție notabilă a acestei reguli o reprezintă aplicații care necesită capacități sau inductanțe extrem de mari pentru stocarea energiei electrice: bobinele realizate din fire supraconductoare (rezistență electrică zero) sunt mai practice din punct de vedere al realizării lor decât condensatoarele de aceeași valoare, și probabil sunt și mai mici.

## **Interferența cauzată de bobine**

Bobinele pot afecta componentele adiacente dintr-un circuit electric sau electronic datorită câmpurilor magnetice create. Aceste câmpuri se întind pe o distanță relativ mare față de bobină. Acest lucru este adevărat mai ales în cazul în care există și alte bobine în apropierea acestora. În cazul în care câmpurile magnetice a două sau mai multe bobine se „cuplează”, în circuit vor exista inductanțe mutuale precum și inductanțe proprii, ducând la efecte nedorite.

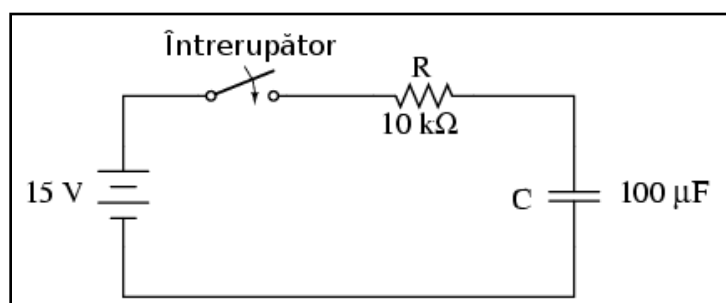
Acesta este un alt motiv pentru care, la proiectarea circuitelor, se aleg de obicei condensatoare în dauna bobinelor, acolo unde acest lucru este posibil: câmpul electric al condensatoarelor nu se „împrăștie” pe o suprafață mare precum cel al bobinelor, și nu generează efecte mutuale cu celelalte componente din circuit.

## **16 - Constantele de timp RC și L/R**

## 1. Răspunsul tranzitoriu al condensatorului

- Condensatoarele se comportă aproximativ asemenea bateriilor secundare în cazul aplicării unei tensiuni la bornele lor: reacția inițială este de a produce un curent foarte mare ce tinde spre zero cu timpul
- Un condensator complet descărcat se comportă inițial asemenea unui scurt circuit atunci când la bornele sale se aplică o anumită tensiune. După ce se încarcă la valoarea tensiunii sursei de alimentare, se comportă precum un circuit deschis
- Într-un circuit RC (rezistor-condensator) alimentat, tensiunea condensatorului crește de la zero la valoarea sursei de alimentare, pe când curentul trece de la valoarea maximă spre zero; ambele variabile au o variație puternică la început, și se apropie tot mai greu de valorile lor finale odată cu trecerea timpului

### Circuit RC simplu

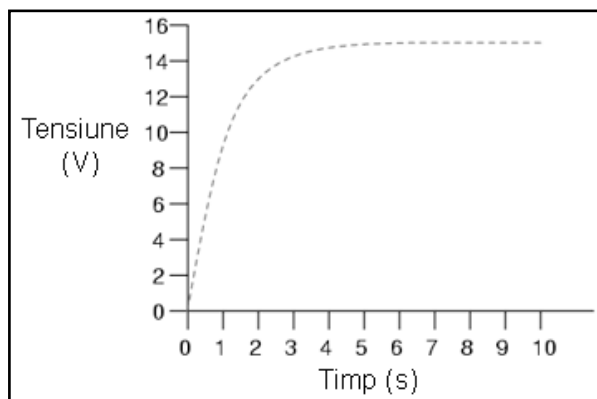


Condensatoarele tind să se comporte asemenea bateriilor secundare datorită posibilității de stocare și eliberare ulterioară a energiei sub formă de câmp electric.

Un condensator complet descărcat generează o tensiune de zero volți la bornele sale, iar un condensator încărcat menține o valoare constantă a tensiunii la bornele sale, asemenea unei baterii. Atunci când aceștia sunt introduși într-un circuit cu alte surse de tensiune, absorb energie de la aceste surse, la fel precum o baterie secundară se încarcă atunci când este conectată la un generator. Un condensator complet descărcat, având o cădere de tensiune zero la bornele sale, conectat la o sursă de tensiune, se va comporta inițial precum un scurt-circuit, folosind un curent maxim de la sursă pe măsură ce se încarcă.

Cu timpul, tensiunea la bornele sale crește spre valoarea tensiunii aplicate de sursă, iar curentul prin condensator scade din această cauză. După ce condensatorul a atins valoarea maximă a tensiunii sursei, încetează să mai „consume” curent de la această, și se comportă practic precum un circuit deschis.

### Închiderea întrerupătorului



Graficul alăturat prezintă variația tensiunii cu timpul, variație cunoscută sub numele de răspuns tranzistoriu (al condensatorului, în acest caz).

Atunci când întrerupătorul este închis prima dată, tensiunea la bornele condensatorului (considerat complet descărcat) este de zero volți; de aceea, în primă fază se comportă precum un scurt-circuit. Cu timpul, tensiunea condensatorului crește până la valoarea tensiunii bateriei, moment în care condensatorul se comportă precum un circuit deschis. În această configurație, curentul prin circuit este determinat de raportul dintre diferența de tensiune dintre baterie și condensator și valoarea rezistenței,  $10\ \Omega$ . Pe măsură ce tensiunea condensatorului se apropie de cea a bateriei, curentul prin circuit se apropie și el de valoarea zero. Odată atinsă tensiunea bateriei de către condensator (15 V), curentul va fi exact zero.

### Tabelul variației

Mai jos este prezentat tabelul variației tensiunii cu timpul, în primele 10 secunde de la închiderea întrerupătorului:

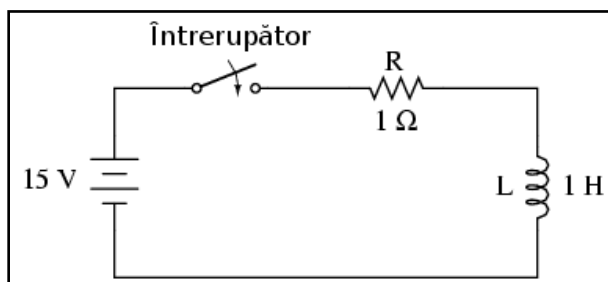
| Timp (secunde) | Tensiune baterie | Tensiune condensator | Curent        |
|----------------|------------------|----------------------|---------------|
| 0              | 15 V             | 0 V                  | 1500 $\mu$ A  |
| 0.5            | 15 V             | 5,902 V              | 909,8 $\mu$ A |
| 1              | 15 V             | 9,482 V              | 551,8 $\mu$ A |
| 2              | 15 V             | 12,970 V             | 203,0 $\mu$ A |
| 3              | 15 V             | 14,253 V             | 74,68 $\mu$ A |
| 4              | 15 V             | 14,725 V             | 27,47 $\mu$ A |
| 5              | 15 V             | 14,899 V             | 10,11 $\mu$ A |
| 6              | 15 V             | 14,963 V             | 3,718 $\mu$ A |
| 10             | 15 V             | 14,999 V             | 0,068 $\mu$ A |

În timp, tensiunea condensatorului se apropie de 15 volți iar curentul se apropie de zero; acest grafic se numește asimptotic, adică, ambele variabile se apropie tot mai mult de valoarea lor finală cu timpul, dar niciuna nu atinge exact acea valoare. Din punct de vedere practic însă, putem presupune că valoarea tensiunii la bornele condensatorului atinge la un moment dat 15 V, iar curentul 0 A.

## 2. Răspunsul tranzitoriu al bobinei

- O bobină complet descărcată se comportă inițial precum un circuit deschis atunci când la bornele sale este aplicată o tensiune. După ce se încarcă, curentul prin ea este maxim, iar tensiunea zero, comportamentul fiind asemenea unui scurt-circuit.
- Într-un circuit rezistor-bobină, curentul bobinei trece de la zero la valoarea maximă, iar tensiunea de la valoarea maximă la zero; ambele variabile au o variație puternică la început.

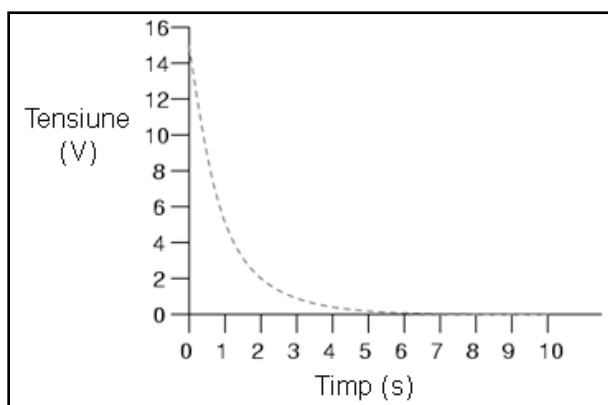
### Circuit L/R simplu



O bobină complet descărcată (nu există câmp magnetic), prin care nu trece niciun curent, la conectarea unei surse de tensiune la bornele sale, se va comporta inițial asemenea unui circuit deschis (încearcă să mențină un curent de zero amperi), căderea de tensiunea la bornele sale fiind maximă.

În timp, curentul crește spre valoarea maximă permisă de circuit, iar tensiunea scade spre zero. Odată atinsă valoarea de zero volți (pentru o bobină ideală), curentul rămâne la nivelul maxim, iar bobina se va comporta asemenea unui scurt-circuit.

### Închiderea întrerupătorului



La închiderea întrerupătorului, căderea de tensiune pe bobină sare direct la valoarea tensiunii bateriei (precum un circuit deschis) și scade spre zero cu timpul (ajungând să se comporte precum un scurt-circuit).

Tensiunea pe bobină se determină calculând care este căderea de tensiune de pe R cunoscând curentul prin bobină; diferența dintre tensiunea bateriei și cea a rezistorului este tensiunea de pe bobină. La închiderea inițială a întrerupătorului, curentul este zero, dar crește apoi cu timpul până ajunge să fie egal cu raportul dintre tensiunea furnizată de baterie și rezistența rezistorului conectat în serie ( $1\Omega$  în acest caz). Comportamentul acesta este exact invers față de circuitul RC (rezistor-condensator), unde curentul inițial a fost maxim iar tensiunea pe condensator zero.



## Tabelul variației

Mai jos este prezentat tabelul variației tensiunii cu timpul, în primele 10 secunde de la închiderea întrerupătorului:

| Timp (secunde) | Tensiune baterie | Tensiune condensator | Curent  |
|----------------|------------------|----------------------|---------|
| 0              | 15 V             | 15 V                 | 0       |
| 0.5            | 15 V             | 9,098 V              | 5,902 A |
| 1              | 15 V             | 5,518 V              | 9,482 A |
| 2              | 15 V             | 2,030 V              | 12,97 A |
| 3              | 15 V             | 0,747 V              | 14,25 A |
| 4              | 15 V             | 0,275 V              | 14,73 A |
| 5              | 15 V             | 0,101 V              | 14,90 A |
| 6              | 15 V             | 37,181 mV            | 14,96 A |
| 10             | 15 V             | 0,681 mV             | 14,99 A |

La fel ca în cazul circuitului RC, graficul tensiunii și al curentului cu timpul este asimptotic.

### 3. Analiza circuitelor tranzitorii RC și L/R

Pașii pentru analiza circuitelor tranzitorii RC și L/R:

1. Determinarea constantei de timp a circuitului (RC sau L/R)
2. Identificarea variabilei de calculat (tensiune pentru condensator, curent pentru bobină)
3. Determinarea valorilor inițiale și finale a variabilei alese
4. Introducerea valorilor (inițiale, finale, constantei de timp) în formula universală a constantei de timp și rezolvarea acestora (calcularea variației)
5. Dacă valoarea inițială a fost zero, atunci valoarea actuală la timpul specificat este egală cu variația calculată cu ajutorul formulei universale. În caz contrar, valoarea actuală este suma dintre variația calculată și valoarea inițială a variabilei

Există o metodă sigură de calcul a tuturor variabilelor dintr-un circuit reactiv (cu bobine și/sau condensatoare) de curent continuu. Primul pas este identificarea valorilor inițiale și a celor finale pentru tensiune în cazul condensatoarelor și pentru curent în cazul bobinelor.

## Valorile inițiale

La închiderea întrerupătorului (sau deschiderea) dintr-un circuit, componentul reactiv încearcă să mențină această cantitate (tensiune pentru condensator, curent pentru bobină) la valoarea existentă înainte de acționarea întrerupătorului (vezi răspunsul tranzistoriu al condensatorului și răspunsul tranzistoriu al bobinei); această valoare este prin urmare folosită ca valoare „inițială”.

## Valorile finale

Valoarea finală a acestor mărimi este cantitatea la care acestea ajung după o durată de timp infinită de la acționarea întrerupătorului. Aceasta poate fi determinată în analiza circuitului capacitiv considerând condensatorul un circuit deschis, iar în cazul analizei circuitului inductiv, considerând bobina un scurt-circuit, deoarece acesta este comportamentul lor după ce sunt încărcate la maxim (după o perioadă de timp infinită).

## Constanta de timp

Următorul pas este calcularea constantei de timp a circuitului: timpul necesar pentru ca valorile tensiunii și ale curentului să varieze cu aproximativ 63% din valoarea finală, într-o situație tranzitorie. Constanta de timp se exprimă în secunde și este simbolizată prin litera grecească „tau”,  $\tau$ .

### Circuit RC serie

Într-un circuit RC serie, constanta de timp este egală cu produsul dintre rezistența totală în ohmi și capacitatea în Farad:

$$\tau = RC$$

### Circuit L/R serie

Pentru un circuit serie L/R, constanta de timp este egală cu raportul dintre inductanța totală în Henry și rezistența totală în ohmi.

$$\tau = \frac{L}{R}$$

## Explicație

Creșterea și descreșterea valorilor circuitului reactiv tranzitoriu, este asimptotică, curbele graficului sunt prin urmare exponențiale.

După cum am spus mai sus, constanta de timp este durata de timp necesară pentru ca oricare dintre aceste valori să varieze cu 63% față de valoarea lor inițială spre cea finală. Cu fiecare constantă de timp, aceste valori se situează cu 63% mai aproape de valoarea lor finală. Formula matematică pentru determinarea precisă a procentelor variației este următoarea:

$$\text{procentul variației} = \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{t}{\tau}}}\right) 100\%$$

Litera **e** este constanta lui Euler, aproximativ 2,7182818. La formula de mai sus s-a ajuns cu ajutorul analizei matematice, după analiza asimptotică a valorilor circuitului. După un timp egal cu o constantă de timp, procentul variației față de valoarea inițială este de:

$$\left(1 - \frac{1}{e^1}\right) 100\% = 63,212\%$$

După o perioadă de două constante de timp, procentul variației față de valoarea inițială este:

$$\left(1 - \frac{1}{e^2}\right) 100\% = 86,466\%$$

După zece constante de timp:

$$\left(1 - \frac{1}{e^{10}}\right) 100\% = 99,995\%$$

Cu cât perioada de timp de la aplicarea tensiunii bateriei la bornele bobinei/condensatorului este mai lungă, cu atât este mai mare valoarea numitorului fracției, întreaga fracție fiind astfel mai mică, iar totalul scăzut din valoarea 1 se apropie eventual spre 1, sau, 100%.

## Formula universală a constantei de timp

Putem deduce o formulă universală pentru determinarea valorilor curentului și ale tensiunii în circuitele tranzitorii, astfel:

$$\text{variația} = (\text{inițial} - \text{final}) \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{t}{\tau}}}\right)$$

unde,

final = valoarea variabilei după un timp infinit (valoarea finală)

inițial = valoarea inițială a variabilei considerate

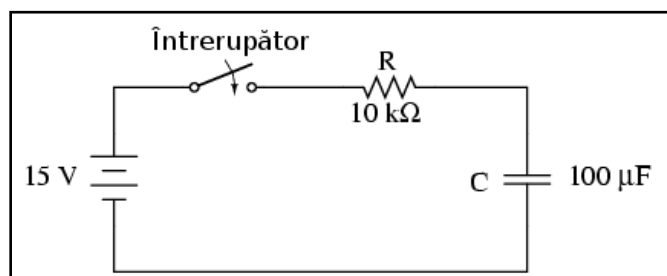
$e$  = constanta lui Euler (2,7182)

$t$  = timpul (s)

$\tau$  = constanta de timp a circuitului ( $\tau$ )

## Analiza circuitului RC serie

Să analizăm circuitul RC serie de la începutul capitolului:



### Constanta de timp

Din moment ce constanta de timp ( $\tau$ ) a unui circuit RC serie este produsul dintre rezistență și capacitate, valoarea obținută este de 1 secundă:

$$\tau = RC = 10 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ }\mu\text{F} = 1 \text{ s}$$

### Calcularea tensiunii

Analizăm în acest caz tensiunea deoarece este valoarea pe care condensatoarele încearcă să o mențină constantă. Cu toate că formula se poate aplica la fel de bine și pentru curent, valorile finale și cele inițiale pentru curent sunt de fapt derivate din tensiunea condensatorului, prin urmare, calcularea tensiunii este o metodă mai directă. Rezistența este de 10 k $\Omega$  iar capacitatea de 100  $\mu\text{F}$  (microfarad).

Dacă inițial condensatorul este complet descărcat (0 V), putem folosi această valoare pentru tensiunea inițială. Valoarea finală va fi tensiunea bateriei, 15 V. Formula universală pentru tensiunea condensatorului în acest circuit arată astfel:

$$\text{variația} = (\text{inițial} - \text{final}) \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{t}{\tau}}} \right) = (15 \text{ V} - 0 \text{ V}) \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{t}{1}}} \right)$$

După 7,25 de secunde de la aplicarea tensiunii la bornele condensatorului (prin închiderea întrerupătorului), tensiunea va crește astfel:

$$\text{variația} = (15 \text{ V} - 0 \text{ V}) \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{7,25}{1}}} \right) - (15 \text{ V} - 0 \text{ V}) \cdot 0,99929 = 14,989 \text{ V}$$

Deoarece tensiunea inițială la bornele condensatorului a fost de 0 V, o creștere cu 14,989 V se traduce printr-o cădere de tensiune de 14,989 V la bornele condensatorului după 7,25 s de la închiderea circuitului.

### Calcularea curentului

Aceași formulă poate fi folosită și pentru determinarea curentului din circuit. Știm că un condensator descărcat se comportă precum un scurt-circuit, prin urmare, curentul inițial va fi maximul posibil în circuit:

$$\text{curentul inițial} = \frac{15 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega}$$

Știm de asemenea că valoarea finală a curentului va fi zero, din moment ce condensatorul se va comporta eventual precum un circuit deschis, prin urmare, nu va exista curgere a electronilor prin circuit. Cunoscând valorile inițiale și cele finale, putem folosi formula universală pentru determinarea valorii curentului după 7,25 de secunde de la închiderea aceluiași circuit RC de mai sus:

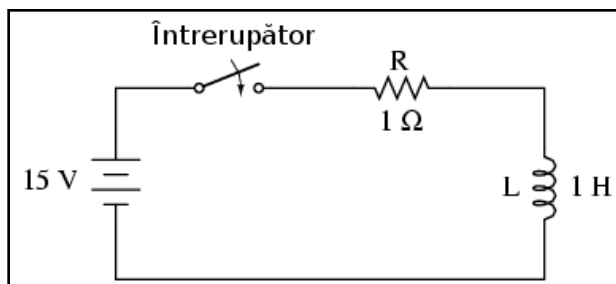
$$\text{variația} = (0 \text{ mA} - 1,5 \text{ mA}) \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{7,25}{1}}} \right) = (0 \text{ mA} - 1,5 \text{ mA}) \cdot 0,99929 = -1,4989 \text{ mA}$$

Observăm că valoarea obținută este negativă, nu pozitivă! Acest lucru înseamnă o descreștere a curentului și nu creștere a acestuia în timp. Din moment ce am început cu un curent de 1,5 mA, această descreștere de 1,4989 mA se traduce prin existența unui curent de 0,001065 mA (1,065  $\mu$ A) după un interval de timp de 7,25 de secunde de la închiderea circuitului.

Am fi putut determina curentul prin circuit după 7,25 s, scăzând tensiunea condensatorului din tensiunea bateriei pentru obținerea tensiunii pe rezistor; aflăm apoi curentul prin rezistor (și prin întreg circuitul) folosind legea lui Ohm ( $I = E / R$ ). În ambele cazuri, ar trebui să obținem același rezultat:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{(15 \text{ V} - 14,989 \text{ V})}{10 \text{ k}\Omega}$$

### Analiza circuitului L/R serie



Să analizăm acum circuitul L/R serie de la începutul capitolului.

### Constanta de timp

Cu o inductanță de 1 Henry și o rezistență serie de 1 ohm, constanta de timp a circuitului de față este de 1 secundă:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{1 \text{ H}}{1 \Omega} = 1 \text{ s}$$

### Calcularea curentului

Deoarece este un circuit inductiv, iar bobinele știm că se opun variației curentului, vom aplica formula universală folosind valorile inițiale și finale ale curentului. Dacă inițial întrerupătorul este deschis, curentul este egal cu zero (valoarea inițială). După o perioadă de timp infinită, curentul va atinge valoarea sa finală, egală cu raportul dintre tensiunea sursei și rezistența totală din circuit ( $I = E / R$ ), 15 A în acest caz.

Dacă vrem să aflăm valoarea curentului la 3,5 secunde după închiderea întrerupătorului, aplicăm formula universală astfel:

$$\text{variația} = (15 \text{ A} - 0 \text{ mA}) \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{3,5}{1}}} \right) = (15 \text{ A} - 0 \text{ A}) \cdot 0,9698 = 14,547 \text{ A}$$

Din moment ce valoarea inițială a curentului a fost zero, valoare acestuia după 3,5 secunde este de 14,547 amperi.

### Calcularea tensiunii

Având doar un singur rezistor în circuit, calculăm mai întâi căderea de tensiune pe acesta pentru timpul de 3,5 s:

$$E_R = 14,547 \text{ A} \cdot 1 \Omega = 14,547 \text{ V}$$

Făcând diferența între tensiunea bateriei și cea a rezistorului, căderea de tensiune pe bobină este de 0,453 V pentru timpul de 3,5 s:

$$E_L = E_{baterie} - E_R = 15 \text{ V} - 14,547 \text{ V} = 0,453 \text{ V}$$

## 4. De ce L/R și nu LR

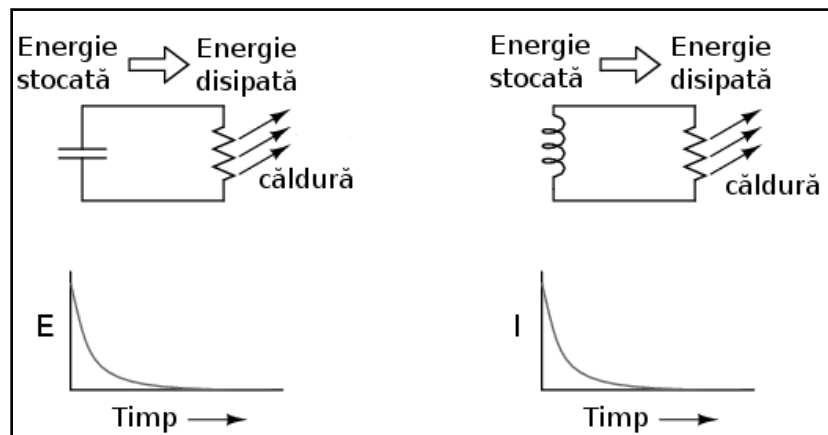
### Circuitele tranzitorii și transferul de energie

Pentru cei care studiază teoria circuitelor electrice pentru prima dată, este destul de greu de înțeles motivul pentru care calculul constantei de timp pentru un circuit inductiv este diferit față de circuitul capacitiv. Pentru un circuit rezistor-condensator (RC), constanta de timp (în secunde) se calculează ca produs dintre rezistența în ohmi și capacitatea în Farad:  $\tau = RC$ . Totuși, pentru un circuit rezistor-bobină (L/R), constanta de timp se calculează ca raport dintre inductanța în Henry și rezistență în ohmi:  $\tau = L/R$ .

Această diferență a modului de calcul are implicații profunde asupra analizei calitative a răspunsului tranzitoriu al circuitului. Circuitele RC au un răspuns mai rapid pentru o valoare mică a rezistenței și un răspuns mai lent pentru o valoare mare a rezistenței; circuitele L/R au un răspuns mai rapid cu o rezistență mai mare și unul mai lent pentru o rezistență mai mică, exact opusul situației precedente. Circuitele RC în general sunt destul de intuitive, dar cele inductive sunt mai greu de înțeles.

Cheia care stă la baza înțelegerii circuitelor tranzitorii este o însușire temeinică a conceptului transferului de energie și natura sa electrică. Atât condensatoarele cât și bobinele pot stoca energie, condensatorul sub formă de câmp electric iar bobina sub formă de câmp magnetic. Energia electrostatică a condensatorului tinde să mențină constantă valoarea tensiunii de la terminalele sale. Energia electromagnetică a bobinei tinde să mențină constantă valoarea curentului prin ea.

## Descărcarea condensatorului și a bobinei



Să luăm în considerare ce se întâmplă în cazul fiecărui component reactiv în momentul descărcării, și anume, atunci când energia stocată în dispozitiv (bobină sau condensator) este eliberată pe un rezistor și disipată de acesta sub formă de căldură.

În ambele cazuri, căldura disipată de rezistor constituie energie ce părăsește circuitul, în consecință, componentul reactiv (condensatorul sau bobina) își pierde energia stocată în timp; rezultatul este fie o descreștere a tensiunii condensatorului sau o descreștere a curentului bobinei, lucru reprezentat pe grafic. Cu cât rezistorul disipă mai multă putere, cu atât mai rapidă este descărcarea dispozitivelor, deoarece puterea, prin definiție, este rata transferului de energie cu timpul.

Prin urmare, constanta de timp a unui circuit tranzitoriu depinde de rezistența circuitului. Desigur, aceasta depinde și de capacitatea de stocare a componentului reactiv, dar ne vom concentra momentan doar pe efectul rezistorului asupra circuitului. Constanta de timp a circuitului este mai mică (o rată de descărcare mai rapidă) dacă

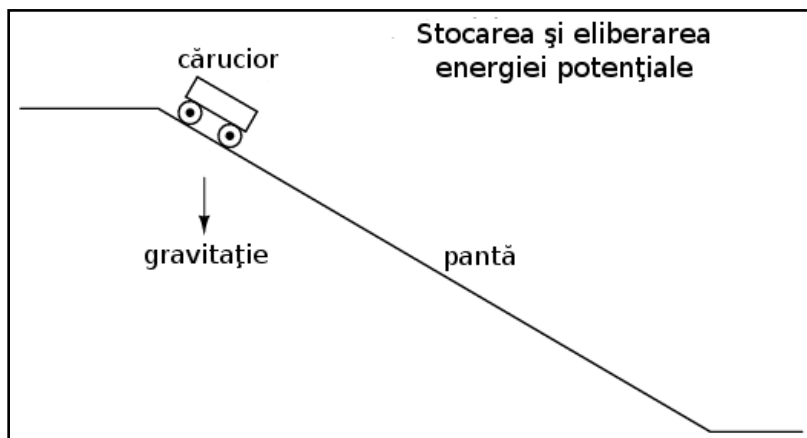
valoarea rezistorului este în așa fel încât maximizează disiparea puterii (rata transformării energiei în căldură) din circuit.

Pentru un circuit capacitiv, unde energia stocată este sub formă de tensiune, acest lucru înseamnă că rezistorul trebuie să posede o valoare mică a rezistenței pentru maximizarea curentului, oricare ar fi tensiunea existentă. Pentru un circuit inductiv, unde energia stocată este sub formă de curent, acest lucru înseamnă că rezistorul trebuie să posede o valoare mare a rezistenței pentru maximizarea căderii de tensiune, oricare ar fi valoarea curentului (luând în considerare faptul că produsul dintre tensiune și curent este egal cu puterea).

## Energia potențială și energia cinetică

Ca și o analogie, putem recurge la o exemplificare mecanică a stocării energiei sub formă capacitivă și inductivă. Condensatoarele, stocând energie electrostatic, sunt rezervoare de energie potențială. Bobinele, stocând energie electromagnetic (electrodinamic), sunt rezervoare de energie cinetică. Mecanic, energia potențială poate fi reprezentată cu ajutorul unei mase suspendate, iar energia cinetică cu ajutorul unei mase aflate în mișcare.

### Energia potențială



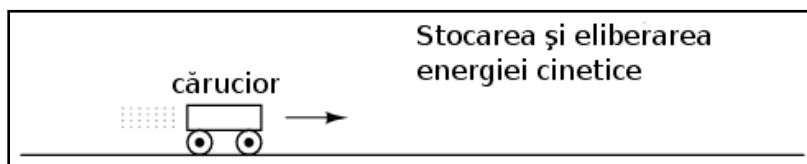
Să considerăm ilustrația alăturată pentru condensator, considerând energia stocată în acesta ca fiind energie potențială.

Căruciorul, atunci când se afla în vârful pantei, posedă energie potențială datorată influenței gravitației și poziției sale din vârf. Dacă luăm în considerare sistemul de frânare al căruciorului, acesta este analog rezistenței circuitului/sistemului, iar căruciorul este în acest caz condensatorul; întrebarea este, ce valoare (mică sau mare) a rezistenței ajută la o eliberare mai rapidă (parcursul mai rapid al pantei) a energiei potențiale? Desigur, o rezistență minimă (lipsa frânelor) ar duce la parcursul cea mai rapidă a pantei de către cărucior!

Fără ca sistemul de frânare să acționeze, căruciorul se va deplasa liber pe pantă în jos, folosind („consumând”) energie potențială pe măsură ce pierde din înălțime. Atunci când sistemul de frânare acționează la capacitate maximă, căruciorul nu se va deplasa la vale (sau o va face foarte încet), iar energia sa potențială se va păstra pentru o perioadă mai îndelungată de timp. Același lucru se întâmplă și în cazul circuitului capacitiv, ce se descarcă rapid dacă rezistența sa este mică, și se descarcă lent dacă rezistența este mare.



## Energia cinetică



Să considerăm acum o analogie mecanică pentru bobină, reprezentând energia stocată de aceasta sub formă cinetică.

De această dată, căruciorul se află la nivelul solului și este deja în mișcare. Energia sa în acest caz este energie cinetică (mișcare), nu potențială (înălțime). Din nou, considerând sistemul de frânare al căruciorului ca fiind analog rezistenței din circuit, atunci putem considera căruciorul ca fiind bobina; întrebarea în acest caz este este asemănătoare celei din cazul condensatorului, și anume, ce valoare a rezistenței facilitează eliberarea rapidă a energiei cinetice stocate? Desigur, o rezistență maximă (sistemul de frânare acționat la maxim) va încetini căruciorul cel mai repede (într-o perioadă de timp cât mai scurtă).

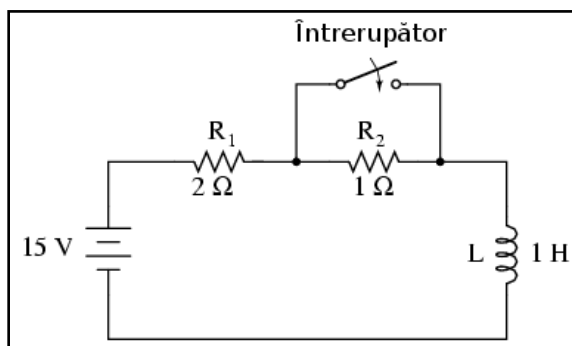
Cu sistemul de frânare acționat la maxim, căruciorul se va opri foarte repede, folosind („consumând”) energia cinetică pe măsură ce încetinește. Fără acțiunea frânelor, căruciorul se deplasează liber, pentru o perioadă de timp infinită (neglijând frecarea și rezistența aerodinamică în acest caz), iar energia sa cinetică va fi menținută (stocată) pentru o perioadă lungă de timp. Analog, un circuit inductiv se descarcă rapid dacă rezistența pe care se descarcă este mare și invers, se descarcă lent dacă rezistența este mică.

## 5. Cazuri speciale de calcul

### Valori inițiale diferite de zero

Există cazuri de analiză a circuitelor de curent continuu tranzitorii în care componentele reactive (condensatoare sau bobine) nu sunt inițial „descărcate”, prin urmare, valorile inițiale ale tensiunii și curentului nu sunt zero. Cu alte cuvinte, condensatorul poate fi parțial încărcat la momentul inițial (tensiunea la bornele sale este diferită de zero), iar bobina poate fi deja străbătută de un anumit curent la momentul inițial.

### Circuit L/R simplu



Să luăm circuitul alăturat ca și exemplu; inițial întrerupătorul este deschis, iar la momentul final acesta este închis.

Deoarece acesta este un circuit inductiv, începem analiza prin determinarea valorilor inițiale și finale ale curentului. Acest pas este extrem de important în analiza circuitelor inductive, deoarece valorile inițiale și finale ale tensiunii nu pot fi cunoscute decât după determinarea curentului!

Cu întrerupătorul în poziția deschis (condiția inițială), rezistența serie totală este de  $3\Omega$ , ceea ce limitează valoarea finală a curentului din circuit la 5 A:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{15 \text{ V}}{3 \Omega} = 5 \text{ A}$$

astfel, chiar înainte de a închide întrerupătorul, avem un curent de 5 A prin bobină, față de 0 A în exemplul din secțiunea precedentă). Când întrerupătorul este închis (condiția finală), rezistorul de  $1 \Omega$  este scurt-circuitat, iar valoarea totală a rezistenței din circuit se reduce la  $2\Omega$ ; valoarea finală a curentului prin circuit cu întrerupătorul închis este:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{15 \text{ V}}{2 \Omega} = 7,5 \text{ A}$$

Prin urmare, bobina din acest circuit are un curent inițial de 5 A și unul final de 7,5 A. Deoarece ne interesează ce se întâmplă în circuit după închiderea întrerupătorului și scurt-circuitarea rezistorului  $R_2$ , calcularea constantei de timp se realizează pentru  $L_1$  și  $R_1$ :  $1 \text{ Henry} / 2 \Omega$ , sau  $\tau = 0,5$  secunde. Cu aceste valori, putem acum calcula valorile curentului în timp. Tensiunea pe bobină este egală cu diferența dintre tensiunea bateriei (15 V) și produsul dintre curentul circuitului (7,5 A) și rezistența  $R_1$  ( $2 \Omega$ ). Dacă observăm că tensiunea inițială la bornele bobinei este de 5 V și apoi scade la 0 V după un timp infinit de la închiderea întrerupătorului, putem folosi aceste valori în formula universală a constantei de timp pentru a ajunge la aceleași rezultate:

$$\text{variația} = (7,5 \text{ A} - 5 \text{ A}) \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{t}{0,5}}} \right) - \text{pentru curent}$$

$$\text{variația} = (0 \text{ V} - 5 \text{ V}) \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{t}{0,5}}} \right) - \text{pentru tensiune}$$

### **Tabelul variației**

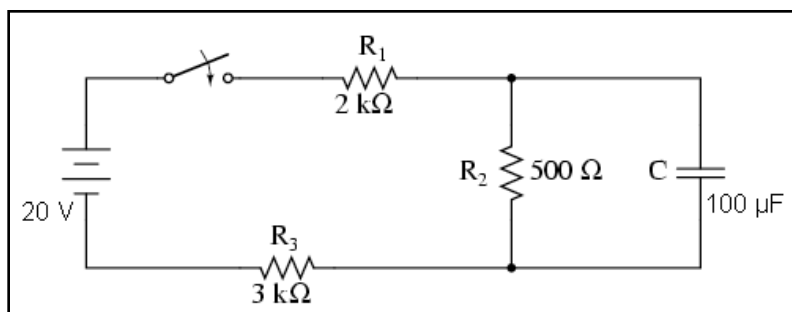
Mai jos este prezentat tabelul variației tensiunii cu timpul, în primele 3 secunde de la închiderea întrerupătorului:

| Timp (secunde) | Tensiune baterie | Tensiune condensator | Curent  |
|----------------|------------------|----------------------|---------|
| 0              | 15 V             | 5 V                  | 5 A     |
| 0.1            | 15 V             | 4.094 V              | 5.453 A |
| 0.25           | 15 V             | 3.033 V              | 5.984 A |
| 0.5            | 15 V             | 1.839 V              | 6.580 A |
| 1              | 15 V             | 0.677 V              | 7.162 A |
| 2              | 15 V             | 0.092 V              | 7.454 A |
| 3              | 15 V             | 0.012 V              | 7.494 A |

## 6. Circuite complexe

- Pentru analiza circuitelor RC sau L/R mai complexe decât cele serie simple, putem transforma circuitul într-un circuit echivalent Thevenin considerând compoentul reactiv (condensator sau bobină) ca fiind „sarcina” și reducând restul componentelor la un circuit echivalent cu o sursă de tensiune și un rezistor serie. Apoi, analizăm comportamentul circuitului în timp, folosind formula universală a constantei de timp

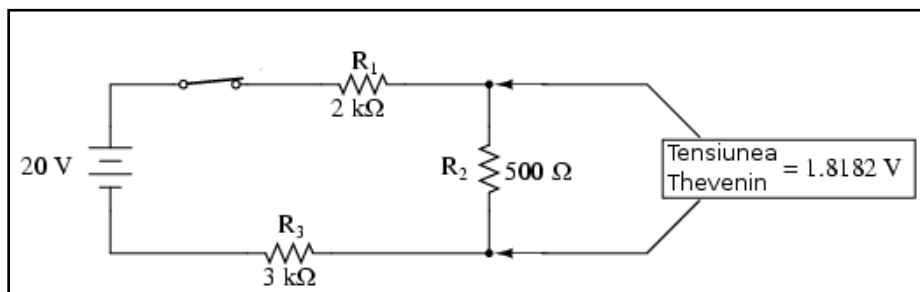
### Circuit RC paralel



Ce facem în cazul în care avem un circuit mai complicat decât configurațiile serie considerate până acum? Să considerăm circuitul alăturat, de exemplu.

Formula constantei de timp ( $\tau = RC$ ) se bazează pe un circuit capacitiv serie simplu, format dintr-un condensator și un rezistor conectate în serie. Același lucru este valabil și pentru constanta de timp în circuitul inductiv serie simplu ( $\tau = L / R$ ). Ce putem face prin urmare într-o situație asemănătoare celei de față, unde rezistorii sunt conectați într-o configurație serie-paralel cu condensatorul / bobina?

### Aplicarea teoremei lui Thevenin



Răspunsul este că putem folosi metodele învățate la analiza rețelor. Teorema lui Thevenin ne spune că putem reduce oricare circuit liniar la un circuit echivalent compus dintr-o sursă de

tensiune, un rezistor conectat în serie cu aceasta și o sarcină, urmând câțiva pași simpli.

Pentru aplicarea teoremei lui Thevenin circuitului de față, considerăm componentul reactiv, condensatorul, ca fiind sarcina; pasul următor este îndepărtarea acestuia din circuit pentru determinarea tensiunii și a rezistenței Thevenin. Apoi, după ce am determinat valorile din circuitul echivalent, reconectăm condensatorul și determinăm tensiunea și curentul în funcție de timp, exact cum am făcut și până acum.

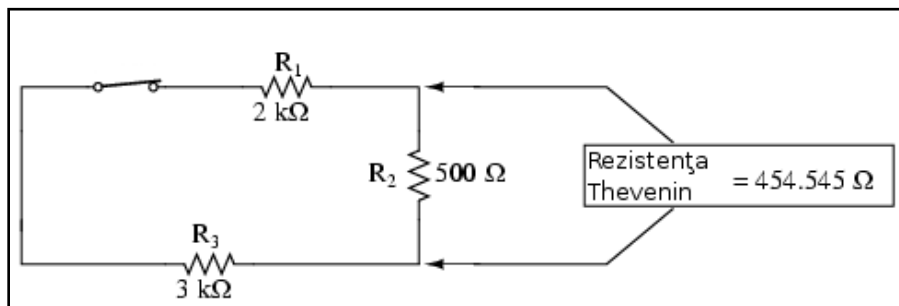
### Determinarea tensiunii la bornele sarcinii

| Mărime | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$  | Total | Unitate  |
|--------|-------|-------|--------|-------|----------|
| E      | 7,273 | 1,818 | 10,909 | 20    | V        |
| I      | 3,636 | 3,636 | 3,636  | 3,636 | A        |
| R      | 2k    | 500   | 3k     | 5,5k  | $\Omega$ |

După ce am identificat condensatorul ca fiind „sarcina” circuitului, îl îndepărtăm și determinăm tensiunea la bornele sarcinii (întrerupătorul este închis, vezi figura de mai sus). Aplicând metoda tabelului, valorile sunt cele alăturate.

Acest pas al analizei reflectă faptul că tensiunea la bornele sarcinii (aceeași ca la bornele rezistorului  $R_2$ ) este de 1,8182 V atunci când nu este conectată nicio sarcină. Dacă suntem atenți, observăm că această tensiunea este chiar tensiunea finală la bornele condensatorului, deoarece un condensator complet încărcat se comportă precum un circuit deschis (curent zero). Folosim această valoare a tensiunii pentru circuitul echivalent Thevenin.

### Determinarea rezistenței Thevenin



Pentru determinarea rezistenței Thevenin, trebuie să eliminăm toate sursele de putere din circuitul original și să recalculăm rezistența așa cum este ea văzută de la terminalele sarcinii (vezi circuitul

alăturat)

Formulele de calcul arată astfel:

$$R_{Thevenin} = R_2 // (R_1 + R_3)$$

$$R_{Thevenin} = 500 \Omega // (2 k\Omega + 3 k\Omega)$$

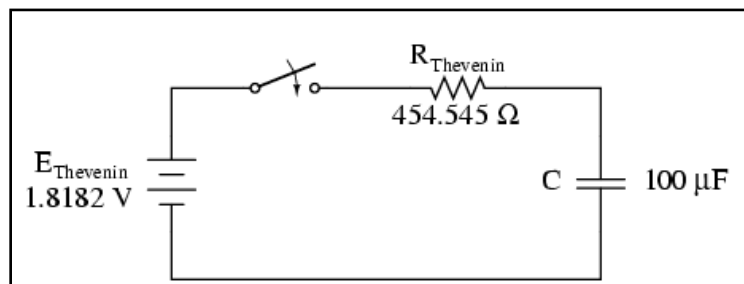
$$R_{Thevenin} = 454,545 \Omega$$

unde,

// reprezintă conectarea în paralel a rezistorilor

-- reprezintă conectarea în serie a rezistorilor

### Desenarea circuitului echivalent Thevenin



Următorul pas este redesenarea circuitului original sub forma circuitului echivalent Thevenin.

Constanta de timp pentru acest circuit va fi egală cu produsul dintre rezistența Thevenin și capacitatea condensatorului ( $\tau = RC$ ).

Cu valorile de mai sus, putem face următoarele calcule:

$$\tau = RC = 454,545 \, \Omega \cdot 100 \, \mu\text{F}$$

### Determinarea tensiunii la bornele condensatorului

În acest moment putem afla și tensiunea la bornele condensatorului direct din formula universală de calcul a constantei de timp. Să facem calculele pentru o valoare de 60 de milisecunde. Deoarece este o formulă capacitivă, vom face calculele în funcție de tensiune:

$$\text{variația} = (\text{inițial} - \text{final}) \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{t}{\tau}}} \right)$$

$$\text{variația} = (1,8182 \, \text{V} - 0 \, \text{V}) \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{60 \, \text{ms}}{45,45 \, \text{ms}}}} \right)$$

$$\text{variația} = 1,8182 \, \text{V} \cdot 0,7328 = 1,3325 \, \text{V}$$

Din nou, deoarece valoarea inițială a tensiunii condensatorului am presupus-o ca fiind 0 V, căderea de tensiune actuală pe condensator după un interval de 60 ms de la închiderea întrerupătorului este suma dintre valoarea inițială (0 V) și cea finală (1,3325 V), adică 1,3325 V.

## 7. Rezolvarea circuitului pentru variabila timp

## Determinarea duratei de timp

În unele cazuri este necesară determinarea duratei de timp pentru care circuitul va atinge o valoare predeterminată. Acest lucru este în special întâlnit în cazurile în care proiectăm circuitul RC sau L/R pentru o aplicație în funcție de timp. Pentru acest calcul, trebuie să modificăm formula universală a constantei de timp. Cea originală arată astfel:

$$\text{variația} = (\text{inițial} - \text{final}) \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{t}{\tau}}} \right) = (\text{inițial} - \text{final}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

În acest caz dorim însă să realizăm un calcul în funcție de timp. Pentru aceasta, modificăm formula, și scoatem variabila timp în stânga formulei, în loc de „variație”:

$$v = (i - f) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$\frac{v}{i - f} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\frac{v}{i - f} - 1 = -e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$1 - \frac{v}{i - f} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\ln \left( 1 - \frac{v}{i - f} \right) = \ln \left( e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$\frac{-t}{\tau} = \ln \left( 1 - \frac{v}{i - f} \right)$$

$$t = -\tau \left[ \ln \left( 1 - \frac{v}{i - f} \right) \right]$$

unde,

v = variația (tensiunii sau a curentului); a nu se confunda cu tensiunea instantanee

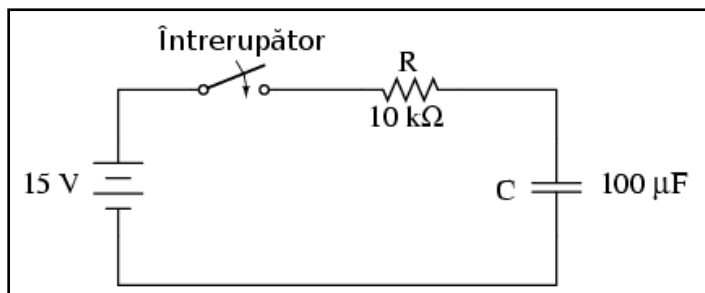
i = valoarea inițială (a nu se confunda cu, curentul instantaneu

f = valoarea finală

Iar  $\ln$  reprezintă logaritmul natural; inversa lui  $e$ :

dacă  $e^x = a$ , atunci  $\ln a = x$  - puterea la care trebuie ridicat  $e$  pentru a produce rezultatul  $a$

## Exemplu



Folosim același circuit rezistor-condensator de la începutul capitolului și ne folosim de datele deja determinate pentru a afla durata de timp.

Constanta de timp este aceeași, 1 secundă ( $10\text{ k}\Omega$  înmulțit cu  $100\text{ }\mu\text{F}$ ); iar valorile inițiale și finale rămân și ele neschimbate (tensiunea inițială a condensatorului este inițial  $0\text{ V}$ , iar cea finală  $15\text{ V}$ ). După cum reiese din tabelul de la începutul capitolului, după 2 secunde condensatorul va fi încărcat la  $12,970\text{ V}$ .

Să introducem așadar valoarea de  $12,970\text{ V}$  în formula determinată mai sus pentru a vedea dacă timpul rezultat este de 2 secunde:

$$t = -1\text{ s} \left[ \ln \left( 1 - \frac{12,97\text{ V}}{15\text{ V} - 0\text{ V}} \right) \right] = -1\text{ s} \cdot \ln(0,135) = 1\text{ s} \cdot 2 = 2\text{ s}$$

Într-adevăr, răspunsul este cel așteptat, și anume 2 secunde. Putem însă afla duratele de timp necesare încărcării condensatorului pentru oricare valoare din intervalul (inițial, final). De exemplu, care este durata de timp pentru care condensatorul se încarcă la  $10\text{ V}$ ?

Tony R. Kuphaldt



INTRODUCERE ÎN CIRCUITE ELECTRICE  
ȘI ELECTRONICE

**Volumul 2: Curentul alternativ**

Traducere: Mihai Olteanu

**SCIENTIA**ro



## Prefață

Cartea de față reprezintă varianta românească, tradusă de Mihai Olteanu, a volumului „Curentul alternativ” din seria „Lessons in Electric Circuits” scrisă de Tony R. Kuphaldt sub licența „Design Science License”.

Cartea în limba română se distribuie gratuit prin intermediul site-ului Scientia.ro. Orice comentarii sau sugestii de îmbunătățire sunt binevenite și pot fi trimise pe adresa [admin@scientia.ro](mailto:admin@scientia.ro). Puteți utiliza conținutul de față în orice scop, respectând condițiile impuse de licența DSL, în principal, menționarea sursei originale.

*Atenție, pe tot parcursul cărții se va folosi notația reală de deplasare a electronilor prin circuit, și anume, dinspre borna negativă (-) spre borna pozitivă (+) !*

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>01 - BAZELE TEORIEI CURENTULUI ALTERNATIV .....</b>                 | <b>1</b>   |
| 1. CE ESTE CURENTUL ALTERNATIV .....                                   | 1          |
| 2. FORME DE UNDĂ ÎN CURENT ALTERNATIV .....                            | 5          |
| 3. AMPLITUDINEA CURENTULUI ALTERNATIV.....                             | 7          |
| 4. REZOLVAREA CIRCUITELOR SIMPLE DE CURENT ALTERNATIV.....             | 12         |
| 5. FAZELE CURENTULUI ALTERNATIV.....                                   | 14         |
| <b>02 - NUMERE COMPLEXE .....</b>                                      | <b>18</b>  |
| 1. INTRODUCERE .....                                                   | 18         |
| 2. VECTORI ȘI FORME DE UNDĂ ÎN CURENT ALTERNATIV .....                 | 19         |
| 3. ADUNAREA SIMPLĂ A VECTORILOR .....                                  | 21         |
| 4. ADUNAREA COMPLEXĂ A VECTORILOR .....                                | 23         |
| 5. NOTAȚIA POLARĂ ȘI RECTANGULARĂ A NUMERELOR COMPLEXE .....           | 24         |
| 6. ARITMETICA NUMERELOR COMPLEXE .....                                 | 28         |
| <b>03 - REACTANȚA ȘI IMPEDANȚA INDUCTIVĂ.....</b>                      | <b>30</b>  |
| 1. CIRCUITE REZISTIVE.....                                             | 30         |
| 2. CIRCUITE INDUCTIVE. REACTANȚA .....                                 | 31         |
| 3. CIRCUITE REZISTIV-INDUCTIVE SERIE. IMPEDANȚA .....                  | 36         |
| 4. CIRCUITE REZISTIV-INDUCTIVE PARALEL.....                            | 41         |
| <b>04 - REACTANȚA ȘI IMPEDANȚA CAPACITIVĂ.....</b>                     | <b>44</b>  |
| 1. CIRCUITE CAPACITIVE .....                                           | 44         |
| 2. CIRCUITE REZISTIV-CAPACITIVE SERIE .....                            | 47         |
| 3. CIRCUITE REZISTIV-CAPACITIVE PARALEL .....                          | 51         |
| <b>05 - REACTANȚA ȘI IMPEDANȚA RLC .....</b>                           | <b>55</b>  |
| 1. REZISTENȚA (R), REACTANȚA (X) ȘI IMPEDANȚA (Z) - RECAPITULARE ..... | 55         |
| 2. CIRCUITE RLC SERIE.....                                             | 57         |
| 3. CIRCUITE RLC PARALEL.....                                           | 60         |
| 4. CIRCUITE RLC SERIE-PARALEL .....                                    | 62         |
| 5. SUSCEPTANȚA ȘI ADMITANȚA.....                                       | 68         |
| <b>06 - REZONANȚA .....</b>                                            | <b>69</b>  |
| 1. PENDULUL ELECTRIC .....                                             | 69         |
| 2. REZONANȚA PARALEL.....                                              | 74         |
| 3. REZONANȚA SERIE .....                                               | 76         |
| 4. APLICAȚII ALE REZONANȚEI.....                                       | 78         |
| 5. REZONANȚA SERIE-PARALEL. ANTIREZONANȚA.....                         | 79         |
| <b>07 - SEMNALE CU FRECVENȚE MULTIPLE.....</b>                         | <b>86</b>  |
| 1. INTRODUCERE .....                                                   | 86         |
| 2. ANALIZA UNUI SEMNAL DREPTUNGHILAR.....                              | 89         |
| 3. ANALIZA SPECTRALĂ .....                                             | 93         |
| 4. EFECTE ASUPRA CIRCUITELOR.....                                      | 97         |
| <b>08 – FILTRE.....</b>                                                | <b>101</b> |
| 1. CE ESTE UN FILTRU .....                                             | 101        |
| 2. FILTRU TRECE-JOS.....                                               | 102        |
| 3. FILTRU TRECE-SUS .....                                              | 106        |
| 4. FILTRU TRECE-BANDĂ.....                                             | 109        |
| 5. FILTRU STOP-BANDĂ .....                                             | 111        |
| 6. FILTRE REZONANTE .....                                              | 113        |
| <b>09 – TRANSFORMATORUL.....</b>                                       | <b>119</b> |

|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| 1. TRANSFORMATORUL ȘI INDUCTANȚA MUTUALĂ.....              | 119        |
| 2. EXEMPLU DE FUNCȚIONARE.....                             | 125        |
| 3. TRANSFORMATORUL RIDICĂTOR ȘI COBORĂTOR DE TENSIUNE..... | 128        |
| 4. TIPURI DE ÎNFĂȘURĂRI; AUTOTRANSFORMATORUL.....          | 131        |
| <b>10 - CIRCUITE POLIFAZATE .....</b>                      | <b>135</b> |
| 1. SISTEME DE ALIMENTARE MONOFAZATE.....                   | 135        |
| 2. SISTEME DE ALIMENTARE TRIFAZATE.....                    | 139        |
| 3. SECVENȚA FAZELOR .....                                  | 143        |
| 4. FUNCȚIONAREA MOTOARELOR ELECTRICE.....                  | 146        |
| 5. CONFIGURAȚII STEA ȘI TRIUNGHI TRIFAZATE.....            | 150        |
| 6. TRANSFORMATORUL TRIFAZAT .....                          | 155        |
| <b>11 - FACTORUL DE PUTERE .....</b>                       | <b>159</b> |
| 1. PUTEREA ÎN CIRCUITELE REZISTIVE ȘI REACTIVE .....       | 159        |
| 2. PUTEREA REALĂ, REACTIVĂ ȘI APARENTĂ.....                | 161        |
| 3. CALCULAREA ȘI CORECTAREA FACTORULUI DE PUTERE.....      | 163        |
| <b>12 - LINII ELECTRICE LUNGI.....</b>                     | <b>168</b> |
| 1. CIRCUITELE ELECTRICE ȘI VITEZA LUMINII .....            | 168        |
| 2. IMPEDANȚA CARACTERISTICĂ.....                           | 169        |
| 3. LINII ELECTRICE FINITE .....                            | 174        |
| 4. LINII ELECTRICE LUNGI ȘI LINII ELECTRICE SCURTE.....    | 179        |
| 5. UNDE STAȚIONARE ȘI REZONANȚA .....                      | 182        |

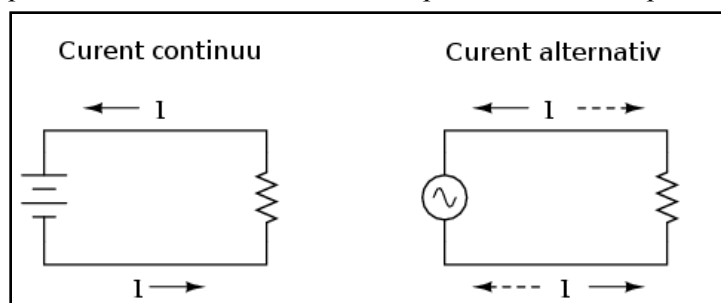
# 01 - Bazele teoriei curentului alternativ

## 1. Ce este curentul alternativ

- Curentul continuu menține tensiunea și curentul la o polaritate respectiv direcție constantă în timp
- În curent alternativ, tensiunea și curentul își schimbă polaritatea respectiv direcția în timp
- Generatoarele electromecanice în curent alternativ, cunoscute sub numele de *alternatoare*, sunt mult mai simplu de construit decât generatoarele de curent continuu. Același lucru este valabil și în cazul motoarelor electrice

### Definiție

În primul capitol am luat în considerare doar curentul continuu, termen folosit în electricitate pentru a defini deplasarea electronilor într-o singură direcție constantă și/sau calitatea tensiunii de a deține o singură polaritate. Curentul continuu este tipul de electricitate produsă de o baterie, de exemplu.



Pe cât de folosit și ușor de înțeles este curentul continuu, acesta nu este „tipul” de electricitate folosit în general. Unele surse electrice, precum generatoarele electro-mecanice rotative, produc tensiuni a căror polaritate alternează, inversându-se în acest caz polii pozitivi și negativi între ei.

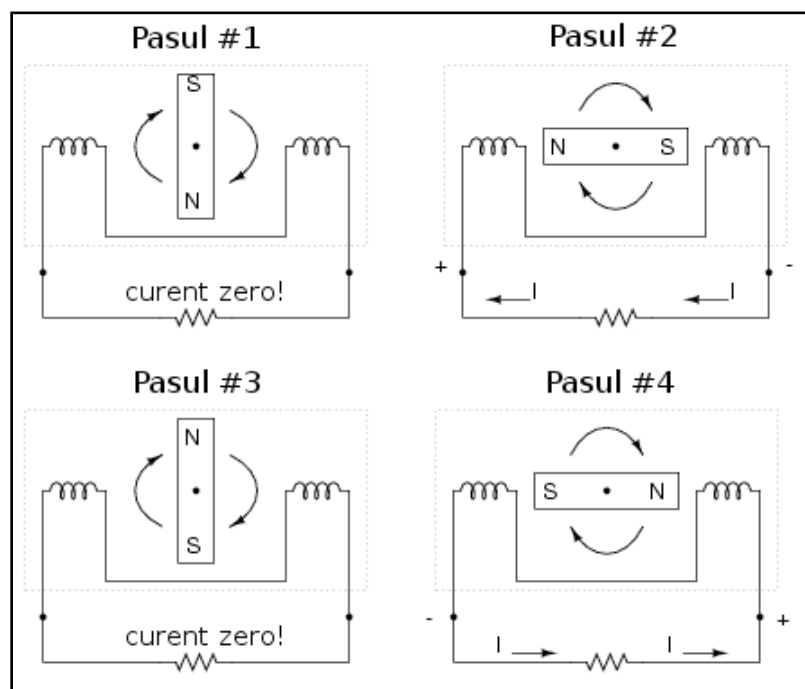
Fie că vorbim de modificarea polarității unei tensiuni sau de modificarea direcției de deplasare a electronilor înainte și înapoi, acest gen de electricitate poartă denumirea de curent alternativ.

Deși simbolul bateriei este folosit pentru a reprezenta orice sursă de curent continuu, în cazul curentului alternativ, simbolul unei surse de energie îl reprezintă o linie sinusoidală într-un cerc, precum în figura de mai sus.

### Scop

Ne putem întreba, pe bună dreptate, de ce ne-am bate capul și cu acest tip de electricitate. Este adevărat că în unele cazuri, curentul alternativ nu prezintă niciun avantaj față de cel continuu. În aplicațiile în care curentul electric este folosit doar pentru a genera energie sub formă de căldură (reșou, bec, etc.), polaritatea sau direcția curentului este irelevantă atâta timp cât tensiunea și curentul existente în circuit sunt suficiente pentru a disipa puterea necesară elementelor din circuit. Totuși, cu ajutorul curentului alternativ se pot construi generatoare electrice, motoare electrice și sisteme de distribuție a energiei electrice mult superioare din punct de vedere al eficienței față de curentul continuu.

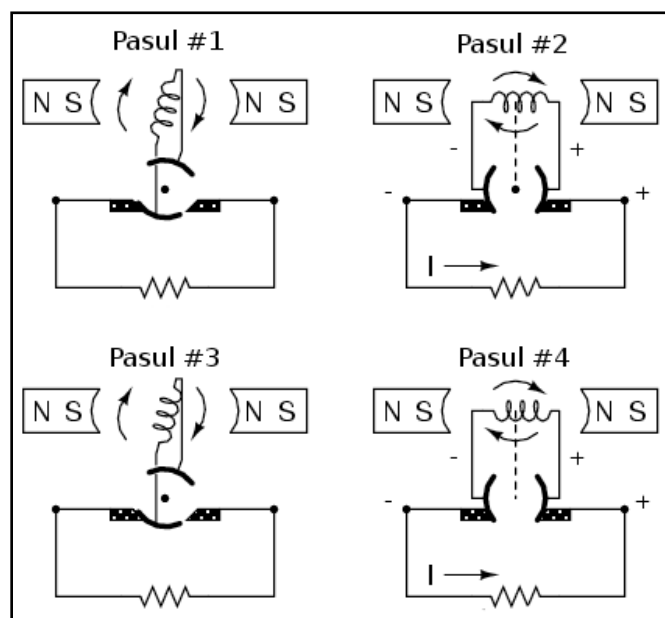
## Generarea curentului alternativ



În cazul în care construim o mașină ce rotește un câmp magnetic în jurul unui set de înfășurări staționare prin intermediul unui ax, vom constata producerea curentului alternativ pe înfășurări pe măsură ce axul se rotește; principiul se bazează pe legea inducției electromagnetice a lui Faraday. Acesta este și principiul de bază a unui generator de curent alternativ, cunoscut și sub numele de alternator.

Putem observa că polaritatea tensiunii pe înfășurare se inversează atunci când prin preajma acestea trece polul opus al magnetului. Conectată la o sursă, această inversare a polarității crează un curent invers (în direcție opusă) prin circuit. Cu cât viteza de rotație a axului generatorului este mai mare, cu atât mai repede se rotește și magnetul; rezultatul este o tensiune și curent alternativ ce-și modifică direcțiile mult mai des în aceeași perioadă de timp.

## Generarea curentului continuu



Deși generatoarele de curent continuu funcționează pe baza aceluiași principiu al inducției electromagnetice ca și generatoarele de curent alternativ, construcția acestora nu este așa de simplă.

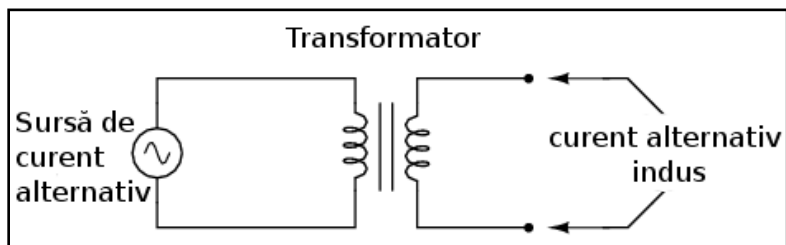
La un generator de curent continuu, înfășurarea este montată pe ax, acolo unde la generatorul de curent alternativ se află magnetul permanent, iar contactul dintre înfășurarea rotativă și circuitul exterior se realizează cu ajutorul unor contacte staționare de carbon, numite perii, ce vin în contact cu fâșii de carbon aflate pe înfășurare.

Toate aceste elemente sunt necesare pentru schimbarea polarității de ieșire spre circuitul exterior, pentru ca acesta „să vadă” o polaritate constantă (curent continuu).

Generatorul de mai sus produce două pulsuri de tensiune la fiecare revoluție a axului, ambele pulsuri având aceeași direcție (polaritate). Pentru ca un generator de curent continuu să producă o tensiune constantă și nu o tensiune intermitentă, acesta trebuie echipat cu seturi multiple de înfășurări pentru contactul cu periile. Diagrama de mai sus este prin urmare una simplificată.

Problema ce se ivește în cazul închiderii și deschiderii contactelor între înfășurările rotative și periile este dezvoltarea căldurii excesive și a scânteilor, în special la viteze mari. Dacă mediul ambiant în care funcționează generatorul prezintă vapori inflamabili sau explozivi, problema folosirii unui astfel de generator este și mai gravă. Pe de altă parte, un generator de curent alternativ nu necesită perii și comutatoare pentru funcționarea sa, și este prin urmare imun la astfel de probleme. Avantajele curentului alternativ față de cel continuu se regăsesc și în cazul confecționării motoarelor electrice.

## Transformatorul



Un alt domeniu de aplicare al curentului continuu se bazează pe un efect al electromagnetismului cunoscut sub denumirea de inducție mutuală: două sau mai multe înfășurări plasate una în vecinătatea celeilalte,

astfel încât câmpul magnetic variabil creat de o înfășurare induce o tensiune electrică în cealaltă.

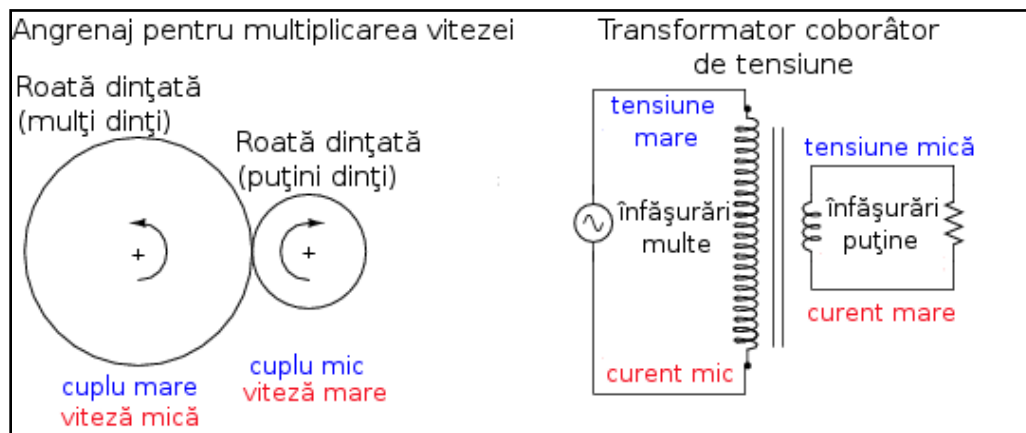
Dacă avem două înfășurări mutual inductive și alimentăm una dintre ele în curent alternativ, cea de a doua înfășurare va fi și ea străbătută de curent alternativ. O astfel de utilizare a înfășurătorilor dă naștere unui dispozitiv numit transformator:

Transformatorul este utilizat în principal pentru ridicarea sau coborârea valorii tensiunii de la înfășurarea alimentată la cea nealimentată. Prima înfășurare, cea care este alimentată în curent alternativ, poartă denumirea de primar; cea de a doua înfășurare, cea în care se induce un curent alternativ dinspre primar, poartă denumirea de secundar.

Valoarea tensiunii induse în secundar este egală cu produsul dintre valoarea tensiunii din primar și raportul dintre numărul de spire din secundar și numărul de înfășurări din primar:

$$U_2 = U_1 \frac{n_2}{n_1}$$

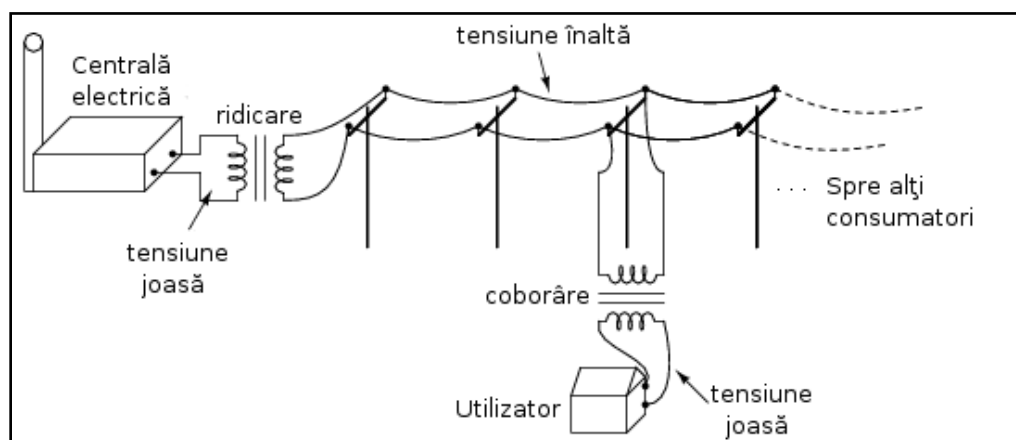
## Analogie



Această relație poate fi reprezentată printr-o analogie mecanică, folosind cuplul și viteza pentru reprezentarea tensiunii și respectiv a curentului.

Dacă inversăm raportul numărului de spire dintre primar și secundar, astfel încât primarul va avea mai puține spire decât secundarul, atunci transformatorul va „ridica” tensiune de la nivelul existent în primar la un nivel mai mare în secundar.

## Rețele de distribuție a energiei electrice



Abilitatea transformatoarelor de a ridica tensiunea sau de a o coborî este extrem de utilă în proiectare rețelelor de distribuție a energiei electrice. Atunci când se transportă energie electrică pe distanțe lungi, este mult mai eficient dacă aceasta se realizează la tensiuni înalte și curenți mici (diametrul conductorilor este mai mic, prin urmare și pierderile sunt mai mici), și coborârea acestora pentru utilizarea de către consumatori.

Tehnologia proiectării transformatoarelor face posibilă existența sistemelor de distribuție. Fără capacitatea de ridicare și coborâre a tensiunii, sistemele de distribuție ar fi mult prea scumpe pentru a fi practice, decât poate, doar pe distanțe scurte, de câțiva kilometri.

## Observație

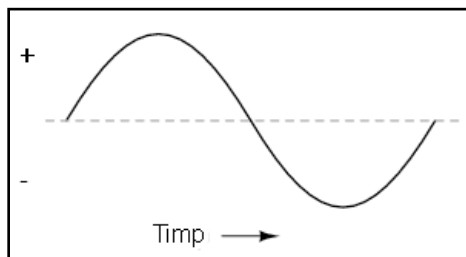
Pe cât sunt de folositoare, transformatoarele funcționează doar în curent alternativ, deoarece fenomenul de inducție mutuală se bazează pe câmpuri magnetice variabile, iar curentul continuu nu poate produce decât câmpuri

magnetice constante. Desigur, curentul continuu poate fi folosit sub formă de impulsuri prin înfășurarea primară pentru crearea unui câmp magnetic variabil, dar acest curent pulsatoriu nu este foarte diferit până la urmă de curentul alternativ.

## 2. Forme de undă în curent alternativ

- Graficul curentului alternativ produs de un generator (alternator) electromecanic este sinusoidal (formă de undă)
- Perioada reprezintă timpul, luat din oricare punct al graficului forme de undă până în punctul în care acesta începe să se repete, măsurat în secunde
- Frecvența este numărul perioadelor efectuate de o formă de undă într-un interval de o secundă și se măsoară în Hertz (Hz); 1 Hz este egal cu o perioadă efectuată într-un interval de o secundă
- $f = 1 / T$

### Forme de undă sinusoidale



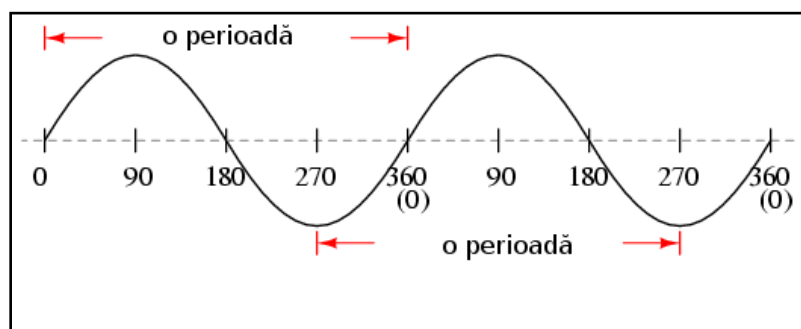
Datorită modului de producere al energiei electrice, unda produsă de modificarea continuă a polarității tensiunii, respectiv direcției curentului, are o formă sinusoidală, precum în figura alăturată.

Graficul tensiunii cu timpul pentru un generator electric electromecanic ne arată o modificare netedă a polarității (dinspre (+) spre (-) sau invers); nivelul tensiunii are cea mai rapidă variație în jurul valorii de zero, la intersecția cu axa timpului, și cea mai lentă în jurul valorilor maxime. Dacă luăm funcția trigonometrică **sinus** între 0 și 360 de grade și o desenăm pe un grafic, aceasta va fi exact figurii considerate mai sus.

Motivul pentru care generatorul produce curent alternativ se datorează modului său fizic de funcționare. Tensiunea produsă de stator (înfășurările staționare) datorită mișcării rotorului (magnetului rotativ) este proporțională cu rata variației fluxului magnetic perpendicular pe înfășurări (legea inducției electromagnetice). Această rată de variație este maximă atunci când polii magnetului se află în imediata apropiere a înfășurărilor, iar valoarea ei este minimă atunci când aceștia se află la distanța maximă față de înfășurări. Matematic, rata variației fluxului magnetic datorită unui magnet rotativ, urmărește graficul funcției sinus, astfel că tensiunea produsă de înfășurări este descrisă de aceeași funcție.



## Perioada unei funcții



Dacă urmărim variația tensiunii produsă de înfășurările unui generator din oricare punct de pe graficul funcției (sinus în acest caz) până în momentul în care graficul începe să se repete, spunem că s-a efectuat exact o perioadă a acelei funcții.

Matematic, perioada unei funcții se notează cu  $T$ . Acest concept este cel mai ușor de vizualizat între valorile maxime ale funcției, dar poate la fel de bine să fie luat în considerare între oricare puncte ale acestuia. Valorile unghiurilor de pe axa orizontală desemnează domeniul funcției trigonometrice sinus, dar și poziția unghiulară a axului alternatorului aflat în mișcare.

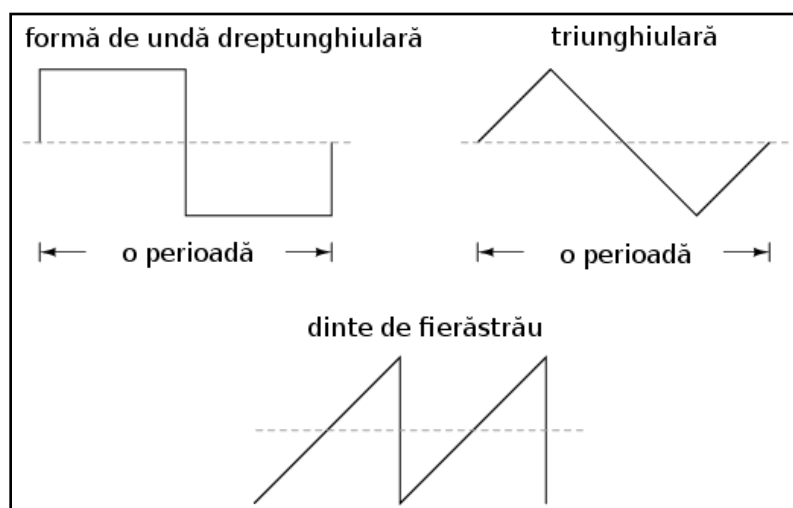
Din moment ce axa orizontală a graficului desemnează trecerea timpului precum și poziția axului alternatorului în grade, unitatea de măsură folosită pentru marcarea unei perioade este timpul, în majoritatea cazurilor măsurat în secunde sau fracțiuni de secundă. Perioada unei unde, măsurată în grade, este tot timpul 360, dar timpul ocupat de o singură perioadă depinde de rata variației tensiunii de la o polaritate spre cealaltă.

## Frecvența

O metodă și mai des folosită pentru a descrie alternanța curentului alternativ este exact rata acestei oscilații, denumită frecvență, desemnată matematic prin  $f$ . Unitatea de măsură pentru frecvență este Hertz-ul (prescurtat Hz), și reprezintă numărul de perioade complete într-un interval de o secundă. În Europa, frecvența standard folosită este de 50 Hz, ceea ce se traduce prin faptul că tensiunea alternativă oscilează cu o rată de 50 de perioade la fiecare secundă. O stație de transmisie radio ce folosește o frecvență de 100 MHz generează tensiune alternativă ce oscilează cu o rată de 100 de milioane de perioade pe secundă.

Matematic, perioada și frecvența sunt mărimi reciproce, frecvența fiind egală cu inversul perioadei ( $f = 1 / T$ ). De exemplu, pentru o perioadă  $T = 16 \text{ ms}$ , frecvența  $f = 1 / 16 = 62.5 \text{ Hz}$ . Instrumentul folosit pentru vizualizarea formelor de undă (a variației tensiunii sau curentului cu timpul) se numește osciloscop.

## Alte forme de undă



Deși generatoarele electromecanice și multe alte fenomene fizice produc în mod natural forme de undă sinusoidale, acestea nu sunt singurele forme de unde alternative existente. Există o varietate de unde alternative produse de circuitele electronice. Alăturat sunt câteva exemple.

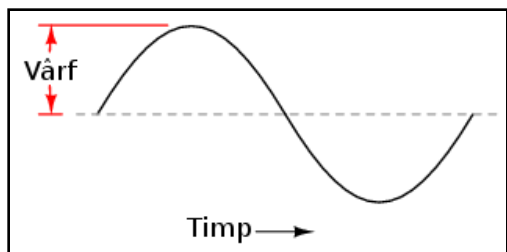
Acestea nu sunt însă singurele tipuri de forme de undă existente, ci doar câteva dintre cele mai comune. Chiar și circuitele considerate sinusoidale, dreptunghiulare sau triunghiulare pure nu sunt perfecte în realitate. Unele forme de undă sunt atât de complexe încât nu pot fi clasificate. General vorbind, orice formă de undă ce se apropie de o formă sinusoidală este denumită ca atare, toate celelalte fiind denumite ne-sinusoidale. Forma undei de tensiune sau curent are o importanță crucială asupra comportamentului unui circuit și trebuie să fim prin urmare atenți la diferitele forme de undă existente în practică.

### 3. Amplitudinea curentului alternativ

- Amplitudinea unei unde alternative este valoarea sa pe grafic în funcție de timp, și poate însemna valoare de vârf, vârf la vârf, medie sau efectivă
- Valoarea de vârf a unei forme de unde alternative se măsoară de la intersecția acesteia cu axa orizontală (timp) până la nivelul maxim pozitiv pe grafic, sau nivelul minim negativ
- Amplitudinea vârf la vârf reprezintă înălțimea totală a unei forme de undă alternative măsurată pe grafic între valoarea sa maximă pozitivă și valoarea minimă negativă
- Amplitudinea medie reprezintă media aritmetică a valorilor tuturor punctelor de pe grafic în decurs de o perioadă
- Valoarea efectivă (RMS) a unei forme de undă alternative este un mod de exprimare a echivalenței dintre efectele curentului continuu și cel alternativ. RMS vine din engleză, și înseamnă Root Mean Square, adică metoda de calcul a acestei valori
- Factorul de vârf a unei unde alternative este raportul dintre valoarea sa de vârf și cea efectivă
- Factorul de formă a unei unde alternative este raportul dintre valoarea sa efectivă și cea medie

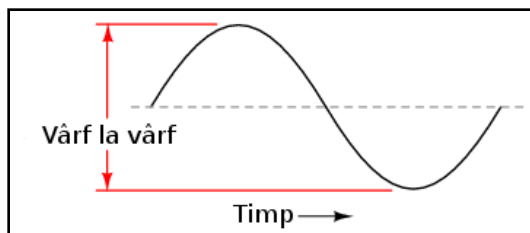
#### Amplitudinea sau valoarea de vârf a unui semnal

În curent continuu, unde valoarea tensiunii și a curentului sunt constante în timp, exprimarea cantității acestora în orice moment este destul de ușoară. Dar cum putem măsura valoarea unei tensiuni sau a unui curent care variază tot timpul?



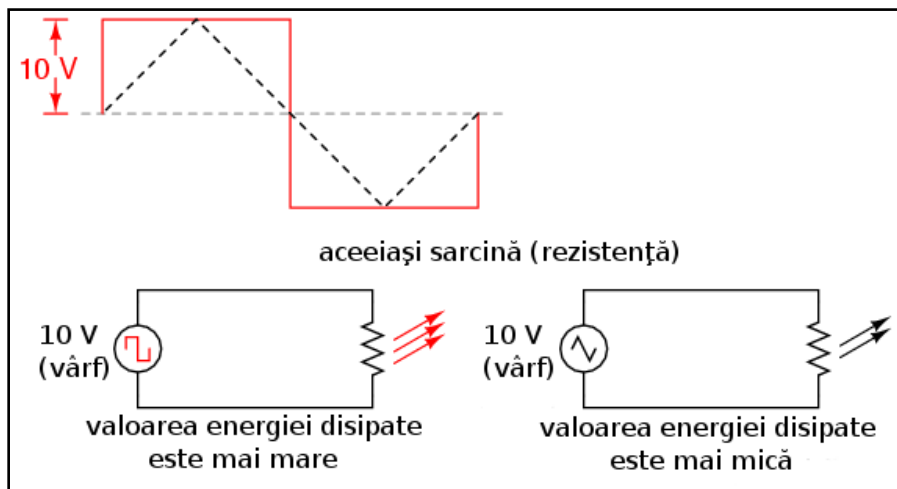
O metodă de exprimare a intensității, curentului alternativ, denumită și amplitudine, este măsurarea înălțimii formei de undă de pe grafic. Aceasta este denumită valoarea de vârf a unei unde alternative.

### Amplitudinea vârf la vârf



O altă metodă constă în măsurarea înălțimii totale a forme de undă, între cele două vârfuri, valoare ce poartă numele de amplitudine vârf la vârf.

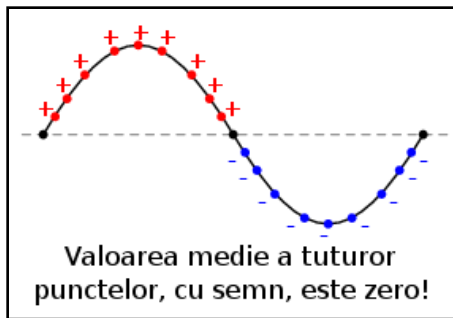
### Utilitate



Din păcate, ambele modalități de calcul ale amplitudinii unei unde alternative nu sunt foarte practice atunci când vrem să facem o comparație între diferite tipuri de undă. De exemplu, o undă dreptunghiulară cu valoarea de vârf de 10 V are evident o valoare a tensiunii mai mare pentru o perioadă mai lungă de timp față de o undă

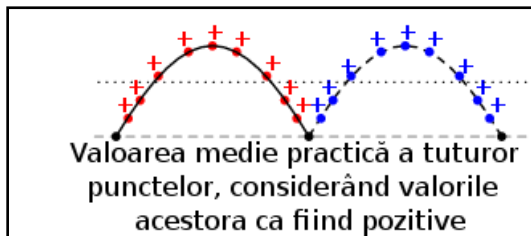
triunghiulară cu aceeași valoare maximă de 10 V. Efectele acestor două tipuri de undă asupra unei sarcini sunt diferite.

### Amplitudinea medie



O modalitate de exprimare a amplitudinilor diferitelor forme de undă într-o formă echivalentă constă în efectuarea mediei aritmetice a valorilor tuturor punctelor de pe grafic. Această mărime este cunoscută sub numele de valoarea medie a formei de undă.

Dacă luăm media aritmetică a tuturor punctelor de pe grafic, luând în considerare și semnul (pozitiv sau negativ), valoarea medie pentru majoritatea undelor va fi zero, datorită anulării reciproce dintre valorile pozitive și cele negative pe o perioadă completă.



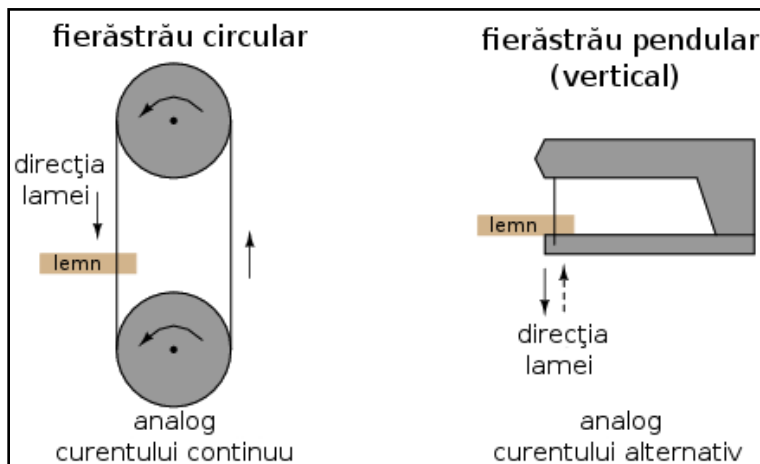
Acest lucru este valabil pentru oricare formă de undă constituită din arii egale atât deasupra cât și sub axa orizontală (zero) a graficului. Totuși, practic, măsurarea valorii medii a unei se efectuează matematic prin considerarea valorilor absolute a tuturor punctelor dintr-o perioadă.

Cu alte cuvinte, valoarea medie practică a unei se calculează considerând toate punctele de pe grafic ca fiind pozitive, prin „răsturnarea” imaginară a tuturor punctelor de pe grafic aflate sub linia orizontală.

## Valoarea efectivă a unei (RMS)

O altă metodă de aflare a valorii reale a amplitudinii unei unde se bazează pe capacitatea acesteia de a efectua lucru mecanic util atunci când este aplicată asupra unei sarcini ( $P = E^2/R$ , and  $P = I^2R$ ).

### Analogie

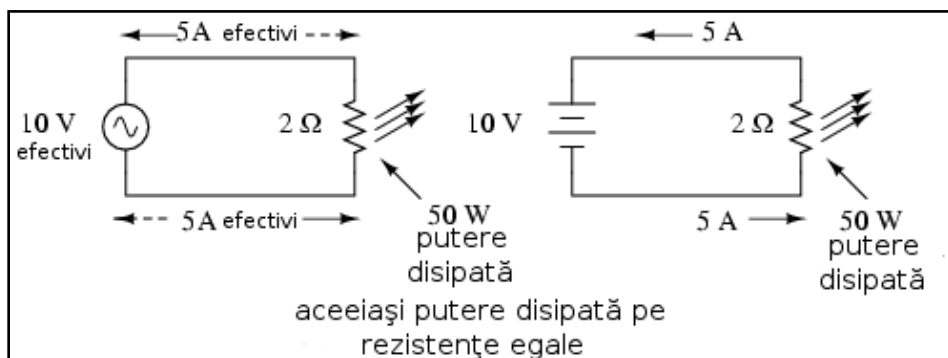


este analoagă comparației dintre curentul continuu și cel alternativ.

Să considerăm de exemplu un fierăstrău circular și unul pendular (vertical), ambele folosite pentru tăierea lemnului. Ambele tipuri de fierăstraie folosesc o lamă metalică dințată acționată de un motor electric, dar cel circular folosește o mișcare continuă a lamei pentru a tăia, iar cel pendular folosește o mișcare înainte și înapoi pentru a realiza aceeași operație. Comparația dintre cele două tipuri de mișcări

Problema descrierii variației valorilor prezente în curent alternativ într-o singură componentă, este prezentă și în acest caz al analogiei: cum putem exprima viteza lamei fierăstrăului? Lama fierăstrăului circular are o viteză constantă, la fel ca în cazul curentului continuu ce „împinge” electronii prin circuit cu o forță constantă. Lama fierăstrăului pendular, pe de altă parte, se deplasează înainte și înapoi (curent alternativ), iar în acest caz valoarea vitezei acesteia variază în fiecare clipă.

Care viteză este mai mare, care dintre fierăstraie poate tăia mai mult lemn în aceeași durată de timp? Mai mult decât atât, mișcare înainte și înapoi a unui fierăstrău se poate să nu fie de același tip cu mișcarea unui alt fierăstrău, în funcție de caracteristicile mecanice ale fiecăruia. Unul dintre ele poate, de exemplu, să folosească o formă de undă sinusoidală în mișcarea sa, pe când un altul, o undă triunghiulară. O comparație între viteza de vârf între două fierăstraie nu are avea aproape niciun rost (sau o comparație între unul circular și unul pendular!). Cu toate că fiecare dintre aceste fierăstraie are o mișcare diferită a lamei, toate sunt egale în cel puțin un sens: toate taie lemn, iar o comparația cantitativă asupra acestei funcții comune poate servi ca punct de plecare pentru determinarea valorii universale a vitezei oricărui fierăstrău.



Dacă ne imaginăm două fierăstraie, unul circular și altul pendular, cu lame identice, capabile să taie același tip de lemn, cu aceeași grosime, în același interval de timp, am putea spune despre ele că sunt

echivalente în ceea ce privește capacitatea lor de tăiere, și totuși, ele sunt foarte diferite în modul lor de funcționare.

Această comparație poate fi folosită pentru a desemna o viteză a fierăstrăului pendular echivalentă cu cea a fierăstrăului circular, pentru a putea realiza o comparație reală între eficiența celor două tipuri. Aceasta este și ideea folosirii unui procedeu de măsură a „echivalenței în curent continuu” a oricărei mărimi din curent alternativ: valoarea curentului sau tensiunii în curent continuu ce ar produce aceeași cantitate de energie disipată pe o aceeași rezistență.

## Definiție

În cele două circuite de mai sus, avem aceeași valoare a sarcinii, respectiv  $2\Omega$ , ce disipă aceeași cantitate de putere sub formă de căldură, 50 W, unul dintre ele fiind alimentat în curent alternativ, celălalt în curent continuu. Deoarece sursa de tensiune alternativă este echivalentă din punct de vedere al puterii transmise spre sarcină cu o baterie de 10 V în curent continuu, putem denumi aceasta o sursă de 10 V. Mai precis, spunem că tensiunea efectivă este de 10 V. În limba engleză notația este de 10 V *RMS*, notație ce o vedem adesea mai ales în sistemele audio. RMS înseamnă Root Mean Square și se referă la modalitatea matematică de obținere a acestei valori, și anume,

ridicarea la pătrat a tuturor valorilor de pe graficul forme de undă, atât pozitive cât și negative, calcularea valorii medii a acestora și introducerea lor sub radical pentru obținerea valorii finale, efective.

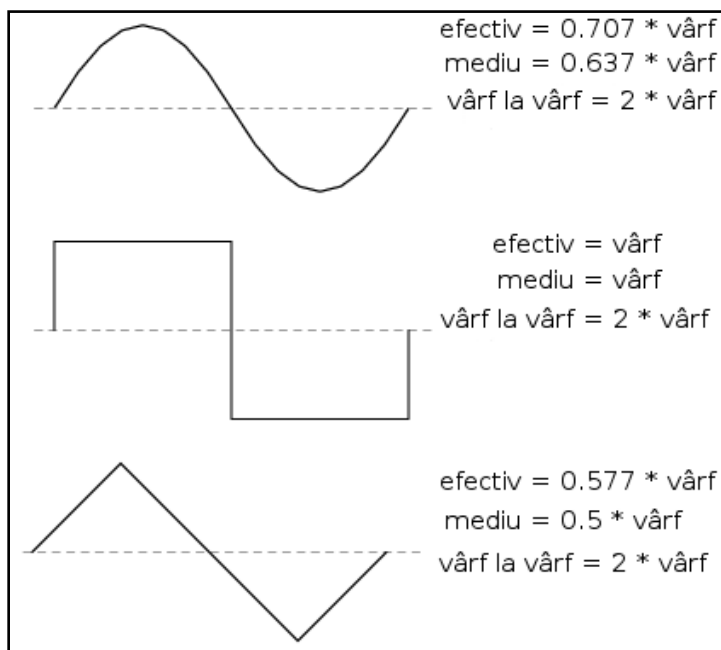
Măsurarea valorii efective este cea mai bună modalitate de realizare a echivalenței dintre cele două tipuri de electricitate, continuă și alternativă, indiferent de natura formelor de undă implicate, fie sinusoidale, triunghiulare sau de orice altă formă.

## Măsurarea efectivă a valorilor de vârf

Măsurătorile vârf la vârf sunt cel mai bine efectuate cu ajutorul unui osciloscop, deoarece acesta poate indica vârful forme de undă cu o acuratețe maximă. Pentru măsurarea valorilor efective, aparatele de măsură analogice vor funcționa doar dacă au fost special calibrate pentru acest scop. Datorită inerției mecanice și efectului de atenuare, deplasarea indicatorului electromecanic al aparatului de măsură va fi în proporție cu valoarea medie a unei alternative, și nu valoarea ei efectivă. Datorită acestui lucru, aparatele de măsură analogice trebuie calibrate, iar acuratețea acestei operații depinde de natura forme de undă presupuse, de obicei sinusoidală.

Cele mai bune aparate de măsură a valorilor efective sunt cele electronice, special concepute pentru acest tip de măsurători. O metodă constă în măsurarea temperaturii unui element rezistiv pentru redarea precisă a valorii efective fără alte calcule matematice, folosind doar legile fizici. Acuratețea acestui tip de măsurătoare este independentă de natura forme de undă.

## Coeficienții formelor de undă pure



Pentru forme de undă „pure”, există niște coeficienți pentru calcularea relației dintre valorile de vârf, vârf la vârf, medii practice și valorii efective ale acestora.

Pe lângă acești coeficienți, mai există și alte modalități de exprimare a proporționalității între formele de undă fundamentale.

## Factorul de vârf

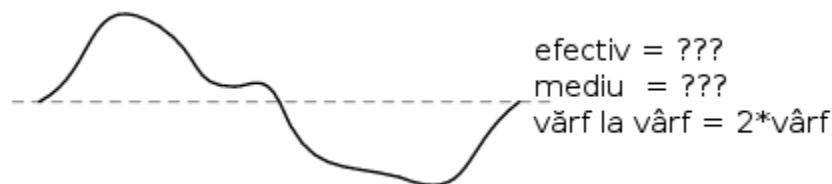
Factorul de vârf a unei forme de undă alternative este raportul dintre valoarea sa de vârf și valoarea efectivă.

## Factorul de formă

Factorul de formă reprezintă raportul dintre valoarea efectivă a undei și valoarea sa medie.

## Observații

Factorii de vârf și formă ale undelor dreptunghiulare sunt întotdeauna egali cu 1, din moment ce valoarea de vârf este egală cu cea medie (practică) și cea efectivă. Formele de undă sinusoidale au o valoare efectivă de 0,707 ( $1 / 2^{1/2}$ ) și un factor de formă de 1,11 ( $0,707 / 0,636$ ). Formele de undă triunghiulare și dinte de fierăstrău a valorile efective de 0,577 ( $1 / 3^{1/2}$ ) și factorii de formă egali cu 1,15 ( $0,5777 / 0,5$ ).

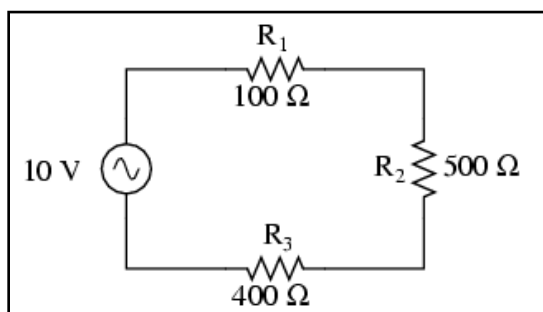


Țineți minte că aceste constatări de conversie între valorile de vârf, vârf la vârf, medii și efective ale unei forme de undă se pot folosi doar pentru formele de undă pure. Relațiile dintre aceste valori, folosind aceste constante, nu se pot aplica în cazul formele de undă distorsionate.

## 4. Rezolvarea circuitelor simple de curent alternativ

- Toate regulile și legile circuitelor de curent continuu sunt valabile și în cazul circuitelor de curent alternativ. Totuși, pentru circuitele complexe, valorile folosite vor trebui exprimate într-o formă matematică mai complexă

### Circuit pur rezistiv



Rezolvarea circuitelor de curent alternativ se poate dovedi extrem de complexă în unele cazuri datorită comportamentului condensatoarelor și a bobinelor în acest caz. Totuși, în cazul circuitelor simple, constând dintr-o sursă de curent alternativ și

unul sau mai mulți rezistori, putem aplica aceleași reguli ca și în cazul curentului continuu fără alte complicații.

Formulele pentru rezolvarea circuitului de mai sus arată astfel:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$I_{total} = \frac{E_{total}}{R_{total}} = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ mA}$$

$$E_{R1} = I_{total} R_1 = 1 \text{ V}$$

$$E_{R2} = I_{total} R_2 = 5 \text{ V}$$

$$E_{R3} = I_{total} R_3 = 4 \text{ V}$$

Rezistențele serie se adună, cele în paralel se diminuează, iar legea lui Ohm, legea lui Kirchhoff pentru tensiune și legea lui Kirchhoff pentru curent sunt și ele valabile. De fapt, după cum vom vedea, aceste reguli sunt *tot timpul* valabile, doar că trebuie să folosim forme matematice mai avansate pentru exprimarea tensiunii, curentului și a opoziției față de acesta. Pentru că acesta este însă un circuit pur rezistiv, complexitățile circuitelor de curent alternativ nu afectează rezolvarea lui.

Introduse într-un tabel, valorile de mai sus arată astfel:

| Mărime | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | Total | Unitate |
|--------|----------------|----------------|----------------|-------|---------|
| E      | 1              | 5              | 4              | 10    | V       |
| I      | 10m            | 10m            | 10m            | 10m   | A       |
| R      | 100            | 500            | 400            | 1k    | Ω       |

## Observație

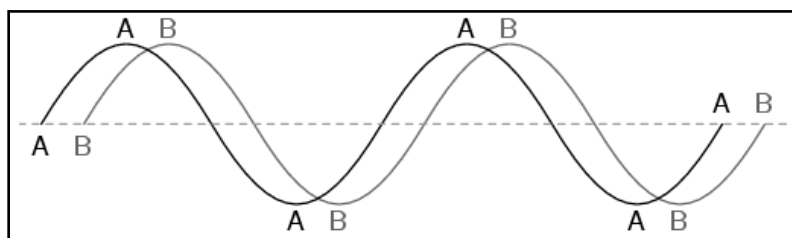
Un singur lucru foarte important trebuie ținut minte: toate mărimile folosite în curent alternativ trebuie exprimate folosind aceeași termeni (valori de vârf, vârf la vârf, medii sau efective). Dacă tensiunea sursei este dată ca valoare de vârf, atunci toți curenții și tensiunile calculate vor fi exprimate ca și valori de vârf. Același lucru este valabil și în cazul celorlalte tipuri de valori. Exceptând cazurile speciale ce vor fi descrise explicit, toate valorile tensiunilor și curenților din circuite se vor considera a fi valorile efective ale formelor de undă alternative și nu cele de vârf, vârf la vârf sau medii.



## 5. Fazele curentului alternativ

- Diferența de fază (defazajul) reprezintă ne-sincronizarea a două sau a mai multor forme de undă între ele
- Valoarea defazajului dintre două forme de undă poate fi exprimată prin grade
- Două sau mai multe forme de undă pot fi defazate înainte, înapoi sau se pot afla în fază (diferența de fază de 0 grade)
- Rezolvarea circuitelor de curent alternativ trebuie să ia în considerare atât amplitudinea undei cât și diferențele de fază existente; matematic, acest lucru se realizează cu ajutorul numerelor complexe

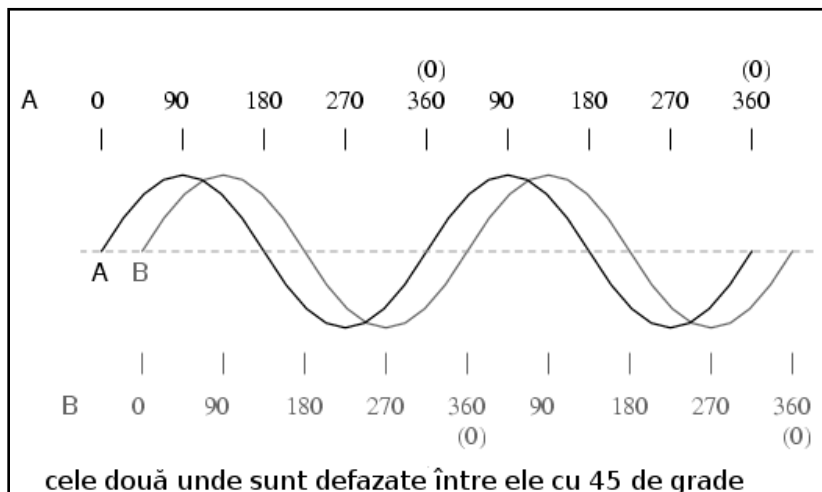
### Defazajul (diferența de fază)



Lucrurile încep să se complice atunci când trebuie să comparăm două sau mai multe forme de undă alternative ce sunt defazate între ele. Prin această „defazare” se înțelege faptul că formele de undă nu sunt

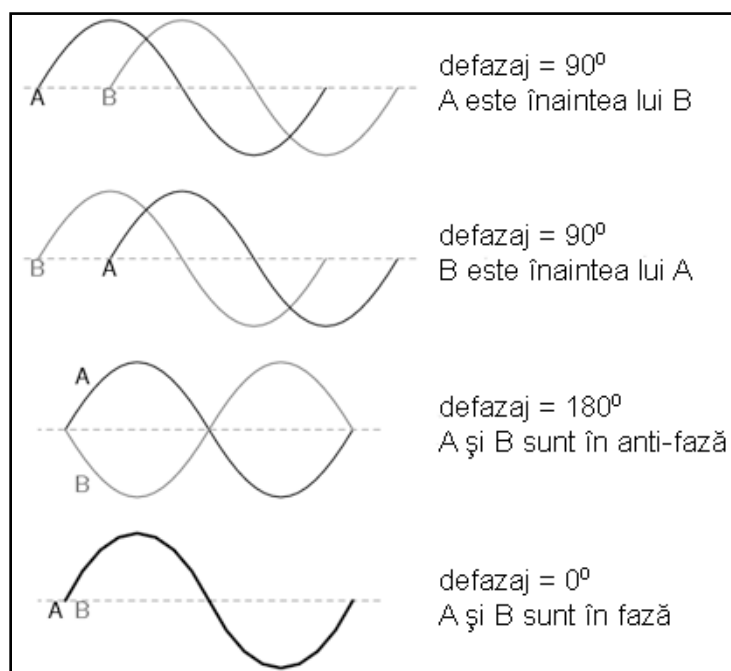
sincronizate, valorile lor de vârf și punctele de intersecție cu axa orizontală nu sunt identice în timp. Figura alăturată ilustrează acest lucru.

Cele două unde de mai sus (A și B) au aceeași amplitudine și frecvență, dar sunt defazate între ele.



În exemplele precedente am considerat faptul că funcția trigonometrică sinus este reprezentată grafic pornind din punctul zero (zero grade), continuând până la valoarea sa maximă pozitivă la 90 de grade, din nou la zero la 180 de grade, minimă negativă la 270 de grade și înapoi la punctul de plecare la 360 de grade.

Putem folosi această scară pentru axa orizontală pentru a exprima valoarea defazajului dintre cele două unde. Defazajul (diferența de fază) dintre cele două forme de undă este de 45 de grade, unda A fiind înaintea undei B.



O comparație între defazaje diferite ale undelor în graficele alăturate ilustrează mai bine acest concept.

Deoarece formele de undă de mai sus au aceeași frecvență, defazajul dintre ele este același în oricare punct din timp. Din acest motiv, putem exprima defazajul dintre două sau mai multe forme de undă ce au aceeași frecvență ca și o valoare constantă pentru întreaga undă, și nu doar între două puncte particulare. Putem spune, prin urmare, că tensiunea A este defazată cu 45 de grade față de tensiunea B, de exemplu.

Forma de undă ce este în față se numește defazată înainte, iar cea care este în urmă spunem că este

defazată înapoi.

Defazajul, ca și tensiunea, este tot timpul o valoare relativă între două lucruri. Nu putem spune că o formă de undă are o anumită fază absolută pentru că nu există o referință universală pentru fază. În mod uzual, în analiza circuitelor de curent alternativ, forma de undă a sursei de energie este folosită ca și referință de fază, sub formă de „x volți la 0 grade”. Orice altă tensiune sau curent alternativ va fi în fază sau defazată înainte sau înapoi față de această undă de referință.

## Observație

Din acest motiv, circuitele de curent alternativ sunt mult mai complicate decât cele de curent continuu. La aplicarea legilor lui Ohm și Kirchhoff, trebuie luate în considerare atât amplitudinile cât și diferențele de faze între undele de tensiune sau curent. Operațiile de adunare, scădere, înmulțire sau împărțire trebuie să ia în considerare aceste lucruri, folosind sistemul numerelor complexe pentru reprezentarea amplitudinii și a fazei.

## 6. Principii ale undelor radio

Una dintre cele mai fascinante aplicații a energiei electrice constă în generarea undelor invizibile de energie, și anume, a undelor radio. Deși subiectul este prea vast pentru a fi acoperit în acest scurt capitol, vom prezenta totuși unele principii de bază.

## Unde electromagnetice

Odată cu descoperirea accidentală a electromagnetismului de către Oersted, lumea științifică a realizat legătura strânsă dintre electricitate și magnetism. La trecerea unui curent electric printr-un conductor, se generează un câmp magnetic perpendicular pe axa de curgere. Asemănător, dacă un conductor este expus unui flux magnetic variabil perpendicular pe lungimea acestuia, se va produce o cădere de tensiune pe această porțiune. Până în acel moment, oamenii de știință știau că electricitatea și magnetismul erau strâns legate prin aceste principii enumerate mai sus. Totuși, o descoperire crucială se ascundea sub acest concept simplu al perpendicularității celor două câmpuri. Această descoperire reprezintă un moment crucial în istoria științei.

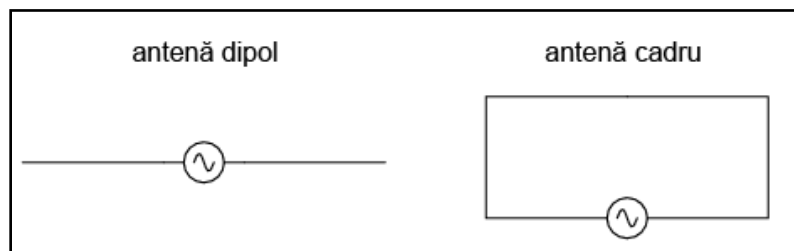
Cel responsabil de această revoluție conceptuală în domeniul fizicii a fost James Clerk Maxwell (1831-1879), cel care a unificat studiul electricității și a magnetismului sub forma unor ecuații diferențiale compacte (în număr de 4) ce-i poartă numele (ecuațiile lui Maxwell). Acestea descriu practic întreg comportamentul câmpurilor electrice și magnetice, dar, necesită un nivel înalt de abstractizare și pregătire matematică pentru a le putea înțelege. Formal însă, descoperirea lui Maxwell poate fi rezumată astfel: un câmp electric variabil produce un câmp magnetic perpendicular, iar un câmp magnetic variabil produce un câmp electric perpendicular.

Acest comportament poate avea loc în spațiu liber, cele două câmpuri alternante menținându-se unul pe celălalt pe măsură ce parcurg spațiul cu viteza luminii (în vid). Această structură dinamică formată din câmpuri electrice și magnetice este cunoscută sub numele de *undă electromagnetică*.

Există multe tipuri de energie radiantă naturală compusă din unde electromagnetice. Chiar și lumina este o undă electromagnetică. La fel razele-X și radiația gamma. Singura diferență dintre aceste tipuri de radiație electromagnetică este frecvența lor de oscilație (schimbarea polarității câmpurilor electrice și magnetice).

## Crearea undelor electromagnetice cu ajutorul antenelor

Folosind o sursă de tensiune de curent alternativ, și un dispozitiv special ce poartă numele de *antena*, putem crea unde electromagnetice (cu o frecvență mult mai mică decât cea a luminii) relativ ușor. O antena nu este altceva decât un dispozitiv construit pentru a produce un câmp electric sau magnetic dispersiv. Cele două tipuri



fundamentale de antene sunt *antena dipol* și *antena cadru*, prezentate în figura de mai jos:

Deși cele două tipuri de antene nu sunt altceva decât un circuit deschis (dipol), respectiv un scurt-circuit (cadru), acești conductori reprezintă surse eficiente de

câmpuri electromagnetice atunci când sunt conectate la surse de curent alternativ de o frecvență corespunzătoare.

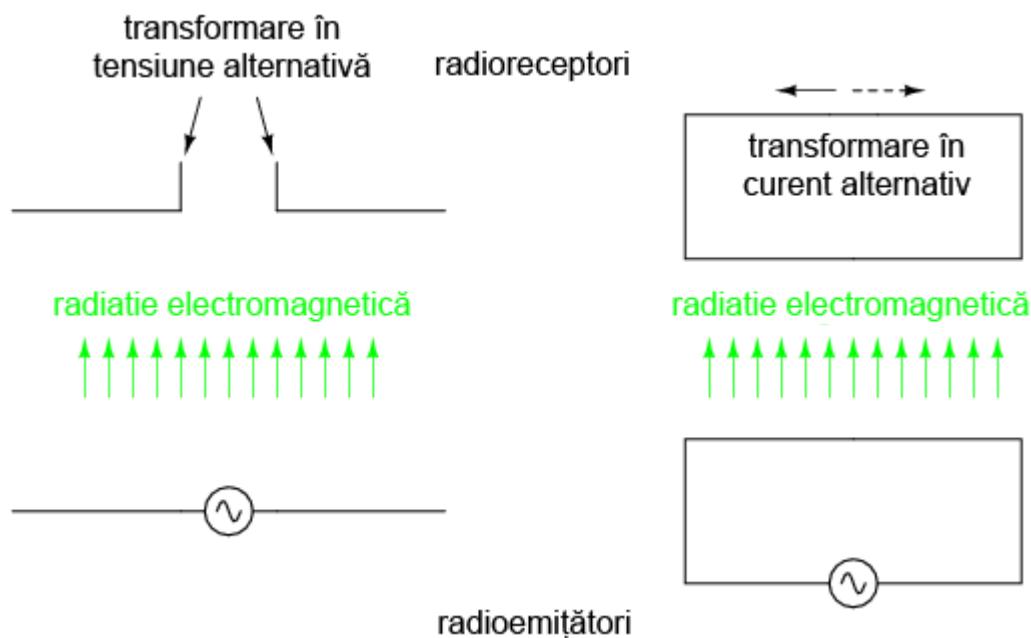
Cei doi conductori ai antenei dipol joacă rolul unui condensator (doi conductori separați de un dielectric). Dispersia câmpului electric este însă permisă, spre deosebire de condensatoarele propriu-zise unde acesta este concentrat între cele două armături.

Circuitul închis al antenei cadru se comportă precum o bobină cu miez (mare) de aer. Din nou, și în cazul acestei antene, dispersia câmpului este facilitată dinspre antenă spre mediul înconjurător. Acest lucru este în contradicție cu o bobină propriu-zisă, unde câmpurile magnetice sunt concentrate în interior.

Pe măsură ce antena dipol radiază un câmp electric în spațiu, va lua naștere un câmp magnetic variabil la unghiuri drepte. În acest fel, câmpul electric este susținut mai departe în spațiu, iar unda electromagnetică se propagă cu viteza luminii (în vid). Același lucru este valabil și pentru antena cadru, cu deosebirea că aceasta radiază inițial un câmp magnetic și nu electric. Rezultatul final este însă același: producerea controlată a unui câmp electromagnetic.

## Transmisia și recepția undelor electromagnetice

Alimentată de o sursă de curent alternativ de frecvență înaltă, o antenă joacă rolul unui dispozitiv de transmisie. Tensiunea și curentul alternativ sunt convertite în energie sub forma undelor electromagnetice. Antenele pot de asemenea să intercepteze undele electromagnetice și să transforme energia lor în tensiunea și curent alternativ. În acest mod de funcționare, antena joacă rolul unui dispozitiv de recepție:



## 02 - Numere complexe

### 1. Introducere

- Un număr scalar este un tip de obiect matematic uni-dimensional folosit pentru măsurarea temperaturii, distanței, greutateii, etc.
- Un număr complex este un tip de obiect matematic bi-dimensional (două dimensiuni) folosit pentru a reprezenta valoarea cât și direcția
- Un vector, este reprezentarea grafică a unui număr complex, posedând direcție și sens. Câteodată, în aplicațiile electrice, mai este folosit și termenul de fazor, acolo unde unghiul vectorului reprezintă diferența de fază între formele de undă

### Scop

Dacă dorim de exemplu să descriem distanța dintre două orașe, putem folosi o singură cifră, în kilometri, sau orice altă unitate de măsură pentru distanța liniară. Totuși, dacă vrem să descriem și modul de deplasare dintr-un oraș în altul, avem nevoie de mai multă informație pe lângă distanță propriu-zisă dintre orașe; trebuie să indicăm și direcția de mers în acest caz.

### Mărimi scalare

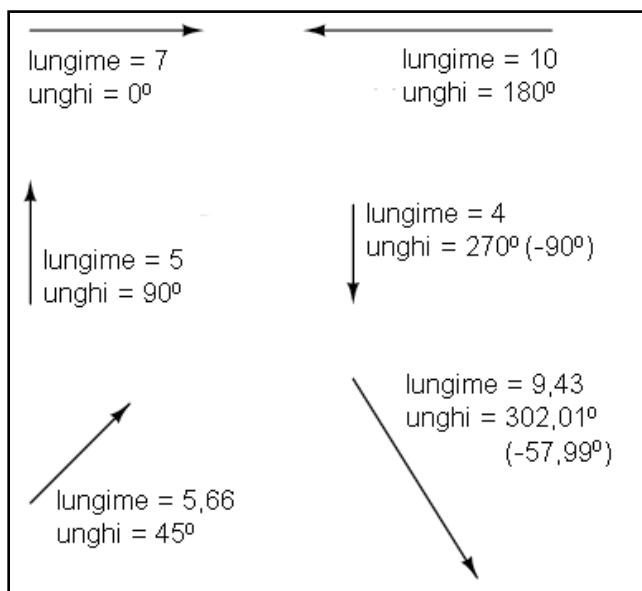
Tipul de informație ce exprimă o singură dimensiune, precum distanța liniară, poartă denumirea de scalar în matematică. Numerele scalare sunt cele folosite pentru desemnarea valori tensiunii unei baterii, de exemplu, a rezistenței sau a curentului, dacă vorbim de curent continuu.

Totuși, atunci când începem să analizăm circuitele electrice în curent alternativ, descoperim că valorile tensiunii, curentului și chiar a rezistenței (denumită impedanță în curent alternativ) nu sunt cantități uni-dimensionale precum în cazul circuitelor de curent continuu, ci, aceste cantități, fiind dinamice (alternează în direcție și amplitudine), posedă alte dimensiuni ce trebuiesc luate în considerare. Frecvența și diferența de fază sunt două dintre aceste dimensiuni adiționale.

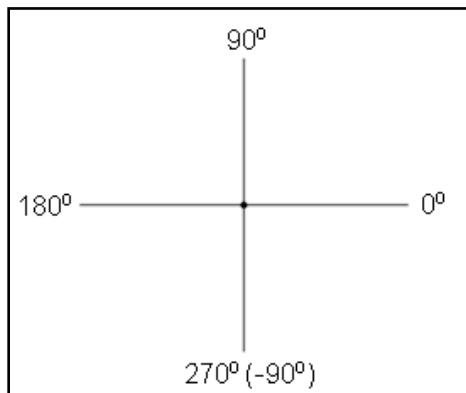
### Mărimi complexe

Pentru a putea analiza cu succes circuitele de curent alternativ, trebuie să abandonăm numerele scalare și să luăm în considerare cele complexe, capabile să reprezinte atât amplitudine cât și faza unei unde în același timp.

Numerele complexe sunt mai ușor de înțeles dacă sunt trecute pe un grafic. Dacă desenăm o linie cu o anumită lungime (amplitudine) și unghi (direcție), obținem o reprezentare grafică a unui număr complex, reprezentare cunoscută în fizica sub numele de vector.



### Sistemul de referință al vectorilor

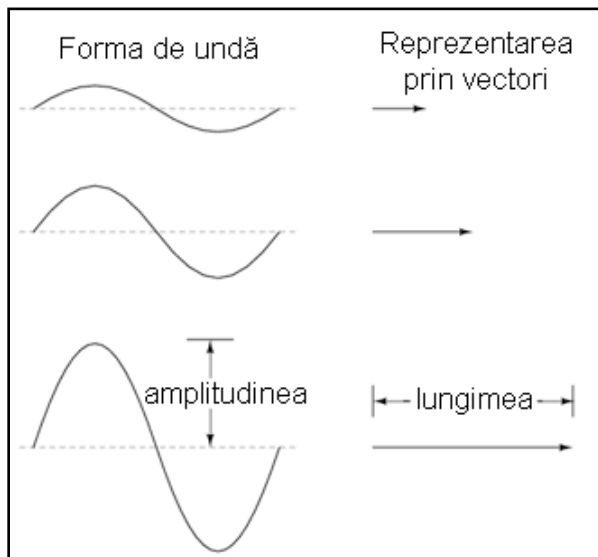


Precum în cazul distanțelor și direcțiilor de pe o hartă, trebuie să avem un sistem de referință pentru ca toate aceste valori să aibă un sens. În acest caz, dreapta înseamnă  $0^\circ$ , iar unghiurile sunt măsurate în direcție pozitivă în sensul invers acelor de ceasornic.

## 2. Vectori și forme de undă în curent alternativ

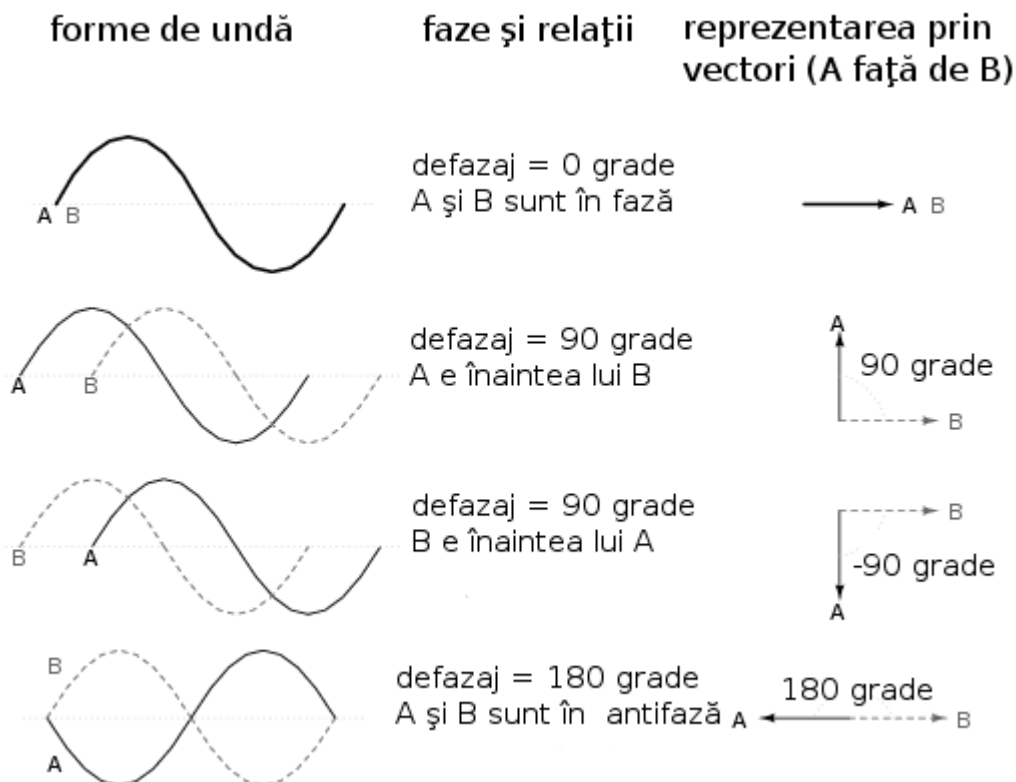
- Când este folosit pentru descrierea valorilor în curent alternativ, lungimea unui vector reprezintă amplitudinea undei iar unghiul său reprezintă diferența de fază (defazajul) undei față de unda de referință

## Lungimea vectorului



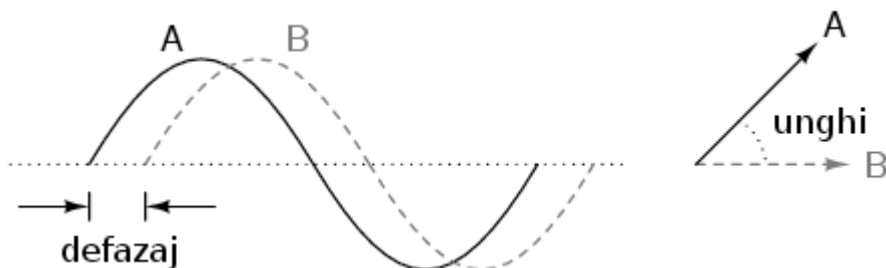
Să luăm câteva exemple de reprezentare a formelor de undă în curent alternativ cu ajutorul vectorilor, unde lungimea vectorului reprezintă amplitudinea undei.

## Unghiul vectorului



Cu cât amplitudinea formei de undă este mai mare, cu atât lungimea vectorului corespunzător va fi mai mare. Pe de altă parte, unghiul vectorului reprezintă diferența de fază (defazajul) dintre unda considerată și o altă formă de undă de referință. De obicei, atunci când exprimăm faza unei forme de undă, punctul de referință îl

reprezintă forma de undă a sursei de alimentare, considerată a fi  $0^\circ$ . Țineți minte că faza este tot timpul o mărime relativă dintre două unde și nu o proprietate absolută a undelor.



Cu cât defazajul dintre formele de undă considerate este mai mare, cu atât este mai mare unghiul dintre vectorii corespunzători.

### 3. Adunarea simplă a vectorilor

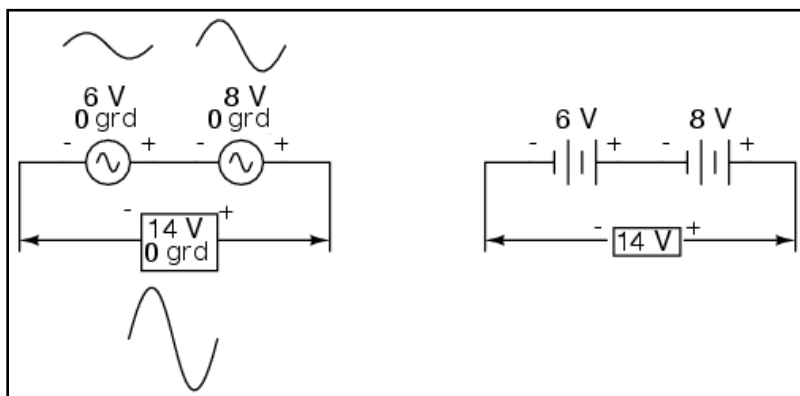
- Vectorii ce au același unghi se adună precum oricare altă mărime scalară
- Vectorii ce se află în opoziție de fază (defazaj de  $180^\circ$ ) se scad la fel ca orice altă mărime scalară

#### Unghi identic ( $0^\circ$ )

$$\begin{array}{ccc} \text{lungime} = 6 & \text{lungime} = 8 & \\ \text{unghi} = 0 \text{ grade} & \text{unghi} = 0 \text{ grade} & \text{lungime totală} = 6 + 8 = 14 \\ & & \text{unghi} = 0 \text{ grade} \end{array}$$

Operațiile ce pot fi efectuate asupra vectorilor sunt aceleași care sunt posibile asupra oricărei mărimi scalare: adunare, scădere, înmulțire, împărțire. Dintre toate acestea, adunarea este probabil cea mai ușor de înțeles. Dacă adunăm doi vectori ce au același unghi, lungimile lor se adună precum o mărime scalară.

#### Surse de tensiune

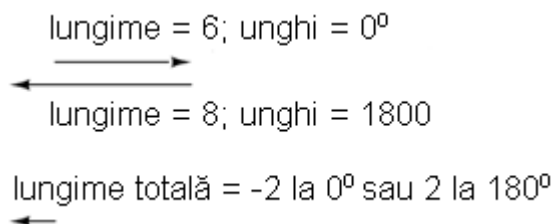


Similar, dacă două sau mai multe surse de curent alternativ cu aceeași fază sunt conectate în serie, tensiunile lor se adună asemenea tensiunilor bateriilor.



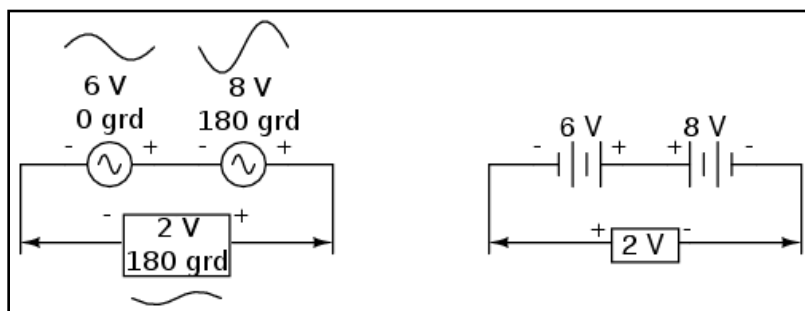
Observați notația „+” și „-” la bornele surselor de alimentare în curent alternativ. Chiar dacă noțiunea de polaritate nu este aceeași precum în curent continuu, aceste notații sunt esențiale pentru scoaterea în evidență a fazei unei de referință (tensiunea).

## Opoziția de fază ( $180^\circ$ )



Dacă adunăm doi vectori, a căror diferențe de fază este de  $180^\circ$ , aflați prin urmare în opoziție, lungimile lor se scad, asemenea operației de adunare dintre doi scalari, unul pozitiv și celălalt negativ.

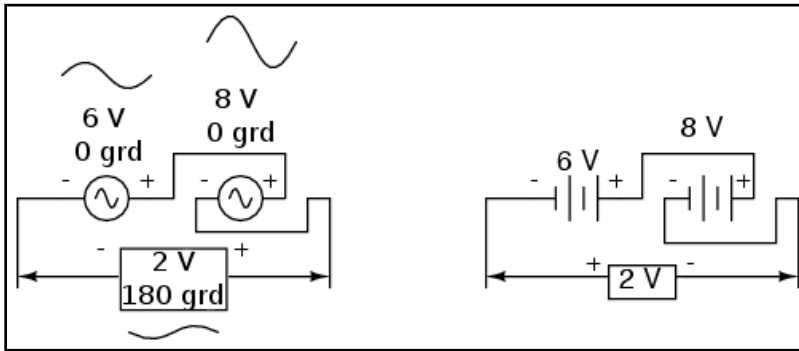
## Surse de tensiune



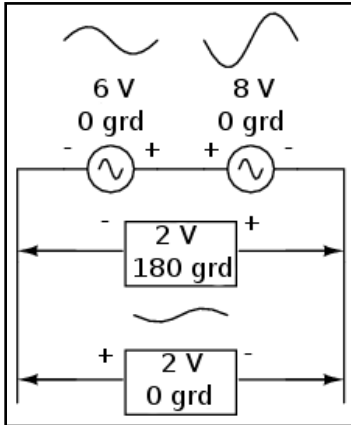
În mod similar, dacă două surse de curent alternativ aflate în anti-fază (defazaj de  $180^\circ$ ) sunt conectate în serie, tensiunile lor se scad asemenea bateriilor de curent continuu conectate în opoziție.

Pentru a determina dacă cele două surse se află în opoziție una față de cealaltă, este nevoie de o examinare atentă atât a polarității (+ sau -) cât și a fazelor. Polaritățile de mai sus tind să indice faptul că cele două tensiuni sunt aditive (de la stânga spre dreapta: - și + la sursa de 6 V, - și + la sursa de 8 V). Chiar dacă aceste notații ar indica în mod normal un efect aditiv într-un circuit de curent continuu (cele două tensiuni „lucrează” împreună pentru a produce o tensiune rezultată mai mare), în acest circuit de curent alternativ, cele două tensiuni se scad pentru a da tensiunea finală, deoarece faza uneia dintre ele este de  $0^\circ$ , iar a celeilalte de  $180^\circ$ . Rezultatul total este o tensiune de 2 V, la  $180^\circ$ , sau, -2 V la  $0^\circ$ .

## Exemplu

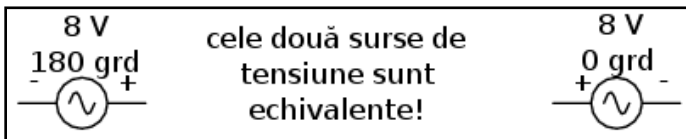


Un alt exemplu în care tensiunile se scad este cel din figura alăturată.



După cât am văzut mai sus, există două moduri de reprezentare a rezultatului final.

### Inversarea fazei

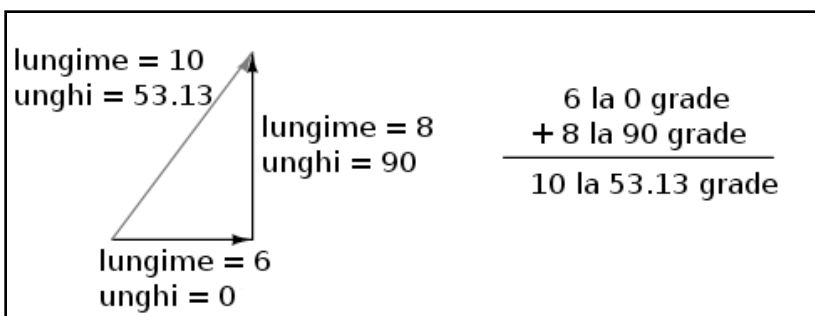


O inversare a firelor sursei de curent alternativ este echivalentă cu schimbarea fazei acelei surse cu 180 de grade.

## 4. Adunarea complexă a vectorilor

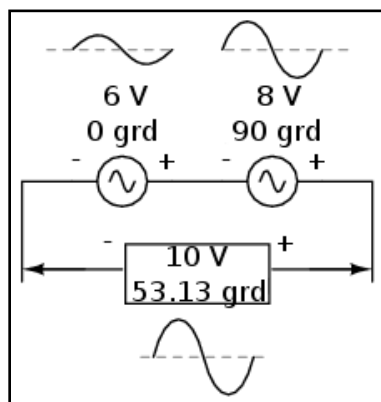
- Adunarea vectorilor cu unghiuri diferite se realizează trigonometric

### Vectori cu unghiuri diferite



Dacă adunăm doi vectori cu unghiuri diferite, lungimile lor se adună diferit față de cele scalare.

## Surse de tensiune



Dacă două tensiuni alternative, defazate cu  $90^\circ$  între ele, sunt conectate în serie, amplitudinile lor nu se adună sau scad direct precum valorile scalare în cazul curentului continuu. În schimb, aceste tensiuni sunt valori complexe, și, precum în cazul vectorilor de mai sus a căror adunare se realizează trigonometric, o sursă de 6 V la  $0^\circ$  adunată (conectată în serie) cu o sursă de 8 V la  $90^\circ$ , rezultă într-o tensiune de 10 V a cărei fază este de  $53.13^\circ$ .

Prin comparație cu circuitele de curent continuu, acest lucru poate părea ciudat la început. De exemplu, cu ajutorul unui voltmetru, putem citi indicațiile de 6 și respectiv 8 volți la bornele celor două surse de curent alternativ, dar tensiunea totală indicată de acesta va fi de „doar” 10 volți!

## 5. Notăția polară și rectangulară a numerelor complexe

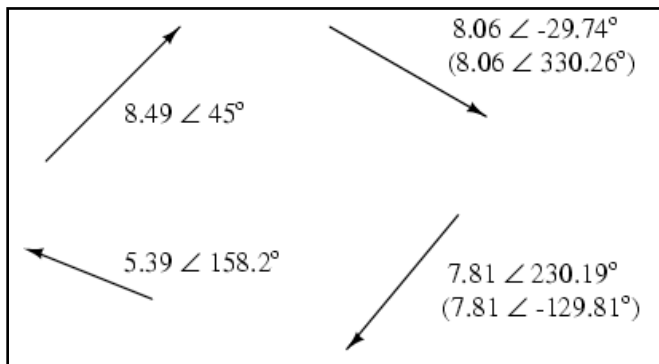
- Notăția polară desemnează un număr complex ca fiind compus din lungimea și direcția vectorului față de punctul de plecare
- Notăția rectangulară desemnează un număr complex ca fiind compus din dimensiunile orizontale și verticale ale vectorului
- Transformarea din notația polară în cea rectangulară și invers, se face relativ ușor

## Scop

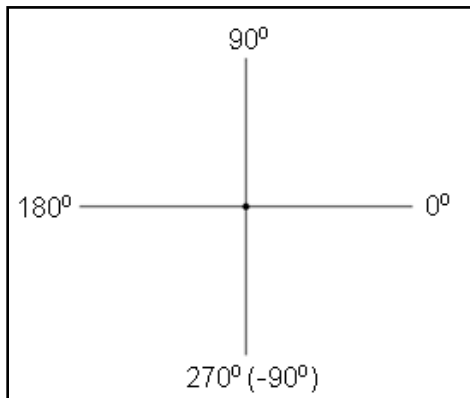
Pentru a putea lucra cu aceste numere complexe fără a fi nevoiți să desenăm tot timpul vectori, avem nevoie de o notație matematică standard. Există două forme pentru notația numerelor complexe: polară și rectangulară.

## Notăția polară

Forma polară constă în exprimarea unui număr complex prin lungimea (cunoscută și sub numele de dimensiune, valoare absolută sau modul) și unghiul vectorului (desemnat de obicei prin simbolul  $\angle$ ).



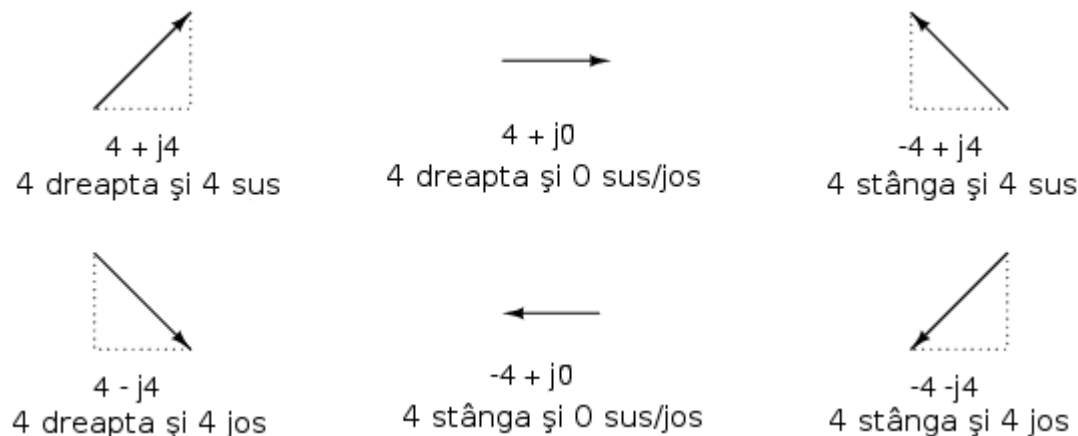
Alăturat avem două exemple de vectori împreună cu notația lor polară.



Orientarea standard pentru unghiurile vectorilor în curent alternativ definește unghiul de  $0^\circ$  (sau  $360^\circ$ ) ca fiind în dreapta (axa orizontală),  $90^\circ$  sus,  $180^\circ$  stânga,  $270^\circ$  jos. Atenție, vectorii a căror unghi este „în jos” pot fi reprezentați cu ajutorul notației polare ca fiind vectori pozitivi cu un unghi de peste  $180^\circ$ , sau ca numere negative cu unghiuri sub  $180^\circ$ . De exemplu, putem spune că un vector cu unghiul  $\angle 270^\circ$  (direct în jos) are unghiul de  $-90^\circ$  (notație echivalentă). Vectorul de mai sus ( $7,81 \angle 230.19^\circ$ ) poate fi descris de asemenea prin  $7,81 \angle -129.81^\circ$ .

## Notația rectangulară

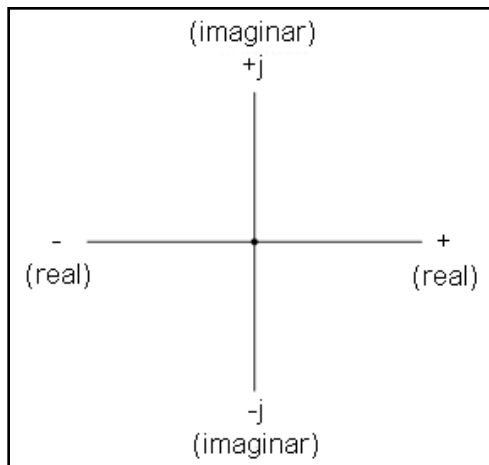
Forma rectangulară constă în reprezentarea vectorului prin componentele sale orizontale și verticale. În esență, vectorul unghiular este considerat a fi ipotenuza unui unghi drept și descris cu ajutorul lungimilor laturilor opuse respectiv adiacente. În loc să descrie lungimea și direcția unui vector prin precizarea lungimii și a unghiului, acesta este descris în termenii „cât de departe în stânga/dreapta” și „cât de departe „sus/jos”.



Aceste două valori dimensionale (orizontală și verticală) sunt simbolizate prin două valori numerice. Pentru a putea face distincție între cele două dimensiuni, cea verticală este însoțită de notația „i” (în matematica pură) sau „j” (în domeniul electric). Aceste litere nu reprezintă o variabilă fizică (precum curentul instantaneu, simbolizat de

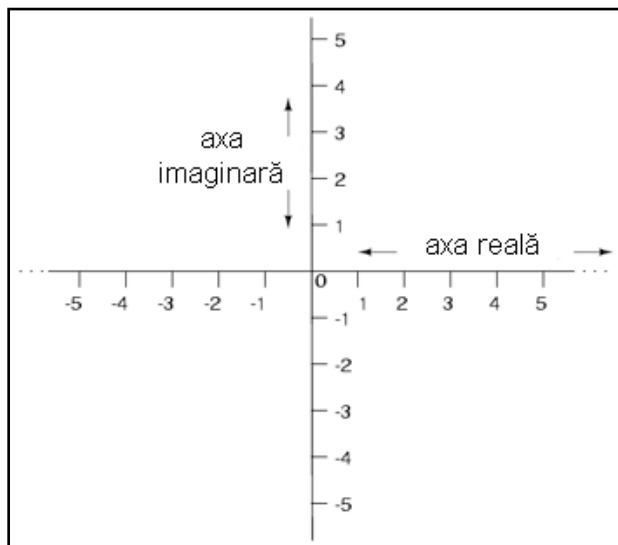
asemenea prin „i”), ci sunt operatori matematici folosiți pentru a face distincția dintre componenta verticală și cea orizontală a unui vector. Ca și număr complex complet, valorile cele două componente sunt scrise ca și sumă.

### Componenta reală și componenta imaginară



Componenta orizontală este denumită componentă reală deoarece aceasta este compatibilă cu numerele normale, scalare („reale”). Componenta verticală este denumită componenta imaginară, deoarece această dimensiune se află pe o altă direcție și nu are nicio legătură cu scara numerelor reale.

### Axa reală și axa imaginară

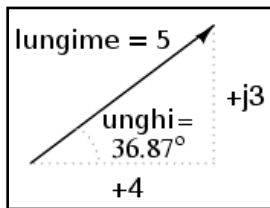


Cele două axe poartă denumirea de axa reală respectiv axa imaginară.

### Diferența dintre cele două notații

Oricare dintre cele două forme poate fi folosită pentru numerele complexe. Principalul motiv pentru care există două sisteme de notație valide se datorează faptului că forma rectangulară este ușor de folosit pentru adunare și scădere, iar forma polară pentru înmulțire și împărțire.

### Transformarea din formă polară în formă rectangulară



Conversia de la o formă la alta se poate realiza pe cale trigonometrică destul de ușor. Pentru a transforma forma polară în forma rectangulară, aflăm mai întâi componenta reală prin înmulțirea lungimii polare cu cosinusul unghiului, iar componenta imaginară prin înmulțirea lungimii polare cu sinusul unghiului.

Acest lucru poate fi înțeles mult mai ușor dacă desenăm valorile ca și laturi ale unui triunghi dreptunghic, ipotenuza acestuia reprezentând exact vectorul analizat (lungimea și unghiul său față de orizontală reprezintă forma sa polară), latura orizontală fiind componenta reală, iar latura verticală reprezentând componenta imaginară:

Calcululele de transformare arată astfel:

$$5 \angle 36,87 - \text{forma polară}$$

$$5 \cos 36,87^\circ = 4 - \text{componenta reală}$$

$$5 \sin 36,87^\circ = 3 - \text{componenta imaginară}$$

$$4 + 3j - \text{forma rectangulară}$$

## Transformarea din formă rectangulară în formă polară

Pentru a realiza conversia de la forma rectangulară la cea polară, găsim mai întâi lungimea polară folosind teorema lui Pitagora, fiindcă lungimea polară este ipotenuza unui triunghi dreptunghic, iar componenta reală și cea imaginară sunt reprezentate de latura adiacentă respectiv cea opusă. Găsim unghiul ca fiind raportul dintre arc-tangenta componentei imaginare și componenta reală, astfel:

$$4 + 3j - \text{forma rectangulară}$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} - \text{teorema lui Pitagora}$$

$$\text{lungimea polară} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5$$

$$\text{unghiul polar} = \arctan\left(\frac{3}{4}\right) = 36,87^\circ$$

$$5 \angle 36,87 - \text{forma polară}$$

## 6. Aritmetica numerelor complexe

- Asupra numerelor complexe se pot efectua toate operațiile aritmetice de adunare, scădere, înmulțire și împărțire

### Adunarea numerelor complexe

|            |              |              |
|------------|--------------|--------------|
| $2 + j5$   | $175 - j34$  | $-36 + j10$  |
| $+ 4 - j3$ | $+ 80 - j15$ | $+ 20 + j82$ |
| $6 + j2$   | $255 - j49$  | $-16 + j92$  |

Pentru adunarea numerelor complexe, adunăm pur și simplu componentele reale pentru a determina componenta reală a sumei cele două numere complexe; același lucru este valabil

și pentru componenta imaginară.

### Scăderea numerelor complexe

|              |                |                |
|--------------|----------------|----------------|
| $2 + j5$     | $175 - j34$    | $-36 + j10$    |
| $- (4 - j3)$ | $- (80 - j15)$ | $- (20 + j82)$ |
| $-2 + j8$    | $95 - j19$     | $-56 - j72$    |

Pentru scăderea numerelor complexe, se aplică același principiu de mai sus, doar cu scădere în loc de adunare.

### Înmulțirea numerelor complexe

$$(35 \angle 65^\circ)(10 \angle -12^\circ) = 350 \angle 53^\circ$$

$$(124 \angle 250^\circ)(11 \angle -100^\circ) = 1364 \angle -10^\circ \text{ sau}$$

$$(124 \angle 250^\circ)(11 \angle -100^\circ) = 1364 \angle 350^\circ$$

$$(3 \angle 30^\circ)(5 \angle -30^\circ) = 15 \angle 0^\circ$$

Pentru operațiile de înmulțire și împărțire forma preferată este cea polară. Atunci când efectuăm înmulțirea numerelor complexe sub formă polară, înmulțim dimensiunile numerelor complexe pentru determinarea dimensiunii produsului și adunăm unghiurile numerelor complexe pentru determinarea unghiului final al produsului.

### Împărțirea numerelor complexe

$$\frac{35 \angle 65^\circ}{10 \angle 12^\circ} = 3,5 \angle 77^\circ$$

$$\frac{124 \angle 250^\circ}{11 \angle 100^\circ} = 11,273 \angle 150^\circ$$

$$\frac{3 \angle 30^\circ}{5 \angle -30^\circ} = 0,6 \angle 60^\circ$$

Pentru efectuarea împărțirii numerelor complexe, calculăm pur și simplu raportul dintre dimensiunea primului număr complex cu dimensiunea celui de al doilea pentru aflarea dimensiunii finale a raportului, și scădem unghiul celui de al doilea număr complex din primul pentru a afla unghiul final al raportului dintre cele două numere complexe.

### **Reciproca (inversa) numerelor complexe**

$$\frac{1}{35 \angle 65^\circ} = \frac{1 \angle 0^\circ}{35 \angle 65^\circ} = 0,028 \angle -65^\circ$$

$$\frac{1}{10 \angle -12^\circ} = \frac{1 \angle 0^\circ}{10 \angle -12^\circ} = 0,1 \angle 12^\circ$$

$$\frac{1}{0,0032 \angle 10^\circ} = \frac{1 \angle 0^\circ}{0,0032 \angle 10^\circ} = 312,5 \angle -10^\circ$$

Pentru a obține reciproca ( $1/x$ ), sau inversa unui număr complex, calculăm raportul dintre valoarea scalară 1 (unghi zero) și numărul complex sub formă polară.

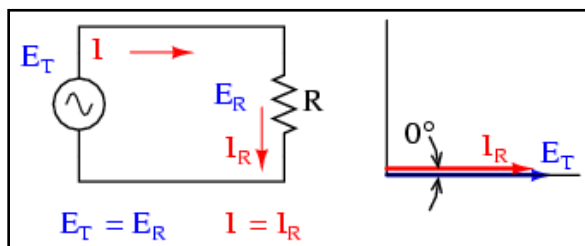


## 03 - Reactanța și impedanța inductivă

### 1. Circuite rezistive

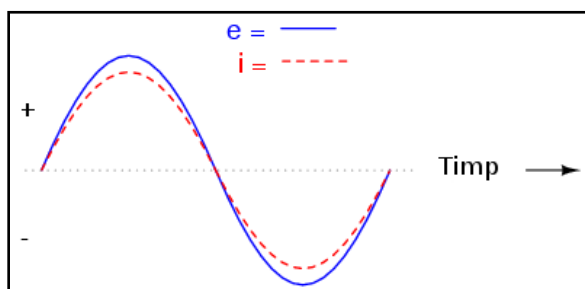
- Într-un circuit pur rezistiv, curentul și tensiunea sunt tot timpul în fază
- Într-un circuit pur rezistiv, întreaga putere este disipată sub formă de căldură

#### Circuit pur rezistiv



Să considerăm un circuit de curent alternativ pur rezistiv (format doar din rezistori și surse de putere), caz în care tensiunea și curentul sunt în fază (unghiul de defazaj dintre ele este  $0^\circ$ ).

#### Graficul formelor de undă

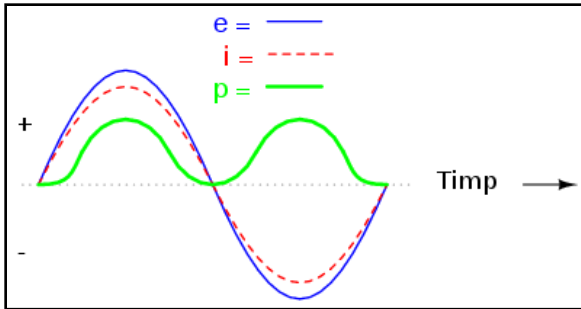


Dacă trecem curentul și tensiunea din circuitul de mai sus pe un grafic, acesta va arăta aproximativ ca în figura alăturată.

Deoarece rezistorul se opune pur și simplu deplasării electronilor prin circuit în mod direct, în orice moment din timp, forma de undă a căderii de tensiune pe rezistor este exact în fază cu forma de undă a curentului prin acesta. Putem lua în considerare orice punct de pe axa orizontală a graficului și compara valorile curentului și ale tensiunii între ele (aceste puncte poartă denumirea de valori instantanee). Astfel, atunci când valoarea instantanee a curentului este zero, valoarea instantanee a tensiunii este și ea zero.

De asemenea, atunci când curentul prin rezistor atinge valoarea sa maximă pozitivă, tensiunea la bornele sale este și ea la valoarea sa maximă pozitivă. În orice punct de-a lungul formelor de undă, putem aplica legea lui Ohm pentru valorile instantanee a curentului și tensiunii.

## Calcularea puterii



Putem de asemenea să calculăm puterea disipată de rezistor și să completăm graficul alăturat.

Se poate observa de pe grafic faptul că puterea nu are niciodată o valoare negativă. Atunci când valoarea curentului este pozitivă, și tensiunea este pozitivă, produsul celor două ( $p = ie$ ) fiind prin urmare pozitiv. Atunci când curentul este negativ, și tensiunea este negativă, ceea ce se traduce din nou printr-un produs pozitiv între cele două. Această polaritate unică ne spune de fapt că rezistorul disipă tot timpul puterea generată de sursă sub formă de căldură. Indiferent de valoarea curentului, pozitivă sau negativă, un rezistor va disipa tot timpul energie.

## 2. Circuite inductive. Reactanța

- Într-un circuit pur inductiv, tensiunea este defazată cu  $90^\circ$  înaintea curentului, sau echivalent, curentul este defazat cu  $90^\circ$  în urma tensiunii
- Reactanța inductivă reprezintă opoziția bobinei față de curentul alternativ datorată defazajului ce apare la stocarea și eliberarea energiei sub formă de câmp magnetic. Simbolul reactanței este „X”, iar unitatea de măsură este ohm-ul, exact ca în cazul rezistenței (R)
- Matematic, reactanța inductivă se calculează folosind formula:  $X_L = 2\pi fL$
- Viteza unghiulară a unui circuit electric în curent alternativ reprezintă un alt mod de exprimare a frecvenței sale; unitatea de măsură este radian electric per secundă în loc de numărul de perioade per secundă. Simbolul este litera grecească „omega”,  $\omega$
- Reactanța inductivă crește odată cu creșterea frecvenței, și invers. Cu alte cuvinte, cu cât frecvența este mai mare, cu atât este mai mare opoziția față de deplasarea electronilor (în curent alternativ)

## Scop

Bobinele au un comportament diferit față de cel al rezistorilor atunci când sunt introduse în circuit. Față de rezistori, care doar se opun trecerii curentului prin acel punct din circuit în care aceștia sunt conectați (prin dezvoltarea unei căderi de tensiune direct proporționale cu valoarea curentului), bobinele se opun variației curentului prin ele, prin dezvoltarea unei căderi de tensiune direct proporționale cu rata de variație a curentului. În conformitate cu legea lui Lenz, polaritatea acestei tensiuni induse este astfel încât valoarea curentului să se mențină la valoarea curentă, și anume, dacă valoarea curentului crește, tensiunea indusă se va opune deplasării electronilor;

în cazul descreșterii curentului, polaritatea este inversă pentru a putea împinge electronii și a se opune descreșterii curentului. Această opoziție la variația curentului poartă denumirea de reactanță, în loc de rezistență.

## Reactanța (X)

Opoziția unei bobine sau a unui condensator față de variația curentului se traduce printr-o opoziție față de curentul alternativ în general, curent ce este prin definiție variabil în amplitudine instantanee și direcție (polaritate). Această opoziție față de curentul alternativ este similară rezistenței, dar diferită prin faptul că rezultă întotdeauna într-o diferență de fază între curent și tensiune, iar puterea disipată este zero. Datorită acestei diferențe, are și o denumire specifică: reactanță. Reactanță în curent alternativ se exprimă în ohmi ( $\Omega$ ), la fel ca și rezistența, doar că simbolul matematic este X, în loc de R.

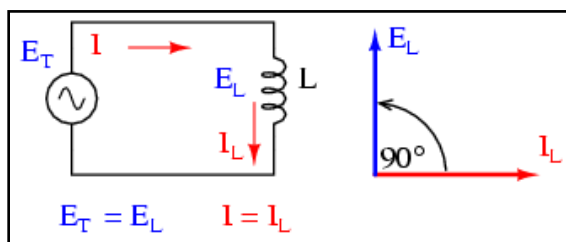
## Relația tensiune-curent a bobinei

Matematic, relația dintre căderea de tensiune pe o bobină și rata variației curentului prin aceasta, se exprimă astfel:

$$e = L \frac{di}{dt}$$

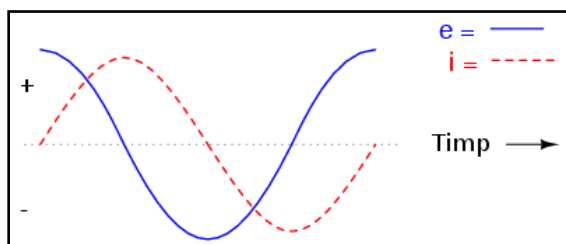
Expresia  $di/dt$  reprezintă derivata curentului cu timpul, adică rata de variația a curentului instantaneu ( $i$ ) cu timpul, în amperi per secundă. „L” reprezintă inductanța în Henry, iar „e” este tensiunea instantanee. Câteodată în loc de „e” se mai folosește și „v”, dar cele două notații sunt echivalente (vezi și relația tensiune-curent a bobinei).

## Circuit pur inductiv

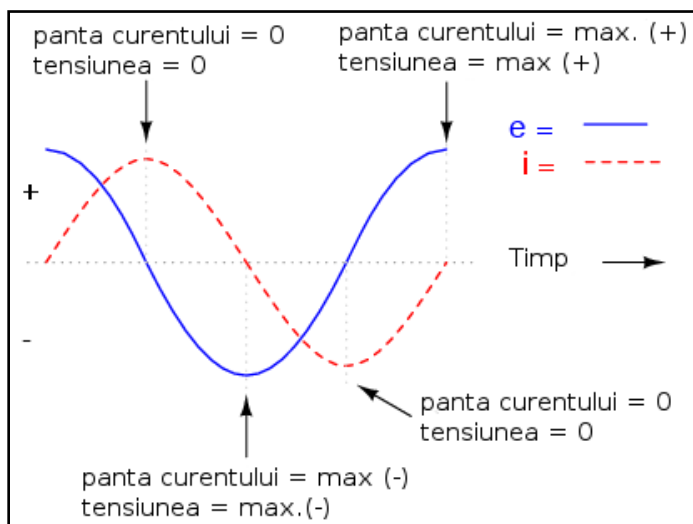


Să analizăm un circuit pur inductiv (format doar din bobine și surse de putere) simplu în curent alternativ. În acest caz, curentul este defazat în urma tensiunii cu  $90^\circ$ .

## Graficul formelor de undă



Graficul tensiunii și al curentului în acest caz este cel din figura alăturată.



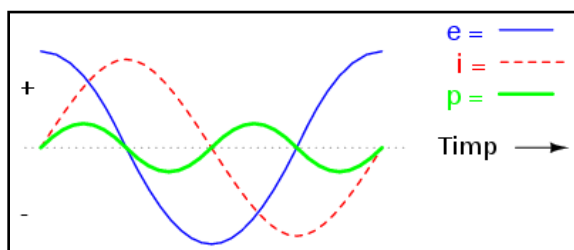
Rețineți faptul că valoarea căderii de tensiune pe bobină este în funcție de variația curentului prin aceasta.

Prin urmare, tensiunea instantanee este zero ori de câte ori curentul instantaneu este la valoarea maximă, de vârf (pozitivă sau negativă), deoarece în acest caz variația, sau panta, este zero; tensiunea instantanee are o valoare maximă, de vârf, atunci când panta curentului instantaneu, sau variația acestuia este maximă (intersecția formei de undă cu axa orizontală a timpului). Datorită acestui fapt, formele de undă sunt defazate cu  $90^\circ$ .

defazate cu  $90^\circ$ .

Dacă ne uităm pe grafic, observăm că unda de tensiune are un mic „avantaj” față de unda de curent; prin urmare, spunem că tensiunea este defazată cu  $90^\circ$  înaintea curentului, sau echivalent, curentul este defazat cu  $90^\circ$  în urma tensiunii.

### Calcularea puterii



Lucrurile devin și mai interesante atunci când introducem și forma de undă a puterii pe grafic.

### Puterea negativă

Deoarece puterea instantanee reprezintă produsul dintre tensiunea și curentul instantaneu ( $p = ie$ ), puterea este egală cu zero atunci când curentul sau tensiunea instantanee este zero. Ori de câte ori curentul și tensiunea instantanee sunt ambele pozitive sau ambele negative, puterea este și ea pozitivă. Dar, datorită faptului că cele două unde de tensiune, respectiv curent, sunt defazate între ele cu  $90^\circ$ , există momente în care una este pozitivă și cealaltă negativă, rezultatul fiind o putere instantanee negativă.

Dar ce înseamnă putere negativă? Înseamnă că bobina eliberează putere înapoi în circuit, iar putere pozitivă înseamnă că aceasta absoarbe putere din circuit. Acest lucru dovedește faptul că bobina nu „consumă” putere precum o face un rezistor (ce o disipă sub formă de căldură), ci puterea absorbită din circuit este stocată sub formă de câmp magnetic. În cazul de față, datorită faptului că duratele de putere pozitivă și negativă sunt perfect egale, bobina generează aceeași cantitate de putere înapoi în circuit pe care a absorbit-o într-o perioadă completă de timp.

Practic, reactanța (rezistență în curent continuu) bobinei nu disipă energie, sau echivalent, energia disipată de aceasta este zero. Atenție, cazul de sus este cel al unei bobine ideale, cu rezistență zero.

## Reactanța inductivă

Pentru a fi mai exacti, reactanța asociată cu o bobină poartă numele de reactanță inductivă și este simbolizată prin  $X_L$ .

Din moment ce căderea de tensiune pe bobine este proporțională cu rata de variație a curentului, căderea de tensiune va fi mai mare pentru variații mai rapide de curent, și mai mică pentru variații mai lente. Acest lucru înseamnă că reactanța în ohmi pentru oricare bobină, este direct proporțională cu frecvența curentului alternativ. Matematic, acest lucru se exprimă astfel:

$$X_L = 2\pi fL \text{ sau}$$

$$X_L = \omega L$$

unde,

$\omega$  = viteza unghiulară

Dacă avem o bobină de 10 mH și o conectăm într-un circuit cu frecvența variabilă, astfel: 60, 120 și 2.500 Hz, reactanța (inductivă) a acestora în fiecare dintre cele trei cazuri este următoarea:

| Frecvența (Hertz) | Reactanță (Ohm) |
|-------------------|-----------------|
| 60                | 3.7699          |
| 120               | 7.5398          |
| 2500              | 157.0796        |

## Viteza unghiulară

În formula de calcul a reactanței inductive, termenul „ $2\pi f$ ” are un înțeles aparte. Este numărul de radiani pe secundă la care se „rotește” curentul alternativ, dacă ne imaginăm că o perioadă a curentului alternativ reprezintă o rotație completă. Radianul este o unitate de măsură unghiulară: într-o rotație completă există 2 $\pi$  radiani, echivalentul a 360° într-un cerc complet. Dacă generatorul ce produce curentul alternativ are doi poli, va produce o rotație completă pentru fiecare rotație completă a arborelui, adică la fiecare 2 $\pi$  radiani, sau 360°. Dacă această constantă,  $2\pi$ , este înmulțită cu frecvența în Hertz (număr de rotații pe secundă), rezultatul va reprezenta o valoare în radiani per secundă, valoare cunoscută sub numele de viteza unghiulară a sistemului de curent alternativ.

Viteza unghiulară poate fi reprezentată prin expresia  $\omega$ , sau poate fi reprezentată folosind propriul său simbol, și anume, litera grecească Omega,  $\omega$ . Prin urmare, formula reactanței,  $X_L = 2\pi fL$ , poate fi rescrisă conform ecuației de mai sus ( $X_L = \omega L$ ).

Trebuie înțeles faptul că această „viteză unghiulară” este o expresie a vitezei de rotație a formelor de undă în curent alternativ, o rotație completă fiind egală cu  $2\pi$  radiani, și nu este neapărat viteza actuală a arborelui generatorului ce produce curentul alternativ. Dacă generatorul este format din mai mult de doi poli, viteza unghiulară va fi multiplu de viteza arborelui. Din acest motiv, viteza unghiulară  $\omega$  este câteodată exprimată sub formă de radiani electrici per secundă, pentru a face diferență între aceasta și rotația mecanică.

## Legea lui Ohm



Indiferent de modul în care reprezentăm viteza unghiulară a sistemului, este știut faptul că reactanța bobinei este direct proporțională cu aceasta. Odată cu creșterea frecvenței sistemului de curent alternativ (creșterea vitezei de rotație a arborelui generatorului), opoziția bobinei față de curgerea curentului va fi tot mai mare, și invers. Curentul alternativ într-un circuit inductiv simplu este egal cu raportul dintre tensiunea și reactanța inductivă, asemănător modului de calcul în c.c., sau în circuitele rezistive în c.a.:

$$X_L = 3,76 \, \Omega$$

$$I = \frac{E}{X} = \frac{10 \, \text{V}}{3,76 \, \Omega} = 2,65 \, \text{A}$$

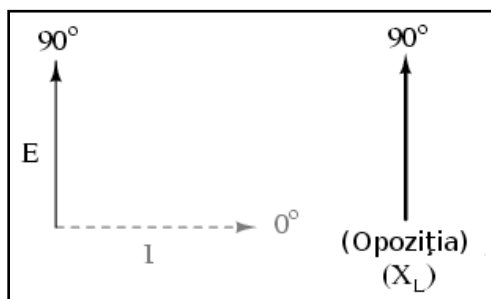
## Unghiul de fază

Totuși, trebuie să fim atenți la faptul că tensiunea și curentul nu sunt în fază în acest caz. După cum am văzut, diferența de fază dintre cele două unde este de  $90^\circ$ . Dacă reprezentăm aceste unghiuri de fază matematic, sub forma numerelor complexe, observăm că opoziția unei bobine față de curent posedă și un unghi al fazei:

$$\text{opoziție} = \frac{\text{tensiune}}{\text{curent}} = \frac{10 \, \text{V} \angle 90^\circ}{2,65 \, \text{A} \angle 0^\circ} = 3,76 \, \Omega \angle 90^\circ \text{ sau}$$

$$\text{opoziție} = 0 + j 3,76 \, \Omega$$

## Diagrama fazorială



Matematic, spunem că unghiul de fază a opoziției bobinei față de curent este de  $90^\circ$ , ceea ce înseamnă o mărime imaginară pozitivă. Acest unghi de fază este foarte important în analiza circuitelor electrice, în special al celor complexe (în curent alternativ), unde există o interacțiune între

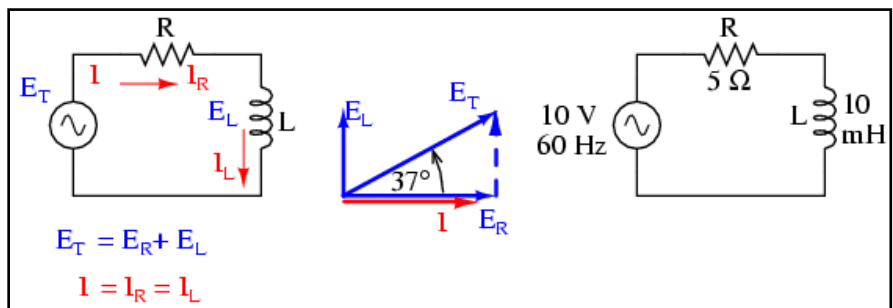
rezistență și reactanță. Se va dovedi extrem de benefică reprezentarea opoziției față de curent a oricărei componente sub forma numerelor complexe și nu sub forma cantităților scalare.

### 3. Circuite rezistiv-inductive serie. Impedanța

- Impedanța reprezintă valoarea totală a opoziției față de curentul electric și este suma complexă (vector) a rezistenței (reale) și a reactanței (imaginară). Simbolul este litera „Z” iar unitate sa de măsură este Ohm-ul, la fel ca a rezistenței (R) și a reactanței (X)
- În analiza circuitelor, impedanțele (Z) serie se comportă precum rezistențele (R) serie: se adună pentru a forma impedanța totală. Țineți minte să efectuați toate calculele sub formă complexă, nu scalară!  $Z_{\text{Total}} = Z_1 + Z_2 + \dots Z_n$
- O impedanță pur rezistivă va avea tot timpul un unghi de fază de exact  $0^\circ$  ( $Z_R = R \Omega \angle 0^\circ$ )
- O impedanță pur inductivă va avea tot timpul un unghi de fază de exact  $+90^\circ$  ( $Z_L = X_L \Omega \angle 90^\circ$ )
- Legea lui Ohm pentru circuitele de curent alternativ:  $E = IZ$ ;  $I = E / Z$ ;  $Z = E / I$
- Când într-un circuit avem și rezistori și bobine, impedanța totală va avea un unghi de fază între  $0^\circ$  și  $+90^\circ$ . Curentul din circuit va avea un unghi de fază între  $0^\circ$  și  $-90^\circ$
- Circuitele serie în curent alternativ posedă aceleași proprietăți fundamentale precum circuitele de curent continuu: curentul este același prin întreg circuitul, căderile de tensiune se adună pentru a forma tensiunea totală din circuit, iar impedanțele se adună pentru a forma impedanța totală

În secțiunile precedente, am văzut ce se întâmplă într-un circuit electric de curent alternativ simplu pur rezistiv, respectiv pur inductiv.

#### Circuit rezistiv-inductiv serie



Acum vom considera ambele componente legate în serie și vom studia efectele lor. Luăm așadar ca și exemplu un circuit rezistiv-inductiv (format din rezistori, bobine și surse de putere), caz în care curentul este defazat în urma tensiunii cu un unghi

cuprins între  $0^\circ$  și  $90^\circ$ .

## Impedanța

Rezistorul impune o rezistență de  $5 \Omega$  față de curent, indiferent de valoarea frecvenței, iar bobina va oferi o reactanță de  $3,7699 \Omega$  față de curentul alternativ la o valoare a frecvenței de 60 Hz. Deoarece rezistența rezistorului este un număr real ( $5 \Omega \angle 0^\circ$ , sau  $5 + j0 \Omega$ ), iar reactanța bobinei este un număr imaginar ( $3,7699 \Omega \angle 90^\circ$ , sau  $0 + j3,7699 \Omega$ ), efectul total (combinat) al celor două componente va crea o opoziție față de curent egală cu suma complexă a celor două numere. Această opoziție combinată va fi un vector. Pentru a putea exprima mai clar această opoziție, avem nevoie de un nou termen pentru opoziția față de curent pe lângă rezistență și reactanță. Acest termen poartă numele de impedanță, iar simbolul lui este „Z”; unitatea de măsură este de asemenea ohm-ul, la fel ca și a rezistenței și a reactanței.

În exemplul de mai sus, impedanța totală a circuitului este:

$$Z_{total} = (5 \Omega \text{ rezistență}) + (3,76 \Omega \text{ reactanță inductivă})$$

$$Z_{total} = 5 \Omega (R) + 3,76 \Omega (X_L) = 5 \Omega (\angle 0^\circ) + 3,76 \Omega (\angle 90^\circ)$$

sau

$$Z_{total} = (5 + j0 \Omega) + (0 + j3,76 \Omega)$$

$$Z_{total} = 6,26 \Omega \angle 37,01^\circ - \text{forma polară}$$

$$Z_{total} = 5 + j3,76 \Omega$$

## Legea lui Ohm pentru circuite în curent alternativ

Relația dintre impedanță, curent și tensiune este similară rezistenței din legea lui Ohm:

$$E = IZ; I \frac{E}{Z}; Z = \frac{E}{I}$$

De fapt, această expresie este o formă a legii lui Ohm mult mai cuprinzătoare (mai generală) decât cea considerată în curent continuu ( $E = IR$ ), la fel precum impedanța este o expresie mult mai cuprinzătoare a opoziției față de deplasarea electronilor decât rezistența. Orice rezistență și orice reactanță, separate sau în combinații serie/paralel, pot fi și trebuie exprimate ca și o singură impedanță într-un circuit de curent alternativ.

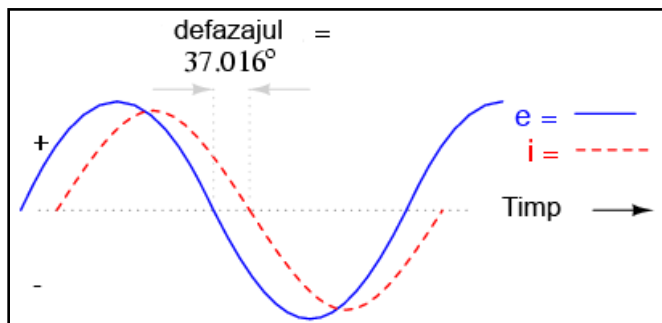
## Rezolvarea circuitului

### Curentul total



Pentru aflarea valorii curentului în circuitul de mai sus, trebuie mai întâi să impunem o referință pentru unghiul de fază a sursei de tensiune, iar în mod normal, aceasta se presupune a fi zero:

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{10 \text{ V} \angle 0^\circ}{6,26 \Omega \angle 37,01^\circ} = 1,59 \text{ A} \angle -37,01^\circ$$



La fel ca și în cazul circuitelor pur inductive, curentul este defazat în urma tensiunii (sursei), cu toate că de data aceasta defazajul nu este atât de mare, doar  $37,016^\circ$ , față de  $90^\circ$  în cazul circuitului pur inductive.

### Tensiunea pe rezistor

Relațiile de fază pentru rezistor și bobină, luate individual, nu s-au modificat. Caderea de tensiune la bornele rezistorului și curentul prin acesta sunt în fază (defazaj de  $0^\circ$ ), iar defazajul dintre tensiune și curent în cazul bobinei este de  $+90^\circ$ .

Putem verifica matematic acest lucru (unghiul de fază al lui  $E_R$  este egal cu unghiul de fază al curentului):

$$E = IZ$$

$$E_R = I_R Z_R = (1,59 \text{ A} \angle -37,01^\circ)(5 \Omega \angle 0^\circ) = 7,98 \text{ V} \angle -37,01^\circ$$

În formula de mai sus  $Z_R$  semnifică impedanța rezistivă, și este același lucru cu rezistența. Tensiunea și curentul prin rezistor sunt în fază, adică au același unghi de fază.

### Tensiunea pe bobină

Tensiunea la bornele bobinei are un unghi de fază de  $52,984^\circ$  (față de unghiul de fază de referință,  $0^\circ$ ), iar curentul prin bobina are un unghi de fază de  $-37,016^\circ$ , o diferență de exact  $90^\circ$  între cele două. Acest lucru ne spune că  $E$  și  $I$  sunt defazate între ele tot cu  $90^\circ$  (doar în cazul bobinei):

$$E = IZ$$

$$E_L = I_L Z_L = (1,59 \text{ A} \angle -37,01^\circ)(3,76 \Omega \angle 90^\circ) = 6,02 \text{ V} \angle 52,98^\circ$$

Putem observa că unghiul de fază a lui  $E_L$  este mai mare cu exact  $90^\circ$  decât cel al curentului.

### Tensiunea totală

Putem de asemenea să demonstrăm matematic că rezultatul sumei acestor valori complexe este tensiunea totală, așa cum rezultă din aplicarea legii lui Kirchhoff:

$$E_{total} = E_R + E_L = 7,98 \text{ V} \angle -37,01^\circ + 6,02 \text{ V} \angle 52,98^\circ$$

## Aplicarea metodei tabelului

Cu toate aceste valori rezultate, chiar și pentru un circuit simplu precum este acesta, este mai ușor să aplicăm metoda tabelului.

### Valorile inițiale

| Mărime | R                              | L                                     | Total                            | Unitate  |
|--------|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------|
| E      |                                |                                       | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | V        |
| I      |                                |                                       |                                  | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$ | $0 + j3,76$<br>$3,76 \angle 90^\circ$ |                                  | $\Omega$ |

Tabelul va conține valorile pentru tensiune (E), curent (I) și impedanță (Z) pentru fiecare component în parte. Nu vom insera valorile propriu-zise ale rezistenței și inductanței în ohm sau Henry, ci forma lor complexă.

Deși nu este neapărat necesar, este folositor să trecem atât forma rectangulară ( $x + jy$ ) cât și pe cea polară ( $x \angle y$ ) în fiecare tabel. Dacă folosim un calculator pentru a realiza automat aceste calcule complexe fără a mai fi nevoiți să facem conversia între cele două forme, atunci această documentație suplimentară nu este deloc necesară. Totuși, dacă suntem nevoiți să efectuăm calculele „de mână”, atunci scrierea ambelor forme în tabel se va dovedi într-adevăr folositoare.

### Impedanța totală

| Mărime | R                              | L                                     | Total                                                                        | Unitate  |
|--------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------|
| E      |                                |                                       | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$                                             | V        |
| I      |                                |                                       |                                                                              | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$ | $0 + j3,76$<br>$3,76 \angle 90^\circ$ | <b><math>5 + j3,76</math></b><br><b><math>6,26 \angle 37,01^\circ</math></b> | $\Omega$ |

După ce am introdus în tabel toate datele cunoscute, putem trece la rezolvarea circuitului asemănător circuitelor de curent continuu: determinăm impedanța totală din impedanțele individuale. Din moment ce acesta este un circuit serie, știm că opoziția față de curgerea electronilor (rezistență sau impedanță) este aditivă, iar rezultatul îl reprezintă opoziția totală.

### Curentul total

| Mărime | R                              | L                                     | Total                                                                            | Unitate  |
|--------|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| E      |                                |                                       | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$                                                 | V        |
| I      |                                |                                       | <b><math>1,27 - j0,96</math></b><br><b><math>1,59 \angle -37,01^\circ</math></b> | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$ | $0 + j3,76$<br>$3,76 \angle 90^\circ$ | $5 + j3,76$<br>$6,26 \angle 37,01^\circ$                                         | $\Omega$ |

Acum, după ce tensiunea și impedanța totală ne sunt cunoscute, putem aplica legea lui Ohm ( $I = E / Z$ ) pentru determinarea curentului total din circuit.

### Curenții prin rezistor și bobină

| Mărime | R                                                                                | L                                                                                | Total                                        | Unitate  |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------|
| E      |                                                                                  |                                                                                  | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$             | V        |
| I      | <b><math>1,27 - j0,96</math></b><br><b><math>1,59 \angle -37,01^\circ</math></b> | <b><math>1,27 - j0,96</math></b><br><b><math>1,59 \angle -37,01^\circ</math></b> | $1,27 - j0,96$<br>$1,59 \angle -37,01^\circ$ | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$                                                   | $0 + j3,76$<br>$3,76 \angle 90^\circ$                                            | $5 + j3,76$<br>$6,26 \angle 37,01^\circ$     | $\Omega$ |

La fel ca în cazul circuitelor de curent continuu, curentul total într-un circuit de curent alternativ serie este același prin oricare din componentele circuitului. Acest lucru este în continuare adevărat, deoarece într-un circuit serie există doar o singură cale pentru curgerea electronilor, prin urmare, rata lor de

deplasare trebuie să fie uniformă în întreg circuitul. Prin urmare, putem trece valorile curentului total pentru fiecare component în parte (rezistor și bobină) în tabel.

### Căderile de tensiune pe rezistor și bobină

| Mărime | R                                                                               | L                                                                              | Total                                        | Unitate  |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------|
| E      | <b><math>6,37 - j4,8</math></b><br><b><math>7,98 \angle -37,01^\circ</math></b> | <b><math>3,62 + j4,8</math></b><br><b><math>6,02 \angle 52,98^\circ</math></b> | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$             | V        |
| I      | $1,27 - j0,96$<br>$1,59 \angle -37,01^\circ$                                    | $1,27 - j0,96$<br>$1,59 \angle -37,01^\circ$                                   | $1,27 - j0,96$<br>$1,59 \angle -37,01^\circ$ | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$                                                  | $0 + j3,76$<br>$3,76 \angle 90^\circ$                                          | $5 + j3,76$<br>$6,26 \angle 37,01^\circ$     | $\Omega$ |

Acum, tot ceea ce mai avem de făcut este să completăm căderea de tensiune pe rezistor și pe bobină. Aflarea acestor valori se realizează folosind legea lui Ohm ( $E = IZ$ ), aplicată pe fiecare coloană a tabelului.

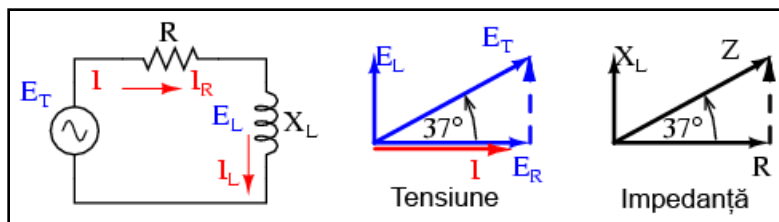
Tabelul este acum complet. De observat că am aplicat exact aceleași reguli ca și în analiza circuitelor electrice în curent continuu, cu diferența că toate valorile trebuie exprimate și calculate sub formă complexă și nu scalară precum era cazul în curent continuu. Atâta timp cât diferența de fază este reprezentată corect, nu există nicio diferență fundamentală între analiza unui circuit de curent alternativ față de unul în curent continuu.

### Indicația aparatelor de măsură

Să luăm acum în considerare relația dintre valorile calculate mai sus și indicația tensiunii și a curentului dată de instrumentele de măsură. Valorile din tabel care corespund cu valorile citite de pe un instrument de măsură sunt cele sub formă polară, nu rectangulară! Cu alte cuvinte, dacă am conecta un voltmetru la bornele rezistorului

din circuit pentru aflarea căderii de tensiune, acesta va indica 7,9847 V (valoarea sub formă polară), nu 6,3756 V (valoarea reală sub formă rectangulară) și nici 4,8071 V (valoarea imaginară sub formă rectangulară). Pentru a exprima acest lucru grafic, aparatele de măsură „indică” pur și simplu lungimea vectorului (pentru tensiune sau curent). Notăția rectangulară, deși este mai ușor de folosit pentru operațiile aritmetice de adunare și scădere, este o formă de notație mai abstractă decât forma polară pentru măsurătorile reale. Dacă ar fi să folosim doar o singură notație, cea mai bună alegere ar fi cea polară, pentru că este singura ce are legătură directă cu măsurătorile reale.

## Diagrama impedanței



Impedanța ( $Z$ ) unui circuit serie R-L poate fi calculată cunoscând rezistența ( $R$ ) și reactanța inductivă ( $X_L$ ). Din moment ce  $E = IR$ ,  $E = IX_L$  și  $E = IZ$ , rezistența, reactanța și impedanța sunt proporționale cu tensiunea. Prin urmare,

diagrama fazorială a tensiunii poate fi înlocuită cu o diagramă similară a impedanței.

## Problemă

Găsiți impedanță totală a circuitului format dintr-un rezistor de  $40 \Omega$  conectat în serie cu o bobină de 79.59 mH, la o frecvență a sursei de alimentare de 60 Hz.

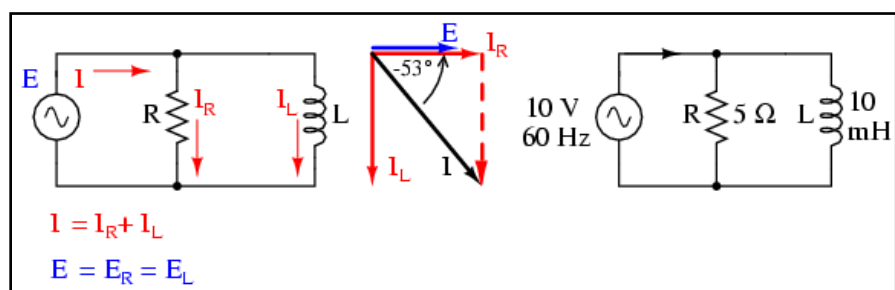
**Răspuns:**  $Z = 40 + j30 = 50 \angle 36.87^\circ$ .

## 4. Circuite rezistiv-inductive paralel

- În analiza circuitelor, impedanțele paralel ( $Z$ ) se comportă precum rezistorii ( $R$ ) paralel: impedanța totală este mai mică decât impedanță fiecărei ramuri luată individual, folosind formula echivalentă. Atenție, realizați toate calculele sub formă complexă, nu scalară!  

$$Z_{\text{Total}} = 1 / (1 / Z_1 + 1 / Z_2 + \dots 1 / Z_n)$$
- Legea lui Ohm pentru circuitele de curent alternativ:  $E = IZ$  ;  $I = E / Z$  ;  $Z = E / I$
- Când rezistorii și bobinele sunt conectate în paralel, impedanța totală va avea un unghi de fază între  $0^\circ$  și  $+90^\circ$ . Curentul din circuit va avea un unghi de fază între  $0^\circ$  și  $-90^\circ$
- Circuitele paralel în curent alternativ prezintă aceleași proprietăți ca și circuitele în curent continuu: căderile de tensiune sunt aceleași pe toate componentele circuitului, curenții de ramură se însumează și dau naștere curentului total, iar impedanțele totală este mai mică decât impedanța fiecărei ramuri luate în parte

## Circuit rezistiv-inductiv paralel



Să luăm în considerare aceleași componente din circuitul serie, dar să le conectăm de data aceasta în paralel.

## Rezolvarea circuitului

### Valorile inițiale

| Mărime | R                              | L                                     | Total                            | Unitate  |
|--------|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------|
| E      |                                |                                       | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | V        |
| I      |                                |                                       |                                  | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$ | $0 + j3,76$<br>$3,76 \angle 90^\circ$ |                                  | $\Omega$ |

Deoarece sursa de tensiune are aceeași frecvență ca și în cazul circuitului serie, iar rezistorul și bobina au aceleași valori ale rezistenței și inductanței, acestea trebuie să aibă aceleași valori ale impedanței. Prin urmare, începem completarea tabelului cu aceleași valori inițiale.

### Căderile de tensiune pe rezistor și bobină

| Mărime | R                                | L                                     | Total                            | Unitate  |
|--------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------|
| E      | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$      | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | V        |
| I      |                                  |                                       |                                  | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$   | $0 + j3,76$<br>$3,76 \angle 90^\circ$ |                                  | $\Omega$ |

Singura diferență față de cazul precedent, este că de data aceasta vom aplica regulile circuitelor paralele, și nu cele ale circuitelor serie. Metoda de lucru este practic aceeași ca și în cazul circuitelor de curent continuu. Cunoaștem faptul că tensiunea este aceeași pe toate componentele într-un circuit paralel, așa că putem completa toate coloanele cu aceeași valoare a tensiunii.

### Curentul prin rezistor și bobină

| Mărime | R                                | L                                      | Total                            | Unitate  |
|--------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|----------|
| E      | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$       | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | V        |
| I      | $2 + j0$<br>$2 \angle 0^\circ$   | $0 - j2,65$<br>$2,65 \angle -90^\circ$ |                                  | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$   | $0 + j3,76$<br>$3,76 \angle 90^\circ$  |                                  | $\Omega$ |

Acum putem aplica legea lui Ohm ( $I = E / Z$ ) vertical pentru cele două coloane, calculând curentul prin rezistor și curentul prin bobină.

### Curentul total

| Mărire | R                 | L                      | Total                                    | Unitate |
|--------|-------------------|------------------------|------------------------------------------|---------|
| E      | 10 + j0<br>10 ∠0° | 10 + j0<br>10 ∠0°      | 10 + j0<br>10 ∠0°                        | V       |
| I      | 2 + j0<br>2 ∠0°   | 0 + j2,65<br>-90 ∠0°   | <b>2 - j2,65</b><br><b>3,32 ∠-52,98°</b> | A       |
| Z      | 5 + j0<br>5 ∠0°   | 0 + j3,76<br>3,76 ∠90° |                                          | Ω       |

La fel ca în cazul circuitelor de curent continuu, curenții de ramură în circuitele de curent alternativ se însumează pentru a forma curentul total (legea lui Kirchhoff pentru curent este valabilă și în acest caz).

### Impedanța totală

| Mărire | R                 | L                      | Total                                     | Unitate |
|--------|-------------------|------------------------|-------------------------------------------|---------|
| E      | 10 + j0<br>10 ∠0° | 10 + j0<br>10 ∠0°      | 10 + j0<br>10 ∠0°                         | V       |
| I      | 2 + j0<br>2 ∠0°   | 0 + j2,65<br>-90 ∠0°   | 2 - j2,65<br>3,32 ∠-52,98°                | A       |
| Z      | 5 + j0<br>5 ∠0°   | 0 + j3,76<br>3,76 ∠90° | <b>1,81 + j2,4</b><br><b>3,01 ∠52,98°</b> | Ω       |

Impedanța totală poate fi calculată folosind legea lui Ohm ( $Z = E / I$ ) vertical pe coloana „Total”.

### Impedanța paralel

Impedanța totală poate fi calculată, de asemenea, folosind o formulă echivalentă celei folosite pentru calcularea rezistenței totale paralele:

$$Z_{\text{paralel}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}}$$

Indiferent ce metodă folosim, rezultatul este același.

## 04 - Reactanța și impedanța capacitivă

### 1. Circuite capacitive

- Reactanța capacitive reprezintă opoziția condensatorului față de curentul alternativ datorită modului său „defazat” de stocare și eliberare a energiei sub forma câmpului electric
- Reactanța capacitivă poate fi calculată folosind formula  $X_C = 1/(2\pi fC)$
- Reactanța capacitivă scade odată cu creșterea frecvenței. Cu alte cuvinte, cu cât frecvența este mai mare, cu atât opoziția față de curent este mai mică

### Scop

Comportamentul condensatoarelor este diferit față de cel al rezistorilor. Pe când rezistorii opun o rezistență direct proporțională cu căderea de tensiune în față curgerii curentului, condensatoarele se opun variației de tensiune absorbind (încărcare) sau eliberând (descărcare) curent în circuit. Curgerea curentului „prin” condensator este direct proporțională cu rata de variație a tensiunii la bornele acestuia. Această opoziție în calea variației tensiunii este o altă formă de reactanță, opusă însă reactanței bobinei.

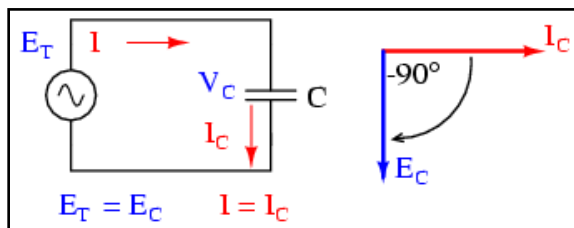
### Relația curent-tensiune a condensatorului

Matematic, relația dintre curentul condensatorului și rata de variație a tensiunii la bornele acestuia, se exprimă astfel:

$$i = C \frac{de}{dt}$$

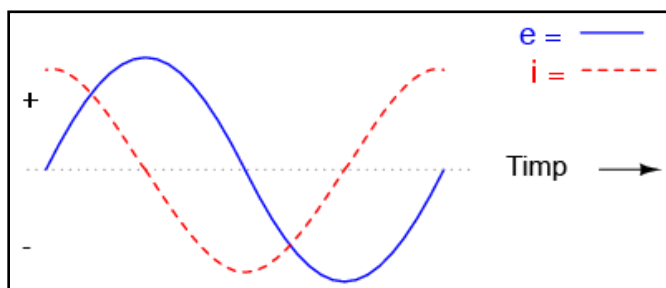
Expresia  $de/dt$  exprimă rata de variație a tensiunii instantanee ( $e$ ) în raport cu timpul, calculată în volți per secundă. Capacitatea ( $C$ ) este în Farazi, iar curentul instantaneu ( $i$ ) în Amperi. O exprimare echivalentă este și  $dv/dt$ , folosind „v” în loc de „e” pentru exprimarea tensiunii; cele două notații sunt însă echivalente.

### Circuit pur capacitiv

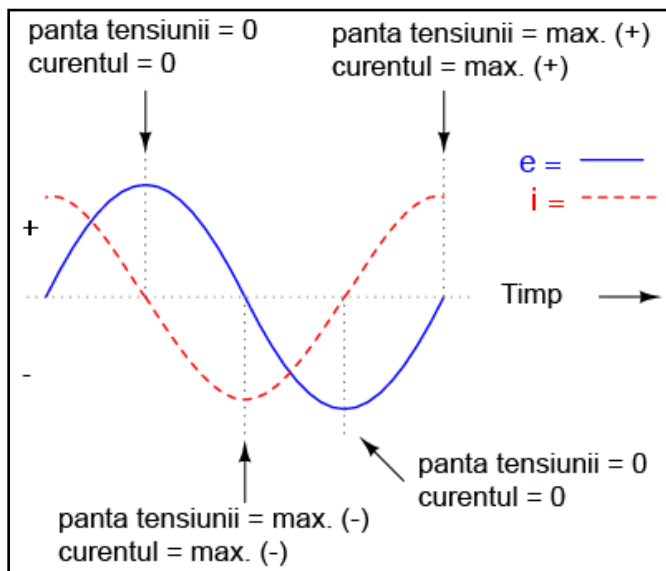


Să analizăm un circuit simplu pur capacitiv. Tensiunea este defazată în urma curentului cu  $90^\circ$ .

## Graficul formelor de undă



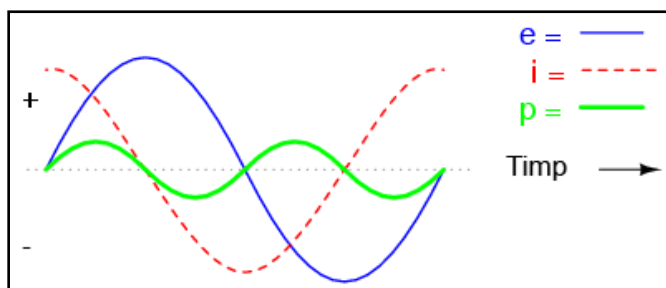
Graficul celor două forme de undă sunt cele din figura alăturată.



Rețineți, curentul printr-un condensator este rezultatul variației tensiunii la bornele acestuia. Prin urmare, curentul instantaneu este zero atunci când tensiunea instantanee este la valoarea sa maximă, pozitivă sau negativă, reprezentând variație zero sau pantă zero; curentul instantaneu are valoarea maximă atunci când tensiunea instantanee are variația maximă, adică zona în care variația este maximă (intersecția cu axa orizontală a timpului).

Rezultă o undă a tensiunii defazată cu  $-90^\circ$  față de curent. Dacă ne uităm pe grafic, curentul pare să aibă un „avantaj” față de tensiune; curentul este defazat înaintea tensiunii, sau echivalent, tensiunea este defazată în urma curentului.

## Calcularea puterii



Forma de undă pentru putere este asemănătoare celei existente în cazul circuitului pur inductiv.

Defazajul de  $90^\circ$  dintre curent și tensiune duce la o formă a undei de putere ce alternează în mod egal între pozitiv și negativ. Acest lucru înseamnă că nu există pierdere de putere (nu se disipă putere) pe condensator ca urmare a variației tensiunii; acesta doar absoarbe putere și apoi o eliberează din și înspre circuit, în mod alternativ.



## Reactanța capacitivă

Opoziția condensatorului la variația tensiunii se traduce printr-o opoziție față de tensiunea alternativă în general, care prin definiție își modifică tot timpul amplitudinea instantanee și direcția. Oricare ar fi amplitudinea tensiunii alternative pentru o anumită frecvență, un condensator va „conduce” o anumită valoare a curentului alternativ. La fel ca în cazul rezistorilor, unde curentul este o funcție de tensiune la bornele acestuia și rezistența sa, curentul alternativ printr-un condensator este o funcție de tensiune la bornele sale și reactanța oferită de acesta. Ca și în cazul bobinelor, reactanța este exprimată în ohmi, iar simbolul este  $X$  (sau mai exact,  $X_C$  - reactanța capacitivă).

Din moment ce condensatoarele „conduc” curent în proporție directă cu variația tensiunii, acestea vor conduce mai mult curent cu cât variația tensiunii este mai mare (durata de încărcare și descărcare la valorile de vârf este mai mică), și mai puțin cu cât variația tensiunii este mai mică. Acest lucru înseamnă **că** reactanța condensatoarelor este invers proporțională cu frecvența curentului alternativ. Formula de calcul a reactanței capacitive este următoarea:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

sau

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

unde,

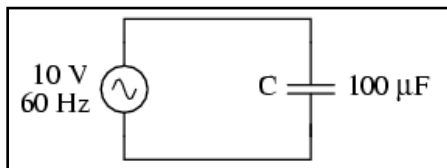
$\omega = 2\pi f$ , și reprezintă viteza unghiulară

| Frecvența (Hertz) | Reactanța (Ohm) |
|-------------------|-----------------|
| 60                | 26.5258         |
| 120               | 13.2629         |
| 2500              | 0.6366          |

Reactanța unui condensator de 100  $\mu\text{F}$ , la diferite frecvențe, este prezentată în tabelul alăturat.

De observat că relația dintre reactanța capacitivă și frecvență este exact opusă față de cea a reactanței inductive. Reactanța capacitivă scade odată cu creșterea frecvenței curentului alternativ, și invers. Bobinele se opun variației curentului prin producerea unor căderi de tensiune mai mari; condensatoarele se opun variației tensiunii prin trecerea unor curenți mai mari prin aceștia.

## Legea lui Ohm



Curentul alternativ într-un circuit pur capacitiv este egal cu raportul dintre tensiune și reactanța capacitivă. Să luăm ca și exemplu circuitul alăturat.

Calculul curentului total din circuit arată astfel:

$$X_C = 26,52 \, \Omega$$

$$I = \frac{E}{X} = \frac{10 \, \text{V}}{26,52 \, \Omega} = 0,37 \, \text{A}$$

Totuși, trebuie să ne reamintim faptul că tensiunea și curentul nu sunt în fază în acest caz, curentul fiind defazat cu  $+90^\circ$  față de tensiune. Dacă reprezentăm unghiul de fază al tensiunii și al curentului sub formă matematică, putem calcula unghiul de fază al opoziției reactive a condensatorului față de curent:

$$\text{opoziție} = \frac{\text{tensiune}}{\text{curent}} = \frac{10 \, \text{V} \angle 0^\circ}{0,37 \, \text{A} \angle 90^\circ} = 26,52 \, \Omega \angle 90^\circ$$

### Diagrama fazorială

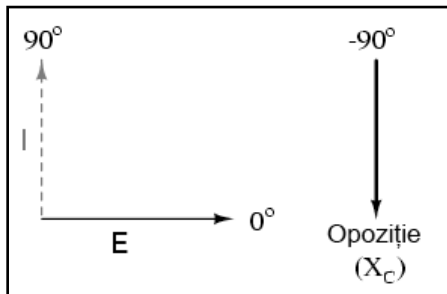


Diagrama fazorială pentru un condensator, reprezentând diferența de fază dintre tensiune și curent, este prezentată în figura alăturată.

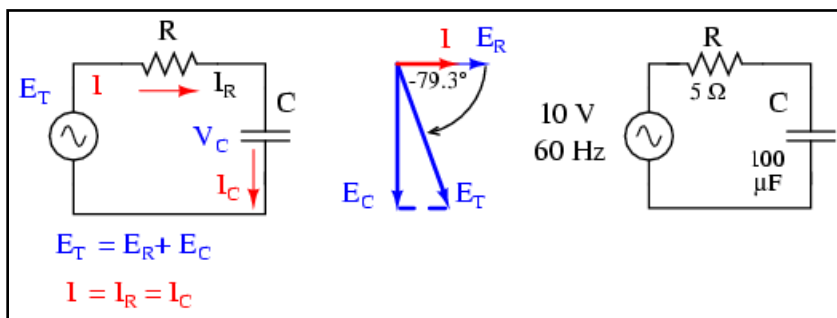
## 2. Circuite rezistiv-capacitive serie

- Impedanța ( $Z$ ) este cantitatea totală a opoziției față de curentul electric și este suma complexă (vector) dintre rezistență (reală) și reactanța (imaginară)
- În circuitele serie, impedanțele ( $Z$ ) se comportă precum rezistențele ( $R$ ) serie: acestea se adună pentru a forma impedanța totală. Atenție, efectuați toate calculele sub formă complexă, nu scalară!  

$$Z_{\text{Total}} = Z_1 + Z_2 + \dots Z_n$$
- Țineți minte că impedanțele se însumează tot timpul atunci când sunt conectate în serie, indiferent de tipul componentelor, rezistive, inductive sau capacitive; din punct de vedere matematic, toate sunt echivalente

- O impedanță pur rezistivă va avea tot timpul un unghi de fază de exact  $0^\circ$  ( $Z_R = R \Omega \angle 0^\circ$ )
- O impedanță pur capacitivă va avea tot timpul un unghi de fază de exact  $-90^\circ$  ( $Z_C = X_C \Omega \angle -90^\circ$ )
- Legea lui Ohm pentru circuitele de curent alternativ:  $E = IZ$  ;  $I = E / Z$  ;  $Z = E / I$
- Atunci când rezistorii și condensatoarele sunt conectate împreună în circuite, impedanța totală a circuitului va avea un unghi între  $0^\circ$  și  $-90^\circ$
- Circuitele serie de curent alternativ prezintă aceleași proprietăți fundamentale ca și în cazul circuitelor de curent continuu: curentul este același prin tot circuitul (prin toate componentele), căderile de tensiune se însumează, iar suma lor este tensiunea totală iar impedanțele se adună rezultând impedanța totală

### Circuit rezistiv-capacitiv serie



Până acum am văzut doar ce se întâmplă într-un circuit pur rezistiv, respectiv pur capacitiv. Acum vom analiza cele două componente conectate împreună într-un circuit serie.

Rezistorul va produce o rezistență de  $5 \Omega$  în circuit față de curentul alternativ, indiferent de valoarea frecvenței, iar condensatorul va produce o reactanță de  $26,5258 \Omega$  față de curentul alternativ la o frecvență de 60 Hz. Deoarece rezistența rezistorului este un număr real ( $5 \Omega \angle$  sau  $5 + j0 \angle \Omega$ ), iar reactanța condensatorului este un număr imaginar ( $26,5258 \Omega \angle -90^\circ$  sau  $0 - j26,5258 \Omega$ ), efectul celor două componente luate împreună (combinat) va fi o opoziție față de curent egală cu suma complexă a celor două numere. Termenul folosit pentru desemnarea acestei opoziții față de curent se numește impedanță, simbolizată prin  $Z$  și exprimată în Ohm, la fel ca rezistență și reactanță.

### Impedanța totală

În circuitul de sus, impedanța totală a circuitului este:

$$Z_{total} = (5 \Omega \text{ rezistență}) + (26,52 \Omega \text{ reactanță capacitivă})$$

$$Z_{total} = 5 \Omega (R) + 26,52 \Omega (X_C) = (5 \Omega \angle 0^\circ) + (26,52 \Omega \angle -90^\circ)$$

sau

$$Z_{total} = (5 + j0 \Omega) + (0 - j26,52 \Omega)$$

$$Z_{total} = 26,99 \, \Omega \angle -79,32^\circ$$

sau

$$Z_{total} = 5 - j26,52 \, \Omega$$

## Relația impedanță-curent-tensiune

Toate mărimile sunt exprimate sub formă complexă, nu scalară:

$$E = IZ; \quad I = \frac{E}{Z}; \quad Z = \frac{E}{I}$$

Relația dintre impedanță, curent și tensiune este similară rezistenței din legea lui Ohm.

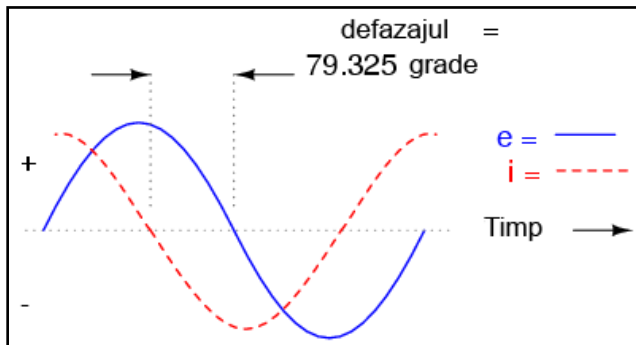
De fapt, această expresie este o formă a legii lui Ohm mult mai cuprinzătoare (mai generală) decât cea considerată în curent continuu ( $E = IR$ ), la fel precum impedanța este o expresie mult mai cuprinzătoare a opoziției față de deplasarea electronilor decât rezistența. Orice rezistență și orice reactanță, separate sau în combinații serie/paralel, pot fi și trebuie exprimate ca și o singură impedanță într-un circuit de curent alternativ.

## Curentul total

Pentru a calcula curentul din circuitul de mai sus, trebuie să luăm prima dată o referință a unghiului de fază pentru sursa de tensiune; în mod normal, aceasta se consideră zero:

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{10 \, \text{V} \angle 0^\circ}{26,93 \, \Omega \angle -79,32^\circ} = 370,5 \, \text{mA} \angle -79,32^\circ$$

## Defazajul



Ca și în cazul circuitului pur capacitiv, curentul este defazat înaintea tensiunii (sursei), cu toate că de data aceasta diferența este de  $79.325^\circ$ , nu  $90^\circ$ .

## Analiza circuitului

Să folosim din nou metoda tabelului pentru analiza circuitului de mai sus.

### Valorile inițiale

| Mărime | R                              | C                                        | Total                                                                   | Unitate  |
|--------|--------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------|
| E      |                                |                                          | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$                                        | V        |
| I      |                                |                                          | $68,62\text{m} + j364,06\text{m}$<br>$370,5\text{m} \angle 79,32^\circ$ | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$ | $0 - j26,52$<br>$26,52 \angle -90^\circ$ | $5 - j26,52$<br>$26,99 \angle -79,32^\circ$                             | $\Omega$ |

Primul pas este introducerea tuturor cantităților cunoscute în tabel.

### Curentul total

| Mărime | R                                                                       | C                                                                       | Total                                                                   | Unitate  |
|--------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------|
| E      |                                                                         |                                                                         | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$                                        | V        |
| I      | $68,62\text{m} + j364,06\text{m}$<br>$370,5\text{m} \angle 79,32^\circ$ | $68,62\text{m} + j364,06\text{m}$<br>$370,5\text{m} \angle 79,32^\circ$ | $68,62\text{m} + j364,06\text{m}$<br>$370,5\text{m} \angle 79,32^\circ$ | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$                                          | $0 - j26,52$<br>$26,52 \angle -90^\circ$                                | $5 - j26,52$<br>$26,99 \angle -79,32^\circ$                             | $\Omega$ |

rezistorului și a condensatorului.

Într-un circuit serie, curentul total este același prin toate componentele circuitului; prin urmare, valorile curentului din coloana „Total” pot fi trecute și în celelalte două coloane, a

### Căderile de tensiune pe rezistor și condensator

| Mărime | R                                                                        | C                                                                       | Total                                                                   | Unitate  |
|--------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------|
| E      | $343,11\text{m} + j364,06\text{m}$<br>$370,5\text{m} \angle 79,32^\circ$ | $68,62\text{m} + j364,06\text{m}$<br>$370,5\text{m} \angle 79,32^\circ$ | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$                                        | V        |
| I      | $68,62\text{m} + j364,06\text{m}$<br>$370,5\text{m} \angle 79,32^\circ$  | $68,62\text{m} + j364,06\text{m}$<br>$370,5\text{m} \angle 79,32^\circ$ | $68,62\text{m} + j364,06\text{m}$<br>$370,5\text{m} \angle 79,32^\circ$ | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$                                           | $0 - j26,52$<br>$26,52 \angle -90^\circ$                                | $5 - j26,52$<br>$26,99 \angle -79,32^\circ$                             | $\Omega$ |

Continuând analiza, putem aplica legea lui Ohm ( $E = IR$ ) vertical, pentru determinarea căderilor de tensiune pe rezistor și condensator.

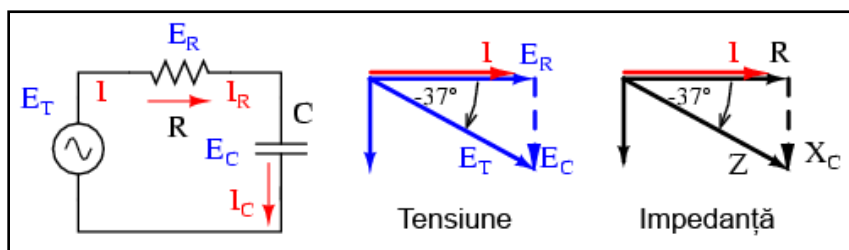
Observați faptul că tensiunea și curentul prin rezistor au același unghi de fază, ceea ce înseamnă că E și I sunt în fază în cazul rezistorului. Tensiunea la bornele condensatorului are un unghi de fază de  $-10.675^\circ$ , cu exact  $90^\circ$  mai puțin decât unghiul de fază al curentului din circuit. Acest lucru ne spune că tensiunea și curentul condensatorului sunt defazate cu exact  $90^\circ$  între ele (în cazul condensatorului!).

### Indicația instrumentelor de măsură

Din nou, trebuie să insistăm pe faptul că valorile calculate ce corespund cu măsurătorile reale luate de aparatele de măsură, sunt cele sub formă polară, nu rectangulară! De exemplu, dacă am construi fizic acest circuit rezistiv-capacitiv (R-C) și am măsura tensiunea la bornele rezistorului, voltmetrul ar indica 1,8523 V, nu 343,11 mV (termenul real rectangular) și nici 1,8203 V (termenul imaginar rectangular). Instrumentele reale de măsură, conectate la circuite reale indică lungimea vectorului (amplitudinea).

Notăția rectangulară, deși este mai ușor de folosit pentru operațiile aritmetice de adunare și scădere, este o formă de notație mai abstractă decât forma polară pentru măsurătorile reale. Dacă ar fi să folosim doar o singură notație, cea mai bună alegere ar fi cea polară, pentru că este singura ce are legătură directă cu măsurătorile reale.

## Diagrama impedanței



Impedanța ( $Z$ ) unui circuit serie R-L poate fi calculată cunoscând rezistența ( $R$ ) și reactanța inductivă ( $X_L$ ). Din moment ce  $E = IR$ ,  $E = IX_L$  și  $E = IZ$ , rezistența, reactanța și impedanța sunt

proporționale cu tensiunea. Prin urmare, diagrama fazorială a tensiunii poate fi înlocuită cu o diagramă similară a impedanței.

## Problemă

Găsiți impedanță unui circuit serie format dintr-un rezistor de  $40 \Omega$  și un condensator de  $88.42 \text{ mF}$  la frecvența de  $60 \text{ Hz}$ .

**Răspuns:**  $Z = 40 - j30 = 50 \angle 36.87^\circ$ .

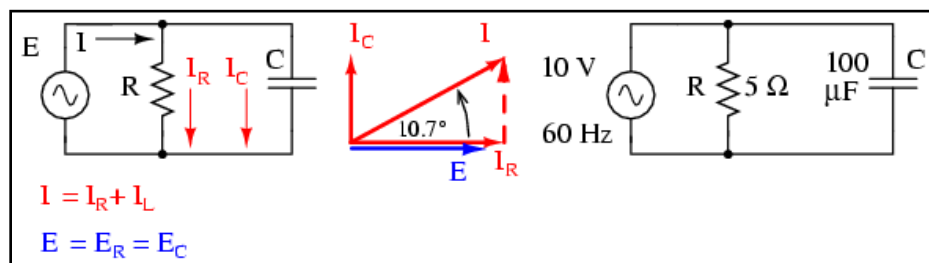
## 3. Circuite rezistiv-capacitive paralel

- În circuitele paralel, impedanțele ( $Z$ ) se comportă precum rezistențele ( $R$ ) în paralel: valoarea totală a impedanței este mai mică decât valoarea fiecărei impedanțe luate individual, folosind formula echivalentă. Atenție, efectuați toate calculele sub formă complexă, nu scalară!  

$$Z_{\text{Total}} = 1 / (1 / Z_1 + 1 / Z_2 + \dots 1 / Z_n)$$
- Legea lui Ohm pentru circuitele de curent alternativ:  $E = IZ$  ;  $I = E / Z$  ;  $Z = E / I$
- Atunci când în circuit sunt conectați rezistori și condensatoare în paralel, unghiul de fază al impedanței totale va fi între  $0^\circ$  și  $-90^\circ$ . Curentul din circuit va avea un unghi de fază între  $0^\circ$  și  $+90^\circ$

- Circuitele paralel în curent alternativ au aceleași proprietăți fundamentale ca și circuitele de curent continuu: tensiunea este aceeași în întreg circuitul (pe fiecare component), curentul total este suma curenților de ramură iar impedanța totală este mai mică decât fiecare dintre impedanțele individuale luate separat (cu ajutorul formulei echivalente)

## Circuit rezistiv-capacitiv paralel



Folosind aceleași valori, vom conecta rezistorul și condensatorul în paralel, și vom trece la analiza acestuia folosind metoda tabelului.

## Analiza circuitului

### Valorile inițiale

| Mărime | R                              | C                                        | Total                            | Unitate  |
|--------|--------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|----------|
| E      |                                |                                          | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | V        |
| I      |                                |                                          |                                  | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$ | $0 - j26,52$<br>$26,52 \angle -90^\circ$ |                                  | $\Omega$ |

Întrucât sursa de tensiune are aceeași frecvență ca și în cazul circuitului serie, iar rezistorul și condensatorul au aceleași valori ale rezistenței, respectiv capacității, valorile impedanțelor trebuie să fie aceleași. Prin urmare, putem începe completarea tabelului cu valorile cunoscute.

### Căderile de tensiune pe rezistor și condensator

| Mărime | R                                | C                                        | Total                            | Unitate  |
|--------|----------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|----------|
| E      | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$         | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | V        |
| I      |                                  |                                          |                                  | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$   | $0 - j26,52$<br>$26,52 \angle -90^\circ$ |                                  | $\Omega$ |

Fiind un circuit paralel, știm faptul că tensiunea este aceeași pe fiecare dintre componente, prin urmare, putem introduce tensiunea totală ( $10 \text{ V} \angle 0^\circ$ ) pe toate coloanele.

### Curenții prin rezistor și condensator

| Mărimă | R                                | C                                           | Total                            | Unitate  |
|--------|----------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|----------|
| E      | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$            | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | V        |
| I      | $2 + j0$<br>$2 \angle 0^\circ$   | $0 + j376,99m$<br>$376,99m \angle 90^\circ$ |                                  | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$   | $0 - j26,52$<br>$26,52 \angle -90^\circ$    |                                  | $\Omega$ |

Acum putem aplica legea lui Ohm vertical ( $I = E / Z$ ) pentru cele două coloane din tabel, calculând curentul prin rezistor, respectiv condensator.

### Curentul total

| Mărimă | R                                | C                                           | Total                                       | Unitate  |
|--------|----------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|----------|
| E      | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$            | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$            | V        |
| I      | $2 + j0$<br>$2 \angle 0^\circ$   | $0 + j376,99m$<br>$376,99m \angle 90^\circ$ | $2 + j376,99m$<br>$2,03 \angle 10,67^\circ$ | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$   | $0 - j26,52$<br>$26,52 \angle -90^\circ$    |                                             | $\Omega$ |

Asemenea circuitelor de curent continuu, curentul total este suma curenților de ramură (legea lui Kirchhoff pentru curent).

### Impedanța totală

| Mărimă | R                                | C                                           | Total                                           | Unitate  |
|--------|----------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|
| E      | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$ | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$            | $10 + j0$<br>$10 \angle 0^\circ$                | V        |
| I      | $2 + j0$<br>$2 \angle 0^\circ$   | $0 + j376,99m$<br>$376,99m \angle 90^\circ$ | $2 + j376,99m$<br>$2,03 \angle 10,67^\circ$     | A        |
| Z      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$   | $0 - j26,52$<br>$26,52 \angle -90^\circ$    | $4,82 - j910,14m$<br>$4,91 \angle -10,67^\circ$ | $\Omega$ |

Impedanța totală poate fi calculată folosind legea lui Ohm ( $Z = E / I$ ), vertical, pe coloana „Total”.

### Impedanța paralelă

După cum am mai văzut, impedanța paralelă poate fi calculată folosind o formulă echivalentă cu cea folosită pentru calcularea rezistenței totale paralele. Trebuie amintit faptul că această regulă a impedanței paralele se aplică indiferent de tipul impedanțelor ce le avem în paralel. Cu alte cuvinte, nu contează dacă avem circuite compuse exclusiv din rezistori paraleli, bobine paralele, condensatoare paralele sau orice alt tip de combinație între cele trei; sub forma impedanței ( $Z$ ), toți termenii sunt comuni și pot fi aplicați uniform în aceeași formulă:

$$Z_{paralel} = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}}$$



Singurul dezavantaj al acestei ecuații este volumul mare de muncă necesar pentru a efectua calculele matematice. Dar, indiferent de metoda ce o aplicăm pentru calcularea impedanței paralel din circuitul de mai sus (fie folosind legea lui Ohm, fie formula echivalentă), rezultatul este identic.

## 05 - Reactanța și impedanța RLC

### 1. Rezistența (R), reactanța (X) și impedanța (Z) - recapitulare

- Unghiul de fază al impedanței reprezintă diferența de fază dintre căderea de tensiune la bornele unui component și curentul prin acesta

Înainte de a începe să explorăm efectele rezistorilor, bobinelor și a condensatoarelor conectate împreună în același circuit de curent alternativ, să recapitulăm mai întâi câteva noțiuni de bază.

#### Rezistența (R)

Rezistența este de fapt frecarea întâmpinată de electroni, atunci când aceștia se află în mișcare. Toate materialele conductoare posedă o anumită rezistență (excepție făcând materialele supraconductoare), în special rezistorii. Atunci când curentul alternativ întâmpină o rezistență, căderea de tensiune și curentul prin aceasta sunt în fază. Simbolul matematic pentru rezistență este „R”, iar unitatea de măsură este Ohm-ul ( $\Omega$ ).

#### Reactanța (X)

Reactanța este de fapt inerția întâmpinată de electroni, atunci când aceștia se află în mișcare. Este prezentă peste tot unde există câmpuri electrice sau magnetice datorită tensiunii sau curentului aplicat, dar în special în condensatoare și bobine. Atunci când curentul alternativ întâmpină o reactanță, căderea de tensiune și curentul prin aceasta sunt defazate cu  $90^\circ$ . Simbolul matematic pentru reactanță este „X”, iar unitatea de măsură este Ohm-ul ( $\Omega$ ).

#### Impedanța (Z)

Impedanța este o expresie completă a tuturor formelor de opoziție întâmpinate de electroni, atunci când aceștia se află în mișcare, și include efectele rezistenței cât și a reactanței. Este prezentă în toate circuitele și în toate componentele. Atunci când curentul alternativ întâmpină o impedanță, căderea de tensiune și curentul prin aceasta sunt defazate cu un unghi între  $0^\circ$  și  $90^\circ$ . Simbolul matematic al impedanței este „Z”, iar unitatea de măsură este Ohm-ul ( $\Omega$ ), sub formă complexă.

#### Componente ideale

Rezistorii perfecți posedă doar rezistență, nu și reactanță. Bobinele și condensatoarele perfecte posedă doar reactanță, nu și rezistență. Toate componentele posedă impedanță, și, datorită acestei proprietăți universale a componentelor, este normal să exprimăm (traducem) valorile tuturor componentelor (rezistență, inductanță și capacitate) sub un termen comun, cel al impedanței, ca prim pas în analiza oricărui circuit de curent alternativ:

|                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rezistor</b> 100 $\Omega$<br> $R = 100 \Omega$<br>$X = 0 \Omega$<br>$Z = 100 \Omega \angle 0^\circ$ | <b>Bobină</b> 100 mH<br>159.15 Hz<br> $R = 0 \Omega$<br>$X = 100 \Omega$<br>$Z = 100 \Omega \angle 90^\circ$ | <b>Cond.</b> 10 $\mu F$<br>159.15 Hz<br> $R = 0 \Omega$<br>$X = 100 \Omega$<br>$Z = 100 \Omega \angle -90^\circ$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## Unghiul de fază al impedanței

Unghiul de fază al impedanței pentru fiecare component este diferența de fază dintre căderea de tensiune la bornele dispozitivului și curentul prin acesta.

### Rezistor

În cazul unui rezistor perfect, căderea de tensiune și curentul sunt tot timpul în fază, prin urmare, unghiul de fază al impedanței rezistorului (impedanța rezistivă) este  $0^\circ$ .

### Bobină

Pentru o bobină perfectă, căderea de tensiune este tot timpul defazată înaintea curentului cu  $90^\circ$ , prin urmare, unghiul de fază al impedanței bobinei (impedanța inductivă) este  $+90^\circ$ .

### Condensator

Pentru un condensator perfect, căderea de tensiune este tot timpul defazată în urma curentului cu  $90^\circ$ , prin urmare, unghiul de fază al impedanței condensatorului (impedanța capacitivă) este  $-90^\circ$ .

## Legile lui Ohm și Kirchhoff în curent alternativ

Toate mărimile sunt exprimate sub formă complexă, nu scalară:

$$E = IZ; \quad I = \frac{E}{Z}; \quad Z = \frac{E}{I}$$

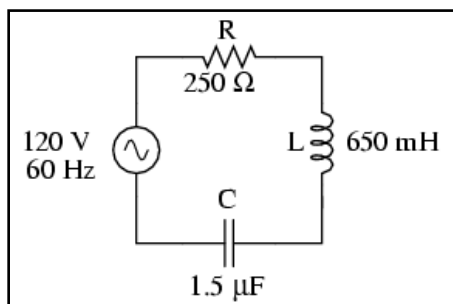
Impedanțele în curent alternativ se comportă analog rezistențelor în curent continuu: se adună când sunt conectate în serie și se micșorează în paralel. Legea lui Ohm pentru circuitele de curent alternativ, bazată pe impedanță, nu pe rezistență, arată conform figurii alăturată.

Legile lui Kirchhoff, precum și toate metodele de analiză a rețelilor și toate teoremele valabile pentru curent continuu sunt valabile și în curent alternativ, atâta timp când valorile sunt exprimate sub formă complexă și nu scalară. Cu toate că această echivalență poate fi greu de aplicat aritmetic, conceptual, ea este simplă și elegantă. Singura diferență reală între circuitele de curent continuu și alternativ este cea legată de calcularea puterii. Deoarece reactanța nu disipă putere precum o face rezistența, conceptul de putere în circuitele de curent alternativ este radical diferit față de cele de curent alternativ.

## 2. Circuite RLC serie

- Cu toate că impedanțele în serie se adună, impedanța totală pentru un circuit ce conține atât bobine cât și condensatoare poate să fie mai mică decât impedanțele individuale, datorită faptului că impedanțele inductive și capacitive tind să se anuleze reciproc atunci când sunt conectate în serie. Acest lucru poate duce la căderi de tensiune pe componente mai mari decât tensiunea sursei de alimentare

### Circuit RLC serie



Să considerăm circuitul RLC serie alăturat.

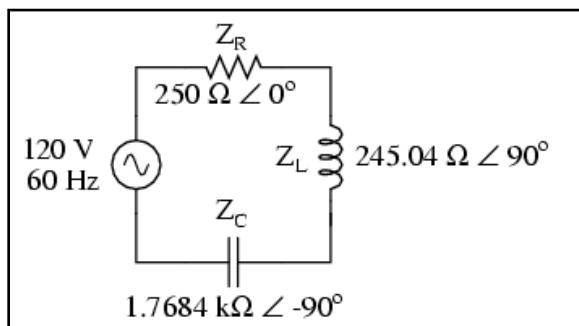
### Reactanța bobinei și a condensatorului

Primul pas este determinarea reactanțelor pentru bobină și condensator:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 650 \text{ mH} = 245,04 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 1,5 \mu\text{F}} = 1,76 \text{ k}\Omega$$

### Impedanțele componentelor



Următorul pas constă în exprimarea tuturor rezistențelor și reactanțelor într-o formă matematică comună: impedanța. Țineți minte că reactanța inductivă (reactanța bobinei) se traduce printr-o impedanță imaginară pozitivă (+90°), iar reactanța capacitivă (reactanța condensatorului) se traduce printr-o impedanță imaginară negativă (-90°). Rezistența, desigur, este considerată o impedanță „reală” pură (unghi polar de 0°).

Formulele de calcul arată astfel:

$$Z_R = 250 + j0 \, \Omega \text{ sau } 250 \, \Omega \angle 0^\circ$$

$$Z_L = 0 + j245,04 \, \Omega \text{ sau } 245,04 \, \Omega \angle 90^\circ$$

$$Z_C = 0 - j0,17 \, \Omega \text{ sau } 0,17 \, \Omega \angle -90^\circ$$

## Rezolvarea circuitului

### Valorile inițiale

| Mărime | R                    | L                           | C                          | Total                | Unitate |
|--------|----------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------|
| E      |                      |                             |                            | 120 + j0<br>120 ∠ 0° | V       |
| I      |                      |                             |                            |                      | A       |
| Z      | 250 + j0<br>250 ∠ 0° | 0 + j245,04<br>245,04 ∠ 90° | 0 - j1,76k<br>1,76k ∠ -90° |                      | Ω       |

După ce toate valorile opoziției față de curent au fost exprimate sub forma comună a impedanței, ca și numere complexe, acestea pot fi manipulate la fel ca rezistențele în curent continuu. Putem scrie toate valorile cunoscute într-un tabel, și apoi să rezolvăm mai departe acest circuit.

### Impedanța totală

Circuitul de mai sus fiind unul serie, știm că impedanța totală este egală cu suma impedanțelor individuale:

$$Z_{total} = Z_R + Z_L + Z_C$$

$$Z_{total} = (250 + j0 \, \Omega) + (0 + j245,04 \, \Omega) + (0 - j1,76 \, k\Omega)$$

$$Z_{total} = 250 - j1,52 \, k\Omega \text{ sau } 1,54 \, k\Omega \angle -80,68^\circ$$

| Mărime | R                                  | L                                         | C                                        | Total                                                                             | Unitate  |
|--------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| E      |                                    |                                           |                                          | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$                                                | V        |
| I      |                                    |                                           |                                          |                                                                                   | A        |
| Z      | $250 + j0$<br>$250 \angle 0^\circ$ | $0 + j245,04$<br>$245,04 \angle 90^\circ$ | $0 - j1,76k$<br>$1,76k \angle -90^\circ$ | <b><math>250 - j1,52k</math></b><br><b><math>1,54k \angle -80,68^\circ</math></b> | $\Omega$ |

Introducând valoarea impedanței totale în tabel, obținem tabelul alăturat.

### Curentul total

| Mărime | R                                  | L                                         | C                                        | Total                                                                                | Unitate  |
|--------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| E      |                                    |                                           |                                          | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$                                                   | V        |
| I      |                                    |                                           |                                          | <b><math>12,58m + j76,7m</math></b><br><b><math>77,73m \angle 80,68^\circ</math></b> | A        |
| Z      | $250 + j0$<br>$250 \angle 0^\circ$ | $0 + j245,04$<br>$245,04 \angle 90^\circ$ | $0 - j1,76k$<br>$1,76k \angle -90^\circ$ | $250 - j1,52k$<br>$1,54k \angle -80,68^\circ$                                        | $\Omega$ |

Putem acum aplica legea lui Ohm ( $I = E / Z$ ), vertical, în coloana „Total” pentru a găsi curentul total din circuit.

### Curentul prin fiecare dintre componente

| Mărime | R                                                                                    | L                                                                                    | C                                                                                    | Total                                                                                | Unitate  |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| E      |                                                                                      |                                                                                      |                                                                                      | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$                                                   | V        |
| I      | <b><math>12,58m + j76,7m</math></b><br><b><math>77,73m \angle 80,68^\circ</math></b> | <b><math>12,58m + j76,7m</math></b><br><b><math>77,73m \angle 80,68^\circ</math></b> | <b><math>12,58m + j76,7m</math></b><br><b><math>77,73m \angle 80,68^\circ</math></b> | <b><math>12,58m + j76,7m</math></b><br><b><math>77,73m \angle 80,68^\circ</math></b> | A        |
| Z      | $250 + j0$<br>$250 \angle 0^\circ$                                                   | $0 + j245,04$<br>$245,04 \angle 90^\circ$                                            | $0 - j1,76k$<br>$1,76k \angle -90^\circ$                                             | $250 - j1,52k$<br>$1,54k \angle -80,68^\circ$                                        | $\Omega$ |

Fiind un circuit serie, curentul trebuie să fie același prin toate componentele.

### Căderile de tensiune pe fiecare component

| Mărime | R                                                                                 | L                                                                                   | C                                                                                 | Total                                            | Unitate  |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------|
| E      | <b><math>3,14 + j19,17</math></b><br><b><math>19,43 \angle 80,68^\circ</math></b> | <b><math>-18,79 + j3,08</math></b><br><b><math>19,04 \angle 170,68^\circ</math></b> | <b><math>120 + j22,26</math></b><br><b><math>137,46 \angle -9,31^\circ</math></b> | $135,65 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$            | V        |
| I      | $12,58m + j76,7m$<br>$77,73m \angle 80,68^\circ$                                  | $12,58m + j76,7m$<br>$77,73m \angle 80,68^\circ$                                    | $12,58m + j76,7m$<br>$77,73m \angle 80,68^\circ$                                  | $12,58m + j76,7m$<br>$77,73m \angle 80,68^\circ$ | A        |
| Z      | $250 + j0$<br>$250 \angle 0^\circ$                                                | $0 + j245,04$<br>$245,04 \angle 90^\circ$                                           | $0 - j1,76k$<br>$1,76k \angle -90^\circ$                                          | $250 - j1,52k$<br>$1,54k \angle -80,68^\circ$    | $\Omega$ |

Putem aplica acum legea lui Ohm ( $E = IZ$ ) fiecărui component în parte, pentru determinarea căderilor de tensiune.

### Observații

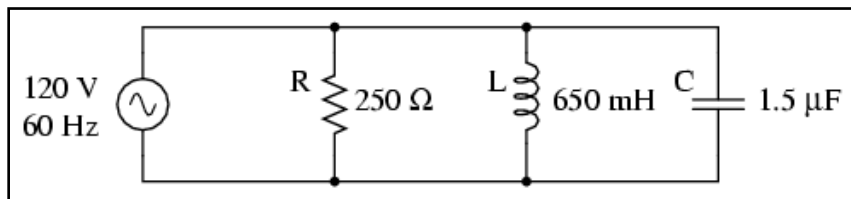
Putem observa ceva aparent ciudat în acest caz: cu toate că tensiunea sursei de alimentare este de doar 120 V, tensiunea la bornele condensatorului este de 137,46 V! De ce se întâmplă acest lucru? Răspunsul se află în interacțiunea dintre reactanțele inductive și capacitive. Exprimată ca și impedanță, putem vedea că bobina se opune trecerii curentului într-un mod exact invers față de condensator. Exprimată sub formă rectangulară, impedanță bobinei posedă un termen imaginar pozitiv, iar condensatorul un termen imaginar negativ. Când aceste două impedanțe contrare sunt adunate (în serie), ele tind să se anuleze reciproc! Cu toate că ele se adună, suma lor este de fapt mai mică decât oricare dintre impedanțe (inductive sau capacitive) considerate separat. Acest lucru este analog sumei dintre un scalar pozitiv și unul negativ.

Dacă impedanța totală într-un circuit serie ce conține atât elemente inductive cât și capacitive, pe lângă cele rezistive (RLC), este mai mică decât impedanța individuală a oricărui element luat separat, atunci curentul total din circuit trebuie să fie mai mare decât curentul rezultat în cazul în care doar componenta capacitivă sau inductivă ar fi introduse în circuit. Odată cu apariția acestui curent prin fiecare element, mai mare decât în mod normal, pot apărea căderi de tensiune mai mari decât tensiunea sursei de alimentare, pe anumite elemente din circuit!

### 3. Circuite RLC paralel

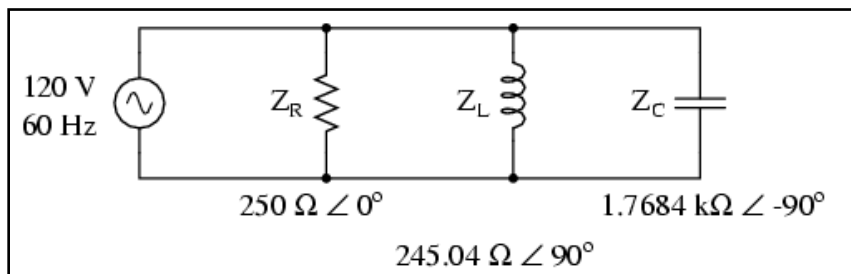
- Analiza circuitelor paralel în curent alternativ este similară analizei circuitelor paralel din curent continuu. Singura diferență majoră constă în faptul că toate valorile și calculele se realizează sub formă complexă, nu scalară

#### Circuit RLC paralel



Putem folosi aceleași componente de la circuitul serie, dar conectate în paralel de această dată.

#### Valorile impedanțelor individuale



Faptul că aceste componente sunt conectate în paralel și nu în serie, nu are absolut niciun efect asupra impedanțelor individuale. Atâta timp cât frecvența sursei de tensiune este aceeași, reactanțele inductive și capacitive nu se vor modifica deloc.

#### Rezolvarea circuitului

### Valorile inițiale

| Mărime | R                                  | L                                         | C                                        | Total                              | Unitate  |
|--------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|----------|
| E      |                                    |                                           |                                          | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$ | V        |
| I      |                                    |                                           |                                          |                                    | A        |
| Z      | $250 + j0$<br>$250 \angle 0^\circ$ | $0 + j245,04$<br>$245,04 \angle 90^\circ$ | $0 - j1,76k$<br>$1,76k \angle -90^\circ$ |                                    | $\Omega$ |

După ce am exprimat valorile tuturor componentelor ca și impedanțe (Z), putem începe analiza circuitului prin completarea tabelului, folosind regulile circuitelor serie de data aceasta.

### Căderea de tensiune pe fiecare dintre componente

| Mărime | R                                  | L                                         | C                                        | Total                              | Unitate  |
|--------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|----------|
| E      | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$ | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$        | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$       | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$ | V        |
| I      |                                    |                                           |                                          |                                    | A        |
| Z      | $250 + j0$<br>$250 \angle 0^\circ$ | $0 + j245,04$<br>$245,04 \angle 90^\circ$ | $0 - j1,76k$<br>$1,76k \angle -90^\circ$ |                                    | $\Omega$ |

Știind că într-un circuit paralel, căderea de tensiune este aceeași pe toate componentele, putem trece valoarea tensiunii totale în fiecare coloană.

### Curentul prin fiecare dintre componente

| Mărime | R                                    | L                                            | C                                         | Total                              | Unitate  |
|--------|--------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|----------|
| E      | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$   | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$           | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$        | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$ | V        |
| I      | $480m + j0$<br>$480m \angle 0^\circ$ | $0 - j489,71m$<br>$489,71m \angle -90^\circ$ | $0 + j67,85m$<br>$67,85m \angle 90^\circ$ |                                    | A        |
| Z      | $250 + j0$<br>$250 \angle 0^\circ$   | $0 + j245,04$<br>$245,04 \angle 90^\circ$    | $0 - j1,76k$<br>$1,76k \angle -90^\circ$  |                                    | $\Omega$ |

Acum putem aplica legea lui Ohm ( $I = E / Z$ ) vertical, pe fiecare coloană, pentru determinarea curentului prin fiecare component.

### Curentul și impedanța totală

Există două strategii pentru calcularea curentului și a impedanței totale. Prima presupune calcularea impedanței totale din impedanțele individuale conectate în paralel folosind formula echivalentă:

$$Z_{total} = \frac{1}{\frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_C}}$$

iar curentul total ca raport dintre tensiunea sursei de alimentare și impedanța totală ( $I = E / Z$ ). Totuși, rezolvarea ecuației presupune un calcul dificil cu numere complexe.



| Mărimă | R                     | L                             | C                          | Total                                              | Unitate |
|--------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------|---------|
| E      | 120 + j0<br>120 ∠0°   | 120 + j0<br>120 ∠0°           | 120 + j0<br>120 ∠0°        | 120 + j0<br>120 ∠0°                                | V       |
| I      | 480m + j0<br>480m ∠0° | 0 - j489,71m<br>489,71m ∠-90° | 0 + j67,85m<br>67,85m ∠90° | <b>480m - j421,85m</b><br><b>639,03m ∠-41,31°</b>  | A       |
| Z      | 250 + j0<br>250 ∠0°   | 0 + j245,04<br>245,04 ∠90°    | 0 - j1,76k<br>1,76k ∠-90°  | <b>141,05 + j123,96m</b><br><b>187,79m ∠41,31°</b> | Ω       |

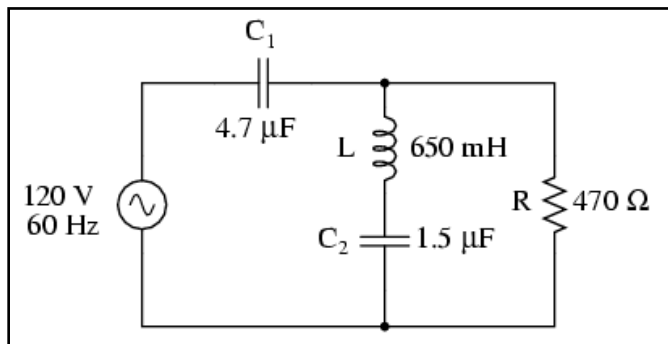
A doua metodă de calcul presupune aflarea curentului total ca sumă a curenților de ramură, iar apoi, folosind legea lui Ohm, putem determina impedanța totală ca raport dintre tensiunea sursei de alimentare și curentul total ( $Z = E / I$ ). Rezultatul final trebuie să fie același

în ambele cazuri.

#### 4. Circuite RLC serie-paralel

- Analiza circuitelor serie-paralel în curent alternativ este similară analizei circuitelor serie-paralel din curent continuu. Singura diferență majoră constă în faptul că toate valorile și calculele se realizează sub formă complexă, nu scalară
- Este important de ținut minte ca înainte de simplificarea circuitului serie-paralel, trebuie să determinăm impedanțele (Z) fiecărui component, rezistor, bobină sau condensator. În acest fel, valorile tuturor componentelor vor fi exprimate sub aceeași formă (Z) și se evită astfel amestecarea rezistențelor (R) cu inductanțe (L) și capacități (C)

##### Circuit RLC serie-paralel



Să luăm ca și exemplu circuitul RLC serie-paralel alăturat.

##### Impedanțele individuale ale componentelor

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 4,7 \mu\text{F}} = 564,38 \Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 1,5 \mu\text{F}} = 1,76 \text{ k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 650 \text{ mH} = 245,04 \Omega$$

$$R = 470 \, \Omega$$

Primul pas este determinarea valorilor impedanțelor (Z) pentru toate componentele, în funcție de frecvența sursei de alimentare. Pentru a realiza acest lucru, trebuie mai întâi să determinăm valorile reactanțelor (X) bobinelor și condensatoarelor iar apoi să exprimăm reactanțele (X) și rezistențele (R) sub formă de impedanțe (Z).

Formulele de calcul sunt următoarele:

$$Z_{C1} = 0 - j564,38 \, \Omega \text{ sau } 564,38 \, \Omega \angle -90^\circ$$

$$Z_{C2} = 0 - j1,76 \, k\Omega \text{ sau } 1,76 \, k\Omega \angle -90^\circ$$

$$Z_L = 0 + j245,04 \, \Omega \text{ sau } 245,04 \, \Omega \angle 90^\circ$$

$$Z_R = 470 + j0 \, \Omega \text{ sau } 470 \, \Omega \angle 0^\circ$$

## Rezolvarea circuitului

### Valorile inițiale

| Mărime | C <sub>1</sub>              | L                          | C <sub>2</sub>            | R                   | Total               | Unitate |
|--------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|---------|
| E      |                             |                            |                           |                     | 120 + j0<br>120 ∠0° | V       |
| I      |                             |                            |                           |                     |                     | A       |
| Z      | 0 - j564,38<br>564,38 ∠-90° | 0 + j245,04<br>245,04 ∠90° | 0 - j1,76k<br>1,76k ∠-90° | 470 + j0<br>470 ∠0° |                     | Ω       |

Putem acum să completăm valorile inițiale în tabel.

### Observație

Întrucât avem de a face în acest caz cu un circuit serie-paralel combinat, nu putem afla impedanța totală dintr-un singur pas. Prima dată luăm L și C<sub>2</sub> ca și combinație serie; impedanța combinată va fi suma impedanțelor individuale. Apoi, impedanța rezultată o vom combina în paralel cu impedanța rezistorului, rezultatul fiind o nouă impedanță. Și, în sfârșit, impedanța precedentă o combinăm în serie cu impedanța C<sub>1</sub> și ajungem la valoarea impedanței totale a circuitului considerat.

| Mărime | L -- C <sub>2</sub> | R // (L -- C <sub>2</sub> ) | (Total)<br>C <sub>1</sub> -- [R // (L -- C <sub>2</sub> )] | Unitate |
|--------|---------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|---------|
| E      |                     |                             |                                                            | V       |
| I      |                     |                             |                                                            | A       |
| Z      |                     |                             |                                                            | Ω       |

Pentru a putea reprezenta toți acești pași sub format tabelar, va trebui să mai adăugăm câteva coloane (folosim de fapt un al doilea tabel din motive de spațiu), fiecare coloană reprezentând combinația respectivă.

### Impedanțele combinate

| Mărime | $L \text{ -- } C_2$                      | $R // (L \text{ -- } C_2)$                         | (Total)<br>$C_1 \text{ -- } [R // (L \text{ -- } C_2)]$ | Unitate  |
|--------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------|
| E      |                                          |                                                    | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$                      | V        |
| I      |                                          |                                                    |                                                         | A        |
| Z      | $0 - j1,52k$<br>$1,52k \angle -90^\circ$ | $429,15 - j132,41$<br>$449,11 \angle -17,14^\circ$ | $429,15 - j696,72$<br>$818,34 \angle -58,37^\circ$      | $\Omega$ |

Calculul acestor impedanțe combinate necesită sume complexe pentru combinațiile serie și utilizarea formulei echivalente pentru impedanțele paralel.

Putem să renunțăm la coloana total din primul tabel, întrucât aceasta apare în cel de al doilea tabel.

### Curentul total

| Mărime | $L \text{ -- } C_2$                      | $R // (L \text{ -- } C_2)$                         | (Total)<br>$C_1 \text{ -- } [R // (L \text{ -- } C_2)]$ | Unitate  |
|--------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------|
| E      |                                          |                                                    | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$                      | V        |
| I      |                                          |                                                    | $76,89m + j124,86m$<br>$146,64m \angle 58,37^\circ$     | A        |
| Z      | $0 - j1,52k$<br>$1,52k \angle -90^\circ$ | $429,15 - j132,41$<br>$449,11 \angle -17,14^\circ$ | $429,15 - j696,72$<br>$818,34 \angle -58,37^\circ$      | $\Omega$ |

Cunoscând impedanța și tensiunea totală, putem aplica legea lui Ohm, vertical, pe coloana „Total” pentru calcularea curentului total.

### Curentul prin condensator și combinația serie paralel

| Mărime | $C_1$                                             | L                                         | $C_2$                                    | R                                  | Unitate  |
|--------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|----------|
| E      |                                                   |                                           |                                          |                                    | V        |
| I      | $76,89m + j124,86$<br>$146,64 \angle 58,37^\circ$ |                                           |                                          |                                    | A        |
| Z      | $0 - j564,38$<br>$564,38 \angle -90^\circ$        | $0 + j245,04$<br>$245,04 \angle 90^\circ$ | $0 - j1,76k$<br>$1,76k \angle -90^\circ$ | $470 + j0$<br>$470 \angle 0^\circ$ | $\Omega$ |

În acest moment, putem căuta componente sau combinații de componente ce au fie aceeași cădere de tensiune sau același curent. Iar în acest caz, atât prin  $C_1$  cât și prin combinația paralel  $R // (L \text{ -- } C_2)$  trece același curent, întrucât ele sunt în serie. Putem trece prin urmare aceste valori în

ambele coloane.

| Mărime | $L \text{ -- } C_2$                      | $R // (L \text{ -- } C_2)$                          | (Total)<br>$C_1 \text{ -- } [R // (L \text{ -- } C_2)]$ | Unitate  |
|--------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------|
| E      |                                          |                                                     | $120 + j0$<br>$120 \angle 0^\circ$                      | V        |
| I      |                                          | $76,89m + j124,86m$<br>$146,64m \angle 58,37^\circ$ | $76,89m + j124,86m$<br>$146,64m \angle 58,37^\circ$     | A        |
| Z      | $0 - j1,52k$<br>$1,52k \angle -90^\circ$ | $429,15 - j132,41$<br>$449,11 \angle -17,14^\circ$  | $429,15 - j696,72$<br>$818,34 \angle -58,37^\circ$      | $\Omega$ |

### Căderea de tensiune pe condensator și combinația serie paralel

| Mărimă | $C_1$                                                           | L                                  | $C_2$                             | R                           | Unitate  |
|--------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------|
| E      | <b>70,46 - j43,4</b><br><b>82,76 <math>\angle</math>-31,62°</b> |                                    |                                   |                             | V        |
| I      | 76,89m + j124,86<br>146,64 $\angle$ 58,37°                      |                                    |                                   |                             | A        |
| Z      | 0 - j564,38<br>564,38 $\angle$ -90°                             | 0 + j245,04<br>245,04 $\angle$ 90° | 0 - j1,76k<br>1,76k $\angle$ -90° | 470 + j0<br>470 $\angle$ 0° | $\Omega$ |

Acum putem calcula căderile de tensiune pe  $C_1$  și pe combinația serie-paralel R//(L-- $C_2$ ) folosind legea lui Ohm ( $E=IZ$ ), vertical.

| Mărimă | L -- $C_2$                        | R // (L -- $C_2$ )                                             | (Total)<br>$C_1$ -- [R // (L -- $C_2$ )]     | Unitate  |
|--------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------|
| E      |                                   | <b>49,53 + j43,4</b><br><b>65,85 <math>\angle</math>41,22°</b> | 120 + j0<br>120 $\angle$ 0°                  | V        |
| I      |                                   | 76,89m + j124,86m<br>146,64m $\angle$ 58,37°                   | 76,89m + j124,86m<br>146,64m $\angle$ 58,37° | A        |
| Z      | 0 - j1,52k<br>1,52k $\angle$ -90° | 429,15 - j132,41<br>449,11 $\angle$ -17,14°                    | 429,15 - j696,72<br>818,34 $\angle$ -58,37°  | $\Omega$ |

#### Căderea de tensiune pe rezistor și combinația serie

| Mărimă | $C_1$                                      | L                                  | $C_2$                             | R                                                              | Unitate  |
|--------|--------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------|
| E      | 70,46 - j43,4<br>82,76 $\angle$ -31,62°    |                                    |                                   | <b>49,53 + j43,4</b><br><b>65,85 <math>\angle</math>41,22°</b> | V        |
| I      | 76,89m + j124,86<br>146,64 $\angle$ 58,37° |                                    |                                   |                                                                | A        |
| Z      | 0 - j564,38<br>564,38 $\angle$ -90°        | 0 + j245,04<br>245,04 $\angle$ 90° | 0 - j1,76k<br>1,76k $\angle$ -90° | 470 + j0<br>470 $\angle$ 0°                                    | $\Omega$ |

Din nou, putem căuta componente ce au aceeași cădere de tensiune sau curent. În acest caz, rezistorul (R) și combinația serie a bobinei cu cel de al doilea condensator (L--C) au aceeași cădere de tensiune, pentru că cele două seturi de impedanțe sunt conectate în paralel. Astfel, putem

trece valorile tensiunii calculate mai sus în coloanele R și L-- $C_2$ .

| Mărimă | L -- $C_2$                                                     | R // (L -- $C_2$ )                           | (Total)<br>$C_1$ -- [R // (L -- $C_2$ )]     | Unitate  |
|--------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------|
| E      | <b>49,53 + j43,4</b><br><b>65,85 <math>\angle</math>41,22°</b> | 49,53 + j43,4<br>65,85 $\angle$ 41,22°       | 120 + j0<br>120 $\angle$ 0°                  | V        |
| I      |                                                                | 76,89m + j124,86m<br>146,64m $\angle$ 58,37° | 76,89m + j124,86m<br>146,64m $\angle$ 58,37° | A        |
| Z      | 0 - j1,52k<br>1,52k $\angle$ -90°                              | 429,15 - j132,41<br>449,11 $\angle$ -17,14°  | 429,15 - j696,72<br>818,34 $\angle$ -58,37°  | $\Omega$ |

#### Curentul prin rezistor și combinația serie

| Mărimă | C <sub>1</sub>                     | L                          | C <sub>2</sub>            | R                                                   | Unitate |
|--------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------|---------|
| E      | 70,46 - j43,4<br>82,76 ∠-31,62°    |                            |                           | 49,53 + j43,4<br>65,85 ∠41,22°                      | V       |
| I      | 76,89m + j124,86<br>146,64 ∠58,37° |                            |                           | <b>105,39m + j92,341m</b><br><b>140,12m ∠41,22°</b> | A       |
| Z      | 0 - j564,38<br>564,38 ∠-90°        | 0 + j245,04<br>245,04 ∠90° | 0 - j1,76k<br>1,76k ∠-90° | 470 + j0<br>470 ∠0°                                 | Ω       |

Următorul pas este calcularea curentului prin rezistor și prin combinația serie L--C<sub>2</sub>. Tot ceea ce trebuie să facem este să aplicăm legea lui Ohm (I=E/Z), vertical, în ambele coloane.

| Mărimă | L -- C <sub>2</sub>                               | R // (L -- C <sub>2</sub> )          | (Total)<br>C <sub>1</sub> -- [R // (L -- C <sub>2</sub> )] | Unitate |
|--------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------|
| E      | 49,53 + j43,4<br>65,85 ∠41,22°                    | 49,53 + j43,4<br>65,85 ∠41,22°       | 120 + j0<br>120 ∠0°                                        | V       |
| I      | <b>-28,49m + j32,51m</b><br><b>43,23 ∠131,22°</b> | 76,89m + j124,86m<br>146,64m ∠58,37° | 76,89m + j124,86m<br>146,64m ∠58,37°                       | A       |
| Z      | 0 - j1,52k<br>1,52k ∠-90°                         | 429,15 - j132,41<br>449,11 ∠-17,14°  | 429,15 - j696,72<br>818,34 ∠-58,37°                        | Ω       |

### Curentul prin bobină și condensator

Din moment ce L și C<sub>2</sub> sunt conectate în serie și cunoaștem curentul prin combinație serie a impedanței, putem trece aceleași valori și în coloanele L și C<sub>2</sub>, folosind regula conform căreia în circuitele serie, curentul prin fiecare component este același:

| Mărimă | C <sub>1</sub>                     | L                                                  | C <sub>2</sub>                                     | R                                     | Unitate |
|--------|------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------|---------|
| E      | 70,46 - j43,4<br>82,76 ∠-31,62°    |                                                    |                                                    | 49,53 + j43,4<br>65,85 ∠41,22°        | V       |
| I      | 76,89m + j124,86<br>146,64 ∠58,37° | <b>-28,49m + j32,51m</b><br><b>43,23m ∠131,22°</b> | <b>-28,49m + j32,51m</b><br><b>43,23m ∠131,22°</b> | 105,39m + j92,341m<br>140,12m ∠41,22° | A       |
| Z      | 0 - j564,38<br>564,38 ∠-90°        | 0 + j245,04<br>245,04 ∠90°                         | 0 - j1,76k<br>1,76k ∠-90°                          | 470 + j0<br>470 ∠0°                   | Ω       |

### Căderile de tensiune pe bobină și condensator

Ultimul pas constă în aplicarea legii lui Ohm (E = I Z), vertical, pentru calcularea căderilor de tensiune pentru cele două coloane rămase (L și C<sub>2</sub>):

| Mărimē | C <sub>1</sub>                     | L                                             | C <sub>2</sub>                                | R                                     | Unitate |
|--------|------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|---------|
| E      | 70,46 - j43,4<br>82,76 ∠-31,62°    | <b>-7,96 - j6,98</b><br><b>10,59 ∠221,22°</b> | <b>-57,5 + j50,38</b><br><b>76,45 ∠41,22°</b> | 49,53 + j43,4<br>65,85 ∠41,22°        | V       |
| I      | 76,89m + j124,86<br>146,64 ∠58,37° | -28,49m + j32,51m<br>43,23m ∠131,22°          | -28,49m + j32,51m<br>43,23m ∠131,22°          | 105,39m + j92,341m<br>140,12m ∠41,22° | A       |
| Z      | 0 - j564,38<br>564,38 ∠-90°        | 0 + j245,04<br>245,04 ∠90°                    | 0 - j1,76k<br>1,76k ∠-90°                     | 470 + j0<br>470 ∠0°                   | Ω       |

## 5. Susceptanța și admitanța

- Susceptanța reprezintă reciproca reactanței ( $1 / X$ ), simbolul matematic este  $B$ , iar unitatea sa de măsură este Siemens
- Admitanța reprezintă reciproca impedanței ( $1 / Z$ ), simbolul matematic este  $Y$ , iar unitatea sa de măsură este Siemens

### Rezistența și conductanța

În studiul circuitelor electrice de curent continuu am întâlnit termenul de conductanță; aceasta se definește ca inversul rezistenței. Matematic, aceasta reprezintă reciproca rezistenței,  $1 / R$ , termen ce în formula rezistenței paralel este chiar conductanța.

Pe când „rezistența” denotă cantitatea opoziției față de deplasarea electronilor, „conductanța” reprezintă ușurința de deplasare a electronilor. Unitatea de măsură pentru conductanță este Siemens, iar simbolul matematic, „ $G$ ”.

### Susceptanța

Componentele reactive, precum bobinele și condensatoarele, se opun trecerii curentului (deplasării electronilor) în funcție de timp și nu într-un mod constant, uniform, ca în cazul rezistorilor. Această opoziție în funcție de timp se numește reactanță, notată cu „ $X$ ” și măsurată de asemenea în Ohm.

La fel cum pentru rezistență există o mărime complementară, conductanța, și pentru expresia reactanței există o mărime complementară, denumită susceptanță. Matematic, susceptanța este inversa (reciproca) reactanței,  $1 / X$ . Simbolul matematic este „ $B$ ”, iar unitatea de măsură este tot Siemens.

### Admitanța

În aceeași ordine de idei, există și o mărime complementară pentru impedanță, admitanță. Matematic, admitanța este inversa impedanței,  $1/Z$ . Simbolul matematic este „ $Y$ ”, iar unitatea de măsură este Siemens. La fel ca și impedanța, admitanța este o cantitate complexă, nu scalară.

Chiar dacă în calculele uzuale nu vom întâlni prea des acești termeni, este bine de știut că aceștia există.

## 06 - Rezonanța

### 1. Pendulul electric

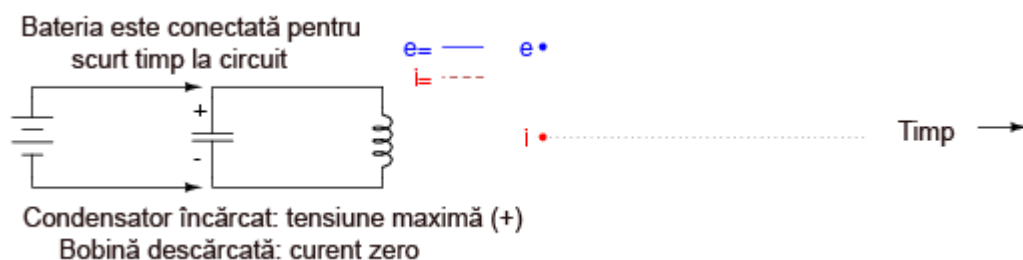
- Un condensator și o bobină conectate împreună formează un circuit oscilator, ce rezonază (oscilează) pe o anumită frecvență. La această frecvență, energia este transferată de la condensator spre bobină și invers sub formă de tensiune și curent alternativ defazate între ele cu  $90^\circ$
- Atunci când frecvența sursei de alimentare în curent alternativ este exact egală cu frecvența naturală de oscilație a circuitului LC, spunem că circuitul se află într-o stare de rezonanță

#### Scop

Condensatoarele stochează energie sub formă de câmp electric, iar această energie stocată se manifestă electric sub formă de potențial: tensiune statică. Bobinele stochează energie sub formă de câmp magnetic, iar această energie stocată se manifestă electric sub formă cinetică: curent. Ambele elemente sunt însă fețele opuse ale aceleiași monede; ambele sunt elemente reactive ce stochează și eliberează energie în două moduri complementare. Când aceste două tipuri de componente reactive sunt conectate împreună, rezultatul modului lor complementar de stocare a energiei este unul neobișnuit.

#### Descriere

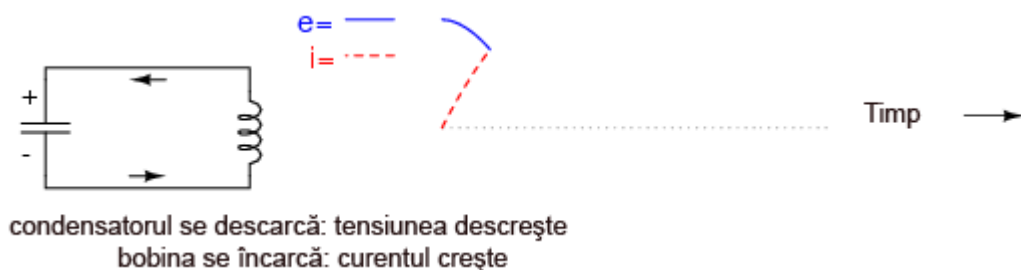
##### Condensator încărcat, bobină descărcată



Dacă unul dintre cele două componente, fie condensatorul, fie bobina, este inițial încărcat, cele două componente vor schimba energie între ele, de la unul la altul, creând propria lor tensiune și curent alternativ. Dacă presupunem că ambele componente sunt supuse unei tensiuni aplicate brusc (de la o baterie, de exemplu), condensatorul se va încărca foarte repede, iar bobina se va opune variației curentului; prin urmare condensatorul va fi încărcat, iar bobina descărcată.

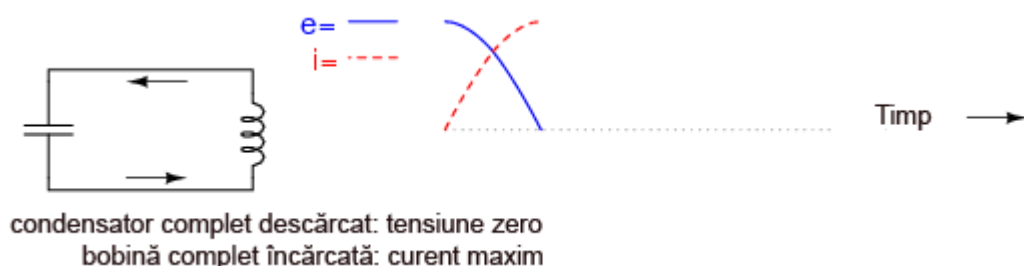
##### Descărcarea condensatorului și încărcarea bobinei





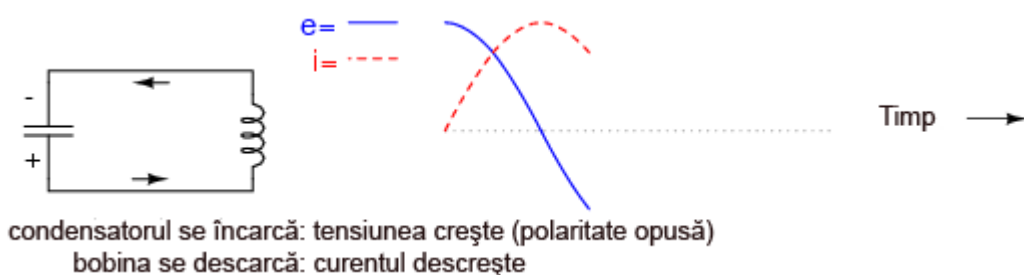
Condensatorul va începe să-și descarce energia înmagazinată pe bobină, prin urmare, tensiunea va descrește. Între timp, bobina va conduce curent electric și va înmagazina energie sub formă de câmp magnetic; rezultatul este creșterea curentului în circuit.

### Condensator descărcat, bobină încărcată



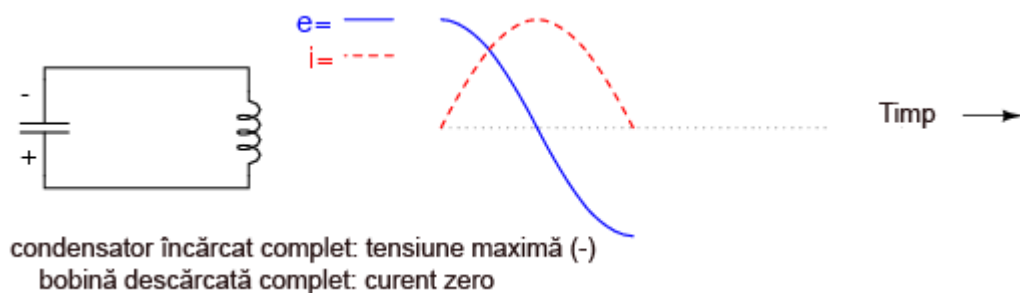
Bobina va continua să se încarce și să mențină curgerea electronilor în circuit până când condensatorul va fi complet descărcat (tensiune zero la bornele sale).

### Încărcarea condensatorului și descărcarea bobinei



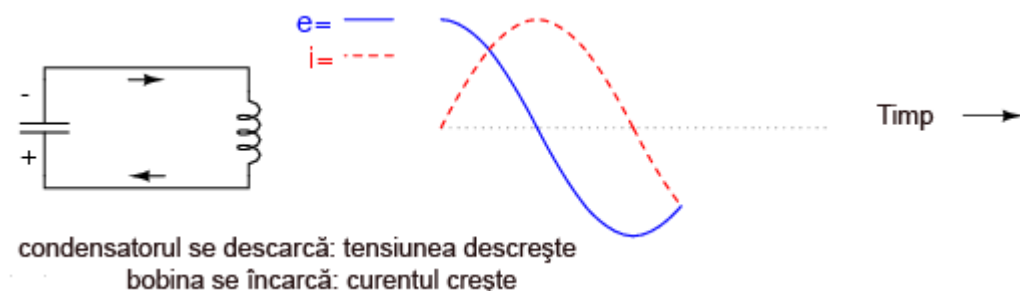
Bobina va menține curentul chiar și fără existența unei tensiuni aplicate la bornele sale; de fapt, va genera o tensiune (precum o baterie) pentru menținerea direcției curentului. Condensatorul, fiind elementul ce primește acest curent, va începe să acumuleze o sarcină de polaritate inversă față de polaritatea sa inițială.

### Condensator încărcat la polaritate inversă, bobina descărcată



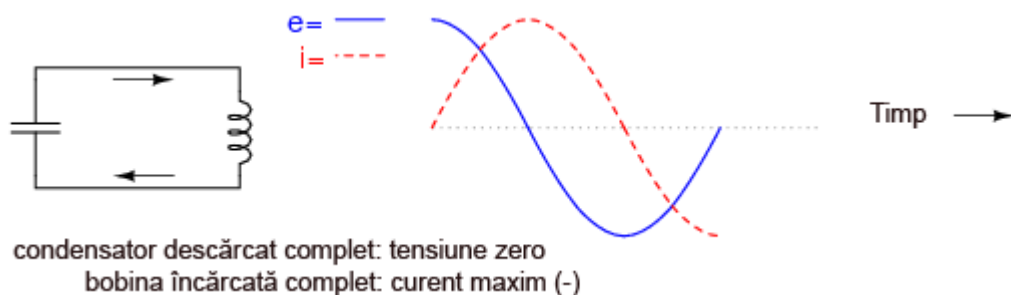
Atunci când curentul prin bobină se epuizează iar energia înmagazinată ajunge la zero, tensiunea condensatorului va fi maximă, și de polaritate opusă tensiunii inițiale.

### Descărcarea condensatorului și încărcarea bobinei



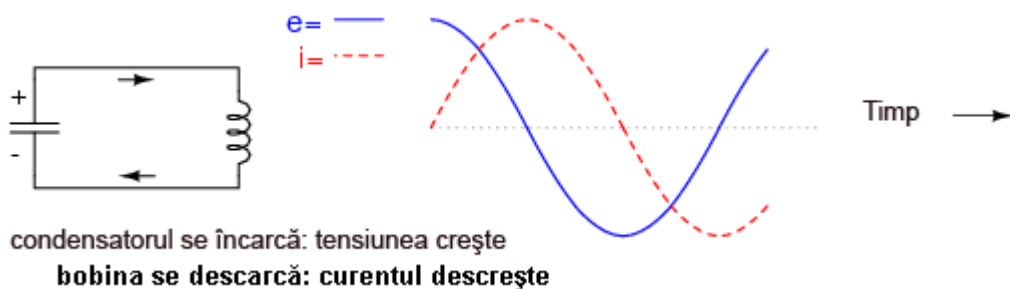
Am ajuns acum la o situație foarte similară celei inițiale: condensatorul este complet încărcat iar curentul prin circuit este zero (bobină descărcată). Condensatorul va începe (din nou) să se descarce prin/pe bobină, ducând la creșterea curentului (în direcție opusă față de cazul inițial) și descreșterea tensiunii pe măsură ce energia înmagazinată de condensator tinde spre zero.

### Condensator descărcat și bobina încărcată la un curent invers



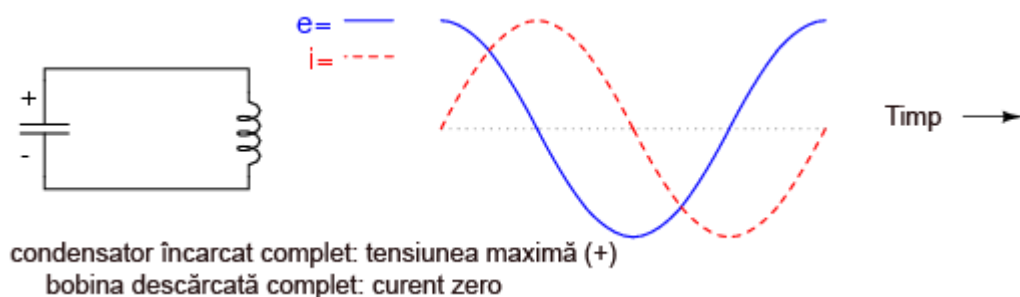
Într-un final, condensatorul se va descărca complet (zero volți), iar bobina va deveni încărcată complet (curent maxim).

### Condensatorul se încarcă și bobina se descarcă



Bobina, încercând să mențină direcția curentului, se va comporta din nou precum o sursă, generând tensiune electrică precum o baterie pentru menținerea acestuia. În acest fel, condensatorul va începe să se încarce din nou, iar amplitudinea curentului din circuit va descrește din nou.

### Condensator încărcat complet, bobina descărcată complet (situația inițială)



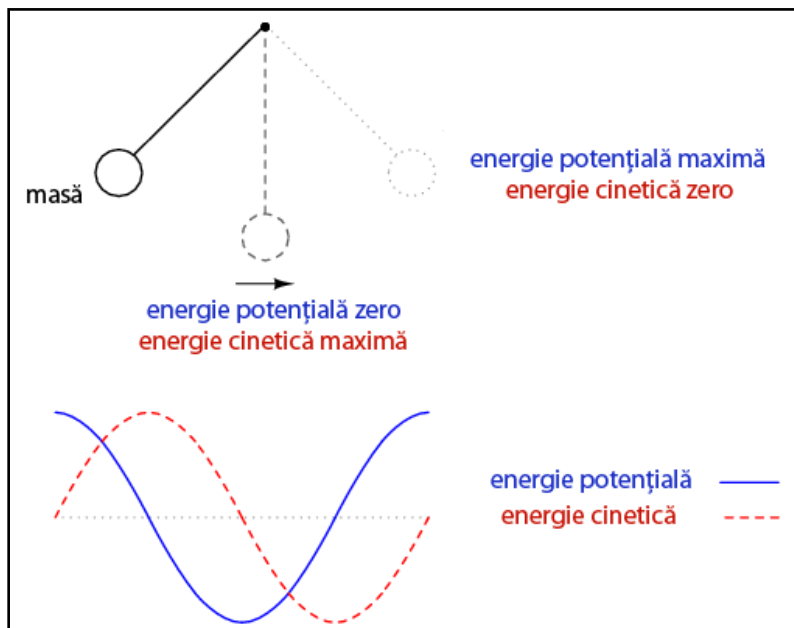
Până la urmă condensatorul se va încărca complet (din nou) pe măsură ce energia bobinei se apropie de zero. Tensiunea se va afla din nou la valoarea maximă pozitivă, iar curentul la zero. Acest ultim pas duce la completarea unei perioade pe parcursul cărei cele două componente au schimbat între ele aceeași energie electrică.

### Explicație

Această oscilație a energiei de la un component la altul va continua cu o amplitudine a semnalelor din ce în ce mai mică, descreștere datorată pierderilor de putere cauzate de rezistențele parazite din circuit, până când întregul proces se oprește cu totul. În mare, acest comportament este asemănător comportamentului pendulului: pe măsură ce masa pendulului oscilează înainte și înapoi, există o transformare continuă între energia cinetică (mișcare) și energia potențială (înălțime), asemănător circuitului format din bobină și condensator.

În punctul în care înălțimea pendulului este maximă, masa acestuia se oprește pentru o scurtă perioadă de timp, urmată de schimbarea direcției sale de mișcare. În acest punct, energia potențială este maximă iar energia cinetică este zero. Pe măsură ce masa oscilează înapoi, trece rapid printr-un punct în care coarda este direcționată perpendicular pe direcția pământului. În acest punct, energia potențială este zero iar energia cinetică este la valoarea sa maximă. Precum un circuit, oscilația înainte și înapoi a pendulului va continua cu o amplitudine a oscilațiilor din

ce în ce mai mică, descreștere datorată frecării cu aerul (rezistență) ce disipă energie. Tot precum în cazul circuitului de mai sus, poziția și viteza pendulului trasate pe un grafic (timp-amplitudine) conturează două unde sinusoidale defazate între ele cu  $90^\circ$ .



În fizică, această oscilație sinusoidală naturală este cunoscută sub numele de mișcare armonică simplă. Aceleași principii stau însă și la baza circuitelor formate din condensator și bobină, de genul celui văzut mai sus. O proprietate interesantă al oricărui tip de pendul, este că perioada sa depinde de lungimea brațului și nu de greutatea masei de la capătul acesteia.

De aceea pendulul va continua să oscileze la aceeași frecvență pe măsură ce amplitudinea oscilațiilor scade. Rata oscilațiilor este independentă de cantitatea de energie stocată în pendul.

Același lucru este valabil și pentru circuitul bobină/condensator. Rata oscilațiilor este strict dependentă de mărimea condensatorului și a bobinei, și nu de cantitatea de tensiune (sau curent) disponibilă în circuit. Proprietatea sa de a menține o singură frecvență, naturală, indiferent de valoarea energiei stocate, este de o mare importanță în realizarea circuitelor electrice.

## Frecvența naturală (de rezonanță)

Frecvența naturală reprezintă frecvența la care sistemul „vibrează” după ce acesta a fost pus în mișcare, fără să existe vreo intervenție din afara acestuia. Această frecvență mai poartă și numele de frecvență de rezonanță.

## Rezonanța

Dacă frecvența sursei de alimentare a circuitului este exact frecvență naturală de oscilație a combinației LC, spunem că circuitul se află într-o stare de rezonanță. Efectele neobișnuite vor atinge un maxim în această condiție de rezonanță. Din acest motiv, trebuie să calculăm din timp frecvența de rezonanță pentru diferite combinații de L și C, și să ținem cont de efectele acesteia asupra circuitului.

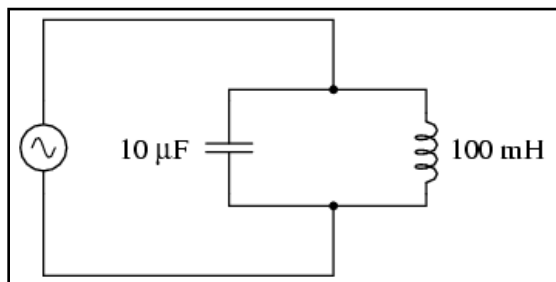
## Observație

Totuși, această tendință de oscilație, sau rezonanță, la o anumită frecvență, nu este limitată doar la circuitele concepute special în acest scop. De fapt, aproape orice circuit de curent alternativ ce conține o combinație de capacități și inductivități (circuit „LC”) tinde să manifeste efecte neobișnuite atunci când frecvența sursei de alimentare în curent alternativ se apropie de frecvența naturală. Acest lucru este valabil indiferent de scopul pentru care circuitul a fost creat.

## 2. Rezonanța paralel

- Rezonanța are loc atunci când reactanța capacitivă este egală cu reactanța inductivă
- Impedanța totală a unui circuit LC paralel tinde spre infinit pe măsură ce frecvența sursei de alimentare se apropie de frecvența de rezonanță

### Circuit LC paralel



Putem ajunge la o stare de rezonanță într-un circuit oscilator (LC), dacă reactanțele condensatorului și a bobinei sunt egale între ele. Deoarece reactanța inductivă crește odată cu creșterea frecvenței, iar reactanța capacitivă scade cu creșterea frecvenței, există doar o singură frecvență unde cele două reactanțe vor fi egale.

### Frecvența de rezonanță

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Din egalitatea celor două ecuații de mai sus, obținem:

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

Înmulțim ambele ecuații cu  $f$

$$2\pi f^2 L = \frac{1}{2\pi C}$$

Împărțim ambele ecuații cu  $2\pi f$

$$f = \frac{1}{4\pi^2 f LC}$$

Rezolvând și simplificând ecuația de mai sus, obținem următorul rezultat:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

În circuitul de mai sus, avem un condensator de  $10\ \mu\text{F}$  și o bobină de  $100\ \text{mH}$ . Din moment ce cunoaștem ecuațiile pentru determinarea reactanțelor, oricare ar fi valoarea frecvenței, iar ceea ce ne interesează este punctul în care cele două reactanțe sunt egale între ele, putem rezolva ecuația formată din egalitatea celor două reactanțe pentru a afla frecvența de rezonanță (naturală).

Aceasta este formula prin care putem afla frecvența de rezonanță a unui circuit oscilator, atunci când cunoaștem valorile inductanței ( $L$ ) și a capacității ( $C$ ). După introducerea valorilor  $L$  și  $C$  în formula de mai sus, ajungem la frecvență de rezonanță de  $159,155\ \text{Hz}$ .

## Impedanța totală

Ceea ce se întâmplă la rezonanță este interesant. Fiindcă reactanța inductivă este egală cu cea capacitivă, impedanța totală crește spre infinit, ceea ce înseamnă că circuitul oscilator nu „consumă” deloc curent de la sursa de tensiune! Putem calcula impedențele individuale ale condensatorului de  $10\ \mu\text{F}$  și a bobinei de  $100\ \text{mH}$ .

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \cdot 159,15\ \text{Hz} \cdot 100\ \text{mH} = 100\ \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 159,15\ \text{Hz} \cdot 10\ \mu\text{F}} = 100\ \Omega$$

Prin urmare, ambele impedențe sunt egale, ~~100~~. Putem apoi să aplicăm formula impedenței paralele pentru a demonstra matematic ceea ce am spus mai sus:

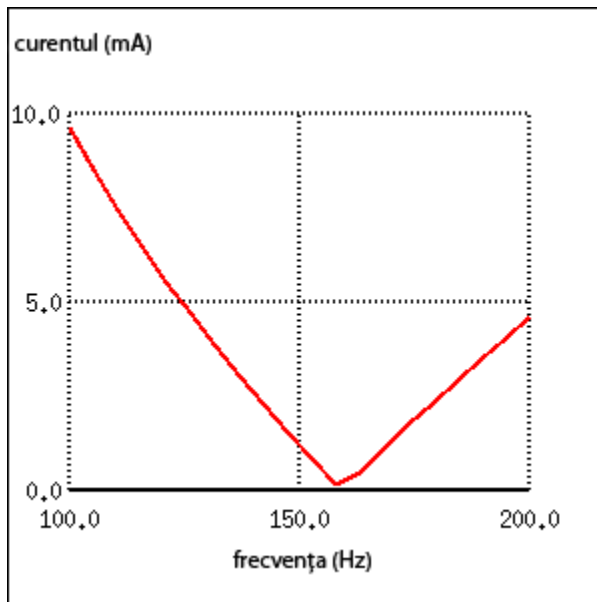
$$Z_{paralel} = \frac{1}{\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_C}}$$

$$Z_{paralel} = \frac{1}{\frac{1}{100 \Omega \angle 90^\circ} + \frac{1}{100 \Omega \angle -90^\circ}} = \frac{1}{0,01 \Omega \angle -90^\circ + 0,01 \Omega \angle 90^\circ}$$

$$Z_{paralel} = \frac{1}{0} \text{ nedefinit !}$$

Desigur, nu putem face raportul unui număr cu zero pentru a ajunge la un rezultat care să aibă sens, dar putem spune că rezultatul tinde spre infinit pe măsură ce valorile celor două impedanțe paralele se apropie una de cealaltă. Practic, acest lucru înseamnă **că** impedanța totală a circuitului oscilator la rezonanță este infinită. (se comportă precum un circuit deschis).

### Relația curent-frecvență



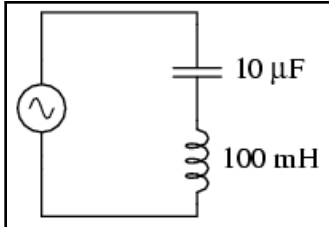
Grafic, amplitudinea curentului din circuit în funcție de frecvența sursei de alimentare arată precum în figura alăturată. Punctul de pe grafic unde curentul este zero, coincide cu frecvența de rezonanță calculată mai sus, 159,155 Hz.

### 3. Rezonanța serie

- Impedanța totală a unui circuit LC serie se apropie de zero pe măsură ce frecvența sursei de alimentare se apropie de frecvența de rezonanță

- Formula de calcul a frecvenței de rezonanță este aceeași ca și în cazul circuitului LC paralel
- Circuitele LC serie pot dezvolta căderi de tensiune extrem de mari pe cele două componente atunci când se află la rezonanță, datorită curenților mari din circuit și a impedanțelor suficient de mari ale componentelor

### Circuit LC serie



Un efect similar rezonanței paralel are loc și în circuitele inductiv-capacitive serie. Atunci când este atinsă o stare de rezonanță (reactanța capacitivă este egală cu cea inductivă), cele două impedanțe se anulează reciproc iar impedanța totală scade la zero!

### Frecvența de rezonanță

Formula frecvenței de rezonanță calculată anterior este valabilă atât pentru circuitele LC paralel cât și pentru cele serie.

$$f_{\text{rezonanță}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

### Impedanța totală

După cum am spus și mai sus, impedanța totală la rezonanță scade spre zero. Matematic, acest lucru arată astfel:

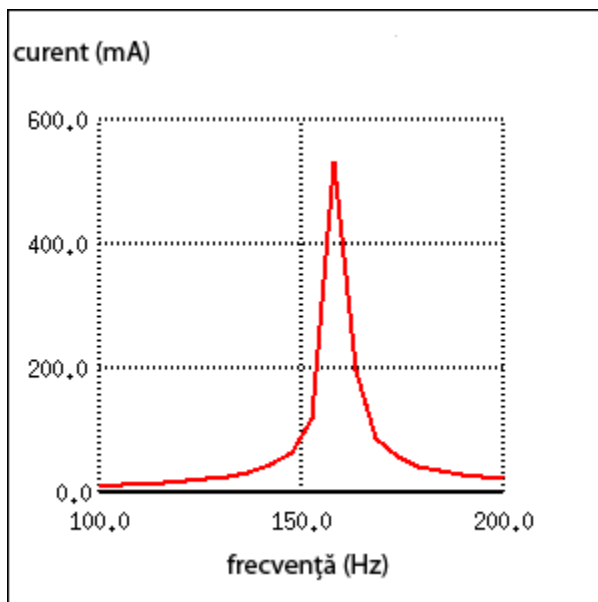
La 159,155 Hz:

$$Z_L = 0 + j100 \, \Omega; \quad Z_C = 0 - j100 \, \Omega$$

$$Z_{\text{serie}} = Z_L + Z_C = (0 + j100 \, \Omega) + (0 - j100 \, \Omega) = 0 \, \Omega$$

### Graficul curent-frecvență





Fiindcă impedanța serie totală este 0 la frecvența de rezonanță de 159,155 Hz, se va produce un *scurt circuit* la bornele sursei de curent alternativ la rezonanță. Graficul curentului în funcție de frecvență este cel din figura alăturată.

Putem observa de pe grafic, că la frecvența de rezonanță de 159,155 Hz (aproximativ), valoarea curentului prin circuit este maximă, ceea ce sugerează un scurt-circuit.

### Observație

Atenție, datorită curenților mari ce se pot dezvolta într-un circuit LC serie la rezonanță, este posibilă apariția unor căderi de tensiune periculoase pe condensator și bobină, întrucât fiecare component are o impedanță suficient de mare. Dacă alimentăm acest circuit cu doar 1 V, căderile de tensiune pe cele două componente pot atinge valori impresionante de aproximativ 70 V ! Prin urmare, fiți foarte atenți atunci când experimentați cu astfel de circuite!

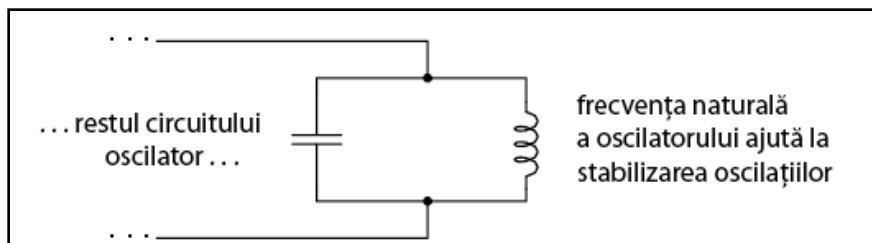
## 4. Aplicații ale rezonanței

- Rezonanța poate fi utilizată pentru menținerea oscilațiilor circuitelor de curent alternativ la o frecvență constantă
- Rezonanța poate fi exploatată pentru proprietățile sale cu privire la impedanță: creșterea sau descreșterea dramatică a impedanței pentru anumite frecvențe. Circuitele concepute special pentru înlăturarea tuturor frecvențelor din circuit exceptând cele dorite, se numesc filtre

### Scop

Până acum, fenomenul rezonanței pare doar o curiozitate nefolositoare, sau chiar dăunătoare, mai ales în cazul scurt-circuitării sursei de tensiune alternativă în circuitul serie. Totuși, rezonanța este o proprietate valoroasă a circuitelor de curent alternativ, fiind folosită într-o varietate de aplicații.

## Stabilizarea frecvenței



Una dintre aplicațiile rezonanței constă în atingerea unei frecvențe stabile în circuitele folosite pentru producerea semnalelor alternative. De obicei este folosit un circuit paralel în acest scop,

condensatorul și bobina fiind conectate împreună, schimbând energie între ele, alternativ.

La fel cum pendulul poate fi folosit pentru stabilizarea frecvenței oscilațiilor ceasurilor, un circuit oscilator (paralel) poate fi folosit pentru stabilizarea frecvenței electrice a unui circuit oscilator de curent alternativ. După cum am mai spus, frecvența impusă de circuitul oscilator depinde doar de valorile  $L$  și  $C$ , și nu de amplitudinea tensiunii sau a curentului din circuit.

## Filtre de frecvență

O altă aplicație a rezonanței este în circuitele în care efectele impedanțelor mărite sau micșorate, la o anumită frecvență, sunt de dorit. Un circuit rezonant poate fi folosit pentru „blocarea” (impedanță mare) unei anumite frecvențe sau a unui domeniu de frecvențe; circuitul se comportă în acest caz precum un „filtru”, pentru selectarea anumitor frecvențe în defavoarea altora. Aceste circuite sunt de fapt denumite filtre, iar studiul lor constituie o întreagă disciplină.

În principiu, acesta este și modul de funcționare al unui aparat de radiorecepție, ce selectează o anumită frecvență (post radio) din seria frecvențelor variate recepționate de antenă.

## 5. Rezonanța serie-paralel. Antirezonanța

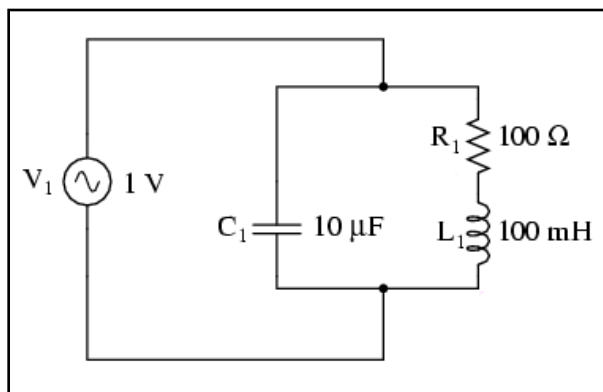
- Adăugarea unei rezistențe într-un circuit LC poate să producă efectul de antirezonanță, unde efectele de vârf ale impedanței au loc la o frecvență diferită față de frecvența de rezonanță inițială
- Rezistența prezentă în bobinele reale poate contribui în mare măsură la apariția antirezonanței. O sursă a unei astfel de rezistențe este efectul pelicular.
- Într-un circuit RLC serie, rezistența adițională în circuit nu produce antirezonanță.

## Scop

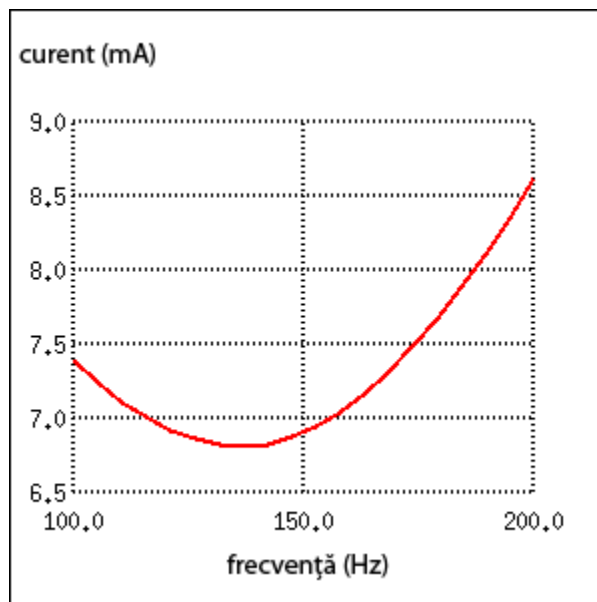
În circuitele reactive simple fără rezistență (sau rezistență foarte mică), efectele impedanțelor la frecvența de rezonanță vor fi cele prezise de ecuația acesteia. Într-un circuit LC paralel, aceasta înseamnă impedanță infinită. În circuitele LC serie, înseamnă impedanță zero (la rezonanță).

Totuși, dacă începem să introducem rezistență în circuitele LC, această formulă de calcul pentru rezonanță nu mai este utilizabilă. Vom lua câteva circuite LC ca și exemplu, folosind aceleași valori pentru capacitate și inductanță ca și înainte:  $10\ \mu\text{F}$  și  $100\ \text{mH}$ . Frecvența de rezonanță, potrivit formulei, ar trebui să fie  $159,155\ \text{Hz}$ , dar să vedem ce se întâmplă atunci când introducem un rezistor în circuit.

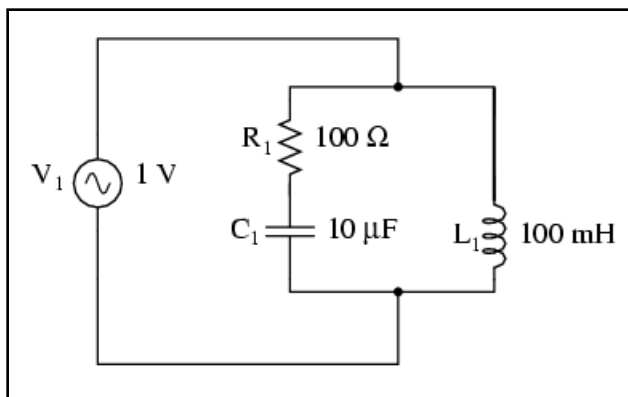
### Circuit RLC paralel (rezistor -- bobina)



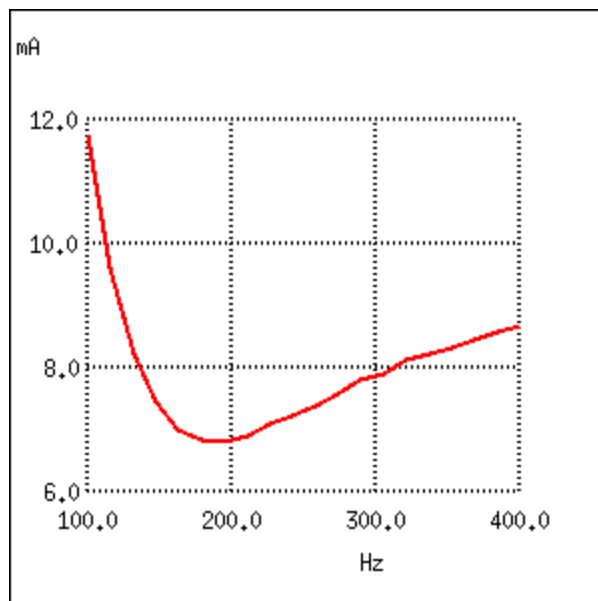
Rezistorul conectat în paralel cu bobina produce un curent minim, ce nu este zero, la frecvența de  $136,8\ \text{Hz}$ , și nu la  $159,2\ \text{Hz}$ , valoarea calculată.



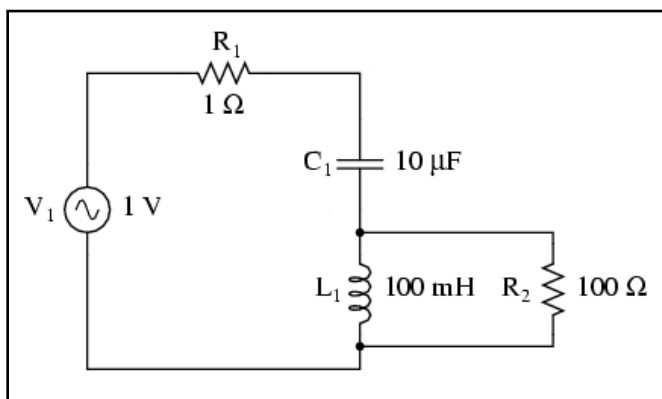
### Circuit RLC paralel (condensator -- rezistor)



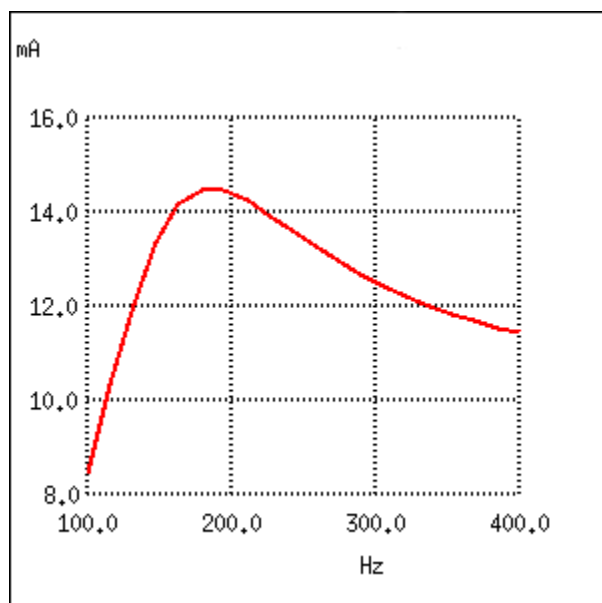
Curentul minim în acest caz este la frecvența de 180 Hz, nu la 159,2 Hz.



### Circuit RLC serie (rezistor // bobina)

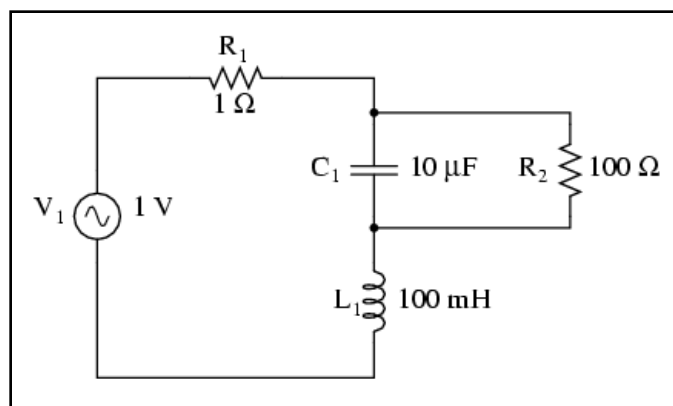


Întorcându-ne la circuitul LC serie, vom conecta o rezistență în paralel cu bobina. În circuitul alăturat, rezistorul  $R_1$  de  $1\ \Omega$  este conectat în serie cu bobina și condensatorul pentru limitarea curentului total prin circuit la rezonanță. Rezistorul „extra” pe care îl introducem în circuit pentru influențarea frecvenței de rezonanță este rezistorul  $R_2$  de  $100\ \Omega$ .

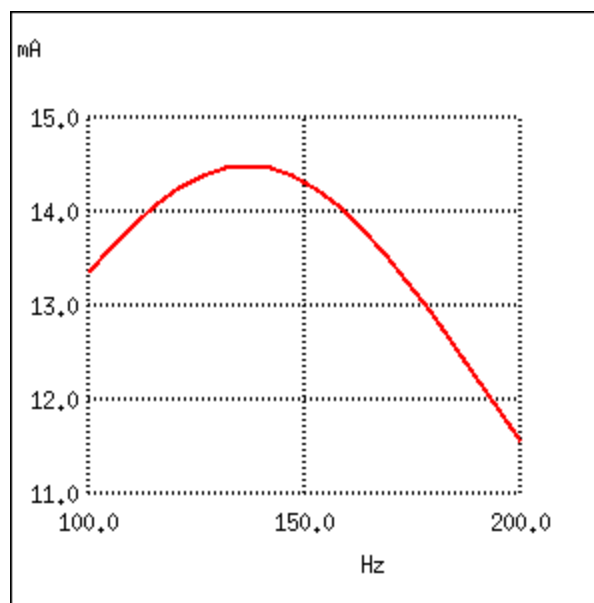


Circuitul rezonant serie (LC) cu un rezistor conectat în paralel cu bobina, prezintă un curent maxim la o frecvență de 180 Hz, față de 159,2 Hz.

## Circuit RLC serie (rezistor // condensator)



Și în acest caz, curentul maxim prin circuit nu se mai produce la frecvența de 159,2 Hz, ci la 136,8 Hz.



## Antirezonanța

Tendința rezistenței de modificare a punctului în care impedanța atinge maximul sau minimul într-un circuit LC, poartă numele de antirezonanță.

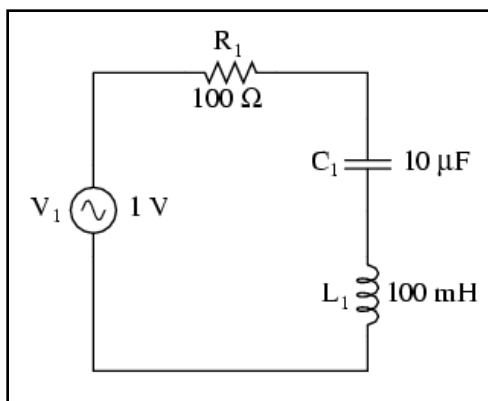
Din nou, efectele de mai sus ilustrează natura complementară a condensatoarelor și a bobinelor: rezistența serie cu unul dintre ele crează un efect de antirezonanță echivalent cu rezistența paralel cu celălalt. Dacă ne uităm și mai atent la graficele de mai sus, putem observa că frecvențele de rezonanță sunt modificate cu aceeași valoare, iar forma graficelor complementare sunt în oglindă!

## Efectul pelicular

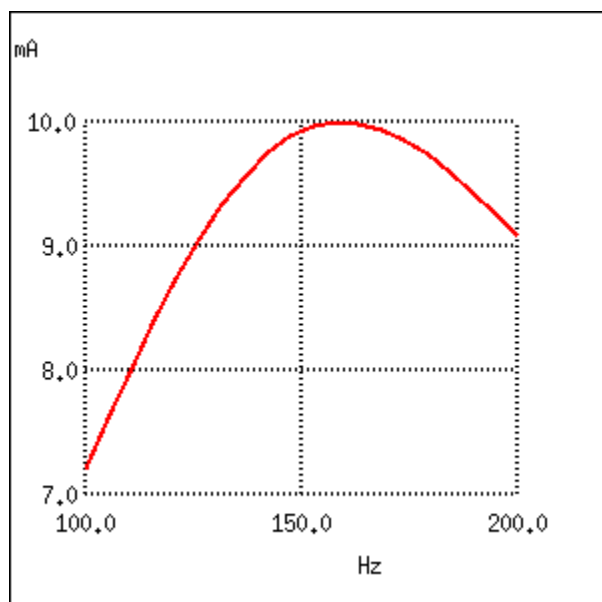
Nu este foarte greu să adăugăm o rezistență într-un circuit LC, dar, deși confecționarea condensatoarelor cu rezistențe neglijabile, este posibilă, bobinele suferă la acest capitol; rezistențele lor sunt mari datorită lungimilor conductorilor folosiți la confecționarea acestora. Mai mult decât atât, rezistența conductorilor tinde să crească odată cu creșterea frecvenței de funcționare, datorită efectului pelicular, efect ce se manifestă prin excluderea deplasării curentului alternativ prin centrul conductorului, reducând prin urmare secțiunea transversală a firului și mărinind astfel rezistența sa. Astfel, bobinele nu doar că au rezistență, dar au o rezistență variabilă, dependentă de frecvență.

Pe lângă asta, bobinele se mai confruntă și cu pierderi, datorită miezurilor de fier folosite, efect cunoscut sub numele de curenți turbionari.

## Circuit RLC serie



O excepție de la regula conform căreia o rezistență adițională într-un circuit LC modifică valoarea rezistenței de rezonanță, este circuitul RLC serie. Atâta timp cât toate componentele sunt conectate în serie, frecvența de rezonanță nu va fi afectată de rezistența în plus introdusă în circuit. Graficul variației curentului în funcție de frecvență este prezentat alăturat.



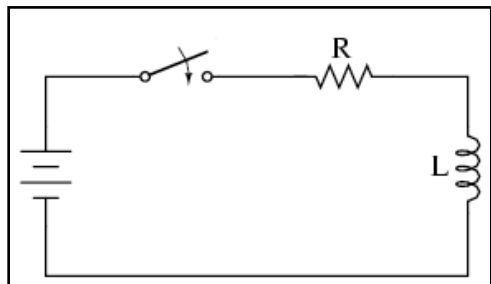
Valoarea curentului maxim este din nou atinsă pentru frecvența de 159,2 Hz!

## Aplicațiile antirezonanței

Este bine de știu că antirezonanța are un efect de amortizare (atenuare) a oscilațiilor circuitelor LC pure, precum cele paralele. La începutul acestui capitol am observat cum un condensator și o bobină conectate direct împreună se comportă precum un pendul, schimbând tensiune și curent între ele precum un pendul schimbă energia potențială cu cea cinetică, alternativ. Într-un circuit oscilator perfect (rezistență zero), această oscilație poate continua la infinit, la fel ca în cazul unui pendul fără frecări, ce ar putea oscila la infinit la frecvența sa de rezonanță. Dar aceste dispozitive fără frecare sunt foarte greu de găsit în realitate, și la fel este și cazul circuitelor oscilatoare. Pierderea de energie prin rezistență (sau alte tipuri de pierdere) într-un circuit LC va duce la atenuarea amplitudinii oscilațiilor până acestea se „sting”. Dacă într-un circuit oscilator, există suficiente pierderi de energie, acesta nu va rezona deloc.

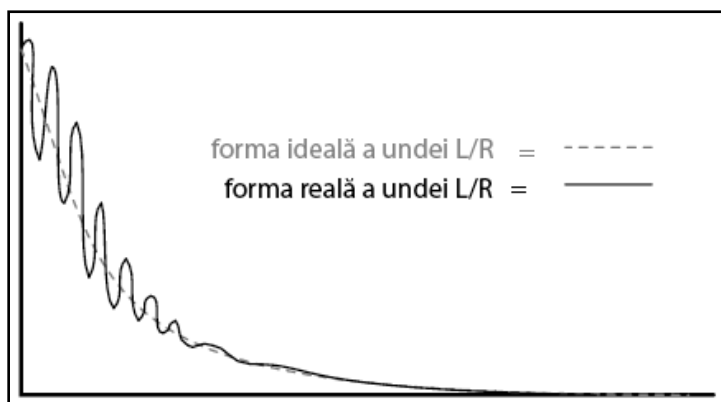
## Eliminarea oscilațiilor nedorite

Efectul de antirezonanță este mai mult decât o simplă curiozitate: antirezonanța poate fi extrem de utilă la eliminarea oscilațiilor nedorite din circuitele ce conțin inductanțe sau capacități parazite, precum este cazul majorității circuitelor.



Să luăm ca și exemplu circuitul alăturat, al cărei constantă de timp este  $L/R$ .

Ideea acestui circuit este simplă: încărcarea bobinei atunci când întrerupătorul este închis. Rata (viteza) de încărcare a bobinei depinde de raportul  $L/R$ , cunoscut sub numele de constanta de timp a circuitului, măsurată în secunde.



Totu și, dacă ar fi să construim fizic un astfel de circuit, am descoperi oscilații neașteptate a tensiunii la bornele bobinei atunci când întrerupătorul este închis. De ce se întâmplă acest lucru? Nu există niciun condensator în circuit, prin urmare, cum putem avea oscilație rezonantă folosind doar o bobină, un rezistor și o baterie?

Toate bobinele prezintă o anumită capacitate parazită datorită modului de realizare a înfășurărilor. De asemenea, conductorii folosiți pentru realizarea circuitului, prezintă și ei o anumită capacitate parazită. Cu toate că proiectarea „curată” a circuitelor electrice elimină mare parte dintre aceste capacități parazite, aceasta nu poate fi niciodată eliminată complet. Dacă acest lucru cauzează probleme de rezonanță (oscilații nedorite), un mod de combatere al acestui efect este prin adăugarea rezistențelor. Dacă un rezistor,  $R$ , este suficient de mare, acesta va duce la o situație de antirezonanță, disipând suficientă energie pentru anularea, sau diminuarea efectelor oscilației datorate combinației dintre inductanță și capacitățile parazite.

## Amortizoare

Este interesant de menționat faptul că, principiul utilizării rezistenței pentru eliminarea efectelor nedorite ale rezonanței este des folosit în conceperea sistemelor mecanice, unde orice obiect aflat în mișcare reprezintă un potențial rezonator. O aplicație extrem de des întâlnită este folosirea amortizoarelor la automobile. Fără amortizoare, automobilele ar vibra necontrolat la frecvența de rezonanță, atunci când ar întâlni o denivelare în

asfalt, de exemplu. Rolul amortizorului este de a introduce un efect antirezonant puternic prin disiparea energiei pe cale hidraulică, în același fel în care un rezistor disipă energie pe cale electrică.



## 07 - Semnale cu frecvențe multiple

### 1. Introducere

- Combinarea mai multor forme de undă cu frecvențe diferite duce la formarea unui semnal complex a cărei frecvență fundamentală este semnalul cu cea mai mică frecvență. Celelalte forme de undă sunt multiplii ale frecvenței fundamentale, și poartă numele de armonici

### Scop

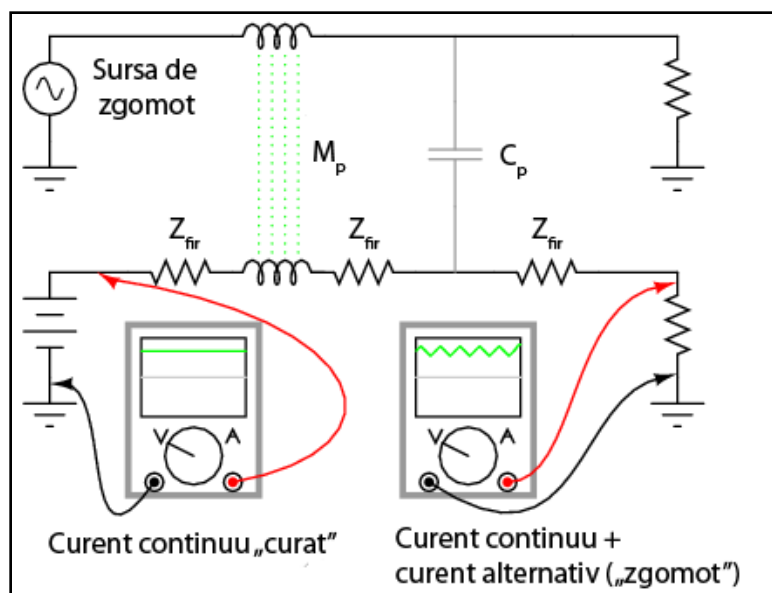
Circuitele studiate până în acest moment au fost alimentate integral într-o singură frecvență sinusoidală. În multe aplicații însă, frecvența unică este mai degrabă excepția decât regula. De multe ori întâlnim circuite unde frecvența tensiunii de alimentare este compusă din mai multe frecvențe individuale suprapuse una peste cealaltă. Pe lângă asta, formele de undă ale tensiunii pot avea și alte forme, nu doar sinusoidale, caz în care ele intră în categoria formelor de undă *ne-sinusoidale*.

Întâlnim de asemenea cazuri în care semnalul de curent continuu este combinat cu cel de curent alternativ: forma de undă este suprapusă peste un semnal de curent continuu. Rezultatul unei astfel de combinații este un semnal variabil în intensitate (amplitudine) dar nu și în polaritate, sau polaritatea sa variază asimetric. Indiferent de caz, atunci când avem mai multe frecvențe în același circuit, analiza acestuia este mult mai complexă decât ceea ce am văzut până acum.

### Cuplaje inductive și capacitive

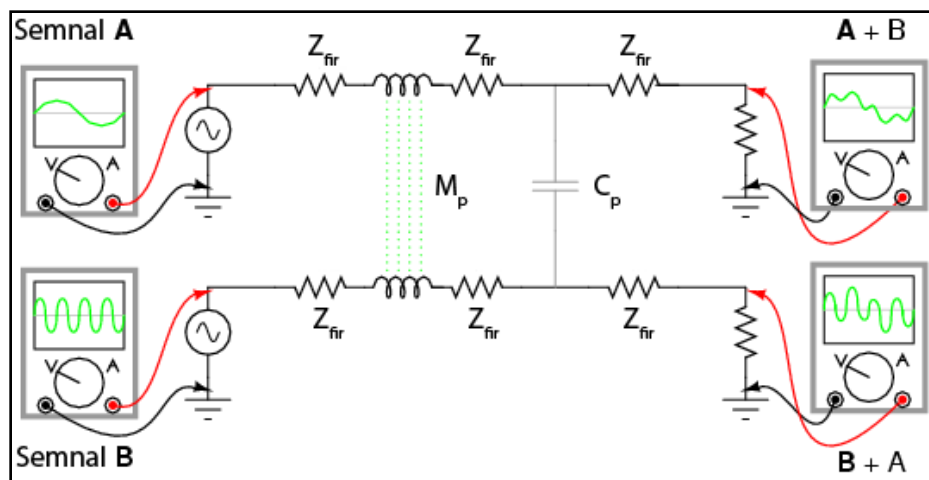
Unele situații de semnale de curent sau tensiune cu frecvențe multiple sunt create accidental, fiind rezultatul conexiunilor accidentale dintre circuite, conexiuni ce poartă numele de cuplaje, cauzate de capacitățile sau inductanțele parazite (nedorite) dintre conductorii acelor circuite.

Un exemplu clasic de cuplaj este întâlnit des în industrie, unde o rețea de semnal în curent continuu este plasată în apropierea unei rețele de alimentare în curent alternativ. Prezența tensiunilor înalte și a curenților alternativi pot duce la modificarea comportamentului rețelei de curent continuu.



Capacitatea parazită formată între izolațiile celor două rețele poate induce tensiune de la cea de curent alternativ la cea de curent continuu, iar inductanțele parazite formate între cele două lungimi ale conductorilor pot duce la situația în care curenții primei rețele să inducă tensiune pe cale electromagnetică în conductorii celei de a doua rețele.

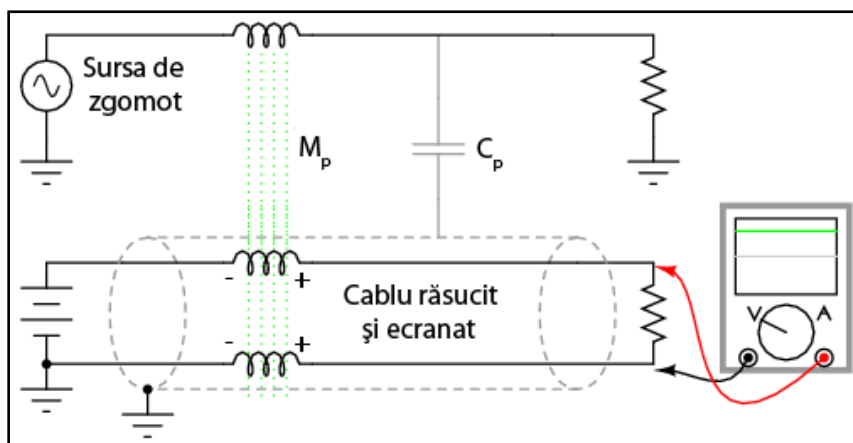
Rezultatul este o combinație de semnale de curent continuu și alternativ. Schema prezentată reprezintă modul în care sursa de zgomot de curent alternativ se poate cupla la circuitul de curent continuu prin inductanța ( $M_p$ ) și capacitatea parazită ( $C_p$ ).



Cuplajul poate să apară și între două seturi de conductori de curent alternativ, caz în care ambele semnale vor purta o combinație de frecvențe:

## Folosirea cablurilor răsucite și ecranate

Atunci când tensiunile alternative parazite se mixează cu semnalele de curent continuu, rezultatele sunt de obicei nedorite. Din acest motiv, rețeaua de alimentare cu energie electrică (curent alternativ, puteri mari) trebuie să fie neapărat separată de rețelele de semnal (curent continuu, puteri mici), iar semnalele transmise prin intermediul cablurilor răsucite (twisted) formate din doi conductori, și nu doar printr-un singur fir și conexiunea acestuia la împământare:

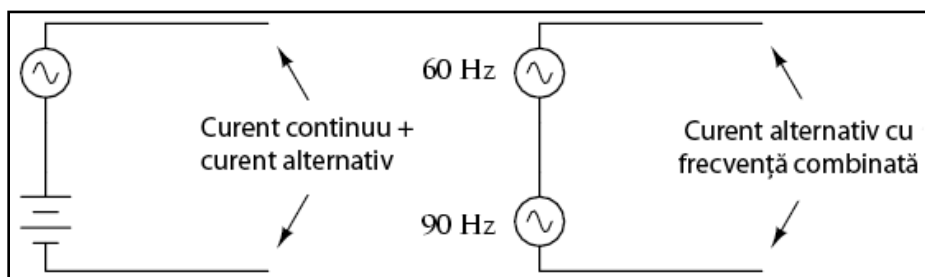


Ecranajul cablului - o folie metalică înfășurată în jurul celor doi conductori izolați - este conectat la împământare, și izolează ambii conductori față de cuplajul electrostatic (capacitiv), blocând orice câmp electric exterior.

Răsucirea celor doi conductori, unul lângă celălalt, anulează orice cuplaj electromagnetic (inductanță mutuală),

întrucât orice tensiune parazită indusă va fi aproximativ egală în amplitudine dar defazată cu  $180^\circ$  (opозиție de fază) în ambii conductori, cele două semnale anulându-se practic între ele, rezultând o diferență de potențial aproape nulă.

## Alte moduri de generare a frecvențelor multiple



Cuplajul este doar unul dintre exemplele de combinare a frecvențelor, fiind accidental și de nedorit.

În alte cazuri însă, semnalele cu frecvențe multiple sunt rezultatul proiectării voite a circuitului sau reprezintă o calitate intrinsecă a semnalului analizat. Cel mai ușor mod de producere a semnalelor cu frecvențe multiple este conectarea în serie a surselor de tensiune de frecvențe diferite.

În unele cazuri, frecvența mixată a semnalului este produsă de o singură sursă de tensiune. Un exemplu este microfonul, un traductor ce transformă presiunea aerului datorată frecvențelor audio într-o tensiune a cărei formă de undă corespunde acestor frecvențe ne-sinusoidale. Foarte puține sunete naturale sunt formate dintr-o vibrație sinusoidală pură, ci, majoritatea sunt compuse dintr-o serie de vibrații la frecvențe și amplitudini diferite combinate într-un singur semnal final.

## Armonicile și frecvența fundamentală

De exemplu, acordurile muzicale sunt produse printr-un amestec de frecvențe peste frecvența de bază, denumită frecvența fundamentală, fiecare dintre acestea fiind un multiplu al fundamentalei, și purtând numele de armonici. Chiar și o simplă notă de pian este compusă dintr-o frecvență predominantă amestecată cu alte armonici,

fiecare dintre acestea fiind un multiplu al primei (fundamentala). Pentru ilustrare, putem considera următorul tabel, în care frecvența fundamentală este de 1.000 Hz (cifră luată la întâmplare):

| Frecvența (Hz) | Termen                       |
|----------------|------------------------------|
| 1000           | armonica 1, sau fundamentală |
| 2000           | armonica a 2-a               |
| 3000           | armonica a 3-a               |
| 4000           | armonica a 4-a               |
| 5000           | armonica a 5-a               |
| 6000           | armonica a 6-a               |
| 7000           | armonica a 7-a               |

Unele instrumente muzicale nu pot produce anumite tipuri de frecvențe armonice. De exemplu, un „instrument” realizat dintr-un tub deschis la un capăt și închis la celălalt (precum o sticlă) nu va putea produce armonici pare. Un asemenea instrument, construit astfel încât să producă o frecvență fundamentală de 1.000 Hz, va produce și armonici de 3.000, 5.000, 7.000, etc. Hz, dar nu va putea produce 2.000, 4.000, 6.000, etc. Hz

O formă de undă pur sinusoidală (frecvență unică, „curată”), neavând nicio armonică, sună „sec” urechii umane. Majoritatea instrumentelor muzicale nu sunt capabile să producă sunete atât de „simple”.

## 2. Analiza unui semnal dreptunghiular

- Formele de undă dreptunghiulare sunt echivalente unei forme de undă sinusoidală de aceeași frecvență (fundamentala) însumată cu o serie infinită de unde sinusoidale (armonici) de frecvențe multiplu impar ale fundamentalei și amplitudini descrescătoare
- Orice formă de undă periodică, ne-sinusoidală poate fi reprezentată ca serie de semnale sinusoidale de frecvențe și amplitudini diferite însumate împreună

### Definiție

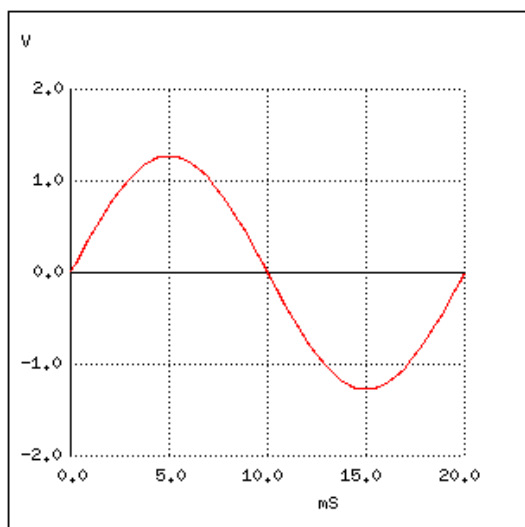
Este cunoscut faptul că orice semnal periodic (ce se repetă în timp) ne-sinusoidal poate fi reprezentat ca și combinație de semnale continue, sinusoidale și/sau cosinusoidale (semnal sinusoidal defazat cu 90 de grade) de frecvențe și amplitudini variate. Acest lucru este perfect valabil indiferent cât de „ciudat” sau „contorsionat” ar părea semnalul analizat. Atâta timp cât este periodic, se poate reduce la tipul de combinații prezentate mai sus. Într-un caz particular, formele de undă dreptunghiulare sunt echivalente din punct de vedere matematic cu suma unui semnal sinusoidal fundamental, de o anumită frecvență, plus o serie infinită de multiplii impari ai frecvenței fundamentale cu amplitudini descrescătoare.

### Exemplu

Acest adevăr, perfect demonstrabil, al formelor de undă pare greu de crezut. Totuși, dacă o formă de undă dreptunghiulară este de fapt o serie infinită de armonici sinusoidale adunate împreună, ar trebui să putem demonstra acest lucru însumând câteva armonici sinusoidale și obținând o aproximare a semnalului dreptunghiular. Vom încerca să facem acest lucru în continuare.

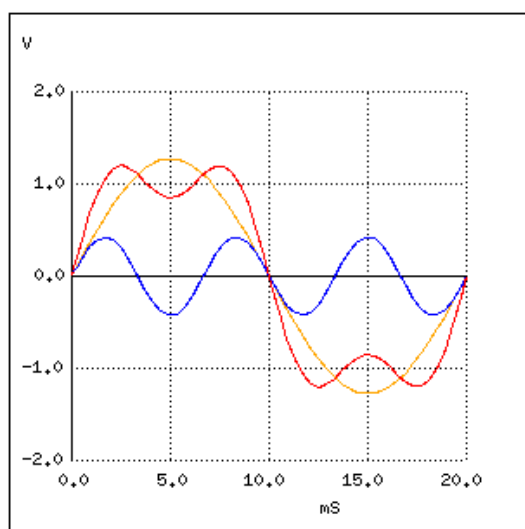
Circuitul considerat constă din cinci surse de tensiune, de amplitudini și frecvențe diferite, conectate în serie. Armonicele considerate sunt: cea fundamentală (prima) la o frecvență de 50 Hz, armonica a 3-a ( $3 \cdot 50 = 150$  Hz), a 5-a, a 7-a și a 9-a ( $9 \cdot 50 = 450$  Hz). Amplitudinile semnalelor nu sunt nici ele aleatoare, ci, constau din fracția  $4/\pi$  înmulțită cu fracțiile 1 ( $4/\pi \cdot 1 = 4/\pi$  V),  $1/3$ ,  $1/5$ ,  $1/7$  și  $1/9$  ( $4/\pi \cdot 1/9 = 4/9\pi$  V), în funcție de armonica corespunzătoare.

### Frecvența fundamentală



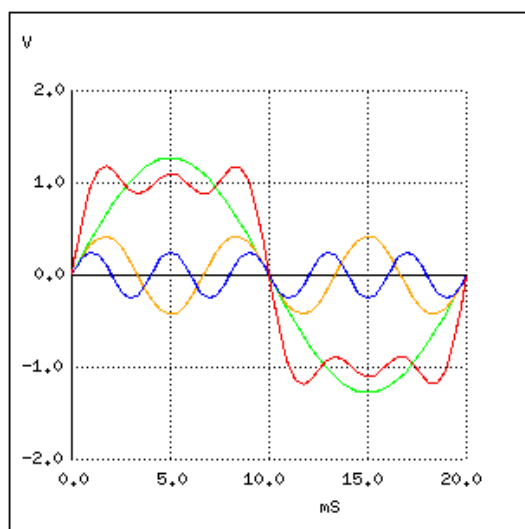
Primul grafic reprezintă tocmai frecvența fundamentală, la 50 Hz și amplitudine de  $4/\pi$ , adică aproximativ 1,27 V.

### Armonica a 3-a



În următorul grafic, vom vedea ce se întâmplă cu acest semnal sinusoidal pur atunci când îl combinăm cu armonica a 3-a (150 Hz). Din acest moment, nu mai seamănă cu un semnal sinusoidal pur (semnalul combinat este cel cu roșu). Panta formei de undă la intersecția cu axa orizontală a timpului este mult mai mare acum, semn că forma de undă inițială se apropie de cea dreptunghiulară.

### Armonica a 5-a

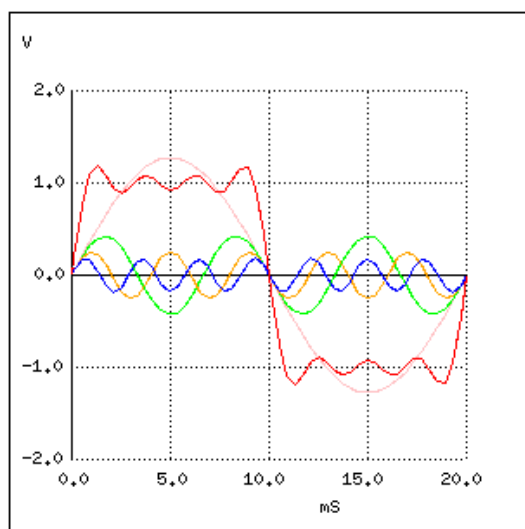


Să adăugăm în continuare și armonica a 5-a pe grafic.

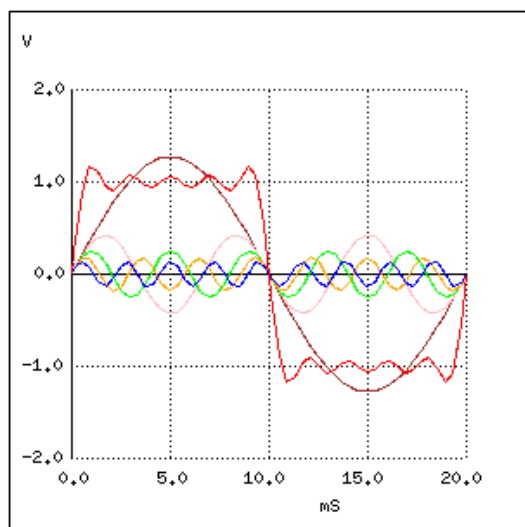
Armonica a 5-a (250 Hz) este reprezentată pe graficul alăturat cu albastru, iar efectele combinate a celor două armonici cu fundamentale sunt reprezentate cu roșu.

Putem observa cum vârful formei de undă s-a aplatizat față de situația inițială, iar panta a crescut și mai mult față de cazul precedent.

### Armonica a 7-a și a 9-a



Adăugăm pe rând și armonicile a 7-a,

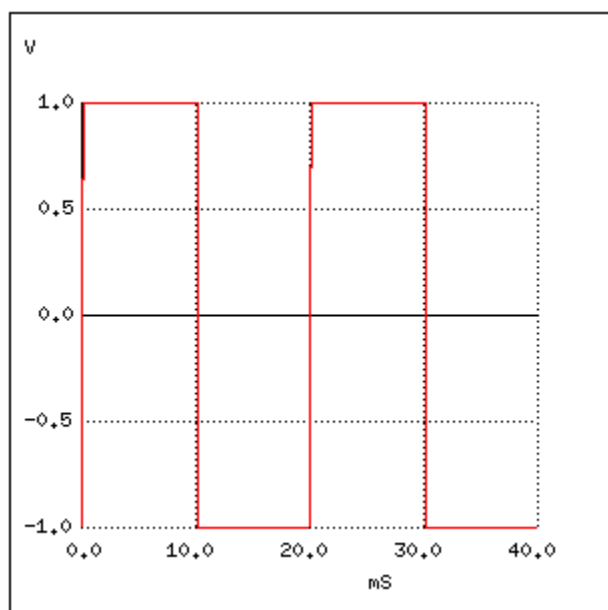


respectiv a 9-a.

## Efecte asupra circuitelor

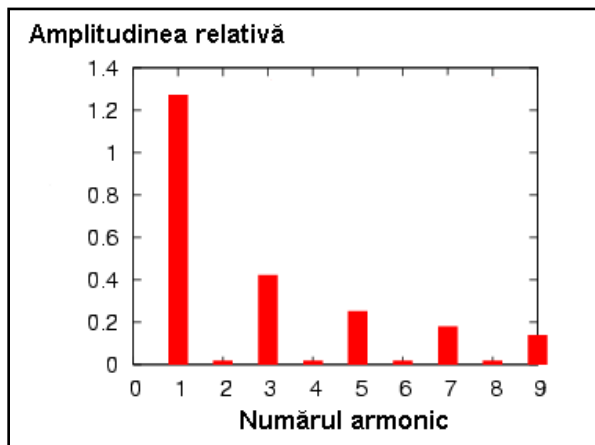
Rezultatul însumării celor 5 armonici, cu amplitudinile de rigoare, reprezintă o aproximare destul de bună a unui semnal dreptunghiular. Scopul acestui exemplu a fost ilustrarea modului de construire a unui semnal dreptunghiular folosind semnale sinusoidale multiple la frecvențe diferite pentru a demonstra faptul că un semnal pur dreptunghiular este într-adevăr echivalent cu o serie de semnale sinusoidale. Atunci când se aplică un semnal dreptunghiular într-un circuit ce conține elemente reactive (condensatoare și/sau bobine), acele componente se comportă ca și cum am fi aplicat mai multe tensiuni de frecvențe diferite în același timp, ceea ce de fapt am și făcut.

## Analiza Fourier



facem în continuare.

Să luăm din nou exemplul semnalului dreptunghiular, simetric, cu amplitudinea de 1 V.



Faptul că semnalele ne-sinusoidale periodice sunt echivalente cu o serie de semnale de curent continuu, sinusoidale și/sau cosinusoidale este o consecință intrinsecă a modului de „funcționare” al semnalelor: o proprietate fundamentală a tuturor formelor de undă, indiferent că sunt electrice sau mecanice.

Procesul matematic de reducere a acestor forme de undă ne-sinusoidale ca sumă a componentelor sale la frecvențe și amplitudini diferite, poartă numele de analiză Fourier, fiind un proces destul de complicat. Analiza Fourier este în schimb ușor de implementat cu ajutorul unui calculator și un algoritm numit transformata Fourier, ceea ce vom încerca să

În graficul alăturat, formele de undă sunt împărțite în funcție de frecvențele lor sinusoidale, până la armonica a 9-a. Amplitudinile armonicilor pare sunt aproximativ zero, iar a celor impare descresc de la 1 la 9 (prima este cea mai mare, ultima cea mai mică).

## Analiza spectrală

Un dispozitiv construit special pentru afișarea - nu și controlul - amplitudinii fiecărei frecvențe a unui semnal format din mai multe frecvențe, se numește analizor spectral, iar procesul de analiză a unui semnal în acest mod, poartă numele de analiză spectrală

Deși poate părea ciudat, orice formă de undă periodică ne-sinusoidală este de fapt echivalentă cu suma unei serii de unde sinusoidale de frecvențe și amplitudini diferite. Formele dreptunghiulare sunt doar un singur caz, dar nu unicul.

### 3. Analiza spectrală

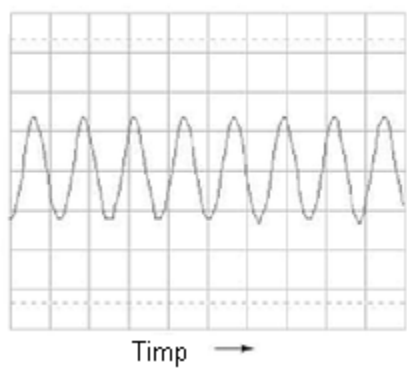
- Formele de undă simetrice față de axa lor orizontală nu conțin armonici pare
- Componenta de curent continuu prezintă în semnal nu are niciun fel de impact asupra conținutului armonic al formei de undă în cauză

## Scop

Analiza Fourier computerizată, în special sub forma algoritmului *FFT* (Transformata Fourier Rapidă), este un instrument excelent pentru înțelegerea formelor de undă și a componentelor spectrale ale acestora.

## Semnal sinusoidal

### Forma de undă

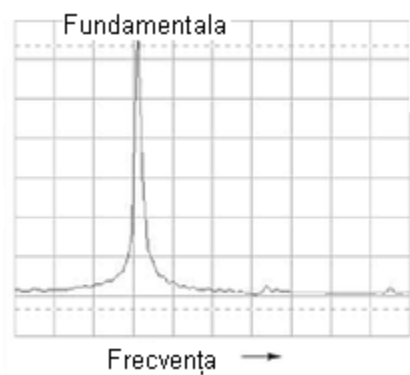


Pentru început, luăm o formă de undă sinusoidală (aproape perfectă) la frecvența de 523,25 Hz, semnal produs cu ajutorul unei claviaturi electronice. Graficul formei de undă din figura este luat de pe afișajul unui osciloscop și prezintă amplitudinea tensiunii (axa verticală) cu timpul (axa orizontală).

Dacă observăm cu atenție unda sinusoidală, putem vedea că există anumite imperfecțiuni ale formei acesteia. Din păcate, acesta este rezultatul echipamentului folosit pentru analiza undei. Astfel de caracteristici datorate echipamentelor de testare sunt cunoscute sub denumirea tehnică de artefacte: fenomene a cărei existență se datorează aparatelor de măsură folosite pentru derularea experimentului.



## Analiza spectrală

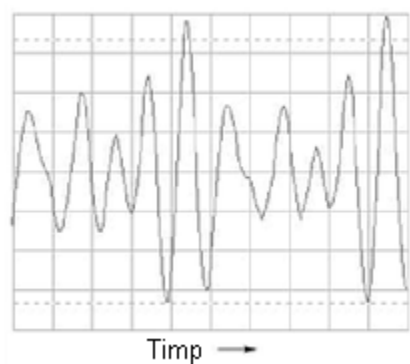


Dacă urmărim această tensiune alternativă pe un analizor spectral, rezultatul este puțin diferit, dar semnalul analizat este exact același.

După cum se poate vedea, orizontala este marcată și reprezintă „Frecvența”, adică domeniul măsurătorii. Vârful curbei reprezintă frecvența dominantă, considerată mai sus (523,25 Hz), iar înălțimea acestuia este amplitudinea semnalului pentru această frecvență.

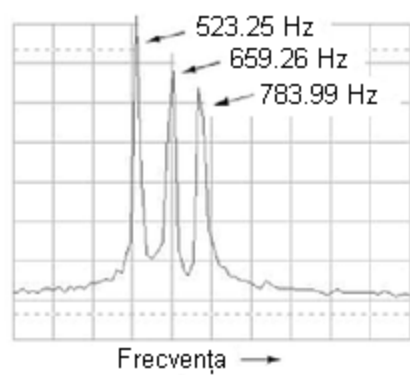
## Semnal ne-sinusoidal

### Forma de undă



Dacă vom combina mai multe note muzicale pe aceeași claviatură electronică și măsurăm rezultatul, din nou cu un osciloscop, putem vedea foarte ușor faptul că semnalul crește în complexitate. Semnalul final este de fapt o combinație de semnale sinusoidale de frecvențe și amplitudini diferite.

## Analiza spectrală

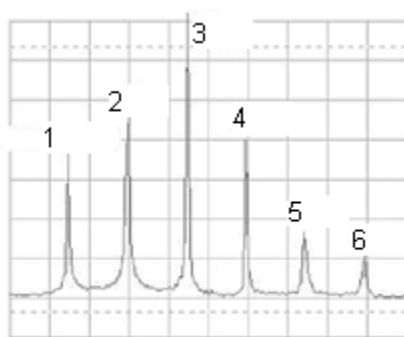


Analiza spectrală este mult mai ușor de prezentat, întrucât fiecărei note (sinusoidale) îi corespunde pe grafic un vârf, în funcție de frecvența sa.

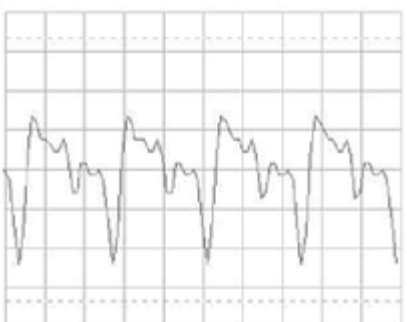
Să luăm în continuare alte forme de undă muzicale, și să le analizăm grafic:



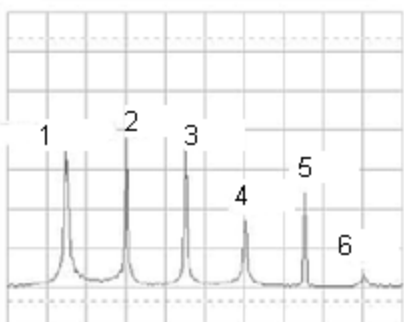
Timp →



Frecvența →



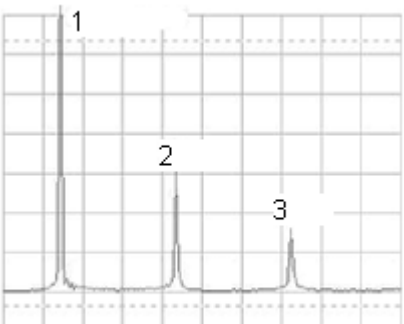
Timp →



Frecvența →

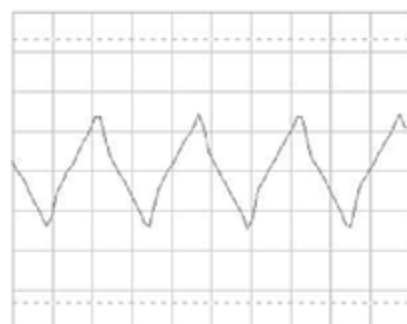


Timp →

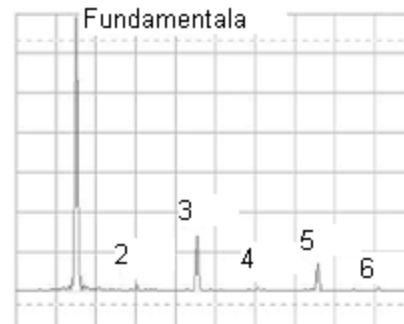


Frecvența →

Conform analizei spectrale, forma de undă dreptunghiulară de mai sus nu conține armonici pare, doar impare. Cu toate că afișajul osciloscopului nu permite vizualizarea frecvențelor peste armonica a 6-a, armonicile impare continuă la infinit, cu o amplitudine din ce în ce mai mică.

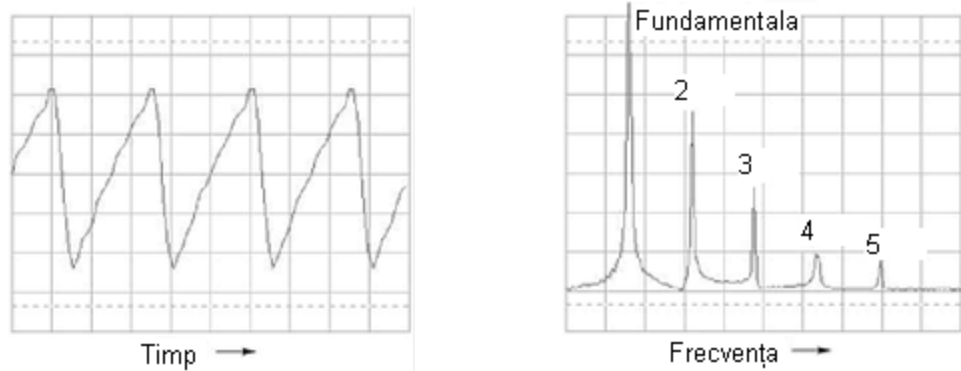


Timp →



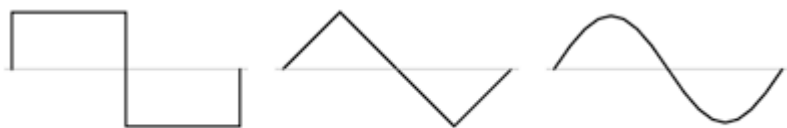
Frecvența →

În cazul formei de undă triunghiulare, nu există practic armonici pare: singurele armonici sunt cele impare. Deși putem vedea vârfuri mici pentru armonicile 2, 4 și 6, acestea se datorează imperfecțiunilor formei de undă triunghiulare. O formă de undă triunghiulară perfectă, nu produce armonici pare, la fel ca în cazul formei de undă dreptunghiulare. Este evident însă că spectrul celor două nu este identic: amplitudinile armonicelor respective nu sunt identice.



### Diferența dintre armonicile pare și impare

Distincția dintre o formă de undă ce conține armonici pare și o formă de undă ce nu conține aceste armonici se poate observa grafic, înaintea realizării analizei spectrale. Diferența constă în simetria față de axa orizontală a undei.



O formă de undă simetrică față de axa orizontală nu va prezenta armonici pare.

Formele de undă de mai sus, fiind toate simetrice față de orizontală, conțin doar armonici impare (forma de undă pur sinusoidală conține doar armonica de gradul întâi, fundamentală).



Formele de undă ce sunt asimetrice față de orizontală, conțin și armonici pare.

Trebuie înțeles faptul că simetria se referă exclusiv la axa orizontală a undei, și nu neapărat la axa orizontală a timpului.

### Componenta de curent continuu



Să luăm de exemplu aceleași forme de undă, dar însumate cu o componentă de curent continuu, astfel încât graficul lor este deplasat în sus, sau în jos, față de axa timpului (în cazul precedent, componenta de curent continuu era zero, astfel încât cele două axe orizontale coincideau). Analiza armonică a acestor forme de undă nu va fi diferită față de cele de mai sus, singura diferență fiind componenta de curent continuu, care însă nu afectează în niciun fel conținutul armonicilor (frecvența ei este zero).



Același lucru este valabil și pentru formele de undă nesimetrice față de orizontală, conținutul armonic al acestor forme de undă nu va fi afectat de introducerea componentei de curent continuu.

#### 4. Efecte asupra circuitelor

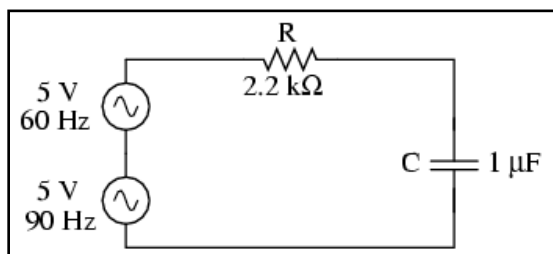
- Orice formă de undă periodică nesinusoidală este echivalentă cu o anumită serie (infinită) de unde sinusoidale/cosinusoidale de frecvențe, faze și amplitudini diferite, plus o componentă de tensiune în curent continuu (în funcție de caz). Metoda matematică de determinarea formei de undă echivalente, poartă numele de *analiza Fourier*
- Simularea tensiunilor cu frecvențe diferite se poate realiza prin conectarea mai multor surse de tensiune, cu o singură frecvență, în serie. Analiza curenților și a tensiunilor se realizează folosind teorema superpoziției. Atenție, curenții și tensiunile de frecvențe diferite *nu* pot fi adunați sub formă complexă folosind teorema superpoziție, din moment ce frecvența nu poate fi indicată cu ajutorul numerelor complexe, ci numai amplitudinea și faza
- Armonicile pot cauza probleme prin inducerea de tensiuni nedorite (zgomot) în circuitele învecinate. Aceste zgomote pot apărea prin cuplaj capacitiv, cuplaj inductiv, radiație electromagnetică, sau o combinație dintre acestea

#### Scop

Principiul conform căruia formele de undă periodice ne-sinusoidale sunt compuse dintr-o serie de unde sinusoidale de frecvențe și amplitudini diferite, este o proprietate generală a formelor de undă și are o importanță practică în studiul circuitelor de curent alternativ. Acest lucru înseamnă că de fiecare dată când întâlnim o formă de undă ne-sinusoidală, comportamentul circuitului va fi același ca și în cazul în care am introduce deodată, în circuit, tensiuni de frecvențe diferite.

Când un circuit de curent alternativ este alimentat de la o sursă de tensiune ce conține o combinație de forme de undă de frecvențe diferite, componentele acelui circuit vor răspunde diferit fiecărei frecvențe în parte. Orice component reactiv din circuit, precum condensatorul și bobina, va avea simultan o impedanță unică și diferită față de fiecare frecvență prezentă în circuit. Din fericire, analiza unui astfel de circuit este destul de ușor de realizat apelând la teorema superpoziției, considerând sursa de alimentare cu frecvențe multiple ca un set de surse cu frecvențe unice conectate în serie; analiza circuitului se face considerând fiecare „sursă” în parte, însumând la final rezultatele pentru a determina efectul total asupra circuitului.

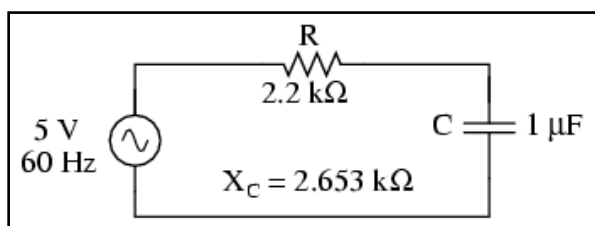
## Exemplu



Să considerăm un circuit RC serie simplu, alimentate cu o sursă de tensiune ce conține două semnale cu frecvențe diferite suprapuse una peste cealaltă (acest lucru este echivalent cu două surse de tensiune cu frecvențe diferite).

## Analiza circuitului

### Sursa de 60 Hz

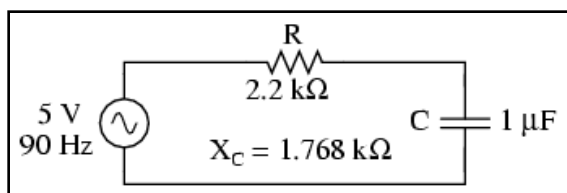


Primul pas constă în analiza circuitului alimentat doar cu sursa de tensiune de 60 Hz.

| Mărimă | R                                                 | C                                                 | Total                                             | Unitate  |
|--------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------|
| E      | $2,03 + j2,45$<br>$3,19 \angle 50,32^\circ$       | $2,96 - j2,45$<br>$3,84 \angle -39,67^\circ$      | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$                    | V        |
| I      | $926,22\mu + j1,1m$<br>$1,45m \angle 50,32^\circ$ | $926,22\mu + j1,1m$<br>$1,45m \angle 50,32^\circ$ | $926,22\mu + j1,1m$<br>$1,45m \angle 50,32^\circ$ | A        |
| Z      | $2,2k + j0$<br>$2,2k \angle 0^\circ$              | $0 - j2,65k$<br>$2,65k \angle -90^\circ$          | $2,2k - j2,65k$<br>$3,44k \angle -50,32^\circ$    | $\Omega$ |

Ne-insistând asupra calculelor propriu-zise, valorile finale arată sunt cele prezentate în tabelul alăturat.

### Sursa de 90 Hz



Apoi analizăm circuitul considerând doar efectele sursei de tensiune de 90 Hz.

| Mărimă | R                                             | C                                             | Total                                          | Unitate  |
|--------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|----------|
| E      | $3,03 + j2,44$<br>$3,89 \angle 38,79^\circ$   | $1,96 - j2,44$<br>$3,13 \angle -51,2^\circ$   | $5 + j0$<br>$5 \angle 0^\circ$                 | V        |
| I      | $1,38m + j1,1m$<br>$1,77m \angle 38,79^\circ$ | $1,38m + j1,1m$<br>$1,77m \angle 38,79^\circ$ | $1,38m + j1,1m$<br>$1,77m \angle 38,79^\circ$  | A        |
| Z      | $2,2k + j0$<br>$2,2k \angle 0^\circ$          | $0 - j1,76k$<br>$1,76k \angle -90^\circ$      | $2,2k - j1,76k$<br>$2,82k \angle -38,79^\circ$ | $\Omega$ |

Din nou, nu vom insista asupra calculelor, ci prezentăm direct rezultatele finale sub formă tabelară.

### Aplicarea teoremei

Folosind teorema superpoziției (suma efectelor celor două surse de tensiune) pentru căderile de tensiune pe rezistor (R) și condensator (C), obținem:

$$E_R = 3,19 \text{ V} \angle 50,32^\circ \cdot 60 \text{ Hz} + 3,89 \text{ V} \angle 38,79^\circ \cdot 90 \text{ Hz}$$

$$E_C = 3,84 \text{ V} \angle -39,67^\circ \cdot 60 \text{ Hz} + 3,13 \text{ V} \angle -51,20^\circ \cdot 90 \text{ Hz}$$

Pentru că cele două tensiuni se află la frecvențe diferite, nu putem obține un rezultat final cu o singură valoare a tensiunii, precum putem aduna două tensiuni de amplitudini și faze diferite dar de aceeași frecvență. Cu ajutorul numerelor complexe, putem reprezenta amplitudinea și faza formelor de undă, dar nu și frecvența.

### Concluzii și observații

Ceea ce putem concluziona după aplicarea teoremei superpoziției, este că, pe condensator, căderea de tensiune va fi mai mare pentru componenta de 60 Hz față de componenta de 90 Hz. În cazul bobinei, este exact invers. Acest lucru este important de realizat, având în vedere faptul că tensiunile celor două surse de alimentare sunt, de fapt, egale. Este important de luat în considerare acest răspuns nesimetric al componentelor circuitului.

## 08 – Filtre

### 1. Ce este un filtru

- Un filtru, este un circuit special de curent alternativ, utilizat pentru separarea anumitor frecvențe dintr-un semnal cu frecvențe multiple
- Aplicații ale filtrelor includ egalizatoarele și rețelele crossover
- O diagramă Bode este un grafic a cărei axă orizontală este frecvența, și nu timpul

### Definiție

În unele cazuri este necesară folosirea unor circuite capabile să filtreze selectiv o anumită frecvență, sau un domeniu de frecvențe, dintr-un circuit ce conține o combinație de frecvențe (vezi capitolul precedent). Un circuit construit special pentru realizarea acestei selecții a frecvențelor poartă numele de circuit de filtrare, sau mai simplu, filtru.

### Aplicații

#### Sisteme audio

O aplicație populară pentru circuitele de filtrare o reprezintă filtrarea sistemelor audio, unde este necesar ca anumite domenii de frecvențe să fie amplificate sau înlăturate pentru obținerea unui sunet de cea mai înaltă calitate și eficiență. Un exemplu este folosirea egalizatorului, ce permite selectarea de către utilizator a domeniilor de frecvențelor și amplitudinile acestora în funcție de preferințele acestuia sau de acustica încăperii. Crossover-ele sunt folosite de asemenea pentru blocarea „accesului” anumitor frecvențe la difuzoare. Un tweeter (difuzor de frecvență înaltă) este inefficient atunci când este folosit la reproducerea semnalelor de frecvențe joase, astfel că este nevoie de conectarea unui crossover între tweeter și terminalele de ieșire a sistemului audio pentru blocarea semnalelor de frecvență joasă; singurele semnale care trec de acest punct sunt doar semnalele de frecvență înaltă. Acest lucru duce la creșterea eficienței sistemelor audio, și prin urmare la o performanță crescută. Atât egalizatorul cât și crossover-ul sunt exemple de filtre, concepute special pentru filtrarea anumitor frecvențe nedorite.

#### Prelucrarea semnalelor ne-sinusoidale

O altă aplicație practică a circuitelor de filtrare constă în prelucrarea tensiunilor ne-sinusoidale în circuitele de putere. Unele componente electronice sunt sensibile în prezența armonicilor surselor de alimentare, prin urmare, este nevoie de prelucrarea acestor forme de undă pentru funcționarea normală a dispozitivelor electronice. Dacă o tensiune sinusoidală distorsionată se comportă precum o serie de armonici însumate cu frecvența fundamentalei,



atunci ar trebui să fie posibilă construirea unui circuit de filtrare care să permită doar trecerea fundamentalei, blocând toate celelalte armonici.

În cele ce urmează, vom studia câteva circuite de filtrare elementare, folosind reprezentarea prin diagrame Bode (variația amplitudinii față de frecvență) pentru diferitele filtre considerate. Totuși, aceste circuite pot fi analizate luând fiecare frecvență în parte și aplicând teorema superpoziției, precum în cazul precedent.

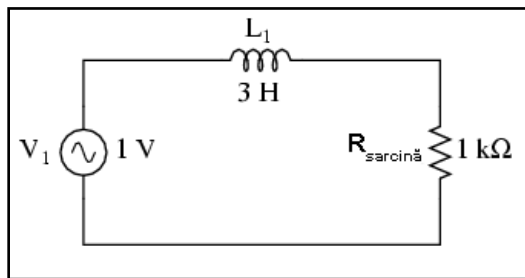
## 2. Filtru trece-jos

- Un filtru trece-jos permite trecerea semnalelor de frecvență joasă de la sursă spre sarcină, și blochează semnalele de frecvențe înalte
- Filtrele trece-jos inductive constau din introducerea unei bobine în serie cu sarcina, prin blocarea semnalelor de frecvențe nedorite
- Filtrele trece-jos capacitive constau în introducerea unui rezistor în serie cu un condensator, ambele componente fiind conectate în paralel cu sarcina, prin scurt-circuitarea semnalelor de frecvențe nedorite
- Frecvența de tăiere a unui filtru trece-jos este frecvența la care tensiune de ieșire este egală cu 70.7% din tensiunea de intrare. Peste această frecvență de tăiere, valoarea tensiunii de ieșire este sub 70.7% din tensiune de intrare, și invers

### Definiție

Filtrul trece-jos permite trecerea (impedanță mică) semnalelor de frecvență joasă și blochează trecerea (impedanță mare) celor de frecvență înaltă.

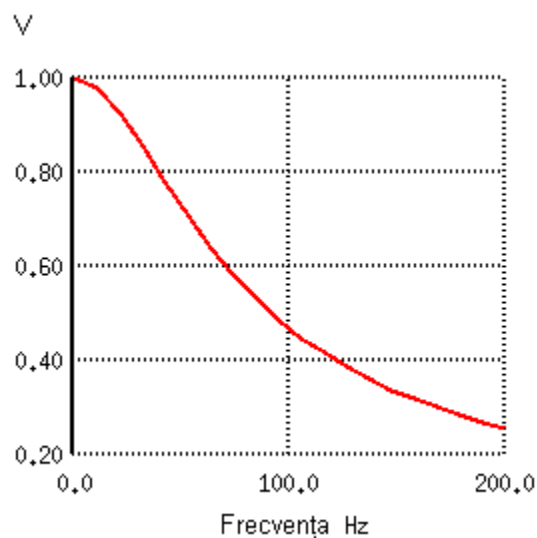
### Filtrul trece-jos inductiv



Există două tipuri de circuite capabile să îndeplinească aceste condiții, și multe versiuni din fiecare. Pentru început vom considera varianta inductivă.

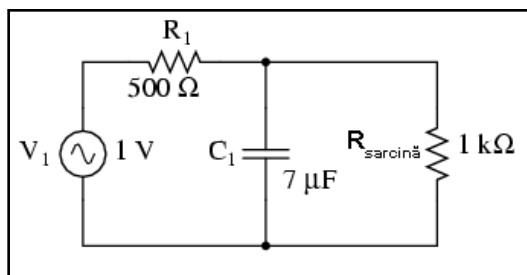
În această configurație, impedanța bobinei crește odată cu creșterea frecvenței, iar această impedanță în serie cu rezistența de sarcină (bec, motor electric, ventilator, etc.) face ca semnalele de frecvență înaltă să nu ajungă la sarcină (blocarea/filtrarea lor).

### Diagrama Bode



Grafic, comportamentul filtrului, atunci când este supus unei forme de undă multi-frecvență, este cel alăturat.

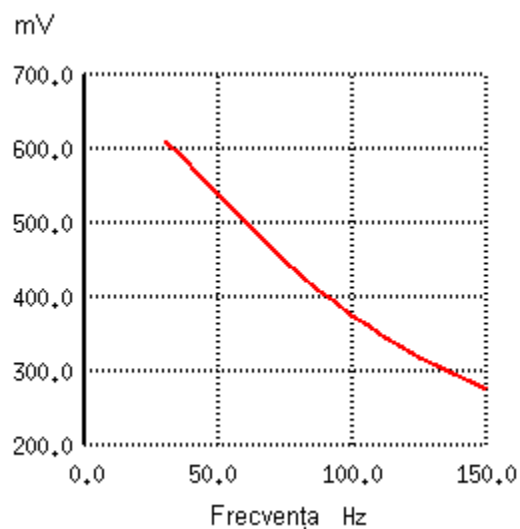
### Filtrul trece-jos capacitiv



Să considerăm și varianta capacitivă a aceluiași filtru.

Impedanța condensatorului scade odată cu scăderea frecvenței. Această impedanță mică, conectată în paralel cu rezistența de sarcină, duce la scurt-circuitarea celei din urmă la semnalele de frecvență înaltă, iar mare parte din căderea de tensiune se va regăsi pe rezistorul serie  $R_1$ .

### Diagrama Bode



Grafic, acest lucru arată precum în figura alăturată.

## Comparație între filtrele trece-jos inductive și capacitive

Filtrul trece-jos inductiv este cât se poate de simplu, constând doar dintr-un singur component, bobina. Versiunea capacitivă a aceluiași filtru nu este nici ea mai complicată, constând dintr-un rezistor și un condensator. Totuși, filtrele capacitive, chiar dacă sunt puțin mai complexe, sunt cele mai des întâlnite configurații, deoarece condensatoarele sunt în general elemente reactive mai „pure” decât bobinele, prin urmare, comportamentul acestora este mult mai previzibil. Prin pur se înțelege faptul că rezistența condensatoarelor este mult mai mică decât cea a bobinelor, fiind astfel aproape 100% reactive. Bobinele, pe de altă parte, prezintă efecte disipative importante (rezistive), atât în lungimea firelor utilizate cât și prin pierderile magnetice din miezul magnetic. Condensatoarele sunt mult mai puțin supuse efectelor de „cuplaj” cu alte componente și sunt mult mai ieftine decât bobinele.

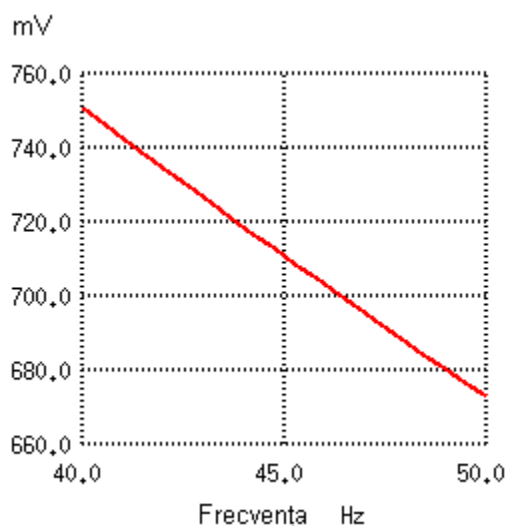
Totuși, filtrul trece-jos inductiv este adeseori preferat în cazul redresării tensiunii de curent alternativ în curent continuu pentru eliminarea vârfurilor create în această situație, rezultând o componentă continuă pură. Principalul motiv al alegerii constă în necesitatea unei rezistențe mici a filtrului pentru ieșirea unei astfel de surse de alimentare. Un filtru capacitiv necesită introducerea unei rezistențe suplimentare în serie cu sursa, pe când unul inductiv nu. Dacă în circuitul de curent continuu considerat, adăugarea unei rezistențe suplimentare nu este de dorit, atunci filtrul trece-jos inductiv este cea mai bună alegere pentru filtrarea formei de undă. Pe de altă parte, dacă prioritățile principale sunt un volum și o greutate scăzută, atunci filtrul capacitiv este cea mai bună alegere.

## Frecvența de tăiere

Toate filtrele trece-jos au o anumită proprietate, și anume, frecvența de tăiere, și reprezintă frecvența peste care tensiunea de ieșire a circuitului scade sub 70.7% din valoarea tensiunii de intrare. Această valoare de 70.7% nu este arbitrară, chiar dacă pare așa la prima vedere.

Într-un circuit simplu trece-jos capacitiv sau inductiv, frecvența de tăiere reprezintă frecvența la care reactanță capacitivă este egală cu rezistență (ambele valori fiind exprimate în ohmi). Într-un circuit trece-jos capacitiv simplu (un rezistor și un condensator), frecvența de tăiere este dată de următoarea formulă:

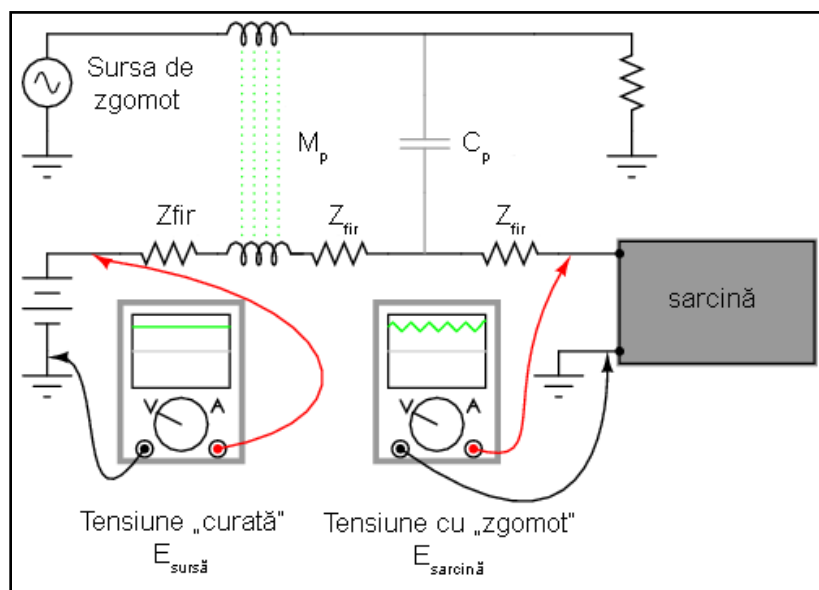
$$f_{\text{tăiere}} = \frac{1}{2\pi RC}$$



Realizând calculele, ajungem la valoarea frecvenței de tăiere, 45,473 Hz. Întrucât formula de mai sus nu ia în considerare și rezistența de sarcină din circuit, refacem graficul de mai sus, eliminând sarcina din circuit.

Este important de ținut minte **că** răspunsul filtrului depinde de valorile componentelor acestuia precum și de impedanța sarcinii. Dacă ecuația frecvenței de tăiere nu ia în considerare și această impedanță, sarcina nu este luată în considerare, iar valorile reale ale frecvenței de tăiere vor fi diferite de valoarea calculată.

### Utilizarea filtrelor pentru eliminarea zgomotului

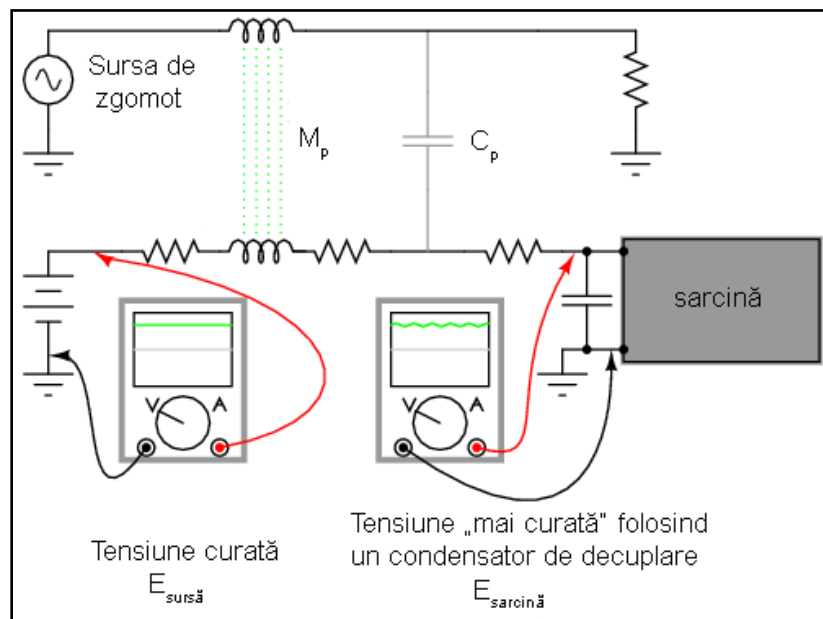


O aplicație frecventă a filtrului trece-jos capacitiv este în cadrul circuitelor ce prezintă componente sau secțiuni susceptibile zgomotului electric. Un exemplu este suprapunerea zgomotului de curent alternativ peste liniile electrice de curent continuu folosite pentru alimentarea circuitelor sensibile prin capacitatea și inductanța mutuală parazită ( $C_p$  și  $M_p$ ).

Aparatul de măsură din stânga măsoară o tensiune de alimentare în curent continuu „curată”. După realizarea cuplajului cu circuitul de curent alternativ, prin inductanța mutuală și capacitatea parazită, tensiunea măsurată la bornele sarcinii prezintă un amestec de curent continuu și curent alternativ, componenta alternativă fiind cea nedorită. În mod normal ne-am aștepta ca  $E_{sarcină}$  să fie identică cu  $E_{sursă}$  datorită faptului că nu există întreruperi ale conductorilor de la sursă la sarcină, iar cele două seturi de câte două puncte ar trebui să fie comune

din punct de vedere electric. Totuși, amplitudinea zgomotului poate varia în diferite puncte ale sistemului de curent continuu.

### Condensatorul de decuplare



Scopul nostru este de a preveni astfel de zgomote în circuitul de curent continuu, iar pentru aceasta este suficientă conectarea unui filtru trece-jos la ieșirea circuitului, înainte de sarcină, pentru blocarea oricăror semnale de cuplaj nedorite.

Sub forma cea mai simplă, acest filtru nu este nimic mai mult decât un condensator conectat direct la bornele sarcinii, acesta prezentând o impedanță foarte mică față de orice zgomot de curent alternativ. Un astfel de condensator poartă numele de condensator de decuplare.

Capacitatea unui condensator de decuplare este în mod normal în jurul valorii de  $0,1 \mu F$ , sau peste, fiind capacitatea minimă necesară pentru producerea unei impedanțe suficient de mari pentru scurt-circuitarea oricărui zgomot.

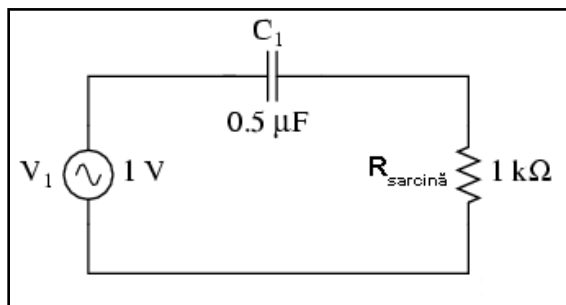
### 3. Filtru trece-sus

- Un filtru trece-sus permite trecerea semnalelor de frecvență înaltă de la sursă spre sarcină, și blochează semnalele de frecvență joasă
- Circuitele trece-sus capacitive folosesc un condensator conectat în serie cu sarcina, prin blocarea semnalelor de frecvențe nedorite
- Circuitele trece-sus inductive folosesc un rezistor conectat în serie cu o bobină, ambele componente fiind conectate în paralel cu sarcina, prin scurt-circuitarea semnalelor de frecvențe nedorite
- Frecvența de tăiere pentru un filtru trece-sus, reprezintă frecvența la care tensiunea de ieșire este egală cu 70,7% din tensiunea de intrare. Peste această frecvență de tăiere, tensiunea de ieșire este mai mare decât 70,7% din tensiunea de intrare, și invers

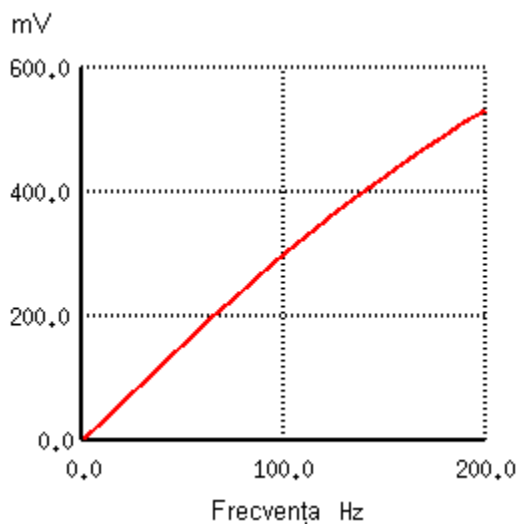
### Definiție

Filtrul trece-sus este exact opusul filtrului trece-jos, după cum sugerează și numele: permite trecerea semnalelor de frecvență înaltă și blochează trecerea semnalelor de frecvență joasă. Modul de conectare al elementelor reactive în circuit este exact opus față de filtrele trece-jos.

### Filtru trece-sus capacitiv

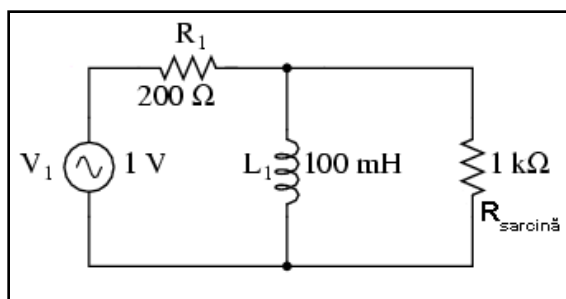


Impedanța condensatorului din circuitul considerat crește odată cu descreșterea frecvenței. Această impedanță în serie cu sarcina tinde să blochează semnalele de frecvență joasă ce ar putea ajunge pe sarcină.

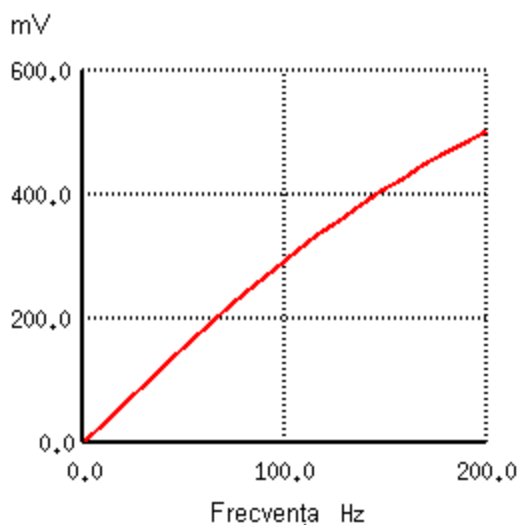


După cum se poate vedea în diagrama Bode, răspunsul filtrului capacitiv trece-sus crește cu creșterea frecvenței.

### Filtrul trece-sus inductiv



Impedanța bobinei scade odată cu scăderea frecvenței. Această impedanță mică conectată în paralel cu sarcina, tinde să scurt-circuiteze semnalele de frecvență joasă, astfel că acestea nu mai ajung la sarcină. Prin urmare, mare parte a căderii de tensiune se va regăsi pe rezistorul  $R_1$ .



După cum se poate vedea în diagrama Bode, răspunsul filtrului inductiv trece-sus crește cu creșterea frecvenței.

## Comparație între filtrele trece-sus inductive și capacitive

De data aceasta, schema filtrului capacitiv trece-sus este mai simplă decât cea inductivă, necesitând doar un singur component în plus, un condensator. Din nou, puritatea reactivă a condensatoarelor față de bobine face ca filtrele capacitive să fie cel mai des folosite.

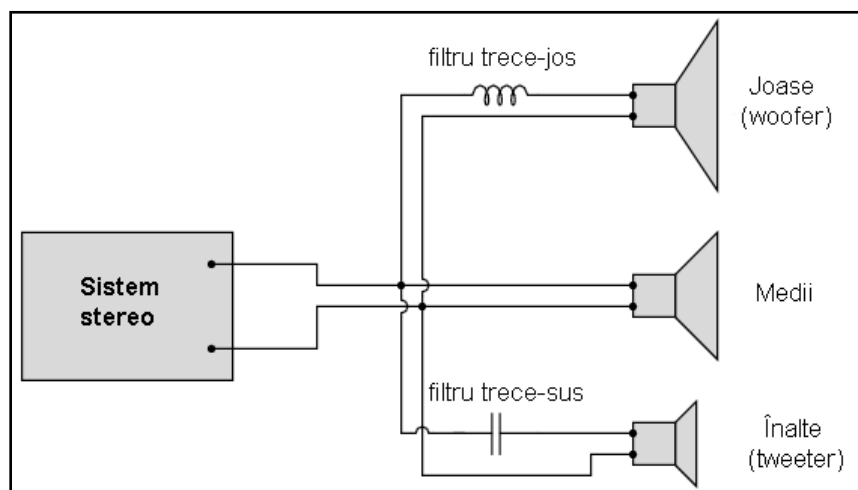
## Frecvența de tăiere

La fel ca în cazul filtrelor trece-jos, și filtrele trece-sus au o frecvență de tăiere specifică. Peste valoarea acestei frecvențe, tensiunea de ieșire este mai mare de 70,7% din valoarea tensiunii de intrare. Formula de calcul a frecvenței de tăiere este aceeași ca și în cazul filtrelor trece-jos:

$$f_{\text{tăiere}} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Rezistența din formulă, în cazul circuitului capacitiv trece-sus, este chiar rezistența de sarcină.

## Filtrarea unui sistem audio



Să considerăm un sistem audio, ca și exemplu. Un condensator conectat în serie cu tweeter-ul (înaltele) are rolul de filtru trece-sus, impunând circuitului de ieșire o impedanță mare frecvențelor joase (bas), prevenind astfel risipa de putere pe un difuzor ce este inefficient în reproducerea acestor sunete.

Asemănător, bobina conectată în serie cu woofer-ul (bas) are rolul de filtru trece-jos, permițând doar trecerea acelor sunete pe care difuzorul le și poate reproduce cu succes. În acest circuit simplu, difuzorul pentru frecvențele medii este supus întregului spectru de frecvențe produs de aparatul stereo. Câteodată se folosesc sisteme de filtrare mult mai elaborate, dar ideea generală este aceasta. În acest exemplu este prezentat doar un singur canal (stânga sau dreapta). Un sistem real ar conține 6 difuzoare: 2 joase, 2 medii și 2 înalte.

Pentru a mări și mai mult performanțele acestui sistem, am putea construi un circuit de filtrare capabil să permită trecerea frecvențelor ce se află între joase și înalte spre difuzorul de medii, astfel încât să nu existe putere disipată (de frecvență înaltă sau joasă) pe un difuzor ce reproduce acest tip de sunete inefficient. Ceea ce vrem de fapt să realizăm în această situație, este un filtru trece bandă.

#### 4. Filtru trece-bandă

- Un filtru trece-bandă blochează frecvențele care sunt prea mici sau prea mari, permițând trecerea acelor frecvențe ce se regăsesc într-un anumit domeniu de frecvențe
- Filtrele trece-bandă pot fi construite prin conectarea în serie a unui filtru trece-jos și a unui filtru trece-sus, indiferent de ordinea lor

##### Definiție

Există aplicații în care este nevoie de filtrarea unei anumite benzi de frecvențe din totalul frecvențelor prezente în semnal. Circuitele de filtrare realizate pentru îndeplinirea acestui obiectiv pot fi realizate dintr-un filtru trece-jos și unul trece-sus, conectate împreună. Rezultatul este un filtru denumit trece-bandă.

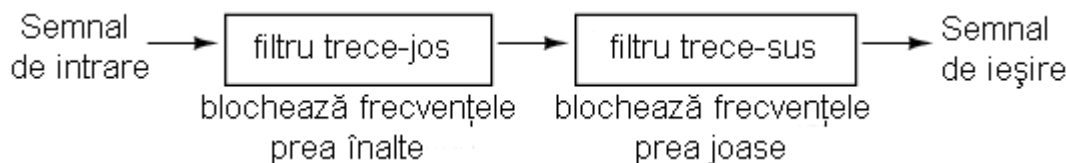
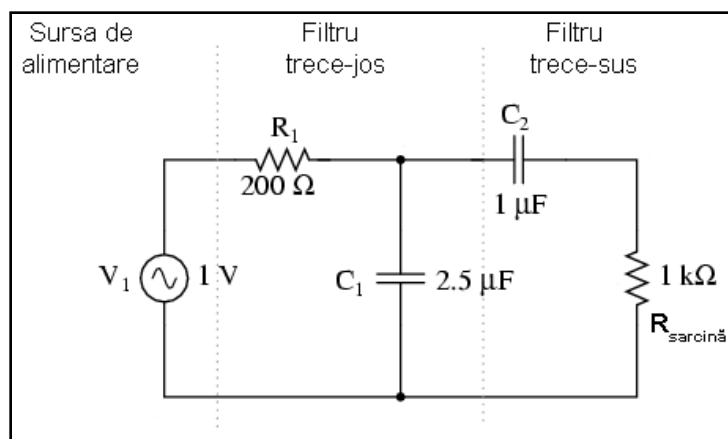


Diagrama de sus reprezintă modul de conectare al celor două filtre.

Rezultatul acestei combinații serie dintre cele două filtre este un circuit ce va permite trecerea acelor frecvențe ce se regăsesc între cele două limite, nici mai mari, nici mai mici.

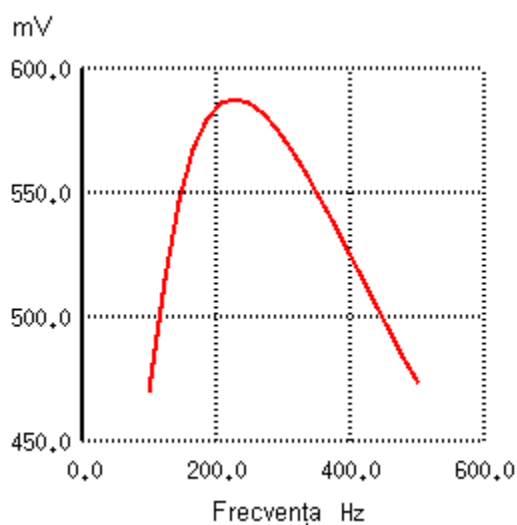
##### Filtrul trece-bandă capacitiv





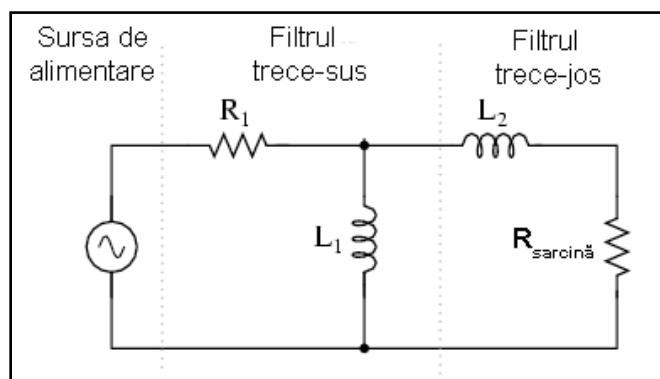
Folosind componente reale, circuitul electric al filtrului trece-bandă astfel conceput, arată precum în figura alăturată.

### Diagrama Bode



Să vedem și răspunsul în frecvență (diagrama Bode) a filtrului capacitiv trece-bandă.

### Filtrul trece-bandă inductiv



Filtrele trece-bandă pot fi construite folosind elemente inductive, dar, după cum am mai menționat, filtrele capacitive sunt preferate în locul celor inductive datorită „purității” reactive a condensatoarelor. Circuitul electric al filtrului inductiv este cel din figura alăturată.

Faptul că filtrul trece-sus se află poziționat înainte filtrului trece-jos, nu are nicio importanță din punct de vedere al funcționalității filtrului.

## Limitele unui astfel de filtru

Deși idea combinării celor două filtre, trece-jos și trece-sus, într-unul singur, pentru a realiza un filtru trece-bandă este bună, aceasta posedă și unele dezavantaje. Deoarece acest tip de filtru funcționează utilizând proprietatea fiecărui filtru în parte de a bloca frecvențele nedorite, construirea unui astfel de filtru, astfel încât să nu blocheze în anumită măsură și frecvențele din banda dorită, este de obicei dificilă.

Atât filtrul trece-jos cât și filtrul trece-sus vor bloca toate semnalele într-o anumită măsură, iar efectul lor combinat se traduce printr-o amplitudine redusă a semnalului chiar și în domeniul frecvențelor dorite (de trecere). Putem observa acest lucru din diagrama de mai sus, unde tensiunea sarcinii nu depășește valoarea de 0,6 V, deși tensiunea sursei este de 1 V. Această atenuare a semnalului de ieșire devine și mai pronunțată în cazul în care filtrul are un scop mult mai restrictiv (pantă mai mare a unde, banda de trecere a frecvențelor mai îngustă).

## 5. Filtru stop-bandă

- Scopul filtrului stop-bandă este înlăturarea frecvențelor aflate într-un anumit domeniu, permițând doar trecerea acelor frecvențe ce se află în afara acestuia
- Filtrele stop-bandă pot fi realizate prin conectarea în paralel a unui filtru trece-jos cu un filtru trece-sus. Ambele filtre sunt în configurație „T”, prin urmare, acest tip de filtru mai este cunoscut și sub numele de „filtru stop-bandă în dublu-T”

### Definiție

Filtrul stop-bandă permite trecerea tuturor frecvențelor ce se află peste sau sub un anumit domeniu / bandă de frecvențe determinat de elementele sale componente. Și acest tip de filtru poate fi realizat prin conectarea unui filtru trece-jos cu un filtru trece-sus, doar că de data aceasta conectarea se realizează în paralel, nu în serie cum era cazul filtrului trece-bandă.

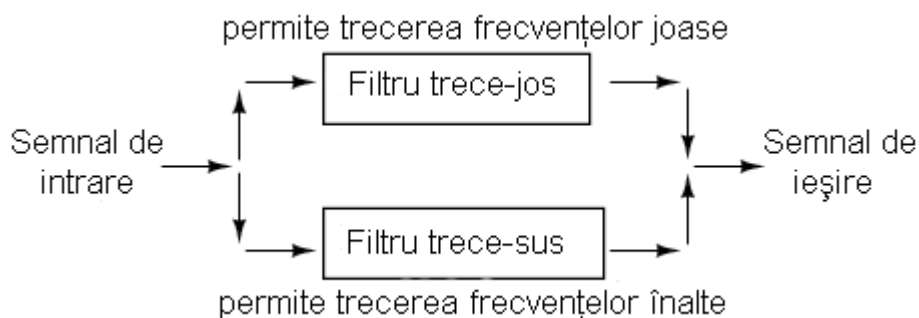
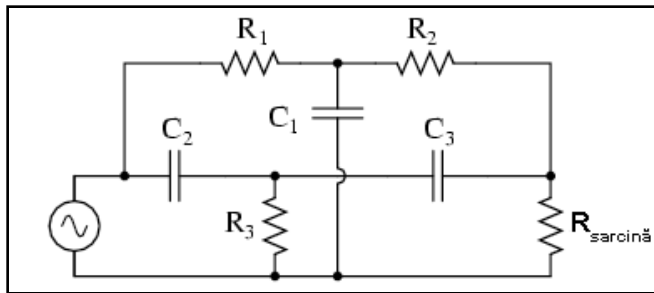


Diagrama bloc a filtrului este prezentată în figura alăturată.

## Filtrul stop-bandă capacitiv



Folosind componente reale, circuitul stop-bandă capacitiv arată în felul următor.

Filtrul trece-jos este compus din  $R_1$ ,  $R_2$  și  $C_1$  în configurație „T”, iar filtrul trece-sus este compus din  $C_2$ ,  $C_3$  și  $R_3$  de asemenea în configurație „T”. Împreună, cele două filtre formează filtrul stop-bandă cunoscut sub numele de „dublu T”.

Răspunsul acestui filtru este foarte precis atunci când sunt respectate următoarele proporții în alegerea elementelor constitutive:

$$R_1 = R_2 = 2R_3$$

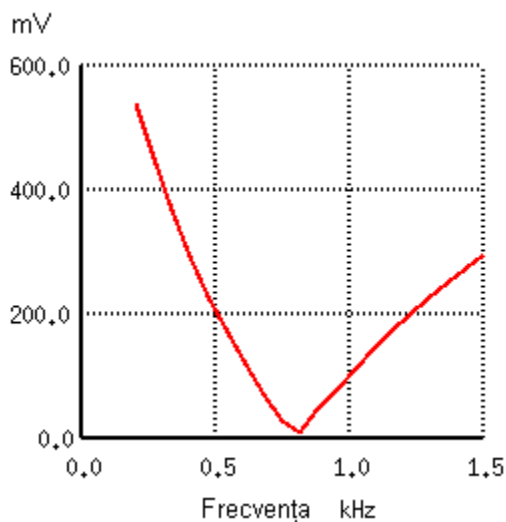
$$C_2 = C_3 = 0,5C_1$$

### Frecvența de trecere

Utilizând aceste rații, frecvența maximă de trecere poate fi calculată astfel:

$$f_{trecere} = \frac{1}{4\pi R_3 C_3}$$

### Diagrama Bode



Putem vedea și răspunsul în frecvență foarte bun al acestui filtru, folosind proporțiile de mai sus, în diagrama (Bode) alăturată.

## 6. Filtre rezonante

- Filtrele trece-jos, trece-sus, trece-bandă sau stop-bandă pot fi proiectate utilizând combinații rezonante de condensatoare și bobine fără a fi necesară conectarea rezistorilor ce doar ar „împiedica” trecerea frecvențelor dorite dinspre sursă spre sarcină

### Scop

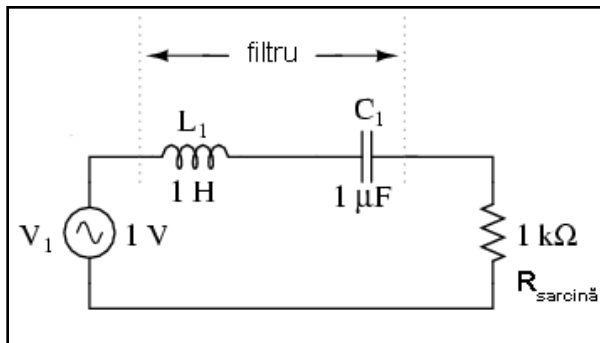
Filtrele considerate până în acest moment au fost compuse exclusiv din condensatoare sau bobine, dar nu ambele tipuri de componente în același timp. Știm că circuitele ce folosesc combinații de L și C tind să rezoneze, iar această proprietate poate fi exploatată în construcția filtrelor trece-bandă și stop-bandă.

Circuitele LC serie prezintă o impedanță minimă la rezonanță, iar circuitele LC paralel impedanță maximă la frecvența de rezonanță. Există prin urmare două strategii de bază pentru construcția filtrelor trece- respectiv stop-bandă.

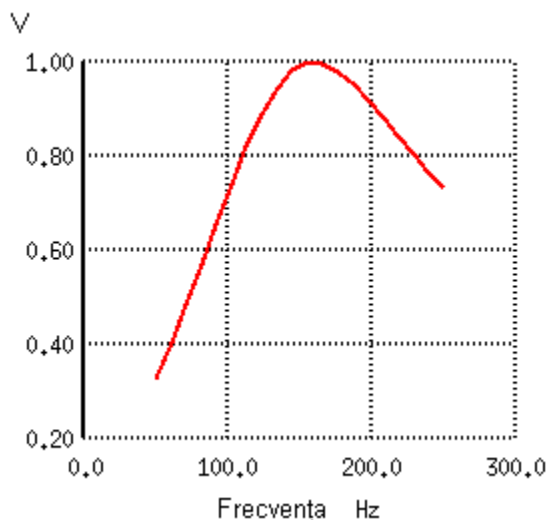
### Filtru trece-bandă rezonant

Pentru acest tip de filtru, există, de asemenea, două strategii: circuit LC serie sau LC paralel.

#### Filtru trece-bandă LC serie



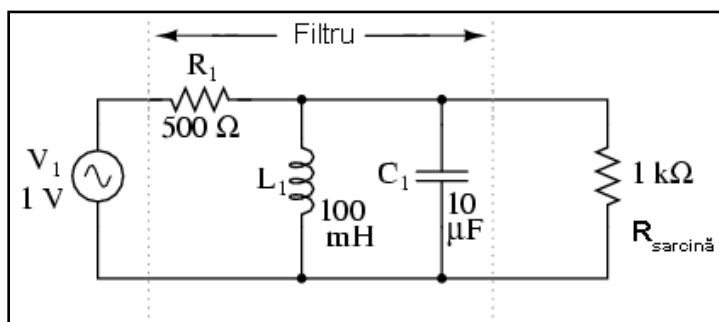
Circuitul LC serie permite trecerea semnalului la frecvența de rezonanță (impedanță mică - scurt-circuit), și blochează toate celelalte frecvențe (impedanță mare - circuit deschis), astfel că acestea nu ajung la sarcină, după cum se poate vedea în diagramă.



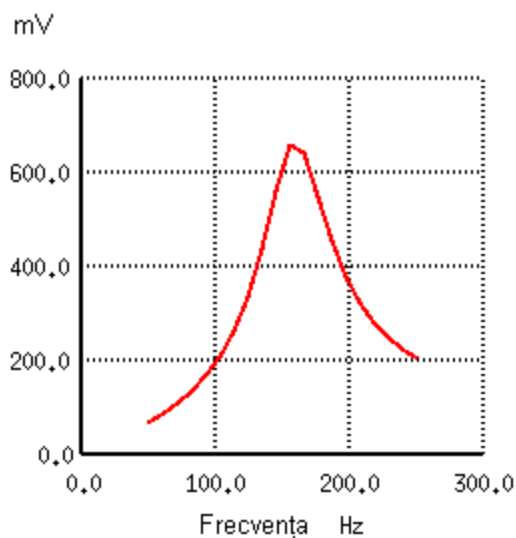
Putem observa că în cazul acestui tip de filtru, nu există practic nicio atenuare a semnalului în banda de trecere, astfel că tensiunea de ieșire pe rezistența de sarcină este aceeași cu tensiunea de alimentare a sursei; acesta nu este și cazul filtrelor construite exclusiv din condensatoare sau bobine.

De asemenea, din moment ce principiul de funcționare al filtrului se bazează pe principiul rezonanței LC serie, frecvența de rezonanță nefiind prin urmare afectată de valoarea rezistenței prezentă în circuit, valoarea rezistenței de sarcină nu va influența în niciun fel frecvența de trecere. Totuși, diferite valori ale rezistenței de sarcină vor duce la modificarea pantei diagramei Bode (selectivitatea filtrului).

### Filtrul trece-bandă LC paralel



Circuitul LC paralel permite trecerea semnalului la frecvența de rezonanță (impedanță mare - circuit deschis) spre sarcină, și blochează toate celelalte frecvențe (impedanță mică - scurt-circuit), căderea de tensiune regăsindu-se în marea ei parte pe  $R_1$ , astfel că acestea nu ajung la sarcină, după cum se poate vedea în diagramă.



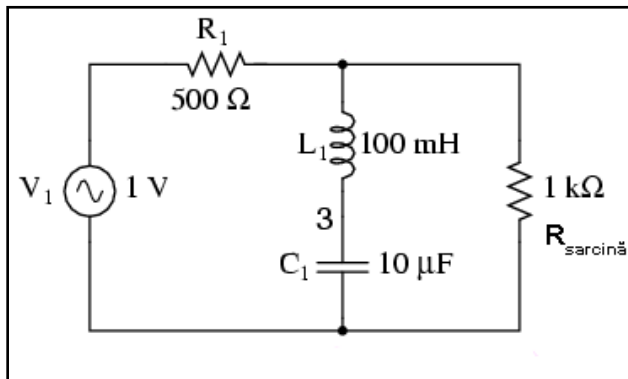
Acest tip de filtru rezonant, asemenea filtrelor trece-sus și trece-jos, nu va putea transmite întreaga tensiune de la sursă spre sarcină datorită rezistorului conectat în serie ce va prelua tot timpul o parte din căderea de tensiune totală existentă în circuit.

Putem menționa că acest tip de filtru trece-bandă rezonant este folosit pe scară largă în radiourile analogice, pentru selectarea unei anumite frecvențe din cele recepționate de antenă. Practic, se folosește un disc selector pentru alegerea postului de radio, disc ce modifică capacitatea unui condensator variabil dintr-un circuit LC paralel.

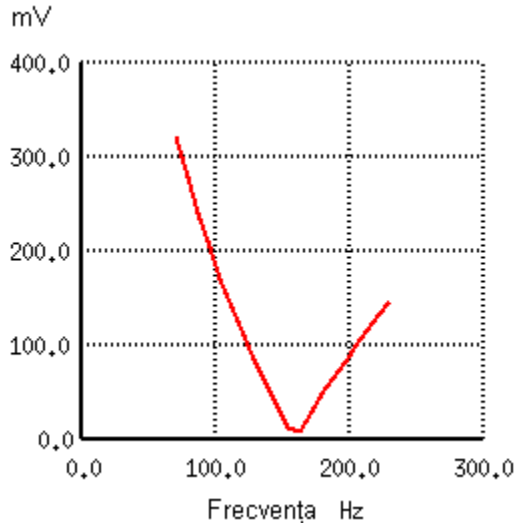
## Filtru stop-bandă rezonant

Din nou, avem două strategii la dispoziție, circuitul LC serie sau LC paralel.

### Filtrul stop-bandă LC serie

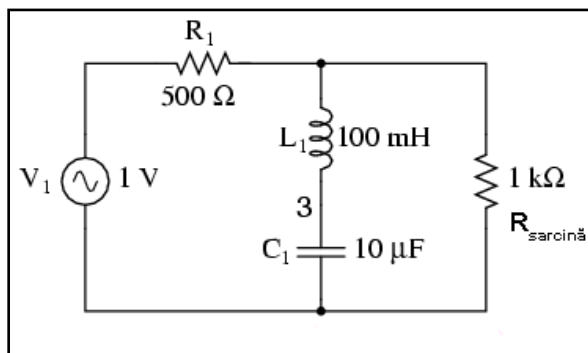


Folosit în această combinație, filtrul LC prezintă o impedanță foarte scăzută față de semnal, la frecvența de rezonanță, întreaga cădere de tensiune regăsindu-se pe rezistorul  $R_1$ , iar semnalul nu este astfel „văzut” de către sarcină.

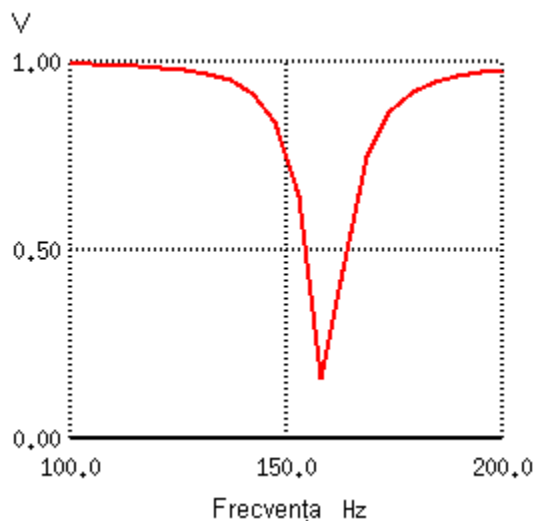


Răspunsul în frecvență a filtrului discutat este prezentat în figura alăturată.

### Filtrul stop-bandă LC paralel



Componentele LC conectate în paralel prezintă o impedanță mare la frecvența de rezonanță, blocând astfel semnalele de la sursa spre sarcină, la frecvența respectivă, și permite trecerea tuturor celorlalte semnale (alte frecvențe decât cea de rezonanță) de la sursă spre sarcină.



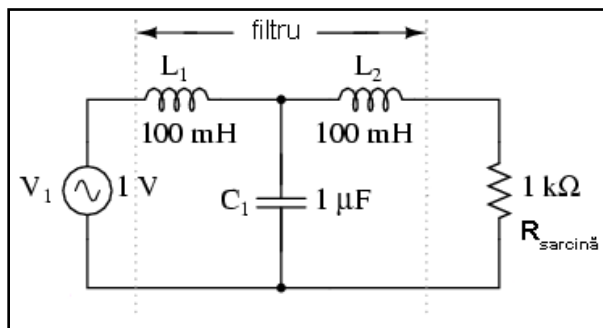
Din nou se poate observa faptul că absența unui rezistor serie duce la o atenuare minimă a semnalelor dorite. Amplitudinea semnalului la frecvența de trecere, pe de altă parte, este foarte mică. Cu alte cuvinte, acesta este un filtru foarte selectiv.

În toate aceste circuite de filtrare rezonante, selectivitatea depinde în mare măsură de „puritatea” bobinelor și a condensatoarelor utilizate. În cazul în care există o rezistență parazită, aceasta va afecta abilitatea filtrului de discriminare precisă a frecvențelor, și este posibilă introducerea efectelor antirezonante ce afectează frecvențele de trecere.

## Filtre trece-jos și trece-sus rezonante

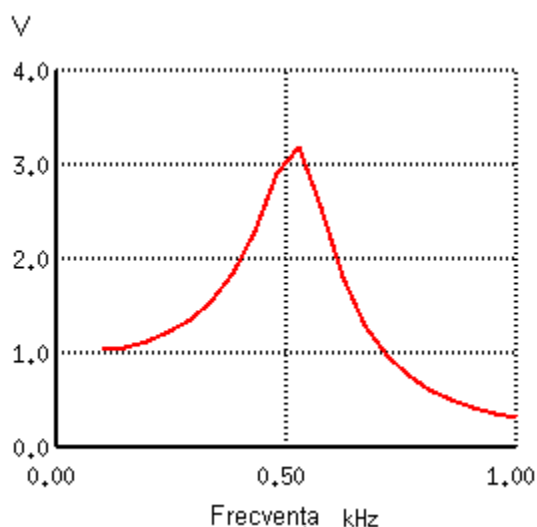
După ce am analizat filtrele standard RC și LC trece-jos și trece-sus, ne-am putea imagina că se poate realiza o proiectare mai eficientă a acestor tipuri de filtre combinând efectele condensatoarelor și a bobinelor în același circuit.

### Filtru trece-jos LC



Bobinele ar trebui să blocheze trecerea frecvențelor înalte, iar condensatorul ar trebui să blocheze și el trecerea aceluiași frecvențe, efectele lor combinate permițând doar trecerea semnalelor de frecvență joasă de la sursă spre sarcină.

La prima vedere, aceasta pare o strategie bună; în plus, este posibilă și eliminarea rezistorului serie. Totuși, trebuie realizat faptul că orice combinație condensator-bobină poate duce la efecte rezonante la o anumită frecvență, iar acesta nu este un lucru de dorit.



Să urmărim răspunsul în frecvență a filtrului de mai sus, pe rezistența de sarcină ( $R_{sarcină}$ ).

Ceea ce a fost gândit ca un filtru trece-jos s-a dovedit a fi un filtru trece bandă cu o frecvență de trecere în jurul valorii de 526 Hz, frecvența de rezonanță a condensatorului și a bobinei în acest caz.

Problema este că impedanța de intrare și impedanța de ieșire a filtrului LC trebuie să fie egală. Cu alte cuvinte, impedanța sursei de alimentare trebuie să fie egală cu impedanța de intrare a filtrului, iar impedanța de ieșire a filtrului trebuie să fie egală cu impedanța sarcinii ( $R_{sarcină}$ ) pentru ca răspunsul filtrului să fie cel așteptat.

Impedanța de intrare și de ieșire a filtrului este rădăcina pătrată a raportului dintre  $L$  și  $C$ :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

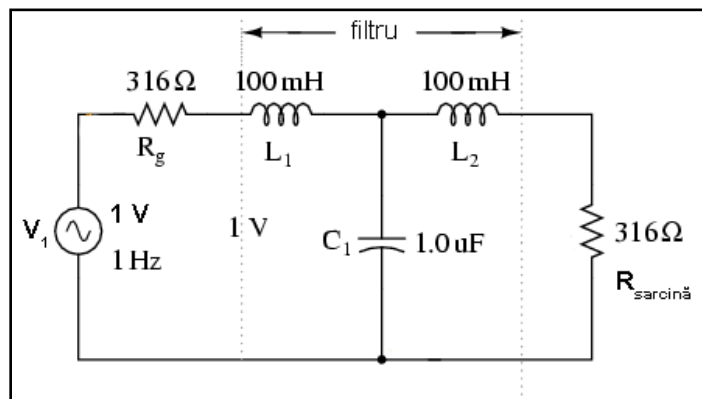
Folosind valorile componentelor de pe circuit, putem afla impedanța filtrului și impedanțele necesare ale sursei și ale sarcinii:

$$\text{pentru } L = 100 \text{ mH și } C = 1 \mu\text{F}$$

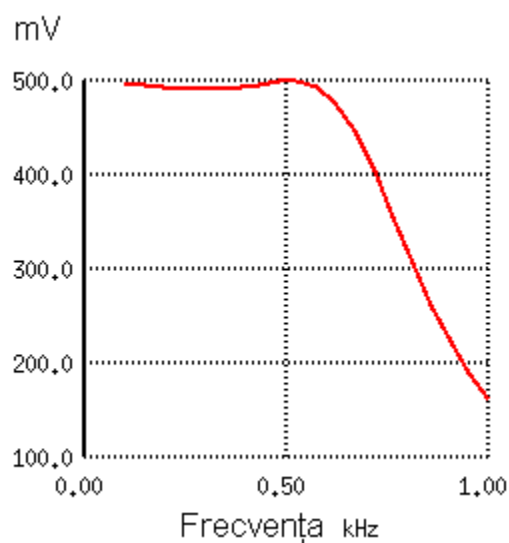


$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{100 \text{ mH}}{1 \mu\text{F}}} = 316 \Omega$$

### Modificarea rezistenței de intrare



Astfel, în circuitul de mai sus putem adăuga rezistorul  $R_g$  de  $316 \Omega$  în serie cu sursa de tensiune și modificăm  $R_{\text{sarcină}}$  de la  $1.000 \Omega$  la  $316 \Omega$ . Dacă ar fi fost necesară alimentarea unei sarcini de  $1.000 \Omega$ , am fi putut modifica raportul  $L/C$  pentru a păstra egalitatea față de sarcină.



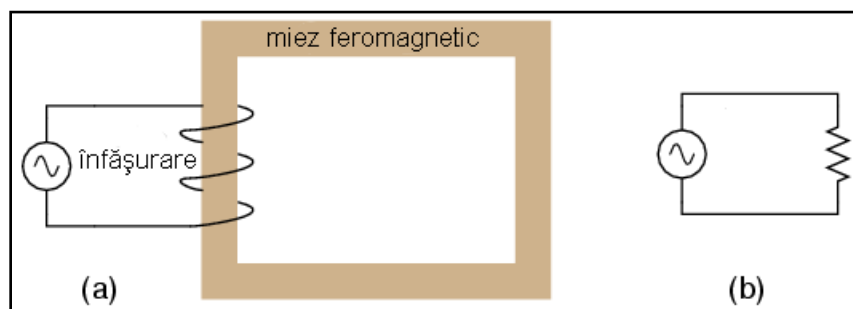
Răspunsul în frecvență al filtrului arată de data aceasta mult mai bine.

## 09 – Transformatorul

### 1. Transformatorul și inductanța mutuală

- Un transformator este un dispozitiv construit din două sau mai multe bobine, una dintre ele alimentată în curent alternativ ce induce o tensiune alternativă în cealaltă bobină. Dacă a doua bobină este conectată la o sarcină, puterea sursei de tensiune a primei bobine este cuplată electromagnetic la sarcina celei de a doua
- Inductanța mutuală reprezintă situația în care fluxurile magnetice a două sau a mai multe bobine sunt cuplate între ele, astfel încât există o tensiune indusă într-una dintre bobine direct proporțională cu rata de variație a curentului în cealaltă
- Bobina transformatorului alimentată în curent alternativ se numește înfășurare primară. Bobina nealimentată a transformatorului se numește înfășurare secundară
- Fluxul magnetic al miezului este defazat cu  $90^0$  în urma tensiunii de alimentare. Curentul furnizat de sursa de alimentare în înfășurarea primară pentru producerea acestui flux magnetic, poartă numele de curent de magnetizare, și este și acesta defazat cu  $90^0$  în urma tensiunii de alimentare
- Curentul total din primar al unui transformator neconectat la sarcină, se numește curent de excitație, și este compus din curentul de magnetizare plus curentul datorat pierderilor miezului feromagnetic. Într-un transformator real, forma de undă a acestuia nu este niciodată sinusoidală
- Fluxul magnetic al miezului induce o tensiune electrică în orice înfășurare realizată în jurul acestuia. Tensiunile induse sunt, ideal, în fază cu tensiunea primară (a sursei) și au aceeași formă de undă
- Orice curent prin secundar, datorită sarcinii, va produce un curent echivalent în înfășurarea primară, curent generat de sursă, ca și când sursa ar fi conectată direct la sarcină

#### Înfășurarea primară



Să presupunem că avem un miez feromagnetic închis (formă dreptunghiulară) și înfășurăm un conductor metalic izolat alimentat în curent alternativ în jurul uneia dintre laturi.

Fiindcă ceea ce am realizat este de fapt o bobină, această înfășurare în jurul miezului feromagnetic ar trebui să se opună tensiunii aplicate datorită reactanței inductive, limitând astfel curentul prin înfășurare conform ecuațiilor:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$I = \frac{E}{X} \text{ sau } I = \frac{E}{Z}$$

## Funcționarea circuitului

Pentru a clarifica acest exemplu totuși, vom analiza mai atent interacțiunile ce iau naștere între tensiune, curent și fluxul magnetic în acest dispozitiv.

Conform legii lui Kirchhoff pentru tensiune, suma tuturor tensiunilor dintr-un circuit închis trebuie să fie egală cu zero. În exemplul de mai sus, putem aplica această lege generală a electricității pentru descrierea tensiunilor sursei, respectiv a înfășurării. Ca în oricare circuit format dintr-o singură sursă și o singură sarcină, căderea de tensiune a sarcinii trebuie să fie egală cu tensiunea produsă de sursă, presupunând că nu există căderi de tensiune în lungul firelor (rezistența lor este zero). Cu alte cuvinte, sarcina, reprezentată de înfășurare, trebuie să producă o tensiune de semn contrar și de aceeași amplitudine cu sursa.

Dar de unde apare această tensiune opusă tensiunii sursei? Dacă sarcina ar fi un rezistor (cazul „b” din figura de mai sus), căderea de tensiune ia naștere ca urmare a pierderilor sub formă de căldură datorate „frecării” electronilor la trecerea prin această rezistență. În cazul unei bobine perfecte (rezistență zero a înfășurării), tensiunea opusă se prezintă sub o altă formă, și anume, reacția față de fluxul magnetic variabil al miezului de fier. Atunci când forma de undă a curentului variază, variază și fluxul. Variația fluxului induce un câmp electromagnetic contrar.

## Relația dintre fluxul magnetic și tensiune indusă

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

unde,

e = tensiunea indusă instantanee (V)

N = numărul de spire a înfășurării (1 pentru fir simplu)

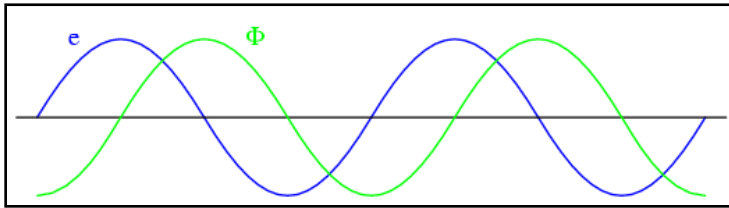
$\phi$  = fluxul magnetic (Wb)

t = timpul (s)

Formularea relației matematice între fluxul magnetic ( $\Phi$ ) și tensiunea indusă îi este atribuită lui Michael Faraday, și arată precum în figura alăturată.

Tensiunea instantanee indusă (e) în înfășurare, în orice moment, este egală cu produsul dintre numărul spirelor înfășurării (N) și variația instantanee a fluxului magnetic ( $d\Phi/dt$ ) al bobinei

## Formele de undă



Grafic, formele de undă sunt sinusoidale (presupunând că forma de undă a sursei de alimentare este sinusoidală), fluxul fiind defazat în urma tensiunii cu 90°.

## Tensiunea magnetomotoare

Legea lui Ohm pentru circuite electrice:

$$E = IR$$

Legea lui Ohm pentru circuite magnetice:

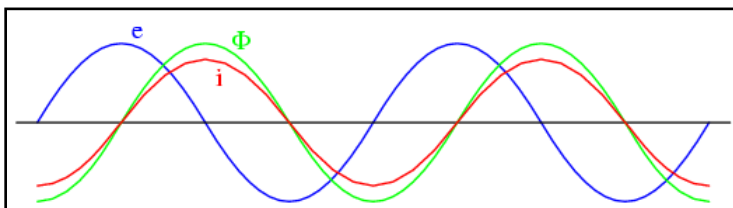
$$u_{mm} = \phi \mathfrak{R}$$

Fluxul magnetic printr-un material feromagnetic este analog curentului printr-un conductor: trebuie să fie „împins” de o forță exterioară pentru a se forma. În circuitele electrice, această forță o reprezintă tensiunea (mai precis, tensiunea electromotoare, prescurtat „tem”). În „circuitele” magnetice, această forță este reprezentată de tensiunea magnetomotoare (prescurtat „tmm” și simbolizat prin  $u_{mm}$ ).

Tensiunea magnetomotoare și fluxul magnetic se află în strânsă legătură una cu cealaltă prin intermediul unei proprietăți a materialelor magnetice, reluctanța, concept analog rezistenței în circuitele electrice.

În exemplul de mai sus, tensiunea magnetomotoare (tmm) necesară producerii acestui flux magnetic variabil trebuie să fie furnizată de un curent variabil prin înfășurare. Tensiunea magnetomotoare generată de înfășurarea unui electromagnet este egală cu produsul dintre curentul prin înfășurare și numărul de spire al înfășurării, iar unitatea de măsură a tensiunii magnetomotoare este Amper-spiră. Deoarece relația matematică dintre fluxul magnetic și tmm este direct proporțională, iar relația dintre tmm și curent este de asemenea direct proporțională, curentul prin înfășurare este în fază cu fluxul magnetic:

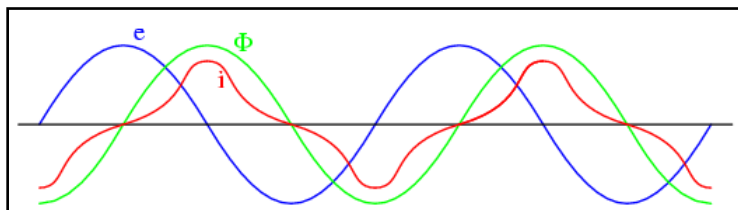
## Curentul de magnetizare



Acesta este și motivul pentru care curentul într-o bobină este defazat în urma tensiunii cu 90°: deoarece aceasta este defazarea necesară producerii unui flux magnetic a cărui rată de variație poate produce o tensiune în opoziție de

fază cu tensiunea aplicată. Datorită funcției sale de producere a tensiunii magnetomotoare pentru miezul feromagnetic, acest curent este câteodată numit și curent de magnetizare.

## Saturația miezului feromagnetic



Trebuie menționat faptul că acest curent prin înfășurare nu este perfect sinusoidal, iar acest lucru se datorează ne-liniarității curbei de magnetizație ( $B / H$ ) a fierului. Dacă bobina este construită ieftin, folosind cât mai puțin fier cu

puțință, densitatea fluxului magnetic poate atinge valori mari, aproape de saturație, rezultatul fiind o formă de undă a curentului de magnetizare ce arată aproximativ precum în figura alăturată.

Atunci când un material feromagnetic se apropie de fluxul magnetic de saturație, este nevoie de tensiuni magnetomotoare din ce în ce mai mari pentru menținerea constantă a creșterii fluxului magnetic. Deoarece  $t_{mm}$  este direct proporțională cu valoarea curentului prin înfășurare ( $u_{mm} = NI$ ), creșterea foarte mare a  $t_{mm}$  necesare susținerii creșterii fluxului duce la creșteri mari ale curentului prin înfășurare, pentru a putea menține forma de undă a fluxului magnetic nedistorsionată (sinusoidală).

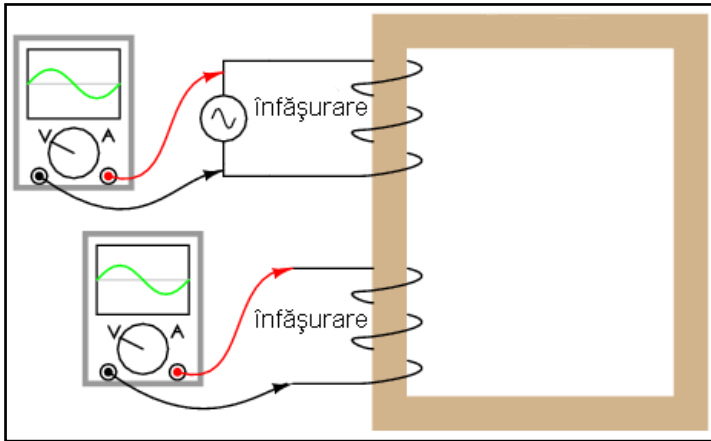
## Curentul de excitație

Situația este însă și mai complicată datorită pierderilor de energie din miezul feromagnetic. Efectul histerezisului și al curenților turbionari duce la accentuarea deformării formei de undă a curentului, alterându-i atât forma sinusoidală cât și defazajul, ce va fi cu puțin sub  $90^\circ$  în urma tensiunii. Acest curent al înfășurării constituit din suma tuturor efectelor magnetice asupra înfășurării, poartă numele de curent de excitație.

Distorsionarea curentului de excitație a unei înfășurări cu miez feromagnetic (bobină) poate fi minimizată dacă aceasta este concepută și funcționează la densități de flux foarte scăzute. Acest lucru necesită însă un miez cu o secțiune transversală mare, ceea ce duce la costuri ridicate și un volum mare. Pentru a simplifica lucrurile însă, vom presupune un miez feromagnetic ideal, fără pericolul saturației și fără pierderi, ceea ce duce la un curent de excitație perfect sinusoidal.

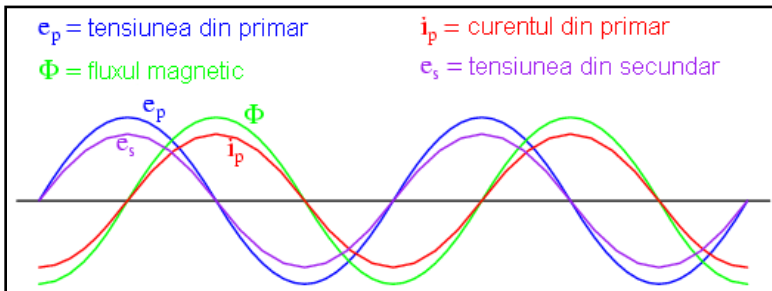
## Înfășurarea secundară

După cum am văzut în capitolul dedicat bobinelor, defazajul curentului față de tensiune cu  $90^\circ$  crează o condiție în care puterea este absorbită și eliberată alternativ de la circuit la bobină și invers. Dacă bobina este perfectă (rezistență zero, pierderi în miez zero, etc.), puterea disipată de aceasta va fi zero.



Să reluăm exemplul de mai sus, dar introducem de data această o nouă înfășurare în jurul aceluiași miez feromagnetic. Ca să diferențiem între cele două înfășurări, prima înfășurare o vom denumi înfășurarea primară sau simplu, primar, iar cea de a doua, înfășurarea secundară, sau simplu, secundar.

Dacă cea de a doua înfășurare este supusă unei variații a fluxului magnetic identice cu prima înfășurare, iar numărul de spire al înfășurării este același cu a primei înfășurări, atunci, conform principiului inducției electromagnetice, tensiunea indusă în secundar va fi egală în amplitudine și fază cu tensiunea sursei de alimentare a primarului.



În graficul alăturat, amplitudinea tensiunii induse este voit mai mică, pentru a putea face distincție între aceasta și tensiunea de alimentare.

## Inductanța mutuală

$$e_1 = L \frac{di}{dt} - \text{inductanța proprie}$$

$$e_2 = M \frac{di_1}{dt} - \text{inductanța mutuală}$$

unde,

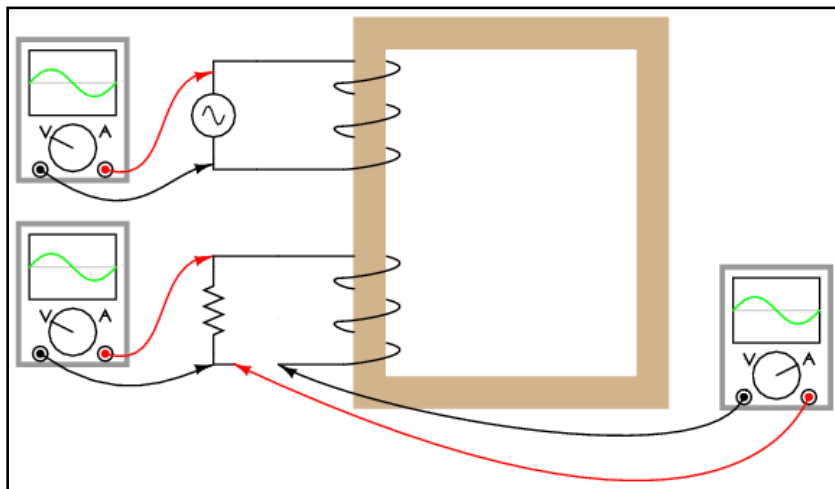
$e_2$  = tensiunea indusă în secundar

$i_1$  = curentul din primar

Acest efect al inducerii unei tensiuni într-o înfășurare ca răspuns a variației curentului din cealaltă înfășurare, poartă numele de inductanță mutuală. Unitatea de măsură este Henry, la fel ca inductanța proprie, iar simbolul matematic este „M”, în loc de „L”.

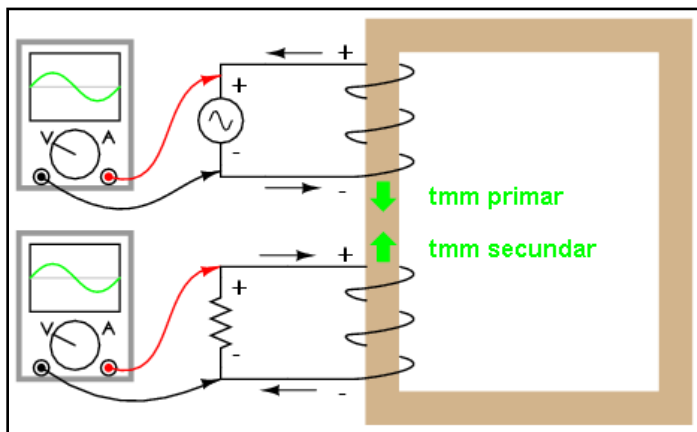
## Funcționarea transformatorului

În acest moment, în înfășurarea secundară nu există curent deoarece aceasta este deschisă. Dacă conectăm însă un rezistor în acest circuit, curentul alternativ prin înfășurare va fi în fază cu tensiunea indusă.



Ne-am putea aștepta ca acest curent secundar să producă un flux magnetic suplimentar în miezul feromagnetic. Acest lucru nu se întâmplă însă. Dacă fluxul magnetic indus în miez ar crește, acest lucru ar duce la creșterea tensiunii induse a înfășurării primare.

Acest lucru nu se poate întâmpla, deoarece tensiunea indusă a primarului trebuie să rămână la aceeași amplitudine și fază pentru se păstra egalitate dintre aceasta și tensiunea sursei, potrivit legii lui Kirchhoff pentru tensiune. Prin urmare, fluxul magnetic al miezului nu este afectat de curentul din secundar. Totuși, ceea ce se modifică este valoarea tensiunii magnetomotoare a circuitului magnetic.



Tensiunea magnetomotoare (tmm) ia naștere ori de câte ori există deplasare de electroni printr-un fir. De obicei, această tensiune este însoțită de flux magnetic, conform legii lui Ohm pentru circuitele magnetice,  $u_{mm} = \Phi R$ . Dar producerea unui flux magnetic suplimentar nu este permisă în acest caz, prin urmare, singura posibilitate de existență a tmm în secundar implică apariția unei tmm contrare (în anti-fază), și amplitudine egală, generate de înfășurarea primară.

Acest lucru este exact ceea ce se întâmplă, și anume, formarea unui curent alternativ în înfășurarea primară, defazat cu  $180^\circ$  (în anti-fază) față de curentul secundarului, pentru generarea unei tmm contrare și prevenirea apariției unui flux magnetic adițional prin miez.

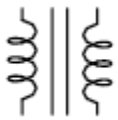
Deși întreg procesul pare destul de complicat, iar proiectarea transformatoarelor este un subiect complex, cel mai important lucru de ținut minte este acesta: atunci când asupra înfășurării primare este aplicată o tensiune alternativă, aceasta produce un flux magnetic în miezul feromagnetic ce induce la rândul său o tensiune alternativă în înfășurarea secundară, în fază cu tensiunea sursei de alimentare. Apariția oricărui curent prin secundar, la conectarea unei sarcini de exemplu, duce la apariția unui curent similar în primar, curent menținut de sursa de alimentare.

Putem observa faptul ca înfășurarea primară se comportă precum o sarcină față de sursa de tensiune, iar înfășurarea secundară este echivalentă unei surse de tensiune alternativă pentru rezistorul conectat la capetele acesteia. Față de prima situația, de data aceasta energia nu este absorbită și eliberată tot în înfășurarea primară ci este cuplată cu înfășurarea secundară unde este folosită pentru alimentarea sarcinii (rezistor). Din punct de vedere al sursei, aceasta alimentează direct sarcina secundarului. Desigur, curentul din primar este defazat cu  $90^0$  față de tensiune, lucru ce nu s-ar întâmpla într-o alimentare directă a rezistorului.

## Observație

Acest dispozitiv este cunoscut sub numele de transformator, deoarece transformă energia electrică în energie magnetică și înapoi în energie electrică. Deoarece funcționarea acestuia depinde de inducția electromagnetică dintre două înfășurări staționare și de variația amplitudinii și „polarității” fluxului magnetic, transformatoarele se pot folosi doar în curent alternativ, nu și în curent continuu.

## Simbolul transformatorului



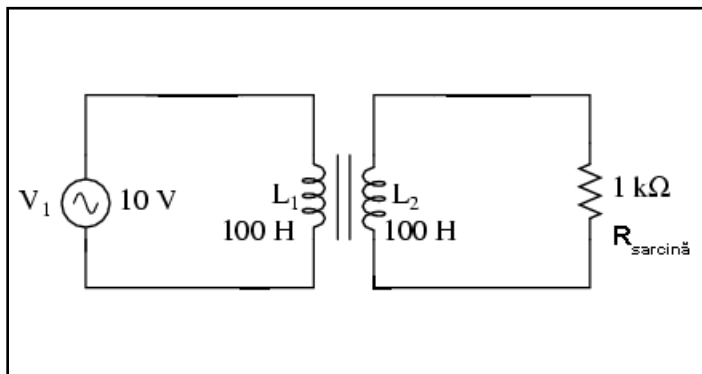
Simbolul electric al transformatorului îl reprezintă două bobine (înfășurarea primară și secundară) și un miez feromagnetic comun celor două.

## 2. Exemplu de funcționare

- Coeficientul de cuplaj magnetic descrie cât de strâns sunt cuplate cele două înfășurări ale unui transformator
- Inductanța de scăpări descrie acea parte a câmpului magnetic ce nu se regăsește pe înfășurarea secundară
- Un transformator ideal transferă energia electrică din primar în secundar ca și cum sarcina ar fi conectată direct la sursă

## Coeficientul de cuplaj magnetic (k)





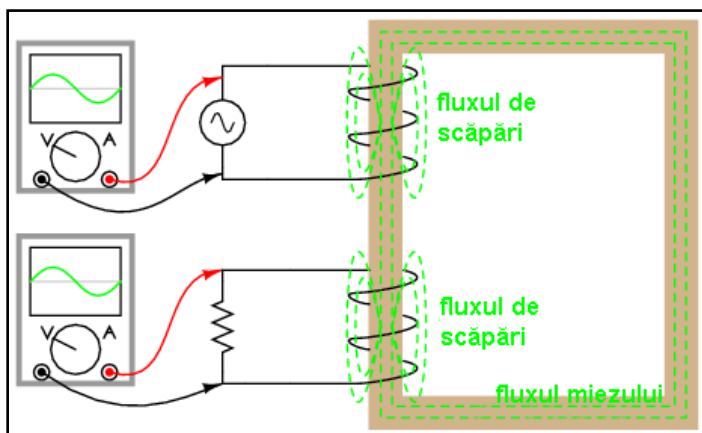
Putem explica funcționarea unui transformator simplu prin intermediul unui circuit electric. Vom considera coeficientul de cuplaj magnetic ( $k$ ) ca având o valoare foarte aproape de perfecție, și anume, 0,999. Acest coeficient descrie cât de strâns cuplate sunt cele două bobine (înfășurări) una față de cealaltă. Cu cât acest coeficient este mai mare (ideal, 1), cu atât cuplajul magnetic dintre cele două

înfășurări, și prin urmare, și eficiența transferului de energie este mai mare.

Ambele inductanțe ale înfășurărilor fiind egale (100 H), tensiunile și curenții pentru cele două înfășurări sunt aproximativ egale (10 V, respectiv 10 mA). Diferența dintre curentul primar și cel secundar este defazajul de  $90^\circ$  dintre ele, datorat curentului de magnetizare al miezului. Valoarea acestui curent de magnetizare este foarte mică în acest caz, față de curentul din primar, astfel că cei doi curenți sunt aproximativ egali. Această eficiență mare este tipică transformatoarelor în general. Orice eficiență de sub 95% este considerată mult prea mică în proiectarea transformatoarelor.

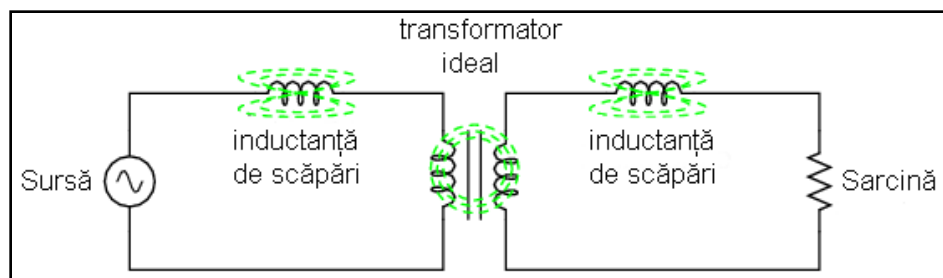
Dacă reducem rezistența sarcini (de la  $1\text{ k}\Omega$  la  $200\ \Omega$ ), pentru a crește valoarea curentului în secundar, pentru aceeași valoare a tensiunii, observăm că și curentul din înfășurarea primară crește. Chiar dacă sursa de tensiune alternativă nu este conectată direct la sarcină, ci este cuplată electromagnetic, valoarea curentului ce parcurge sarcina este aproximativ aceeași cu valoarea curentului dacă sarcina ar fi conectată direct la sursă. În acest caz, valoarea curenților din înfășurări va crește de la aproximativ 10 mA la 47 mA. De fapt, egalitatea celor doi curenți este chiar mai accentuată față de cazul precedent, deoarece curentul de magnetizare este același ca și în cazul precedent. De asemenea, tensiunea din secundar a scăzut puțin sub influența sarcini mai mari (curent mai mare), de la aproximativ 10 V la 9,3 V.

## Inductanța de scăpări



Să vedem ce se întâmplă dacă reducem și mai mult rezistența sarcinii, până la valoarea de  $15\ \Omega$ . Curentul sarcinii (în secundar) este acum 130 mA, o creștere substanțială față de cazul precedent, iar curentul primar este aproximativ egal cu acesta. În schimb, tensiunea prin secundar a scăzut foarte mult comparativ cu valoarea tensiunii din secundar (1,95 V în secundar față de 10 V în primar).

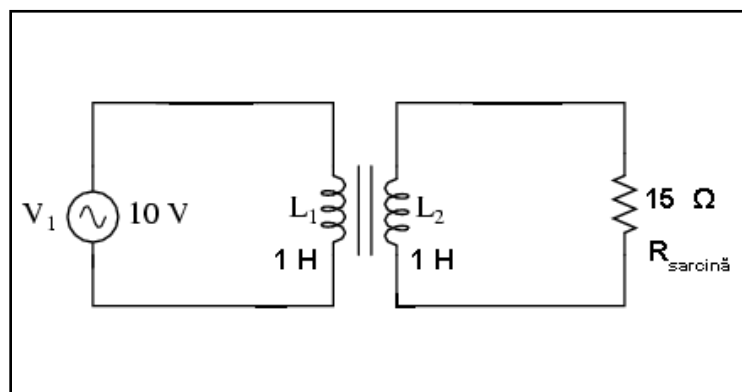
Motivul acestei diferențe se regăsește în imperfecțiunile transformatorului: cuplajul dintre cele două înfășurări nu este perfect, coeficientul de cuplaj magnetic,  $k$ , fiind 0,999, nu 1. Prin urmare, există o inductanță de scăpări prezentă, ceea ce înseamnă ca o parte a câmpului magnetic nu se regăsește pe înfășurarea secundară și nu poate „transfera” energie din această cauză.



Acest flux de scăpări doar stochează și eliberează energia înapoi în circuitul de alimentare prin intermediul inductanței proprii, comportamentul acestuia fiind al unei impedențe serie

conectate în ambele înfășurări. Căderea de tensiune finală este redusă datorită existenței unei căderi de tensiune pe această „impedanță serie”. Efectul este cu atât mai pronunțat cu cât curentul sarcinii crește.

Dacă cuplajul magnetic dintre cele două înfășurări ar fi mai „strâns”, de exemplu,  $k=0,99999$  (în loc de 0,999), valorile tensiunii în cele două înfășurări ar fi din nou aproximativ egale (10 V), păstrându-se și egalitatea dintre cei doi curenți.



Din păcate, construirea unui transformator real, cu un astfel de coeficient de cuplaj magnetic, este foarte dificilă. O soluție de compromis constă în folosirea unei inductanțe mai scăzute pentru ambele înfășurări (1 H, în loc de 100 H), deoarece o inductanță mai scăzută duce și la o inductanță de scăpări mai scăzută, oricare ar fi coeficientul de cuplaj magnetic. Rezultatul este o cădere de

tensiune pe sarcină mult mai bună, menținând aceeași valoare a curentului și a cuplajului.

## Explicație

Prin simpla utilizare a unei inductanțe mai mici pentru cele două înfășurări, căderea de tensiune pe sarcină este din nou „ideală”, aproximativ 10 V, aceeași valoare cu a sursei de alimentare. Cu siguranță că ne putem întreba, „Dacă tot ceea ce este necesar pentru atingerea unei performanțe ideale în cazul unei sarcini mari, este reducerea inductanței, de ce să ne mai facem griji cu privire la eficiența cuplajului magnetic? Dacă este imposibilă proiectarea transformatoarelor cu coeficienți de cuplaj perfecți, dar înfășurările cu inductanțe mici sunt ușor de construit, atunci de ce nu am construi transformatoare cu inductanțe mici și cuplaj scăzut pentru obținerea unei eficiențe ridicate?”

Pentru a răspunde acestei nedumeriri, considerăm un nou circuit, în care sarcina de data aceasta este de 1  $\Omega$  în loc de 15  $\Omega$ , toate celelalte valori rămânând egale. Cu inductanțe mai mici pentru înfășurări, tensiunile din primar

și secundar sunt aproximativ egale (10 V), dar curenții celor două înfășurări nu sunt egali, cel din primar fiind 28,35 mA, de aproape trei ori mai mare decât cel din secundar, de doar 10 mA. De ce se întâmplă acest lucru? Cu o inductanță mult mai mică a înfășurării primare, reactanța inductivă este mult mai mică, și prin urmare, curentul de magnetizare este mult mai mare. O parte importantă a curentului din înfășurarea primară este folosit doar pentru magnetizarea miezului feromagnetic și nu pentru transferul de energie spre înfășurarea secundară.

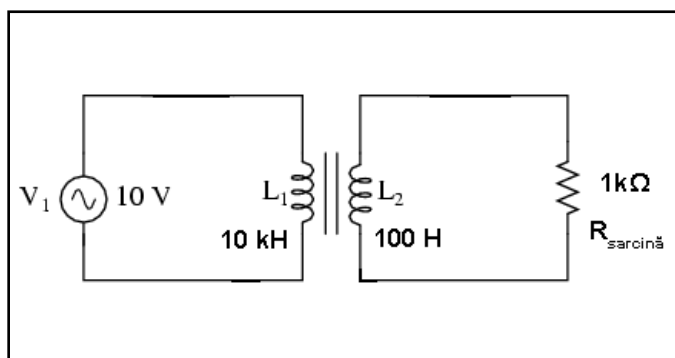
## Transformatorul ideal

Un transformator ideal, cu înfășurări primare și secundare identice, ar dezvolta aceleași căderi de tensiune și curenți în ambele înfășurări, indiferent de valoarea sarcinii. Ideal, transformatoarele ar trebui să transfere putere electrică din primar în secundar ca și cum sarcina ar fi conectată direct la sursă. Acest lucru se poate realiza doar dacă există un cuplaj magnetic perfect între cele două înfășurări. Din moment ce acest lucru nu este imposibil, transformatoarele trebuie proiectate pentru a funcționa între anumite valori ale tensiunii și sarcinii, valori cunoscute dinainte, pentru a oferi maximul de eficiență.

### 3. Transformatorul ridicător și coborâtor de tensiune

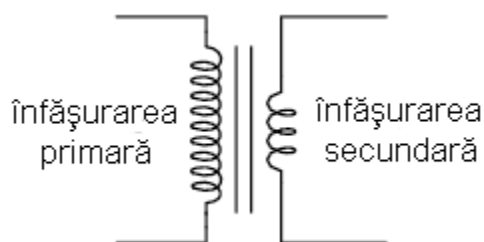
- Transformatoarele sunt dispozitive utilizate la ridicarea sau coborârea tensiunii în funcție de raportul dintre numărul spirelor înfășurărilor
- Un transformator proiectat să ridice tensiunea dinspre primar spre secundar (numărul spirelor din înfășurarea secundară este mai mare decât numărul celor din primar), se numește transformator ridicător de tensiune
- Un transformator proiectat să realizeze chiar opusul, coborârea tensiunii dinspre primar spre secundar (numărul spirelor din înfășurarea secundară este mai mic decât numărul celor din primar), poartă numele de transformator coborâtor de tensiune

## Scop



Până în acest moment, am luat în considerare doar cazul în care cele două înfășurări ale transformatorului aveau inductanțe identice, ducând la egalitatea tensiunilor și a curenților în cele două înfășurări. Această egalitate între înfășurarea primară și cea secundară nu este însă specifică tuturor transformatoarele. Dacă inductanțele celor două

înfășurări sunt diferite, prin modificarea raportului de spire dintre cele două, și comportamentul transformatorului suferă modificări.



În configurația de mai sus, tensiunea secundarului este de aproximativ 10 ori mai mică decât tensiunea din primar (1 V față de 10 V), iar pe de altă parte, curentul din secundar este de aproximativ 10 ori mai mare decât curentul din primar (1 mA față de 0.1 mA). Ceea ce avem în circuitul de mai sus, este un dispozitiv ce coboară tensiunea de zece ori și crește curentul cu același factor (coborâtor de tensiune / ridicător de curent).

## Definiție

Acesta este un dispozitiv extrem de folositor. Cu ajutorul acestuia se pot foarte ușor multiplica sau împărți valorile tensiunilor și ale curenților în circuitele de curent continuu. Un transformator ce ridică nivelul tensiunii dinspre primar înspre secundar se numește transformator ridicător de tensiune, iar un transformator ce coboară nivelul tensiunii dinspre primar înspre secundar se numește coborâtor de tensiune.

## Inversarea alimentării transformatorului

Oricare transformator poate fi alimentat și invers, dinspre secundar spre primar, inversându-se astfel și rolul acestuia: transformatorul coborâtor de tensiune devine ridicător de tensiune, și invers. Totuși, după cum am precizat în secțiunea precedentă, funcționare eficientă a unui transformator se poate realiza doar prin proiectarea acestuia pentru anumite valori ale curenților și tensiunilor. Prin urmare, dacă am fi să folosim un transformator „invers”, va trebui să respectăm parametrii inițiali pentru tensiune și curent în cazul fiecărei înfășurări, altfel, transformatorul s-ar putea dovedi extrem de ineficient, iar în cazuri extreme, operarea lui necorespunzătoare poate duce la distrugerea acestuia datorită curenților sau tensiunilor în exces.

## Notăția transformatoarelor

În general, transformatoarele sunt astfel construite încât este imposibil de spus care este înfășurarea primară și care cea secundară. O convenție folosită în industrie este notarea cu „H” a înfășurării cu tensiune mai înaltă (primarul, într-un transformator coborâtor; secundarul, într-un transformator ridicător) și cu „X” a înfășurării cu tensiune mai joasă. Prin urmare, un transformator simplu ar trebui să aibă notațiile „H<sub>1</sub>”, „H<sub>2</sub>”, „X<sub>1</sub>” și „X<sub>2</sub>”.

Faptul că tensiunea și curentul sunt „transformate” în direcții opuse nu ar trebui să ne mire. Puterea este egală cu produsul dintre tensiune și curent, iar transformatoarele nu pot produce putere, ci o pot doar converti.

## Inductanța înfășurărilor transformatorului

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l}$$

unde,

$L$  = inductanța înfășurării (H)

$N$  = numărul spirelor din înfășurare (1, pentru fir simplu)

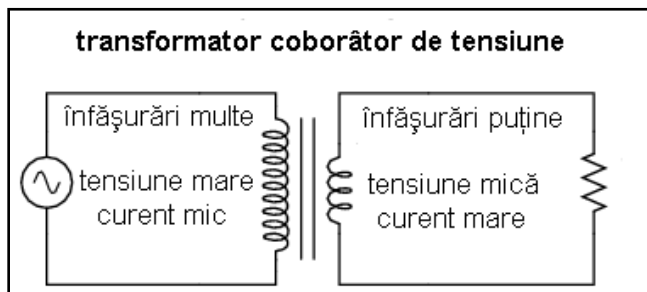
$\mu$  = permeabilitatea absolută a miezului magnetic

$A$  = aria înfășurării ( $\text{m}^2$ )

$l$  = lungimea înfășurării (m)

Dacă ne uităm mai atent la rezultatele obținute cu circuitul de mai sus, putem vedea o legătură între raportul de transformare al transformatorului și cele două inductanțe. Se observă că bobina primară are o inductanță de 100 de ori mai mare decât cea secundară, iar raportul de transformare al tensiunii a fost de 10 la 1. Înfășurarea cu o inductanță mai mare va avea o tensiune mai mare și un curent mai mic decât cealaltă.

Din moment ce ambele bobine sunt înfășurate în jurul aceluiași material (pentru un cuplaj magnetic cât mai eficient între ele), singurul parametru care nu este comun ambelor înfășurări este numărul spirelor din fiecare înfășurare în parte. Din formula inductanței, putem observa că aceasta este direct proporțională cu pătratul spirelor înfășurării:



Astfel, putem deduce că cele două înfășurări din exemplul de mai sus, cu un raport al inductanțelor de 100:1, ar trebui să aibă un raport al înfășurărilor de 10:1 ( $10^2 = 100$ ). Acesta este exact raportul descoperit între valorile tensiunilor și ale curenților primare și secundare (10:1).

## Raportul de transformare al transformatorului

$$k = \frac{N_2}{N_1}$$

unde,

$N_2$  = numărul spirelor înfășurării secundare

$N_1$  = numărul spirelor înfășurării primare

$k > 1$  ( $N_2 > N_1$ ) – transformator ridicător de tensiune

$k < 1$  ( $N_2 < N_1$ ) – transformator coborător de tensiune

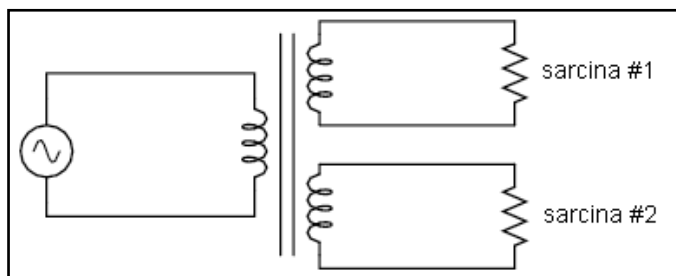
$k = 1$  ( $N_2 = N_1$ ) – separator electric

Putem spune prin urmare, că raportul de transformare al unui transformator este egal cu raportul dintre numărul spirelor înfășurărilor primare și secundare.

#### 4. Tipuri de înfășurări; autotransformatorul

- Este posibilă construirea transformatoarelor cu mai mult de o singură înfășurare primară și secundară. Acest lucru permite obținerea unor raporturi de transformare variabile folosind același dispozitiv
- Există posibilitatea de realizare a „prizelor” pe înfășurările transformatoarelor: intersecția contactului electric în puncte diferite din lungul înfășurării
- Transformatoarele variabile se pot realiza folosind un contact variabil pe lungimea înfășurării, putându-se practic realiza prize în orice punct de pe înfășurare
- Un autotransformator este un transformator ce folosește o singură înfășurare pentru ridicarea sau coborârea tensiunii; față de un transformator normal, acesta nu oferă separare electrică între primar și secundar
- Un autotransformator variabil poartă numele de Variac

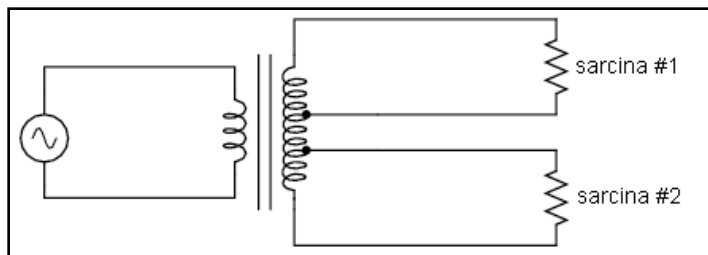
#### Transformatoare cu înfășurări multiple



Nu este neapărat necesar ca transformatoarele să fie realizate din doar două seturi de înfășurări. Să considerăm circuitul alăturat.

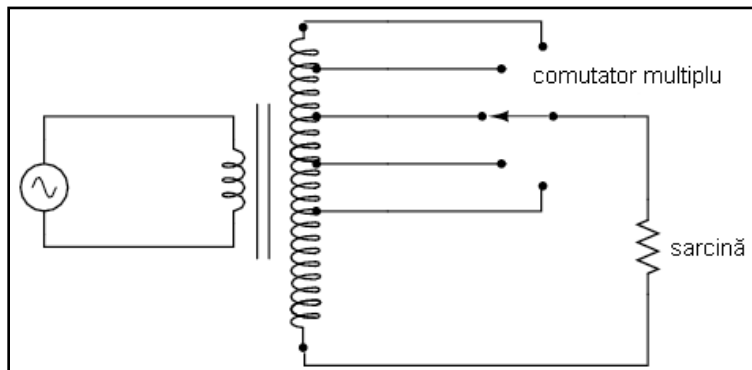
În acest caz, toate înfășurările împart același miez feromagnetic, fiind cuplate magnetic între ele. Relația dintre numărul spirelor înfășurărilor și raportul de transformare al tensiunilor considerat la transformatoarele cu două înfășurări, este valabilă și în acest (înfășurări multiple). Este posibilă proiectarea unui transformator precum cel din figura de mai sus (o înfășurare primară și două înfășurări secundare) în care, o înfășurare secundară să fie ridicătoare de tensiune iar cealaltă coborâtore. Toate circuitele sunt separate electric în acest caz.

#### Transformatoare cu prize



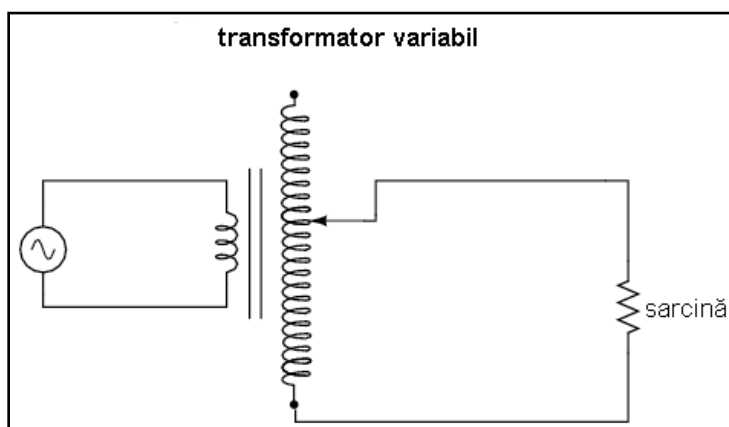
Dacă în schimb, nu avem neapărată nevoie de o separare electrică a circuitelor, un efect similar poate fi obținut și prin utilizarea prizelor în diferite puncte ale înfășurării secundare, precum în figura alăturată.

O priză reprezintă o conexiune făcută într-un anumit punct de pe secundarul transformatorului. Relația dintre numărul de spire al înfășurării și tensiunea obținută în secundar este valabilă și în acest caz, pentru toate prizele transformatorului.



Acest lucru poate fi exploatat pentru obținerea unui domeniu mult mai larg de raporturi de transformare.

### Transformatorul variabil



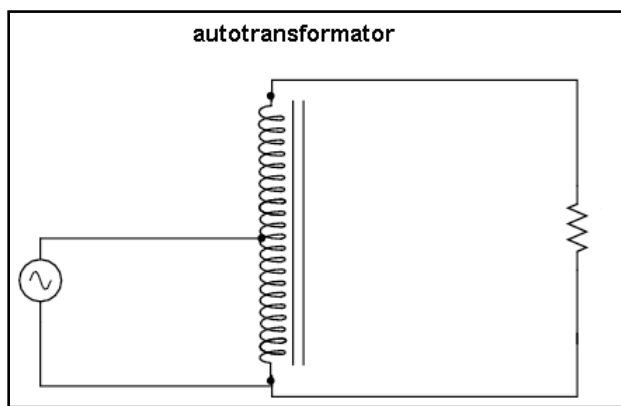
Trecând mai departe, putem construi un „transformator variabil”, caz în care vom avea un contact variabil ce se deplasează pe înfășurarea secundară expusă a transformatorului, fiind posibilă conectarea acestuia în oricare punct (priză variabilă).

Utilizarea acestor contacte variabile nu este practică în proiectarea transformatoarelor industriale de putere mare, dar sunt totuși folosite pentru ajustarea tensiunilor. În sistemele de putere, aceste ajustări de tensiune trebuie făcute periodic pentru a veni în întâmpinarea variației sarcinilor de-a lungul timpului. În mod normal, aceste tipuri de transformatoare nu sunt proiectate pentru a opera sub curenți sa sarcină, prin urmare, „reglarea” lor se realizează doar atunci când transformatorul nu este alimentat.

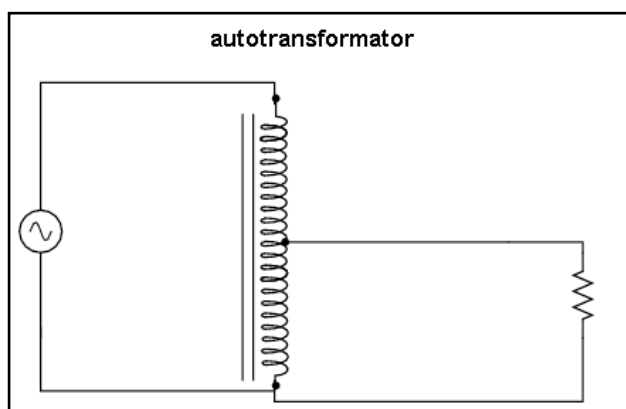
### Autotransformatorul

Dacă neglijăm în totalitate separarea electrică dintre înfășurări, putem construi un transformator folosind doar o singură înfășurare; dispozitivul astfel creat poartă numele de autotransformator.

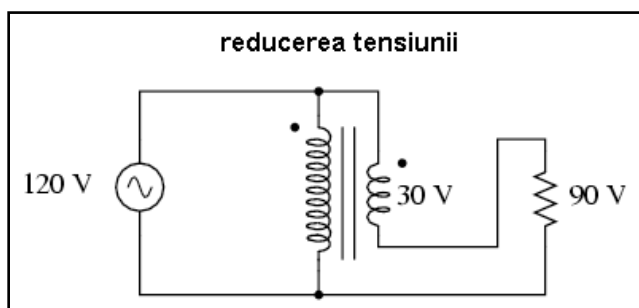
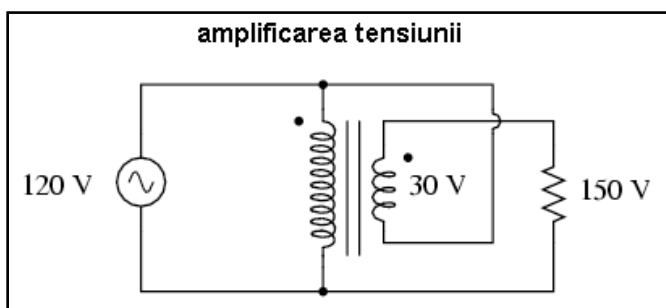
#### Autotransformator ridicător de tensiune



**Autotransformator coborâtor de tensiune**



### Utilizarea autotransformatoarelor

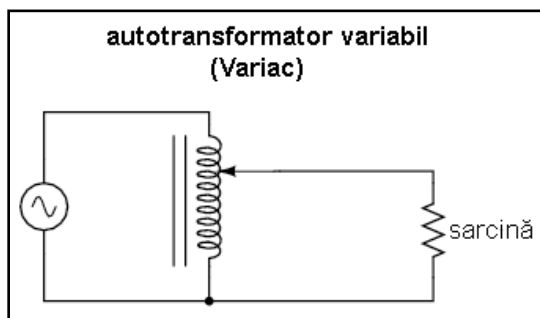


Autotransformatoarele sunt folosite în principal în aplicațiile unde este nevoie de o reducere sau amplificare mică a tensiunii pe sarcină. Ca și alternativă, se poate folosi un transformator normal construit special pentru aplicația în cauză, sau se poate folosi un autotransformator coborâtor de tensiune cu înfășurarea secundară conectată în serie, fie pentru amplificarea tensiunii sau pentru reducerea ei (anti-serie).

Principalul avantaj al unui autotransformator precum cel de mai sus, este folosirea unei singure înfășurări pentru realizarea amplificării sau reducerii tensiunii, fiind mult mai ușor de construit și mai ieftin decât un transformator normal.



## Variacul



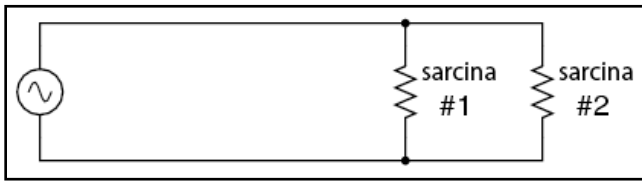
Ca și în cazul transformatoarelor normale, se pot realiza prize și pe înfășurările autotransformatoarelor pentru obținerea variației raporturilor de transformare. Mai mult decât atât, acestea pot fi realizate cu un contact variabil, caz în care transformatoarele poartă numele de Variac.

## 10 - Circuite polifazate

### 1. Sisteme de alimentare monofazate

- Sistemele de alimentare monofazate constau dintr-o sursă de alimentare (sau mai multe) având doar o singură formă de undă a tensiunii

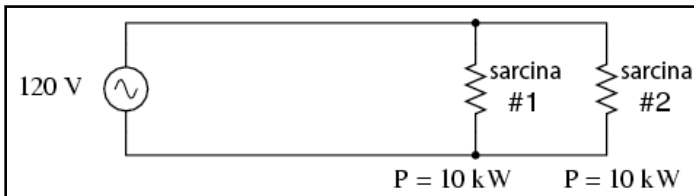
#### Circuitul de putere



Schema electrică alăturată este a unui circuit electric simplu, monofazat, în curent alternativ. Dacă puterea disipată pe sarcini este suficient de mare, putem denumi o astfel de configurație „circuit de putere”.

Distincția dintre un circuit de putere și un circuit normal poate părea întâmplătoare, dar implicațiile practice sunt importante.

Una dintre implicații este costul și mărimea conductorilor necesari pentru alimentarea sarcinilor de la sursă. În mod normal, nu ne interesează astfel de probleme dacă analizăm un circuit doar pentru a învăța despre electricitate. Totuși, în viața reală, acest lucru este de o importanță deosebită.



Dacă, în circuitul de mai sus, considerăm sursa de tensiune ca fiind de 120 V, iar puterile disipate pe sarcini de 10 kW fiecare, putem determina tipul conductorilor de care avem nevoie.

Curenții și puterile din circuitul de mai sus arată astfel:

$$I = \frac{P}{E} = \frac{10 \text{ kW}}{120 \text{ V}} = 83,33 \text{ A (pentru fiecare rezistor de sarcină)}$$

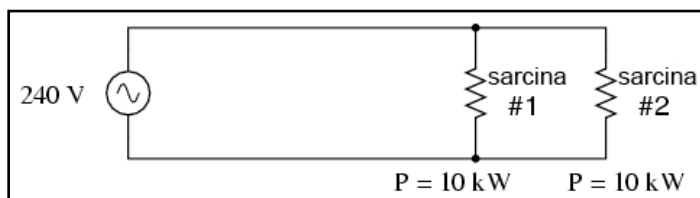
$$I_{total} = I_{sarcină\#1} + I_{sarcină\#2} = 83,33 \text{ A} + 83,33 \text{ A} = 166,67 \text{ A}$$

$$P_{total} = 10 \text{ kW} + 10 \text{ kW} = 20 \text{ kW}$$

Putem vedea că valoarea curentului prin circuit este foarte mare în acest caz, 88,33 A pentru fiecare rezistor, adică 166,66 A pentru curentul total din circuit. Conductorii de cupru folosiți pentru astfel de aplicații ar ajunge undeva la 6 mm în diametru, cu o greutate de aproximativ 50 kg la 100 m, iar cuprul nu este nici el un

material ieftin. În cazul în care ar fi să proiectăm un astfel de sistem de putere, cea mai bună strategie ar fi să căutăm soluții pentru minimizarea acestor tipuri de costuri.

## Creșterea tensiunii de alimentare



O soluție ar fi creșterea tensiunii sursei de alimentare folosind sarcini ce disipă aceeași cantitate de putere, 10 kW, pentru această tensiune mărită. Sarcinile ar trebui să aibă valori mai mari ale rezistențelor dacă

vrem să disipe aceeași putere la o tensiune mai mare. Avantajul constă în diminuarea curentului necesar, și prin urmare, folosirea unor conductori de dimensiuni mai mici, mai ușori și mai ieftini.

$$I = \frac{P}{E} = \frac{10 \text{ kW}}{240 \text{ V}} = 41,67 \text{ A (pentru fiecare rezistor de sarcină)}$$

$$I_{total} = I_{sarcină\#1} + I_{sarcină\#2} = 41,67 \text{ A} + 41,67 \text{ A} = 83,33 \text{ A}$$

$$P_{total} = 10 \text{ kW} + 10 \text{ kW} = 20 \text{ kW}$$

De data aceasta, curentul total este 83,33 A, jumătate față de valoarea precedentă. Putem utiliza conductori a căror greutate este jumătate din valoarea precedentă. Aceasta este o reducere considerabilă a costurilor sistemului, fără niciun efect negativ asupra performanțelor. Acesta este și motivul pentru care sistemele de distribuție sunt proiectate pentru transmiterea puterilor la tensiuni foarte înalte: pentru a profita de avantajul oferit de utilizarea conductorilor cu diametru mai mic, mai ușori și mai ieftini.

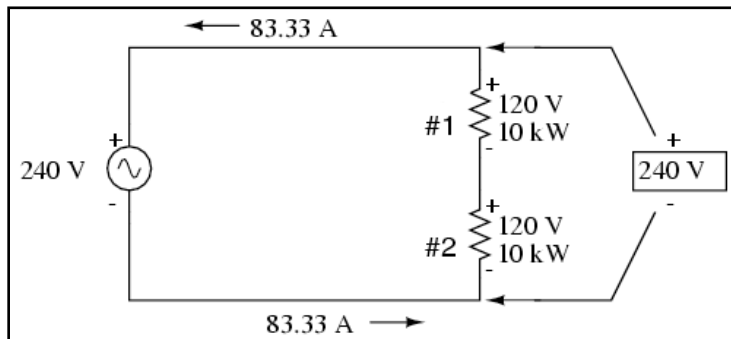
## Liniile electrice de înaltă tensiune

Totuși, această soluție prezintă și dezavantaje. O altă problemă ce trebuie luată în considerare în cadrul circuitelor de putere, este pericolul electrocutărilor datorat tensiunilor înalte. Din nou, acesta nu este neapărat un subiect luat în considerare atunci când învățăm despre legile electricității, dar este o problemă reală în proiectarea sistemelor electrice, mai ales atunci când puterile sunt foarte mari. Deși am câștigat în eficiență prin ridicarea tensiunii sistemului, acest lucru duce pe de altă parte la mărirea pericolului electrocutării. Companiile de distribuție a curentului electric au rezolvat această problemă prin instalarea liniilor de putere pe stâlpi de „înaltă tensiune” și izolarea lor față de conductori prin dielectrici confecționați din porțelan.

## Utilizarea energiei electrice

Dar această tensiune ridicată nu poate fi păstrată la aceleași valori atunci când ajunge la consumatori, evident, din motive de siguranță. Sistemele de putere din Europa folosesc această tensiune mai înaltă, de 240 V, riscul crescut de electrocutare al utilizatorilor fiind compensat de eficiența mărită a unui astfel de sistem. În America de Nord, tensiune de alimentare este jumătate, și anume 120 V, scăderea eficienței în acest caz fiind compensată de creșterea siguranței utilizatorilor.

### Alimentarea sarcinilor în serie cu o tensiune mai înaltă



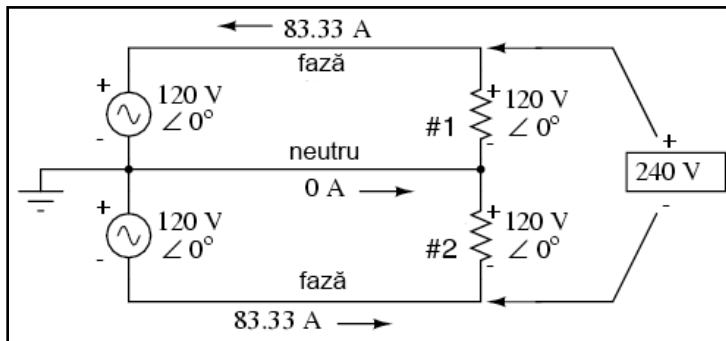
O soluție alternativă ar fi utilizarea unei surse de tensiune mai înaltă pentru alimentarea celor două sarcini în serie, căderea de tensiune pe fiecare sarcină fiind astfel jumătate din tensiunea de alimentare. Această soluție combină eficiența unui sistem de tensiune înaltă cu siguranța oferită de un sistem de tensiune joasă.

Putem observa pe desen și polaritățile („+” și „-”) pentru fiecare tensiune, precum și direcția curentului prin circuit. Chiar dacă este un circuit alternativ, vom utiliza aceste notații pentru a avea un sistem de referință pentru fazele tensiunilor și a curenților, sistem ce se va dovedi folositor în capitolele următoare.

Curentul pe fiecare sarcină este același ca și în cazul circuitului alimentat de la 120 V, dar aceștia nu se însumează, deoarece sunt în serie, nu în paralel. Căderea de tensiune pe fiecare sarcină este de doar 120 V, nu 240 V, așadar nivelul de siguranță a crescut. Diferența de potențial între cei doi conductori ai sistemului de alimentare este tot de 240 V, dar fiecare sarcină este alimentată la o tensiune mult mai mică. În cazul apariției electrocutării, este foarte probabil ca persoana în cauză să intre în contact cu sarcina, sau conductorii acesteia, și nu cu firele de 240 V.

### Surse de tensiune duale cu fir neutru

Există însă un dezavantaj al acestui tip de circuit: în cazul defectării uneia dintre sarcinii, dacă aceasta este închisă sau scoasă din circuit, vom avea practic un circuit deschis, curentul scăzând la zero și întreaga cădere de tensiune se va regăsi pe această sarcină „defectă”.



Din acest motiv, trebuie să modificăm puțin circuitul.

În locul unei singure surse de tensiune de 240 V, folosim două surse de 120 V, conectate în serie și în fază una cu cealaltă, pentru producerea unei tensiuni de 240 V, și utilizăm un conductor suplimentar conectat între cele două sarcini și cele două surse, pentru a prelua curentul în cazul deschiderii uneia dintre sarcini. Dacă suntem atenți, observăm că firul neutru trebuie să conducă doar diferența de curent dintre cele două sarcini. În cazul de mai sus, când sarcinile sunt echilibrate (egale), puterea consumată de acestea este egală, astfel că neutrul nu conduce curent.

Calculule parametrilor circuitului, în acest caz, arată astfel:

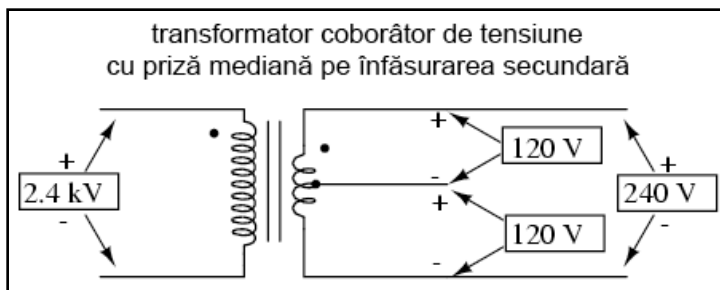
$$E_{total} = 120 \text{ V} \angle 0^\circ + 120 \text{ V} \angle 0^\circ = 240 \text{ V} \angle 0^\circ$$

$$I = \frac{P}{E} = \frac{10 \text{ kW}}{120 \text{ V}} = 83,33 \text{ A (pentru fiecare sarcină în parte)}$$

$$P_{total} = 10 \text{ kW} + 10 \text{ kW} = 20 \text{ kW}$$

Neutrul este conectat la împământare, fiind o practică des întâlnită în proiectarea sistemelor de putere cu fir neutru. Această împământare asigură o diferență de potențial cât mai mică, în fiecare clipă, între fază și pământ.

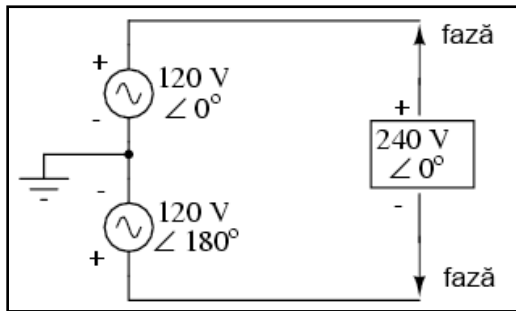
## Utilizarea transformatoarelor cu priză mediană



O componentă importantă a unui astfel de sistem o reprezintă sursele de tensiune duale în curent alternativ. Din fericire, construcția unui astfel de sistem nu este dificilă. Din moment ce majoritatea sistemelor de curent alternativ sunt alimentate de un transformator coborâtor de tensiune, acel

transformator poate fi construit cu o priză mediană pe înfășurarea secundară.

Notarea polarităților („+” și „-”) devine în acest moment importantă. Aceasta este folosită ca și sistem de referință al fazelor în circuitele de curent alternativ cu surse de alimentare multiple.



Cele două surse de mai sus, conectate în serie, pot fi la fel de bine reprezentate folosind notația polară: conectate în anti-serie și defazaj de  $180^\circ$  între ele. Cele două moduri de reprezentare sunt echivalente.

| <i>Polar</i>             | <i>Rectangular</i>        |
|--------------------------|---------------------------|
| $120 \angle 0^\circ$     | $120 + j0 \text{ V}$      |
| $- 120 \angle 180^\circ$ | $- (-120 + j0) \text{ V}$ |
| $240 \angle 0^\circ$     | $240 + j0 \text{ V}$      |

Căderea de tensiune între cele două faze poate fi calculată conform figurii alăturate.

Dacă marcăm conexiunea comună a celor două surse (firul neutru) cu aceeași polaritate (-), atunci va trebui să exprimăm diferența de fază a celor două ca fiind  $180^\circ$ . În caz contrar, am avea două surse de tensiune acționând în direcții opuse, ceea ce ar duce la o diferență de 0 V între cele două faze.

### Observație

În general, un astfel de sistem de alimentare este denumit monofazat, datorită faptului că ambele forme de undă sunt în fază. De asemenea, toate circuitele electrice studiate până în acest moment au fost monofazate.

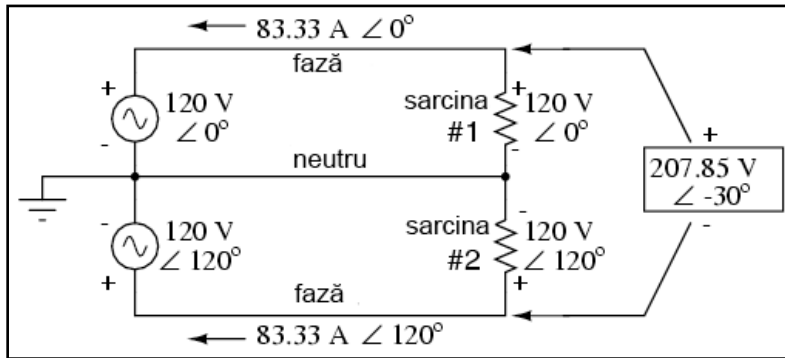
## 2. Sisteme de alimentare trifazate

- Un sistem de alimentare monofazat constă dintr-o singură sursă alimentare (un singur tip de formă de undă)
- Un sistem de alimentare polifazat utilizează mai multe surse de tensiune defazate între ele (mai multe forme de undă existente). Un sistem polifazat poate transmite o putere electrică mai mare folosind conductori de secțiuni mai mici
- Defazajul tensiunilor necesar pentru utilizarea unui sistem polifazat este creat cu ajutorul generatoarelor polifazate ce utilizează seturi multiple de înfășurări

### Scop

Folosind modul „straniu” de însumare a vectorilor și a numerelor complexe atunci când tensiunile alternative sunt defazate între ele, putem construi sisteme de putere cu o eficiență crescută și risc scăzut de electrocutare.

## Surse de alimentare dual defazate cu 120°



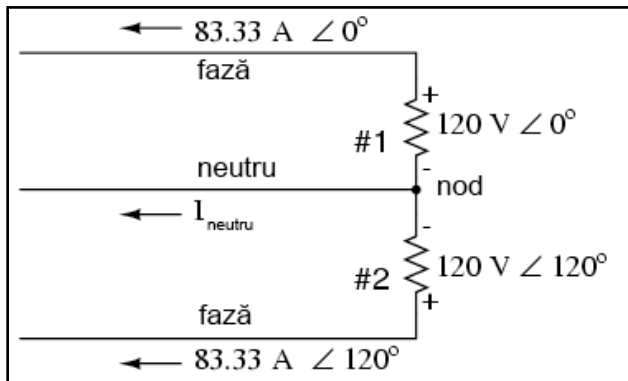
Să presupunem că avem două surse de curent alternativ conectate în serie, la fel ca în secțiunea precedentă, cu diferența că fiecare sursă este defazată cu 120° față de cealaltă.

Din moment ce fiecare sursă de tensiune are 120 V, și fiecare rezistor este conectat direct în paralel cu sursa respectivă, căderea de tensiune pe fiecare sarcină trebuie să fie de asemenea de 120 V. Curenții prin sarcină fiind 83,33 A, acestea vor disipa tot 10 kW de putere. Totuși, tensiunea dintre cele două faze nu mai este 240 V ca în cazul precedent, deoarece diferența de fază între cele două tensiuni este de 120°, nu 180° (sau 0°).

$$E_{total} = 120 \text{ V} \angle 0^\circ - 120 \text{ V} \angle 120^\circ = 207,85 \text{ V} \angle -30^\circ$$

Putem spune că tensiunea nominală dintre cele două fază este de 208 V, iar notația sistemului este 120/208.

## Curentul prin conductorul neutru



Dacă acum calculăm și curentul prin neutru, folosind legea lui Kirchhoff pentru curent, vom vedea că acesta nu este zero, chiar și în cazul sarcinilor echilibrate (egale între ele).

$$-I_{sarcină\#1} - I_{sarcină\#2} - I_{neutru} = 0$$

$$I_{neutru} = -I_{sarcină\#1} - I_{sarcină\#2}$$

$$I_{neutru} = -83,33 \text{ A} \angle 0^\circ - -83,33 \text{ A} \angle 120^\circ = 83,33 \text{ A} \angle 240^\circ \text{ sau}$$

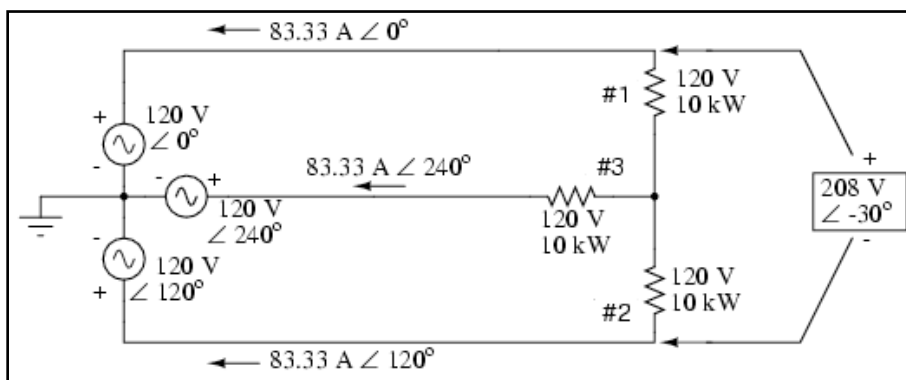
$$I_{neutru} = 83,33 \text{ A} \angle -120^\circ$$

Prin urmare, firul neutru conduce același curent ca și celelalte fire, și anume, 83,33 A

## Avantajele sistemului considerat

Și în acest caz, puterea totală furnizată în sistem este de 20 kW, iar fiecare fază conduce tot 83,33 A, prin urmare n-am reușit o reducere a costurilor prin utilizarea unor conductori cu diametru mai mic. Totuși, siguranța sistemului este mai mare în acest caz, deoarece căderea de tensiune între cele două faze este mai mică cu 32 V față de cazul precedent (208 V în loc de 240 V).

## Utilizarea neutrului pe post de fază



Putem profita de faptul că neutrul conduce un curent de 83,33 A: din moment ce oricum conduce curent, de ce să nu folosim acest al treilea fir pe post de fază, conectând o altă sarcină în serie cu o sursă de 120 V, defazată cu 240° față de tensiunea de referință? În acest fel, putem

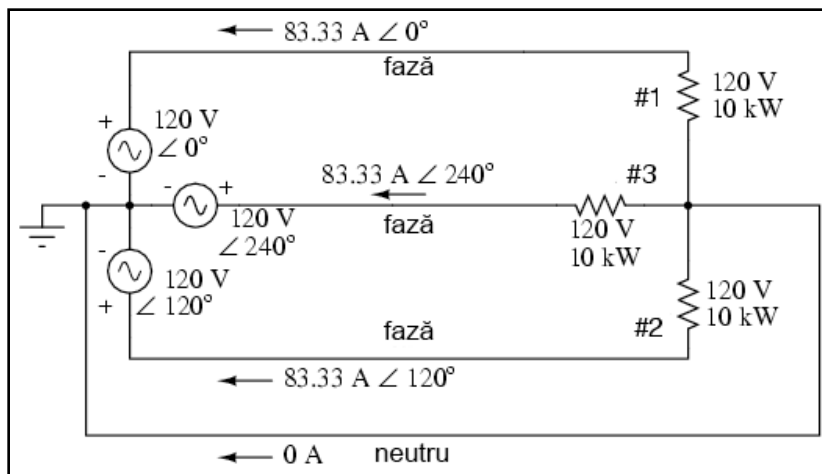
transmite mai multă putere (10 kW în plus), fără a fi nevoie de adăugarea unor conductori suplimentari.

O analiză matematică completă a tuturor curenților și tensiunilor din circuit ar necesita utilizarea unei teoreme de rețea, cea mai ușoară fiind teorema superpoziției. Căderea de tensiune pe fiecare sarcină este de 120 V, iar căderea de tensiune între oricare două faze este de aproximativ 208 V. Curenții prin conductori sunt egali între ei, și anume 83,33 A. La aceste valori, fiecare sarcină va disipa o putere de 10 kW.

Putem observa că acest circuit nu are un conductor neutru pentru asigurarea unei tensiuni stabile în cazul în care una dintre sarcini este (accidental) deconectată (sistem dezechilibrat), situația fiind similară cu cea întâlnită în secțiunea precedentă.

## Adăugarea unui nou conductor neutru în circuit





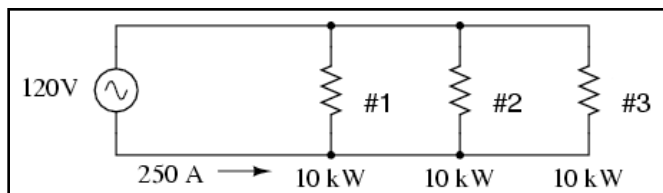
Pentru asigurarea stabilității tensiunii la bornele sarcinilor în cazul deschiderii accidentale a circuitului, avem nevoie de un noi conductor neutru conectat între nodul sursei și nodul sarcinii.

Atâta timp cât sistemul este echilibrat (rezistențe egale, curenți egali), conductorul neutru nu va conduce niciun curent. Acesta este folosit însă pentru cazurile în care una dintre sarcini este înlăturată din circuit (defect, oprire, etc.).

### Observație

Circuitul analizat mai sus, folosind trei surse de alimentare, poartă numele de circuit polifazat, mai exact, este un circuit trifazat (trei surse de alimentare), folosit în sistemele de distribuție a energiei electrice.

### Avantajele unui sistem de alimentare trifazat



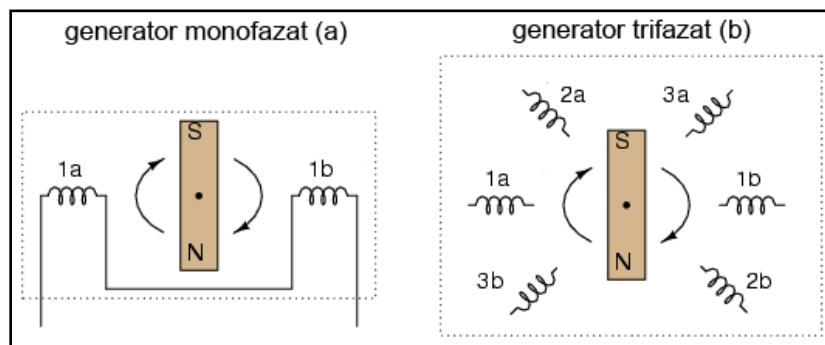
Să analizăm unele dintre avantajele unui astfel de circuit trifazat față de un circuit monofazat de putere echivalentă. Un sistem monofazat (o singură sursă de alimentare, sau mai multe surse, dar în fază) cu trei sarcini conectate în paralel ar produce un curent total foarte mare ( $3 \times 83,33 \text{ A}$ , sau 250 A).

Acest lucru ar necesita conductori cu secțiune foarte mare, cu o greutate de aproximativ optzeci de kilograme la o sută de metri. Dacă distanța dintre sursă și sarcină ar depăși cu puțin un kilometru, am avea nevoie de aproximativ o tonă de cupru pentru realizarea acestui circuit!

Folosind în schimb un sistem trifazat, costurile cu conductorii se reduc considerabil, și în plus, crește și siguranța la electrocutare a sistemului (208 V față de 240 V).

Mai rămâne însă o singură întrebare: cum putem obține trei surse de curent alternativ defazate cu exact  $120^\circ$  între ele? Evident, nu putem folosi transformatoare cu prize pe înfășurarea secundară, pentru că am obține forme de undă ale tensiunii fie în fază, fie defazate cu  $180^\circ$  între ele. Am putea folosi condensatoare și bobine pentru a crea un defazaj de  $120^\circ$ , dar atunci, aceste defazaje ar depinde și de unghiurile de fază ale sarcinilor, în cazul în care în loc de sarcină rezistivă avem o sarcină capacitivă sau inductivă.

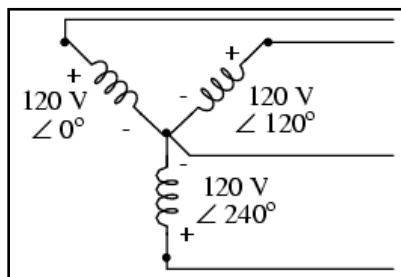
## Generatoare trifazate



jurul circumferinței generatorului.

Împreună, cele șase înfășurări ale generatorului trifazat sunt conectate astfel încât să formeze trei perechi de înfășurări (1a cu 1b, 2a cu 2b, 3a cu 3b), fiecare pereche producând o tensiune alternativă defazată cu  $120^\circ$  față de oricare dintre celelalte două perechi/tensiuni. Conexiunile fizice existente pentru fiecare pereche de înfășurări au fost omise pentru simplitate. Acestea se pot vedea însă în cazul generatorului monofazat.

### Configurația stea (Y)



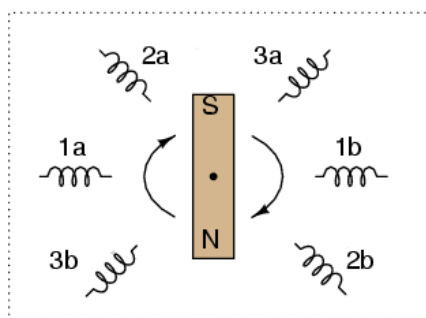
În circuitul considerat, cele trei surse de alimentare au fost conectate în configurație stea, sau „Y”, fiecare sursă având o parte conectată la punctul comun (conductorul neutru). Descrierea unei astfel de circuit se face conform figurii alăturate.

Aceasta însă nu este singura schema de conectare posibilă, după cum vom vedea în următorul capitol.

## 3. Secvența fazelor

- Secvența fazelor este ordinea formelor de undă, defazate între ele, a unui sistem polifazat de curent alternativ. Pentru un sistem trifazat, sunt posibile doar două secvențe, 1-2-3 sau 3-2-1, secvențe ce corespund direcției de rotație a generatorului de tensiune
- Secvența fazelor nu are niciun efect asupra sarcinilor rezistive, dar are efect asupra sarcinilor reactive dezechilibrate, cum este cazul detectorului de secvență
- Secvența fazelor poate fi inversată prin inversarea oricăror două faze ale sistemului trifazat între ele, fără efect asupra direcției de rotație a generatorului

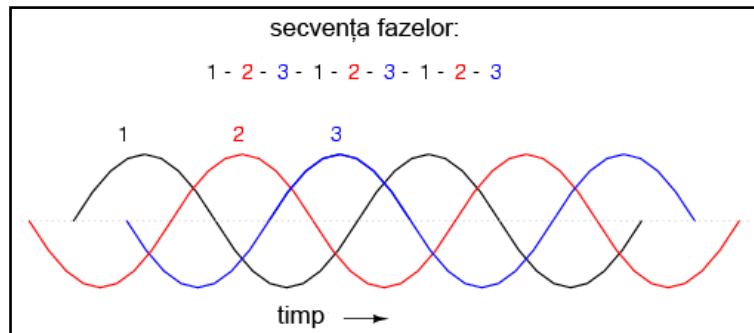
## Generatorul electric trifazat



Să considerăm din nou generatorul trifazat de curent alternativ din cazul precedent și să analizăm rotația magneților și efectele acesteia.

Unghiul de fază de  $120^\circ$  dintre cele trei tensiuni se datorează poziționării celor trei seturi de înfășurări la un unghi de  $120^\circ$  între ele. Dacă rotația magnetului se realizează în sensul acelor de ceasornic, înfășurarea 3 va genera tensiunea instantanee maximă după o rotație de exact  $120^\circ$  a înfășurării 2, a cărei tensiune instantanee va atinge pragul maxim la exact  $120^\circ$  după înfășurarea 1. Modul de poziționare al înfășurărilor va decide valoarea defazajului dintre formele de undă generate. Dacă luăm înfășurarea 1 ca și înfășurare de referință ( $0^\circ$ ), atunci înfășurarea doi va avea un defazaj de  $-120^\circ$  ( $120^\circ$  în urmă, sau  $240^\circ$  înainte), iar înfășurarea 3 un unghi de  $-240^\circ$  ( $240^\circ$  în urmă, sau  $120^\circ$  înainte).

## Secvența fazelor



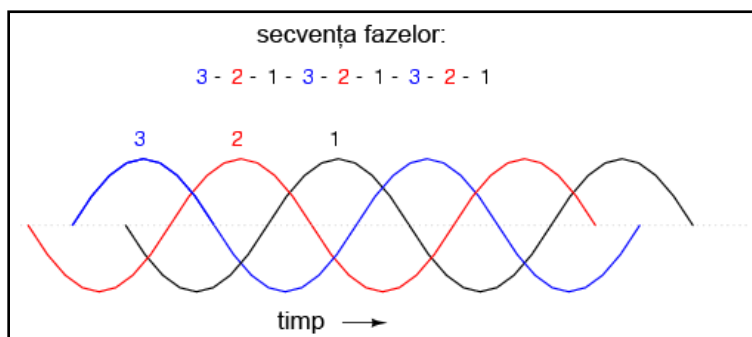
Ordinea secvențelor formelor de undă într-un sistem polifazat se numește secvența fazelor.

Secvența fazelor are o ordine bine stabilită.

Pentru rotația în sensul acelor de ceasornic, ordinea este 1-2-3. Această ordine se repetă atâta timp cât generatorul își continuă rotația (1-2-3-1-2-3-etc.).

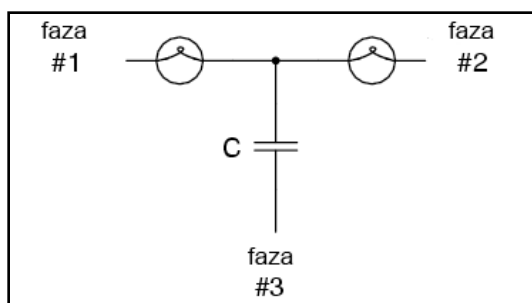
## Inversarea sensului de rotație al generatorului

Dacă inversăm sensul de rotație al generatorului, în sensul invers acelor de ceasornic, sau sensul trigonometric, magnetul va trece pe lângă perechile de poli în secvență inversă. În loc de 1-2-3, vom avea 3-2-1. Forma de undă celei de a doua înfășurări va fi defazată înaintea primei cu  $120^\circ$  iar a treia înaintea celei de a doua cu  $120^\circ$ .

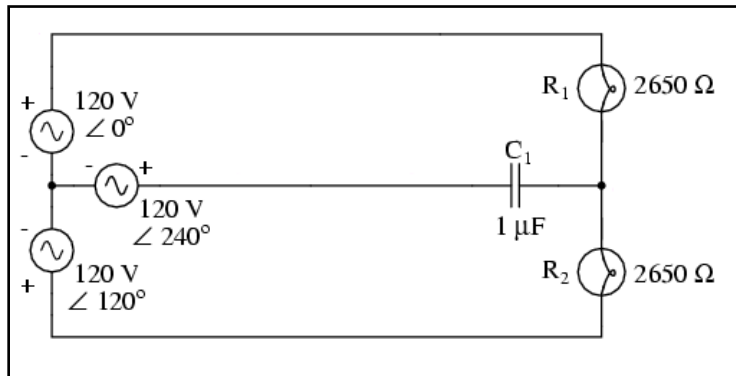


ampermetrele nu pot măsura această secvență, avem nevoie de un alt tip de instrument pentru această sarcină.

### Detectarea secvenței fazelor într-un circuit trifazat



Un circuit ingenios pentru această aplicație, utilizează un condensator pentru introducerea unui defazaj între tensiune și curent, ce sunt mai apoi folosite pentru detectarea secvenței prin comparația dintre intensitatea luminoasă a două lămpi.



Cele două lămpi au aceeași valoare a rezistenței. Condensatorul este ales astfel încât valoarea reactanței la frecvența sistemului să fie egală cu rezistența unei lămpi. Dacă ar fi să înlocuim condensatorul cu un rezistor de o valoare egală cu cea a rezistenței lămpii, intensitatea luminoasă a celor două lămpi ar fi egală, circuitul fiind echilibrat.

Totuși, condensatorul introduce un defazaj între tensiune și curent de  $90^\circ$  în faza #3. Acest defazaj, mai mare de  $0^\circ$ , dar mai mic de  $120^\circ$ , „strică” valorile curenților și ale tensiunilor celor două lămpi relativ la unghiul lor de fază față de faza 3.

Diferența de fază rezultată prin introducerea condensatorului în circuit duce la scăderea tensiunii din faza 1 la 48 V, și la creșterea tensiunii din faza 2 la 180 V. Acest lucru înseamnă că intensitatea luminoasă a celei de a doua lămpi va fi mult mai mare, lucru ce poate fi observat lesne cu ochiul liber. Dacă inversăm secvența fazelor (3-2-1), rezultatul este exact invers.

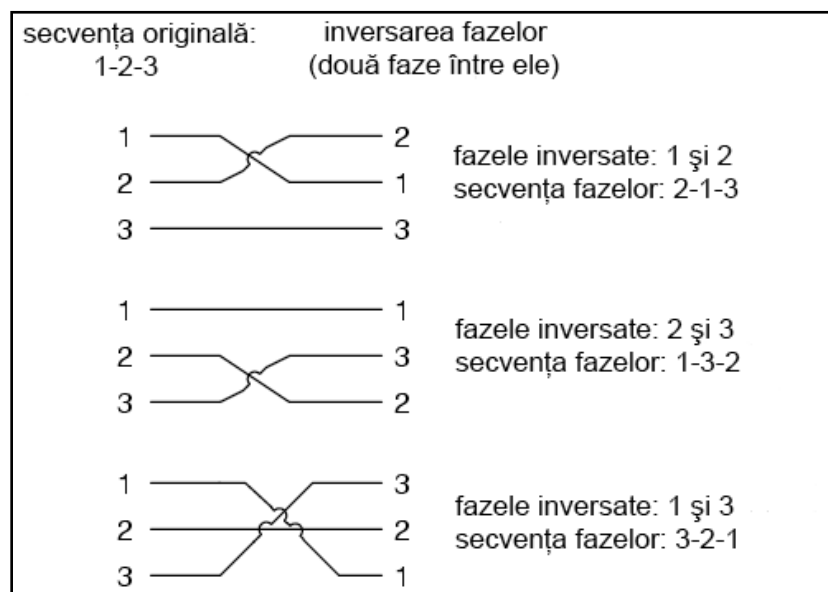
## Inversarea secvenței fazelor

Am văzut că putem inversa secvența fazelor prin schimbarea sensului de rotație al generatorului. Totuși, această modificare de rotație nu se poate realiza de către consumator, atunci când tensiunea de alimentare din rețea provine de la un furnizor național de electricitate și nu de la propriile sale generatoare. Mult mai simplu, o inversare a secvenței fazelor se realizează prin inversarea oricăror două faze între ele.

Putem observa mai bine acest lucru, dacă ne uităm la o secvență mai lungă a fazelor unei surse trifazate:  
**secvență 1-2-3 : 1-2-3-1-2-3-1-2-3-1-2-3-1-2-3...**

**secvență 3-2-1 : 3-2-1-3-2-1-3-2-1-3-2-1-3-2-1...**

Secvența 1-2-3 poate la fel de bine să fie notată prin 2-3-1 sau 3-1-2. Asemănător, secvența inversă, 3-2-1, o putem nota cu 2-1-3 sau 1-3-2.



Luând ca și secvență inițială combinația 3-2-1, putem încerca toate combinațiile posibile de inversare a oricăror două faze și să vedem secvența rezultată.

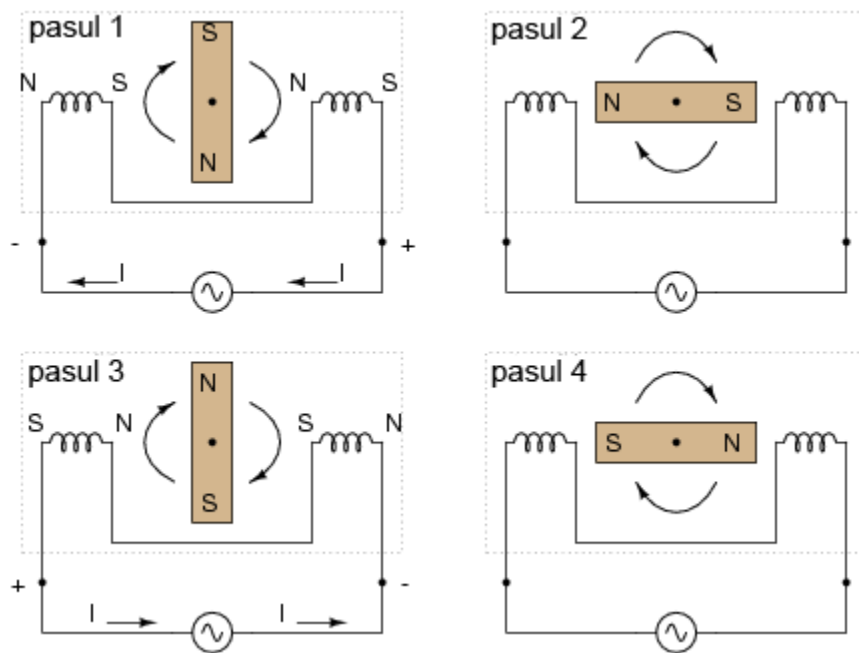
Indiferent de perechea fazelor alese pentru inversare, rezultatul este tot timpul o secvență inversată (1-2-3 devine 2-1-3, 1-3-2 sau 3-2-1, toate fiind echivalente).

## 4. Funcționarea motoarelor electrice

- Direcția de rotație a motoarelor de curent alternativ sincrone și de inducție este dată de câmpurile magnetice alternative produse de înfășurările staționare
- Motoarele de curent alternativ monofazate au nevoie de ajutor pentru pornirea lor într-o anumită direcție
- Prin introducerea unui defazaj mai mic de  $180^\circ$  între câmpurile magnetice ale unui motor de curent alternativ monofazat, se poate obține o direcție precisă a rotorului
- Motoarele de curent alternativ monofazate folosesc adesea o înfășurare auxiliară conectată în serie cu un condensator pentru crearea defazajului necesar
- Motoarele polifazate nu au nevoie de asemenea măsuri; direcția lor de rotație este fixată de secvența de rotație a tensiunilor de la care sunt alimentate

- Inversarea fazelor unui motor de curent alternativ polifazat între ele, va duce la inversare secvenței fazelor, și implicit la inversarea direcției de rotație a acestuia

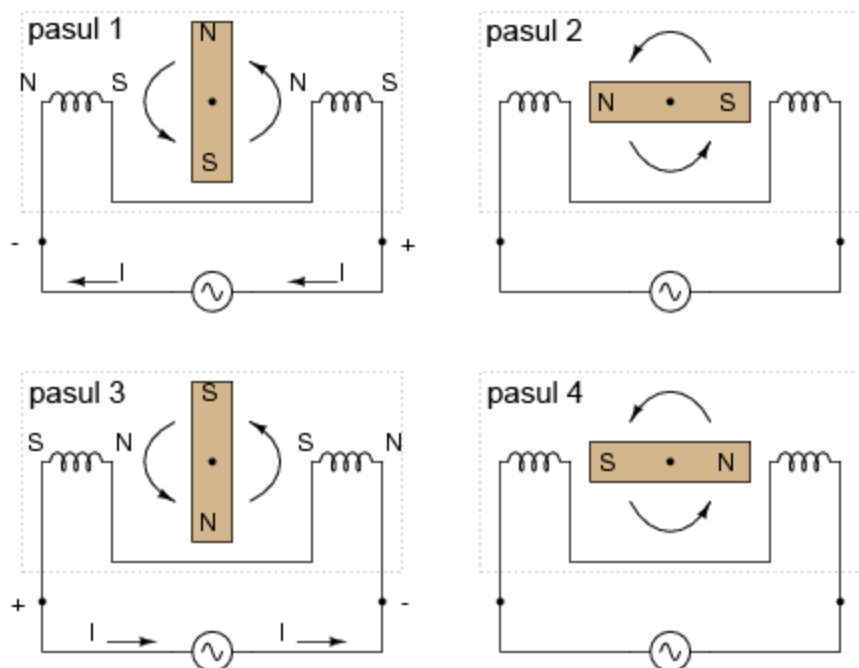
## Motorul de curent alternativ monofazat



Probabil că cel mai mare avantaj al sistemelor de curent alternativ polifazate constă în proiectarea și operarea motoarelor de curent alternativ.

După cum se știe, unele tipuri de motoare sunt practic identice din punct de vedere constructiv cu generatoarele electrice, constând dintr-un set de înfășurări staționare și un set de magneți (electromagneți) rotitori.

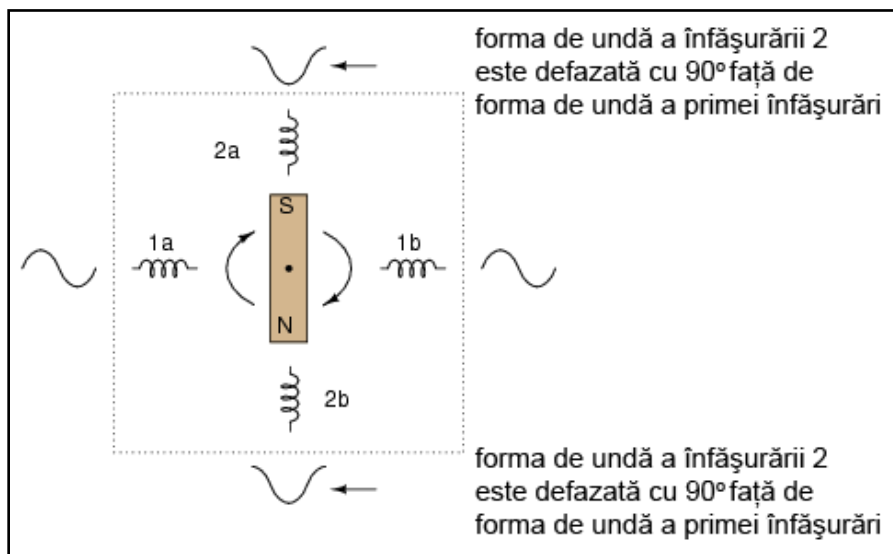
Să considerăm prima dată un motor de curent alternativ monofazat. Dacă magnetul rotitor va putea să țină pasul cu frecvența curentului alternativ prin înfășurări, acesta va fi „tras” într-o mișcare permanentă în sensul acelor de ceasornic.



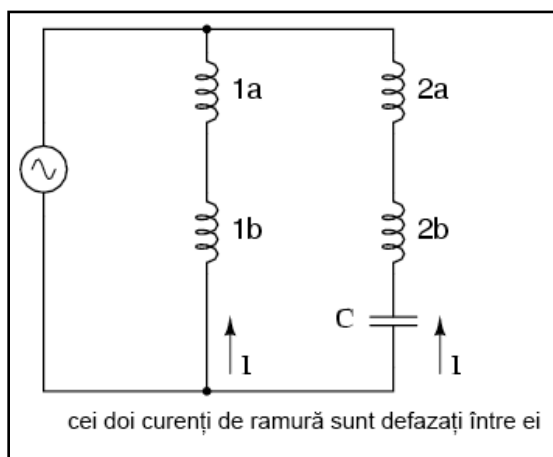
Totuși, aceasta nu este singura direcție posibilă. Ar putea la fel de bine să se rotească în sensul invers acelor de ceasornic (trigonometric), folosind exact aceeași formă de undă (vezi figura alăturată)

Folosind aceeași formă de undă, rotorul magnetic se poate învârti în oricare dintre direcții. Aceasta este o caracteristică comună a tuturor motoarelor monofazate de „inducție” și „sincrone”: nu posedă o direcție normală, sau „corectă” de rotație. O întrebare este binevenită în acest moment: cum putem porni motorul în direcția dorită, dacă acesta se poate roti la fel de bine în orice direcție? Adevărul este că aceste motoare au nevoie de puțin ajutor la pornire. Odată ajutate să pornească într-o anumită direcție, vor continua să se rotească în aceeași direcție, atâta timp când este menținută puterea electrică pe înfășurări.

## Pornirea motorului de curent alternativ monofazat



În mod normal, acest ajutor vine din partea unor seturi adiționale de înfășurări poziționate diferit față de seturile de înfășurări principale, și alimentate cu un curent alternativ defazat față de curentul principal.



Aceste înfășurări suplimentare sunt de obicei conectate în serie cu un condensator pentru introducerea unui defazaj între curenții celor două seturi de înfășurări.

Acest defazaj crează un câmp magnetic al înfășurărilor 2a și 2b ce este defazat la rândul lui cu câmpul magnetic al înfășurărilor 1a și 1b. Rezultatul este un set de câmpuri magnetice cu o direcție de rotație precisă. Această secvență de rotație „trage” la rândul său magnetul într-o direcție precisă.

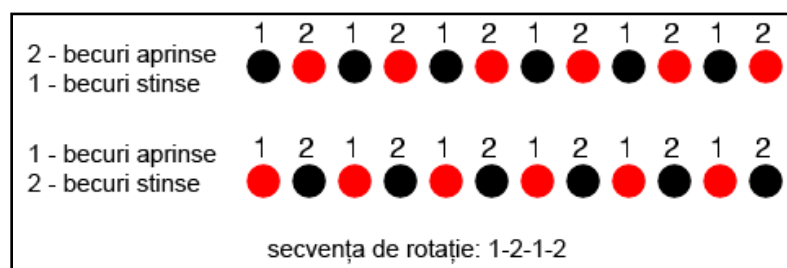
## Pornirea motorului de curent alternativ polifazat

Motoarele de curent alternativ polifazate nu necesită astfel de mecanisme pentru pornirea lor într-o anumită direcție. Datorită faptului că formele de undă ale tensiunilor au deja o direcție bine stabilită (secvența fazelor), și

câmpurile magnetice generate de înfășurări vor avea o direcție precisă. De fapt, combinația tuturor seturilor de înfășurări, lucrând împreună, crează un câmp magnetic ce poartă numele de *câmp magnetic rotitor*. Acest concept l-a inspirat și pe Nikola Tesla să dezvolte primele sisteme electrice polifazate existente, pentru a realiza motoare mai simple și mai eficiente. Avantajele sistemelor polifazate față de cele monofazate nu au fost descoperite decât mai târziu.

## Analogie pentru funcționarea motoarelor electrice

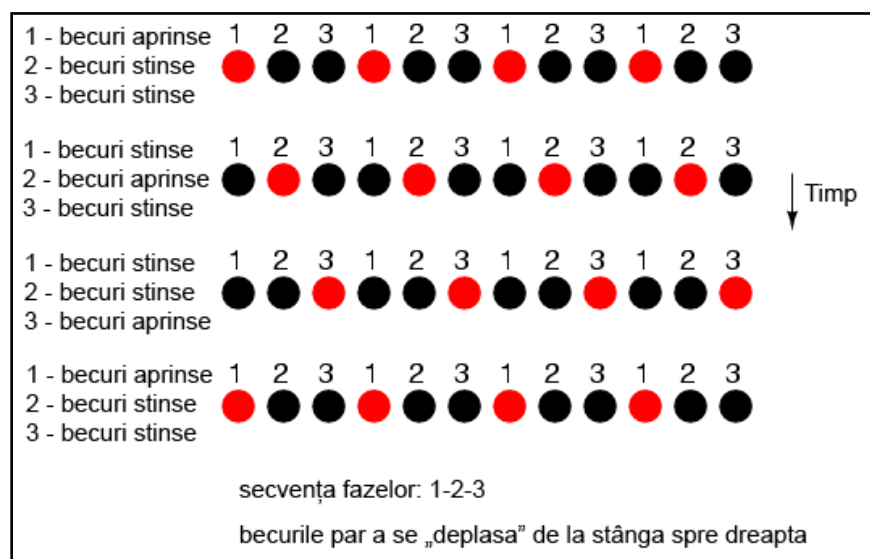
Dacă acest concept prezentat mai sus vă este încă confuz, putem folosi o analogie pentru explicarea lui mai pe înțeles. Să considerăm un set de becuțe alimentate intermitent (ce „clipesc”), precum cele folosite la decorațiile de crăciun. Unele seturi par să se „deplaseze” într-o anumită direcție pe măsură ce becurile se aprind și se sting într-o secvență bine stabilită. Altele doar se sting și se aprind fără nicio mișcare aparentă. Cum se realizează această diferență între diferitele seturi de becuri? Cu ajutorul diferențelor de fază!



Când toate becurile „1” sunt aprinse, toate becurile „2” sunt stinse, și invers. Cu acest tip de secvență, nu există nicio „mișcare” vizibilă a luminii becurilor. Putem la fel de bine să urmărim o deplasare de la stânga la dreapta, la fel de bine cum putem considera aceeași

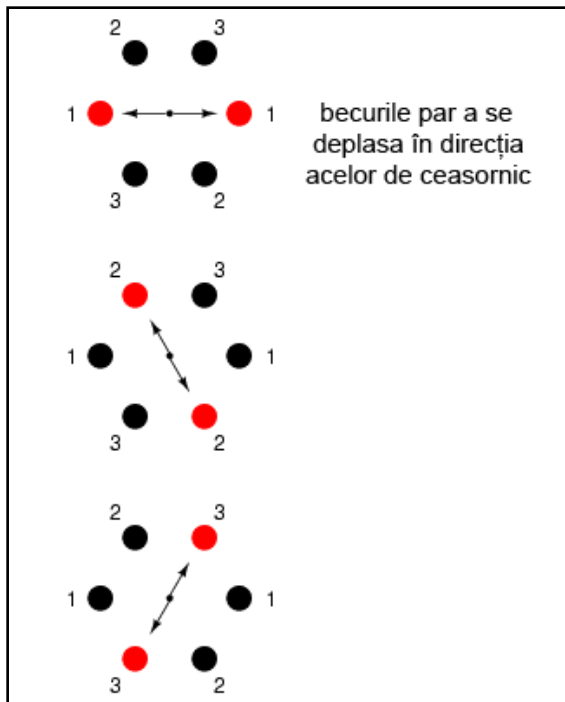
mișcare ca realizându-se de la dreapta la stânga.

Tehnic, secvențelor de aprindere-stingere ale celor două becuri sunt defazate cu  $180^\circ$  între ele (exact opus). Acest lucru este analog motorului de curent alternativ monofazat, ce poate funcționa la fel de bine în ambele direcții, dar care nu poate porni singur datorită faptului că variația câmpului său magnetic nu are o direcție precisă.



Să considerăm prin urmare un nou set de becuri, de această dată folosind trei becuri pentru secvență în loc de două, fiind și acestea defazate între ele.

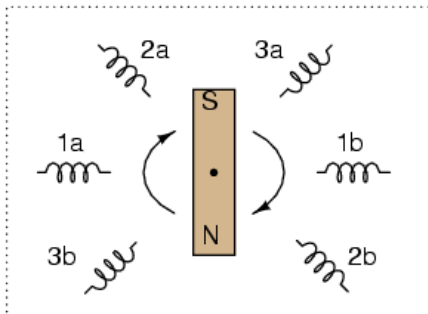




Dacă secvența fazelor este 1-2-3, becurile par a se „deplasa” de la stânga la dreapta. Ne putem acum imagina același set de becuri, dar aranjate într-un cerc.

De data aceasta, becurile par a se deplasa în cerc, în direcția acelor de ceasornic, deoarece sunt aranjate circular și nu liniar, precum era cazul precedent. Desigur, aparența mișcării becurilor se inversează dacă inversăm secvența de rotație a lor.

### Motorul de curent alternativ trifazat



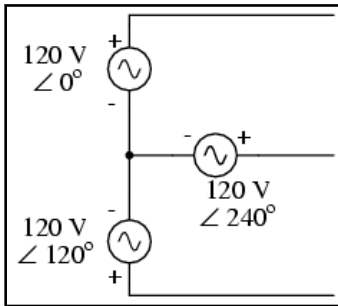
Mișcarea becurilor va fi fie în sensul acelor de ceasornic, fie în sens trigonometric, în funcție de secvența fazelor. Această situație este analoagă unui motor de curent alternativ trifazat cu trei seturi de înfășurări alimentate cu trei surse de tensiune de faze diferite.

## 5. Configurații stea și triunghi trifazate

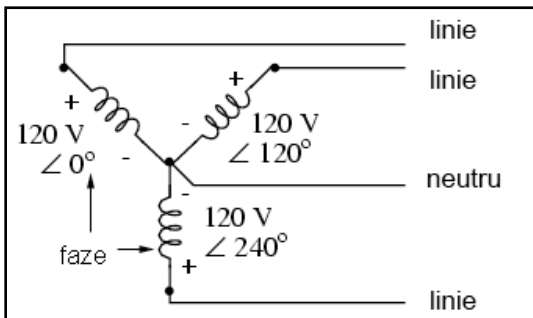
- Conductorii conectați în cele trei puncte ale unei surse sau sarcini trifazate, se numesc *linii*
- Cele trei componente ale sursei sau sarcinii unui sistem trifazat, poartă numele de *faze*
- Tensiunea de linie, este tensiunea măsurată între oricare două linii ale unui circuit trifazat
- Tensiunea de fază, este tensiunea măsurată la bornele unui singur component a sursei sau sarcinii unui sistem trifazat
- Curentul de linie este curentul prin oricare dintre liniile sursei sau sarcinii unui sistem trifazat
- Curentul de fază este curentul prin oricare dintre componentele sursei sau sarcinii unui sistem trifazat

- Fiabilitatea sistemelor în configurație triunghi este mult mai bună decât cea a sistemelor în configurație stea în caz de avarie. Totuși, sursele în configurație stea pot asigura aceeași putere pe sarcină cu un curent de linie mai mic față de conexiunea triunghi.

## Configurația stea (Y)

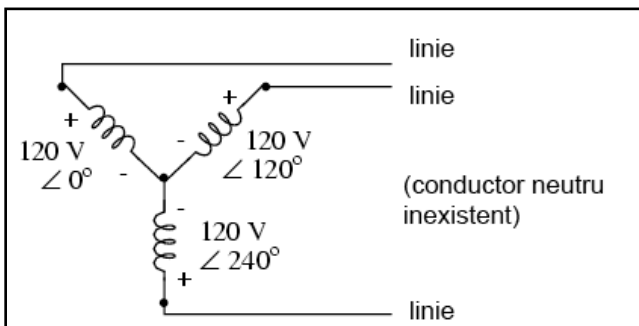


Acest tip de configurație este cel considerat până acum în secțiunile precedente. Aceasta se caracterizează prin existența unui punct comun tuturor surselor de tensiune.



Dacă redesenăm circuitul, folosind în loc de sursele de tensiune bobine, reprezentând înfășurările generatorului, și rearanjăm poziția acestora, configurația devine mai aparentă.

## Linii și faze



Cei trei conductori ce pleacă de la sursele de alimentare (înfășurări) înspre sarcină, poartă numele de „linii”, iar înfășurările propriu-zise sunt denumite „faze”. Într-un sistem „Y” (stea), prezența conductorului neutru nu este obligatorie, deși ajută la evitarea problemelor de potențial în cazul în care una dintre sarcini este scoasă din funcțiune.

## Tensiunea și curentul de linie și de fază

La măsurarea tensiunilor și curenților într-un sistem trifazat, trebuie să fim atenți ce și unde anume măsurăm. Tensiunea de linie se referă la valoarea tensiunii măsurată între oricare doi conductori, într-un sistem trifazat echilibrat. În circuitul de sus, tensiunea de linie este aproximativ 208 V. Tensiunea de fază se referă la tensiunea măsurată la bornele oricărui component (înfășurarea sursei sau impedanța) într-un circuit trifazat. Acolo unde există fir neutru, putem spune că tensiunea de fază se măsoară între linie și neutru. În circuitul de sus, tensiune

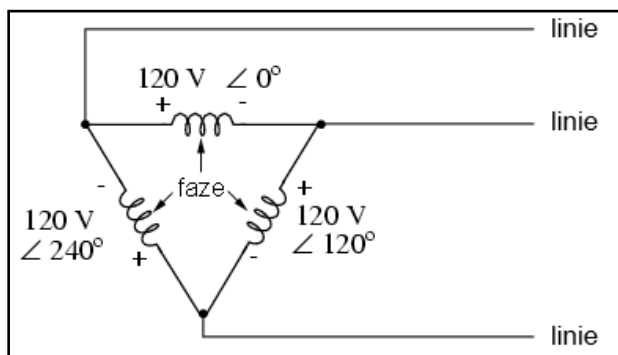
de fază este de 120 V. Ambii termeni, tensiunea/curentul de linie și tensiunea/curentul de fază au aceeași logică: primul se referă la tensiunea/curentul prin oricare dintre conductori (linie), iar celălalt la tensiunea/curentul prin oricare component.

Sursele și sarcinile dintr-o configurație în stea au tot timpul tensiunile de linie mai mari decât tensiunile de fază, iar curenții de linie egali cu cei de fază. Mai mult, dacă sursa sau sarcina este echilibrată, tensiunea de linie va fi egală cu produsul dintre tensiunea de fază și radical de ordin doi din trei:

$$E_{linie} = \sqrt{3}E_{fază}$$

$$I_{linie} = I_{fază}$$

### Configurația triunghi ( $\Delta$ )



Un alt tip de configurație pentru sistemele de alimentare trifazate este configurația triunghi, denumită și „delta”, după litera grecească  $\Delta$ .

La o primă vedere, am putea presupune că sursele de tensiune astfel conectate, ar produce un scurt-circuit, din cauză că electronii sunt liberi să se deplaseze în jurul triunghiului neexistând o altă rezistență decât impedanța internă a înfășurărilor. Însă, datorită diferențelor de fază dintre cele trei surse, acest lucru nu se întâmplă.

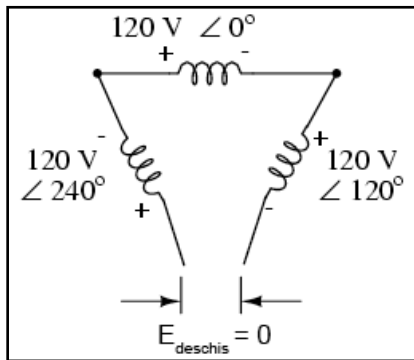
### Aplicarea legii lui Kirchhoff pentru tensiune

Putem verifica acest lucru aplicând legea lui Kirchhoff pentru tensiune și să vedem dacă suma tensiunilor din interiorul buclei formate din laturile triunghiului este într-adevăr zero. Dacă suma este zero, atunci nu va exista nicio cădere de tensiune necesară pentru împingerea electronilor de-a lungul buclei, și prin urmare, nu va exista nici curent și nici posibilitatea apariției scurt-circuitului. Începând cu înfășurarea de sus și continuând în direcție trigonometrică, expresia legii lui Kirchhoff pentru tensiune arată astfel:

$$120 \text{ V} \angle 0^\circ + 120 \text{ V} \angle 240^\circ + 120 \text{ V} \angle 120^\circ = 0$$

Într-adevăr, suma acestor trei vectori este zero.

### Deschiderea circuitului de alimentare



O altă metodă prin care putem demonstra că nu poate exista curent electric în jurul circuitului format de cele trei surse de alimentare (înfășurări), este să „deschidem” bucla la unul dintre noduri, și să calculăm diferența de potențial (tensiunea) dintre cele două ramuri.

Începând cu înfășurarea din dreapta și continuând în sens trigonometric, ecuația legii lui Kirchhoff pentru tensiune arată astfel:

$$120 \text{ V } \angle 0^\circ + 120 \text{ V } \angle 240^\circ + 120 \text{ V } \angle 120^\circ + E_{deschis} = 0$$

$$0 + E_{deschis} = 0$$

$$E_{deschis} = 0$$

Rezultatul obținut este într-adevăr zero, ceea ce înseamnă că nu va exista circulație de curent în bucla formată de triunghiul surselor de alimentare, atunci când circuitul este închis.

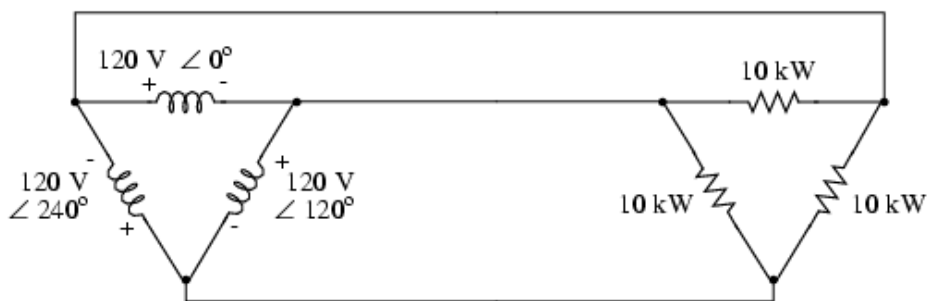
### Tensiunea și curentul de linie și de fază

Datorită faptului că fiecare pereche de conductori, într-o configurație triunghi, este conectată direct la bornele unei singure înfășurări, tensiunea de linie va fi egală cu tensiunea de fază. De asemenea, datorită faptului că fiecare conductor are un punct comun cu două înfășurări, curentul de linie va fi suma vectorilor celor doi curenți de fază.

$$E_{linie} = E_{fază}$$

$$I_{linie} = \sqrt{3} I_{fază}$$

### Exemplu



Să luăm un circuit ca și exemplu.

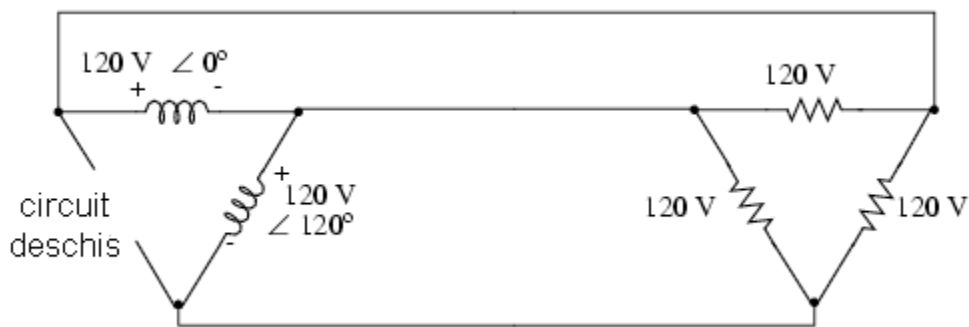
Căderea de tensiune pe fiecare rezistor va fi de 120 V, iar curentul fiecărei faze va fi de 83,33 A.

$$I = \frac{P}{E} = \frac{10 \text{ kW}}{120 \text{ V}} = 83,33 \text{ A}$$

$$I_{\text{linie}} = \sqrt{3} I_{\text{fază}} = \sqrt{3} \cdot 83,33 \text{ A} = 144,34 \text{ A}$$

## Comparație între sistemele trifazate stea și triunghi

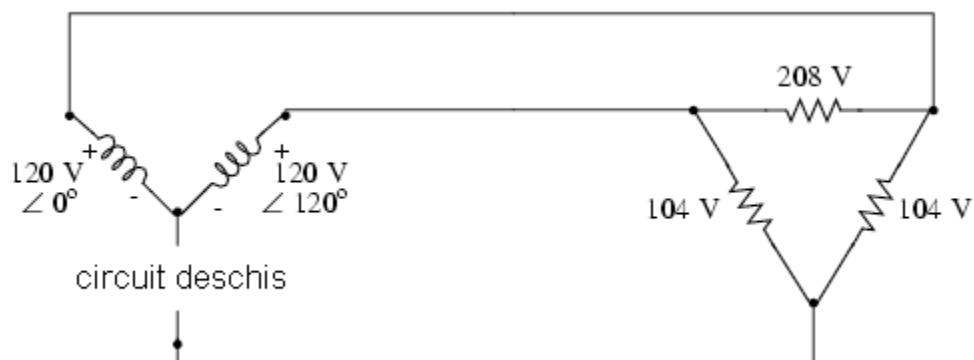
Un avantaj al utilizării configurației triunghi, constă în lipsa firului neutru. În conexiunea stea, firul neutru este necesar pentru preluarea oricăror curenți în cazul în care sarcina este dezechilibrată. Acest lucru nu este însă necesar (nici măcar posibil!) într-o configurație triunghi. Fiecare element fiind conectat direct la bornele sursei respective, tensiunea din circuit va fi aceeași indiferent de comportamentul individual al sarcinilor.



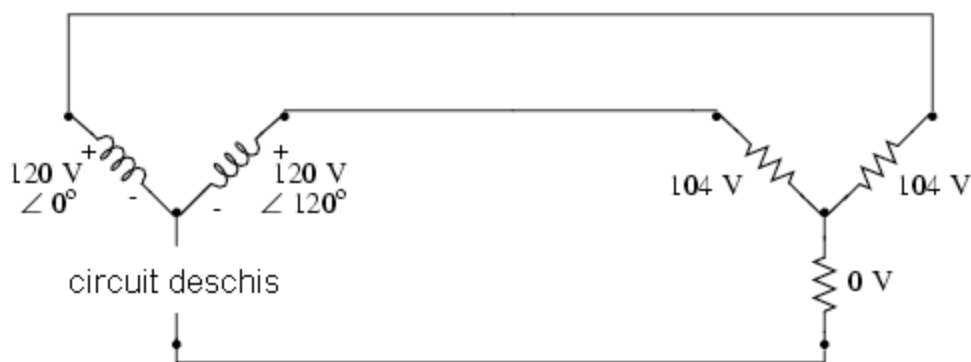
Probabil că cel mai mare avantaj a conexiunii triunghi este toleranța sistemului în caz de defect. Defectarea uneia dintre înfășurări nu va influența tensiunea sarcinii și nici

curentul!

Singura consecință al unui defect într-una dintre înfășurări, pentru un sistem în configurație triunghi, este creșterea curentului de fază pentru înfășurările rămase.



Să comparăm acest comportament cu cel al unui sistem în configurație stea, dar cu aceeași configurație sa sarcinii (triunghi).



Cu o sarcină în configurație triunghi ( $\Delta$ ), căderea de tensiune pe două dintre sarcini scade la jumătate (104 V), iar una dintre sarcini rămâne la tensiunea originală, 208 V. O sarcină în configurație Y, suferă și

mai mult de pe urma aceluiași defect al înfășurării.

În acest caz, numărul sarcinilor ce suferă o reducere a tensiunii se ridică la două, iar căderea de tensiunea pe cea de a treia sarcină este zero! Din această cauză, sursele de tensiune în configurație triunghi ( $\Delta$ ) sunt preferate pentru fiabilitatea lor. Totuși, dacă este necesară o tensiune duală (120/208), sau curenți de linie mai mici, sunt preferate sistemele în conexiune stea (Y).

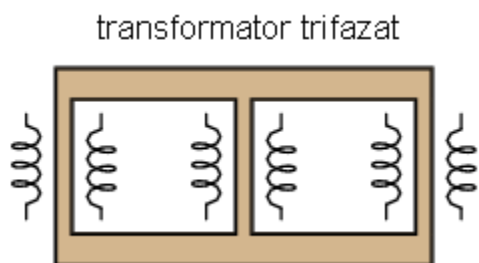
## 6. Transformatorul trifazat

- Un transformator trifazat este compus din câte trei seturi de înfășurări primare și secundare, ce împart același miez feromagnetic

### Scop

Din moment ce sistemele trifazate sunt folosite atât de des în sistemele de distribuție a energiei electrice, este necesară folosirea transformatoarelor trifazate pentru ridicarea sau coborârea tensiunilor. Este adevărat că se pot folosi individual transformatoare monofazate, câte unul pe fiecare fază și în diverse combinații, pentru realizarea acestei sarcini. Dar, transformatoarele trifazate sunt construite special pentru acest scop, folosind mult mai puțin material, volum și greutate decât utilizarea modulară a transformatoarelor monofazate.

### Structura unui transformator trifazat



Un transformator trifazat este compus din trei seturi de înfășurări primare și secundare, înfășurate pe același miez feromagnetic și având fiecare propria sa latură.

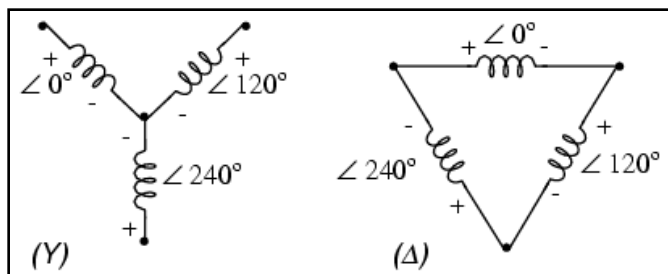
## Configurația înfășurărilor

Aceste înfășurări primare și secundare pot fi conectate între ele în configurații stea sau configurații triunghi, astfel:

| Primar   | - | Secundar |
|----------|---|----------|
| Y        | - | Y        |
| Y        | - | $\Delta$ |
| $\Delta$ | - | Y        |
| $\Delta$ | - | $\Delta$ |

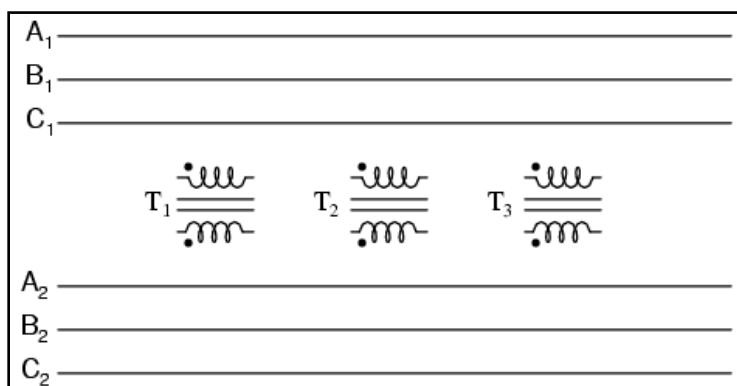
Motivul alegerii configurației  $\Delta$  sau Y pentru conexiunile înfășurărilor transformatorului sunt aceleași ca și în cazul aplicațiilor trifazate: conexiunile Y oferă posibilitatea tensiunilor multiple, iar conexiunile  $\Delta$  oferă un nivel mai ridicat de fiabilitate.

Cel mai important aspect al conectării celor trei seturi de înfășurări o reprezintă secvența fazelor înfășurărilor (punctele sunt folosite pentru desemnarea „polarității” înfășurărilor).



Putem vedea relațiile dintre fazele înfășurărilor Y și  $\Delta$ : centrul înfășurării trebuie să fie ori „-” ori „+”, pentru toate cele trei înfășurări, iar polaritățile înfășurărilor trebuie să complementare, „+” și „-”:

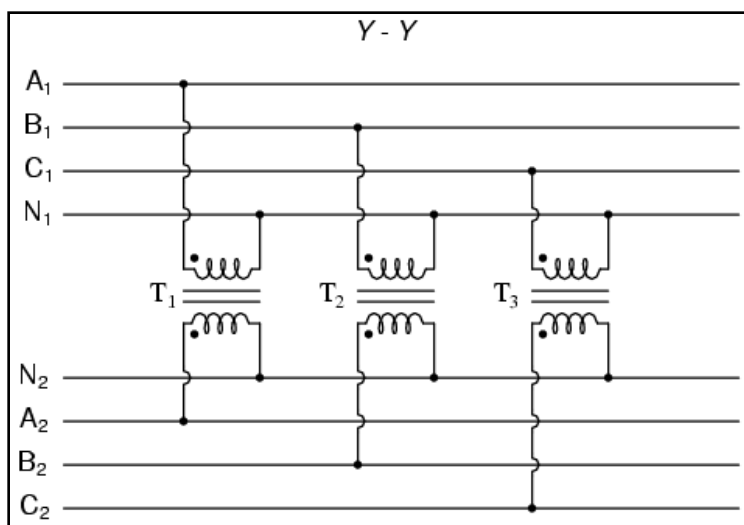
## Secvența fazelor



Realizarea corectă a secvenței fazelor, atunci când înfășurările nu sunt prezentate sub forma configurațiilor stea sau triunghi, poate să fie destul de dificilă. Să ilustrăm acest lucru, pornind din figura alăturată.

Fiecare transformator monofazat reprezintă o înfășurare primară plus cea secundară, întreg ansamblul fiind echivalent din punct de vedere funcțional unui transformator trifazat. Cele trei transformatoare monofazate sunt vor fi conectate împreună pentru transformarea puterii dintr-un sistem trifazat în altul.

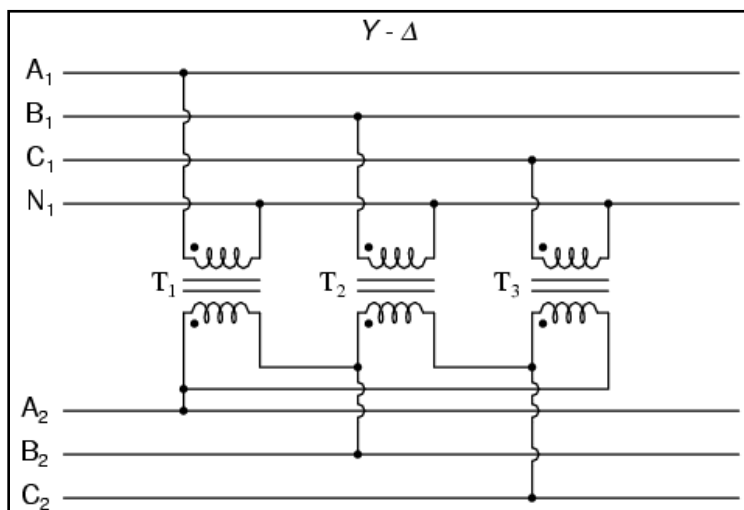
## Configurația Y-Y (stea-stea)



Să considerăm conexiunea Y-Y.

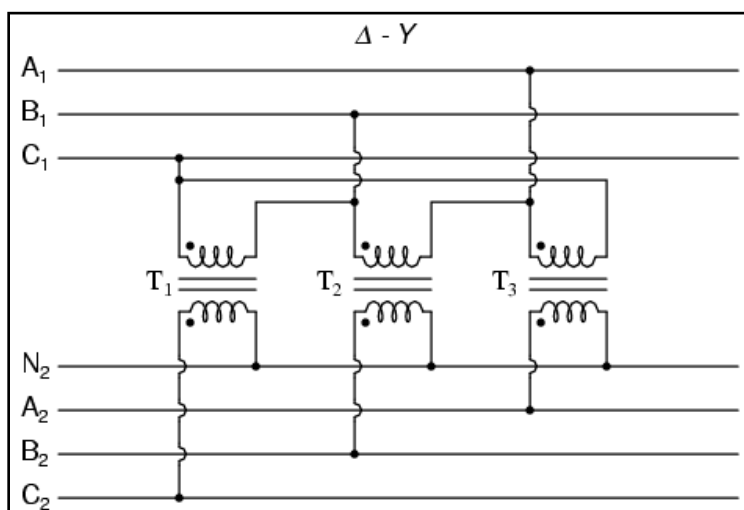
În cazul de față, toate înfășurările marcate cu punct sunt conectate la fazele lor respective, A, B, C, iar înfășurările fără punct sunt conectate împreună (la firul neutru, N) pentru a forma centrul fiecărei configurații stea. Dacă realizăm ambele înfășurări în configurație Y, putem folosi conductori de nul ( $N_1$  și  $N_2$ ) în fiecare sistem trifazat.

### Configurația Y- $\Delta$ (stea-triunghi)



În acest caz, înfășurările secundare sunt conectate în lanț, înfășurarea punctată fiind conectată la următoarea înfășurare ne-punctată, formând o buclă  $\Delta$ .

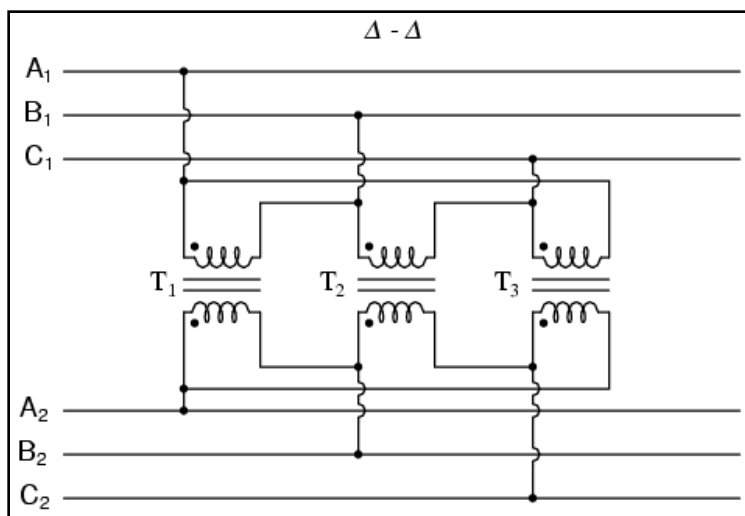
### Configurația $\Delta$ -Y (triunghi-stea)



O asemenea configurație permite folosirea tensiunilor multiple, linie-linie, sau linie-neutru, în sistemul de putere secundar, folosind un sistem primar fără neutru.

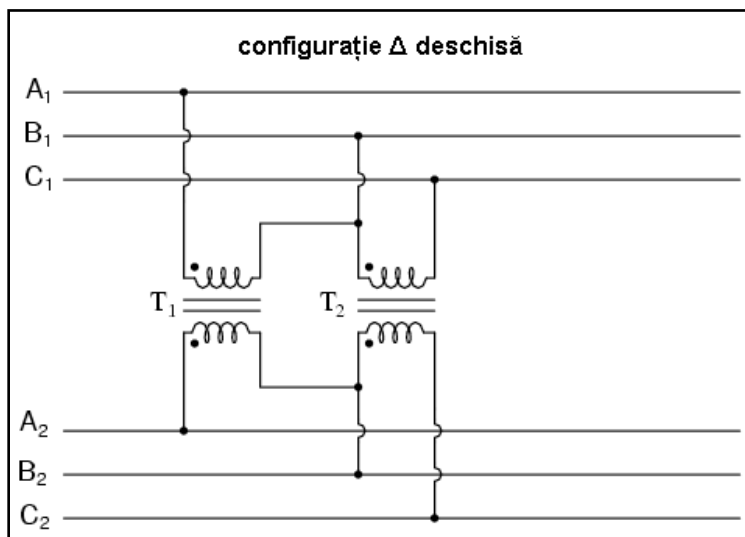


### Configurația $\Delta$ - $\Delta$ (triunghi-triunghi)



Atunci când nu avem nevoie de un conductor neutru în sistemul secundar, cele mai folosite configurații sunt cele triunghi-triunghi, datorită fiabilității lor crescute.

### Configurația V (triunghi deschisă)



Considerând faptul că o configurație triunghi poate funcționa suficient de bine folosind doar două înfășurări, unele scheme de transformare trifazate utilizează doar două transformatoare, reprezentând o configurație triunghi-triunghi, dar fără una dintre înfășurările primare și secundare.

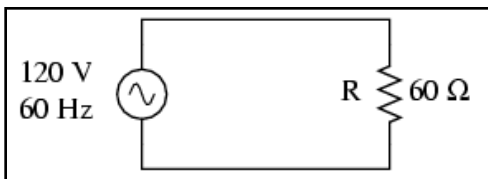
Această configurație mai este cunoscută și sub numele de „V” sau „triunghi deschisă”. Fiecare dintre cele două transformatoare va trebui să fie însă supradimensionat, pentru a putea face față aceleiași puteri precum o configurație standard cu trei transformatoare în configurație triunghi, dar de multe ori, avantajele de cost, mărime și greutate, fac ca această configurație să merite realizată. Totuși, în caz de avarie, sistemul nu poate funcționa la fel ca un sistem triunghi-triunghi în aceeași situație. Dacă unul din cele două transformatoare se defectează, tensiunile și curenții de sarcină vor avea cu siguranță de suferit.

## 11 - Factorul de putere

### 1. Puterea în circuitele rezistive și reactive

- Într-un circuit pur rezistiv, toată puterea se disipă pe rezistor, iar tensiunea și curentul sunt în fază
- Într-un circuit pur reactiv, nu există putere disipată pe sarcină, ci, puterea este absorbită și reintrodusă alternativ dinspre și înspre sursă. Curentul și tensiunea sunt defazate cu  $90^\circ$
- Într-un circuit mixt, ce conține atât elemente rezistive cât și elemente reactive, puterea disipată de sarcină va fi mai mare decât puterea reintrodusă în circuit, dar totuși, o parte din putere se disipă iar o parte este absorbită și reintrodusă în circuit de către elementele reactive. Tensiunea și curentul sunt defazate cu un unghi între  $0^\circ - 90^\circ$

#### Circuit pur rezistiv

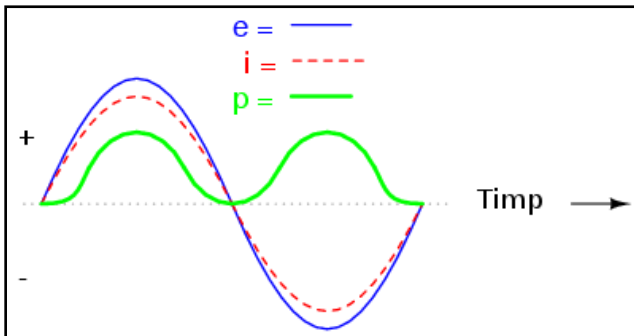


Să considerăm un circuit monofazat de curent alternativ, compus dintr-o sursă de tensiune de 120 V, la frecvența de 60 Hz, și o sarcină rezistivă.

$$Z_R = 60 + j0 \, \Omega \text{ sau } Z_R = 60 \, \Omega \angle 0^\circ$$

$$I + \frac{E}{Z} = \frac{120 \, \text{V}}{60 \, \Omega}$$

Curentul efectiv prin sarcină va fi de 2 A, iar puterea disipată de 240 W. Deoarece sarcina este pur rezistivă (fără reactanță), curentul este în fază cu tensiunea, iar calculele sunt asemănătoare unui circuit de curent continuu.



Formele de undă ale tensiunii, curentului și puterii, sunt cele din figura alăturată.

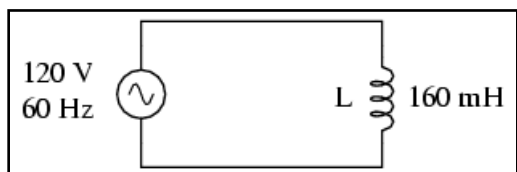
Puterea este tot timpul pozitivă în acest caz. Acest lucru înseamnă că puterea este tot timpul disipată de sarcina rezistivă și nu este reintrodusă în circuit, așa cum este cazul sarcinilor reactive.

De asemenea, frecvența formei de undă a puterii este dublul frecvenței tensiunii și a curentului. Această diferență de frecvență face imposibilă exprimarea puterii în circuitele de curent alternativ folosind aceeași notație

complexă, rectangulară sau polară, folosită în cazul tensiunii, curentului și a impedanței, deoarece această formă de exprimare matematică presupune o frecvență constantă pentru toate formele de undă implicate.

Cea mai bună metodă de calcul a puterii în circuitele de curent alternativ se realizează folosind notația scalară, iar relațiile de fază sunt evidențiate cu ajutorul trigonometriei.

## Circuit pur inductiv

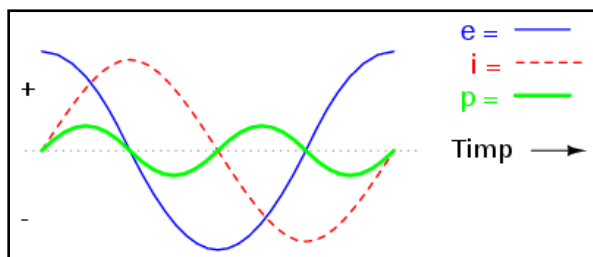


Ca și comparație, să considerăm un circuit simplu cu o sarcină reactivă.

$$X_L = 60,31 \, \Omega$$

$$Z_L = 0 + j60,31 \, \Omega \text{ sau } Z_L = 60,31 \, \Omega \angle 90^\circ$$

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{120 \, \text{V}}{60,31 \, \Omega} = 1,98 \, \text{A}$$

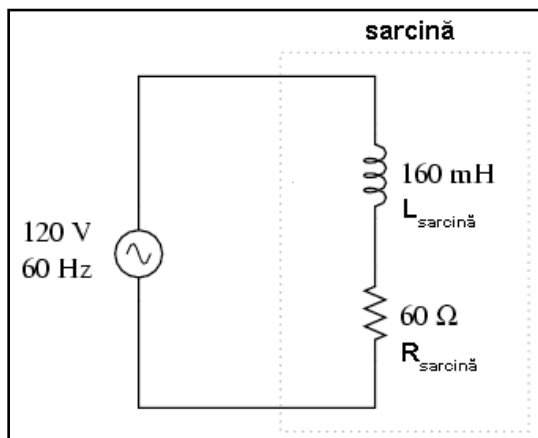


Putem observa defazajul dintre tensiune și curent, precum și forma de undă a puterii, din figura alăturată.

În acest caz, puterea variază alternativ între partea pozitivă și cea negativă. Acest lucru înseamnă că puterea este alternativ absorbită și eliberată din și în circuit. Dacă am considera sursa ca fiind un generator mecanic, practic, energia consumată

pentru acționarea arborelui ar fi zero, deoarece sarcina nu consumă deloc putere.

## Circuit rezistiv-inductiv



Să considerăm acum un circuit cu sarcină rezistiv-inductivă.

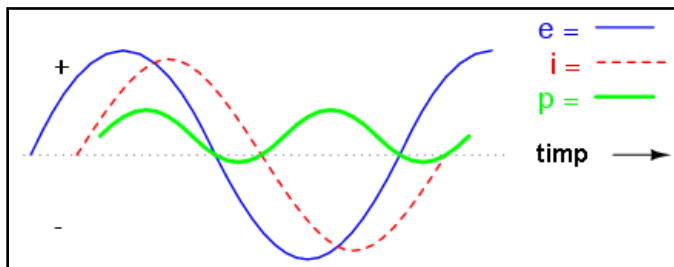
$$X_L = 60,31 \, \Omega$$

$$Z_L = 0 + j60,31 \text{ sau } Z_L = 60,31 \, \Omega \angle 90^\circ$$

$$Z_R = 60 + j0 \, \Omega \text{ sau } Z_R = 60 \, \Omega \angle 0^\circ$$

$$Z_{total} = 60 + j60,31 \, \Omega \text{ sau } Z_{total} = 85,07 \, \Omega \angle 45,15^\circ$$

Aceasta este valoarea efectivă a curentului (1,41 A) pe care ar arăta-o un ampermetru conectat în serie cu rezistorul și bobina.



Graficul formelor de undă arată în acest caz, este cel din figura alăturată.

Și în acest caz, puterea alternează între partea negativă și cea pozitivă, dar valoarea puterii „pozitive” este mai mare decât cea negativă. Cu alte cuvinte, o combinație serie rezistor-bobină va consuma mai multă putere

decât va introduce înapoi în circuit.

## 2. Puterea reală, reactivă și aparentă

- Puterea disipată de o sarcină, sub formă de rezistor, poartă numele de putere reală. Simbolul matematic: P, unitatea de măsură: Watt (W)
- Puterea absorbită și returnată în circuit datorită proprietăților reactive ale sarcinii, sub formă de condensator sau bobină, poartă numele de putere reactivă. Simbolul matematic: Q, unitatea de măsură: Volt-Amper-Reactiv (VAR)
- Puterea totală dintr-un circuit de curent alternativ, atât cea disipată cât și cea absorbită/returnată, poartă numele de putere aparentă. Simbolul matematic: S, unitatea de măsură: Volt-Amper (VA)

### Puterea reală (P)

$$P = I^2 R; \quad P = \frac{E^2}{R}$$

Puterea reală disipată, sau consumată dintr-un circuit, poartă numele de putere reală, unitatea sa de măsură este **Watt**-ul, iar simbolul matematic este „P”.

## Puterea reactivă (Q)

$$Q = I^2 X; \quad Q = \frac{E^2}{X}$$

Se știe că elementele reactive precum bobinele și condensatoarele nu disipă putere, dar existența căderii de tensiune și a curentului la bornele lor, dă impresia că acestea ar disipa putere. Această „putere nevăzută” poartă numele de putere reactivă, iar unitatea sa de măsură este Volt-Amper-Reactiv (VAR), și nu Watt-ul. Simbolul matematic pentru puterea reactivă este Q.

## Puterea aparentă (S)

$$S = I^2 Z; \quad S = \frac{E^2}{Z}; \quad S = IE$$

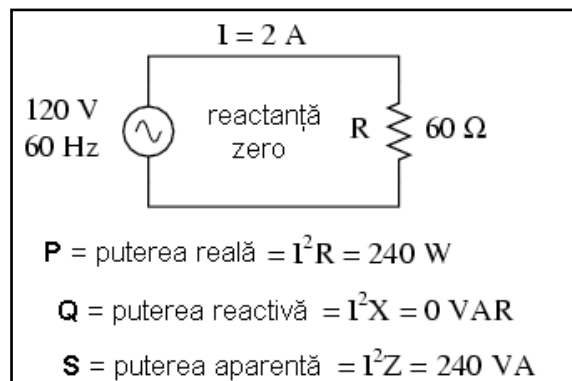
Combinăția dintre cele două puteri, cea reactivă și cea reală, poartă numele de putere aparentă. Unitatea de măsură a puterii aparente este Volt-Amper (VA), iar simbolul matematic este „S”.

## Observație

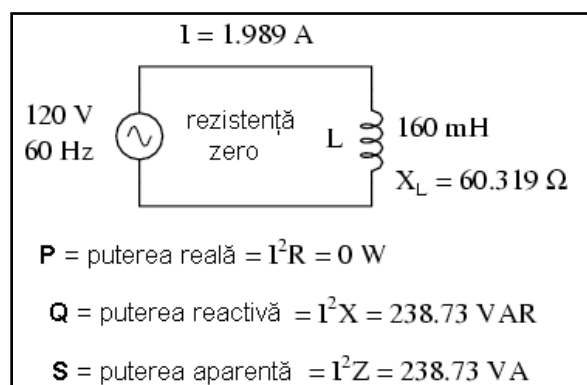
Ca și regulă, puterea reală este o caracteristică a elementelor disipative, de obicei rezistori, puterea reactivă caracterizează reactanța (X) circuitului, iar puterea aparentă depinde de impedanța (Z) totală a circuitului. Datorită faptului că folosim valori scalare pentru reprezentarea puterilor, toate valorile complexe ale tensiunilor, curenților și impedanțelor trebuie să fie reprezentate sub formă polară și nu sub formă reală sau rectangulară.

Există două ecuații pentru calcularea puterilor reale și reactive, dar există trei ecuații pentru calcularea puterii aparente,  $P = IE$  fiind folosită doar în acest scop.

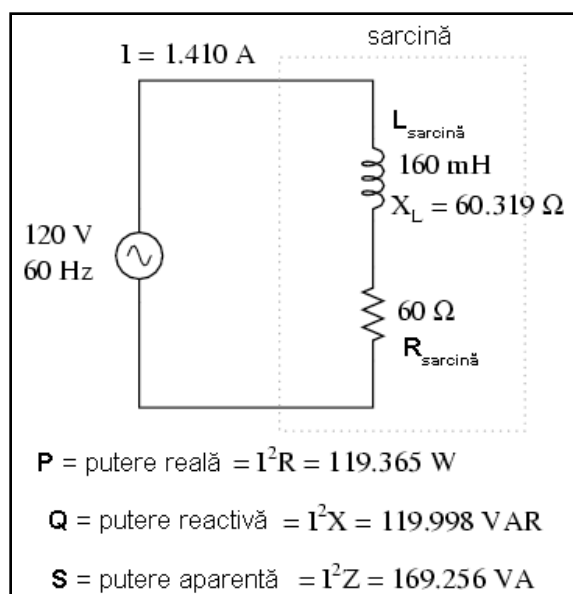
## Circuit pur rezistiv



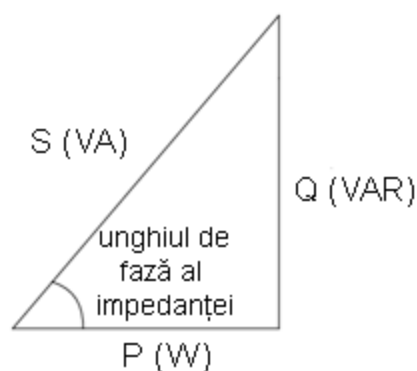
## Circuit pur inductiv



## Circuit rezistiv-inductiv



## Triunghiul puterilor



Relația dintre cele trei tipuri de putere, reală, reactivă și aparentă, poate fi exprimată sub formă trigonometrică. Această exprimare este cunoscută sub numele de „triunghiul puterilor”.

Folosind teorema lui Pitagora, putem afla lungimea oricărei laturi a triunghiului dreptunghic, latură ce reprezintă de fapt puterea respectivă, dacă știm „lungimile” celorlalte două laturi, sau o lungime și unghiul de fază din circuit

## 3. Calcularea și corectarea factorului de putere

- Factorul de putere reprezintă raportul dintre puterea reală și puterea aparentă
- Corectarea factorului de putere dintr-un circuit poate fi realizată prin conectarea în paralel a unei reactanțe opuse față de reactanța sarcinii. Dacă reactanța sarcinii este inductivă, ceea ce este cazul aproape tot timpul, factorul de putere se corectează prin adăugarea unui condensator în paralel cu sarcina

## Factorul de putere

Unghiul acestui „triunghi al puterilor” reprezintă raportul dintre valoarea puterii disipate (sau consumate) și cantitatea de putere absorbită/returnată. De asemenea, reprezintă și unghiul de fază al impedanței circuitului, sub formă polară. Acest raport dintre puterea reală și puterea aparentă poartă numele de factor de putere al circuitului (k). De asemenea, din geometria triunghiului, putem deduce că factorul de putere este egal și cu cosinusul unghiului de fază. Folosind valorile din circuitul precedent:

$$k = \frac{P}{S} = \frac{119,36 \text{ W}}{169,25 \text{ VA}} = 0,7$$

$$\cos 45,15^\circ = 0,7$$

Fiind calculat ca un raport, factorul de putere nu are unitate de măsură.

### Circuite pur rezistive

Pentru circuitele pur rezistive, factorul de putere este 1 (perfect), deoarece puterea reactivă este egală cu zero. În acest caz, triunghiul puterilor este o linie orizontală, deoarece latura opusă (puterea reactivă) va avea lungimea zero.

### Circuite pur reactive

Pentru circuitele pur inductive, factorul de putere este zero, datorită faptului că puterea reală este zero. În acest caz, triunghiul puterilor este o linie verticală, deoarece latura adiacentă (puterea reală) va avea lungimea zero. Același lucru este valabil și pentru circuitele pur capacitive, doar că sensul liniei verticale va fi în jos, nu în sus, cum este cazul circuitelor pur inductive.

### Importanța factorului de putere

Factorul de putere este un element foarte important în proiectarea circuitelor electrice de curent alternativ, deoarece un factor de putere mai mic decât 1 înseamnă că circuitul respectiv, sau mai bine spus, conductorii circuitului în cauză, trebuie să conducă mai mult curent decât ar fi necesar dacă reactanța circuitului ar fi zero, caz în care, cu un curent mai mic, puterea reală distribuită pe sarcină ar fi aceeași. Un curent mai mare înseamnă secțiuni ale conductorilor mai mari, ceea ce afectează direct costurile realizării instalației electrice.

Dacă circuitul considerat mai sus, ar fi fost pur rezistiv, am fi putut transporta o putere de 169,25 W spre sarcină, cu aceeași valoare a curentului de 1,410 A, și nu doar 119,36 W, valoare ce este disipată în acest moment pe sarcină. Un factor de putere scăzut se traduce printr-un sistem inefficient de distribuție al energiei.

## Corectarea factorului de putere

Factorul de putere poate fi însă corectat, paradoxal, prin adăugarea în circuit a unei sarcini suplimentare care să „consume” o cantitate egală de putere reactivă, dar de sens contrar, pentru anularea efectelor reactanței inductive a sarcinii. Reactanțele inductive pot fi anulate și cu ajutorul reactanțelor capacitive, și anume, prin adăugarea unui condensator în paralel cu sarcina (în circuitul precedent). Efectul celor două reactanțe opuse, conectate în paralel, este să aducă impedanța totală a circuitului la o valoare egală cu cea a rezistenței totale. Rezultatul este reducerea unghiului impedanței la zero, sau o valoare cât mai apropiată de zero.

### Introducerea condensatorului în circuit

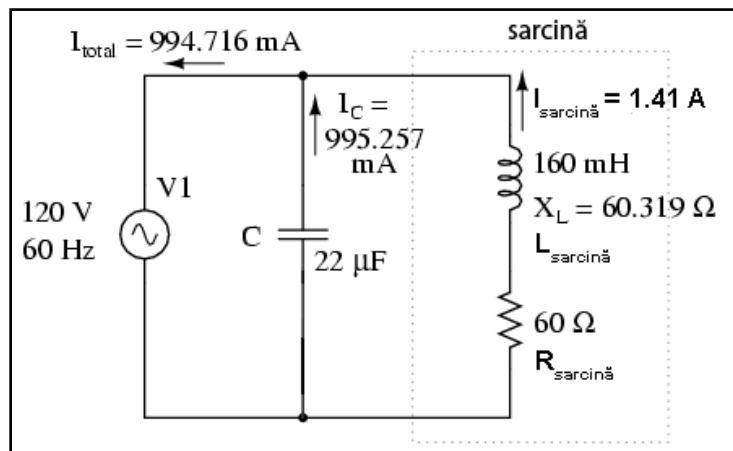
Știm că puterea reactivă, necorectată, este de 119,99 VAR (inductiv), prin urmare, trebuie să calculăm mărimea corectă a condensatorului, mărime necesară pentru a produce o cantitate egală de putere reactivă (capacitivă). Condensatorul va fi conectat în paralel cu sursa, prin urmare, vom folosi următoarele formule:

$$Q = \frac{E^2}{X} \rightarrow X = \frac{E^2}{Q}$$

$$X = \frac{(120 \text{ V})^2}{119,998 \text{ VAR}} = 120,002 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \rightarrow C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 120,002 \Omega} = 22,105 \mu\text{F}$$



Conform rezultatului de mai sus, folosim un condensator cu o capacitate de 22 μF.



## Recalcularea factorului de putere

$$Z_{total} = Z_C // (Z_L - -Z_R)$$

$$Z_{total} = 120,57 \, \Omega \angle -90^\circ // (60,31 \, \Omega \angle 90^\circ - -60 \, \Omega \angle 0^\circ)$$

$$Z_{total} = 120,64 - j573,57 \, m\Omega \text{ sau } Z_{total} = 120,64 \, \Omega \angle 0,27^\circ$$

$$P = I^2 R = 119,365 \, W$$

$$S = I^2 Z = 119,366 \, VA$$

Factorul de putere al circuitului a crescut substanțial, fiind foarte aproape de valoarea 1. Curentul principal a scăzut de la 1,41 A la 994,7 mA, iar puterea disipată pe rezistorul de sarcină a rămas neschimbată, 119,365 W:

$$k = \frac{119,365 \, W}{119,366 \, VA} = 0,9999887$$

$$\angle = 0,272^\circ$$

$$\cos 0,272^\circ = 0,9999887$$

## Observații

Din moment ce impedanța finală este un număr pozitiv, putem spune că, per total, inductivitatea circuitului este mai mare decât capacitatea sa. Dacă corectarea factorului de putere ar fi fost perfectă, unghiul impedanței ar fi fost zero, sau pur rezistiv. Dacă în schimb, am fi adăugat un condensator prea mare în paralel, am fi obținut un unghi al impedanței negativ, indicând faptul că inductivitatea circuitului este mai mică decât capacitatea sa. Cu un factor de putere de 0,9999, defazajul dintre curent și tensiune este foarte aproape de 0°.

Din moment ce curentul și tensiunea sunt aproximativ în fază, produsul celor două va da o putere pozitivă pe aproximativ întreaga perioadă. Cu un factor de putere mult sub 1, produsul celor două ar fi fost negativ, fapt ce duce la reintroducerea puterii negative în circuit, înapoi spre generator. Această putere nu poate fi „vândută”, dar circulația sa de la sursă la sarcină și invers, duce la pierderi de putere în lungul liniilor de transport datorită rezistenței acestora. Conectarea condensatorului în paralel cu sarcina, rezolvă această problemă.

De notat faptul că reducerea pierderilor prin liniile de transport al curentului electric, se aplică doar de la generator la punctul de corecție a factorului de putere (datorită condensatorului). Cu alte cuvinte, există în continuare circulație electrică între condensator și sarcina (rezistiv-)inductivă. Acest lucru nu este în general o problemă însă, deoarece aplicarea corecției factorului de putere se realizează în vecinătatea sarcinii în cauză.

## Pericolul supra-corectării

De asemenea, o capacitatea prea mare într-un circuit de curent alternativ va duce la un factor de putere scăzut, la fel ca în cazul unei inductanțe prea mari. Trebuie să fim prin urmare foarte atenți când realizăm corectarea factorului de putere, pentru a nu supra-corecta circuitul.

### **Corectarea practică a factorului de putere**

Atunci când avem nevoie de corectarea practică a factorului de putere într-un sistem de putere în curent alternativ, probabil că nu vom fi atât de norocoși încât să cunoaștem inductanța exactă a sarcinii. Putem folosi un aparat de măsură special, denumit cosfimetru pentru calcularea factorului de putere. Puterea aparentă o putem calcula folosind un voltmetru și un ampermetru. În cel mai rău caz însă, am putea fi nevoiți să folosim un osciloscop pentru calcularea diferenței de fază, în grade, între formele de undă ale tensiunii și ale curentului; factorul de putere va fi cosinusul celui unghi.

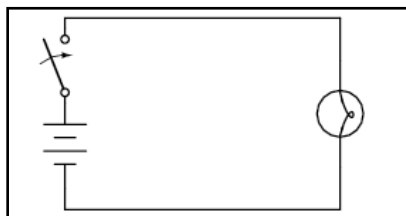
Dacă avem acces la un wattmetru pentru măsurarea puterii reale, putem compara valoarea citită cu valoarea puterii aparente deduse din produsul tensiunii totale cu a curentului total.

## 12 - Linii electrice lungi

### 1. Circuitele electrice și viteza luminii

- Într-un circuit electric, curentul se „deplasează” cu viteza luminii, cu toate că electronii ce compun acest curent au o viteză de deplasare mult mai mică

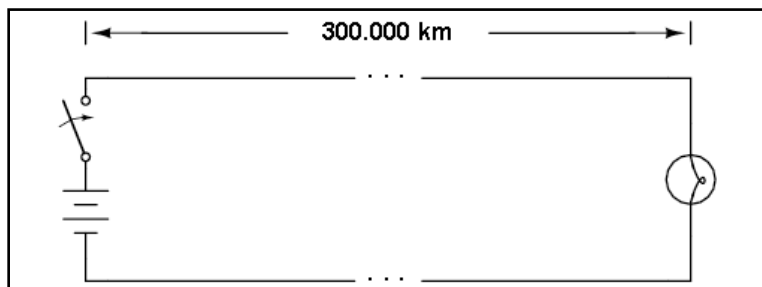
#### Circuit electric simplu



Să presupunem că avem un circuit electric simplu, format dintr-o baterie, o lampă și un întrerupător. La închiderea întrerupătorului, lampa se aprinde instant. La deschiderea întrerupătorului, lampa se stinge instant.

De fapt, aprinderea lămpii durează o mică fracțiune de secundă până se încălzește și emite lumină, timp necesar pentru ca valoarea curentului să devină suficient de mare. Prin urmare, efectul nu este instantaneu. Pentru aplicațiile practice însă, putem considera că efectul este imediat, atunci când lampa și întrerupătorul se află în vecinătate, întrucât „deplasarea” electronilor în conductori are loc cu o viteză foarte mare, și anume, viteza luminii (aproximativ 300.000 de kilometri pe secundă).

#### Circuit electric format din conductori foarte lungi

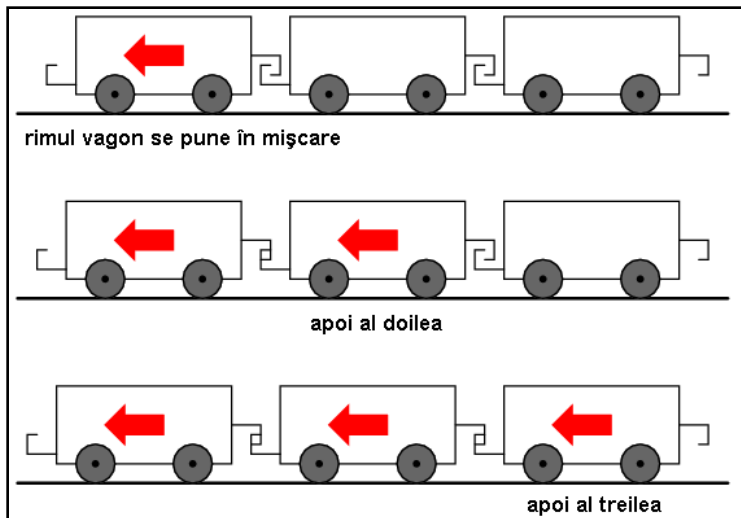


Ce s-ar întâmpla însă dacă conductorii electrici ai unui circuit ar avea o lungime de 300.000 de kilometri? Din moment ce știm că efectele electricității au o viteză finită (deși foarte mare), un set de conductori foarte lungi ar introduce o întârziere de timp în circuit, astfel că acționarea

întrerupătorului și aprinderea/stingerea lămpii nu ar mai fi instantanee.

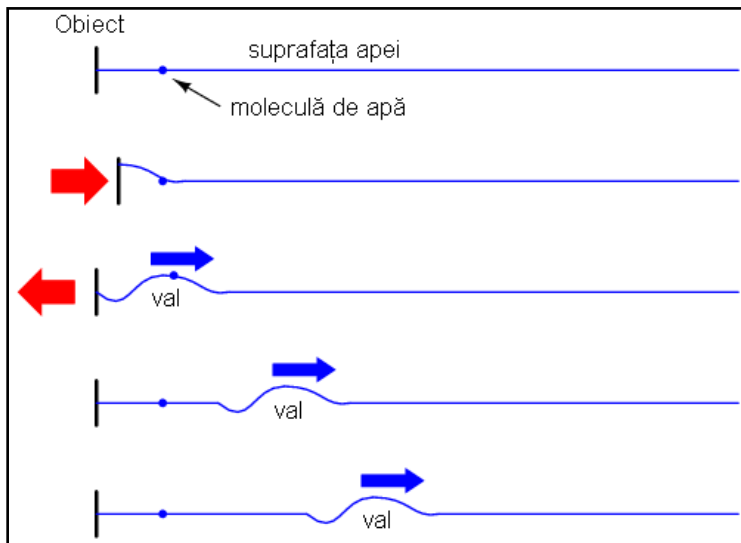
Presupunând că filamentul lămpii nu necesită încălzire, iar rezistența în lungul celor 600.000 de km de fire (dus-întors) este zero, lampa se va aprinde în aproximativ o secundă de la închiderea întrerupătorului. La închiderea întrerupătorului, lampa va continua să primească putere pentru încă o secundă, apoi se va stinge.

#### Analogie pentru comportamentul electronilor în conductori



Ne putem imagina comportamentul electronilor printr-un conductor ca fiind echivalent cu vagoanele unui tren, legate între ele, dar prezentând o anumită „cursă” (distanța parcursă de un vagon față de celălalt, astfel încât elementele de legătură să fie perfect întinse; doar după parcurgerea acestei distanțe, vagonul al doilea poate fi tras de primul vagon).

Astfel, când trenul se pune în mișcare, nu toate vagoanele vor porni deodată, ci locomotiva trage primul vagon, după eliberarea cursei, primul vagon trage al doilea vagon după eliberarea cursei, etc. Astfel, mișcarea este transferată de la vagon la vagon la viteza maximă permisă de cursă, dar la o viteză mult mai mare decât viteza individuală a vagoanelor.



O altă analogie este cea a valurilor în apă. Să presupunem că punem în mișcare un obiect plan pe suprafața apei, astfel încât acesta produce o serie de valuri în urma sa. Apa se va „deplasa” datorită faptului că moleculele sale se ciocnesc una de cealaltă, transferând energia de mișcare de-a lungul suprafeței apei cu o viteză mai mare decât viteza individuală a moleculelor.

## Unda de curent într-un circuit real

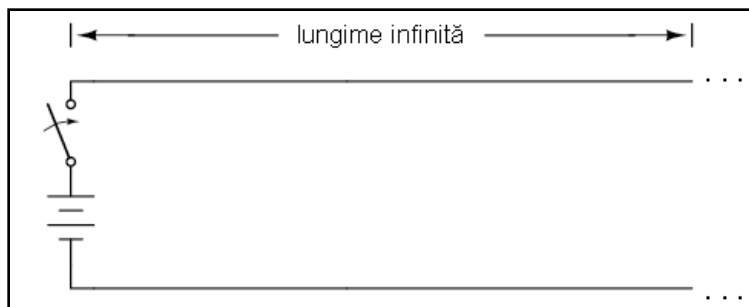
În aceeași ordine de idei, „unda de curent” se deplasează cu viteza luminii, deși electronii individuali nu au o viteză într-atât de mare. Într-un circuit foarte lung, această diferență de viteză, această „cuplare” a electronilor (exemplul trenului), devine vizibilă sub forma unei întârzieri între acțiunea întrerupătorului și efectul asupra lămpii.

## 2. Impedanța caracteristică

- O linie de transmisie este o pereche de conductori cu anumite caracteristici specifice datorate capacităților și inductanțelor distribuite pe lungimea ei

- Impedanța caracteristică ( $Z_0$ ) a unei linii de transmisie este echivalentă cu rezistența acesteia dacă lungimea sa ar fi infinită. Impedanța caracteristică depinde doar de capacitatea și de inductanța distribuită în lungul liniilor de transmisie, și este prezentă chiar și atunci când dielectricul este perfect
- Factorul de viteză este o valoare subunitară tipică pentru cabluri coaxiale și linii electrice lungi duble. Pentru orice tip de cablu, factorul de viteză este egal cu inversa rădăcinii pătrate a permitivității relative a dielectricului dintre cei doi conductori

## Circuit electric format din conductori infiniti

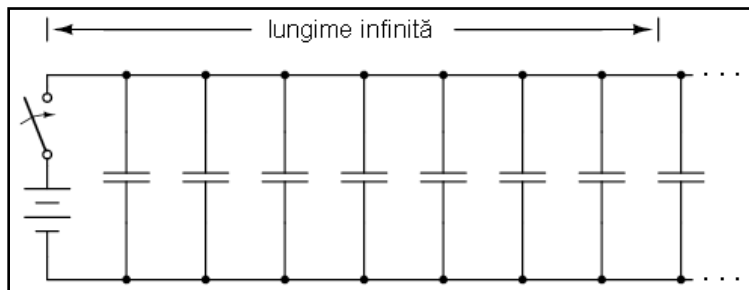


Nu va exista deloc curent prin acest circuit?

Să presupunem că am avea un set de conductori de lungime infinită, fără nicio lampă conectată la capăt. Ce s-ar întâmpla la închiderea întrerupătorului (vezi și secțiunea precedentă). Din moment ce nu avem nicio sarcină conectată la bornele sale, acest circuit este de fapt deschis.

## Capacitatea electrică parazită

Chiar dacă am putea elimina rezistența firelor prin folosirea supraconductorilor în acest „experiment”, nu am putea elimina însă capacitatea formată în lungimile conductoarelor. Orice pereche de conductori separați între ei printr-un mediu izolan, prezintă o anumită capacitate electrică parazită între ei.

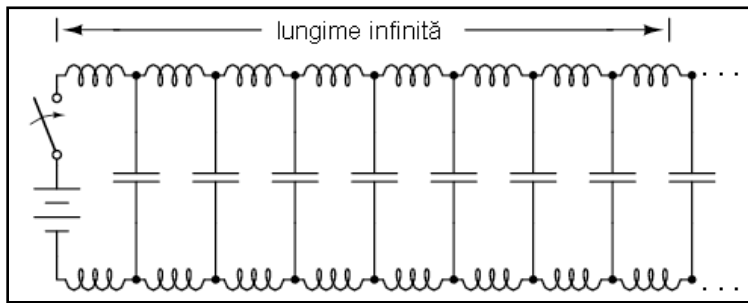


cu rata de variația a tensiunii cu timpul.

Aplicarea unei diferențe de potențial între doi conductori, duce la formarea unui câmp electric între acei doi conductori. Acest câmp electric va stoca energie, iar aceasta va duce la o opoziție față de variația tensiunii, efect descris de ecuația  $i = C(de/dt)$ , și anume, curentul va fi proporțional

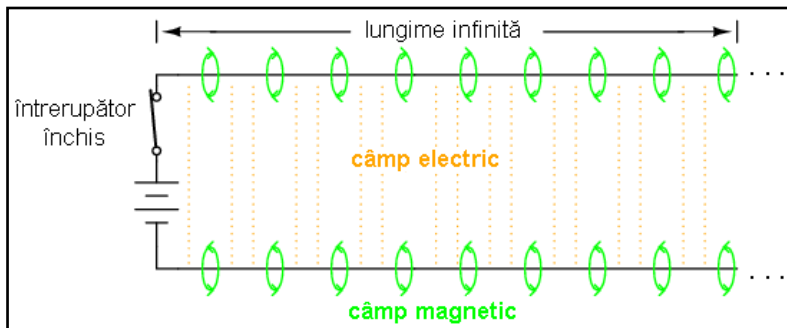
Astfel, la închiderea întrerupătorului, capacitatea dintre cei doi conductori va reacționa împotriva creșterii bruște (variație) a tensiunii, ceea ce va duce la apariție unui curent prin circuit (de la sursă). Conform ecuației, o variație instantă a tensiunii aplicate (produsă de închiderea perfectă a întrerupătorului) ar da naștere unui curent de încărcare infinit.

## Inductanțele serie



Cu toate acestea, curentul prin cei doi conductori paraleli nu va fi infinit, deoarece există o anumită impedanță serie în lungul conductorilor, datorită inductanței acestora.

## Câmpul magnetic

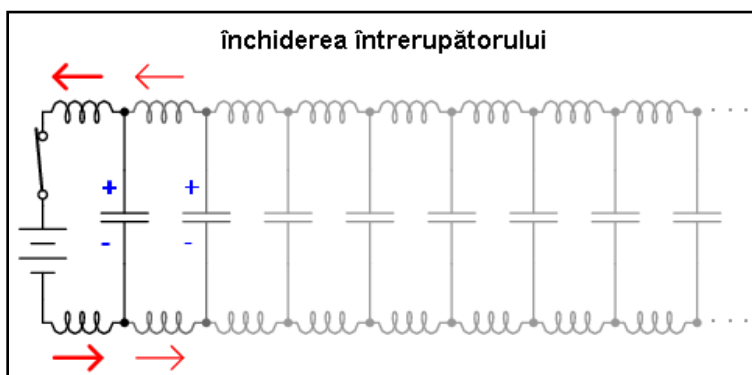


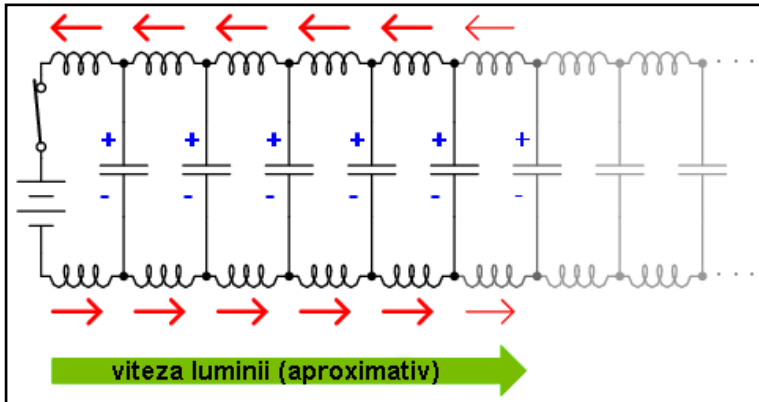
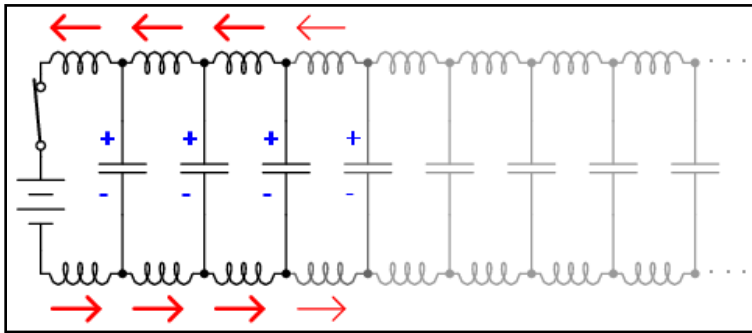
Apariția unui curent, prin orice conductor, dă naștere unui câmp magnetic proporțional cu valoarea acestuia (vezi și electromagnetismul). Acest câmp magnetic va stoca energie, iar acest fapt va duce la o opoziție față de variația curentului.

Fiecare conductor va prezenta un câmp magnetic datorat trecerii curentului, iar căderea de tensiune ce ia naștere se calculează cu ecuația  $e = L(di / dt)$ . Această cădere de tensiune limitează rata de variație a tensiunii în lungul capacităților distribuite, prevenind creșterea curentului spre infinit.

## Încărcarea capacităților și a inductanțelor

Deoarece transferul de mișcare al electronilor celor doi conductori de la unul la celălalt se realizează la viteza luminii, „frontul de undă” al variației tensiunii și curentului se va propaga în lungimea conductorilor cu aproximativ aceeași viteză, ducând la încărcarea progresivă la valoarea maximă de tensiune și curent a capacităților și inductanțelor distribuite, precum în figurile de mai jos:





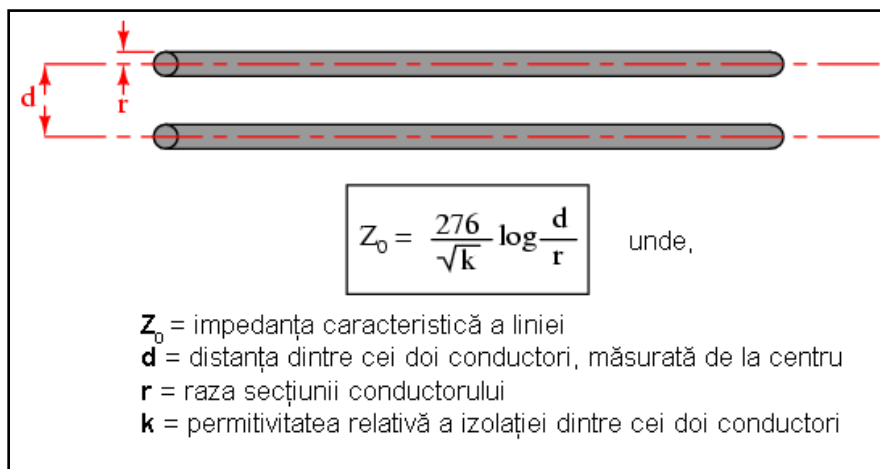
## Liniile de transmisie

Rezultatul final al acestor interacțiuni este un curent constant, de amplitudine limitată, prin sursa de tensiune (baterie). Din moment ce lungimea conductorilor este infinită, capacitățile lor distribuite nu se vor putea încărca niciodată la tensiunea sursei, iar inductanțele distribuite nu vor permite niciodată un curent de încărcare nelimitat. Cu alte cuvinte, această pereche de conductori va consuma curent de la sursă atâta timp cât întrerupătorul este închis, comportându-se precum o sarcină constantă. În acest caz, firele electrice nu mai sunt simple conductoare de curent electric, ci constituie ele însele un component al circuitului, cu caracteristici unice care trebuie luate în considerare. Spunem în acest caz, că cele două perechi de conductoare sunt linii de transmisie.

## Impedanța caracteristică

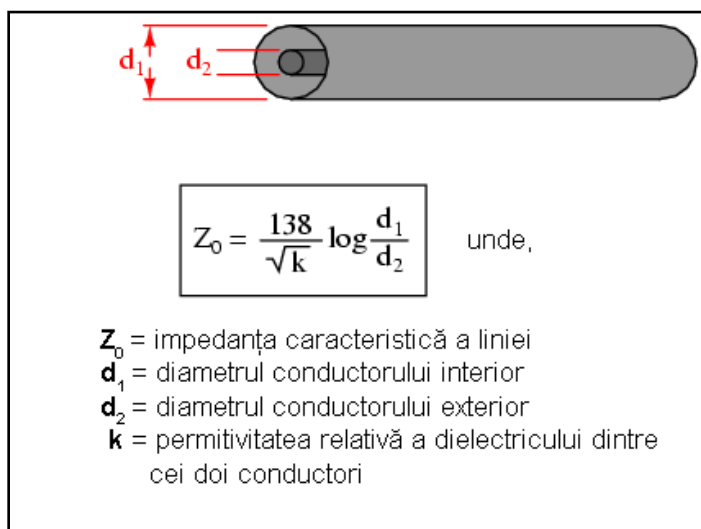
Pentru o sarcină constantă, răspunsul liniilor de transmisie, la aplicarea unei tensiuni, este rezistiv și nu reactiv, deși sunt compuse în mare parte din inductanțe și capacități (presupunând rezistența conductorilor ca fiind zero). Merită menționat acest lucru, deoarece, din punctul de vedere al bateriei, nu există nicio diferență între un rezistor ce disipă tot timpul energie și un set de linii electrice infinite ce absorb energie tot timpul. Impedanță (rezistența) acestei linii, măsurată în Ohmi, poartă numele de impedanță caracteristică, și este o cantitate ce depinde exclusiv de geometria celor doi conductori.

## Conductori paraleli



Pentru un set de conductori paraleli, cu aer pe post de dielectric, impedanța caracteristică poate fi calculată conform figurii alăturate.

## Cablu coaxial



Dacă linia de transmisie este un cablu coaxial, impedanța caracteristică se calculează conform figurii alăturate.

## Formula de calcul

Ignorând orice efecte disipative a conductorilor, impedanța caracteristică a liniilor electrice lungi se poate calcula cu următoarea formulă:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

unde,

$Z_0$  = impedanța caracteristică a liniei

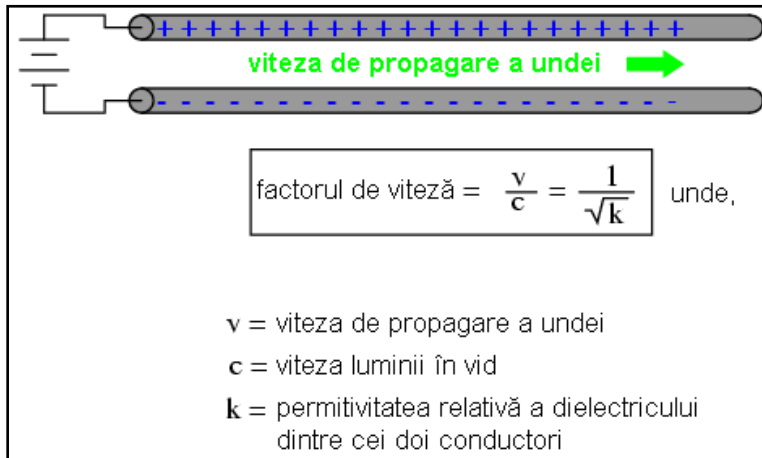
$L$  = inductanța pe unitate de lungime a liniei

$C$  = capacitatea pe unitate de lungime a liniei



## Factorul de viteză

În ambele ecuații se folosesc aceleași unități de măsură. Dacă dielectricul dintre cei doi conductori nu este aer (sau vid), atât impedanța caracteristică cât și viteza de propagare a undelor vor avea de suferit. Raportul dintre viteza reală de propagare a undelor într-o linie de transmisie și viteza luminii, poartă numele de factorului de viteză al acelei linii.



Factorul de viteză depinde doar de permitivitatea relativă a materialului izolator (dielectric), cunoscută și sub numele de constanta dielectrică, și definită ca raportul dintre permitivitatea electrică a materialului respectiv și permitivitatea electrică a vidului. Factorul de viteză a oricărui tip de cablu (coaxial sau alt tip), poate fi calculat cu formula alăturată.

## Observații

Impedanța caracteristică mai este cunoscută și sub numele de impedanță naturală, și se referă la rezistența echivalentă a liniei de transmisie dacă lungimea acesteia ar fi infinită, datorită capacităților și inductanțelor distribuite.

Se poate vedea din ecuațiile de mai sus, că impedanța caracteristică ( $Z_0$ ) a liniilor de transmisie crește odată cu creșterea distanței dintre conductori. Dacă distanța dintre cei doi conductori crește, capacitatea distribuită scade, datorită distanței mai mari dintre armături, iar inductanța distribuită crește, datorită efectelor de anulare a câmpurilor magnetice opuse mult mai mici. O capacitate paralelă mult mai mică, și o inductanță serie mult mai mare, duce la un curent mult mai mic prin linie pentru aceeași valoare a tensiunii aplicate, ceea ce prin definiție înseamnă o impedanță mai mare. Invers, dacă distanța dintre cei doi conductori scade, capacitatea paralelă crește, iar inductanța serie scade. Rezultatul este un curent mai mare prin conductori pentru aceeași valoare a tensiunii, ceea ce înseamnă de fapt o impedanță mai mică.

## 3. Linii electrice finite

- O linie de transmisie de lungime finită va fi văzută de o sursă de tensiune de curent continuu ca o rezistență constantă, pentru o perioadă scurtă de timp. După această perioadă, rezistența liniei este rezistența sarcinii de la capătul acesteia

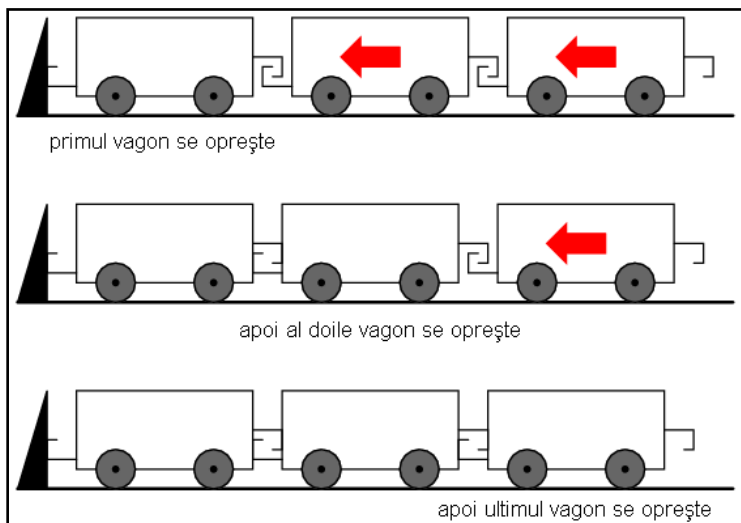
- Un semnal ce se deplasează într-o linie de transmisie de la sursă spre sarcină poartă numele de undă incidentă
- Un semnal ce se reflectă într-o linie de transmisie de la sarcină spre sursă poartă numele de undă reflectată
- Undele reflectate pot fi eliminate prin conectarea la capătul celălalt al liniei a unei rezistor a cărei rezistență este egală cu impedanța caracteristică a liniei
- O undă reflectată poate să fie re-reflectată de către sursă, dacă impedanța internă a acesteia nu este exact egală cu impedanța caracteristică a liniei

## Scop

O linie de transmisie infinită, precum cea considerată în secțiunea precedentă, este imposibil de realizat din punct de vedere fizic, prin urmare, comportamentul lor nu va fi exact același precum o linie finită.

Totuși, cunoașterea/calcularea impedanței caracteristice a liniilor de transmisie este importantă și atunci când avem de a face cu lungimi finite. Dacă celălalt capăt al unei linii de transmisie finite este deschis, unda de curent ce se propagă în lungimea conductorului trebuie să se oprească la un moment dat, din moment ce electronii nu se pot deplasa într-un circuit deschis. Această întrerupere abruptă a curentului la sfârșitul liniei produce o „îngrămădire” de electroni de-a lungul liniei de transmisie, pentru că aceștia nu au unde să se deplaseze.

## Unda incidentă și unda reflectată



Dacă ne imaginăm un tren lung în mișcare, cu o anumită cursă între vagoane, iar primul vagon (sau locomotiva) se oprește brusc într-un parapet fix, acesta se va opri; urmarea este că toate celelalte vagoane din urma lui se vor opri rând pe rând, după ce fiecare parcurge „cursa” sa. Trenul nu se oprește deodată, ci fiecare vagon pe rând, de la primul, până la ultimul.

## Unda incidentă

Propagarea unui semnal de la sursă până la capătul unei linii de transmisie (spre sarcină), poartă numele de undă incidentă.

## Unda reflectată

Propagarea unui semnal de la sarcină (capătul liniei) spre sursă, poartă numele de undă reflectată

Această „îngrămădire” de electroni se propagă înapoi spre baterie, curentul prin baterie încetează, iar linia electrică se comportă precum un circuit deschis. Toate aceste lucruri au loc foarte rapid pentru o linie de transmisie de lungime rezonabilă, prin urmare, un ohmmetru nu poate măsura această perioadă foarte scurtă de timp în care linia se comportă precum un rezistor. Pentru o linie de aproximativ un kilometru, cu un factor de viteză de 0,66, durata de deplasare a semnalului de la un capăt la celălalt este de aproximativ șase microsecunde ( $3 \cdot 10^{-6}$ ). Prin urmare, semnalul reflectat ajunge înapoi la sursă în aproximativ  $12\mu s$ , după care, linia de transmisie se comportă precum un circuit deschis.

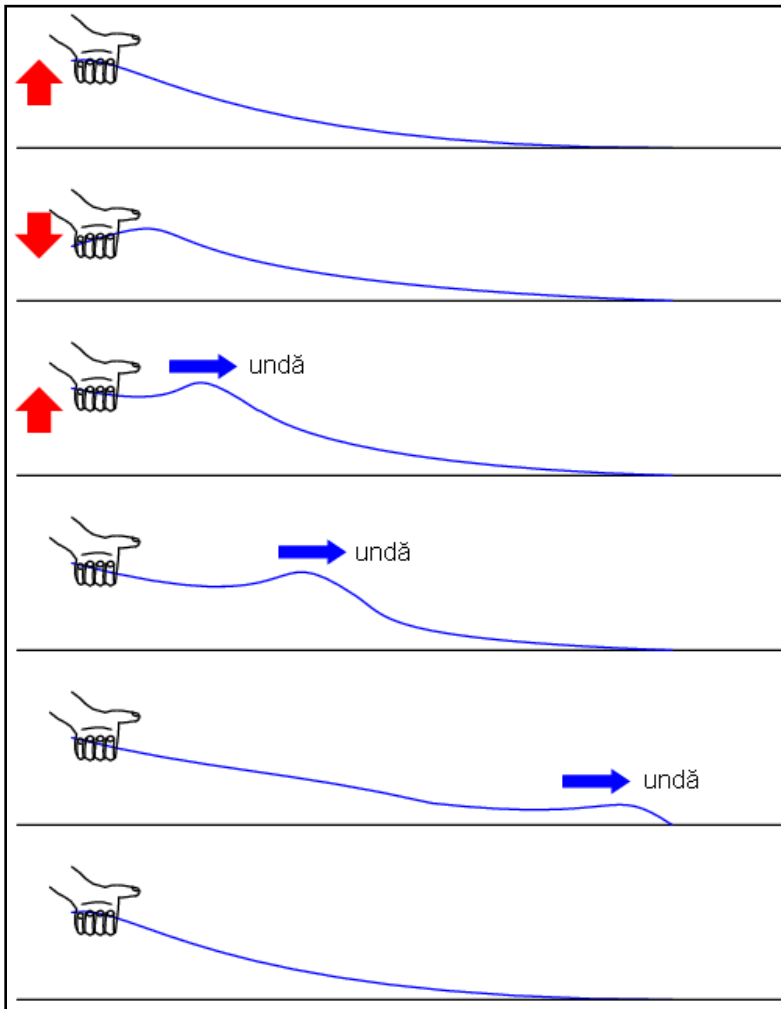
## Utilizarea reflectometrelor

Există aparate ce pot măsura acest interval foarte scurt de timp de la sursă la capătul liniei și înapoi, și pot fi folosite pentru măsurarea lungimilor cablurilor. Această tehnică poate fi folosită și pentru determinarea prezenței cât și a locației unei întreruperi într-unul sau în ambii conductori ai unei linii de transmisie, deoarece curentul se va „reflecta” din locul întreruperii la fel cum se reflectă și într-un circuit deschis. Astfel de instrumente poartă numele de reflectometre, iar principiul de funcționare este identic cu cel al sonarelor: generarea unui puls sonor și măsurarea timpului necesar pentru întoarcerea ecoului.

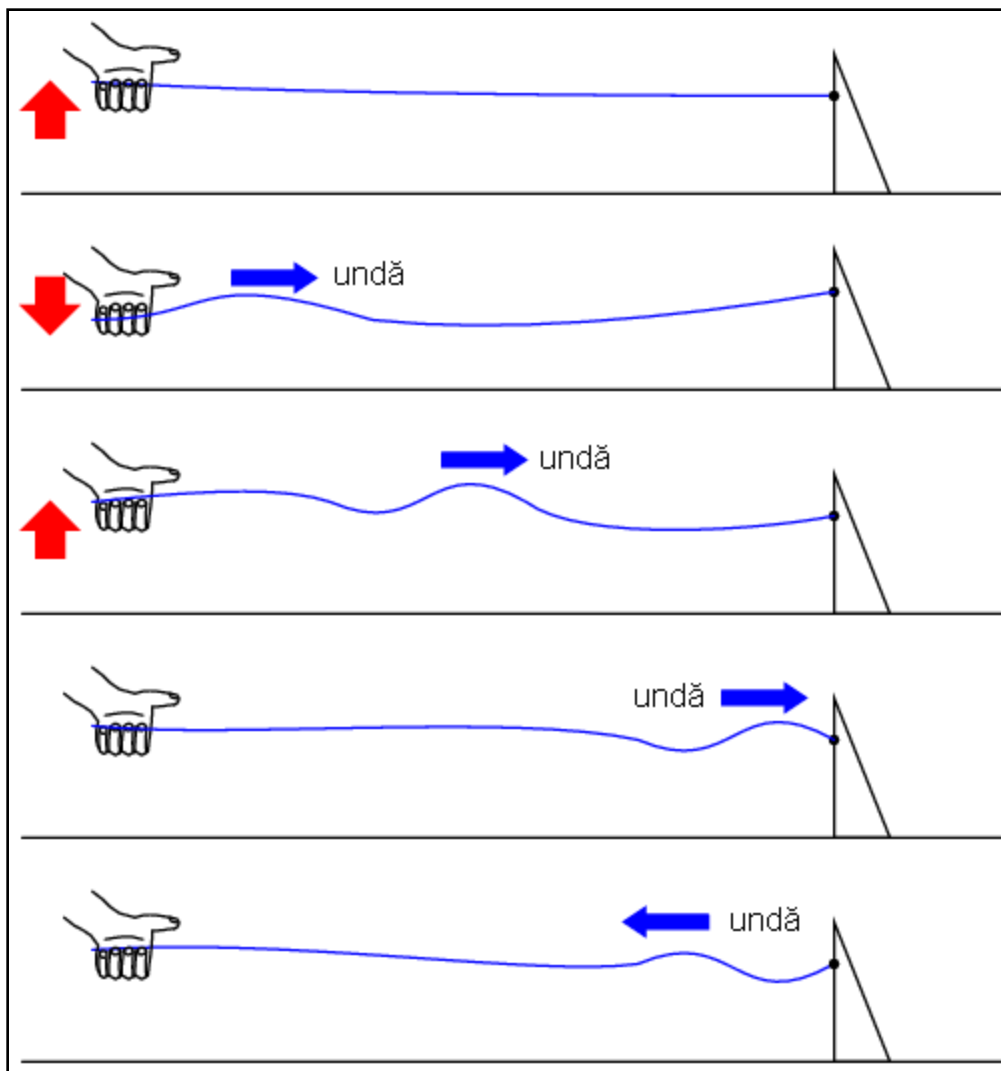
Un fenomen similar are loc dacă scurt-circuităm capătul liniei de transmisie: când unda de tensiune ajunge la capătul liniei, aceasta este reflectată înapoi spre sursă, deoarece tensiunea nu poate exista între două puncte comune din punct de vedere electric. Când unda reflectată ajunge înapoi la sursă, din punctul de vedere al sursei, întreaga linie de transmisie este scurt-circuitată. Din nou, acest lucru se întâmplă foarte rapid.

## Explicarea reflexiei liniilor de transmisie

Putem ilustra acest fenomen de reflexie al liniilor de transmisie cu un experiment simplu.



Acest lucru este analog unei linii de transmisie cu pierderi interne: puterea semnalului este din ce în ce mai slabă pe măsură ce se propagă în lungimea liniei și nu se reflectă niciodată înapoi spre sursă.



Totuși, dacă celălalt capăt al firului este fixat într-un punct în care amplitudinea semnalului nu este încă zero, în lungul sforii va apărea o a doua undă, reflectată înapoi spre mână.

## Observații

De obicei, rolul unei linii de transmisie este propagarea (transportul) energiei electrice dintr-un punct în altul. Dar, chiar dacă semnalele sunt folosite doar pentru transmitere de informații, și nu pentru alimentarea unei sarcini, situația ideală ar fi ca semnalul original să fie transmis de la sursă spre sarcină și absorbit complet de aceasta, pentru un raport semnal/zgomot cât mai bun. Prin urmare, „pierderile” din lungul liniilor de transmisie sunt nedorite, la fel ca și undele reflectate, deoarece energia reflectată reprezintă energie ce nu este transmisă sarcinii.

## Eliminarea reflexiei liniilor de transmisie

Reflexiile liniilor de transmisie pot fi eliminate dacă impedanța sarcinii este egală cu impedanța liniei. De exemplu, un cablu coaxial de  $50 \Omega$ , ce este fie deschis, fie scurtcircuitat, va reflecta energia incidentă înapoi spre sursă. Dacă vom conecta însă un rezistor de  $50 \Omega$  la celălalt capăt al cablului, întreaga energie se va disipa pe acesta și nu vor exista unde reflectate înapoi spre sursă.

În principiu, un rezistor a cărei impedanță (rezistență) este exact impedanța naturală (impedanța caracteristică a liniei), conectat la capătul liniei de transmisie, face ca linia să „pară” infinit de lungă din punctul de vedere al sursei, deoarece un rezistor poate disipa energie pentru o durată infinită, în aceeași măsură în care o linie de transmisie infinită poate absorbi energie pentru o durată de timp infinită.

În cazul în care rezistența nu este perfect egală cu impedanța caracteristică a liniei de transmisie, vor apărea unde reflectate înapoi spre sursă, cel puțin parțial.

## **Re-reflexia undei**

Se poate întâmpla ca unda reflectată să fie re-reflectată de către sursă, dacă impedanța internă (impedanța Thevenin echivalentă) a sursei nu este exact egală cu impedanța caracteristică a liniei. O undă reflectată pe sursă va fi disipată în întregime, dacă impedanța sursei este egală cu cea a liniei, dar va fi reflectată înapoi pe linie precum orice altă undă, cel puțin parțial, dacă impedanța sursei nu este egală cu cea a liniei. Acest tip de reflexii pot fi supărătoare, deoarece aparent, reflexia undei de către sursă duce la impresia că aceasta tocmai a emis un puls nou.

## **4. Linii electrice lungi și linii electrice scurte**

- Atunci când perioada de transmisie a semnalului de curent sau tensiune este mult mai mare decât timpul de propagare al semnalului de-a lungul liniei de transmisie, spunem că linia este electric scurtă.
- Invers, când timpul de propagare este cu o fracțiune mai mare sau chiar un multiplu al perioadei semnalului transmis, spune că linia este electric lungă
- Lungimea de undă a unui semnal reprezintă distanța fizică pe care aceasta o poate parcurge pe durata unei perioade.
- Ca și regulă, lungimea liniei trebuie să fie mai mare decât un sfert ( $1/4$ ) din lungimea de undă a semnalului pentru a fi considerată linie electrică lungă
- Când la capătul unei linii de transmisie este conectată o sarcină de impedanță exact egală cu impedanța caracteristică a liniei, nu vor exista unde reflectată, și prin urmare, nu vor exista nici efecte nedorite datorate lungimii liniei

## **Scop**

În circuitele de curent continuu și în cele de curent alternativ de frecvență joasă, impedanța caracteristică a conductorilor paraleli este de obicei ignorată, datorită duratelor de timp relativ scurte a reflexiilor din lungul liniilor, față de perioada undelor sau a pulsurilor din circuit. După cum am văzut în secțiunea precedentă, dacă o linie de transmisie este conectată la o sursă de curent continuu, aceasta se va comporta precum un rezistor a cărei

valoare este egală cu impedanță caracteristică a liniei pentru o durată de timp egală cu durata de parcurgere a undei până la capătul liniei și înapoi spre sursă. După acea perioadă (aproximativ 12  $\mu$ s pentru un cablu coaxial de un kilometru), sursa „vede” doar impedanța conectată în circuit, oricare ar fi aceasta.

Dacă circuitul în cauză folosește putere în curent alternativ, consecințele unei asemenea întârzieri, introduse de linia de transmisie între vârful tensiunii de curent alternativ generat de tensiune și momentul în care sarcina „vede” acest vârf, nu sunt de o importanță crucială. Cu toate că amplitudinile instantanee ale semnalului în lungimea liniei nu sunt egale, datorită propagării acestuia cu viteza luminii, diferența de fază a semnalelor dintre începutul și capătul liniei este neglijabilă, deoarece propagarea acestora în lungul liniilor au loc cu o fracțiune foarte mică din perioada formei de undă alternative.

### **Linie de transmisie electric scurtă**

Din considerente practice, putem spune că tensiunea de-a lungul unei linii de transmisie cu două conductoare, de frecvență joasă, este egală și în fază în oricare moment.

Acest tip de linie poartă denumirea de linie de transmisie scurtă, deoarece efectele propagării semnalelor sunt mult mai rapide decât perioadele semnalelor transmise.

Invers, o *linie electrică lungă* are un timp de propagare mult mai mare ce poate ajunge să fie multiplu al perioadei semnalului transmis.

### **Linie de transmisie electric lungă**

O linie este considerată „lungă” atunci când semnalul sursei „parcurge” cel puțin un sfert de perioadă ( $90^\circ$ ) înainte ca semnalul incident să ajungă la capătul liniei. Până în acest moment, toate liniile electrice au fost considerate electric scurte.

### **Lungimea de undă**

Trebuie să exprimăm distanța parcursă de o undă de tensiune sau curent, în lungul liniei de transmisie, în funcție de frecvența sursei. Perioada unei forme de undă alternative cu o frecvență de 60 Hz este de 16,66 ms. La viteza luminii, un semnal de tensiune sau curent va parcurge o distanță de aproximativ 5 km. Dacă factorul de viteză al liniei de transmisie este subunitar (mai mic decât 1), viteza de propagare va fi mai mică decât viteza luminii, prin urmare și distanța parcursă va fi mai mică. Dar chiar și dacă utilizăm un factor de viteză mai mic, distanța parcursă în acel interval va fi tot foarte mare. Distanța calculată pentru o anumită frecvență, poartă denumirea de lungime de undă a semnalului.

### **Formula de calcul**

Formula de calcul a lungimii de undă este următoarea:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

unde,

$\lambda$  = lungimea de undă

$v$  = viteza de propagare

$f$  = frecvența semnalului

### **Dominanța impedanței sarcinii**

Când o sursă electrică este conectată la sarcină printr-o linie de transmisie scurtă, impedanța sarcinii domină circuitul. Cu alte cuvinte, când linia electrică este scurtă, impedanța caracteristică a liniei are un impact extrem de redus asupra performanțelor circuitului.

### **Dominanța impedanței caracteristice**

La conectarea unei surse la sarcină prin intermediul unei linii de transmisii lungi, impedanța caracteristică a liniei domină impedanța sarcinii. Cu alte cuvinte, liniile electrice lungi constituie componenta principală a circuitului.

### **Minimizarea efectului lungimii liniilor de transmisie**

Cea mai eficientă metodă de minimizare a impactului lungimii liniilor de transmisie asupra circuitului, este egalarea impedanței caracteristice a liniei cu impedanța sarcinii. În acest caz, orice sursă de semnale conectată la celălalt capăt al iniei va „vedea” exact aceeași impedanță, și va genera același curent în circuit, indiferent de lungimea liniei. În această condiție perfectă, lungimea liniei afectează doar durata de timp necesară pentru transmiterea semnalului de la sursă la sarcină. Totuși, egalarea perfectă a impedanțelor nu este tot timpul practică sau posibilă.

### **Observații**

Considerând o linie lungă ca având o lungime de cel puțin 1/4 din lungimea de undă, putem vedea de ce toate liniile folosite în circuitele discutate au fost presupuse ca fiind linii electrice scurte. Pentru un circuit la frecvența de 60 Hz, liniile de tensiune ar trebui să depășească 1.200 de kilometri în lungime, înainte ca efectele timpului de propagare a semnalelor să devină importante. Cablurile ce realizează conexiunea dintre difuzoare și



amplificator ar trebui să depășească lungimea de 7 kilometri pentru ca reflexiile acestuia să afecteze suficient de mult semnalul audio de 10 kHz.

În cazul circuitelor de frecvență înaltă însă, lungimea liniei este foarte importantă. Să considerăm ca și exemplu un semnal radio de 100 MHz, lungimea sa de undă fiind de doar 3 m, chiar și la viteza de propagare maximă (factor de viteză 1). O linie de transmisie pentru acest semnal este considerată lungă dacă depășește lungimea de 0,75 m! Mai mult, cu un factor de viteză de 0.66, această lungime critică devine 0,5 m!

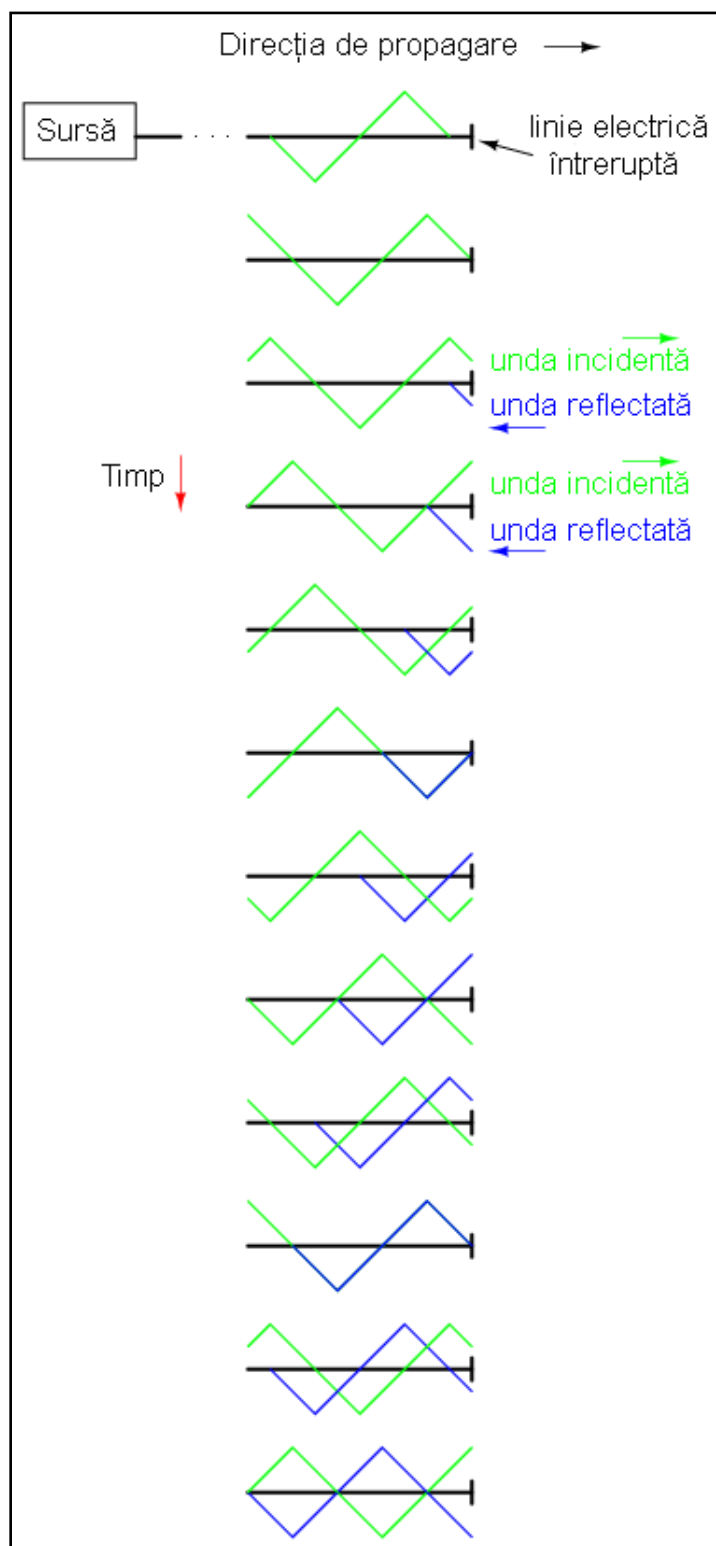
## **5. Unde staționare și rezonanța**

- Suprapunerea undelor reflectate cu undele „originale” poartă numele de unde staționare

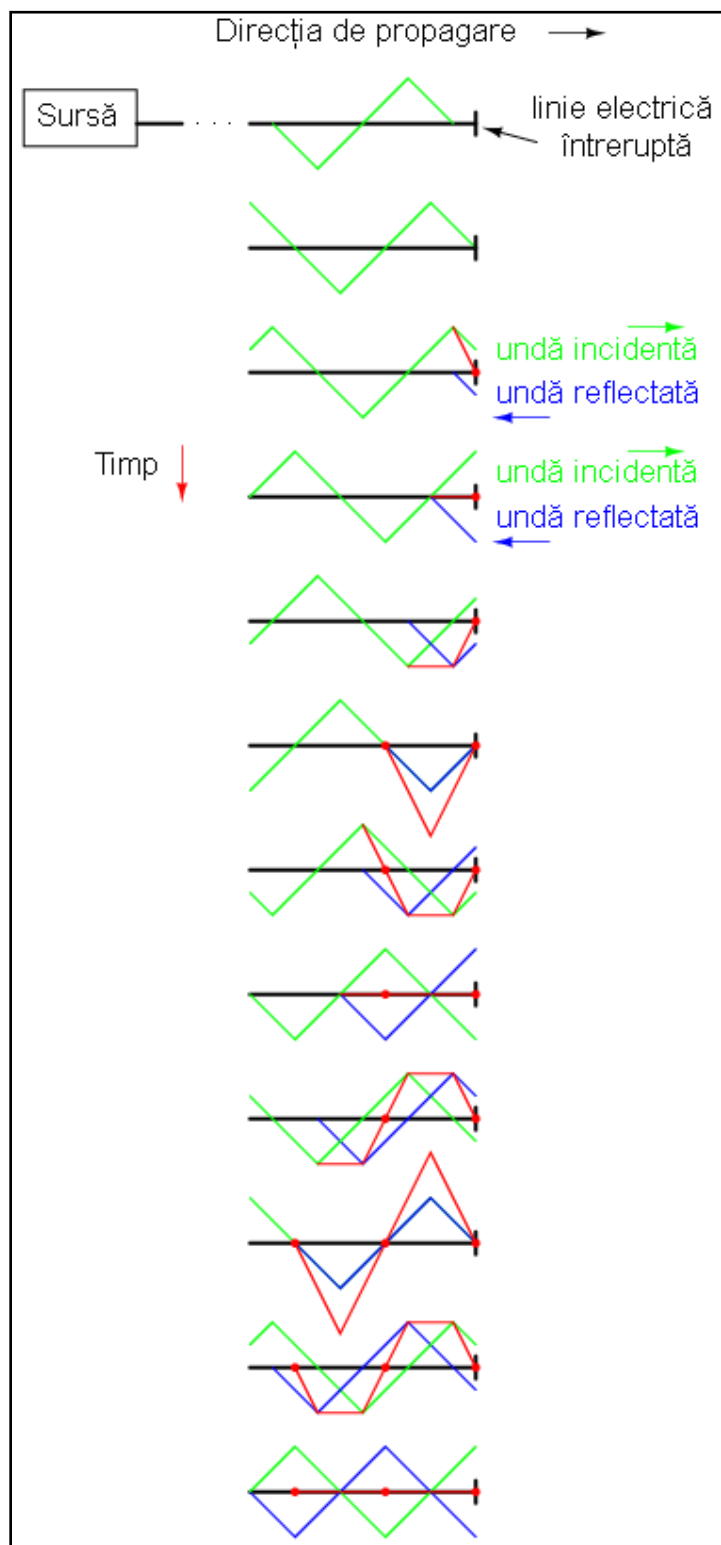
### **Definiție**

De câte ori există o diferență între impedanța caracteristică a liniei și impedanța sarcinii, vor apărea și reflexii ale undelor. Dacă unda incidentă este o formă de undă alternativă, aceste reflexii se vor „amesteca” cu semnalele incidente, iar formele de undă produse poartă numele de forme de undă staționare.

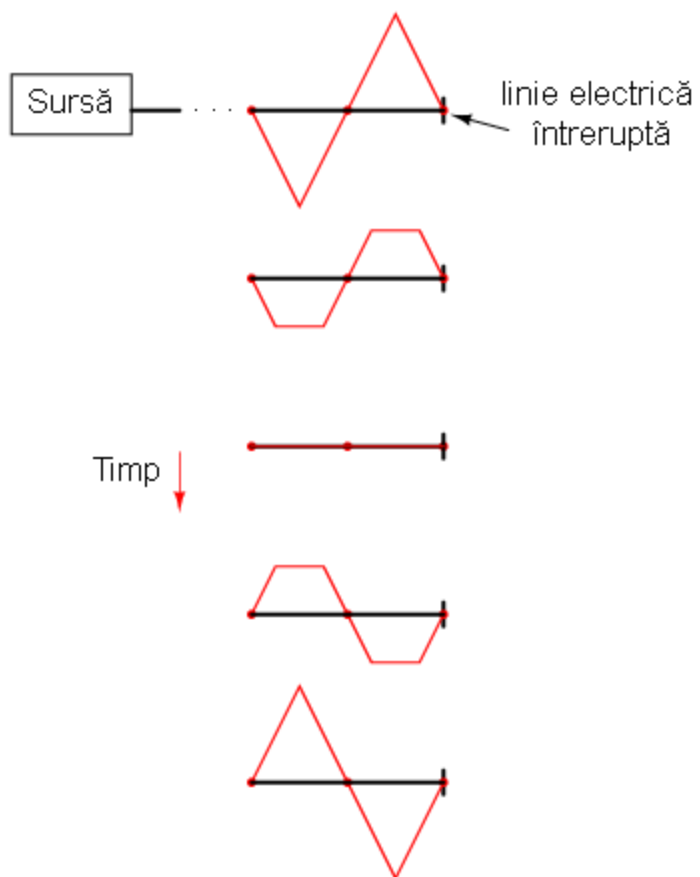
### **Formarea undelor staționare**



Ilustrația alăturată exemplifică modul în care o undă incidentă triunghiulară se transformă într-o reflexie „în oglindă” după ce aceasta ajunge la capătul liniei de transmisie (întrerupte). Linia de transmisie este reprezentată în acest caz doar printr-o singură linie, pentru simplitate. Unda incidentă se deplasează de la stânga la dreapta, iar unda reflectată de la dreapta la stânga.

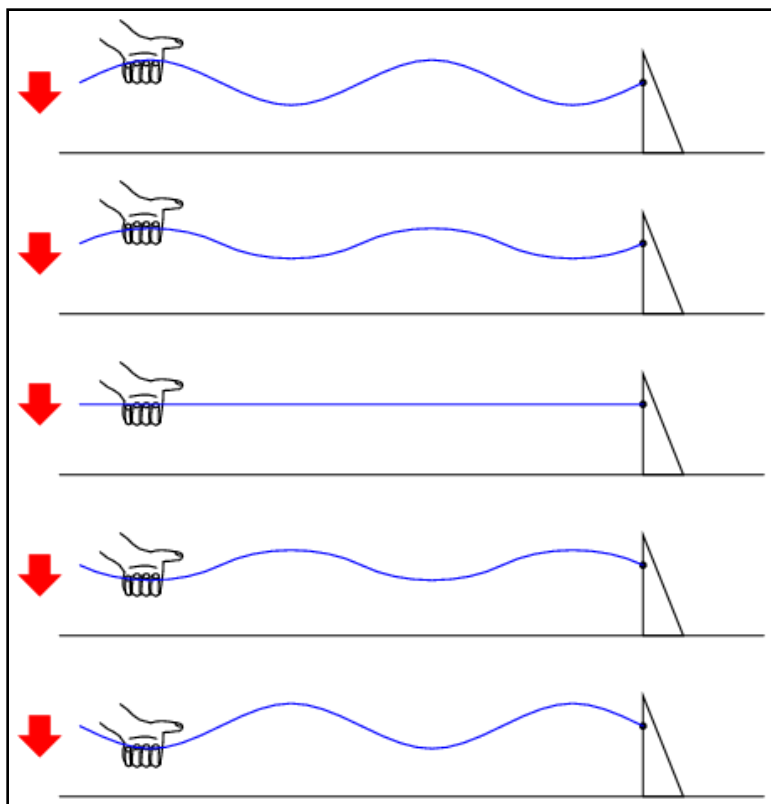


Dacă adăugăm cele două forme de undă, descoperim că în lungul liniei se formează de fapt o a treia formă de undă, staționară.

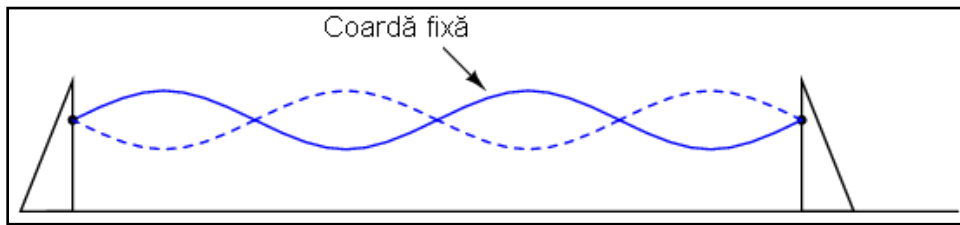


Cea de a treia undă, cea staționară, reprezintă de fapt singura tensiune din lungul liniei, fiind suma undelor incidente și a undelor reflectate. Amplitudinea sa instantanee oscilează, dar unda nu se propagă în lungimea liniei precum celelalte două forme de undă. De observat că punctele de pe linie, ce marchează amplitudinea zero a unei staționare (locul în care unda incidentă și cea reflectată se anulează reciproc), au tot timpul aceeași poziție.

## Exemplu



Undele staționare sunt destul de frecvent întâlnite în lumea înconjurătoare. Să considerăm o coardă, legată la un capăt și „scuturată” la celălalt.



Atât nodurile (punctele unde vibrația este foarte mică sau inexistentă), cât și anti-nodurile (punctele unde vibrația este maximă) rămân fixe de-a

lungul corzii. Efectul este și mai pronunțat când capătul liber este mișcat la frecvența corectă. Corzile fixe prezintă același comportament. Diferența majoră este că aceasta vibrează la frecvența sa „corectă” pentru maximizarea efectului undelor staționare.

Tony R. Kuphaldt



INTRODUCERE ÎN CIRCUITE ELECTRICE  
ȘI ELECTRONICE

**Volumul 3: Electronica analogică**

Traducere: Mihai Olteanu

**SCIENTIA**ro

## Prefață

Cartea de față reprezintă varianta românească, tradusă de Mihai Olteanu, a volumului „Electronica analogică” din seria „Lessons in Electric Circuits” scrisă de Tony R. Kuphaldt sub licența „Design Science License”.

Cartea în limba română se distribuie gratuit prin intermediul site-ului Scientia.ro. Orice comentarii sau sugestii de îmbunătățire sunt binevenite și pot fi trimise pe adresa [admin@scientia.ro](mailto:admin@scientia.ro). Puteți utiliza conținutul de față în orice scop, respectând condițiile impuse de licența DSL, în principal, menționarea sursei originale.

*Atenție, pe tot parcursul cărții se va folosi notația reală de deplasare a electronilor prin circuit, și anume, dinspre borna negativă (-) spre borna pozitivă (+) !*

# CUPRINS

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>01 - INTRODUCERE .....</b>                                      | <b>2</b>   |
| 1. CIRCUITE ELECTRICE ȘI CIRCUITE ELECTRONICE .....                | 2          |
| 2. ELEMENTE ACTIVE ȘI ELEMENTE PASIVE .....                        | 3          |
| 3. AMPLIFICATORUL .....                                            | 4          |
| 4. FACTORUL DE AMPLIFICARE .....                                   | 6          |
| 5. DECIBELUL .....                                                 | 8          |
| <b>02 - FIZICA DISPOZITIVELOR SEMICONDUCTOARE.....</b>             | <b>10</b>  |
| 01. FIZICA CUANTICĂ.....                                           | 10         |
| 02. VALENȚA ȘI STRUCTURA CRISTALINĂ.....                           | 20         |
| 03. BENZI DE ENERGIE .....                                         | 22         |
| 04. ELECTRONI ȘI GOLURI .....                                      | 25         |
| 05. JONȚIUNEA P-N .....                                            | 28         |
| 06. DIODA .....                                                    | 31         |
| 07. TRANZISTORUL BIPOLAR CU JONȚIUNE (BJT) .....                   | 33         |
| 08. TRANZISTORUL CU EFECT DE CÂMP (FET).....                       | 38         |
| 09. TRANZISTORUL CU EFECT DE CÂMP CU POARTĂ IZOLATĂ (MOSFET) ..... | 42         |
| 10. TIRISTORUL .....                                               | 44         |
| <b>03 - DIODA ȘI REDRESORUL.....</b>                               | <b>46</b>  |
| 1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE AL DIODEI .....                       | 46         |
| 2. VERIFICAREA DIODEI CU OHMMETRUL .....                           | 51         |
| 3. PARAMETRII CARACTERISTICI AI DIODEI .....                       | 52         |
| 4. CIRCUITE REDRESOARE .....                                       | 54         |
| 5. DIODA ZENER - PRINCIPII ȘI APLICAȚII .....                      | 60         |
| <b>04 - TRANZISTORUL.....</b>                                      | <b>68</b>  |
| 01. TRANZISTORUL - INTRODUCERE .....                               | 68         |
| 02. TRANZISTORULUI CA ȘI ÎNTRERUPĂTOR .....                        | 69         |
| 03. VERIFICAREA TRANZISTORULUI CU OHMMETRUL .....                  | 72         |
| 04. ZONA ACTIVĂ DE FUNCȚIONARE A TRANZISTORULUI .....              | 74         |
| 05. PUNCTUL STATIC DE FUNCȚIONARE AL TRANZISTORULUI .....          | 79         |
| 06. CONEXIUNEA EMITOR COMUN .....                                  | 83         |
| 07. CONEXIUNEA COLECTOR COMUN .....                                | 91         |
| 08. CONEXIUNEA BAZĂ COMUNĂ .....                                   | 97         |
| 09. AMPLIFICATOARE CLASA A, B, AB, C ȘI D .....                    | 101        |
| 10. METODE DE POLARIZARE ALE TRANZISTORULUI.....                   | 105        |
| 11. CUPLAJUL DE INTRARE ȘI DE IEȘIRE .....                         | 109        |
| 12. AMPLIFICATOARE CU REACȚIE .....                                | 113        |
| <b>05 - DISPOZITIVE MULTIJONȚIUNE .....</b>                        | <b>120</b> |
| 1 - HISTEREZA .....                                                | 120        |
| 2 - TUBURI ELECTRONICE CU DESCĂRCARE ÎN GAZE.....                  | 120        |
| 3 - DIODA SHOCKLEY .....                                           | 124        |
| 4 - DIACUL .....                                                   | 129        |
| 5 - TIRISTORUL .....                                               | 130        |
| 6 - TRIACUL .....                                                  | 139        |
| 7 - OPTOTIRISTORUL .....                                           | 142        |
| <b>06 - AMPLIFICATORUL OPERAȚIONAL .....</b>                       | <b>143</b> |



|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 01. AMPLIFICATORUL CU POTENȚIAL DE REFERINȚĂ ȘI AMPLIFICATORUL DIFERENȚIAL ..... | 143 |
| 02. AMPLIFICATORUL OPERAȚIONAL.....                                              | 146 |
| 03. REACȚIA NEGATIVĂ.....                                                        | 151 |
| 04. REACȚIA NEGATIVĂ PRIN DIVIZOR DE TENSIUNE.....                               | 154 |
| 05. AMPLIFICATORUL TENSIUNE-CURENT.....                                          | 157 |
| 06. CIRCUITE SUMATOARE ȘI DE MEDIERE.....                                        | 159 |
| 07. REALIZAREA UNUI AMPLIFICATOR DIFERENȚIAL .....                               | 161 |
| 08. AMPLIFICATORUL DE INSTRUMENTAȚIE .....                                       | 162 |
| 9. CIRCUITE DE DERIVARE ȘI INTEGRARE .....                                       | 163 |
| 10. REACȚIA POZITIVĂ .....                                                       | 166 |

# 01 - Introducere

## 1. Circuite electrice și circuite electronice

- Într-un circuit electronic, curentul este controlat de curent

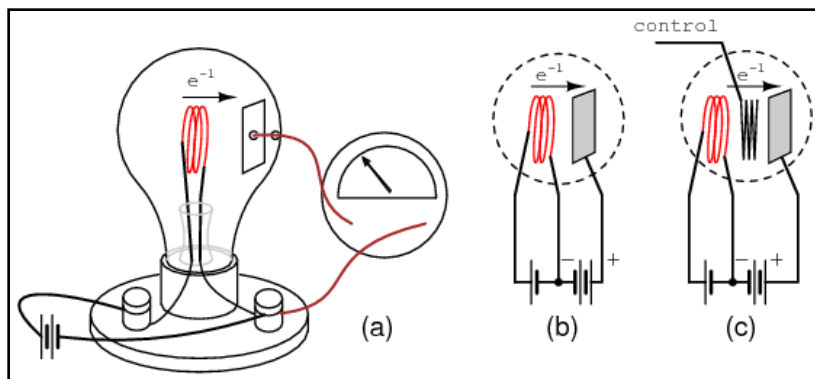
### Definiția circuitelor electronice

Circuitele electrice reprezintă conexiuni ale conductorilor electrici cu elemente de circuit, în cadrul cărora are loc o deplasare uniformă de electroni. Circuitele electronice adaugă o nouă dimensiune circuitelor electrice, prin faptul că deplasarea electronilor este controlată, într-o oarecare măsură, de un semnal electric adițional, fie sub formă de curent, fie sub formă de tensiune.

Controlul curentului nu este neapărat specific electronicii. Întrerupătoarele și potențiometrele controlează și ele deplasarea electronilor. Prin urmare, diferența dintre electric și electronic este dată de modul în care acest control este exercitat în circuit, și nu neapărat de existența sau absența acestuia. Întrerupătoarele și potențiometrele controlează curentul mecanic, printr-un element acționat de o anumită forță fizică externă circuitului. În electronică, pe de altă parte, avem de a face cu elemente speciale, capabile să controleze curentul cu ajutorul unui alt curent, sau prin aplicarea unei tensiuni statice. Cu alte cuvinte, într-un circuit electronic, curentul controlează curentul.

### Efectul Edison

Din punct de vedere istoric, precursorul electronicii moderne a fost inventat de Thomas Edison în 1880, pe când acesta lucra la dezvoltarea becului cu incandescență.



Edison a descoperit că există un curent electric între filamentul becului și o placă metalică instalată în interiorul învelișului vidat (figura alăturată (b)). Astăzi, acest comportament este cunoscut sub numele de „efectul Edison”. De menționat că bateria este necesară doar pentru încălzirea filamentului. Dacă am folosi orice altă

modalitate de încălzire a filamentului, efectul ar fi același.

## **Dioda și trioda cu vid**

În 1904, John Fleming a descoperit că introducerea în circuit a unui curent extern (bateria atașată plăcii, figura de mai sus (b)) se poate realiza doar într-o singură direcție, de la filament la placă, dar nu și invers. Această invenție este cunoscută sub numele de „dioda cu vid”, folosită pentru transformarea (redresarea) curentului alternativ în curent continuu. Adăugarea celui de al treilea electrod de către Lee De Forest (figura de mai sus (c)), a făcut posibil controlul curentului de la filament la placă cu ajutorul unui semnal mai mic. Invenția triodei cu vid de către De Forest a marcat practic începutul erei electronice.

## **Tranzistorul**

Tehnologia electronici a cunoscut o revoluție în anul 1948, odată cu invenția tranzistorului. Acest component electronic minuscul joacă același rol ca și un tub cu vid, dar ocupă un loc mult mai mic și este mult mai ieftin. Tranzistorii realizează controlul curentului cu ajutorul materialelor semiconductoare și nu prin vid.

## **2. Elemente active și elemente pasive**

- Elementele active de circuit sunt acele dispozitive ce pot controla curentul prin intermediul curentului
- Elementele pasive de circuit nu pot controla curentul la bornele lor cu ajutorul unui alt curent

### **Elemente active**

Un element de circuit activ este orice tip de component ce poate controla deplasarea electronilor (curentul) pe cale electrică. Pentru ca un circuit să poarte numele de circuit electronic, acesta trebuie să conțină cel puțin un astfel de element activ.

Elementele active includ, printre altele, tuburile cu vid, tranzistoarele, redresoarele cu semiconductoare, și triacurile.

Toate dispozitivele active controlează curentul prin ele. Unele dispozitive active realizează acest lucru prin intermediul unei tensiuni, iar altele prin intermediul curentului. Cele care utilizează o tensiune statică ca și semnal de control, sunt denumite dispozitive controlate în tensiune. Cele care folosesc un alt curent pentru controlul curentului în cauză sunt cunoscute sub numele de dispozitive controlate în curent. Tuburile cu vid sunt dispozitive controlate în tensiune iar tranzistoarele pot fi de ambele tipuri.

### **Elemente pasive**

Componentele ce nu pot controla curentul prin intermediul unui alt semnal electric, sunt denumite elemente de circuit pasive. Rezistorii, condensatoarele, bobinele, transformatoarele și chiar și diodele, toate sunt considerate elemente de circuit pasive.

### 3. Amplificatorul

- Comanda unei cantități mari de putere prin intermediul unei alte puteri, mai mici, poartă numele de amplificare
- Dispozitivul ce realizează o asemenea amplificare de putere, poartă numele de amplificator

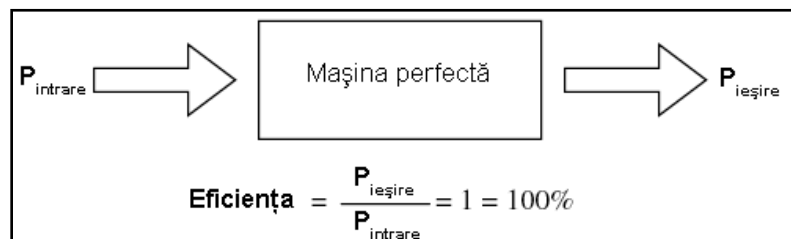
#### Definiția amplificării

Practic, elementele active sunt folosite pentru proprietatea lor de amplificare. Indiferent dacă dispozitivul în cauză este controlat în tensiune sau în curent, puterea necesară pentru semnalul de control este de obicei mult mai mică decât puterea disponibilă în curentul controlat. Cu alte cuvinte, un element activ nu permite pur și simplu controlul curentului de către curent, ci, face posibil controlul unui curent mare de către un curent mic.

Datorită acestei diferențe dintre puterea controlată și puterea de control, elementele active de circuit pot fi folosite pentru comanda unei cantități mari de putere (putere controlată) de către o cantitate mică de putere (putere de control). Acest comportament poartă numele de amplificare.

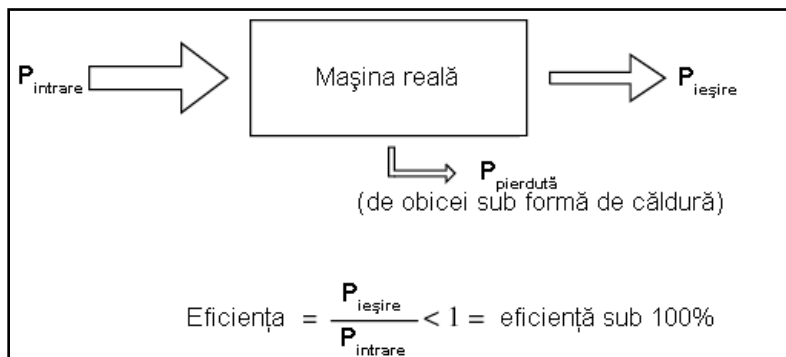
#### Mașina perfectă

O lege fundamentală a fizicii, cea a conservării energiei, spune că energia nu poate fi creată dar nici distrusă. Dacă această lege este adevărată, atunci construirea unui dispozitiv care să ia o cantitate mică de energie și să o transforme într-o cantitate mare de energie, pe cale magică, nu este posibilă.



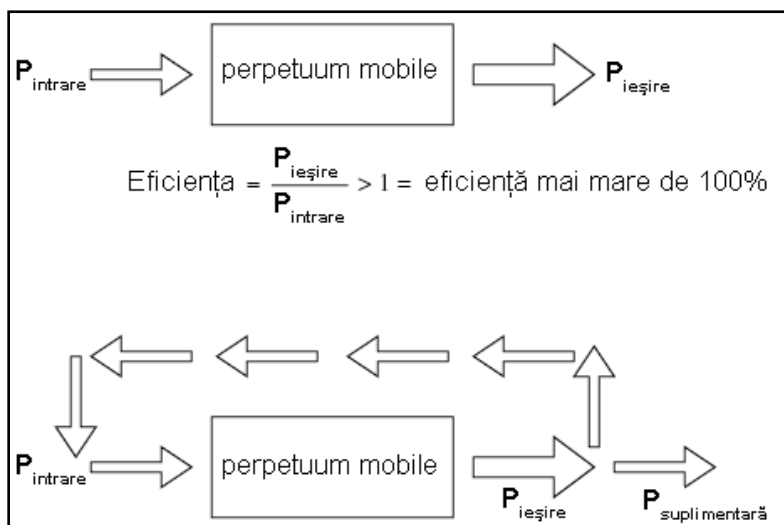
Toate mașinile, incluzând circuitele electrice și electronice, au o eficiență maximă de 100%. În cele mai fericite cazuri, puterea de intrare este egală cu puterea de ieșire.

#### Mașina reală



În realitate însă, de cele mai multe ori, mașinile nu ating nici măcar această limită superioară, deoarece o parte din energia de intrare se pierde sub formă de căldură radiată în spațiul din jur, iar această energie pierdută nu se regăsește în valoarea energiei de ieșire.

## Perpetuum mobile



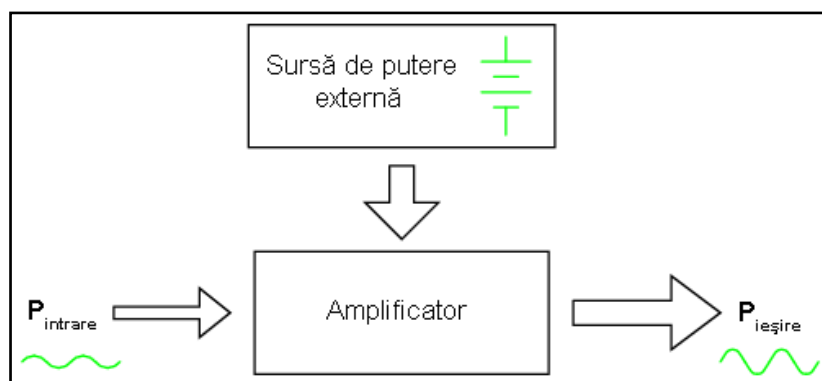
Au existat numeroase încercări, fără succes însă, de a proiecta și construi o mașină a cărei putere de ieșire să fie mai mare decât puterea de intrare. Acest lucru nu doar că ar viola legea conservării energiei, dar ar duce lumea într-o revoluție tehnologică fără precedent, deoarece acest tip de mașină s-ar putea alimenta singură, într-o buclă circulară, și ar putea genera putere „gratuită”. Această mașină este cunoscută sub numele de perpetuum mobile.

Deși au existat multe încercări în acest domeniu, până acum nu s-a reușit construirea unei mașini capabile să se alimenteze singură, cu propria ei energie plus generarea unei energii suplimentare.

## Amplificatorul

Totuși, există o gamă de mașini denumite amplificatoare, în cadrul cărora, semnalele de putere mică de la intrare sunt „transformate” (cu ajutorul unei surse externe de putere) în semnale de ieșire de o putere mult mai mare. Pentru a înțelege cum pot amplificatoarele să existe fără a viola legea conservării energiei, trebuie să înțelegem modul de funcționare al dispozitivelor active.

### Principiul de funcționare al amplificatoarelor



Pentru că elementele active de circuit pot controla cantități mari de putere electrică cu ajutorul unei cantități mici de putere electrică, acestea pot fi utilizate în circuite pentru duplicarea formei semnalului de intrare cu ajutorul unei surse externe de putere electrică.

Rezultatul este un dispozitiv ce pare a transforma pe cale magică un semnal electric de putere mică într-un semnal identic, dar de o putere/amplitudine mai mare. Legea conservării energiei nu este violată, deoarece puterea adițională este introdusă în circuit de o sursă externă, de obicei o baterie de curent continuu sau o sursă echivalentă. Amplificatorul nu crează și nici nu distruge energie, ci doar o „remodelează” într-o formă de undă dorită.

Cu alte cuvinte, abilitatea de control al curentului pe care elementele active le posedă, este folosită pentru „transformarea” puterii de curent continuu dintr-o sursă externă în aceeași formă de undă precum a semnalului de intrare, forma semnalului produs la ieșire fiind în acest caz identică cu cea de la intrare, dar de o amplitudine mult mai mare. Tranzistorul, sau alte dispozitive active conținute într-un amplificator, formează pur și simplu o *copie* a formei de undă a semnalului de intrare cu ajutorul sursei externe de curent continuu „brute”.

### **Eficiența amplificatoarelor**

Eficiența amplificatoarelor, precum este cazul tuturor mașinilor, este limitată la un maxim de 100%. De obicei, amplificatoarele electronice au o eficiență mult sub acest nivel, datorită pierderilor considerabile de energie sub formă de căldură.

## **4. Factorul de amplificare**

- Raportul dintre valoarea de ieșire și cea de intrare a amplificatoarelor poartă numele de factor de amplificare

### **Definiție**

Deoarece amplificatoarele pot să mărească amplitudinea semnalului de intrare, ar fi foarte util dacă am descrie această proprietate a lor printr-un raport ieșire/intrare, raport ce poartă numele de factor de amplificare, sau

amplificare. Acest factor nu are unitate de măsură, fiind un raport dintre două mărimi cu aceeași unitate de măsură. Matematic, simbolul amplificării este „A”.

## Exemplu

De exemplu, dacă la intrarea unui amplificator avem un semnal de tensiune alternativă efectivă de 2 V, iar la ieșire avem o tensiune alternativă efectivă de 30 V, spunem că factorul de amplificare în tensiune al amplificatorului este de 15, adică 30 împărțit la 2.

$$A_V = \frac{V_{ieșire}}{V_{intrare}}$$

Prin aceeași metodă, dacă știm factorul de amplificare și amplitudinea semnalului de intrare, putem calcula amplitudinea semnalului de ieșire. De exemplu, dacă un amplificator cu un factor de amplificare în curent alternativ de 3,5, are la intrare un semnal de 28 mA efectiv, semnalul de ieșire va fi 98 mA efectiv, sau  $3,5 \cdot 28 \text{ mA}$ :

$$I_{ieșire} = A_I I_{intrare}$$

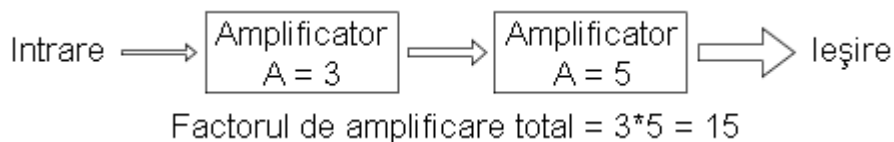
$$I_{ieșire} = 3,5 \cdot 2,8 \text{ mA}$$

$$I_{ieșire} = 98 \text{ mA}$$

În exemplele de mai sus, toate semnalele și amplificările au fost considerate în curent alternativ. Trebuie menționat un principiu important: amplificatoarele electronice răspund diferit semnalelor de intrare în curent alternativ și curent continuu, iar amplificarea celor două poate să fie diferită. Înainte de a putea face calculele amplificărilor, trebuie să înțelegem cu ce semnale avem de a face în primul rând, alternative sau de curent continuu.

## Conectarea în serie a amplificatoarelor

Dacă conectăm mai multe amplificatoare în etaje, factorul de amplificare total va fi egal cu produsul amplificărilor individuale.



În figura de sus, un semnal de 1 V este aplicat intrării unui amplificator cu factorul de amplificare 3. Ieșirea acestuia, de 3 V, este introdusă la intrarea unui amplificator cu factorul de amplificare 5, semnalul de la ieșire fiind 15 V.

## 5. Decibelul

- Factorul de amplificare se poate exprima cu ajutorul decibelului

### Definiție

În cea mai simplă formă, factorul de amplificare al amplificatorului este un raport dintre semnalul de ieșire și cel de intrare, fiind o mărime fără unitate de măsură. Totuși, există o unitate de măsură pentru reprezentarea amplificării, și anume, bel-ul.

Ca și unitate, bel-ul a fost folosit pentru reprezentarea pierderilor de putere din liniile telefonice, și nu pentru reprezentarea amplificărilor. Unitatea poartă numele inventatorului scoțian, Alexander Graham Bell, a cărui muncă fundamentală a dus la dezvoltarea sistemelor telefonice. Sub forma sa originală, bel-ul reprezenta cantitatea de semnal pierdută datorită rezistenței pe o anumită lungime de conductor electric. Acum, acesta este definit ca logaritm din baza zece a raportului dintre semnalul de ieșire și cel de intrare:

$$A_{P(\text{raport})} = \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$$

$$A_{P(\text{bel})} = \log \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$$

### Comparație

Deoarece bel-ul este o unitate logaritmică, acesta este ne-liniar. Să considerăm următorul tabel, ca și o comparație între pierderile de putere exprimate sub formă de raport și aceleași pierderi exprimate sub formă de bel:

Comparație amplificări / pierderi exprimate sub formă de raport și bel

| $\frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$ | $\log \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$ | $\frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$ | $\log \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$ |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1000                                           | 3 B                                                 | 0.1                                            | -1 B                                                |
| 100                                            | 2 B                                                 | 0.01                                           | -2 B                                                |
| 10                                             | 1 B                                                 | 0.001                                          | -3 B                                                |
| 1                                              | 0 B                                                 | 0.0001                                         | -4 B                                                |



Mai târziu a fost realizat faptul că bel-ul este o unitate de măsură prea mare pentru a fi utilizată direct; prin urmare, a început să fie folosit tot mai des prefixul metric *deci* ( $1/10$ , sau  $10^{-1}$ ), și anume *decibel*-ul, sau dB. Astăzi, expresia „dB” este atât de răspândită încât majoritatea nu realizează că aceasta este o combinație dintre „deci” și „bel”, sau că măcar există o unitate de măsură numită „bel”. Următorul tabel este asemănător celui precedent, dar de data aceasta valorile sunt exprimate în dB:

Comparație amplificări / pierderi exprimate sub formă de raport și decibel

| $\frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$ | $10 \log \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$ | $\frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$ | $10 \log \frac{P_{\text{ieșire}}}{P_{\text{intrare}}}$ |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1000                                           | 30 dB                                                  | 0.1                                            | -10 dB                                                 |
| 100                                            | 20 dB                                                  | 0.01                                           | -20 dB                                                 |
| 10                                             | 10 dB                                                  | 0.001                                          | -30 dB                                                 |
| 1                                              | 0 dB                                                   | 0.0001                                         | -40 dB                                                 |

## 02 - Fizica dispozitivelor semiconductoare

### 01. Fizica cuantică

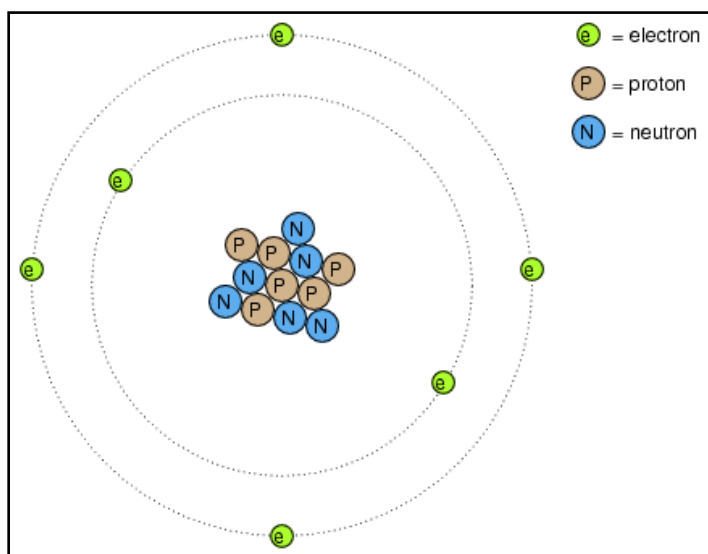
- Electronii există în atomi sub formă de „nori” ai probabilităților distribuite, și nu sub forma unor corpuri discrete ce orbitează în jurul nucleului precum sateliții în jurul planetelor
- Fiecare electron din jurul nucleului atomului are o „stare” unică descrisă de patru numere cuantice: numărul cuantic principal, cunoscut sub numele de strat; numărul cuantic orbital, cunoscut sub numele de substrat; numărul cuantic magnetic, ce descrie orbitalul (orientarea stratului); numărul cuantic de spin, sau pur și simplu spin. Aceste stări sunt cuantificate, adică electronul nu poate exista „între” aceste stări ce sunt definite de numerotația cuantică
- Numărul cuantic principal ( $n$ ) descrie stratul pe care se află electronul. Cu cât acest număr este mai mare, cu atât raza norului electronic este mai mare față de nucleul atomului, și cu atât este mai mare energia electronului. Aceste numere sunt numere întregi pozitive
- Numărul cuantic orbital ( $l$ ) descrie forma norului electronic dintr-un anumit strat și este cunoscut adesea sub numele de substrat. Numărul substraturilor (formelor norilor electronici) din oricare strat este egal cu numărul cuantic orbital. Acestea sunt numere întregi pozitive ce încep de la zero și se termină la  $n-1$  ( $n$  - numărul cuantic principal)
- Numărul cuantic magnetic  $m_l$  descrie orientarea substraturii (forma norului electronic). Numărul orientărilor substraturilor este de  $2l + 1$  ( $l$  - numărul cuantic orbital). Fiecare orientare unică poartă numele de orbital. Aceste numere sunt întregi, cu valori între  $-l$  și  $l$
- Numărul cuantic de spin  $m_s$  descrie o altă proprietate a electronului, iar valoarea acestuia poate să fie  $+1/2$  sau  $-1/2$
- Principiul de excluziune al lui Pauli spune că, într-un atom, nu există doi electroni cu același set de numere cuantice. Prin urmare, numărul maxim de electroni pe fiecare orbital este de 2 ( $\text{spin}=1/2$  și  $\text{spin}=-1/2$ ), de exemplu
- Notăția spectroscopică este o convenție folosită pentru descrierea configurației electronilor dintr-un atom. Straturile sunt descrise de numere întregi, urmate de substraturi, descrise cu ajutorul literelor (s, p, d, f), iar un indice superior este folosit pentru indicarea numărului total de electroni de pe fiecare substrat în parte
- Comportamentul chimic al unui atom este complet determinat de electronii din straturile neocupate complet. Straturile inferioare ocupate complet nu au aproape niciun efect asupra formării legăturilor chimice ale elementelor

## Importanța fizicii cuantice

Invenția dispozitivelor semiconductoare a constituit cu siguranță o nouă revoluție industrială. Aceste dispozitive au făcut posibilă miniaturizarea aparatelor electronice, incluzând calculatoarele personale, dezvoltarea echipamentelor medicale de diagnostic și tratament, apariția dispozitivelor de telecomunicații moderne și multe altele.

Dar în spatele acestor realizări remarcabile se află o altă revoluție a științei în general: fizica cuantică. Fără această nouă înțelegere a lumii, dezvoltarea dispozitivelor semiconductoare nu ar fi fost posibilă. Fizica cuantică este însă un domeniu al științei extrem de complicat, iar acest capitol reprezintă doar o mică introducere. Fără o înțelegere de bază a fizicii cuantice, sau cel puțin o înțelegere a descoperirilor științifice ce au dus la formularea acestora, este imposibilă înțelegerea funcționării dispozitivelor electronice semiconductoare. Majoritatea textelor de electronică încearcă să explice semiconductorii cu ajutorul fizicii „clasice”, lucru ce duce la o confuzie și mai mare, nu la înțelegerea subiectului.

### Modelul clasic al atomului (Rutherford)



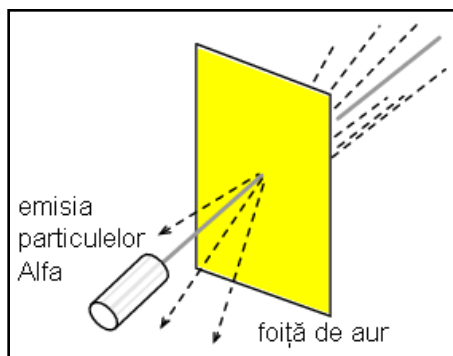
Majoritatea dintre noi am văzut modele ale atomului care arată aproximativ precum în figura alăturată (vezi subiectul discutat în volumul I).

Acesta este cunoscut sub numele de „modelul lui Rutherford”. Centrul atomului este format din particule de materie minuscule denumite protoni și neutroni; electronii orbitează în jurul nucleului precum planetele în jurul Soarelui. Nucleul prezintă o sarcină electrică pozitivă datorită prezenței protonilor, neutronii neavând sarcină electrică, iar electronii ce orbitează în jurul nucleului poartă o

sarcină negativă, întreg ansamblul fiind astfel echilibrat din punct de vedere al sarcinilor electrice.

Electronii sunt atrași de protoni la fel cum planetele sunt atrase prin intermediul gravitației de Soare, dar orbitele sunt stabile datorită mișcării electronilor. Acest model extrem de popular al atomului a fost prezentat pentru prima dată de Ernest Rutherford, ce a determinat pe cale experimentală, în jurul anului 1911, că sarcinile pozitive ale atomului sunt concentrate într-un nucleu dens și de dimensiuni reduse, în contradicție cu modelul propus de J.J. Thompson, care susținea că aceste sarcini sunt distribuite egal în interiorul atomului.

## Experimentul de împrăștiere al lui Rutherford



Acest experiment a presupus bombardarea unei folii subțiri de aur cu particule Alfa, încărcate pozitiv. Rezultatele au fost neașteptate. O mică parte din particule au fost deviate la unghiuri foarte mari. Câteva dintre particulele Alfa au fost deviate înapoi, la aproape  $180^\circ$ , dar majoritatea particulelor au trecut pur și simplu prin folia de aur nedeviate, indicând faptul că cea mai mare parte a foliei era compusă din aer. Faptul că o mică parte a particulelor Alfa au fost deviate la unghiuri foarte mari nu se putea

explica decât prin prezența unui nucleu minuscul, încărcat cu sarcină pozitivă.

Cu toate că acest model al atomului era mai precis decât cel al lui Thompson, totuși, nici acesta nu era perfect. Au fost întreprinse, prin urmare, noi experimente pentru determinarea structurii atomice corecte, iar aceste eforturi au dus la descoperirile bizare ale fizicii cuantice. Astăzi, modelul atomului, așa cum este el înțeles cel puțin, este destul de complex.

### „Moștenirea” modelului lui Rutherford

Totuși, comparația atomului „lui Rutherford” cu sistemul solar continuă să domine chiar și în mediile academice.

De exemplu, următoarea descriere este luată dintr-o carte de electronică:

*Electronii negativi ce orbitează în jurul nucleului pozitiv sunt atrași de acesta, ceea ce ne face să ne întrebăm: de ce electronii nu cad pe nucleul atomului? Răspunsul este că electronii rămân pe orbitele lor stabile datorită existenței celor două forțe egale și de sens contrar: forța centrifugă exercitată asupra electronilor aflați în mișcare pe orbite ce anulează forța centripetă ce atrage electronii spre nucleu datorită sarcinilor opuse.*

Urmând modelul lui Rutherford, autorul consideră electronii ca fiind bucăți solide de materie ce se deplasează pe orbite circulare, atracția față de nucleul încărcat cu o sarcină de semn contrar fiind balansată de mișcarea lor. Referirea la „forța centrifugă” nu este corectă din punct de vedere tehnic (nici chiar pentru planete), dar este ușor de trecut cu vederea datorită popularității ei. În realitate, nu există nicio forță care să împingă un corp, orice corp, departe de centrul orbitei acestuia. „Iluzia” este dată de faptul că un corp ce are inerție tinde să se deplaseze în linie dreaptă, iar din moment ce o orbită este o deviație (acelerație) a deplasării în linie dreaptă, există tot timpul o opoziție față de forța de atracție a corpului spre centrul orbitei, fie că este forță gravitațională, atracție electrostatică, sau orice altă forță.

Însă, adevărata problemă a acestei explicații este ideea că orbitele electronilor sunt circulare. Faptul că sarcinile electrice accelerate emit radiație electromagnetică se știe încă de pe vremea lui Rutherford, iar acest lucru se poate dovedi pe cale experimentală. Din moment ce mișcarea orbitală este o formă de accelerație (corpul ce orbitează este într-o accelerație constantă față de mișcarea normală, liniară), electronii aflați în stare de orbitare ar trebui să „arunce” radiație precum o roată aflată în noroi. Dacă electronii ar pierde energie în acest mod, aceștia s-ar

apropia din ce în ce mai mult de nucleu, rezultatul fiind o coliziune cu nucleul pozitiv. Totuși, acest lucru nu se întâmplă în general în atomi. Într-adevăr, orbitele electronilor sunt extrem de stabile.

### **Spectrul luminii emis de către atomi**

Mai mult decât atât, experimentele cu atomi „excitați” au demonstrat că energia electromagnetică emisă de un atom posedă doar anumite frecvențe specifice. Atomii excitați de influențe externe, precum lumina, absorb această energie și emit unde electromagnetice de frecvențe specifice. Când energia emisă de un atom este descompusă în frecvențele sale (culori) cu ajutorul unei prisme, spectrul culorilor este compus din linii distincte, acestea fiind unice elementului respectiv. Acest fenomen este în general folosit pentru identificarea elementelor atomice, și chiar și pentru determinarea proporțiilor fiecărui element dintr-o compoziție chimică. Conform modelului lui Rutherford și a legilor fizicii clasice, domeniul frecvențelor acestor atomi excitați ar trebui să fie practic nelimitat. Cu alte cuvinte, dacă modelul lui Rutherford ar fi fost corect, spectrul luminii emise de oricare atom ar apărea ca o bandă continuă de culori și nu doar sub forma câtorva linii distincte.

### **Orbitalii**

Niels Bohr a încercat să îmbunătățească modelului lui Rutherford după ce a studiat o perioadă de câteva luni în laboratorul acestuia în 1912. Încercând să armonizeze și descoperirile celorlalți fizicieni, precum Max Planck și Albert Einstein, Bohr a sugerat că fiecare electron posedă o anumită energie specifică, iar orbitele lor sunt cuantificate, astfel că fiecare dintre electroni poate ocupa doar anumite locuri în jurul nucleului. Pentru a scăpa de implicațiile mișcării electronilor datorită legilor electromagnetismului și a particulelor accelerate, Bohr a considerat aceste orbite (orbitali) ca fiind staționare.

Cu toate că încercarea lui Bohr de reconstruire a structurii atomului în termeni cât mai apropiați de rezultatele experimentale, a constituit un pas foarte important pentru fizică, acesta nu a fost totuși complet. Analizele sale matematice au condus la predicții mult mai bune a evenimentelor experimentale decât modelele precedente ale atomului, dar câteva întrebări despre modul ciudat al comportamentului electronilor încă nu își găsiseră răspunsul. Susținerea faptului că electronii existau în stări staționare și cuantificate în jurul nucleului era un pas înainte, dar motivul pentru care electronii se comportau astfel nu era încă cunoscut. Răspunsul acestor întrebări avea să-l dea un alt fizician, Louis de Broglie, cu aproximativ zece ani mai târziu.

### **Dualismul corpuscul-undă**

De Broglie a propus că electronii, precum fotonii (particule de lumină), manifestă atât proprietăți ale particulelor cât și proprietăți ale undelor. Bazându-se pe această interpretare, acesta a sugerat că o analiză a

orbitalilor electronilor din punct de vedere al undelor și nu al particulelor, ar răspunde mai multor întrebări legate de natura lor. Într-adevăr, acesta a reprezentat un nou pas în dezvoltarea unui model al atomului.

Ipoteza lui de Broglie a făcut posibilă introducerea suportului matematic și analogiilor fizice pentru stările cuantificate ale electronilor dintr-un atom, dar nici modelul acestuia nu era complet. În decurs de câțiva ani însă, fizicienii Werner Heisenberg și Erwin Schrödinger, fiecare lucrând individual, au creat un model matematic mult mai riguros pentru particulele subatomice, plecând de la conceptul dualității undă-particulă a lui de Broglie.

## **Principiul incertitudinii al lui Heisenberg**

Avansul teoretic de la modelul staționar al undei propus de de Broglie la modelul matricial al lui Heisenberg la ecuațiile diferențiale ale lui Schrödinger, este cunoscut sub numele de mecanică cuantică și introduce o caracteristică aparent șocantă a lumii particulelor subatomice, și anume probabilitatea sau incertitudinea. Conform teoriei mecanicii cuantice, poziția exactă și momentul exact al particulelor sunt imposibil de determinat în același timp. Explicația acestui „principiu al incertitudinii” constă într-o eroare de măsură cauzată de obicei de procesul de măsurare, și anume, prin încercarea de măsurare exactă a poziției unui electron, are loc o interferență cu momentul acestuia și prin urmare nu putem ști care a fost momentul acestuia înainte de efectuarea măsurătorii, și invers. Implicația surprinzătoare a mecanicii cuantice este că particulele nu au de fapt o poziție și un moment precis, ci aceste două cantități sunt echilibrate astfel încât incertitudinea lor combinată nu scade niciodată sub o anumită valoare minimă.

## **Norii electronici**

Valoarea minimă a incertitudinii poziției și momentului unei particule, exprimată de Heisenberg și Schrödinger, nu are nimic de a face cu aparatele de măsură „neperformante”, ci este o proprietate intrinsecă a dualității undă-particulă. Prin urmare, electronii nu există în orbitele lor ca și „bucăți” de materie precis delimitate, și nici măcar sub formă de unde bine delimitate, ci sub formă de nori cu o distribuție de probabilități, ca și cum fiecare electron ar fi „împrăștiat” pe o suprafață mare de poziții și momente.

## **Numerele cuantice**

Poziția radicală conform căreia, electronii existau sub formă de nori, părea să vină în contradicție cu principiile originale ale stărilor cuantificate ale electronilor: faptul că electronii există sub forma „orbitelor” discrete și bine definite în jurul nucleului atomului. Această din urmă explicație a fost cea care a constituit, până la urmă, punctul de plecare al mecanicii cuantice. Totuși, comportamentul „cuantic” al electronilor nu depinde de o anumită poziție și moment, ci depinde de cu totul altă proprietate, numerele cuantice. Pe scurt, mecanica cuantică înlătură

noțiunile „clasice” de poziție și moment absolut înlocuindu-le pe acestea cu noțiuni ce nu au nicio analogie în viața reală.

Cu toate că electronii există sub formă de „nori” cu probabilități distribuite și nu sub formă de materie discretă, acești nori au unele caracteristici ce sunt discrete. Oricare electron dintr-un atom poate fi descris de patru numere cuantice, și anume: număr cuantic principal, orbital, magnetic și de spin. Toate aceste numere luate împreună determină starea unui electron la un moment dat.

## Numărul cuantic principal

Simbolizat prin litera „n”, acest număr descrie stratul pe care se află un electron. Învelișul electronic este un spațiu din jurul nucleului atomului, format din straturi, ce determină pozițiile în care electronii pot exista. Electronii se pot deplasa de pe un strat pe altul, dar nu pot exista în regiunile dintre straturi.

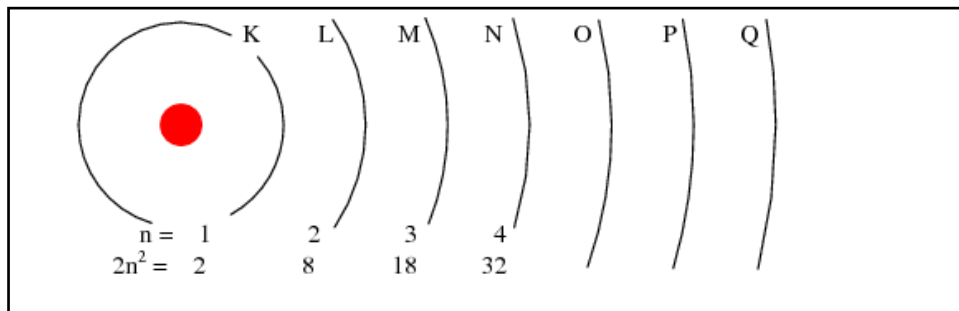
Numărul cuantic principal al electronului este un număr întreg pozitiv (1, 2, 3, 4...). astfel, fiecare electron poate exista pe unul dintre aceste straturi, în funcția de componența atomului. Aceste valori nu au fost alese arbitrar, ci ca urmare a experimentelor cu spectre de lumină: diferitele frecvențe ale luminii emise de atomii de hidrogen excitați, urmează o secvență matematică ce depinde de anumite valori întregi.

Fiecare strat poate susține mai mulți electroni. O analogie a acestei așezări poate fi imaginată dacă luăm în considerare un amfiteatru. Fiecare persoană trebuie să aleagă un rând în care să se așeze (nu se poate așeza între rânduri); la fel, fiecare electron trebuie să „aleagă” un anumit strat în care să se „așeze”. Ca și în cazul amfiteatrelor, stratul exterior poate susține mai mulți electroni decât stratul interior, din apropierea nucleului. De asemenea, electronii tind să se „așeze” pe cel mai de jos strat disponibil, la fel cum într-un amfiteatru, oamenii caută să se așeze cât mai aproape de scenă (în primul rând). Cu cât numărul stratului (numărul cuantic principal, n) este mai mare, cu atât energia electronilor ce-l ocupă este mai mare.

Numărul maxim de electroni dintr-un strat este descris de următoarea ecuație:

$$2n^2$$

Astfel, primul strat (n=1) poate fi ocupat de doar 2 electroni, cel de al doilea strat (n=2) de 8 electroni, al treilea (n=3) de 18 electroni.

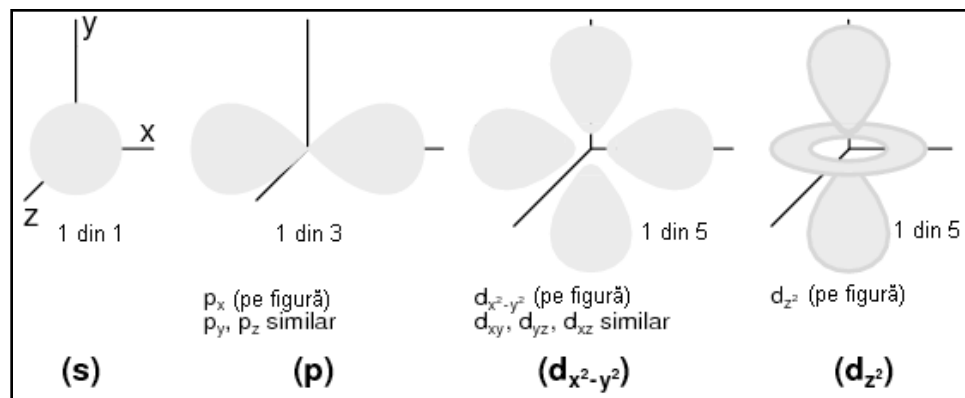


Straturile electronice (de la electron) ale unui atom au fost notate cu litere nu cu cifre. Primul strat (n=1) se notează cu litera K, al doilea (n=2) cu L, al treilea (n=3) cu M, al patrulea (n=4) cu N, al cincilea

( $n=5$ ) cu O, al șaselea ( $n=6$ ) cu P și al șaptelea ( $n=7$ ) cu Q.

## Numărul cuantic orbital

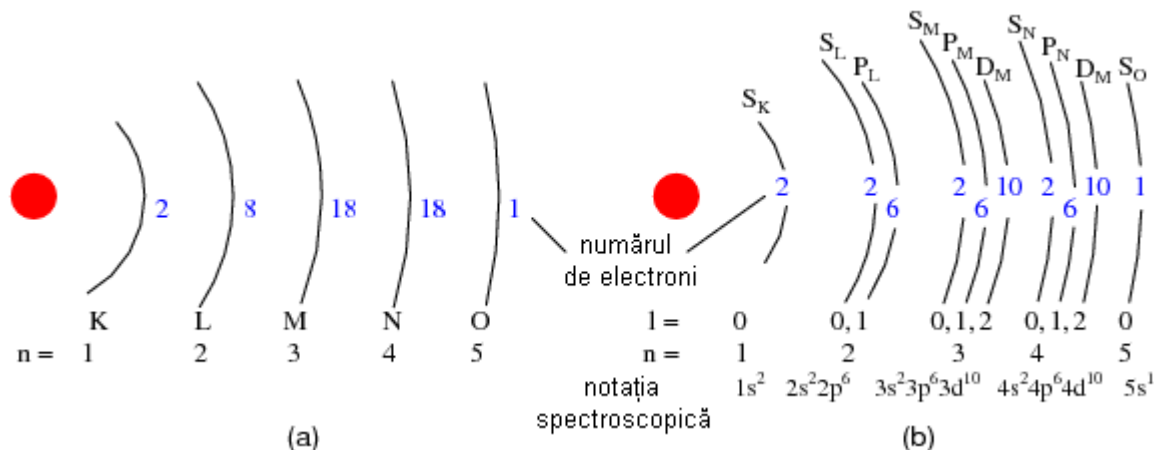
Fiecare strat este compus din substraturi. Substraturile sunt regiuni spațiale ce descriu locul în care pot exista „nori” electronici iar forma lor este diferită de la un substrat la altul.



Primul substrat are forma unei sfere, dacă îl privim sub forma unui nor de electroni ce „învelește” tridimensional nucleul atomic. Cel de al doilea substrat însă, este compus din doi „lobi” conectați împreună într-un singur punct în

apropierea centrului atomului. Al treilea substrat este format dintr-un set de patru „lobi” aranjați în jurul nucleului.

Numărul orbital este un număr întreg, la fel ca și numărul principal, doar că include și zero. Aceste numere sunt simbolizate prin intermediul literei  $l$ . Numărul substraturilor dintr-un strat este egal cu numărul cuantic orbital.



Astfel, primul strat ( $n=1$ ) are un substrat, numerotat cu 0; al doilea strat ( $n=2$ ) are două substraturi, 0 și 1; al treilea strat ( $n=3$ ) are trei substraturi, 0, 1 și 2. O altă convenție, foarte des întâlnită, este numerotarea substraturilor prin  $s$  ( $l=0$ ),  $p$  ( $l=1$ ),  $d$  ( $l=2$ ) și  $f$  ( $l=3$ ).

## Numărul cuantic magnetic

Numărul cuantic magnetic al unui electron determină orientarea formei substratului. „Lobii” substraturilor pot fi orientați în mai multe direcții. Aceste orientări diferite poartă numele de orbitali. Primul substrat ( $s$ ;  $l=0$ ) este



o sferă fără posibilitatea de existență a unei direcții, prin urmare, în acest caz, avem doar un orbital. Pentru al doilea strat ( $l=1$ ) din fiecare strat, „lobii” acestora pot avea trei direcții diferite.

Simbolul numărului magnetic este  $m_l$ . Pentru a calcula numărul de orbitali din fiecare strat, utilizăm următoarea formulă:

$$2l + 1$$

De exemplu, primul strat ( $l=0$ ) al oricărui strat, conține un singur orbital, numerotat cu 0; al doilea strat ( $l=1$ ) al oricărui strat conține trei orbitali, -1, 0, 1; al treilea strat ( $l=2$ ) conține cinci orbitali, numerotați cu -2, -1, 0, 1 și 2; etc.

## Numărul cuantic de spin

Proprietatea de „spin” a electronilor a fost descoperită pe cale experimentală. O observație mai atentă a liniilor spectrale a reliefat faptul că fiecare linie este de fapt o pereche de linii foarte apropiate una de cealaltă, ipoteza fiind că această structură este rezultatul spin-ului fiecărui electron în jurul propriei sale axe. Atunci când sunt excitați, electronii cu spin diferit vor emite energie sub frecvențe diferite.

Numărul de spin este simbolizat prin  $m_s$ . În fiecare orbital, din fiecare strat al fiecărui strat, pot exista doi electroni, unul cu spin  $+1/2$ , iar celălalt cu spin  $-1/2$ .

## Principiul de excluziune al lui Pauli

Explicarea așezării electronilor în atom cu ajutorul acestor numere cuantice poartă numele de principiul de excluziune al lui Pauli. Acest principiu spune că, în același atom, nu pot exista doi electroni care să ocupe exact aceleași stări cuantice. Cu alte cuvinte, fiecare electron al unui atom posedă un set unic de numere cuantice. Acest lucru impune o limită a numărului de electroni ce pot ocupa orice orbital, strat sau strat.

## Notăția spectroscopică

O metodă practică și des întâlnită de descriere a acestui aranjament constă în scrierea electronilor în funcție de straturile și substraturile ocupate; această convenție poartă numele de notația spectroscopică. Sub această notație, numărul stratului este un număr întreg pozitiv, substratul este o literă (s, p, d, f), iar numărul total de electroni dintr-un strat (toți orbitalii și spinii incluși) este reprezentat printr-un indice superior.

## Structura atomului de Hidrogen

|                                                                                                                                                                                                       | substrat<br>( $l$ ) | orbital<br>( $m_l$ ) | spin<br>( $m_s$ ) |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------|
| Stratul K<br>( $n = 1$ )                                                                                                                                                                              | 0                   | 0                    | $1/2$             | ← 1 electron |
| <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Hidrogen</b><br/>           Numărul atomic (<math>Z</math>) = 1<br/>           (nucleul conține un proton)         </div> |                     |                      |                   |              |
| Notăția spectroscopică : $1s^1$                                                                                                                                                                       |                     |                      |                   |              |

electronului). Acest electron ocupă stratul cel mai de jos ( $n=1$ ), primul substrat ( $l=1$ ), în singurul orbital (orientarea spațială) al acelui substrat ( $m_l=0$ ), cu un spin de  $1/2$ . Folosind notația spectroscopică, hidrogenul, având doar un singur electron în stratul inferior, se poate descrie prin notația  $1s^1$ .

### Structura atomului de Heliu

|                                                                                                                                                                                                      | substrat<br>( $l$ ) | orbital<br>( $m_l$ ) | spin<br>( $m_s$ ) |              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------|
| stratul K<br>( $n = 1$ )                                                                                                                                                                             | 0                   | 0                    | $-1/2$            | ← 1 electron |
|                                                                                                                                                                                                      | 0                   | 0                    | $1/2$             | ← 1 electron |
| <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Heliu</b><br/>           Numărul atomic (<math>Z</math>) = 2<br/>           (nucleul conține doi protoni)         </div> |                     |                      |                   |              |
| Notăția spectroscopică : $1s^2$                                                                                                                                                                      |                     |                      |                   |              |

necesită substraturi sau straturi suplimentare pentru cel de al doilea electron.

Totuși, un atom ce conține trei sau mai mulți electroni, va necesita substraturi adiționale pentru toți acei electroni, din moment ce pe stratul inferior ( $n=1$ ) încap doar doi electroni.

### Structura atomului de Litiu

|                                                                                                                                                         | substrat<br>( $l$ ) | orbital<br>( $m_l$ ) | spin<br>( $m_s$ ) |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------|
| stratul L<br>( $n = 2$ )                                                                                                                                | 0                   | 0                    | $1/2$             | ← 1 electron |
| stratul K<br>( $n = 1$ )                                                                                                                                | 0                   | 0                    | $-1/2$            | ← 1 electron |
|                                                                                                                                                         | 0                   | 0                    | $1/2$             | ← 1 electron |
| <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Litiu</b><br/>           Numărul atomic (<math>Z</math>) = 3         </div> |                     |                      |                   |              |
| Notăția spectroscopică : $1s^2 2s^1$                                                                                                                    |                     |                      |                   |              |

Alăturat prezentat aranjamentul electronic al atomului de hidrogen.

Cu nucleul format dintr-un singur proton, este suficient un electron pentru ca atomul să atingă echilibrul electrostatic (sarcina electrică pozitivă a protonului este în echilibru cu sarcina electrică negativă a

Trecând la următorul atom (în ordinea numărului atomic), avem elementul heliu.

Nucleul unui atom de heliu are în compoziția sa doi protoni, iar acest lucru necesită existența a doi electroni pentru a echilibra sarcina electrică totală a atomului. Din moment ce ambii electroni, unul cu spin  $1/2$ , celălalt cu spin  $-1/2$ , „încap” pe un singur orbital, configurația atomului de Heliu nu

Să considerăm următorul atom, cel de litiu.

Un atom de litiu folosește doar o fracțiune din capacitatea stratului L ( $n=2$ ), capacitatea totală a acestuia fiind de opt electroni (capacitatea maximă a stratului =  $2n^2$ , unde  $n$  este numărul stratului).

## Structura atomului de Neon

|                                                                 | substrat<br>( $l$ ) | orbital<br>( $m_l$ ) | spin<br>( $m_s$ ) |                                            |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------------------------------------|
| Stratul L<br>( $n = 2$ )                                        | 1                   | 1                    | $-1/2$            | substratul p<br>( $l = 1$ )<br>6 electroni |
|                                                                 | 1                   | 1                    | $1/2$             |                                            |
|                                                                 | 1                   | 0                    | $-1/2$            |                                            |
|                                                                 | 1                   | 0                    | $1/2$             |                                            |
|                                                                 | 1                   | -1                   | $-1/2$            |                                            |
|                                                                 | 1                   | -1                   | $1/2$             |                                            |
| Stratul K<br>( $n = 1$ )                                        | 0                   | 0                    | $-1/2$            | substratul s<br>( $l = 0$ )<br>2 electroni |
|                                                                 | 0                   | 0                    | $1/2$             |                                            |
|                                                                 | 0                   | 0                    | $-1/2$            | substratul s<br>( $l = 0$ )<br>2 electroni |
|                                                                 | 0                   | 0                    | $1/2$             |                                            |
| <div>Neon</div> <div>Numărul atomic (<math>Z</math>) = 10</div> |                     |                      |                   |                                            |
| Notăția spectroscopică : $1s^2 2s^2 2p^6$                       |                     |                      |                   |                                            |

Dacă examinăm aranjamentul electronic al unui atom cu stratul L completat, putem vedea cum toate combinațiile de substraturi, orbitali și spini sunt ocupate de electroni. Elementul ce corespunde acestei configurații este Neonul.

## Observații

Adesea, atunci când se folosește notația spectroscopică a unui atom, toate straturile ce sunt ocupate complet sunt ignorate, fiind scrise doar straturile neocupate sau stratul ocupat superior. De exemplu, neonul (prezentat mai sus), ce are două straturi complet ocupate, poate fi descris pur și simplu prin  $2p^6$  în loc de  $1s^2 2s^2 2p^6$ . Litiul, având stratul K complet ocupat, și doar un singur electron în stratul L, poate fi descris prin notația  $2s^1$  în loc de  $1s^2 2s^1$ .

„Ignorarea” straturilor inferioare, complet ocupate, nu este doar o convenție de scriere, ci ilustrează foarte bine un principiu de bază al chimiei: comportamentul chimic al unui element este determinat în primul rând de straturile sale neocupate. Atât hidrogenul cât și litiul posedă un singur electron în straturile superioare ( $1s^1$  și  $2s^1$ ), iar acest lucru se traduce printr-un comportament similar al celor două elemente. Ambele elemente sunt reactive, și au o reactivitate similară. Contează mai puțin faptul că litiul posedă un strat complet (K) în plus față de hidrogen. Comportamentul său chimic este determinat de stratul său neocupat, L.

## Elemente nobile

Elementele a căror straturi superioare sunt ocupate complet, sunt clasificate ca elemente nobile, fiind aproape non-reactive față de celelalte elemente. Aceste elemente au fost clasificate în trecut ca inerte, crezându-se că sunt complet non-reactive, dar acestea pot forma compuși cu alte elemente în condiții specifice.

## 02. Valența și structura cristalină

- Atomii încearcă să-și completeze stratul exterior, de valență, cu toți cei 8 electroni (2 electroni pentru stratul inferior). Atomii pot dona, accepta sau împărți electroni pentru a completa un strat
- Atomii formează adesea structuri ordonate și rigide denumite cristale
- Un ion pozitiv se formează prin cedarea unui electron de către un atom neutru
- Un ion negativ se formează prin acceptarea unui electron de către un atom neutru
- Elementele semiconductoare din grupa IVA, C, Si și Ge au o structură cristalină de tip diamant. Fiecare atom al cristalului este parte a unei molecule gigantice, formând legături cu alți patru atomi
- Majoritatea dispozitivelor semiconductoare sunt confecționate din monocristale

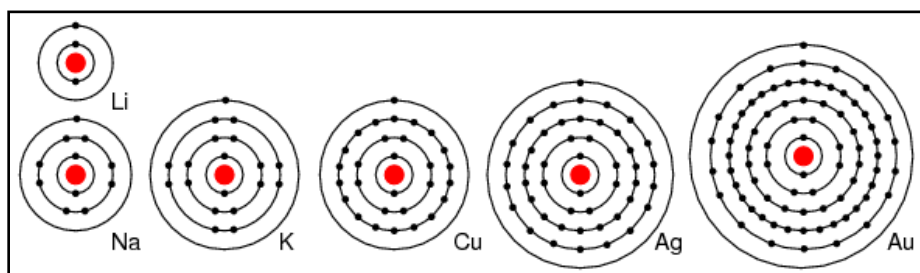
### Electronii de valență

Electronii din stratul exterior, sau stratul de valență, sunt cunoscuți sub numele de electroni de valență. Acești electroni sunt responsabili de proprietățile chimice ale elementelor. Aceștia sunt electronii ce participă la reacțiile chimice cu celelalte elemente.

### Formarea ionilor și a moleculelor

Conform unei reguli chimice simplificate, aplicabilă reacțiilor simple, atomii încearcă să-și completeze toate locurile libere ale stratului exterior cu electroni. Atomii pot ceda câțiva electroni pentru a „descoperi” un strat complet, sau pot accepta câțiva electroni pentru a completa ultimul strat (stratul exterior). Ambele procese duc la formarea ionilor. Atomii pot chiar să împartă electroni între ei în încercarea de completare a stratului exterior, ducând la formarea legăturilor moleculare, adică, atomii se asociază pentru formarea unei molecule.

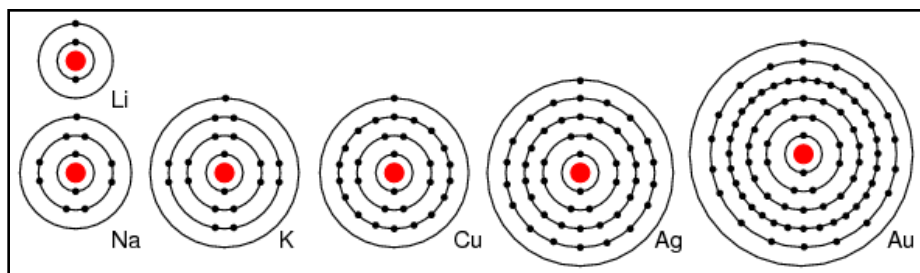
#### Ioni pozitivi



De exemplu, elementele din grupa I din tabelul periodic, Li, Na, K, Cu, Ag și Au au doar un singur electron de valență (numărul de electroni de pe ultimul strat). Toate aceste elemente posedă proprietăți

chimice similare. Acești atomi cedează un electron pentru a reacționa cu alte elemente, iar această proprietate face ca aceste elemente să fie conductoare excelente de electricitate. Cedarea electronilor de către atomi duce la formarea ionilor pozitivi

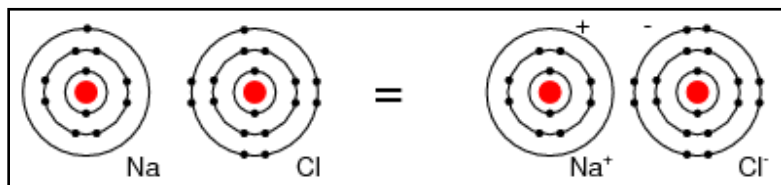
## Ioni negativi



Elementele din grupa VIIA, F, Cl și Br, au toate câte 7 electroni în stratul exterior (stratul de valență). Aceste elemente acceptă un electron pentru completarea stratului de valență la 8 electroni.

În cazul în care aceste elemente acceptă un electron, ele formează ioni negativi. Din moment ce nu cedează electroni, aceste elemente sunt foarte buni izolatori electrici.

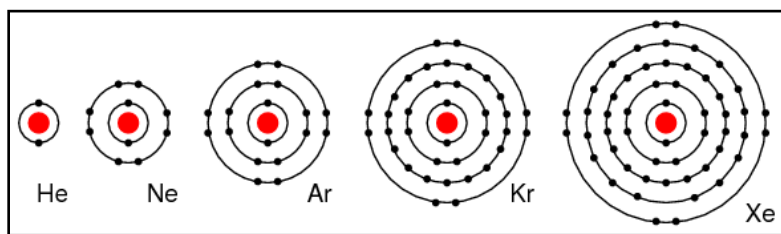
## Definiția ionului



De exemplu, un atom de Cl acceptă un electron al unui atom de Na devenind ion negativ  $\text{Cl}^-$ , iar atomul de Na devine ion pozitiv,  $\text{Na}^+$ . Un ion este un atom, moleculă

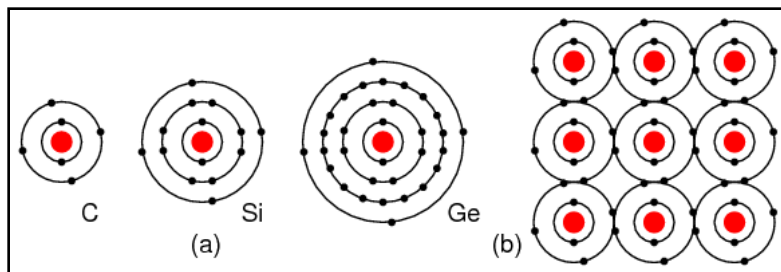
sau grupare de atomi care are un exces de sarcină electrică pozitivă sau negativă. Acesta este modul în care Na și Cl se combină pentru formarea  $\text{NaCl}$ , sarea de masă, care este de fapt o pereche de ioni,  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ . Fiindcă sarcinile celor doi ioni sunt de semn contrar, cei doi se atrag reciproc.

## Exemple



Elementele din grupa a VIIIA, He, Ne, Ar, Kr și Xe au toate câte 8 electroni pe stratul de valență. Acest lucru înseamnă că aceste elemente nici nu donează dar nici nu acceptă electroni, ne-participând la reacții chimice cu

alte elemente. Toate sunt izolatori electrici și se găsesc sub formă de gaz la temperatura camerei.



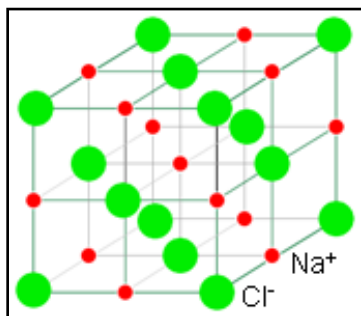
Elementele din grupa IVA, C, Si și Ge au toate câte 4 electroni în stratul de valență. Aceste elemente formează compuși cu alte elemente, dar nu formează ioni. Acest tip de legătură este cunoscută sub numele de *legătură covalentă*. Se poate observa că atomul din centru are

completat stratul de valență prin punerea în comun a electronilor atomilor. Figura de mai jos este o reprezentare bidimensională a unui aranjament tridimensional. Elementele din această grupă prezintă proprietățile semiconductoare pe care le vom studia în continuare.

## Structura cristalină

Majoritatea substanțelor anorganice formează o structură ordonată denumită cristal atunci când se formează legături între atomii sau ionii acestora. Chiar și metalele sunt compuse din cristale, la nivel microscopic. Practic însă, toate metalele industriale au o structură policristalină, în afară de materialele semiconductoare ce sunt monocristaline.

Majoritatea metalelor sunt moi și ușor deformabile pe cale industrială. În timpul prelucrării, microcristalele sunt deformate, iar electronii de valență sunt liberi să se deplaseze prin rețeaua cristalină, și de la cristal la cristal. Electronii de valență nu aparțin unui atom anume, ci tuturor atomilor.



Structura cristalină rigidă a NaCl prezentată în figura alăturată, este compusă dintr-o structură regulată repetitivă formată din ioni pozitivi de Na și ioni negativ de Cl. Odată ce atomii de Na și Cl formează ionii de  $\text{Na}^+$  și  $\text{Cl}^-$  prin transferul unui electron de la Na la Cl, fără existența electronilor liberi, electronii nu sunt liberi să se deplaseze prin rețeaua cristalină, o diferență mare față de metale. Nici ionii nu sunt liberi. Ionii sunt liberi să se deplaseze doar dacă NaCl este dizolvată în apă, dar în acest caz, cristalul nu mai există. Materialele ionice formează structuri cristaline datorită atracției electrostatice puternice dintre ionii încărcăți cu sarcini opuse.

## Materialele semiconductoare

Materialele semiconductoare din grupa IV (C, Si, Ge), formează de asemenea cristale. Fiecare atom formează o legătură chimică covalentă cu alți patru atomi. Cristalul format este practic o singură moleculă. Structura cristalină este relativ rigidă și rezistă deformațiilor. Există un număr relativ mic de electroni liberi prin cristal.

## 03. Benzi de energie

- Pentru îndepărtarea unui electron din banda de valență spre o bandă neocupată, superioară, denumită bandă de conducție, este nevoie de o anumită energie exterioară. Pentru deplasarea electronilor între straturi este nevoie de o energie mai mare decât pentru deplasarea lor între substraturi.

- Datorită faptului că banda de valență și cea de conducție se suprapun în cazul metalelor, energia necesară pentru deplasarea unui electron este mică. Prin urmare, metalele sunt conductori de electricitate foarte buni
- Spațiul foarte mare existent între banda de valență și cea de conducție în cazul materialelor izolatoare, necesită o energie foarte mare pentru deplasarea electronilor între aceste benzi. Din această cauză, aceste materiale sunt bune izolatoare și nu conduc electricitate
- Materialele semiconductoare au un spațiu relativ mic între banda de valență și banda de conducție. Semiconductorii puri nu sunt nici buni izolatori, nici buni conductori

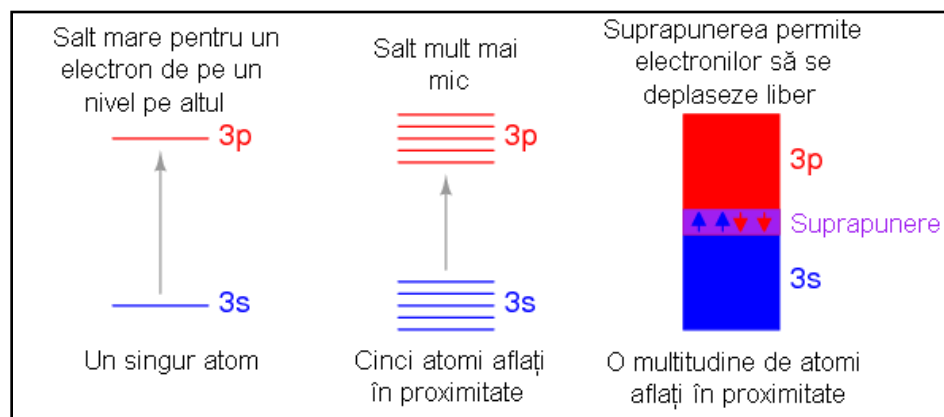
## Nivelele energetice

Fizica cuantică descrie starea electronilor dintr-un atom cu ajutorul celor patru numere cuantice. Aceste numere descriu stările permise ale electronilor dintr-un atom.

La fel ca spectatorii dintr-un amfiteatru, ce se pot deplasa liberi între scaune și rânduri, și electronii își pot modifica starea în cazul existenței unei energii suficiente și loc pentru deplasarea acestora. Din moment ce nivelul stratului este strâns legat de cantitatea de energie a unui electron, „salturile” între straturi (și chiar substraturi) necesită un transfer de energie. Pentru ca un electron să se poată deplasa pe strat mai înalt, acesta are nevoie de energie adițională dintr-o sursă externă. Folosind analogia amfiteatrului, pentru a ajunge într-un rând de scaune superior, este nevoie de o energie din ce în ce mai mare, deoarece persoana trebuie să urce la o înălțime tot mai mare ce necesită învingerea forței gravitaționale. De asemenea, dacă un electron coboară pe un strat inferior, acesta cedează energie. Aceste nivele poartă numele de nivele energetice

Nu toate „salturile” sunt însă egale, cele dintre straturi necesită cel mai mare schimb de energie, pe când salturile dintre substraturi sau dintre orbitali necesită un schimb de energie mai mic.

## Benzile de energie



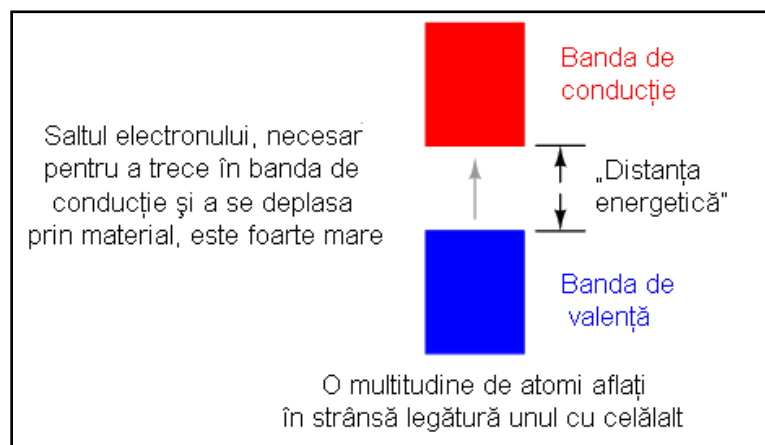
Când atomii se combină pentru formarea substanțelor, straturile, substraturile și orbitalii exteriori se combină între ei, ducând la creșterea energiei disponibile pentru electroni. Când un număr foarte mare de atomi sunt foarte aproape unul de celălalt, aceste nivele de energie disponibile

formează o bandă de electroni aproape continuă, bandă pe care electroni se pot deplasa cu ușurință.

## Electronii liberi

Lățimea acestor benzi și distanța dintre ele determină mobilitatea electronilor în cazul aplicării unui câmp electric asupra lor. În substanțele metalice, benzile libere se suprapun cu benzile ce conțin electroni, ceea ce înseamnă că electronii unui singur atom se pot deplasa la un nivel energetic mai mare necesitând foarte puțină energie externă sau chiar deloc. Astfel, electronii din stratul exterior sunt cunoscuți sub numele de electroni liberi și se pot deplasa foarte ușor dacă sunt supuși unui câmp electric exterior.

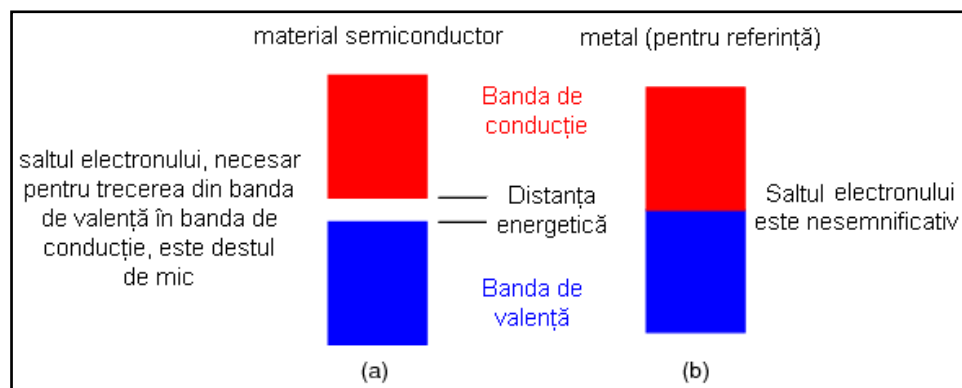
## Cazul materialelor izolatoare



Suprapunerea benzilor nu are loc însă în toate substanțele, indiferent de numărul atomilor ce se află în proximitate. În cazul unor substanțe, există o distanță considerabilă între banda de valență (nivelul energetic cel mai mare) și următoarea bandă goală, denumită banda de conducție.

Prin urmare, electronii de valență sunt „legați” de atomii lor și nu pot deveni mobili în cadrul substanțelor fără ajutorul unei energii externe considerabile. Aceste substanțe formează materialele izolatoare (dielectrice).

## Cazul materialelor semiconductoare



Însă, materialele din categoria semiconductorilor au o „distanță energetică” îngustă între benzile de valență și cele de conducție. Astfel, cantitatea de energie necesară pentru trecerea electronilor de valență în banda de conducție, de undă

devin mobili, este destul de modestă.

La temperaturi joase, energia termică disponibilă pentru „împingerea” electronilor de valență peste spațiul dintre banda de valență și cea de conducție este foarte mică, iar materialul semiconductor se comportă precum un



izolator. La temperaturi înalte însă, energia termică devine suficient de mare pentru a forța electronii peste „distanța energetică”, iar materialul se va comporta precum un material conductor.

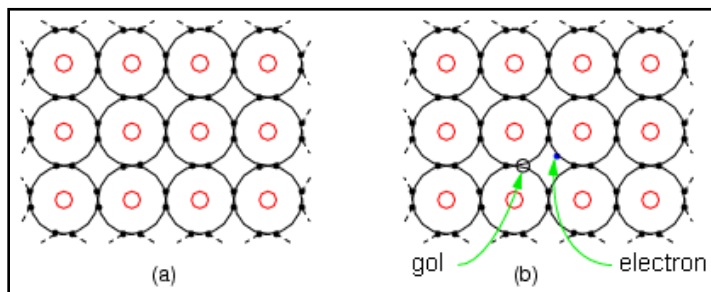
## 04. Electroni și goluri

- Golurile reprezintă absența electronilor din banda de valență
- Materialele semiconductoare pure, cu un procent de 1 parte la 10 miliarde, nu sunt bune conductoare
- Materialele semiconductoare de tip N sunt dopate cu o impuritate pentavalentă pentru crearea electronilor liberi. Un astfel de material este conductor, iar purtătorii de sarcină majoritari sunt în acest caz electronii
- Materialele semiconductoare de tip P sunt dopate cu o impuritate trivalentă și duc la crearea unei abundențe de goluri în structura semiconductorului. Un astfel de material este conductor, iar purtătorii de sarcină majoritari sunt în acest caz golurile

### Scop

Materialele semiconductoare pure sunt izolatori relativ buni, în comparație cu metalele, dar nu sunt la fel de bune precum sticla, de exemplu. Pentru a putea fi folosit în aplicații cu semiconductori, materialul semiconductor pur, nedopat, nu trebuie să conțină mai mult de o impuritate la 10 miliarde de atomi semiconductori. Acest lucru este analog unei impurități sub formă de „un fir de praful într-un sac de zahăr”. Materialele semiconductoare impure sunt conductoare mult mai bune, dar nu la fel de bune precum metalele. De ce se întâmplă acest lucru? Pentru a putea răspunde acestei întrebări, trebuie să ne uităm la structura electronică a acestor materiale.

### Structura electronică a semiconductorilor



În figura alăturată (a), cei patru electroni din stratul de valență a unui material semiconductor formează legături covalente cu alți patru atomi. Toți electronii unui atom formează legături covalente. Electronii nu se pot deplasa liberi în structura cristalului.

Prin urmare, semiconductorii puri (intrinseci) sunt izolatori relativ buni în comparație cu metalele. Energia termică poate elibera ocazional un electron din structura cristalină a semiconductorului. Acest electron se poate deplasa liber prin structura cristalului (electron liber). Când acest electron a fost eliberat cu ajutorul unei energii exterioare, a lăsat în urma lui un loc liber cu sarcină pozitivă în structura cristalului, sarcină cunoscută sub numele

de **gol**. Acest gol nu este nici el fix, ci se poate deplasa liber. Atât electronul, cât și golul contribuie la conducția electrică a cristalului. Electronul este liber până în momentul în care „cade” într-un gol, proces cunoscut sub numele de recombinare. Dacă se aplică un câmp electric extern asupra semiconductorului, electronii și golurile se vor deplasa în direcții opuse.

Creșterea temperaturii duce la creșterea numărului de electroni și goluri și la descreșterea rezistenței. Acest lucru este exact opus comportamentului metalelor, unde rezistența crește odată cu creșterea temperaturii datorită creșterii coliziunilor dintre electroni și structura cristalină. Numărul de electroni și goluri într-un semiconductor intrinsec este egal. Totuși, viteza de deplasare ai celor doi purtători de sarcină (electroni și goluri) nu este egală la aplicarea unui câmp electric extern. Cu alte cuvinte, mobilitatea celor doi purtători de sarcină nu este aceeași.

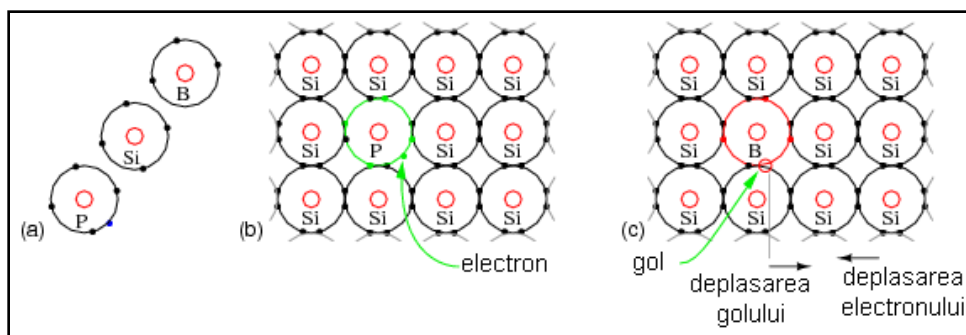
## Doparea materialelor semiconductoare

Materialele semiconductoare pure nu sunt foarte folositoare. Acestea trebuie să prezinte un nivel înalt de puritate înainte de adăugarea impurităților specifice.

Materialele semiconductoare pure (1 parte la 10 miliarde), pot fi „murdărite” cu aproximativ 1 parte la 10 milioane pentru creșterea numărului de purtători de sarcină. Adăugarea unei impurități precise unui material semiconductor este cunoscută sub numele de dopare. Doparea crește conductivitatea semiconductorului, pentru ca acesta să se comporte mai mult ca un metal decât ca un izolator.

## Impuritatea donoare de tip N

Creșterea numărului sarcinilor electrice negative din structura cristalină a unui material semiconductor se poate realiza prin doparea cu electroni a unui material donor precum fosforul. Materialele donatoare de electroni, cunoscute și sub numele de „materiale de tip N, includ elemente din grupa VA a tabelului periodic: N (azot), P (fosfor), As (arsenic) și Sb (stibiu sau antimoniu). Azotul și fosforul sunt folosite ca dopanți de tipul N pentru diamant, iar fosforul, arsenicul și stibiul sunt folosite ca și dopanți pentru siliciu.



Structura cristalină din figura alăturată conține atomi având câte patru electroni în stratul de valență, formând câte patru legături covalente cu atomii adiacenți.

Aceasta este structura anticipată a materialului semiconductor. Adăugarea unui atom de fosfor cu cinci electroni în stratul de valență introduce un electron suplimentar în structura materialului, în comparație cu atomul

de siliciu (figura alăturată (b)). Impuritatea pentavalentă formează patru legături covalente cu patru atomi de siliciu cu ajutorul a patru electroni din cei cinci disponibili. Structura astfel formată va dispune de un electron liber, rămas de la atomul de fosfor, ce nu are o legătură foarte strânsă cu cristalul la fel cum au ceilalți electroni de siliciu, fiind liber să se deplaseze în cristal.

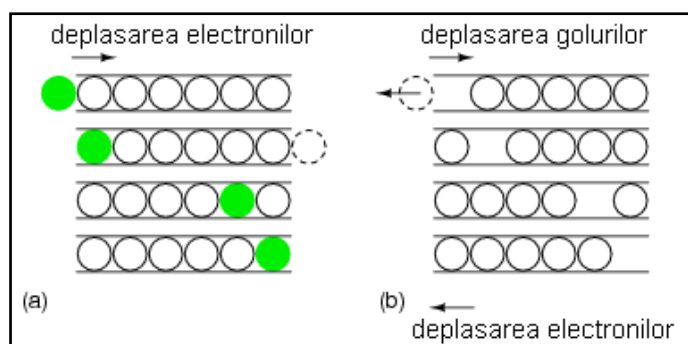
Din moment de am dopat semiconductorul cu un atom de fosfor la fiecare 10 milioane de atomi de siliciu, există relativ puțini electroni liberi creați prin dopaj, dacă facem o comparație cu numărul de atomi de siliciu prezenți în structură. Totuși, dacă facem o comparație între numărul de electroni liberi ai materialului dopat cu materialul pur, numărul de electroni liberi este relativ mare. Aplicarea unui câmp electric extern produce o conducție electrică puternică a materialului semiconductor dopat în banda de conducție. Un nivel de dopaj mai ridicat, produce o conducție și mai puternică. Astfel, un material conductor cu o conductivitate scăzută, a fost „transformat” într-un material conductor destul de bun.

## **Impuritatea acceptoare de tip P**

De asemenea, este posibilă introducerea unei purități cu trei electroni în stratul de valență, adică un electron în minus față de siliciu. Acest lucru duce la formarea unui gol, un purtător de sarcină pozitivă. Atomul de bor (B), ce are trei electroni pe stratul de valență, încearcă să realizeze patru legături covalente cu atomii de siliciu, iar pe parcursul acestui proces, cei trei electroni se vor deplasa încercând să formeze aceste legături (figura de mai sus (c)). Acesta lucru duce la impresia că golul se deplasează. Mai mult, atomul trivalent de bor poate împrumuta un electron de la un atom de siliciu adiacent (sau distant) pentru formarea celor patru legături covalente. Dar acest lucru înseamnă ca atomul de siliciu are un deficit de un electron. Cu alte cuvinte, golul s-a „deplasat” pe un atom de siliciu vecin.

Golurile se regăsesc în banda de valență, cu un nivel mai jos decât banda de conducție. Doparea cu un acceptor - un atom ce poate accepta un electron - crează o deficiență de electroni în structura materialului, sau un exces de goluri (cele două exprimări sunt echivalente). Din moment ce golurile sunt purtători de sarcină pozitivă, un dopant acceptor de electroni poartă numele de „dopant de tip P. Elementele dopante de tip P includ elementele din grupa IIIA a tabelului periodic: B (bor), Al (aluminiu), Ga (galiu) și In (indiu). Borul este folosit pe post de dopant pentru siliciu și diamant, iar indiul pentru germaniu.

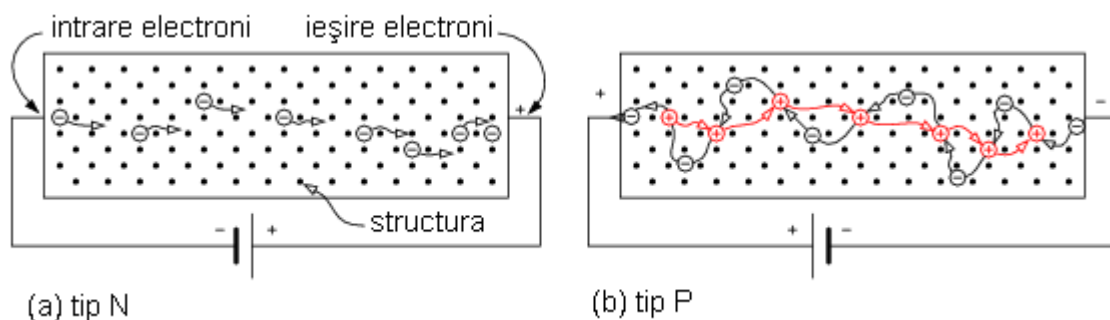
## **Deplasarea electronilor și a golurilor**



Există o strânsă legătură, în analogia „mărgelilor dintr-un tub”, între deplasarea golurilor și deplasarea electronilor. Mărgelile reprezintă electronii dintr-un conductor. Deplasarea electronilor de la stânga la dreapta într-un semiconductor de tip N se poate explica astfel: electronul intră în tub prin partea stângă și iese prin partea dreaptă. Deplasarea electronilor de tip N

are loc în banda de conducție. Putem compara această deplasare cu deplasarea golurilor în banda de valență.

Ceea ce trebuie înțeles este că electronii se deplasează în direcția contrară de deplasare a golurilor. Golurile nu sunt altceva decât absența electronilor din banda de valență, având prin urmare o sarcină pozitivă, sarcină datorată prezenței protonilor din nucleu, și de fapt aceasta este sarcina „imaginară” pe care o reprezentăm cu ajutorul golurilor.



Deplasarea electronilor (curent) într-un semiconductor de tip N este similară deplasării electronilor dintr-un conductor metalic. Atomii materialului dopant de tip N furnizează electroni pentru conducție. Acești electroni poartă numele de *purtători de sarcină majoritari*. Dacă aplicăm un câmp electric între două puncte ale unui material semiconductor, electronii intră prin partea negativă (-) a materialului, traversează structura acestuia și ies prin partea dreaptă (+), terminalul pozitiv al bateriei.

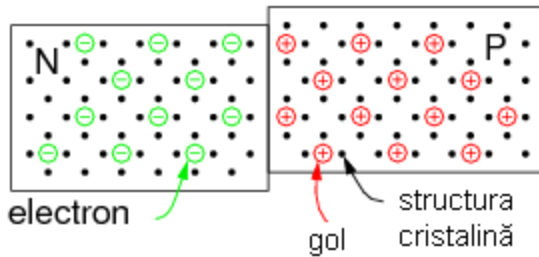
## 05. Joncțiunea P-N

- Joncțiunile PN sunt fabricate dintr-o bucată mono-cristalină de material semiconductor și conțin atât regiuni dopate cu materiale de tip P cât și regiuni dopate cu materiale de tip N, regiuni separate printr-o joncțiune
- Transferul electronilor de la materialul de tip N spre golurile materialului de tip P, produce o barieră de potențial în jurul joncțiunii. Valoarea acesteia este de 0,6-0,7 V pentru siliciu, dar poate varia în cazul altor semiconductoare
- Joncțiunea PN polarizată direct, conduce curent electric

- Joncțiunea PN polarizată invers, nu conduce aproape deloc curent

## Formarea joncțiunii PN

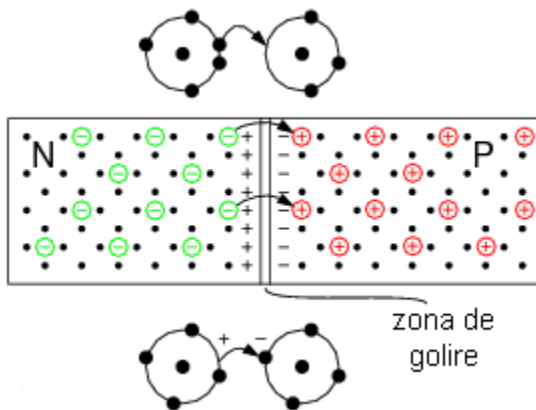
### Două blocuri distincte de material semiconductor



echilibrat de numărul de goluri în ambele blocuri. Astfel, niciunul dintre cele două blocuri nu are o sarcină netă.

Dacă un bloc de material semiconductor de tip P este adus în contact cu un bloc de material semiconductor de tip N (figura alăturată), rezultatul este nesatisfăcător. Vom avea două blocuri conductoare aflate în contact unul cu celălalt, dar fără proprietăți unice. Problema constă în existența a două corpuri cristaline distincte și separate. Numărul de electroni este

### Utilizarea unui singur cristal semiconductor



Totuși, dacă un singur cristal semiconductor este confecționat (dopat) cu un material de tip P la un capăt, și un material de tip N la celălalt capăt, combinația respectivă prezintă unele proprietăți unice. În materialul de tip P, majoritatea purtătorilor de sarcină sunt goluri, aceștia putându-se deplasa liberi prin structura cristalului. În materialul de tip N majoritatea purtătorilor de sarcină sunt electroni, și aceștia putându-se deplasa liberi prin structura cristalului. În jurul joncțiunii însă (intersecția dintre cele două tipuri de materiale), electronii

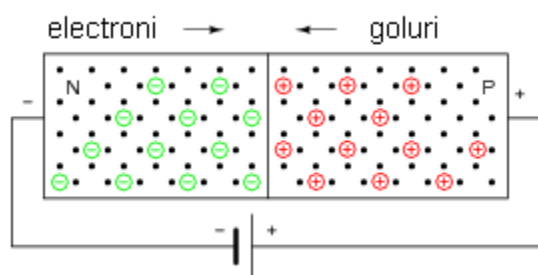
materialului N trec peste joncțiune și se combină cu golurile din materialul P (figura alăturată).

Regiunea materialului P din apropierea joncțiunii capătă o sarcină negativă datorită electronilor atrași, iar regiunea materialului N din apropierea joncțiunii capătă o sarcină pozitivă datorită electronilor cedați. Stratul subțire al acestei structuri cristaline, dintre cele două sarcini de semne contrare, va fi „golit” de majoritatea purtătorilor de sarcină, prin urmare, acesta este cunoscută sub numele de zona de golire, și devine un material semiconductor pur, non-conductor. De fapt, aproape că avem un material izolator ce separă cele două regiuni conductive P și N.

## Bariera de potențial

Această separare de sarcini în jurul joncțiunii P-N (zona de golire) constituie în fapt o barieră de potențial. Această barieră de potențial trebuie să fie „învingută” de o sursă de tensiune externă pentru a se putea comporta precum un material conductor. Formarea joncțiunii și a barierei de potențial are loc în timpul procesului de fabricație. „Înălțimea” barierei de potențial depinde de materialele folosite pentru fabricarea acestuia. Joncțiunile PN din siliciu au o barieră de potențial mai ridicată decât joncțiunile fabricate din germaniu.

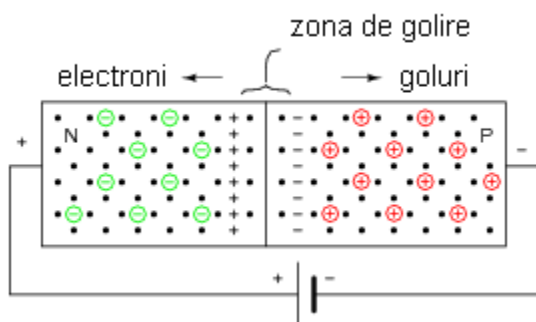
## Polarizarea directă a joncțiunii PN



În figura alăturată, bateria este poziționată astfel încât electronii să se deplaseze dinspre terminalul negativ înspre materialul de tip N. Acești electroni se adună în jurul joncțiunii. Terminalul pozitiv înlătură electronii din materialul semiconductor de tip P, ceea ce duce la crearea golurilor ce se îndreaptă și ele spre joncțiune.

Dacă tensiunea bateriei este suficient de mare pentru a depăși potențialul joncțiunii (0,6 V în cazul siliciului), electronii materialului N și golurile materialului P se combină și se anihilează reciproc. Acest lucru duce la crearea unui spațiu liber în structura materialului ce poate susține o deplasare și mai mare de purtători de sarcină spre joncțiune. Astfel, curenții purtătorilor de sarcină majoritari de tip N (electroni) și de tip P (goluri) se deplasează înspre joncțiune. Recombinarea ce are loc la joncțiune permite curentului bateriei să se „deplaseze” prin joncțiunea PN a unei astfel de diode. În acest caz, spunem că o astfel de joncțiune este polarizată direct.

## Polarizarea inversă a joncțiunii PN



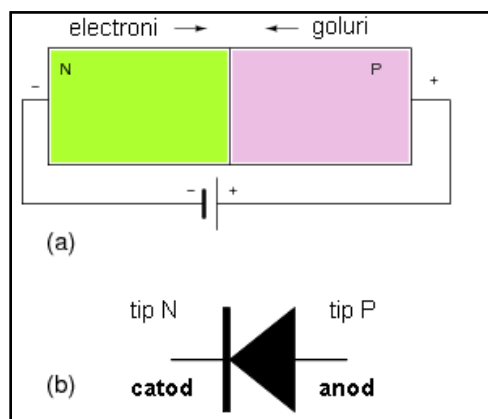
Dacă polaritatea bateriei este inversată (figura alăturată), majoritatea purtătorilor de sarcină vor fi atrași dinspre joncțiune spre terminalii bateriei. Terminalul pozitiv al bateriei atrage purtătorii de sarcină majoritari (electronii) ai materialului N, iar terminalul negativ al bateriei atrage purtătorii de sarcină majoritari (golurile) ai materialului P.

Acest fapt duce la creșterea grosimii zonei de golire non-conductive. Nu are loc nicio recombinație a purtătorilor de sarcină, prin urmare, nu are loc nicio conducție. În acest caz, spunem că joncțiunea PN este *polarizată invers*.

Ceea ce am creat mai sus prin doparea aceluiași cristal atât cu material de tip N cât și cu material de tip P, este o *diodă*.

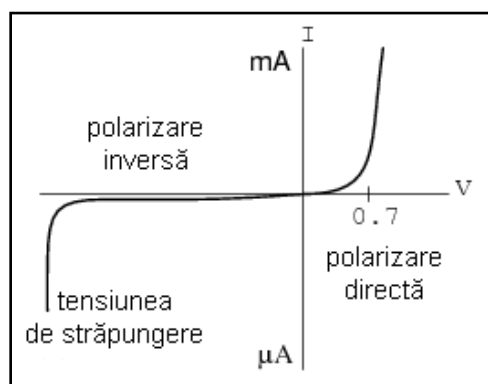
## 06. Dioda

### Definiția și simbolul diodei



După cum am precizat și în secțiunea precedentă, dioda este realizată prin introducerea de impurități de tip N și P în același cristal semiconductor. Simbolul schematic al diodei este prezentat în figura alăturată (b), și corespunde semiconductorului dopat de la (a). Dioda este un dispozitiv unidirecțional (vezi joncțiunea PN). Deplasarea electronilor se poate realiza doar într-o singură direcție, invers față de direcția săgeții, atunci când dioda (joncțiunea PN) este polarizată direct. Catodul, din reprezentarea diodei, reprezintă semiconductorului de tip N, iar anodul corespunde materialului dopat de tip P.

### Polarizarea directă a diodei



Dacă dioda este polarizată direct, curentul crește foarte puțin pe măsură ce tensiunea crește de la 0 V. În cazul în care materialul semiconductor din care este confecționată dioda este siliciu, curentul începe să crească doar după ce tensiunea atinge valoarea de 0,6 V. Dacă tensiunea crește peste valoarea de 0,6 V, valoarea curentului crește foarte rapid. O tensiune peste 0,7 V poate foarte ușor să ducă la distrugerea diodei. Această tensiune de „deschidere” a diodei în jurul valorii de 0,6 V, poartă numele de tensiune de polarizare directă a diodei. Sub această

valoare, dioda este „închisă”, și nu există curent pe la bornele acesteia.

Deși pentru siliciu tensiunea de polarizare directă este de 0,6-0,7 V, pentru germaniu aceasta este de 0,3 V, iar pentru LED-uri de câțiva volți. Curentul ce străbate dioda la polarizarea directă poartă numele de curent direct, iar acesta poate lua valori cuprinse între câțiva mA, până la sute sau mii de amperi pentru diodele de putere.

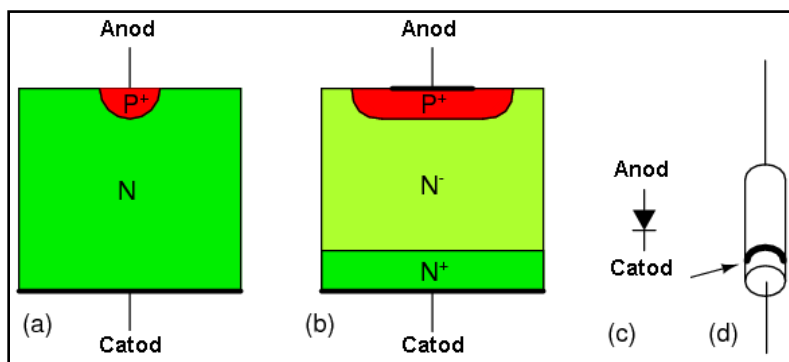
### Polarizarea inversă a diodei

Dacă dioda este polarizată invers, curentul invers va avea o valoare foarte mică, care în condițiile cele mai extreme poate ajunge la un maxim de  $1\ \mu\text{A}$  (figura de mai sus, stânga). Valoarea acestui curent nu crește semnificativ odată cu creșterea tensiunii de polarizare inversă, decât la atingerea punctului de străpungere. Când punctul de străpungere este atins, curentul prin diodă crește la o valoare atât de mare, încât poate duce la distrugerea diodei dacă nu există un rezistor serie pentru limitarea curentului prin diodă. De obicei se alege o diodă a cărei tensiune de străpungere este mai mare decât valoarea tensiunilor aplicate la bornele sale. Diodele din siliciu au de obicei tensiuni de străpungere de la 50, 100, 200, 400, 800 V sau chiar mai mare.

## Curentul de dispersie

Am menționat mai sus că există un curent de dispersie de sub un  $\mu\text{A}$ , pentru diodele de siliciu, la polarizarea inversă. Explicația constă în faptul că energia termică produce câteva perechi de electroni-găuri, ce duc la apariția unui curent de dispersie până la recombinare. Practic, acest curent previzibil este doar o parte a curentului de dispersie total. O mare parte a acestui curent se datorează conducției de suprafață datorită impurităților de la suprafața conductorului. Ambele tipuri de curenți de dispersie cresc odată cu creșterea temperaturii. În cazul germaniului, curentul de dispersie este de câteva ori mai mare decât în cazul siliciului.

## Dioda cu joncțiune



Deși la început, cea mai folosită diodă a fost dioda cu contact punctiform (figura alăturată (a)), majoritatea diodelor folosite astăzi sunt diode cu joncțiune (figura alăturată (b)). Deși joncțiunea PN din figură este puțin mai complexă decât o joncțiune normală, aceasta este tot o joncțiune PN.

Pornind de la catod,  $N^+$  indică faptul că această regiune este dopată puternic, și nu are legătură cu polaritatea. Acest lucru reduce rezistența serie a diodei. Regiunea  $N^-$  din nou, nu are nicio legătură cu polaritatea, ci indică faptul că această regiune este mai puțin dopată, ceea ce duce la o diodă a cărei tensiune de străpungere inversă este mult mai mare, lucru important pentru diodele de putere folosite în redresare.

## Observații



Diodele de puteri mai mici, chiar și redresoarele de putere de tensiuni mai mici, vor avea pierderi de polarizare directă mult mai mici datorită dopajului mai puternic. Cel mai mare nivel de dopaj este folosit pentru diodele Zener, proiectate pentru tensiuni de străpungeri mici. Totuși, un dopaj puternic duce la creșterea curentului invers de dispersie. Regiunea  $P^+$  de la anod, reprezintă un material semiconductor, puternic dopat, de tip P, o foarte bună strategie pentru realizarea contactului. Diodele de joncțiune mici, încapsulate în sticlă, pot conduce curenți de ordinul zecilor sau sutelor de mA. Diodele de putere redresoare, încapsulate în plastic sau ceramică, pot conduce curenți de ordinul miilor de amperi.

## 07. Tranzistorul bipolar cu joncțiune (BJT)

- Tranzistorii bipolari conduc curentul folosind ca purtători de sarcină atât electroni cât și goluri în cadrul aceluiași circuit. De aici și denumirea de „bipolar”
- Funcționarea corectă a unui tranzistor bipolar ca și amplificator de curent necesită polarizarea inversă a joncțiunii colector-bază și polarizarea directă a joncțiunii emitor-bază
- Amplificarea în curent a tranzistorului este exprimată prin relația  $\beta = I_C / I_B$ , iar valoarea ei este de la 100 la 300 pentru tranzistorii mici

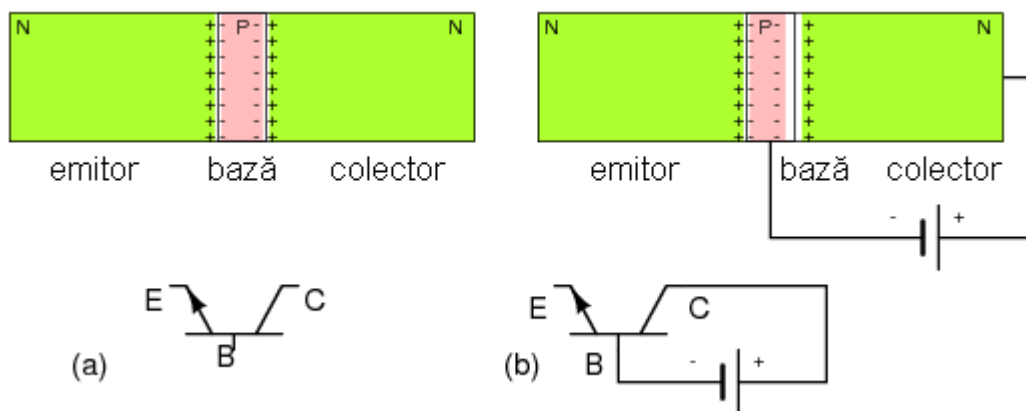
### Scurt istoric

Primul tranzistor bipolar a fost inventat la „Bell Labs” de către William Shockley, Walter Brattain, și John Bardeen în 1948 (de fapt, 1947, dar invenția a fost publicată doar în 1948). Pentru această descoperire, cei trei au fost recompensați cu premiul Nobel pentru fizică în anul 1956.

### Definiția tranzistorului

Tranzistorul bipolar cu joncțiune este un semiconductor format din trei straturi, două de tip N și unul de tip P (NPN). Contactele celor trei straturi poartă numele de *emitor* și *colector* pentru semiconductorii de tip N, și *bază* pentru semiconductorul de tip P. Configurația este asemănătoare unei diode, doar că mai există un strat N în plus. Stratul din mijloc însă, baza, trebuie să fie cât mai subțire cu putință, fără a afecta suprafețele celorlalte două straturi, emitorul și colectorul.

### Structura tranzistorului

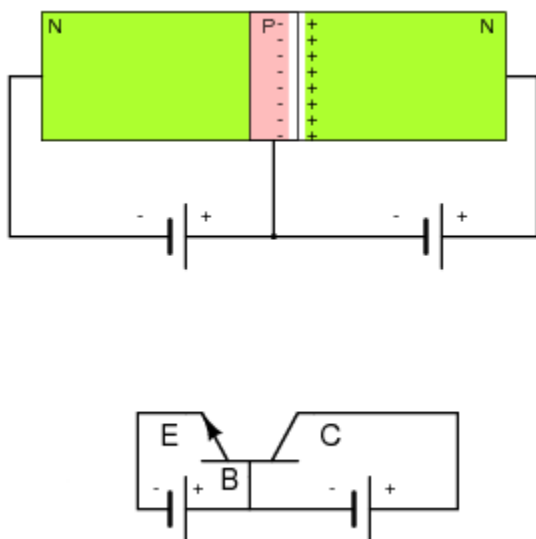


Dispozitivul din figura de sus este format din două joncțiuni, una între emitor și bază, iar cealaltă între bază și colector, aceste joncțiuni formând două zone de golire.

### Polarizarea joncțiunii bază-colector

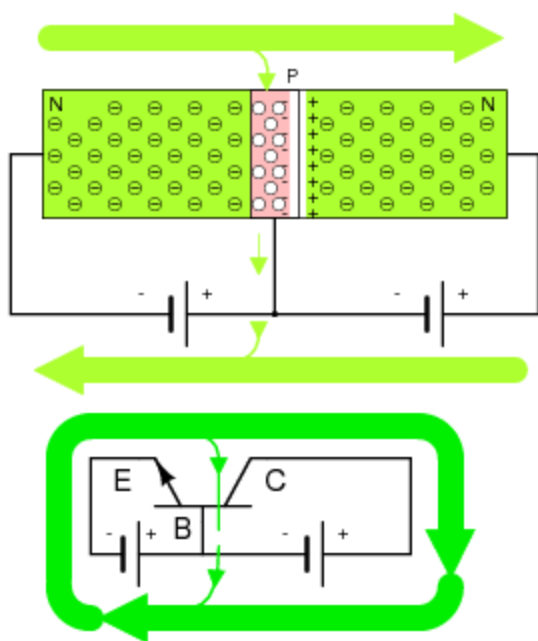
În mod normal, joncțiunea bază-colector a tranzistorului este polarizată invers (b). Acest lucru duce la creșterea regiunii de golire. Această tensiune poate fi de câțiva volți până la zeci de volți pentru majoritatea tranzistorilor. În acest caz, nu există curent în circuitul colectorului, exceptând curentul de dispersie de o valoare foarte mică.

### Polarizarea joncțiunii emitor-bază



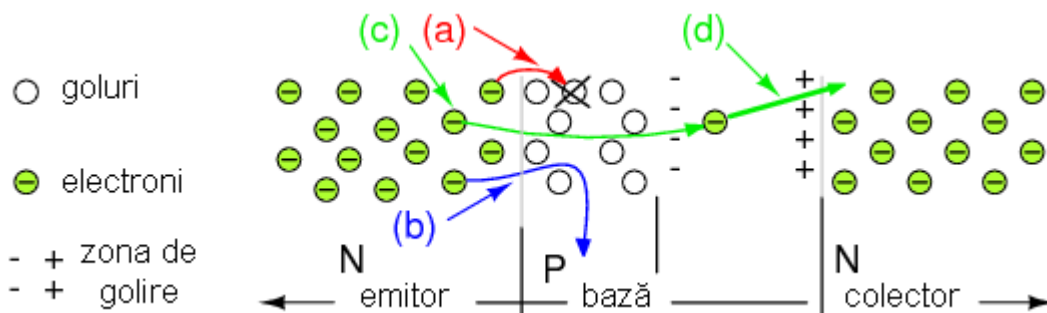
Putem adăuga o sursă de tensiune și în circuitul emitor-bază al tranzistorului (figura alăturată). În mod normal, joncțiunea emitor-bază este polarizată direct, în încercarea de depășire a barierei de potențial de aproximativ 0,6 V. Acest lucru este similar polarizării directe a joncțiunii diodei. Tensiunea acestei surse trebuie să depășească valoarea de 0,6 V pentru ca majoritatea purtătorilor de sarcină (electroni pentru NPN) să treacă din emitor spre bază, devenind purtători de sarcină minoritari în semiconductorul de tip P.

Dacă regiunea bazei ar fi mult mai mare, ca și în cazul poziționării spate-în-spate a două diode, tot curentul ce intră în bază prin emitor, ar ieși prin contactul bazei spre borna pozitivă a bateriei.



Totuși, tranzistoarele sunt confecționate cu o bază foarte subțire. O mică parte a purtătorilor de sarcină majoritari din emitor, injectați ca și purtători de sarcină minoritari în bază, se recombina cu golurile acesteia (figura alăturată). De asemenea, o mică parte a electronilor ce intră în bază pe la emitor trec direct prin bază spre borna pozitivă a bateriei. Dar majoritatea curentului din emitor trece prin suprafață subțire a bazei direct în colector. Mai mult, modificarea curentului mic al bazei duce la modificări importante ale curentului din colector. Dacă tensiunea bazei scade sub aproximativ 0.6 V, curentul emitor-colector scade la zero.

## Explicație



Să privim însă mai îndeaproape la acest mecanism de amplificare al curentului. Considerăm o joncțiune NPN mărită, cu accentul pus pe bază. Chiar dacă nu sunt prezentate în figură, presupunem că joncțiunea emitor-bază este polarizată direct de o sursă de tensiune, iar joncțiunea bază-colector este polarizată invers. Electronii, purtătorii de sarcină majoritari, intră în emitor de la borna negativă a bateriei. Deplasarea electronilor dinspre bază corespunde cu deplasarea acestor dinspre bază spre borna pozitivă a bateriei. Acesta este un curent foarte mic față de curentul din emitor.

Majoritatea purtătorilor de sarcină în emitorul de tip N sunt electronii, ce devin purtători de sarcină minoritară la intrarea în baza de tip P. Acești electroni au patru posibilități după ce intră în baza de tip P. O mică parte „cad” în goluri (figura de sus (a)), lucru ce contribuie la curentul înspre terminalul pozitiv al bateriei. Deși nu este reprezentat pe figură, golurile pot trece din bază spre emitor, unde se recombina cu electronii, contribuind și aceștia la curentul bazei. O altă mică parte din electroni (b) trec direct prin bază înspre terminalul pozitiv al bateriei, ca și cum baza ar fi un rezistor. Atât (a) cât și (b) contribuie curentului foarte mic al bazei. Curentul bazei este

aproximativ 1% din curentul emitor-colector, pentru tranzistoarele mici. Majoritatea electronilor din emitor însă (c), trec direct prin zona îngustă de golire, înspre colector.

Putem observa polaritatea zonei de golire ce înconjoară electronul (d). Câmpul electric intens „trage” electronul rapid în colector. Puterea câmpului electric este direct proporțională cu tensiunea de alimentare a bateriei. astfel, 99% din curentul emitorului trece în colector. Această „trecere” este însă controlată de curentul bazei, ce reprezintă aproximativ 1% din curentul emitorului. Acest lucru reprezintă o amplificare de curent de 99, reprezentat de raportul dintre curentul colectorului și curentul bazei ( $I_C/I_B$ ), cunoscut și ca  $\beta$ .

Difuzia electronilor emitorului prin bază și înspre colector este posibilă doar dacă baza este foarte subțire. Ce s-ar întâmpla cu acești purtători de sarcină dacă baza ar fi de 100 de ori mai groasă? Este foarte posibil ca majoritatea dintre ei, 99% în loc de 1%, să cadă în goluri, nemaiajungând la colector. Prin urmare, curentul de bază poate controla 99% din curentul emitorului, doar dacă 99% din curentul emitorului trece înspre colector. Dacă întreg curentul iese pe la bază, controlul nu este posibil.

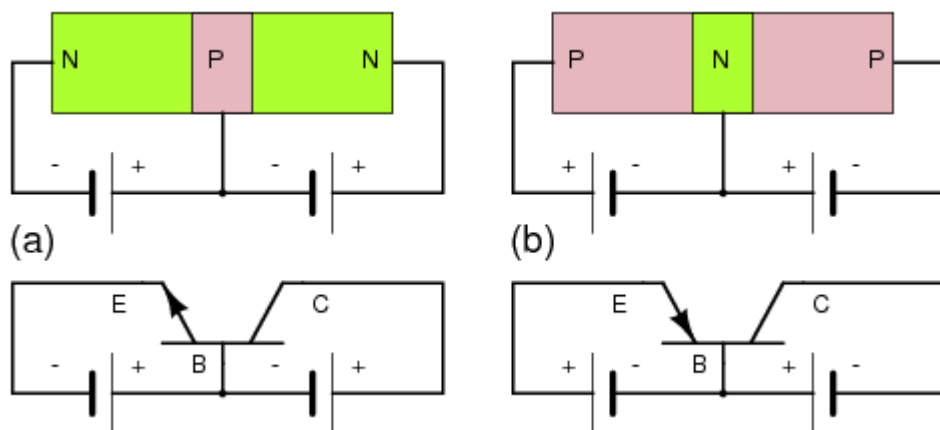
Un alt motiv pentru care 99% dintre electroni trec din emitor, peste bariera de potențial și în colector, este că joncțiunile bipolare reale folosesc un emitor mic dopat puternic. Concentrația mare a electronilor din emitor forțează trecerea acestora în bază. Concentrația mică a dopajului din bază înseamnă că există mult mai puține goluri ce trec în emitor (lucru ce doar ar crește curentul bazei). Difuzia purtătorilor de sarcină dintre emitor spre bază, este puternic favorizată.

## **Eficiența emitorului**

Faptul că baza este subțire iar emitorul puternic dopat, țin foarte sus eficiența emitorului, 99% de exemplu. Acest lucru corespunde ramificației curentului emitorului de 100% în 1% bază și 99% colector. Eficiența emitorului se exprimă astfel:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

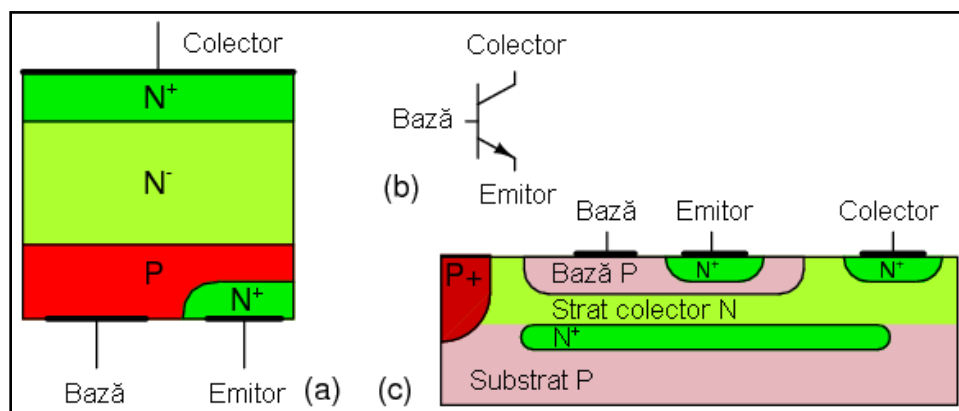
## **Joncțiunea PNP**



Tranzistoarele bipolare pot fi confecționate și sub forma PNP. Diferența dintre PNP și NPN poate fi văzută în figura de sus.

Diferența constă în polaritatea joncțiunilor bază-emitor, polaritate semnalată cu ajutorul săgeții emitorului în simbolul tranzistorului. Direcția săgeții este asemenea direcției anodului joncțiunii unei diode, împotriva sensului real de deplasare al electronilor. Pentru tranzistorii NPN, direcția săgeții este dinspre bază spre emitor, iar în cazul tranzistorilor PNP, direcția este dinspre emitor spre bază. Colectorul nu este reprezentat în niciunul dintre cazuri cu ajutorul vreunei săgeți. Totuși, polaritatea joncțiunii bază-colector este aceeași cu polaritatea joncțiunii bază-emitor în comparație cu o diodă.

## Structura



Emitorul tranzistorului bipolar cu joncțiune de mai jos este puternic dopat, după cum indică și notația  $N^+$ . Baza are un nivel de dopaj P normal, dar aceasta este mult mai subțire în realitate decât este prezentat în această figură (a).

Procentul de dopaj al colectorului este scăzut, după cum indică notația  $N^-$ , pentru ca tensiunea de străpungere a joncțiunii colector-bază să fie cât mai mare, ceea ce înseamnă că sursa de tensiune poate alimenta tranzistorul la tensiuni mai mari. Tranzistoarele de siliciu mici, au o tensiune de străpungere de 60-80 V, dar aceasta poate ajunge la sute de volți pentru tranzistoarele de tensiune înaltă. Dar, colectorul trebuie să fie în același timp dopat puternic pentru minimizarea pierderilor ohmice (datorită rezistențelor), în cazul în care tranzistorul trebuie să conducă curenți mari. Îndeplinirea acestor cerințe contradictorii se realizează prin doparea mai puternică a

colectorului spre partea de contact metalic, și doparea mai ușoară a colectorului în apropierea bazei în comparație cu emitorul. Tensiunea de străpungere a joncțiunii emitor-bază scade până la aproximativ 7 V datorită dopării puternice a emitorului, în cazul tranzistorilor mici. Și tot datorită acestei dopări puternice, joncțiunea emitor-bază se comportă precum o diodă Zener polarizată invers.

Fabricarea mai multor tranzistoare pe același cip dă naștere unui circuit integrat, o reprezentare aproximativă a acestuia este dată în figura de mai sus (c).

## **Observație**

Calitatea tranzistorilor discreți de tip PNP este aproape la fel de bună precum cea a tranzistorilor NPN. Totuși, tranzistorii PNP integrați nu sunt la fel de buni precum cei de tipul NPN, prin urmare, circuitele integrate folosesc tranzistori de tipul NPN în marea lor majoritate.

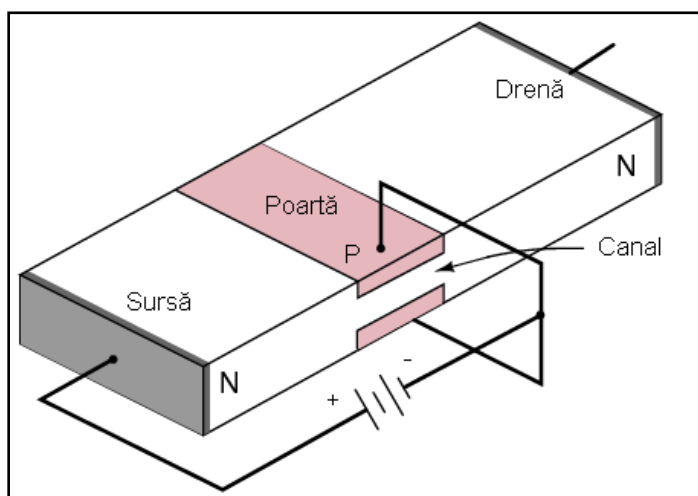
## **08. Tranzistorul cu efect de câmp (FET)**

- Conducția canalului unui tranzistor (unipolar) cu efect de câmp (FET sau JFET) se datorează unui singur tip de purtător de sarcină
- Sursa, poarta și drena unui JFET corespund emitorului, bazei și colectorului unui tranzistor bipolar
- Polarizarea inversă a porții duce la variația rezistenței canalului prin extinderea zonei de golire

## **Scurt istoric**

Tranzistorul cu efect de câmp a fost propus de Julius Liliendfel în 1926 și 1933 sub formă de patent. Shockley, Brattain și Bardeen au investigat și ei tranzistorul cu efect de câmp în 1947, dar dificultățile întâmpinate în realizarea acestuia i-au dus în schimb la dezvoltarea tranzistorului bipolar. Teoria tranzistorului cu efect de câmp a lui Shockley a fost publicată în 1952, dar tehnologia de procesare a materialelor nu era suficient de bine dezvoltată, astfel că doar în anul 1960 s-a reușit fabricarea unui dispozitiv funcțional de către John Atalla.

## **Definiție**

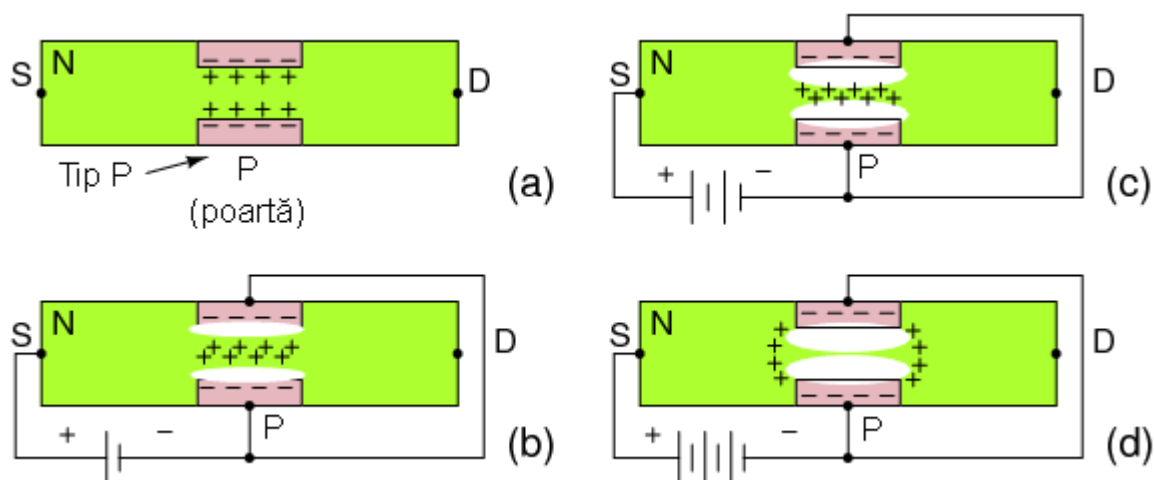


Un tranzistor cu efect de câmp (FET - field effect transistor), este un dispozitiv unipolar, ceea ce înseamnă că existența curentului depinde de un singur tip de purtători de sarcină. Dacă dispozitivul se bazează pe un material semiconductor de tip N, purtătorii de sarcină sunt electronii. Invers, pentru unul de tip P, purtătorii de sarcină sunt golurile.

## Modul de funcționare

La nivelul circuitului, funcționarea tranzistorilor cu efect de câmp este simplă. O tensiune aplicată pe poartă, elementul de intrare, controlează rezistența unei regiuni unipolare dintre sursă și drenă denumită canal; într-un dispozitiv de tip N, această regiune este reprezentată de un material semiconductor dopat de tip  $N^-$ , cu terminale la ambele capete. Sursa și drena sunt terminale echivalente cu emitorul și colectorul într-un tranzistor bipolar. Cu alte cuvinte, sursa este locul de plecare al purtătorilor de sarcină, iar drena este locul înspre care aceștia se deplasează. Poarta este echivalentă bazei tranzistorului bipolar, iar în cadrul unui dispozitiv de tip N, este reprezentată de o regiune de tip  $P^+$  (dopată puternic) prezentă pe ambele laturi și în jurul canalului din centrul semiconductorului.

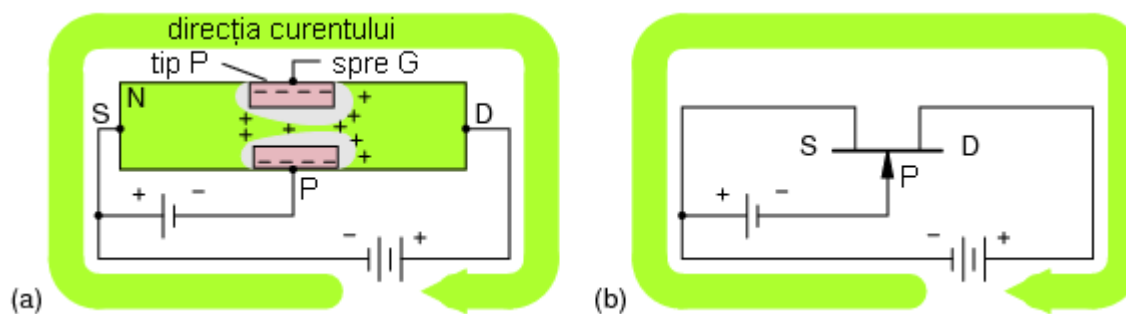
În figura de mai sus, este prezentat un tranzistor cu efect de câmp cu joncțiune (JFET). Poarta constituie o joncțiune, și este polarizată invers pentru funcționarea corectă a dispozitivului. Curentul dintre sursă și drenă poate exista în ambele direcții.



În figura alăturată este reprezentată zona de golire a joncțiunii porții, datorită difuziei golurilor din regiunea de tip P (poartă) în regiunea de tip N (canal). Această difuzie duce la separarea purtătorilor de sarcină în zona joncțiunii și o zonă de golire non-conductivă la joncțiune.

Grosimea zonei de golire poate fi crescută prin aplicarea unei tensiuni moderate de polarizare inversă (figura de mai sus(b)). Acest lucru duce la creșterea rezistenței canalului sursă-drenă prin îngustarea acestuia. Creșterea în continuare a tensiunii de polarizare inversă duce la creșterea zonei de golire, scăderea grosimii canalului și creșterea rezistenței acestuia (c). Peste un anumit nivel (d), tensiunea de polarizare inversă,  $V_{GS}$  va bloca curentul prin canal, rezistența acestuia fiind foarte mare. Tensiunea de blocare,  $V_p$  este de câțiva volți în majoritatea cazurilor. Pe scurt, rezistența canalului sursă-drenă poate fi controlat cu ajutorul valorii de polarizarea inversă a porții.

Sursa și drena sunt interschimbabile, ceea ce înseamnă că există posibilitatea deplasării electronilor în oricare dintre direcții pentru o tensiune mică a bateriei drenei (0,6 V). Cu alte cuvinte, bateria drenei poate fi înlocuită cu o sursă de tensiune scăzută în curent alternativ.



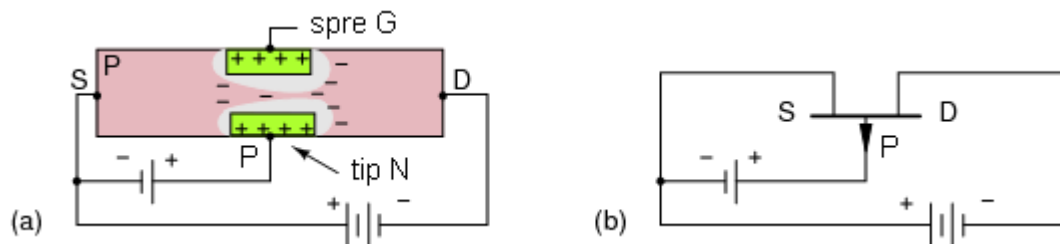
Pentru valori mai mari ale tensiunii drenei, de ordinul zecilor de volți pentru dispozitive mici, polaritatea alimentării este cea prezentată în figura alăturată (a). Atenție, în unele cărți de specialitate, poarta (P) mai este denumită și grilă (G), sau cele două notații sunt folosite chiar concomitent. Am ales în această carte să rămânem la denumirea de poartă, iar aceasta este notată corespunzător pe desene cu P. În orice caz, cele două exprimări sunt echivalente.

Această sursă de tensiune a drenei, ce nu este prezentă în figurile precedente, distorsionează zona de golire, măbind-o înspre partea drenei. Aceasta este o reprezentare mult mai corectă a tensiunilor de curent continuu ale drenei, de la câțiva volți la zeci de volți. Pe măsură ce tensiunea drenă-sursă ( $U_{DS}$ ) crește, zona de golire dinspre drenă crește spre această. Acest lucru duce și la creșterea lungimii canalului, cu efecte asupra rezistenței (crește) acestuia. Totuși, această creștere a rezistenței datorată creșterii lungimii canalului este foarte mică în comparație cu rezistența datorată polarizării inverse a porții. În figura de mai sus (b) este prezentat și simbolul schematic al unui tranzistor cu efect de câmp cu canal de tip N. Săgeata porții indică aceeași direcție ca și joncțiunea diodei, și corespunde regiunii de tip P. Celelalte două extremități (S și D), ce nu conțin nicio direcție, corespund materialului semiconductor de tip N.



În figura de mai sus este reprezentată și direcția curentului de la terminalul (-) a bateriei spre sursă (S), apoi spre drenă (D) și înspre terminalul (+) al bateriei. Acest curent poate fi controlat prin variația tensiunii de polarizare inversă a porții (P). O sarcină conectată în serie cu bateria „vede” o versiune amplificată a variației tensiunii de pe poartă.

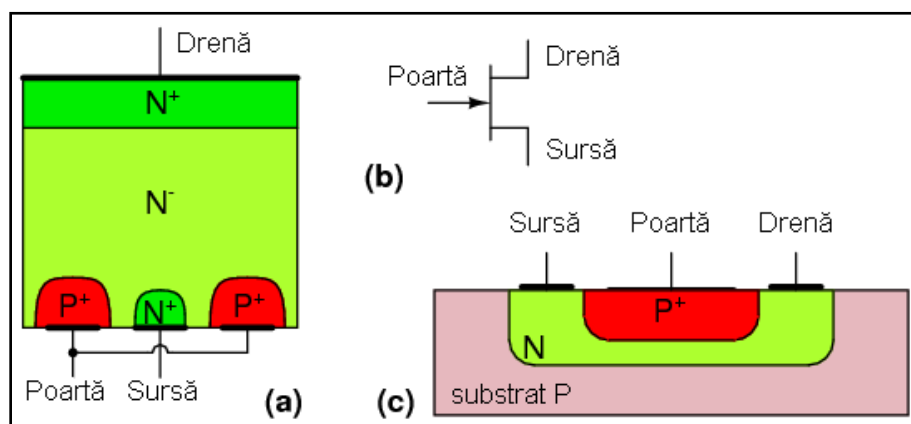
## Tranzistorul cu efect de câmp cu canal de tip P



Tranzistoarele cu efect de câmp pot fi realizate și cu canal de tip P, ceea ce înseamnă că poarta este realizată dintr-un material semiconductor dopat de tip  $N^+$  (dopat puternic). Toate sursele de tensiune sunt inversate într-un circuit cu JFET de tip P față de cel cu canal de tip N (figura alăturată (a)). Săgeata în acest caz este îndreptată dinspre poartă înspre sursa de polarizare inversă (figura alăturată (b)).

Modul de funcționare este asemănător tranzistorului cu efect de câmp cu canal de tip N prezentat mai sus.

## Confecționarea tranzistoarelor cu efect de câmp



Dispozitivele discrete sunt confecționate conform figurii alăturată (a), iar circuitele integrate cu tranzistoare cu efect de câmp, sunt confecționate conform figurii alăturată (b).

Poarta este dopată puternic,  $P^+$ , pentru obținerea unei zone de golire cât mai mari. Sursa și drenea acestui dispozitiv de tip N sunt și ele dopate puternic,  $N^+$ , pentru obținerea unei rezistențe de conexiune cât mai mici. Totuși, canalul din jurul porții este dopat ușor,  $N^-$ , pentru a permite trecerea golurilor dinspre poartă înspre canal.

## Observație

Curățenia este absolut necesară în cazul producerii tranzistorilor cu efect de câmp. Deși este posibilă producerea tranzistorilor bipolari în afara unui spațiu perfect curat, nu același lucru se poate spune și despre cei cu efect de câmp. Tranzistorul cu efect de câmp este mult mai simplu din punct de vedere conceptual decât cel bipolar, dar este foarte greu de produs.

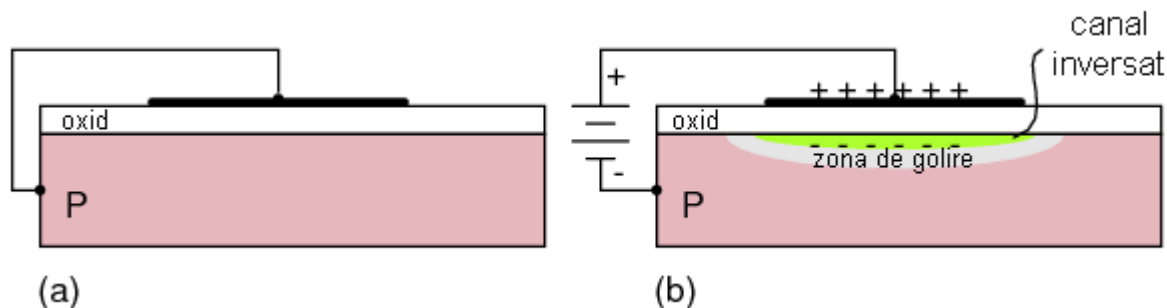
## 09. Tranzistorul cu efect de câmp cu poartă izolată (MOSFET)

- MOSFET-urile sunt dispozitive unipolare, precum FET-urile sau BJT-urile
- MOSFET-ul este un dispozitiv controlat în tensiune, precum FET-ul. O tensiune de intrare pe poartă controlează curentul dinspre sursă spre drenă
- Poarta MOSFET-ului nu necesită prezența unui curent în timpul funcționării, ci doar prezența unui curent inițial pentru încărcarea „condensatorului”

### Definiție

Tranzistorul cu efect de câmp cu poartă izolată (IGFET), cunoscut și sub numele de „tranzistor cu efect de câmp cu metal oxid” (MOSFET), este un dispozitiv derivat al tranzistorului cu efect de câmp (FET). În prezent, majoritatea tranzistorilor folosiți în circuitele integrate sunt de acest tip, cu toate că tranzistorii bipolari cu joncțiune (BJT) discreți sunt mult mai numeroși decât dispozitivele discrete de tip MOSFET. Numărul de tranzistori MOSFET dintr-un circuit integrat poate ajunge la câteva sute de milioane. Dimensiunea unui MOSFET individual este sub un micron.

### Structura și modul de funcționare

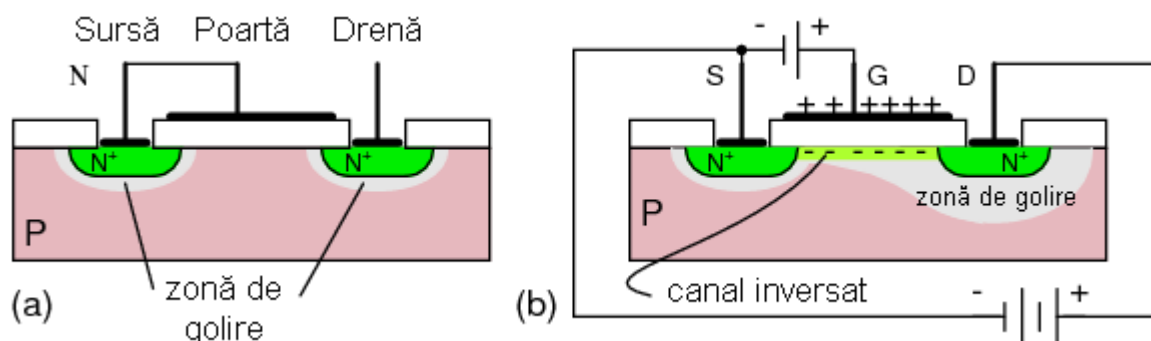


Sursa, poarta și drena sunt asemănătoare cu cele de la FET-uri. Totuși, contactul porții nu realizează o conexiune directă cu materialul semiconductor, cum era cazul FET-urilor. Poarta unui MOSFET reprezintă un strat

metalic sau de poli-siliciu așezat peste un strat de dioxid de siliciu ( $\text{SiO}_2$ ) izolator. Poarta seamănă foarte mult cu un condensator de tip MOS.

La polarizare, polaritatea armăturilor condensatorului va deveni cea a terminalilor bateriei. Armătura inferioară, de tip P formează un canal inversat datorită excesului de electroni din apropierea oxidului format prin respingerea electronilor terminalului negativ al bateriei înspre oxid și atragerea acestora spre armătura pozitivă. Acest canal duce și la formarea unei zone de golire ce izolează canalul de restul substratului de siliciu.

## Polarizarea directă

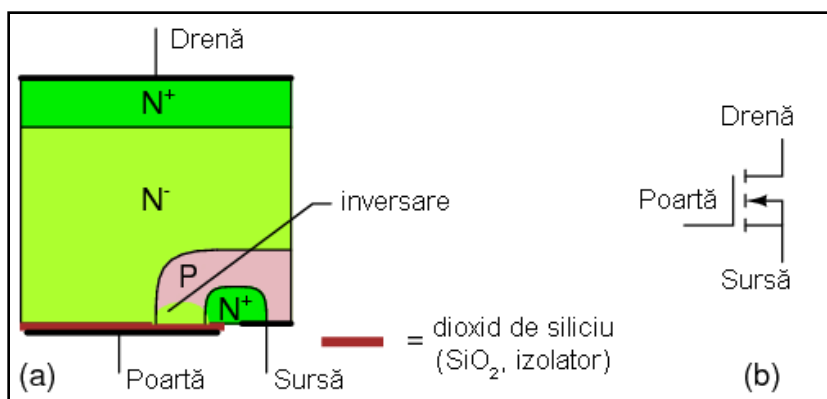


În figura alăturată, un condensator de tip MOS este plasat între o pereche de material semiconductor de tip N aflată într-un substrat de tip P. Când nu există sarcină pe condensator (a), poarta nu este polarizată, iar sursa, drenă și cele două regiuni de tip N rămân izolate din punct de vedere electric.

Aplicarea unei polarizări directe duce la încărcarea condensatorului (porții) (figura de mai sus (b)). Poarta de deasupra stratului de oxid se încarcă pozitiv de la baterie. Substratul de tip P de sub poartă se încarcă negativ. Sub poarta oxidului se va forma o regiune inversată cu un exces de electroni. Această regiune conectează sursa și drenă de tip N, formând o regiune continuă de tip N între cele două. astfel, MOSFET-ul, ca și FET-ul, este un dispozitiv unipolar. Doar un singur tip de purtător de sarcină este responsabil pentru conducție. Exemplul de mai sus este un MOSFET cu canal de tip N. Conducția unui curent mare este posibilă prin aplicarea unei tensiuni între sursă și drenă. Un circuit practic ar avea conectată o sarcină în serie cu bateria drenei.

MOSFET-ul, ca și FET-ul, este un dispozitiv controlat în tensiune. O tensiune aplicată porții controlează curentul dinspre sursă spre drenă. Poarta nu necesită un curent permanent, ci are nevoie doar de un curent inițial pentru încărcarea condensatorului porții.

## Modul de confecționare

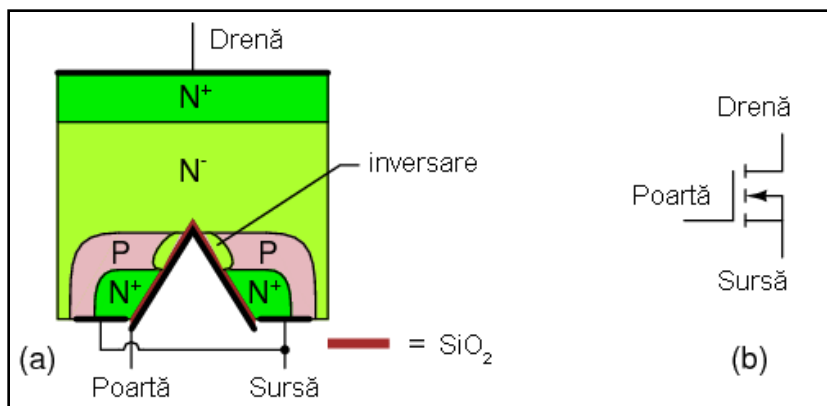


Secțiunea transversală a unui MOSFET de tip N este prezentată în figura alăturată (a). Sursa și drena sunt dopate puternic,  $N^+$ , pentru reducerea pierderilor rezistive datorită curenților dinspre sursă spre drenă.  $N^-$  indică o regiune cu dopaj scăzut. Regiunea P de sub poartă, aflată între sursă și drenă, poate fi inversată prin aplicarea

unei tensiuni de polarizare directă. Simbolul MOSFET-ului este reprezentat în figura alăturată (b).

MOSFET-urile sunt dispozitive cu patru terminale: sursă, poartă, drenă și substrat. Substratul este conectat la sursă în cazul MOSFET-urilor discrete, astfel încât dispozitivul final are doar trei terminale. MOSFET-urile realizate într-un circuit integrat au un substrat comun tuturor dispozitivelor. Această conexiune comună se regăsește de obicei la ieșirea cipului și se conectează la împământare sau la o sursă de tensiune.

### Alte variante ale MOSFET-ului



O altă variantă a MOSFET-ului, V-MOS, este de fapt un MOSFET de putere îmbunătățit, și este prezentat în figura alăturată. O altă variantă, similară, U-MOS, este mult mai ușor de produs.

## 10. Tiristorul

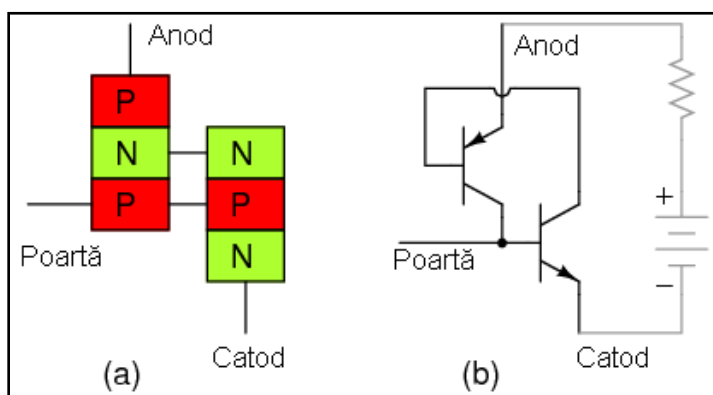
- Redresoarele controlate pe bază de siliciu (SCR) sunt cele mai des întâlnite dispozitive din familia tiristoarelor
- „Pornirea” conducției SCR-ului se realizează prin aplicarea unui impuls pozitiv porții. Conducția continuă chiar și după ce impulsul asupra porții încetează. Conducția poate fi oprită doar dacă tensiunea dintre anod și catod atinge valoarea zero
- SCR sunt folosite de obicei cu surse de tensiune de curent alternativ (sau de curent continuu pulsatoriu) datorită conducției continue
- Un dispozitiv GTO poate fi oprit prin aplicarea unui puls negativ asupra porții

## Definiție și clasificare

Tiristoarele reprezintă o plajă largă de dispozitive semiconductoare bipolare folosind patru (sau mai multe) straturi alternante N-P-N-P. În categoria tiristoarelor intră: redresoare controlate pe bază de siliciu (SCR), TRIAC-uri, DIAC-uri, tiristoare tip GTO, tranzistoare uni-joncțiune (UJT), tranzistoare uni-joncțiune programabile (PUT). Vom analiza aici doar SCR-ul, deși vom menționa și GTO-ul.

Tiristorul cu patru straturi a fost propus de Shockley în 1950, deși practic, acesta a fost construit mulți ani mai târziu de către General Electric. Puterile suportate de SCR ajung până la ordinul MW.

## Structura și modul de funcționare

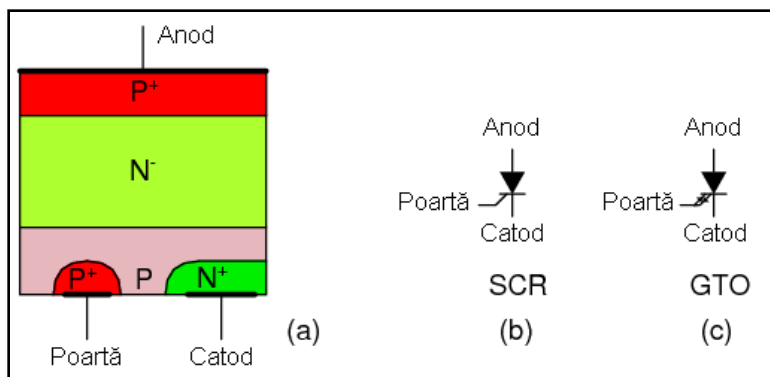


Redresorul controlat pe bază de siliciu este o diodă cu patru straturi și o poartă, asemenea figurii alăturată (a).

Dacă este „pornit”, acesta se comportă precum o diodă, pentru o singură polaritate a curentului. Dacă nu este „pornit”, nu conduce curent. Modul de funcționare poate fi explicat cu ajutorul conexiunii echivalente realizate din tranzistoare bipolare cu joncțiune din figura (b).

Un semnal de pornire pozitiv este aplicat între poartă și catod. Tranzistorul NPN echivalent va începe să conducă curent ceea ce va duce și la declanșarea conducției tranzistorului PNP. În acest moment, tranzistorul NPN va conduce curent chiar și în absența semnalului pe poartă, Odată ce un dispozitiv SCR începe să conducă, o va face atâta timp cât este prezentă o tensiune pe anod (infinat, în cazul circuitului cu baterie de mai sus).

## Modul de confecționare



Catodul unui SCR, ce corespunde emitorului echivalent al tranzistorului NPN este puternic dopat,  $N^+$ . Anodul, ce corespunde emitorului echivalent al tranzistorului PNP, este și el puternic dopat,  $P^+$ . Celelalte două regiuni din mijloc, ce corespund bazei și colectorului tranzistoarelor echivalente, sunt dopate mai ușor,  $N^-$  și  $P$  (figura alăturată (a)). Simbolurile

tiristoarelor SCR și GTO sunt prezentate de asemenea în figura alăturată ((b) respectiv (c)).

## 03 - Dioda și redresorul

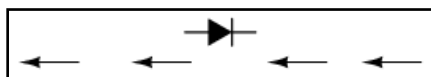
### 1. Principiul de funcționare al diodei

- Dioda este un component electric ce se comportă precum o valvă uni-direcțională de curent
- Spunem că dioda este polarizată direct atunci când aceasta permite trecerea curentului prin diodă
- Spunem că dioda este polarizată invers atunci când trecerea curentului prin diodă este blocată
- Căderea de tensiune la bornele unei diode polarizate direct poartă numele de tensiune de polarizare directă, și este de 0,7 V pentru diodele din siliciu și 0,3 V pentru cele din germaniu. Această tensiune variază foarte puțin pentru diferite valori ale curentului și temperaturii
- Tensiunea de polarizare inversă maximă pe care o poate suporta o diodă fără apariția fenomenului de „străpungere” ce duce inevitabil la distrugerea acesteia, se numește tensiune de străpungere,  $V_s$

### Definiția diodei

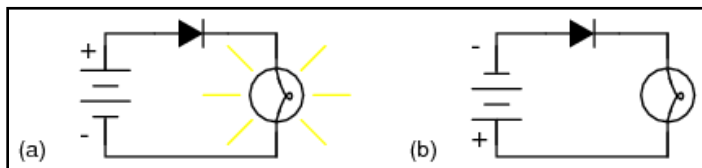
Dioda este un dispozitiv electronic ce permite trecerea curentului doar într-o singură direcție. Cea mai folosită diodă în circuitele electronice este cea semiconductoare, deși există și alte tehnologii.

### Simbolul diodei



Simbolul diodelor semiconductoare este prezentat în figura alăturată; săgețile indică deplasarea reală a electronilor prin diodă.

### Conectarea în circuit



La conectarea într-un circuit simplu, format dintr-o baterie și o lampă, dioda fie va permite trecerea curentului spre lampă, fie o va bloca, în funcție de polaritatea tensiunii aplicate.

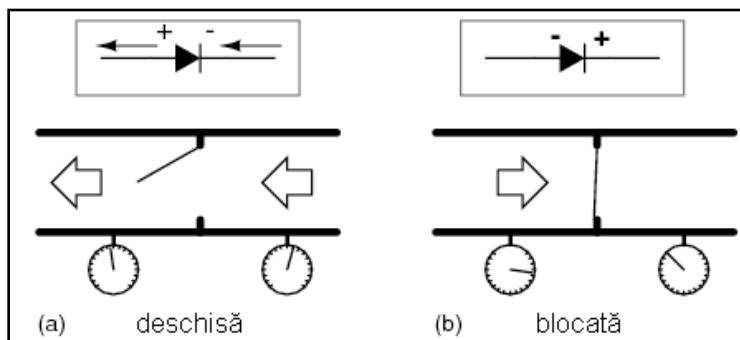
### Polarizarea directă

Atunci când polaritatea bateriei este astfel încât este permisă trecerea electronilor prin diodă, spunem că dioda este polarizată direct.

## Polarizarea inversă

Învers, când trecerea electronilor este blocată datorită inversării bateriei, spunem că dioda este polarizată invers. Putem să ne gândim la diodă ca la un întrerupător: „închisă”, când este polarizată și „deschisă” când este polarizată invers.

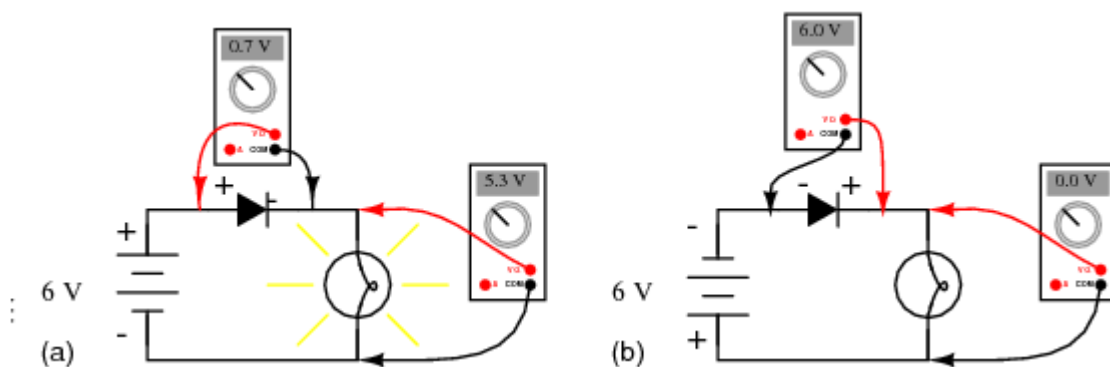
## Dioda precum o supapă de închidere (analogie)



Comportamentul diodei este analog comportamentului dispozitivului hidraulic denumit supapă de închidere. O supapă de închidere permite trecerea fluidului doar într-o singură direcție.

Supapele de închidere sunt de fapt dispozitive controlate cu ajutorul presiunii: acestea se deschid și permit trecerea fluidului dacă „polaritatea” presiunii pe suprafața lor este corectă. Dacă „polaritatea” presiunii este de sens contrar, diferența de presiune pe suprafața valvei va duce la închiderea acesteia, iar curgerea fluidului nu mai este posibilă. Același lucru este valabil și în cazul diodelor, doar că în acest caz presiunea este reprezentată de tensiune.

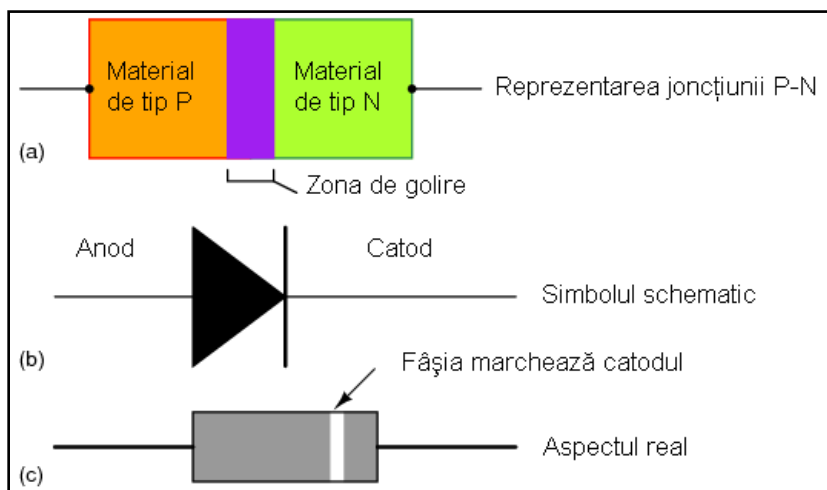
## Explicație



Să reluăm circuitul de mai sus, dar folosind de această dată un aparat de măsură pentru determinarea căderilor de tensiune pe diferite componente ale circuitului.

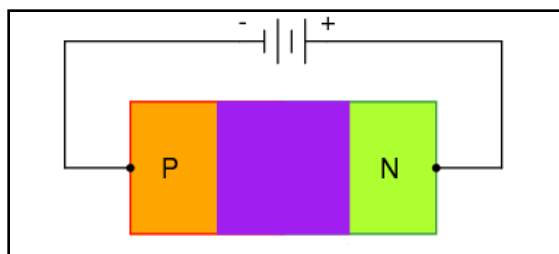
O diodă polarizată direct conduce curent și prezintă o cădere mică de tensiune la bornele sale, astfel încât majoritatea tensiunii disponibile la bornele sursei de alimentare se regăsește pe lampă (sarcină). Dacă polaritatea

bateriei este inversată, dioda devine polarizată invers, și toată tensiunea disponibilă la bornele sursei de alimentare se regăsește pe diodă, iar căderea de tensiune pe sarcină va fi egală cu zero. Putem considera dioda ca fiind un întrerupător „automat” (se închide când este polarizat direct și se deschide când este polarizat invers). Singura diferență notabilă este căderea de tensiune mult mai mare la bornele diodei (0,7 V), față de căderea de tensiune pe un întrerupător mecanic (câțiva mV).



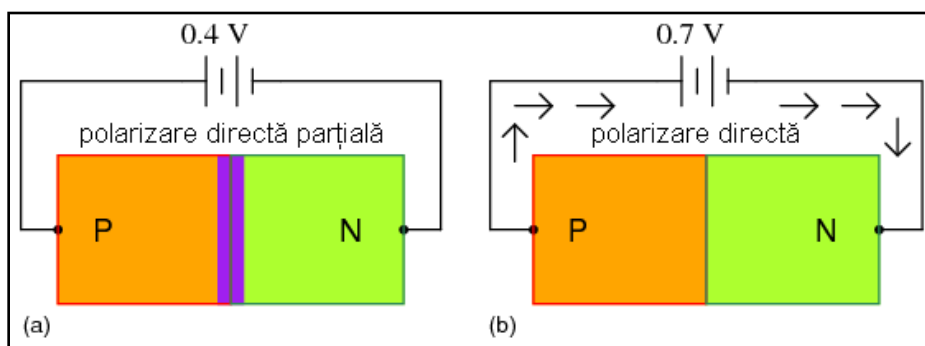
Această cădere de tensiune de polarizare directă se datorează acțiunii zonei de golire formată de joncțiunea P-N sub influența tensiunii aplicate. Dacă nu există nicio tensiune aplicată la bornele diodei semiconductoare, existența zonei de golire înguste în jurul joncțiunii P-N previne apariția curentului (figura alăturată (a)). Purtătorii de sarcină aproape că lipsesc în zona de golire, și prin urmare aceasta se

comportă precum un izolator.



Dacă dioda este polarizată invers, zona de golire se extinde și blochează și mai bine trecerea curentului prin dispozitiv.

## Tensiunea de polarizare directă



Dacă dioda este polarizată direct însă, zona de golire devine mult mai subțire (figura alăturată (a), polarizare parțială), iar rezistența față de curent scade. Pentru funcționarea corectă a diodei însă, zona de golire trebuie să dispară

complet. Acest lucru se poate realiza prin aplicarea unei anumite tensiuni minime, denumită tensiune de polarizare directă (figura alăturată (b)), care pentru diodele de siliciu este în mod normal 0,7 V, iar pentru cele de germaniu de doar 0,3 V.



Căderea de tensiune la bornele diodei rămâne aproximativ constantă pentru o gamă largă de curenți prin diodă. Pentru analiza circuitelor electronice simplificate, putem considera căderea de tensiune pe diodă ca fiind constantă (nu depinde de valoarea curentului prin diodă).

## Ecuția diodei

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{qV_D}{NkT}} - 1 \right)$$

unde,

$I_D$  = curentul diodei (A)

$I_S$  = curentul de saturație (aproximativ  $10^{-12}$  A)

$e$  = constanta lui Euler (2,718)

$q$  = sarcina electronului ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C)

$V_D$  = tensiunea aplicată la bornele diodei (V)

$N$  = factor de idealitate sau coeficient de emisie (între 1 și 2)

$k$  = constanta lui Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$ )

$T$  = temperatura joncțiunii (K)

Ecuția exactă ce descrie curentul printr-o diodă poartă numele de ecuația diodei. Termenul  $q/KT$  descrie tensiunea produsă în joncțiunea P-N datorită acțiunii temperaturii, și poartă numele de *tensiune termică*, sau  $V_t$ . La temperatura camerei, această temperatură este de aproximativ 26 mV.

## Ecuția simplificată a diodei

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{0,026}} - 1 \right)$$

unde,

$I_D$  = curentul diodei (A)

$I_S$  = curentul de saturație (aproximativ  $10^{-12}$  A)

$e$  = constanta lui euler (2,718)

$V_D$  = tensiunea aplicată la bornele diodei (V)

Cunoscând acest fapt, și considerând factorul de idealitate ca fiind 1, putem simplifica ecuația de mai sus și să ajungem la următoarea relație.

Aceste ecuații nu trebuie neapărat luate în considerare la analiza circuitelor simple cu diode, ci este menționată aici doar pentru a înțelege faptul că există o variație a căderii de tensiune la bornele diodei pentru diferite valori ale curenților prin diodă. Această variație este foarte mică, aceasta fiind și motivul pentru care se consideră că, la bornele diodei, căderea de tensiune rămâne constantă la 0,7 (siliciu) sau 0,3 V (germaniu). Totuși, unele circuite folosesc în mod intenționat relația curent/tensiune a joncțiunii P-N, și ele pot fi înțelese doar în contextul acestei ecuații. De asemenea, din moment ce temperatura este un factor în ecuația diodei, o joncțiune P-N polarizată direct poate fi folosită ca un dispozitiv de determinare a temperaturii, iar această utilizare poate fi înțeleasă doar dacă înțelegem în primul rând ecuația diodei de mai sus.

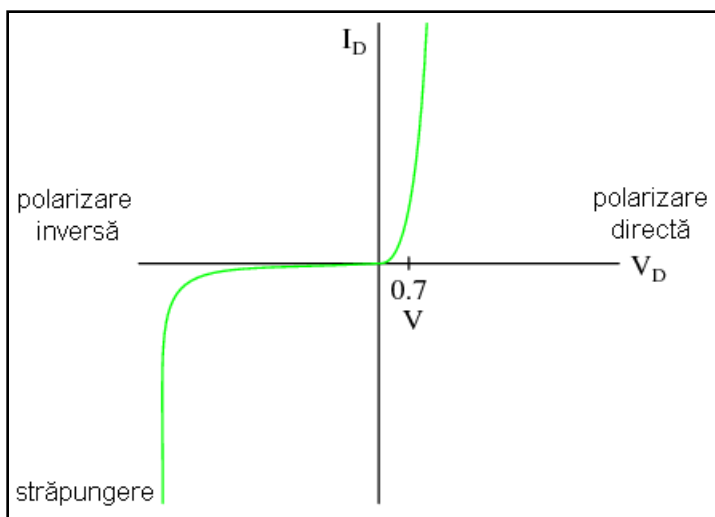
## Curentul invers

Deși o diodă polarizată invers, nu permite curentului să treacă prin ea datorită extinderii zonei de golire, în realitate există un mic curent de scurgere ce trece prin diodă chiar și la polarizarea inversă, iar acest curent poartă numele de curent invers. Curentul invers poate fi însă ignorat pentru majoritatea aplicațiilor.

## Tensiunea de străpungere

Dioda nu poate suporta o tensiune de polarizare inversă infinit de mare. Dacă această tensiune devine prea mare, dioda va fi distrusă datorită unei condiții denumite străpungere. Această tensiune inversă maximă poartă numele de tensiune de străpungere (inversă), notată cu  $V_s$ . Tensiunea de străpungere crește odată cu creșterea temperaturii și scade cu scăderea temperaturii - exact invers față de tensiunea de polarizare directă.

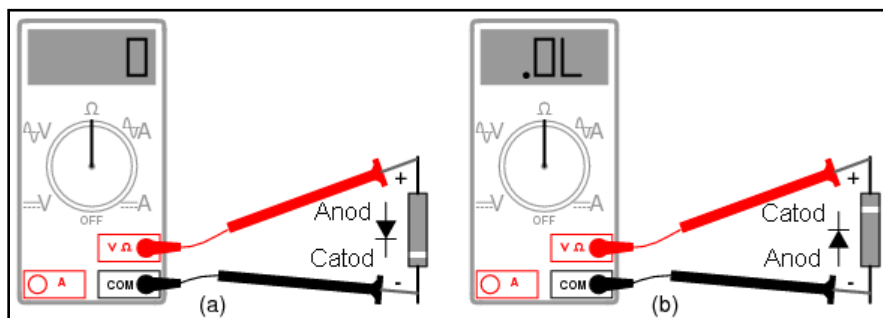
## Variația curent-tensiune a diodei



Alăturat este prezentat graficul curent-tensiune al diodei.

## 2. Verificarea diodei cu ohmmetrul

### Conectarea diodei la ohmmetru



Din moment ce o diodă nu este nimic altceva decât o valvă uni-direcțională de curent, putem verifica acest lucru folosind un ohmmetru alimentat în curent continuu (cu baterie). La conectarea diodei într-o anumită direcție, aparatul de măsură ar trebui

să indice o rezistență foarte mică (figura de alăturată (a)), iar la conectarea inversă, aparatul ar trebui să indice o rezistență foarte mare (figura alăturată (b)). („OL” reprezintă o valoare prea mare ce nu poate fi indicată de aparatul de măsură (din engl. Over-Limit); în acest caz, putem considera rezistența ca fiind infinită).

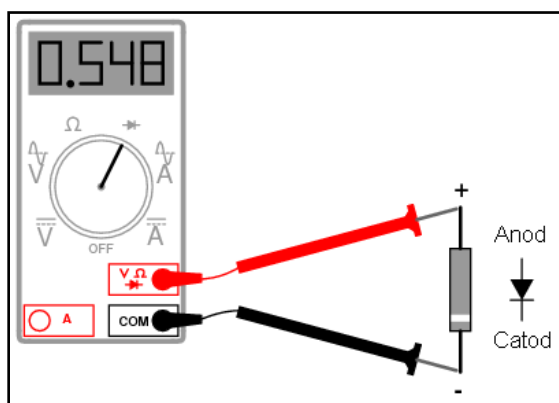
### Folosirea corectă ohmmetrului

Desigur, determinarea polarității diodei (care terminal este anodul și care catodul) necesită ca în primul rând să cunoaștem care din sondele aparatului de măsură este cea pozitivă (+) și care sondă este cea negativă (-), atunci când aparatul este trecut pe funcția  $\Omega$ . La majoritatea multimetrelor digitale, sonda roșie reprezintă terminalul pozitiv iar sonda neagră reprezintă terminalul negativ, atunci când aparatul este setat pe măsurarea rezistențelor. Totuși, acest lucru nu este valabil pentru toate multimetrele, existând posibilitatea ca sonda neagră să fie pozitivă (+) și cea roșie negativă (-).

### Neajunsuri

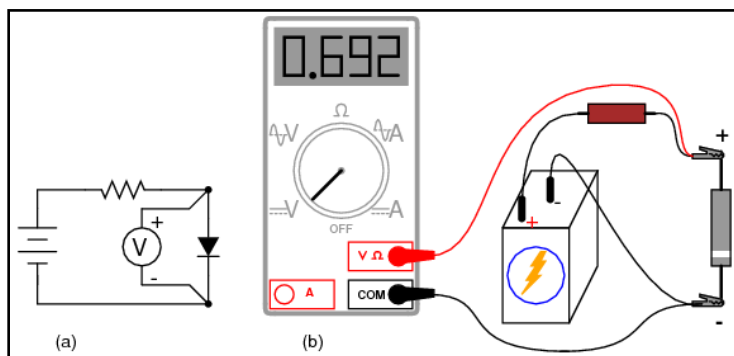
Problema folosirii unui ohmmetru pentru verificarea unei diode, este că indicația afișajului are doar valoare calitativă, nu și cantitativă. Cu alte cuvinte, un ohmmetru poate doar să ne spună dacă dioda funcționează (dacă aceasta conduce curent), dar valoarea rezistenței obținute din măsurătoare nu ne este de niciun folos. Dacă un ohmmetru indică o valoare de  $1,73\Omega$  la polarizarea directă, acea stă valoare nu este folosită de un tehnician sau proiectantului circuitului. Această valoare nu reprezintă nici căderea de tensiune la polarizarea directă și nici rezistența materialului semiconductor din diodă, ci este o mărime dependentă de ambele cantități și variază substanțial în funcție de ohmmetrul folosit pentru efectuarea citirii.

### Utilizarea funcției speciale de „verificare diodă”



Din acest motiv, unele multimetre digitale sunt prevăzute cu o funcție specială de „verificare a diodei” ce indică tensiunea reală de polarizare directă a diodei, în volți, în loc de o rezistență în ohmi. Principiul de funcționare al acestor aparate de măsură constă în forțarea unui curent mic prin diodă și măsurarea căderii de tensiune dintre cele două borne ale diodei.

### Folosirea unui circuit special



Totuși, valoarea tensiunii de polarizare directă indicată de aceste aparate va fi de obicei mai mică decât valoarea „normală” de 0,7 V, deoarece curentul furnizat de aparatul de măsură prin diodă este foarte mic. Dacă nu avem la dispoziție un multimetru cu funcție de verificare a diodelor, sau dacă vrem să măsurăm tensiunea de polarizare directă a diodei folosind un curent mai mare,

putem realiza un circuit electric precum în figura alăturată, folosind o baterie, un rezistor și un voltmetru.

## 3. Parametrii caracteristici ai diodei

### Scop

Pe lângă tensiunea de polarizare directă ( $V_f$ ) și tensiunea de străpungere ( $V_s$ ), mai există mulți alți parametri importanți ai diodelor pentru proiectarea circuitelor și alegerea componentelor. Producătorii de dispozitive semiconductoare oferă aceste specificații ale produselor în publicații denumite cataloage. Cataloagele producătorilor de componente pot fi găsite în cărți de specialitate sau pe internet.

Pentru simplificarea explicațiilor, am folosit în unele situații „tensiunea directă” în loc de „tensiunea de polarizare directă” sau „curentul direct” în loc de „curentul de polarizare direct”. Cele două exprimări sunt însă echivalente.

## Lista parametrilor

Principalele caracteristici ale diodelor, trecute în cataloage, sunt următoarele:

**$V_{RRM}$  - tensiunea inversă repetitivă maximă**, este tensiunea maximă inversă la care poate rezista dioda, atunci când această tensiune este atinsă în mod repetat. Ideal, această valoare ar fi infinită.

**$V_R$  sau  $V_{DC}$  - tensiunea maximă inversă de curent continuu**, este valoarea maximă a tensiunii la care dioda poate funcționa neîntrerupt, fără distrugerea acesteia. Ideal, această valoare ar fi infinită.

**$V_F$  - tensiunea (de polarizare) directă maximă**, de obicei este specificată împreună cu valoarea curentului direct. Ideal, această valoare ar fi zero: ideal, dioda nu ar prezenta niciun fel de opoziție în fața deplasării electronilor. În realitate, tensiunea directă este descrisă de ecuația diodei.

**$I_{F(AV)}$  - valoarea maximă (medie) a curentului direct**, valoarea maximă medie a curentului pe care bobina o poate suporta la polarizarea directă. Această limitare este practic o limitare termică: câtă căldură poate „suporta” joncțiunea P-N, având în vedere că puterea disipată reprezintă produsul dintre curent și tensiune, iar tensiunea de polarizare directă depinde atât de curent cât și de temperatura joncțiunii. Ideal, această valoare ar fi infinită.

**$I_{FSM}$  sau  $i_{f(vârf)}$  - curentul de polarizare directă maxim**, reprezintă curentul de vârf maxim pe care dioda îl poate conduce la polarizare directă, fără ca acest curent să ducă la distrugerea diodei. Din nou, această valoare este limitată de capacitatea termică a joncțiunii diodei, și este de obicei mult mai mare decât valoarea curentului mediu datorită inerției termice. Ideal, această valoare ar fi infinită.

**$P_D$  - puterea maximă disipată totală**, reprezintă valoarea puterii (în Watt) pe care dioda o poate disipa fără ca această putere să ducă la distrugerea diodei. Această valoare este limitată de capacitatea termică a diodei. Ideal, această valoare ar fi infinită.

**$T_J$  - temperatura de funcționare a joncțiunii**, reprezintă temperatura maximă admisă a joncțiunii P-N a diodei, valoare dată de obicei în  $^{\circ}C$ . Căldura reprezintă punctul critic al dispozitivelor semiconductoare: acestea trebuie menținute la o temperatură cât mai apropiată de temperatura camerei pentru funcționarea lor corectă și o durată de funcționare cât mai lungă.

**$T_{STG}$  - temperatura de depozitare**, reprezintă valoarea temperaturii de stocare a diodelor (nepolarizate).

**$R(\Theta)$  - rezistența termică**, reprezintă diferența dintre temperatura joncțiunii și temperatura aerului exterior diodei ( $R(\Theta)_{JA}$ ), sau dintre joncțiune și contacte ( $R(\Theta)_{JL}$ ), pentru o anumită putere disipată. Valoarea este exprimată în  $^{\circ}C/W$ . Ideal, această valoare ar fi zero, ceea ce ar însemna că învelișul (carcasa) diodei ar fi un conductor și radiator termic perfect, fiind capabil să transfere energie sub formă de căldură dinspre joncțiune spre mediul exterior (sau spre contacte) fără nicio diferență de temperatură existentă în grosimea carcasi. O rezistență termică ridicată se traduce prin faptul că dioda va stoca o temperatură excesivă în jurul joncțiunii (punctul critic), în ciuda eforturilor susținute de răcire a mediului exterior diodei; acest lucru duce la limitarea puterii maxime disipate.

**$I_R$  - curentul maxim de polarizare inversă**, reprezintă valoarea curentului prin diodă la polarizarea inversă și aplicarea tensiunii de polarizare inversă maximă de curent continuu ( $V_{DC}$ ). Mai este cunoscut și sub

numele de **curent de scăpări**. Ideal, această valoare ar fi zero, deoarece o diodă perfectă ar bloca toți curenții atunci când este polarizată invers. În realitate, această valoare este mică în comparație cu valoarea curentului maxim de polarizare directă.

**$C_J$  - capacitatea tipică a joncțiunii**, reprezintă capacitatea intrinsecă joncțiunii, datorită comportării zonei de golire precum un dielectric între anod și catod. Această valoare este de obicei foarte mică, de ordinul picofarazilor (pF).

**$t_{rr}$  - timpul de revenire invers**, reprezintă durata de timp necesară „stingerii” diodei atunci când tensiunea la bornele sale alternează între polarizare directă și polarizare inversă. Ideal, această valoare ar fi zero: dioda se „stinge” imediat după inversarea polarității. Pentru o diodă redresoare tipică, timpul de revenire este de ordinul zecilor de microsecunde (ms); pentru o diodă de comutație rapidă, acest timp poate ajunge la doar câteva nanosecunde (ns).

## Observație

Majoritatea acestor parametri variază cu temperatura sau alte condiții de operare, prin urmare, o singură valoare nu poate descrie complet niciun parametru. Prin urmare, producătorii pun la dispoziție grafice ale variațiilor parametrilor cu temperatura (sau alte variabile).

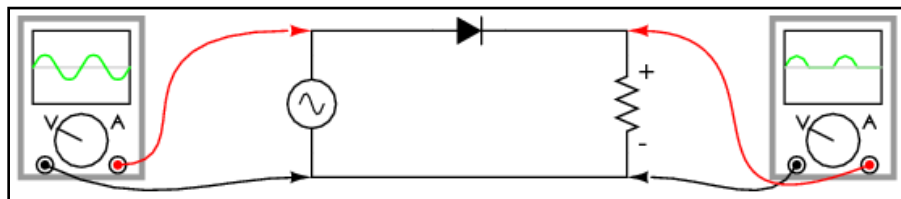
## 4. Circuite redresoare

- Redresarea este transformarea curentului alternativ în curent continuu
- Un redresor mono-alternanță este un circuit ce permite aplicarea doar a unei semi-perioade (o jumătate de perioadă) a tensiunii de curent alternativ asupra sarcinii, rezultând într-o polaritate non-alternantă a căderii de tensiune a sarcinii. Tensiunea de curent continuu rezultată prezintă o „pulsatie” semnificativă
- Un redresor dublă alternanță este un circuit ce transformă întreaga perioadă (ambele semi-perioade) a tensiunii de curent alternativ într-o serie de pulsuri neîntrerupte de tensiune de aceeași polaritate. Tensiunea de curent continuu rezultată prezintă un număr mai mic de pulsuri
- Redresarea tensiunii de curent alternativ polifazate rezultă într-o formă de undă de curent continuu mult mai „netedă” (tensiune de riplu mult mai scăzută) decât redresarea tensiunii monofazate

## Definiția redresării

Cea mai populară aplicația a diodelor este redresarea. Pe scurt, redresarea reprezintă transformarea curentului alternativ în curent continuu. Acest lucru implică folosirea unui dispozitiv ce permite trecerea electronilor doar într-o singură direcție, iar dioda realizează tocmai acest lucru.

### Redresorul mono-alternanță



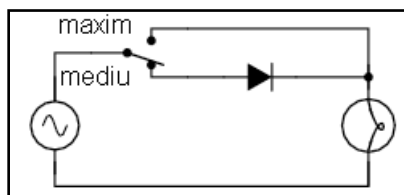
undă de curent alternativ dinspre sursă înspre sarcină.

Cel mai simplu circuit de redresare îl reprezintă redresorul mono-alternanță. Acesta permite trecerea doar a unei jumătăți a formei de

### Neajunsuri

Pentru majoritatea aplicațiilor de putere însă, redresarea mono-alternanță nu este suficientă. Conținutul **armonic** al unde de ieșire este foarte mare și prin urmare dificil de filtrat. Mai mult, sursa de tensiune alternativă este „văzută” de sarcină doar odată la fiecare jumătate de perioadă, ceea ce înseamnă că mare parte din capacitatea sursei nu este folosită.

### Utilizare

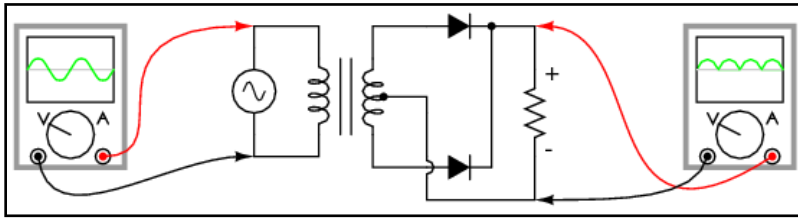


Redresarea mono-alternanță este totuși o modalitate foarte ușoară de reducere a puterii generate pe o sarcină rezistivă. Unele comutatoare cu rezistență reglabilă folosite la lămpi, aplică întreaga tensiune de curent continuu pe filamentul „lămpii” în poziția „maxim”, și doar o jumătate (folosind un redresor mono-alternanță) din tensiunea maximă disponibilă pe cealaltă poziție, pentru o intensitate luminoasă mai scăzută.

Când întrerupătorul este în poziție mediu, lampa incandescentă primește aproximativ jumătate din puterea disponibilă la sursa de curent alternativ. Datorită faptului că forma de undă mono-alternanță pulsează mult mai rapid decât timpul necesar pentru încălzirea și răcirea filamentului, lampa nu „clipește”, ci, filamentul ei pur și simplu operează la o temperatură mai mică decât temperatura normală de funcționare.

### Redresor dublă alternanță cu punct median

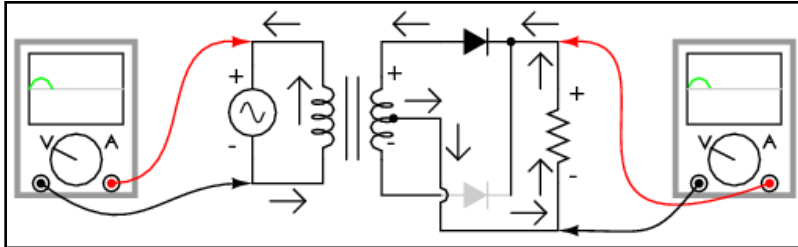
Pentru redresarea și folosirea ambelor alternanțe a undelor sinusoidale, avem nevoie de o altă configurație a circuitului redresor, și anume, un redresor dublă alternanță.



Una dintre posibilități este realizarea redresorului cu punct median, folosind un transformator cu priză mediană pe înfășurarea secundară și două diode.

Putem înțelege mult mai bine funcționarea acestui redresor dacă luăm pe rând fiecare jumătate de perioadă (semi-perioadă).

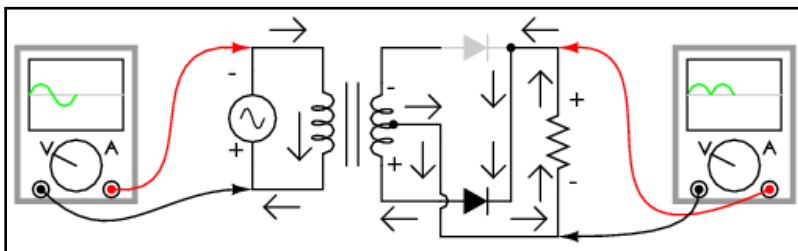
### Prima semi-perioadă



Să considerăm de exemplu prima jumătate a perioadei, când polaritatea tensiunii de alimentare este pozitivă (+) sus și negativă (-) jos. În această situație, doar dioda de sus va conduce, iar dioda de jos este blocată.

Sarcina „vede” prima jumătate a formei de undă sinusoidale, pozitiv sus și negativ jos. Doar partea de sus a înfășurării secundare a transformatorului conduce curent în acest caz.

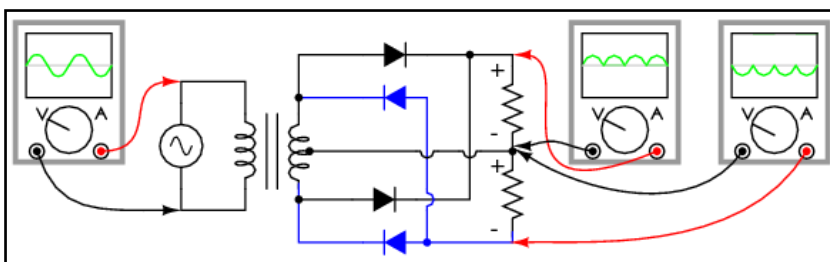
### A doua semi-perioadă



În a doua parte a perioadei, polaritatea tensiunii alternative se inversează. În acest caz, cealaltă diodă, cea de jos, și cealaltă jumătate a secundarului transformatorului, vor conduce curent, iar celelalte porțiuni ale

circuitului ce au fost active la pasul precedent, nu vor conduce curent. Sarcina „vede” și în acest caz o jumătate de formă de undă sinusoidală, de *aceeași* polaritate ca și în cazul precedent: pozitiv în partea de sus și negativ în partea de jos.

### Redresor dublă alternanță cu polaritate dublă



Polaritatea sarcinii poate fi inversată prin inversarea direcțiilor diodelor. Mai mult, diodele inversate pot fi conectate în paralel cu configurația pozitivă deja existentă. Rezultatul este un redresor dublă alternanță cu polaritate dublă.

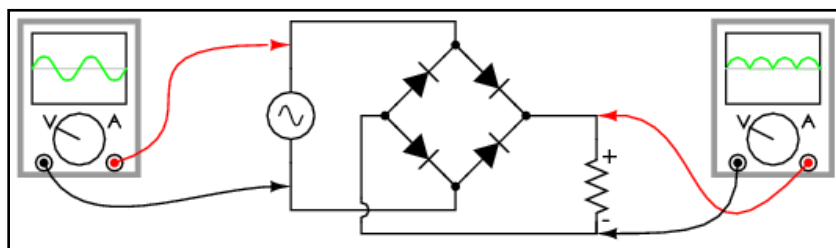
Modul de conectare al diodelor este același ca și la redresorul în punte.



## Dezavantaje

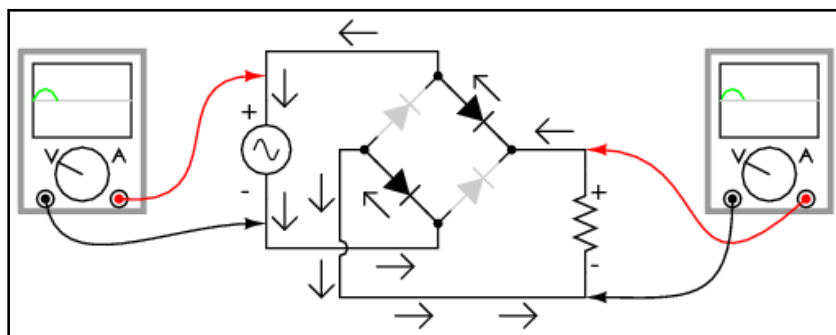
Un mare dezavantaj al acestei configurații este necesitatea folosirii unui transformator cu priză mediană pe înfășurarea secundară. Dacă circuitul în cauză este un circuit de putere mare, mărimea și costul unui astfel de transformator pot fi suficient de mari. Prin urmare, redresorul dublu alternanță cu punct median este folosit doar în aplicațiile de putere mică.

## Redresor dublă alternanță în punte (punte redresoare)



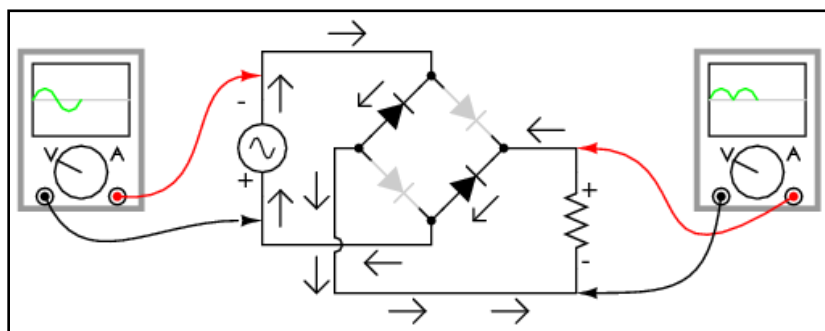
Probabil că cel mai popular redresor este cel dublă alternanță în punte. Aceste utilizează patru diode conectate în punte.

### Semi-perioadele pozitive



Direcția curentului pentru semi-perioadele pozitive este prezentată în figura alăturată.

### Semi-perioadele negative

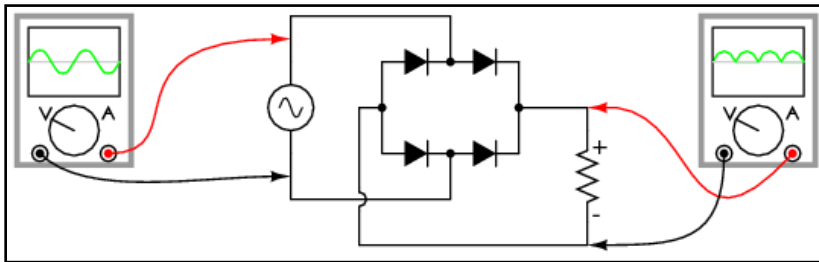


Direcția curentului pentru semi-perioadele negative este prezentată în figura alăturată.

## Avantaje și dezavantaje

Indiferent de polaritatea intrării, curentul prin sarcină are aceeași direcție de curgere. Cu alte cuvinte, o semi-perioadă negativă la sursă este o semi-perioadă pozitivă pe sarcină. Curgerea curentului are loc prin două diode serie, pentru ambele polarități. Astfel, căderea de tensiune pierdută dinspre sursă spre sarcină datorită diodelor este dublă ( $0,7 \cdot 2 = 1,4$  V pentru Si) față de redresorul dubă alternanță cu punct median. Acest dezavantaj reprezintă însă o problemă doar pentru sursele cu o tensiune de alimentare foarte scăzută.

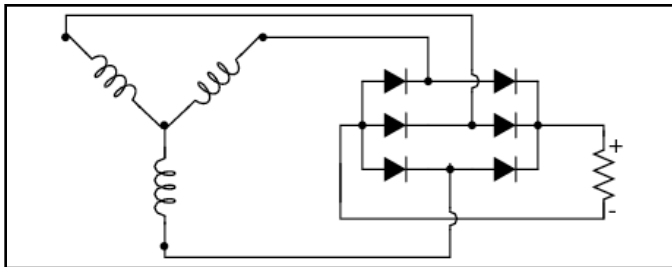
### Reprezentarea echivalentă



sunt poziționate orizontal, și toate indică în aceeași direcție.

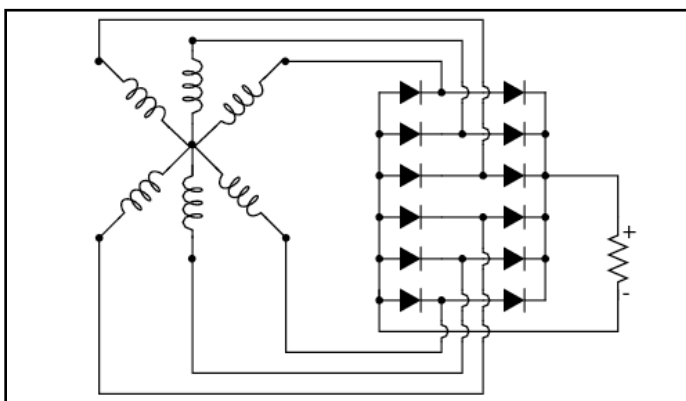
Modul corect de așezare în punte al diodelor poate prezenta pentru începători unele dificultăți. O reprezentare alternativă, dar echivalentă, a acestui circuit este mult mai ușor de ținut minte și de înțeles. Este exact același circuit, doar că toate diodele

### Configurație trifazată



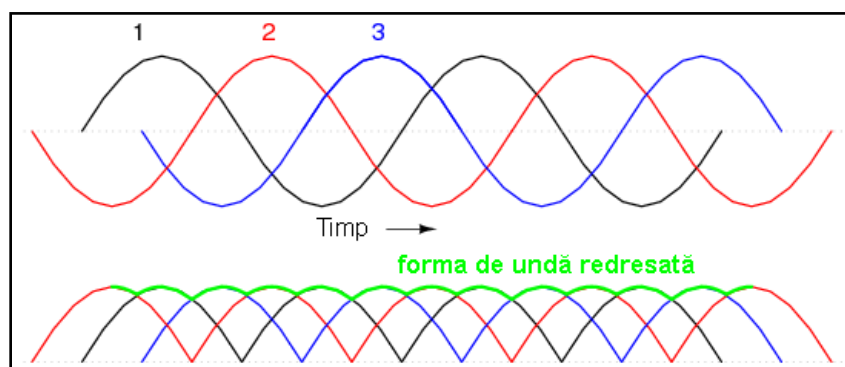
Un avantaj al acestei notații este că poate fi ușor aplicată unei versiuni trifazate a redresorului.

### Configurație polifazată



...sau oricărei configurații polifazate.

### Forma de undă a tensiunii redresate



În cazul redresării unui circuit de curent alternativ polifazat, suprapunerea pulsurilor defazate produce o tensiune de curent continuu mult mai „netedă” (cu un conținut mai mic de curent alternativ) decât cea produsă prin redresarea unei singure faze de curent alternativ. Acesta este un avantaj important în circuitele

redresoare de putere, unde doar mărimea fizică a componentelor necesare pentru realizarea filtrării ar impune unele limite.

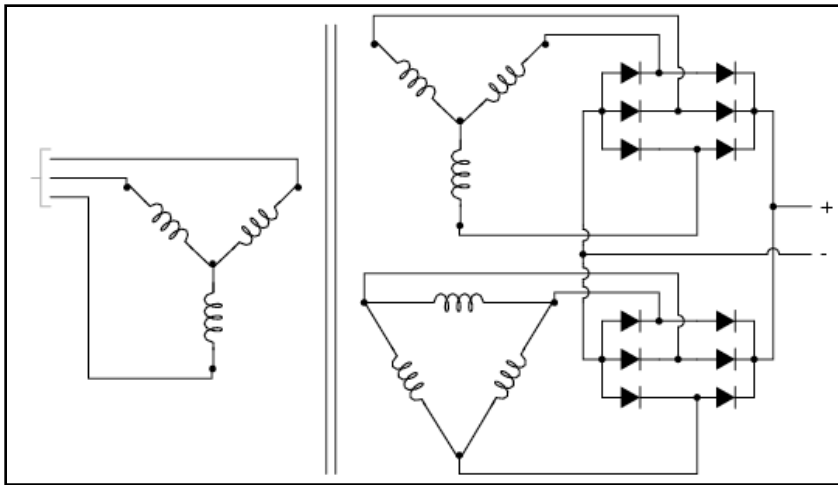
### **Tensiunea de riplu**

Indiferent de tipul redresării - monofazată sau polifazată - cantitatea de tensiunea alternativă „amestecată” cu tensiunea de curent continuu de ieșire a redresorului, poartă numele de tensiune de riplu, sau simplu *riplu*. În majoritatea cazurilor, din moment ce la ieșire dorim o tensiune de curent continuu pură, riplul reprezintă o tensiune nedorită. Dacă puterile implicate nu sunt foarte mari, se pot folosi rețele de filtrare pentru reducerea riplului tensiunii de ieșire.

### **Numărul pulsurilor semnalului redresat**

Câteodată, metoda rectificării (redresării) este descrisă numărând „pulsurile” tensiunii de curent continuu pentru fiecare  $360^\circ$  electrice. Un redresor monofazat, mono-alternanță, este prin urmare un redresor cu un puls, deoarece produce un singur puls într-o perioadă completă ( $360^\circ$ ) a formei de undă alternative. Un redresor monofazat, dublă alternanță (indiferent dacă este cu punct median sau în punte), poate fi numit redresor cu două pulsuri, deoarece produce două pulsuri de tensiune continuă într-o perioadă a tensiunii de curent alternativ. Un redresor trifazat, dublă alternanță poate fi denumit redresor cu șase pulsuri.

### **Dublarea numărului de pulsuri**



Este posibilă obținerea unui număr dublu de pulsuri față de numărul fazelor cu ajutorul unui redresor. Folosind transformatoare, putem conecta în paralel un set de redresoare dublă alternanță în punte astfel încât să rezulte mai mult de 6 pulsuri de tensiune continuă pentru cele trei faze ale curentului alternativ. Dacă se introduce un defazaj de  $30^\circ$  între primarul și secundarul transformatorului trifazat

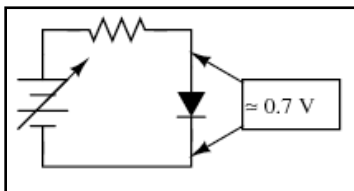
atunci înfășurările nu sunt de același tip.

Cu alte cuvinte, un transformator în configurație Y-Δ (stea-triunghi) sau Δ-Y (triunghi-stea), va prezenta acest defazaj de  $30^\circ$ , dar nu și un transformator în configurație Y-Y sau Δ-Δ. Acest fenomen poate fi exploatat prin utilizarea unui transformator în configurație Y-Y conectat la un redresor în punte, iar un alt transformator în configurație Y-Δ conectat la un al doilea redresor în punte; cele două punți redresoare le conectăm apoi în paralel. Din moment de tensiunea de riplu dintre cele două redresoare este defazată cu  $30^\circ$ , tensiunea de riplu rezultată prin superpoziția lor va fi mai mică decât tensiunea de riplu luată individual pentru cele două redresoare: 12 pulsuri pentru o perioadă ( $360^\circ$ ) în loc de 6.

## 5. Dioda Zener - principii și aplicații

- Diodele Zener sunt proiectate să funcționeze polarizate invers. Tensiunea la care aceste diode încep să conducă este denumită tensiune Zener
- Dioda Zener poate funcționa pe post de stabilizator de tensiune

### Stabilizarea tensiunii cu ajutorul diodelor



La conectarea unei diode în serie cu un rezistor într-un circuit de curent continuu, astfel încât dioda să fie polarizată direct, căderea de tensiune la bornele diodei va rămâne aproximativ constantă pentru o plajă largă de tensiuni de alimentare (figura alăturată).

Conform ecuației diodei, curentul printr-o joncțiune P-N polarizată direct este direct proporțional cu  $e$  ridicat la puterea tensiunii directe (tensiunea de polarizare directă). Deoarece ecuația este exponențială, curentul crește foarte repede pentru creșteri modeste ale căderii de tensiune. Cu alte cuvinte, căderea de tensiune la bornele

unei diode polarizate direct variază foarte puțin pentru variații mari ale curentului prin diodă. În circuitul din figura de mai sus, curentul prin diodă este limitat de tensiunea sursei de alimentare, de rezistorul conectat în serie și de căderea de tensiune la bornele diodei, care după câte știm, nu se îndepărtează foarte mult de valoarea de 0,7 V.

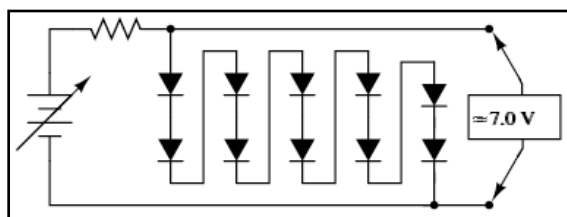
Dacă am fi să creștem tensiunea generată de sursă, căderea de tensiune pe rezistor ar crește cu aproape aceeași valoare, iar căderea de tensiune pe diodă ar crește doar foarte puțin. Invers, o scădere a tensiunii generate de sursă, rezultă într-o descreștere aproape identică a căderii de tensiune pe rezistor și doar într-o mică descreștere a căderii de tensiune pe diodă. Pe scurt, putem spune că dioda stabilizează tensiunea la valoarea de 0,7 V.

## Scopul stabilizării tensiunii

Stabilizarea tensiunii este o proprietate foarte folositoare. Să presupunem că am construi un circuit, al cărei sarcini nu ar tolera variații ale tensiunii sursei de alimentare, dar că acest circuit trebuie să fie alimentat de o baterie, a cărei tensiune, după câte se știe, variază pe durata sa de funcționare. Am putea folosi în acest caz circuitul din figura de mai sus, iar circuitul în cauză să-l conectăm la bornele diodei, astfel încât tensiunea de alimentare a noului circuit să rămână stabilă la valoarea de 0,7 V.

## Creșterea valorii tensiunii stabilizate

Majoritatea circuitelor reale necesită însă o sursă de tensiune stabilizată cu o valoare de peste 0,7 V. O modalitate de creștere a tensiunii stabilizate este conectarea mai multor diode în serie, astfel încât tensiunile de polarizare directă să se însumeze.

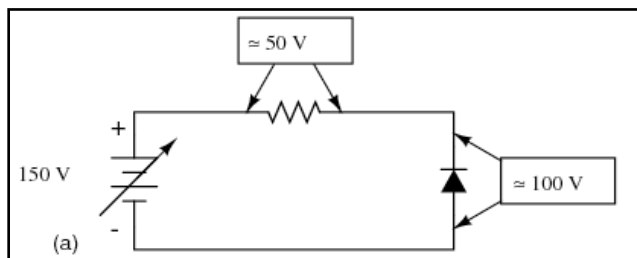


De exemplu, dacă am conecta zece diode în serie, valoarea tensiunii stabilizate ar fi de zece ori mai mare față de cazul precedent, adică 7 V.

Atâta timp cât tensiunea bateriei nu scade sub 7 V, vor exista tot timpul 7 V (tensiune stabilizată) între bornele celor diode

conectate în serie.

## Polarizarea inversă a diodei

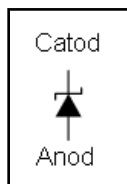


Dacă avem nevoie de tensiuni stabilizate și mai mari, putem folosi și mai multe diode în serie, sau putem încerca o metodă complet diferită, folosindu-ne tot de diode. Știm că tensiunea de polarizare a diodei este o valoare aproximativ constantă pentru o plajă largă de condiții, dar

același lucru este valabil și pentru tensiune (inversă) de străpungere, iar valoarea acestei tensiuni de străpungere este de obicei mult mai mare decât tensiunea directă.

Dacă inversăm polaritatea diodei în circuitul stabilizator de mai sus, și creștem tensiunea sursei de alimentare până în punctul de străpungere al diodei, dioda va stabili și în acest caz tensiunea la acel punct de străpungere, nepermițând tensiunii să crească peste această valoare.

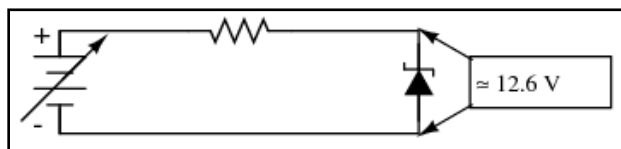
## Utilizarea diodelor Zener pentru stabilizarea tensiunii



Din păcate, când diodele redresoare normale ating punctul de străpungere, acest fapt duce și la distrugerea acestora. Totuși, se pot construi diode speciale ce pot suporta tensiunea de străpungere fără distrugerea completă a acestora. Acest tip de diodă poartă numele de *diodă Zener*, iar simbolul este cel din figura alăturată.

### Tensiunea Zener

La polarizarea directă, diodele Zener se comportă precum diodele redresoare standard: tensiunea directă are valoarea de 0,7 V, conform ecuației diodei. La polarizarea inversă însă, acestea nu conduc curentul decât peste o anumită valoare a tensiunii de alimentare, valoare denumită tensiune Zener; după atingerea acestei valori, dioda Zener va putea să conducă un curent substanțial, dar va limita căderea de tensiune la bornele sale la acea tensiune Zener. Atâta timp când puterea disipată sub formă de căldură nu depășește limita termică a diodei, aceasta nu va fi afectată în niciun fel.



Diodele Zener sunt confecționate cu tensiuni Zener de câțiva volți până la sute de volți. Tensiunea Zener variază ușor cu temperatura, dar acestea pot fi folosite cu succes ca dispozitive de stabilizare a tensiunii datorită stabilității și acurateții lor în funcționare.

### Polarizarea corectă a diodelor Zener

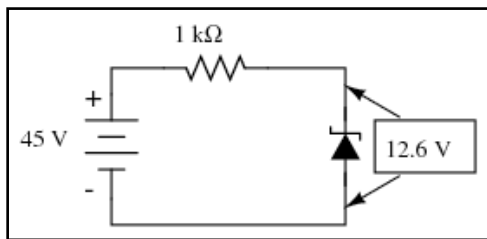
Atenție! Orientarea diodei Zener față de sursa de tensiune în circuitul de mai sus este astfel încât dioda să fie polarizată invers. Acesta este modul corect de conectare a diodelor Zener în circuit! Dacă am fi să conectăm dioda Zener invers, astfel încât să fie polarizată direct, aceasta s-ar comporta precum o diodă „normală”, iar tensiunea de polarizare directă ar avea o valoare de doar 0,7 V.

### Limita termică și distrugerea diodei Zener

Ca și oricare dispozitiv semiconductor, dioda Zener este sensibilă la temperatură. O temperatură excesivă poate duce la distrugerea diodei, astfel că va trebui să se țină seama de puterea maximă permisă a diodei la

proiectarea circuitelor. Interesant este faptul că, la distrugerea diodei Zener, datorită căldurii excesive, distrugerea rezultată duce la scurt-circuitarea diodei, nu la deschiderea. O astfel de diodă „stricată” poate fi detectată foarte ușor, întrucât se comportă precum un conductor electric: căderea de tensiune este aproape zero atât la polarizarea directă cât și la polarizarea inversă.

## Exemplu practic de utilizare a diodei Zener

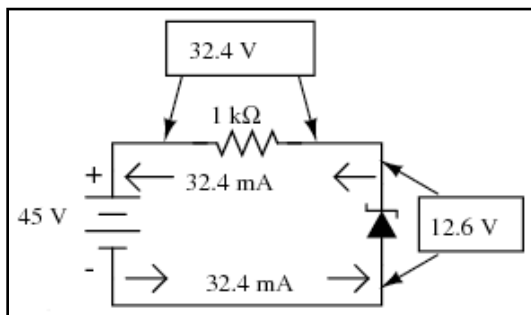


Vom rezolva matematic circuitul precedent, determinând toate tensiunile, curenții și puterile disipate, pentru o tensiune Zener de 12,6 V, o sursă de tensiune de 45 V și o valoare a rezistorului de 1.000 Ω.

Să calculăm prima dată puterile pe rezistor și pe diodă:

$$P_{\text{rezistor}} = 32,4 \text{ mA} \cdot 32,4 \text{ V} = 1,04 \text{ W}$$

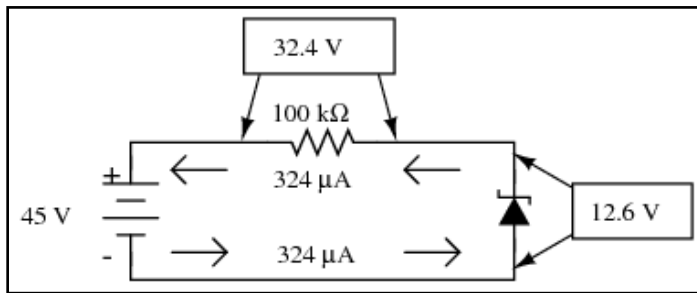
$$P_{\text{diodă}} = 32,4 \text{ mA} \cdot 12,6 \text{ V} = 408,24 \text{ mW}$$



O diodă Zener cu o putere de 0,5 W și un rezistor cu o putere de 1,5 sau 2 W sunt suficiente pentru această aplicație.

## Minimizarea puterii disipate

Dacă puterea excesivă disipată este atât de importantă, de ce nu am proiecta un circuit astfel încât să existe o putere disipată minimă? De ce nu am introduce un rezistor cu o valoare foarte mare a rezistenței, limitând prin urmare curentul și menținând puterea disipată la valori foarte scăzute?



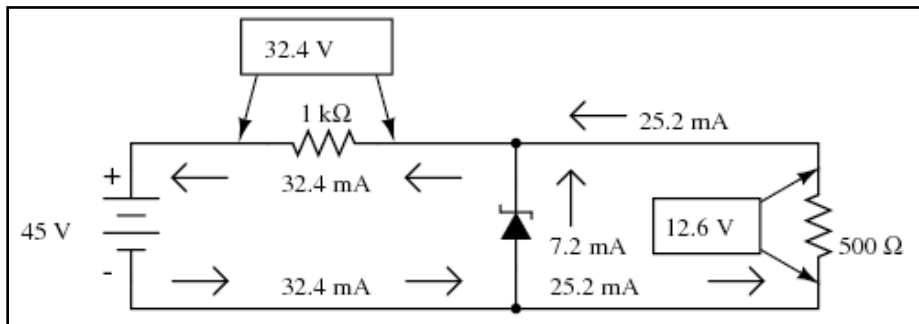
puterilor disipate ar trebui să fie de 100 de ori mai mici:

$$P_{rezistor} = 324 \mu A \cdot 32,4 V = 10,49 W$$

$$P_{diodă} = 324 \mu A \cdot 12,6 V = 4,08 mW$$

Această configurație pare ideală. O putere disipată mai mică înseamnă temperaturi de funcționare mai mici atât pentru dioda Zener cât și pentru rezistor și o pierdere de energie mai mică în sistem. Într-adevăr, o rezistență mai mare reduce puterile disipate din circuit, dar, introduce o altă problemă. Scopul unui stabilizator de tensiune este alimentarea unui circuit secundar cu o tensiune stabilă. Va trebui până la urmă să alimentăm un alt circuit cu 12,6 V, iar acest circuit legat la bornele diodei Zener va necesita și el un anumit curent.

### Modificarea sarcinii



în serie cu sursa de tensiune să prezinte o cădere de tensiune de 32,4 V (45 V, tensiunea sursei - 12,6 V, căderea de tensiune pe diodă), acesta va trebui să conducă un curent de 32,4 mA. Acest lucru înseamnă ca prin dioda Zener va trece un curent de 7.2 mA.

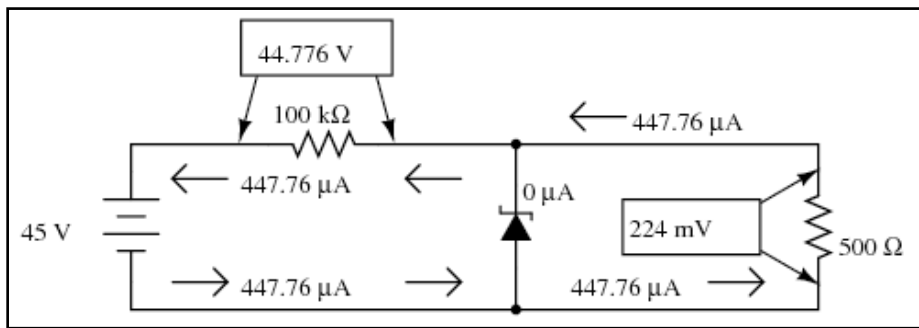
### Modificarea rezistorului de intrare

Să luăm de exemplu circuitul alăturat, cu un rezistor de 100 kΩ în loc de rezistorul de 1 kΩ din circuitul precedent. Atât tensiunea de alimentare cât și tensiunea Zener sunt cele din exemplul precedent. Având un curent de 100 de ori mai mic decât înainte (324 μA în loc de 32,4 mA), ambele valori ale

Să considerăm primul circuit, conectat de această dată la o sarcină de 500 Ω în paralel cu dioda Zener:

Dacă se menține o tensiune de 12,6 V pe sarcina de 500 Ω, aceasta va folosi un curent de 25,2 mA. Pentru ca rezistorul de 1 kΩ



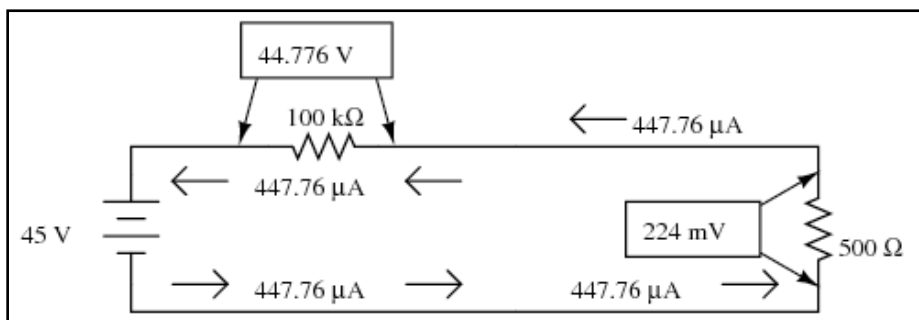


Să considerăm acum al doilea circuit de stabilizare a tensiunii cu un rezistor de  $100\text{ k}\Omega$ , alimentând aceeași sarcină de  $500\Omega$ . Ceea ce ar trebui să facă acest circuit, este să mențină o cădere de tensiune de  $12,6\text{ V}$  la bornele sarcini, la fel ca

în circuitul precedent. Dar, după cum putem vedea, circuitul stabilizator nu poate realiza acest lucru.

Datorită prezenței rezistorului foarte mare în serie cu sursa de tensiune, pe sarcină va exista o cădere de tensiune de doar  $224\text{ mV}$ , mult mai puțin decât valoarea dorită de  $12,6\text{ V}$ . De ce se întâmplă acest lucru? Dacă am fi să avem  $12,6\text{ V}$  pe sarcină, curentul prin sarcină ar fi de  $25,2\text{ mA}$ , la fel ca înainte. Acest curent de sarcină ar trebui să treacă și prin rezistorul serie de valoare mult mai mare față de cazul precedent, iar căderea de tensiune necesară pentru susținerea unui astfel de curent de  $25,2\text{ mA}$  ar trebui să fie de  $2.520\text{ V}$ ! Din moment ce nu avem o tensiune așa de mare la bornele sursei de alimentare, acest lucru nu este posibil. De asemenea, putem observa, că în circuitul de mai sus dioda este blocată.

### Îndepărtarea temporară a diodei Zener



Putem înțelege mai ușor situația de mai sus dacă îndepărtăm temporar dioda Zener din circuit și analizăm doar comportamentul celor doi rezistori.

### Realizarea calculelor

| Mărime | $R_{\text{serie}}$ | $R_{\text{sarcină}}$ | Total | Unitate  |
|--------|--------------------|----------------------|-------|----------|
| E      |                    | 12,6                 | 45    | V        |
| I      |                    |                      |       | A        |
| R      | 100k               |                      |       | $\Omega$ |

Circuitul stabilizator cu rezistorul de  $100\text{ k}\Omega$  are totuși o anumită valoare a rezistenței sarcinii pentru care tensiunea la bornele sale este de  $12,6\text{ V}$ . Putem afla această valoare făcând un mic calcul. Introducem toate valorile cunoscute într-un tabel, de forma celui alăturat.

| Mărime | $R_{\text{serie}}$ | $R_{\text{sarcină}}$ | Total | Unitate  |
|--------|--------------------|----------------------|-------|----------|
| E      | 32,4               | 12,6                 | 45    | V        |
| I      |                    |                      |       | A        |
| R      | 100k               |                      |       | $\Omega$ |

Căderea de tensiune pe rezistorul serie de  $100\text{ k}\Omega$  este diferența căderilor de tensiune dintre sursă (coloana total) și sarcină.

| Mărime | R <sub>serie</sub> | R <sub>sarcină</sub> | Total | Unitate |
|--------|--------------------|----------------------|-------|---------|
| E      | 32,4               | 12,6                 | 45    | V       |
| I      | 324 μ              |                      |       | A       |
| R      | 100k               |                      |       | Ω       |

Putem calcula curentul prin rezistorul serie folosind legea lui Ohm ( $I = E / R$ ).

| Mărime | R <sub>serie</sub> | R <sub>sarcină</sub> | Total | Unitate |
|--------|--------------------|----------------------|-------|---------|
| E      | 32,4               | 12,6                 | 45    | V       |
| I      | 324 μ              | 324 μ                | 324 μ | A       |
| R      | 100k               |                      |       | Ω       |

Fiind un circuit serie, curentul este același prin toate componentele.

| Mărime | R <sub>serie</sub> | R <sub>sarcină</sub> | Total | Unitate |
|--------|--------------------|----------------------|-------|---------|
| E      | 32,4               | 12,6                 | 45    | V       |
| I      | 324 μ              | 324 μ                | 324 μ | A       |
| R      | 100k               | 38,89 k              |       | Ω       |

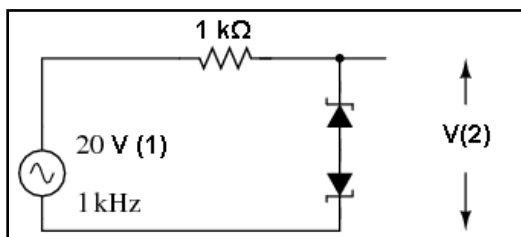
Putem acum calcula rezistența sarcinii folosind legea lui Ohm ( $R = E / I$ ).

### Concluzii

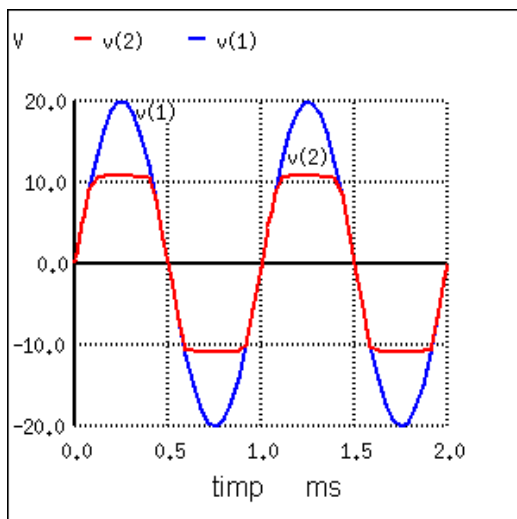
Prin urmare, dacă rezistența sarcini este exact 38,89 kΩ, vom avea o cădere de tensiune de 12,6 V la bornele sale, cu sau fără diodă. Orice rezistența de sarcină mai mică decât această valoare va duce la o cădere de tensiune mai mică de 12,6 V, cu sau fără diodă. Dacă inserăm și dioda Zener conform configurației inițiale, căderea de tensiune maximă pe sarcină va fi stabilizată la o valoare maximă de 12,6 V pentru oricare sarcină mai mare decât 38,89 kΩ.

Cu valoarea inițială a rezistorului serie de 1 Ω, circuitul putea să stabilizeze tensiunea chiar și pentru o sarcină mult mai mică, de 500 Ω. Ceea ce vedem este un compromis între puterea disipată și valoarea acceptabilă a sarcinii. Cu cât rezistorul serie este mai mare și puterea disipată este mai mică, cu atât valoarea minimă a rezistenței sarcinii trebuie să fie mai mare. Dacă vrem să stabilizăm tensiunea pentru o sarcină mică (rezistență mică), circuitul trebuie astfel conceput încât să suporte puteri mari de disipație.

### Circuit limitator cu diode Zener



Un circuit limitator ce „taie” vârfurile formei de undă aproximativ la tensiunea Zener a diodelor, este prezentat în figura alăturată. Circuitul este format din două diode Zener conectate spate-în-spate. Rolul rezistorului este de limitare a curentului prin diode, pentru protecția acestora.

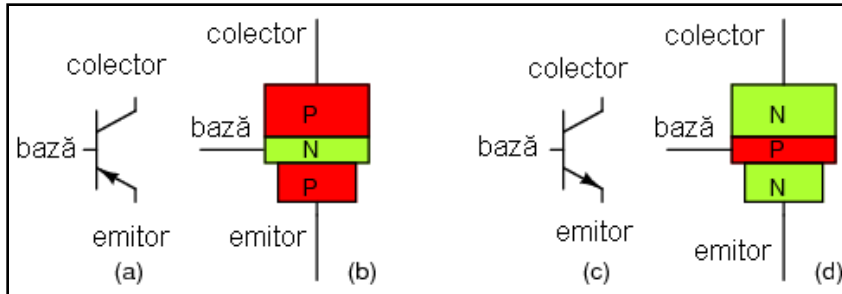


Tensiunea de străpungere pentru cele două diode este fixată la 10 V. Acest lucru duce la tăierea formei de undă la aproximativ 10 V. Diodele, puse spate-în-spate, taie ambele vârfuri. Pentru semi-alternața pozitivă, dioda de sus este polarizată invers. Căderea de tensiune pe dioda de jos este 0,7 V, fiind polarizată direct. Astfel, tăierea exactă a formei de undă se realizează în jurul valorii de 10,7 V. Același lucru este valabil și pentru semi-alternața negativă (-10.7 V).

## 04 - Tranzistorul

### 01. Tranzistorul - introducere

#### Structură și definiție

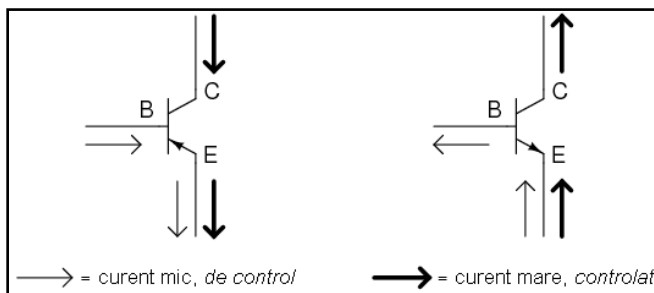


Un tranzistor bipolar cu joncțiune (BJT) este alcătuit din trei straturi de materiale semiconductoare, fie de tipul PNP, fie de tipul NPN. Fiecare strat are un nume specific și un contact pentru conexiunea în circuit.

#### Diferența dintre tranzistorul PNP și NPN

Diferența funcțională dintre tranzistorul PNP și NPN, este modul de polarizare corectă a joncțiunii. Indiferent de starea în care se află, direcțiile curenților și polaritățile tensiunii sunt exact invers la cele două tipuri de tranzistoare.

#### Utilizarea tranzistorilor



Tranzistorii sunt regulatori de curent controlați în curent. Cu alte cuvinte, tranzistorii limitează valoarea curentului prin ei cu ajutorul unui curent de control mai mic. Curentul principal, cel controlat, pleacă dinspre emitor spre colector (tipul PNP), iar curentul mai mic, de control, pleacă dinspre emitor spre bază (tipul NPN).

Pentru tranzistorul de tip PNP, direcția curenților este exact inversă. Atenție, folosim sensul real de deplasare al electronilor, prin urmare, săgețile indicate pe simbolurile elementelor semiconductoare vor indica tot timpul împotriva direcției de deplasare al electronilor.

#### Observații

Denumirea tranzistoarelor bipolare vine de la faptul că deplasarea electronilor prin ele are loc prin două tipuri de material semiconductor: P și N. Cu alte cuvinte, există două tipuri de purtători de sarcină, electroni și goluri.

După cum se poate observa, curentul de control și curentul controlat se însumează tot timpul pe emitor, iar deplasarea electronilor are loc tot timpul împotriva direcției săgeții. Aceasta este prima și cea mai importantă regulă a tranzistoarelor: toți curenții trebuie să meargă în direcțiile corecte pentru ca dispozitivul să funcționeze ca și regulator de curent. De obicei, curentul de control este denumit curent de bază, iar curentul controlat este denumit curent de colector, deoarece sunt singurii curenții ce trec pe la aceste terminale. Curentul pe emitor este suma curenților de bază și colector, în conformitatea cu legea lui Kirchhoff pentru curent.

Atunci când nu există niciun curent prin bază, tranzistorul se comportă precum un întrerupător deschis, iar trecerea curentului prin colector nu este posibilă. Un curent de bază pornește tranzistorul, acesta comportându-se precum un întrerupător închis și permițând trecerea unui curent proporțional prin colector. Curentul de colector este limitat de curentul bazei, indiferent de valoarea căderii de tensiune pe colector.

## 02. Tranzistorului ca și întrerupător

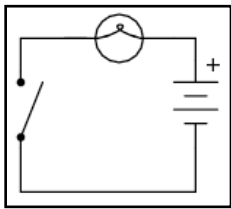
- Tranzistoarele pot fi folosite ca și întrerupătoare pentru controlul puterii de curent continuu asupra sarcinii. Curentul controlat trece prin emitor-colector; curentul de control trece prin emitor-bază
- Când curentul printr-un tranzistor este zero, spunem că acesta este *blocat*
- Când curentul printr-un tranzistor este maxim, spunem că acesta este *saturat*

### Scop

Deoarece curentul colectorului tranzistorului este limitat proporțional de curentul bazei, acesta poate fi folosit pe post de întrerupător controlat în curent. O cantitate relativ mică de electroni, prin bază, poate exercita un control asupra unei cantități mult mai mari de electroni prin colector.

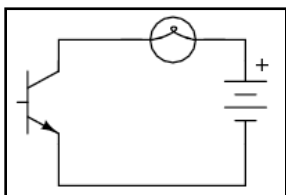
### Exemplu - controlul pornirii/opririi unei lămpi

#### Întrerupător simplu



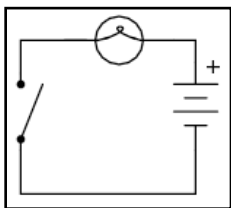
Să presupunem că avem o lampă pe care vrem să o pornim/oprim cu ajutorul unui întrerupător.

### Tranzistor NPN



Pentru exemplificare, să inserăm acum un tranzistor în locul întrerupătorului. Țineți minte, curentul controlat trebuie să treacă prin tranzistor de la colector spre emitor. Din moment ce curentul controlat este cel prin lampă, trebuie să poziționăm colectorul și emitorul tranzistorului în locul contactelor întrerupătorului. Trebuie de asemenea să ne asigurăm că direcția curentului prin tranzistor este împotriva săgeții emitorului, pentru a ne asigura că joncțiunea tranzistorului este polarizată corect.

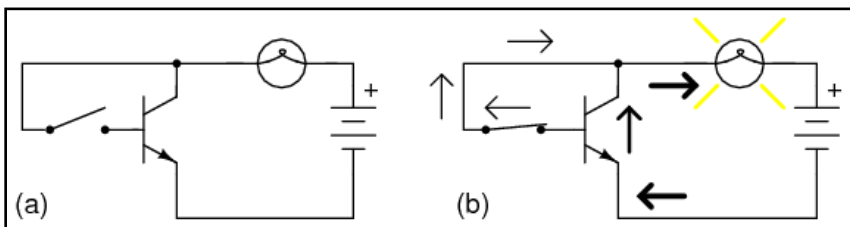
### Tranzistor PNP



Putem de asemenea să folosim și un tranzistor PNP pentru realizarea acestui circuit. Alegerea făcută între PNP și NPN este complet arbitrară, deși, pentru exemplificarea funcționării tranzistoarelor, vom folosi în continuare cele de tipul NPN.

### Adăugarea unui întrerupător între bază și colector

Întorcându-ne la exemplu cu tranzistorul NPN, ne găsim în situația în care mai trebuie să adăugăm ceva în circuit pentru a avea un curent de bază prin tranzistor. Fără o conexiune la terminalul bazei, curentul prin aceasta va fi zero, iar tranzistorul va fi închis, ceea ce înseamnă că lampa va fi tot timpul oprită. Țineți minte, că pentru un tranzistor NPN, direcția curentului de bază trebuie să fie dinspre emitor spre bază (împotriva direcției săgeții).



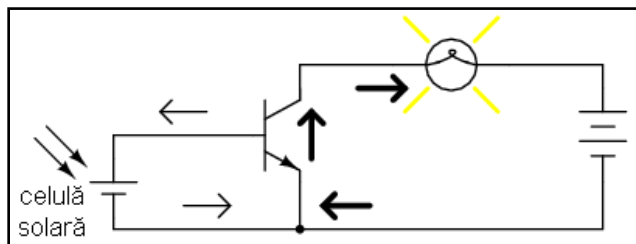
Probabil că cel mai simplu lucru ar fi să conectăm un întrerupător între baza și colector, precum în figura alăturată (a).

### Tranzistor blocat și tranzistor saturat

Dacă întrerupătorul este deschis (a), baza tranzistorului nu va fi conectată la baterie și nu va exista niciun curent prin ea. În această situație, spunem că tranzistorul este blocat. Dacă întrerupătorul este închis (b), va exista un

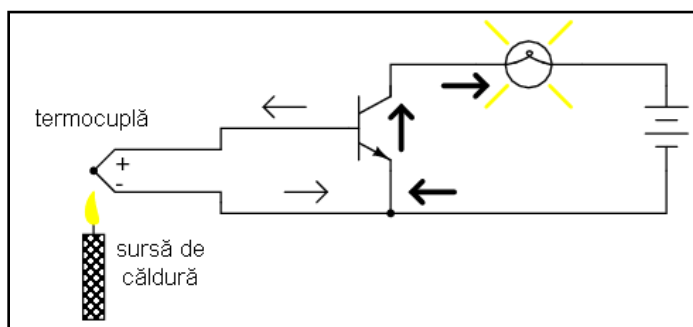
curent dinspre emitor spre bază, prin întrerupător și prin lampă (partea stângă) înapoi la terminalul pozitiv al bateriei. Acest curent de bază va permite trecerea unui curent mult mai mare dinspre emitor spre colector, iar lampa se va aprinde. În această situație, în care curentul prin circuit este maxim, spunem că tranzistorul este saturat.

## Surse de polarizare a tranzistorului

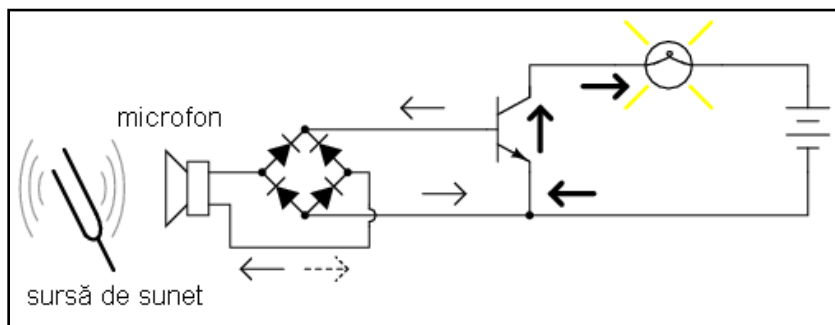


și pornirea tranzistorului.

Putem însă folosi ceva total diferit pentru a controla lampa (pornit/oprit). De exemplu, putem folosi o pereche de celule solare pentru generarea unei tensiuni de 1 V, pentru depășirea tensiunii directe de 0,7 V ( $V_{BE}$ ) între bază și emitor, tensiune necesară pentru apariția curentului de bază



Sau putem folosi mai multe termocuple conectate în serie pentru generarea curentului bazei necesar pornirii tranzistorului.



Putem folosi chiar și un microfon, care cu o tensiune și un curent (printr-un amplificator) suficient de mari, ar putea pune tranzistorul în funcțiune. Desigur, ieșirea microfonului va trebui redresată din curent alternativ în curent continuu, pentru ca joncțiunea emitor-bază să fie tot

timpul polarizată direct.

## Observații

Ceea ce vrem să demonstrăm, este că orice sursă de tensiune în curent continuu, capabilă să pornească tranzistorul, poate fi folosită pentru controlul lămpii, iar puterea acestei surse de tensiune trebuie să fie doar o fracțiune din puterea circuitului controlat. Tranzistorul în acest caz nu se comportă doar ca un întrerupător, ci și ca un amplificator: folosind un semnal de putere relativ mică pentru controlul unui semnal de putere relativ mare.

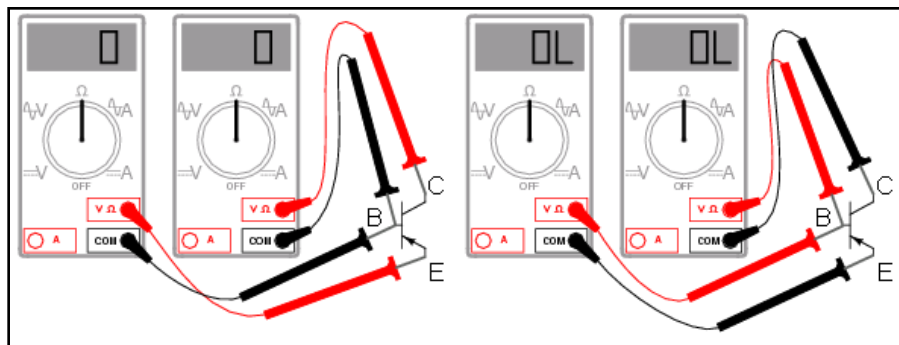
Atenție, puterea necesară aprinderii lămpii este furnizată de bateria din circuitul principal, și nu de celula solară, termocuplă sau microfon. Acestea din urmă doar controlează puterea bateriei pentru aprinderea lămpii.

### 03. Verificarea tranzistorului cu ohmmetrul

- Tranzistorul se comportă precum o pereche de diode conectate spate-în-spate atunci când este verificat cu ajutorul unui multimetru pe post de ohmmetru sau cu funcția „verificare diodă”
- Joncțiunea emitor-bază de tip P-N, are o tensiune directă puțin mai mare decât joncțiunea colector-bază de tip P-N, datorită dopajului mai puternic al emitorului. Acest lucru poate fi exploatat pentru identificarea tranzistorilor

#### Comportamentul tranzistorului

Tranzistorii se comportă precum două diode puse spate-în-spate atunci când sunt verificați cu ajutorul multimetrlui pe post de ohmmetru sau cu funcția „verificare diodă”, datorită celor trei straturi PNP sau NPN.



Tranzistorul alăturat este de tip PNP; sonda neagră este terminalul negativ (-) iar cea roșie corespunde terminalului pozitiv (+)

Dacă multimetru este echipat cu funcția „verificare diodă”, putem folosi acea funcție pentru aflarea

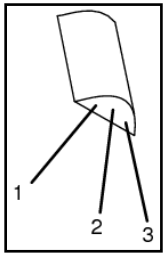
tensiunii de polarizare directă a joncțiunii PN. În cazul unui tranzistor NPN, indicația aparatului de măsură va fi exact invers.

#### Determinarea tipului și contactelor unui tranzistor bipolar nemarcat

Dacă folosim funcția „verificare diodă”, vom vedea că joncțiunea emitor-bază are o tensiune directă mai mare decât joncțiunea colector-bază. Această diferență a tensiunii directe se datorează diferenței concentrațiilor de dopaj dintre regiunile emitorului și colectorului: emitorul este un material semiconductor dopat mult mai puternic decât colectorul, ceea ce duce la producerea unei tensiuni directe mult mai mari a joncțiunii cu baza.

Cunoscând acest lucru, putem determina contactele unui tranzistor nemarcat. Acest lucru este important deoarece nu există un standard cu privire la modul de împachetare al tranzistorilor. Desigur, toți tranzistorii bipolari au trei contacte, dar poziție lor fizică în cadrul tranzistorului poate fi diferită de la un producător la altul.

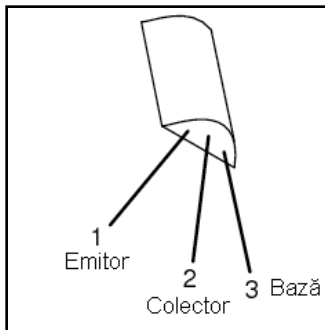




Să presupunem că luăm un tranzistor la întâmplare, nemarcat, și începem să măsurăm cu ajutorul multimetrului setat pe funcția „verificare diodă”. După măsurarea tuturor combinațiilor de contacte, ajungem la următoarele rezultate:

|                                      |
|--------------------------------------|
| între punctele 1(+) și 2(-): OL      |
| între punctele 1(-) și 2(+): OL      |
| între punctele 1(+) și 3(-): 0.655 V |
| între punctele 1(-) și 3(+): OL      |
| între punctele 2(+) și 3(-): 0.621 V |
| între punctele 2(-) și 3(+): OL      |

Singurele combinații de contacte pe care putem măsura tensiunea sunt 1 și 3 (sonda roșie pe 1 și sonda neagră pe 3), și 2 și 3 (sonda roșie pe 2 și sonda neagră pe 3). Aceste două citiri trebuie să indice tensiunea de polarizare directă a joncțiunii emitor-bază (0,655 V) și a joncțiunii colector-bază (0,621).



Putem acum căuta contactul comun ambelor seturi de măsurători „conductive”. Acest contact trebuie să fie baza tranzistorului, deoarece acesta este singurul strat, al dispozitivului format din trei straturi, ce este comun ambelor seturi de joncțiuni PN (emitor-bază și colector-bază). În acest exemplu, contactul căutat este numărul 3, fiind comun combinațiilor 1-3 și 2-3. În ambele măsurători, sonda *neagră* (-) a aparatului de măsură a venit în contact cu contactul 3, ceea ce ne spune că baza acestui tranzistor este realizată dintr-un material semiconductor de tip N. Prin urmare,

tranzistorul în cauză este un tranzistor bipolar de tip PNP, cu baza - contactul 3, emitor - contactul 1 și colector - contactul 2.

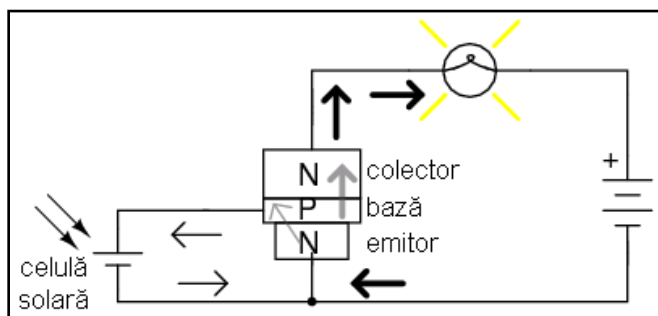
După cum putem observa, baza tranzistorului în acest caz nu este contactul din mijloc al tranzistorului, așa cum ne-am aștepta. Acest lucru se întâmplă foarte des în practică. Singura modalitate prin care ne putem asigura de corectitudinea contactelor este prin verificarea cu ajutorului unui multimetru, sau cu ajutorul catalogului producătorului.

## Determinarea integrității unui tranzistor

Știind faptul că un tranzistor se comportă precum două diode așezate spate-în-spate la testarea conductivității cu un aparat de măsură, dacă în urma măsurătorilor descoperim că există continuitate în mai mult sau mai puțin de două dintre cele șase combinații de contacte, putem spune cu siguranță că tranzistorul este defect, sau ca dispozitivul aflat sub inspecție nu este un tranzistor și un cu totul alt dispozitiv!.

## Modul de funcționare al tranzistorului

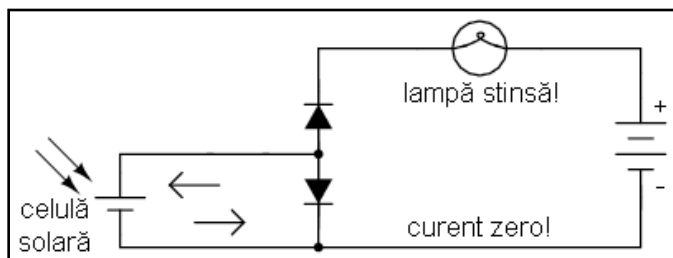
Totuși, modelul „celor două diode” nu poate explica funcționarea tranzistorului ca și dispozitiv de amplificare a semnalului.



Pentru ilustrarea acestui paradox, putem examina circuitul alăturat, folosind diagrama fizică a tranzistorului pentru ușurarea explicațiilor.

Săgeata diagonală gri are direcția deplasării electronilor prin joncțiunea emitor-bază. Acest lucru este clar, din moment ce electronii se deplasează dinspre emitorul de tip N spre baza de tip P: joncțiunea este polarizată direct. Totuși, joncțiunea bază-colector se comportă mai ciudat. Săgeata îngroșată verticală indică direcția de deplasare a electronilor dinspre bază spre colector. Din moment ce baza este realizată dintr-un material de tip P iar colectorul dintr-un semiconductor de tip N, direcția de deplasare a electronilor este inversă față de direcția normală de deplasare printr-o joncțiune P-N! În mod normal, o joncțiune P-N nu ar permite deplasarea inversă a electronilor, cel puțin nu fără a oferi o opoziție extrem de mare.

Totuși, un tranzistor saturat prezintă o opoziție foarte mică față de deplasarea electronilor de la emitor la colector, lucru demonstrat și prin faptul că lampa este aprinsă!



Prin urmare, modelul celor două diode puse spate-înspate poate fi folosit doar pentru înțelegerea modului de verificare al tranzistorilor cu ajutorul aparatului de măsură, nu și pentru înțelegerea funcționării acestora în circuitele practice.

#### 04. Zona activă de funcționare a tranzistorului

- Tranzistorul se află în zona activă de funcționare, atunci când funcționează între starea de blocare și cea de saturație
- Curentul bazei regulează curentul colectorului. Acest lucru înseamnă că prin colector nu poate trece un curent mai mare decât valoarea permisă de către curentul bazei
- Raportul dintre curentul colectorului și curentul bazei poartă numele de *factor beta* sau *factor de amplificare în curent* al tranzistorului, și se notează cu  $\beta$  sau  $h_{fe}$
- $\beta$  variază pentru fiecare tranzistor în parte

- $\beta$  variază pentru diferite condiții de operare

## Definiții

### Tranzistor blocat

Când baza nu este polarizată, și prin urmare nu există curent între emitor și colector, spunem că tranzistorul este blocat.

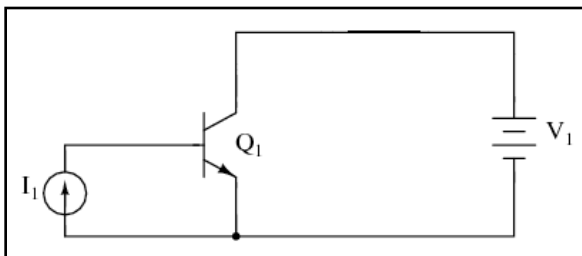
### Tranzistor saturat

Invers, când între emitor și colector trece cantitatea maximă de curent permisă de colector și de sursa de putere, spunem că tranzistorul este saturat.

### Tranzistor în zona activă de funcționare

Dar, în cazul în care curentul controlat este mai mare decât zero dar este sub valoarea maximă admisă de sursă și de circuit, tranzistorul va funcționa între zonele de blocare și saturare; în acest caz, spunem că tranzistorul funcționează în zona activă.

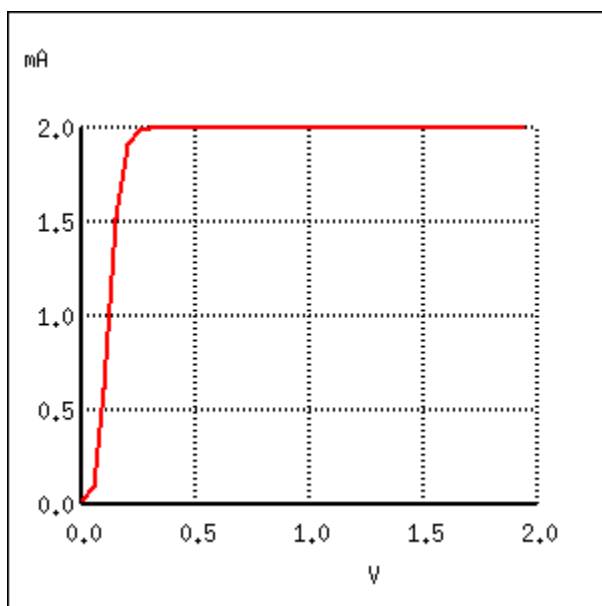
## Exemplu



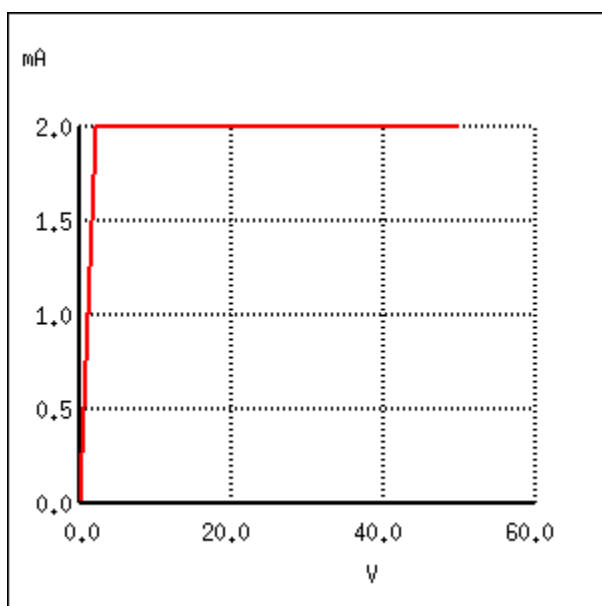
Să considerăm circuit teoretic alăturat.

Circuitul este format dintr-un tranzistor ( $Q_1$ ) de tip NPN, alimentat de o baterie ( $V_1$ ) și controlat printr-o sursă de curent ( $I_1$ ). Sursa de curent va genera un curent fix, generând o tensiune mai mică sau mai mare pentru asigurarea acestui curent prin ea.

### Variația curent-tensiune



### Creșterea tensiunii bateriei



Peste această tensiune „critică”, valoarea tensiunii nu mai are nicio importanță pentru valoarea curentului colectorului. Tranzistorul se comportă în acest caz precum un regulator de curent, permițând un curent de exact 2 mA prin colector, și nu mai mult.

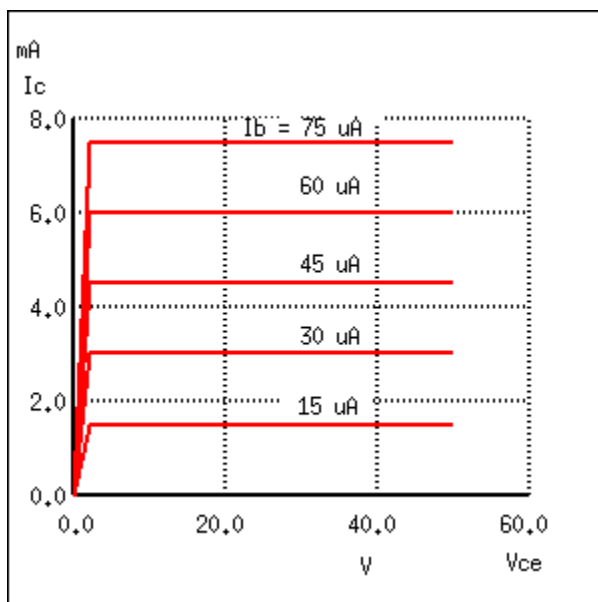
### Creșterea curentului bazei

În această simulare, vom seta valoarea sursei de curent la 20  $\mu$ A și vom varia tensiunea sursei ( $V_1$ ) între 0 V și 2 V; vom observa apoi curentul ce trece prin sursă.

Un curent de bază constant de 20  $\mu$ A controlează un curent maxim de 2 mA prin colector, de exact 100 de ori mai mare. Pentru această valoare a curentului de bază, curentul prin colector nu poate crește mai mult. Putem observa de pe grafic că forma curbei este plată în afară de prima porțiune, porțiune unde tensiunea bateriei ( $V_1$ ) crește de la 0 V la 0,25 V. În acest interval, curentul prin colector crește rapid de la 0 A la 2 mA.

Să observăm ce se întâmplă dacă lărgim plaja valorilor de tensiune a bateriei, de la intervalul 0 - 2 V, la intervalul 0 - 50 V, menținând un curent de bază constant de 20  $\mu$ A.

După cum era de așteptat, rezultatul este același. Curentul prin colector nu poate trece de 2 mA (de exact 100 de ori valoarea curentului bazei!), cu toate că tensiunea bateriei ( $V_1$ ) variază de la 0 V până la 50 V. Putem trage concluzia că tensiunea dintre colector și emitor nu are niciun efect asupra curentului din colector, decât la valori foarte mici (puțin peste 0 volți).

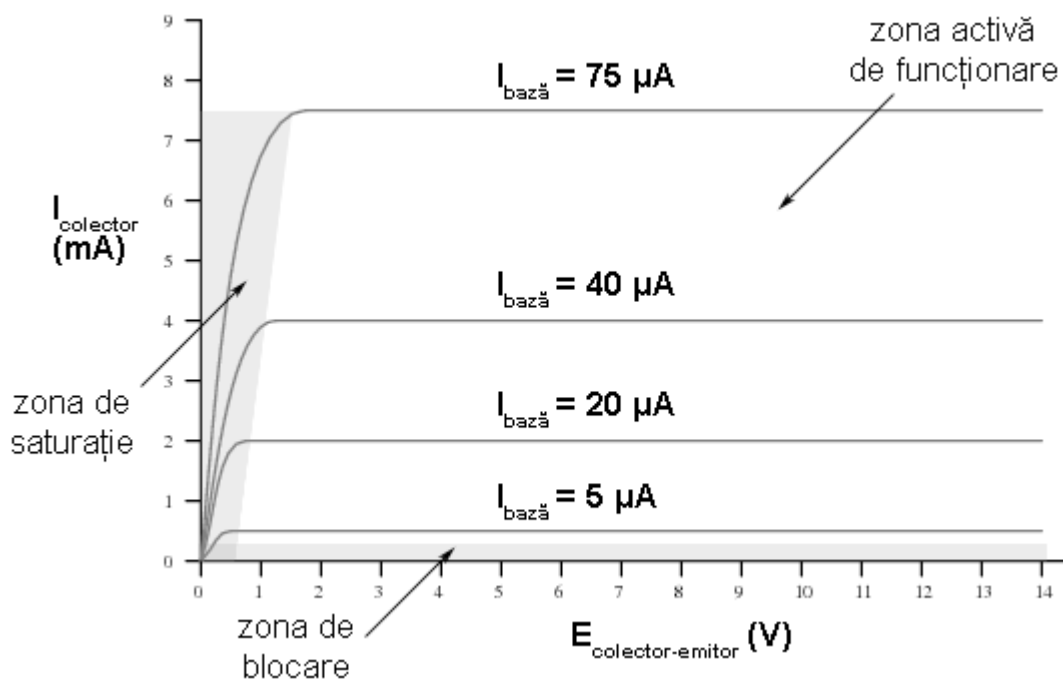


Următorul pas constă în creșterea curentului bazei, de la 20  $\mu A$  la 75  $\mu A$ , menținând tensiunea bateriei în intervalul 0 - 50 V.

Pentru curentul maxim de bază, 75  $\mu A$ , curentul prin colector este (din nou) de 100 de ori mai mare, 7,5 mA și din nou curba curent-tensiune este plată, cu excepția primei părți. Putem trage concluzia că factorul decisiv ce contribuie la valoarea curentului prin colector este curentul bazei, tensiunea bateriei ( $V_1$ ) fiind irelevantă atâta timp cât se situează peste o anumită valoare minimă.

## Curbe caracteristice

Această relație dintre curent și tensiune este fundamental diferită față de relația curent-tensiune a rezistorului. În cazul rezistorului, curentul crește liniar pe măsură ce căderea de tensiune la bornele sale crește. În cazul tranzistorului, curentul dinspre emitor spre colector are o valoare limită fixă, valoare peste care nu poate crește, indiferent de căderea de tensiune dintre emitor și colector.



O reprezentare a tuturor acestor curbe (variații) curent-tensiune pe un singur grafic, pentru un anumit tranzistor, poartă numele de curbe caracteristice.

Pentru funcționarea corectă a tranzistorului, acesta trebuie să se afle tot timpul în zona activă de funcționare (pentru amplificatoare clasa A), nu în cea de blocare și nici în cea de saturație. Țineți minte că tranzistorul este un dispozitiv controlat în curent, prin urmare, dacă ar funcționa în zona de saturație, acesta nu ar mai putea fi controlat prin intermediul curentului bazei; o creștere a curentului bazei, atunci când tranzistorul se află în zona de saturație, nu duce la o creștere a curentului colector-emitor, așa cum era de așteptat. În schimb, dacă tranzistorul se află în zona activă de funcționare, o creștere/scădere a curentului bazei duce la o creștere/scădere a curentului prin colector

### Observație

Trebuie înțeles faptul foarte important, că în graficul de mai sus, avem trei variabile: tensiunea colector emitor ( $E_{\text{colector-emitor}}$ ), curentul de la emitor la colector ( $I_{\text{colector}}$ ) și curentul bazei ( $I_{\text{bază}}$ ). Pentru fiecare variație a curentului de bază, de la 5  $\mu\text{A}$  la 20  $\mu\text{A}$  la 40 până la 75  $\mu\text{A}$ , vom avea o altă curbă caracteristică, și practic, pot exista o infinitate de curbe între aceste valori.

### Factorul beta (factorul de amplificare în curent)

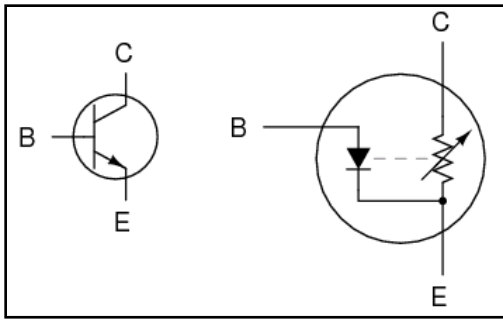
Din moment ce tranzistorul se comportă precum un regulator de curent, limitând curentul colectorului printr-o proporție fixă față de curentul bazei, putem exprima această caracteristică standard a tranzistoarelor printr-un raport, cunoscut sub numele de factor beta sau factor de amplificare în curent, și simbolizat prin litera grecească  $\beta$ , sau prin  $h_{fe}$ :

$$\beta = \frac{I_{\text{colector}}}{I_{\text{bază}}}$$

Factorul  $\beta$  al oricărui tranzistor este determinat de modul său de fabricare, și este o mărime ce nu poate fi modificată după confecționarea acestuia. Este foarte greu să găsim doi tranzistori, de același tip, care să posede un factor  $\beta$  identic, datorită variabilelor fizice ce afectează valoarea acestuia. Dacă vrem să construim un circuit în care avem nevoie de tranzistori cu  $\beta$  egali, aceștia se pot cumpăra în seturi, la un preț mai mare. Dar, construirea unor circuite electronice cu astfel de dependențe nu este indicată.

$\beta$  nu rămâne constant pentru toate condițiile de operare. Pentru un tranzistor fizic, raportul  $\beta$  poate varia cu un factor mai mare decât trei între limitele curentului de operare. De exemplu, un tranzistor marcat cu  $\beta = 50$ , poate în realitate să prezinte un raport  $I_c / I_b$  de 30 sau chiar de 100, în funcție de valoarea curentului prin colector, temperatura tranzistorului, frecvența semnalului amplificat, plus alte variabile. Deși teoretic vom considera că  $\beta$  fiind constant pentru oricare tranzistor, în realitate acest lucru nu este valabil!

### Modelul diodă-potențiometru al tranzistorului

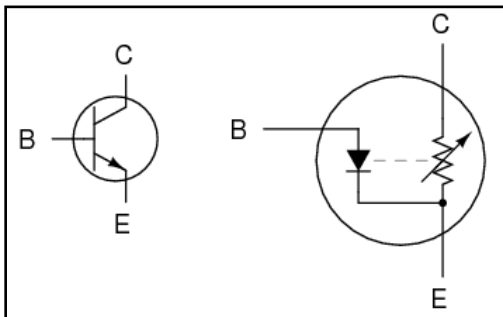


Pentru a înțelege mai ușor modul de funcționare al tranzistorului, putem considera modelul teoretic alăturat.

Conform acestui model, tranzistorul este o combinație dintre o diodă și un potențiomtru. Curentul prin dioda bază-emitor controlează rezistența potențiometrului colector-emitor, lucru evidențiat prin linia întreruptă dintre cele două componente, ceea ce duce la controlul curentului prin colector. Tranzistorul de sus este de tipul NPN.

Tranzistorul de tipul PNP, va avea dioda bază-emitor inversată.

### Modelul diodă-sursă-de-curent al tranzistorului



Un model mult mai precis însă, este cel din figura alăturată. Conform acestui model, tranzistorul este o combinație dintre o diodă și o sursă de curent, ieșirea sursei de curent fiind un multiplu (raportul beta) al curentului de bază. Acest model descrie mult mai precis caracteristica intrare/ieșire a tranzistorului: curentul de bază stabilește o anumit curent în colector, și nu o anumită rezistență colector-emitor, precum în cazul precedent.

Din păcate, folosirea unei surse de curent îi poate induce pe cei mai ne-experimentați în eroare; un tranzistor nu este în niciun caz o sursă de energie electrică, dar pe model, faptul că sursa de energie este externă tranzistorului, nu este aparentă.

## 05. Punctul static de funcționare al tranzistorului

- Punctul static de funcționare reprezintă valoarea curentului bazei pentru care tranzistorul funcționează corect
- Pentru amplificatorul de clasă A, punctul static de funcționare se află la jumătatea distanței dintre punctul de blocare și zona de saturație a drepte de sarcină

### Definiție

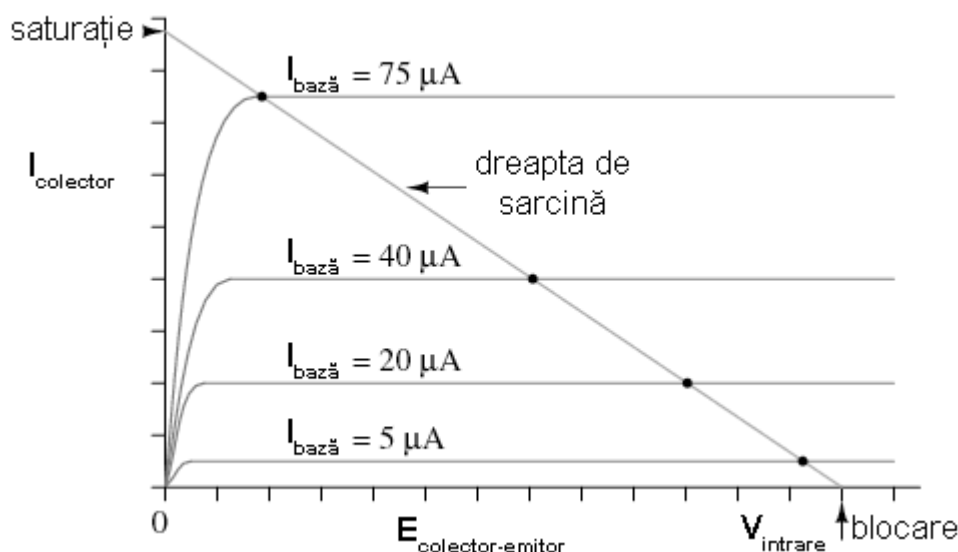
Punctul static de funcționare al unui tranzistor reprezintă coordonatele de funcționare ale tranzistorului în zona activă de funcționare.

## Starea și curentul de repaus

O stare de repaus se caracterizează prin faptul că semnalul de intrare al circuitului este zero. Curentul de repaus, de exemplu, este valoarea curentului dintr-un circuit, atunci când tensiunea aplicată la intrare este zero. Tensiunea de polarizare directă (curent continuu) forțează un nivel diferit al curentului colector-emitor prin tranzistor pentru un semnal de intrare zero, față de cazul în care tensiunea de polarizare directă nu ar exista. Prin urmare, valoarea tensiunii de polarizare într-un circuit de amplificare, determină valorile de repaus ale acestuia.

Pentru un amplificator de clasa A, curentul de repaus trebuie să fie exact între valoarea sa de saturație și valoarea sa de blocare. Amplificatoarele de clasa B și C au un curent de repaus zero, din moment ce acestea sunt proiectate pentru funcționarea în zona de blocare, atunci când nu este aplicat niciun semnal la intrare. Amplificatoarele de clasa AB, au un curent de repaus foarte mic, puțin peste zona de blocare.

## Trasarea dreptei de sarcină

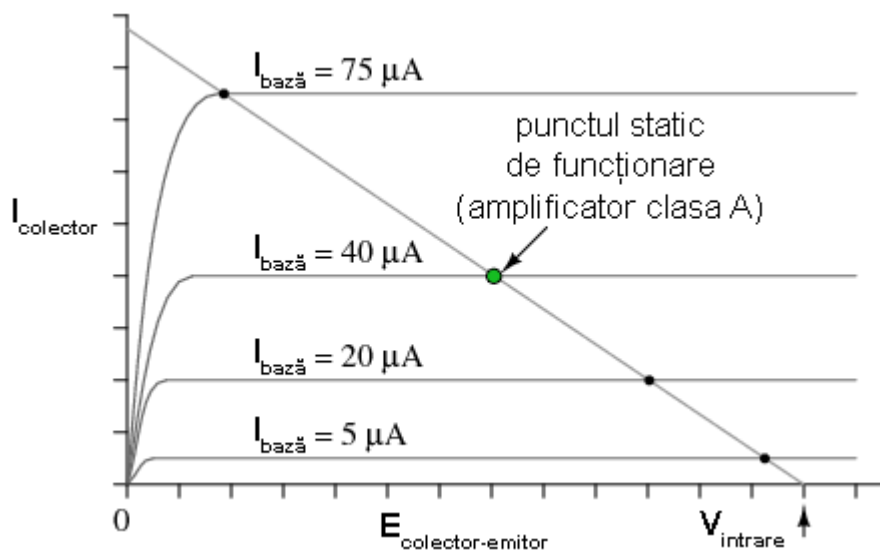


Pentru a ilustra grafic acest lucru, se trasează o dreaptă de sarcină peste curbele caracteristice ale tranzistorului, pentru ilustrarea modului de funcționare atunci când tranzistorul este conectat la o sarcină de o anumită valoare.

O dreaptă de sarcină reprezintă graficul tensiunii colector-emitor pentru un anumit domeniu al curenților de colector. În partea din dreapta jos, tensiunea este maximă și curentul este zero, reprezentând o condiție de blocare. În stânga sus, tensiunea este zero, iar curentul este maxim, reprezentând o condiție de saturație. Punctele de intersecție ale dreptei cu curbele caracteristice, reprezintă condiții de operare reale ale tranzistorului pentru acei curenți de bază.

## Reprezentarea punctului static de funcționare

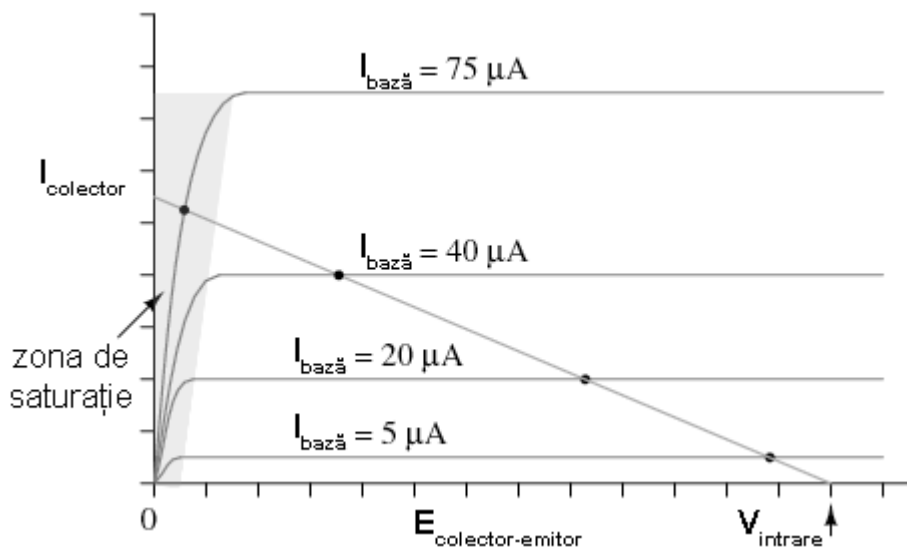




Punctul static de funcționare poate fi reprezentat pe acest grafic printr-un simplu punct la intersecția unei curbe caracteristice cu dreapta de sarcină. Pentru un amplificator de clasa A, punctul static de funcționare se va situa pe mijlocul dreptei de sarcină.

În acest caz particular, punctul static de funcționare se află pe curba de 40  $\mu\text{A}$  a curentului de bază.

### Modificarea rezistenței sarcinii

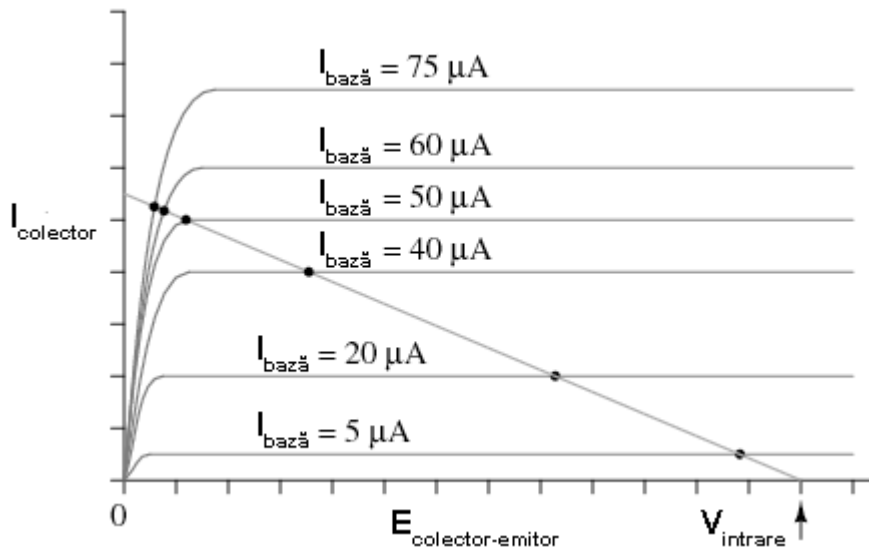


Dacă schimbăm însă rezistența sarcinii acestui circuit cu o rezistență mai mare, acest lucru va afecta panta dreptei de sarcină, întrucât o rezistență de sarcină mai mare va limita curentul maxim prin colector la saturație, dar nu va modifica tensiunea de blocare colector-emitor. Grafic, rezultatul este o dreaptă de sarcină cu un punct de saturație (stânga sus) diferit, dar cu un punct de blocare (dreapta jos) identic.

Putem observa că în această situație, dreapta de sarcină nu mai intersectează curba caracteristică de 75  $\mu\text{A}$  pe porțiunea sa orizontală. Acest lucru este foarte important de realizat, deoarece porțiunea ne-orizontală a curbei

caracteristice reprezintă, după cum am mai menționat, o condiție de saturație a tranzistorului (curentul colector-emitor nu mai poate fi controlat prin intermediul curentului bazei). Prin urmare, pentru un curent al bazei de  $75 \mu\text{A}$ , tranzistorul (amplificatorul) va fi saturat.

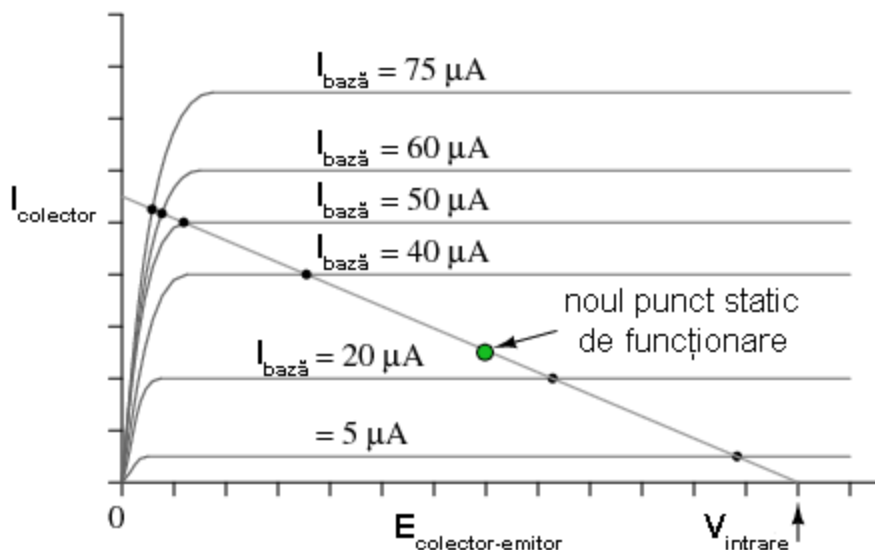
### Adăugarea de noi curbe caracteristice



Pentru menținerea funcționării liniare (fără distorsiuni), amplificatoarele cu tranzistori nu ar trebui să funcționeze în zona de saturație, adică, acolo unde dreapta de sarcină nu intersectează curbele de sarcină pe porțiunea lor orizontală. Vom mai adăuga câteva curbe caracteristice pe grafic, pentru a putea observa până unde putem „împinge” tranzistorul prin creșterea curentului bazei fără ca acesta să intre în zona de saturație.

Se poate vedea de pe grafic că cel mai înalt punct de pe dreapta de sarcină ce intersectează curbele de sarcină ale tranzistorului pe porțiunea orizontală, este pentru curba de  $50 \mu\text{A}$  (curentul de bază). Acest punct ar trebui considerat nivelul maxim al semnalului de intrare pentru funcționarea amplificatorului de clasă A.

### Alegerea unui nou punct static de funcționare



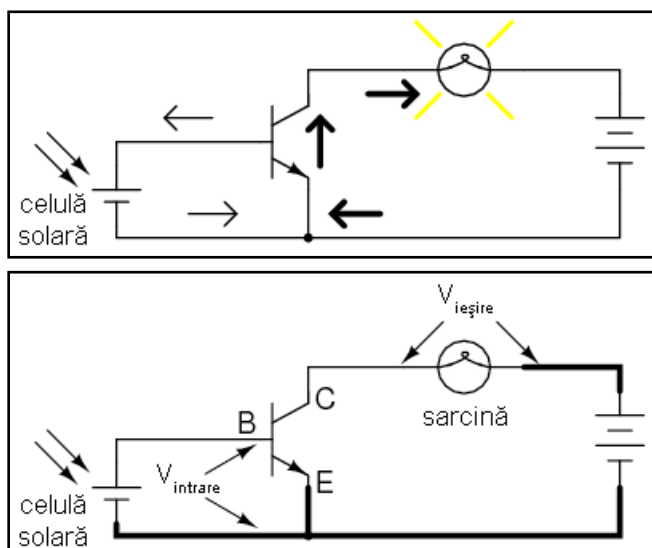
De asemenea, tot pentru funcționarea corectă a amplificatorului de clasă A, tensiunea de polarizare ar trebui să fie astfel încât punctul static de funcționare să se regăsească la mijlocul drumului între punctul maxim de funcționare și punctul de blocare:

Astfel, noul punct static de funcționare, ales pe cale grafică, ne spune că, pentru funcționarea corectă a amplificatorului de clasă A, pentru sarcina în cauză, curentul bazei trebuie să aibă o valoare de aproximativ 25  $\mu\text{A}$ . Cunoscând această valoare, putem determina mai apoi și tensiune de polarizare directă în curent continuu.

## 06. Conexiunea emitor comun

- Denumirea de *emitor-comun* vine de la faptul că tensiunile de intrare și de ieșire ale tranzistorului au ca și punct comun contactul emitorului, ne-luând în considerare alte surse de putere
- Tranzistorii sunt în principiu dispozitive de curent continuu: nu pot conduce curenți în direcție inversă la polarizarea inversă. Pentru a funcționa cu semnale de curent alternativ, semnalul de intrare (alternativ) trebuie să conțină și o componentă de curent continuu pentru menținerea tranzistorului în zona activă de funcționare pe toată durata perioadei semnalului de intrare
- Tensiunea de ieșire, între emitor și colector, a unui amplificator în conexiune emitor comun, este defazată cu  $180^\circ$  față de tensiunea de intrare. Amplificatorul emitor comun mai este cunoscut din această cauză și ca amplificator inversor
- Amplificarea în curent a tranzistorului emitor-comun, cu sarcina conectată în serie cu colectorul, este egală cu  $\beta$
- Amplificarea în tensiune a tranzistorului emitor-comun este dată de relația  $A_V = \beta (R_{ieșire} / R_{intrare})$ , unde  $R_{ieșire}$  reprezintă rezistorul conectat în serie cu colectorul, iar  $R_{intrare}$  reprezintă rezistorul conectat în serie cu baza tranzistorului

## Definiție



Să reluăm exemplu studiat în secțiunile precedente, unde tranzistorul a fost folosit pe post de întrerupător.

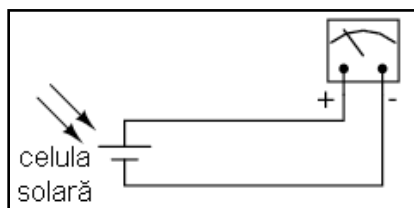
Această configurație poartă numele de conexiune emitor comun datorită faptului că, ignorând bateria de alimentare, atât pentru sursa de semnal (celula solară) cât și pentru sarcină, contactul emitorului reprezintă un punct comun celor două.

În exemplele precedente, am considerat că tranzistorul funcționează saturat (la capacitate maximă). Cunoscând faptul că, curentul prin colector poate varia în funcție de curentul bazei, putem controla luminozitatea lămpii din acest circuit în funcție de expunerea celulei solare la lumină. Când intensitatea luminoasă ce cade pe celula solară este minimă, lampa va lumina foarte slab. Pe măsură ce intensitatea luminoasă ce cade pe celula solară crește, va crește și intensitatea luminoasă a lămpii.

## Exemplu - măsurarea intensității luminoase

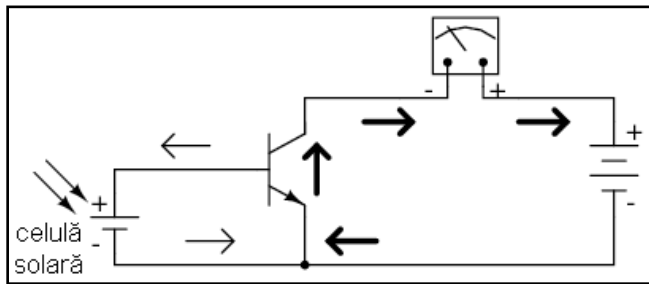
Să presupunem acum că am dori să măsurăm intensitatea luminoasă cu ajutorul celulei solare. Vrem să măsurăm de fapt intensitatea razei incidente pe celula solară folosind curentul său de ieșire conectat la un instrument de măsură (ampermetru).

### Conectarea directă la borne a unui ampermetru



Una dintre soluții ar consta în conectarea ampermetrului direct la celula solară. Cu toate că această metodă funcționează pentru măsurători moderate ale intensităților, ea nu poate fi folosită atunci când intensitatea luminoasă scade sub o anumită valoare, datorită faptului că celula solară trebuie să alimenteze și ampermetrul iar precizia sistemului scade foarte mult în acest caz. Să presupunem în continuare că în exemplul de mai sus, suntem interesați de măsurători extrem de scăzute ale intensităților luminoase. În acest caz, trebuie să căutăm o altă soluție.

### Utilizarea unui tranzistor

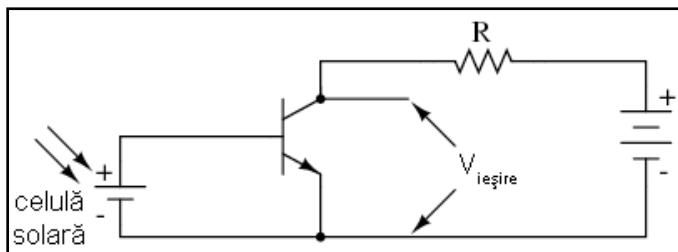


Soluția cea mai la îndemână este utilizarea unui tranzistor pentru amplificarea curentului generat de celula solară. Acest lucru înseamnă că va exista o cantitate mult mai mare de curent disponibilă pentru deviația acului indicator al aparatului de măsură, pentru o valoare mult mai mică a curentului generat de celula solară.

De această dată, curentul prin circuit (și prin aparatul de măsură) va fi de  $\beta$  ori mai mare decât curentul prin celula solară. Pentru un tranzistor cu  $\beta = 100$ , acest lucru reprezintă o creștere substanțială a preciziei măsurătorii. Atenție însă, puterea adițională necesară funcționării aparatului de măsură este „colectată” de la bateria din dreapta, nu de către celula solară. Tot ceea ce realizează celula solară este controlul curentului bateriei pentru furnizarea unei puteri mai mari necesare funcționării aparatului de măsură, puterea ce nu ar fi putut fi generată de către celula solară însăși.

Deoarece tranzistorul este un dispozitiv de regulare a curentului, iar indicația aparatului de măsură depinde doar de curentul ce trece prin bobina acestuia, indicația aparatului de măsură va depinde doar de celula solară și nu de valoarea tensiunii generate de baterie. Acest lucru înseamnă că acuratețea măsurătorii realizată de acest circuit va fi independentă de condițiile bateriei, un lucru extrem de important! Tot ceea ce trebuie bateria să facă, este să genereze o anumită tensiune minimă și un curent suficient pentru funcționarea ampermetrului.

### Înlocuirea ampermetrului cu un rezistor



Configurația emitor comun mai poate fi folosită și pentru producerea unei tensiuni dependente de semnalul de intrare, în loc de curent. Să înlocuim așadar aparatul de măsură cu un rezistor și să măsurăm tensiunea dintre colector și emitor.

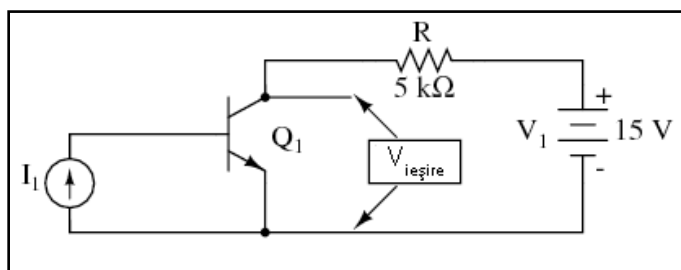
Când intensitatea luminoasă pe celula solară este zero, tranzistorul va fi blocat și se va comporta precum un întrerupător deschis între colector și emitor. Acest lucru va duce la apariția unei căderi de tensiune maxime între colector și emitor,  $V_{iesire}$ , tensiune egală cu tensiunea de la bornele bateriei.

Când intensitatea luminoasă pe celula solară este maximă, celula solară va duce tranzistorul în zona de saturație; acesta se va comporta precum un întrerupător închis între colector și emitor. Rezultatul va fi o cădere de tensiune minimă între colector și emitor. Totuși, această tensiune de saturație dintre colector și emitor este destul de mică, câteva zecimi de volți, în funcție de tranzistorul folosit.

### Amplificator inversor

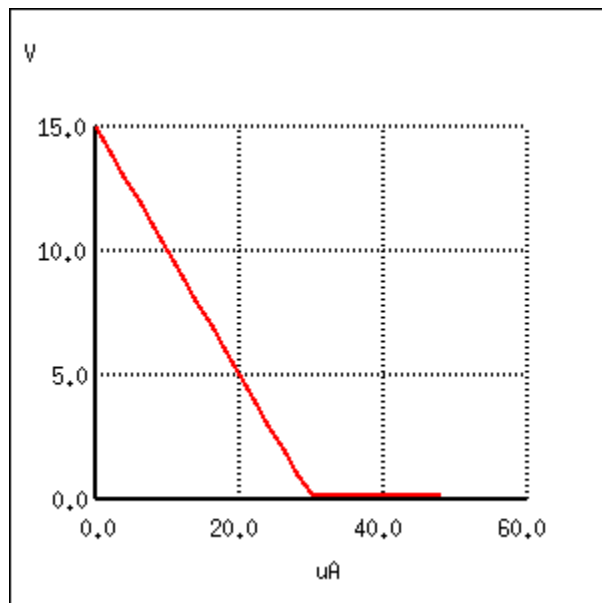
Pentru intensități luminoase ce se regăsesc între aceste valori (minim/maxim), tranzistorul va funcționa în zona activă, iar tensiunea de ieșire va fi undeva între zero volți și tensiunea bateriei. De menționat că tensiunea de ieșire a tranzistorului în configurație emitor comun este invers proporțională cu intensitatea semnalului de intrare. Cu alte cuvinte, tensiunea de ieșire scade cu creșterea semnalului de intrare. Din acest motiv, amplificatorul (cu tranzistor) în configurație emitor comun poartă numele de amplificator inversor.

### Exemplu



Să considerăm circuitul alăturat.

### Variația curent-tensiune



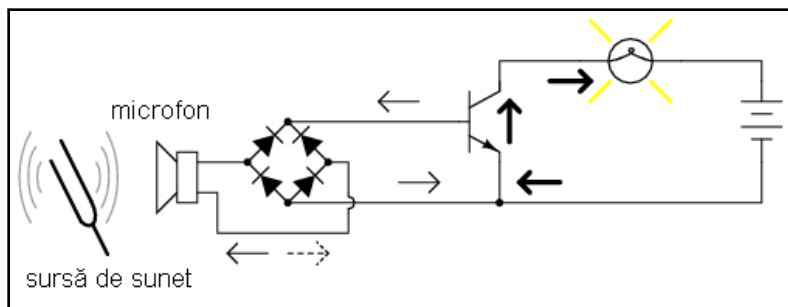
Graficul variației tensiune-curent este cel din figura alăturată (căderea de tensiune dintre colector și emitor și curentul bazei).

La începutul simulării, curentul generat de sursă (celula solară) este zero, tranzistorul este blocat iar căderea de tensiune între colector și emitor este maximă, și anume 15 V, tensiunea bateriei. Pe măsură ce curentul generat de celula solară începe să crească, tensiunea de ieșire începe să scadă proporțional, până când tranzistorul intră în starea de saturație la curentul de bază de 30  $\mu$ A. Putem observa foarte clar de pe grafic că variația tensiunii este perfect liniară, până în momentul saturării, unde nu atinge de fapt niciodată valoarea

zero. Un tranzistor saturat nu poate atinge niciodată o cădere de tensiune de exact 0 volți între colector și emitor datorită efectelor joncțiunii sale interne.

## Amplificarea semnalelor alternative

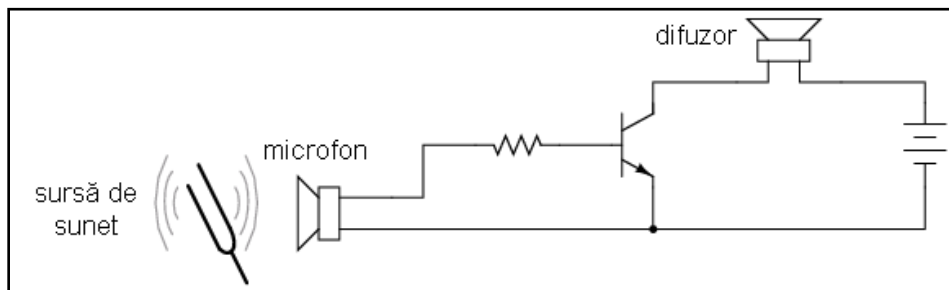
### Circuitul original



Adesea avem nevoie însă de un amplificator în curent alternativ. O aplicația practică este utilizarea acestui tip de amplificare în sistemele audio. Să reluăm circuitul cu microfon, dar să încercăm de data aceasta să-l modificăm astfel încât să alimenteze un difuzor în loc de lampă.

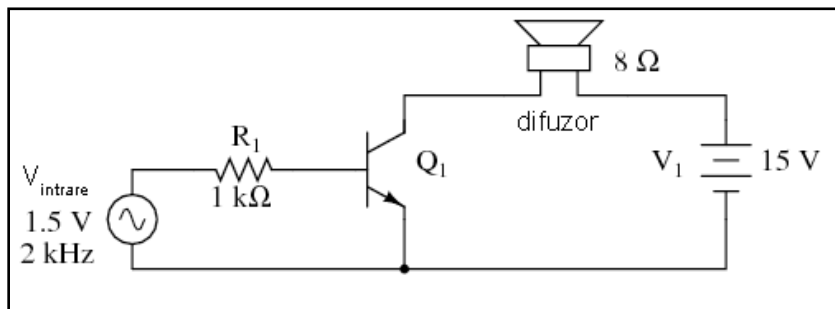
În circuitul original, am folosit o punte redresoare pentru transformarea semnalului de curent alternativ al microfonului în tensiune de curent continuu pentru polarizarea bazei tranzistorului. În acel caz ne-a interesat doar să pornim lampa cu un semnal venit din partea microfonului, iar această configurație și-a îndeplinit scopul. De data aceasta însă, vrem să reproducem un semnal de curent alternativ pe difuzor. Acest lucru înseamnă ca nu mai putem redresa semnalul de ieșire al microfonului, deoarece avem nevoie de semnalul de curent alternativ nedistorsionat la intrarea tranzistorului.

### Îndepărtarea punții redresoare



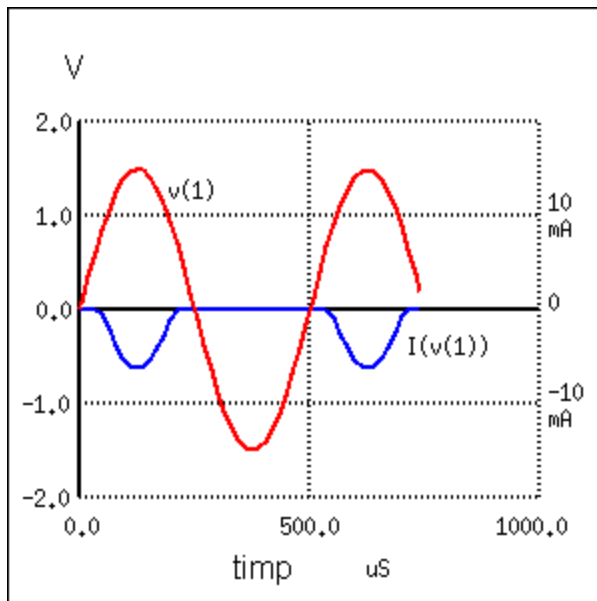
Să îndepărtăm așadar puntea redresoare din circuit și să înlocuim lampa cu un difuzor.

### Circuitul final



Fiindcă microfonul poate produce tensiuni mai mari decât tensiunea de polarizare directă a joncțiunii bază-emitor, vom conecta și un rezistor în serie cu microfonul. Circuitul practic pe care îl vom analiza este cel din figura alăturată.

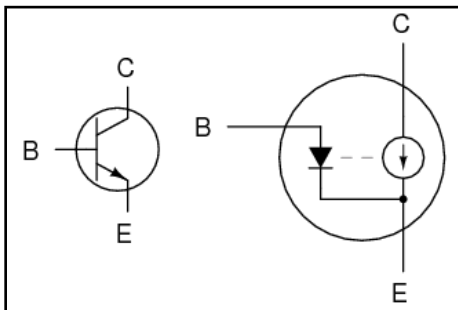
### Formele de undă ale curentului și ale tensiunii



Graficul variației tensiune-curent, tensiunea de alimentare,  $V_1$  (1,5 V,  $f = 2.000$  Hz) cu roșu, curentul prin difuzor (mai mare de 10 ori pe grafic decât curentul real, pentru observarea mai clară a acestuia), cu albastru, este prezentat alăturat.

Curentul prin difuzor este același cu cel prin baterie. Putem vedea că semnalul de tensiune de intrare este un semnal sinusoidal cu semi-perioada pozitivă și negativă, iar semnalul de curent de ieșire pulsează doar într-o singură direcție (semi-perioada negativă). Sunetul reprodus de difuzor în acest caz va fi extrem de distorsionat.

### Explicația comportamentului

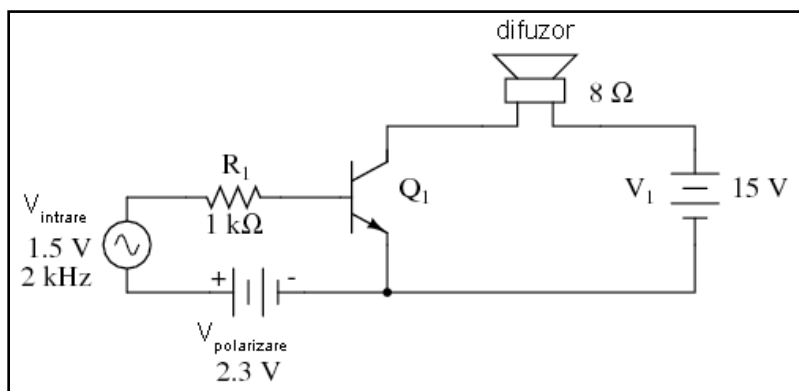


Ce s-a întâmplat cu circuitul în acest caz? De ce nu reproduce în totalitate semnalul de tensiune în curent alternativ de la intrare? Să revenim la modelul diodă-sursă-de-curent al tranzistorului pentru a încerca elucidarea problemei.

Curentul prin colector este regulat, sau controlat, printr-un mecanism de curent constant ce depinde de curentul prin dioda bază-emitor. Observați că ambele direcții ale curentului sunt uni-direcționale! În ciuda faptului că se încearcă o amplificare de semnal în curent alternativ, acesta este de fapt un dispozitiv de curent continuu, fiind capabil să conducă curenți doar într-o singură direcție. Chiar dacă aplicăm o tensiune alternativă între bază și emitor, electronii nu se pot deplasa prin circuit în semi-perioada negativă a semnalului ce polarizează invers joncțiunea bază-emitor (dioda). Prin urmare, tranzistorul va fi blocat în acea porțiune a perioadei, și va intra în conducție doar când polaritatea tensiunii de intrare este corectă, astfel încât să polarizeze direct dioda bază-emitor, și doar dacă acea tensiune este suficient de mare pentru a depăși tensiune de polarizare directă a diodei. Rețineți, tranzistorii sunt dispozitive controlate în curent: aceștia controlează curentul prin colector în funcție de existența curentului între bază și emitor (curentul de bază), și nu în funcție de tensiunea bază-emitor.

### Conectarea unei surse de curent continuu la intrare

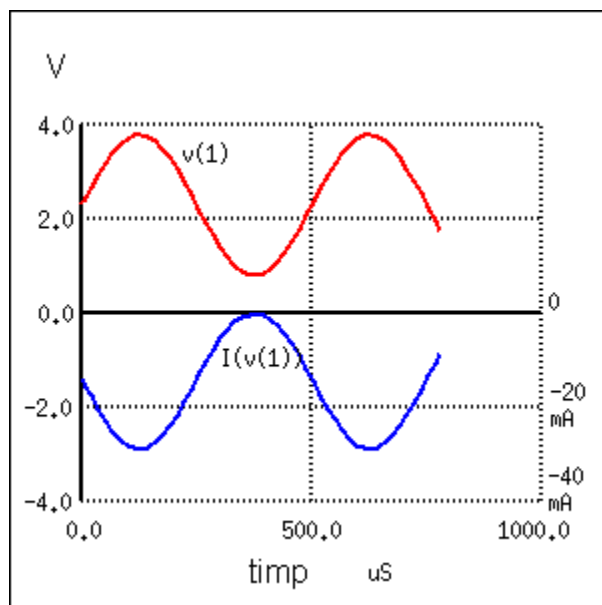




Singura modalitate prin care tranzistorul poate reproduce întreaga formă de undă pe difuzor, este menținerea acestuia în zona activă pe întreaga perioadă a undei, adică, trebuie să menținem un curent prin bază în toată această perioadă. Prin urmare, joncțiunea bază-emitor trebuie polarizată direct tot timpul. Din fericire, acest lucru se

poate realiza prin conectarea unei surse de curent continuu în serie cu semnalul de intrare.

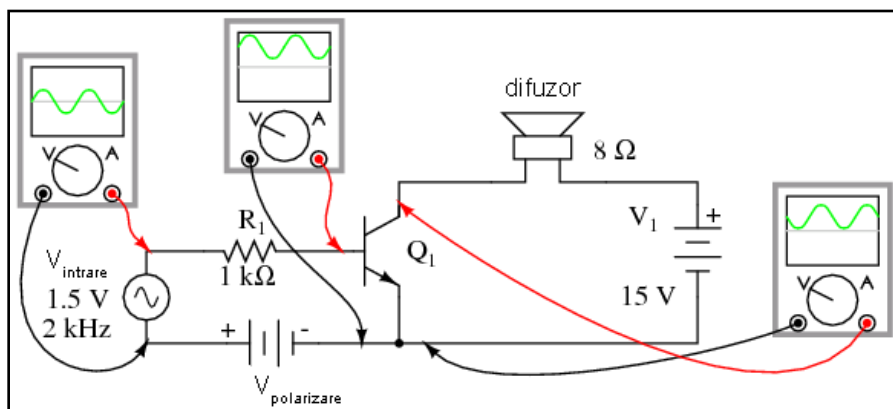
### Formele de undă ale curentului și ale tensiunii



Graficul formelor de undă arată de data această precum în figura alăturată.

Cu sursa de tensiune de polarizare ( $V_{\text{polarizare}}$ ) conectată în serie cu sursa de semnal, tranzistorul rămâne în zona activă de funcționare pe toată perioada undei, reproducând cu exactitate forma de undă de la intrare pe difuzor. Observați că tensiunea de la intrare variază între valorile de 0,8 V și 3,8 V, o amplitudine vârf-la-vârf de exact 3 volți ( $2 \cdot \text{amplitudinea de vârf a sursei} = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ V}$ ). Curentul de ieșire, pe difuzor, variază între zero și aproximativ 300 mA, fiind defazat cu  $180^\circ$  cu semnalul de intrare (al microfonului).

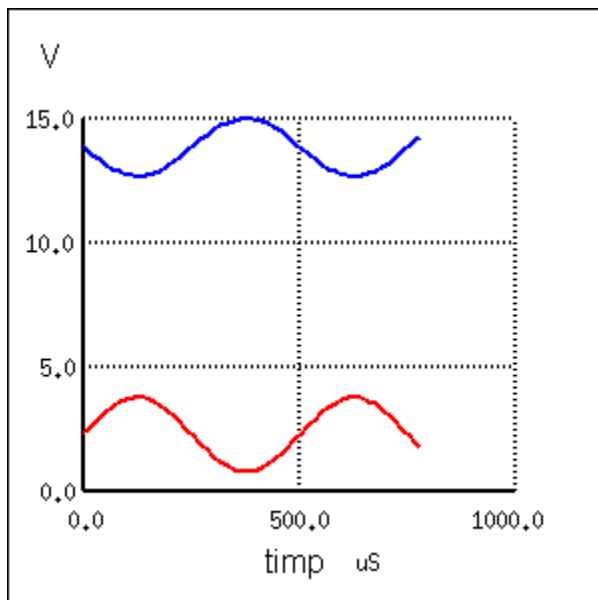
### Formele de undă în întreg circuitul



Dacă am conecta simultan mai multe osciloscopiae în circuitul de mai sus, formele de undă ale tensiunilor ar arăta astfel.

## Amplificarea în tensiune a tranzistorului în conexiune emitor comun

Amplificarea în curent al circuitului de mai sus este dată de factorul beta ( $\beta$ ) al tranzistorului, în acest caz particular, 100, sau 40 dB. Determinarea amplificării în tensiune este însă puțin mai complicată de determinat.

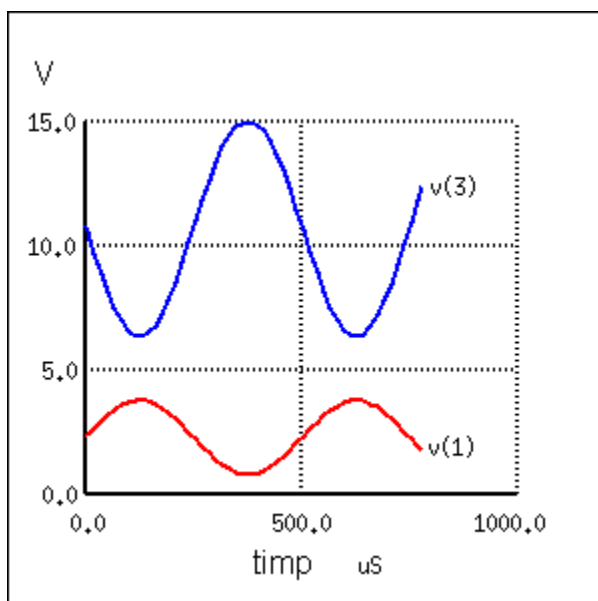


Să urmărim graficul tensiunii pe difuzor (albastru) și al tensiunii de intrare pe tranzistor (roșu, bază-emitor):

Dacă am lua aceeași scală, de la 0 la 4 V, putem vedea că forma de undă a tensiunii de ieșire are o amplitudine vârf-la-vârf mai mică decât tensiunea de intrare. Din moment ce amplificarea în tensiune a unui amplificator este definită ca și raportul dintre amplitudinile semnalelor de curent alternativ, putem ignora componenta de curent continuu ce separă cele două forme de undă. Chiar și așa, tensiunea de intrare este mai mare decât cea de ieșire, ceea ce înseamnă că amplificarea în tensiune este sub-unitară.

Această amplificare mică în tensiune nu este caracteristică tuturor amplificatoarelor emitor-comun, ci este consecința diferenței mari dintre rezistențele de intrare și ieșire. Rezistența de intrare ( $R_i$ ) în acest caz este de 1.000  $\Omega$ , iar rezistența sarcinii (difuzor) este de doar 8  $\Omega$ . Deoarece amplificarea în curent a amplificatorului este determinată doar de factorul beta ( $\beta$ ) al tranzistorului, și deoarece acest factor este fix, amplificarea în curent nu se va modifica odată cu variația niciuneia dintre cele două rezistențe. Totuși, amplificarea în tensiune depinde de aceste rezistențe.

### Mărirea rezistenței sarcinii



Dacă mărim rezistența sarcinii, căderea de tensiune pe aceasta va fi mai mare pentru aceleași valori ale curenților, rezultând o formă de undă de ieșire mai mare. Să urmărim și graficul formelor de undă pentru sarcina de 30  $\Omega$ .

De data aceasta, amplitudinea formei de undă a tensiunii de ieșire (albastru) este mult mai mare decât tensiunea de intrare. Dacă ne uităm mai atent, putem vedea că amplitudinea vârf la vârf este de 9 V, de 3 ori mai mare decât amplitudinea tensiunii de intrare. Mai exact, tensiunea de intrare este de 1,5 V, iar cea de ieșire de 4,418 V.

## Calculul amplificării în tensiune

Să calculăm așadar raportul (factorul) de amplificare în tensiune ( $A_V$ ).

$$A_V = \frac{V_{ieșire}}{V_{intrare}} = \frac{4,41 \text{ V}}{1,5 \text{ V}} = 2,94$$

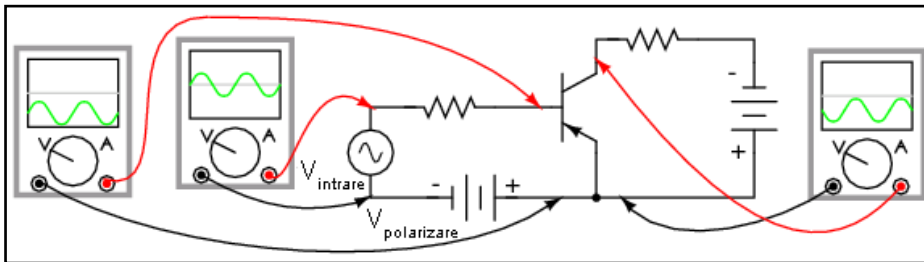
## Formula generală de calcul a amplificării în tensiune

$$A_V = \beta \frac{R_{ieșire}}{R_{intrare}} = 100 \frac{30 \Omega}{1.000 \Omega} = 3$$

Deoarece amplificarea în curent a amplificatorului emitor comun este fixată de factorul  $\beta$ , iar tensiunile de intrare și ieșire vor fi egale cu produsul dintre curenții de intrare și ieșire și rezistențele rezistorilor respectivi, putem scrie următoarea ecuație pentru aproximarea amplificării în tensiune:

Diferența dintre amplificarea reală (2,94) și cea ideală (3), se datorează imperfecțiunilor tranzistorilor în general.

## Amplificator emitor comun cu tranzistor PNP



Până acum am folosit doar tranzistori de tipul NPN, dar putem la fel de bine utiliza tranzistori NPN în orice tip de configurație, atâta timp cât

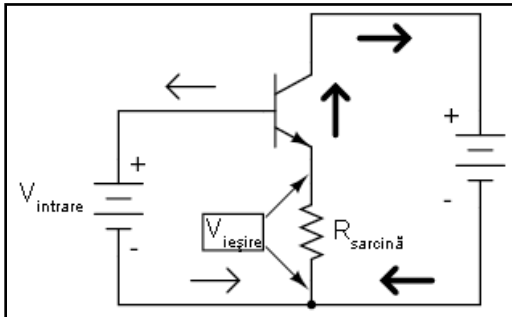
polaritatea și direcțiile curenților sunt cele corecte. Factorii de amplificare în curent și tensiune sunt aceeași și pentru amplificatorul cu tranzistor PNP, doar polaritățile bateriilor sunt diferite.

## 07. Conexiunea colector comun

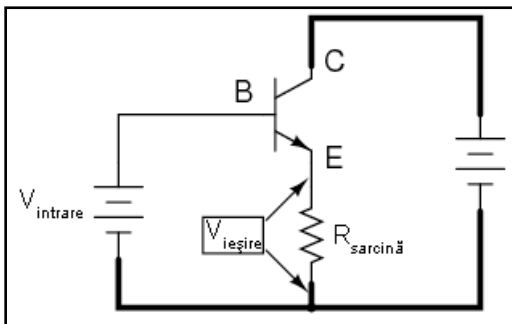
- Denumirea de colector comun vine de la faptul că tensiunea de intrare și cea de ieșire au ca și punct comun terminalul colectorului tranzistorului, ne-luând în considerare sursele de putere din circuit
- Amplificator colector comun mai este cunoscut și sub numele de repetor pe emitor
- Tensiunea de ieșire a unui amplificator în configurație colector comun este în fază cu tensiunea de intrare, ceea ce înseamnă că acest tip de amplificator este *ne-inversor*

- Factorul de amplificare în curent ( $A_I$ ) al amplificatorului colector comun este egal cu  $\beta$  plus 1, iar factorul de amplificare în tensiune ( $A_V$ ) este foarte aproape de 1
- Conectarea în serie a mai multor tranzistori în configurație colector comun, poartă numele de configurație Darlington. Factorul de amplificare în curent rezultat este produsul dintre factorii de amplificare al fiecărui tranzistor din configurație

## Definiție



Configurația amplificatorului colector comun arată astfel.



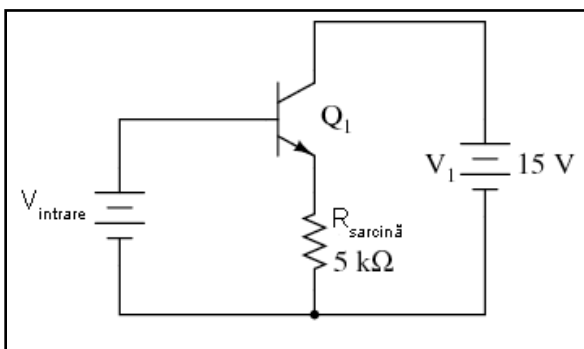
Denumirea de colector comun vine de la faptul că, ignorând sursa de alimentare (bateria), sursa de semnal și sarcina au ca punct comun contactul colectorului.

Se poate observa că prin rezistorul de sarcină trece atât curentul colectorului cât și curentul bazei, fiind conectat în serie cu emitorul. Amplificarea în curent a amplificatorului colector comun este cea mai mare dintre toate configurațiile, deoarece într-un tranzistor, cel mai

mare curent se regăsește pe emitor, fiind suma dintre curentul bazei și al colectorului.

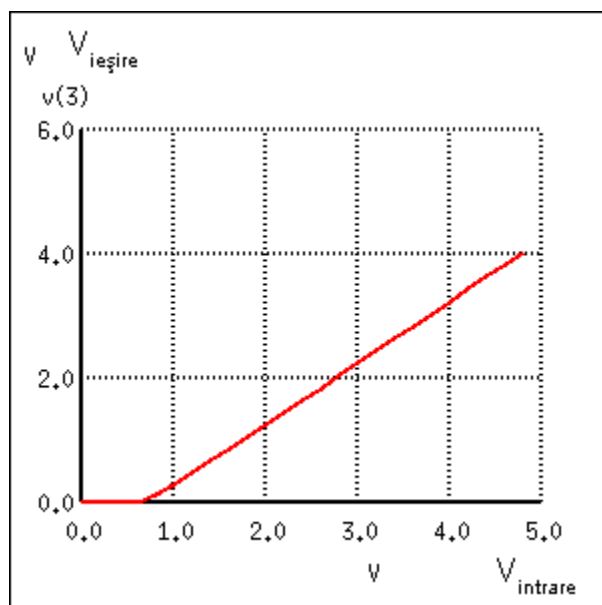
## Exemplu

### Configurația circuitului



Să analizăm însă circuitul alăturat pentru a descoperi particularitățile acestei configurații.

## Variația curent-tensiune



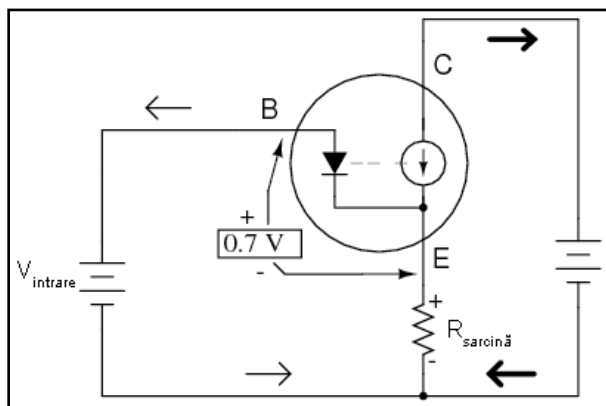
Graficul variației căderii de tensiune de ieșire - cădere de tensiune de intrare, este cel alăturat.

Fața de conexiunea emitor comun, amplificatorul colector comun produce la ieșire o cădere de tensiune de aceeași polaritate cu tensiunea de intrare. Pe măsură ce tensiunea de intrare crește, crește și cea de ieșire. Mai mult, tensiunea de ieșire, este aproape identică cu tensiunea de intrare, minus căderea de 0,7 V a joncțiunii P-N.

Indiferent de factorul beta al tranzistorului, sau de valoarea sarcinii, amplificatorul colector comun are un factor de amplificare în tensiune ( $A_V$ ) extrem de apropiat de valoarea 1. Din această cauză, conexiunea colector comun mai este denumită și repetor pe emitor.

## Explicație

Este relativ ușor de înțeles motivul pentru care căderea de tensiune pe sarcina amplificatorului în colector comun este aproximativ egală cu tensiunea de intrare.

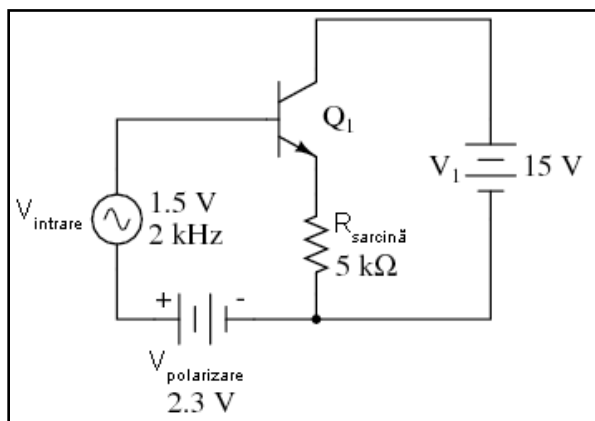


constantă.

Dacă ne referim la modelul diodă-sursă-de-curent al tranzistorului, putem vedea că, curentul bazei trebuie să treacă prin joncțiunea P-N bază-emitor, joncțiune echivalentă unei diode redresoare. Dacă această joncțiune este polarizată direct, va exista o cădere de tensiune de aproximativ 0,7 V (siliciu) între terminalele acesteia. Această cădere de tensiune de 0,7 V nu depinde de amplitudinea curentului de bază, astfel că putem considera această cădere de tensiune ca fiind

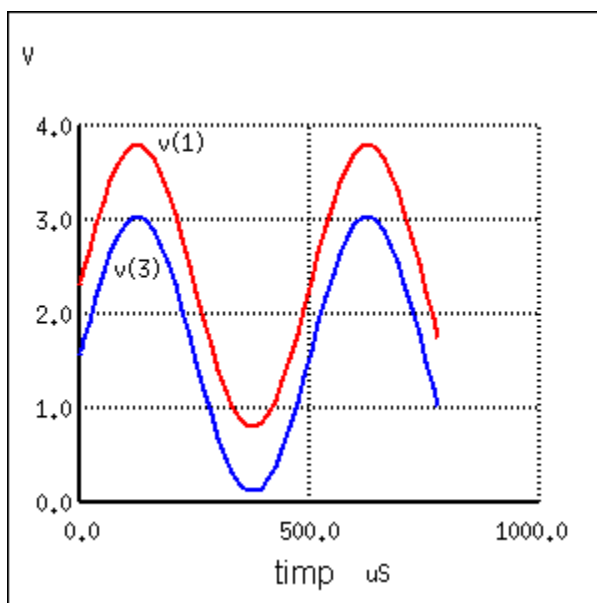
Cunoscând polaritățile tensiunilor joncțiunii P-N bază-emitor și a rezistorului de sarcină, putem vedea că tensiunea de intrare trebuie să fie egală cu suma celor două, în conformitatea cu legea lui Kirchhoff pentru tensiune. Cu alte cuvinte, tensiunea sarcinii va fi tot timpul cu aproximativ 0,7 V mai mică decât tensiunea de intrare, atunci când tranzistorul se află în stare de conducție.

## Tensiunea de polarizare în curent continuu



Pentru amplificarea semnalelor de curent alternativ cu ajutorul configurației colector comun, este nevoie de utilizarea unei surse de tensiune în curent continuu (tensiune de polarizare), la fel cum a fost cazul configurației emitor comun. Rezultatul este însă de această dată un amplificator ne-inversor.

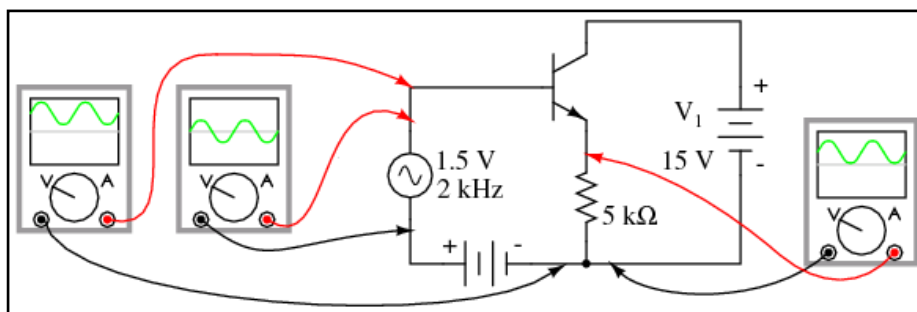
## Tensiunea de intrare și de ieșire



Formele de undă ale tensiunii de ieșire (albastru) și de intrare (roșu) sunt prezentate în graficul alăturat.

## Formele de undă în întreg circuitul

Dacă ar fi să conectăm mai multe osciloscoape în circuit, vom vedea că formele de undă ale tensiunilor arată astfel:

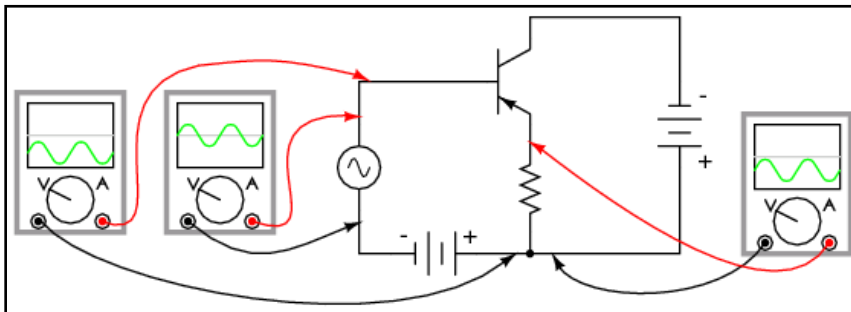


## Factorul de amplificare în curent

$$A_I = \frac{I_{emitor}}{I_{bază}} = \frac{I_{emitor} + I_{bază}}{I_{bază}} = \frac{I_{colector}}{I_{bază}} + 1 = \beta + 1$$

Din moment ce această configurație nu oferă nicio amplificare în tensiune, singura amplificare realizată este în curent. Configurația anterioară, emitor comun, oferea un factorul de amplificare în curent egal cu factorul  $\beta$  al tranzistorului, datorită faptului că, curentul de intrare trecea prin bază, iar curentul de ieșire (sarcină) trecea prin colector, iar  $\beta$  este prin definiție raportul dintre curentul de colector și curentul de bază. În configurația colector comun însă, sarcina este conectată în serie cu emitorul, prin urmare, curentul de ieșire este egal cu acest curent al emitorului. Dar curentul prin emitor este curentul colectorului *plus* curentul bazei. Acest lucru înseamnă o amplificare în curent ( $A_I$ ) egală cu  $\beta$  plus 1.

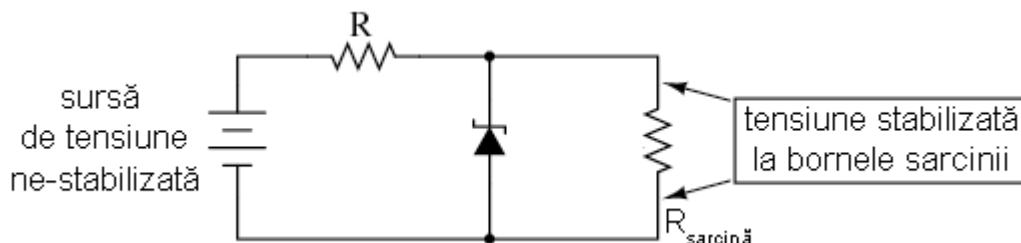
## Amplificator colector comun cu tranzistor PNP



Și în acest caz, se pot utiliza tranzistori de tip PNP pentru realizarea amplificatorului colector comun. Toate calculele sunt identice. Singura diferență este inversarea polarității tensiunilor și a direcției curenților.

## Aplicație - stabilizarea tensiunii

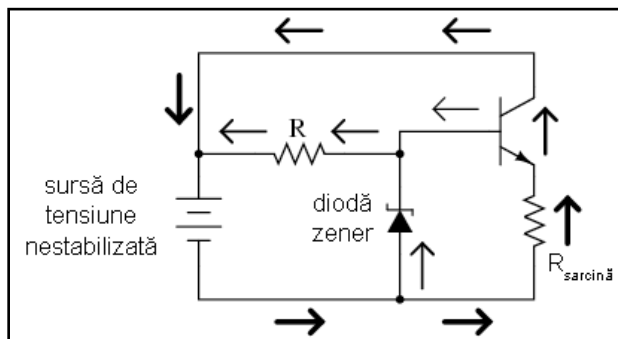
### Diode Zener



O aplicație populară a tranzistorului colector comun constă în stabilizarea surselor de putere în curent continuu. Una dintre soluții utilizează diode Zener pentru tăierea tensiunilor mai mari decât tensiunea Zener.

Totuși, curentul ce poate fi transmis sursei este destul de limitat în această situație. În principiu, acest circuit regulează tensiunea la bornele sarcinii prin menținerea curentului prin rezistorul serie la valori suficient de mari pentru ca întreaga putere în exces a sursei de tensiune să cadă pe rezistor; dioda Zener va utiliza un curent necesar menținerii unei căderi de tensiune constante la bornele sale. Pentru sarcini mari, ce necesită un curent mare pentru acționarea lor, un stabilizator de tensiune cu diodă Zener ar trebui să șunteze un curent mare prin diodă pentru a putea stabili tensiunea pe sarcină.

### Tranzistor în conexiune colector comun

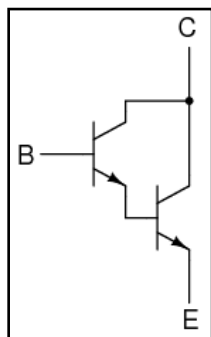


O metodă de rezolvare a acestei probleme constă în utilizarea unui tranzistor în conexiune colector comun pentru amplificarea curentului prin sarcină, astfel ca dioda Zener să nu fie nevoită să conducă decât curentul necesar bazei tranzistorului.

Singura problemă este că tensiunea pe sarcină va fi cu aproximativ 0,7 V mai mică decât căderea de tensiune pe dioda Zener. Acest lucru poate fi însă corectat prin utilizarea unei diode Zener cu o tensiune Zener mai mare cu 0,7 V decât tensiunea necesară pentru aplicația în cauză.

### Tranzistori în configurație Darlington

#### Modul de conectare



În unele aplicații, factorul de amplificare în curent al unui singur tranzistor în configurație colector comun nu este suficient. În acest caz, se pot conecta (etaja) mai mulți tranzistori într-o configurație Darlington.

#### Factorul de amplificare în curent

Configurația Darlington constă în conectarea pe sarcina unui tranzistor colector comun a unui alt tranzistor, multiplicând astfel factorii de amplificare în curent al celor doi:

$$A_I = (\beta_1 + 1) \cdot (\beta_2 + 1)$$

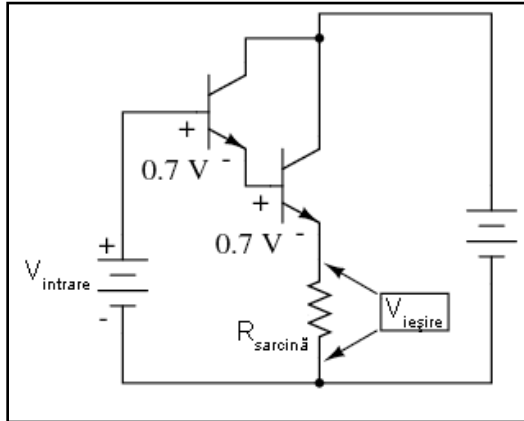


unde:

$\beta_1$  - factorul beta al primului tranzistor

$\beta_2$  - factorul beta al celui de al doilea tranzistor

### Factorul de amplificare în tensiune



Amplificarea în tensiune va fi și de această dată apropiată de 1, cu toate că tensiunea de ieșire va fi mai mică cu 1,4 V decât tensiunea de intrare:

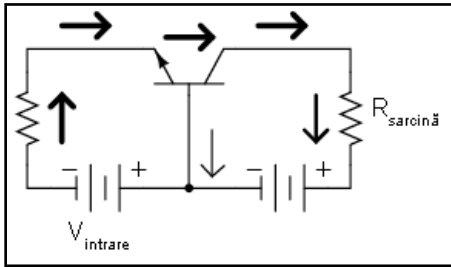
### Observații

Tranzistorii în configurație Darlington pot fi cumpărați ca și dispozitive discrete, sau pot fi construiți din tranzistori individuali. Desigur, dacă se dorește obținerea unor curenți și mai mari, se pot conecta chiar și trei sau patru tranzistori în configurație Darlington.

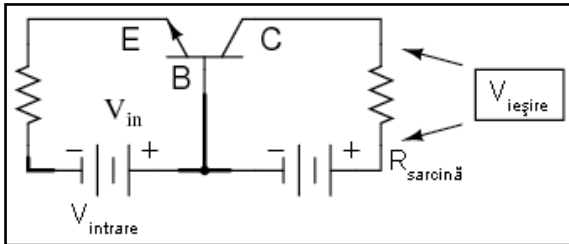
## 08. Conexiunea bază comună

- Denumirea de bază comună vine de la faptul că tensiunile de intrare și de ieșire ale amplificatorului au ca și punct comun baza tranzistorului, ne-luând în considerare sursele de putere
- Factorul de amplificare în curent al amplificatorului bază comună este tot timpul mai mic decât 1
- Factorul de amplificare în tensiune depinde de rezistențele de intrare și de ieșire, cât și de rezistența internă a joncțiunii emitor-bază a tranzistorului, rezistența ce variază cu variația tensiunii de polarizare în curent continuu. Această amplificare este însă foarte mare
- Raportul dintre curentul colectorului și curentul emitorului unui tranzistor, poartă numele de factor alfa ( $\alpha$ ). Pentru orice tranzistor, factorul alfa este subunitar (mai mic decât 1)

### Definiție



Această configurație este mai complexă decât celelalte două, emitor comun și colector comun, și este mai puțin folosită datorită caracteristicilor ciudate de funcționare.



Denumirea de bază comună vine de la faptul că semnalul sursei de alimentare și sarcina au ca și punct comun baza tranzistorului.

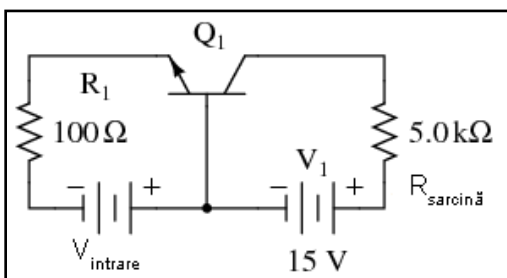
Probabil că cea mai ciudată caracteristică a acestui tip de configurație constă în faptul că sursa de semnal de intrare trebuie să conducă întreg curentul de pe emitor al tranzistorului, după cum este indicat în prima figură prin săgețile îngroșate. După câte știm, curentul emitorului este mai mare decât oricare alți curenți ai tranzistorului, fiind suma curenților de bază și de colector. În celelalte două configurații, sursa de semnal era conectată la baza tranzistorului, curentul prin sursă fiind astfel cel mai mic posibil.

## Factorul de amplificare în curent (factorul alfa)

Deoarece curentul de intrare este mai mare decât toți ceilalți curenți din circuit, inclusiv curentul de ieșire, amplificarea în curent a acestui tip de amplificator este în realitatea mai mică decât 1. Cu alte cuvinte, acest amplificator atenuează curentul, nu-l amplifică. În configurațiile emitor și colector comun, parametrul folosit pentru amplificarea în curent este  $\beta$ , dar în configurație bază comună, avem nevoie de un alt parametru de bază al tranzistorului: raportul dintre curentul colectorului și curentul emitorului, raport ce este tot timpul mai mic decât 1, și poartă numele de factorul alfa ( $\alpha$ ).

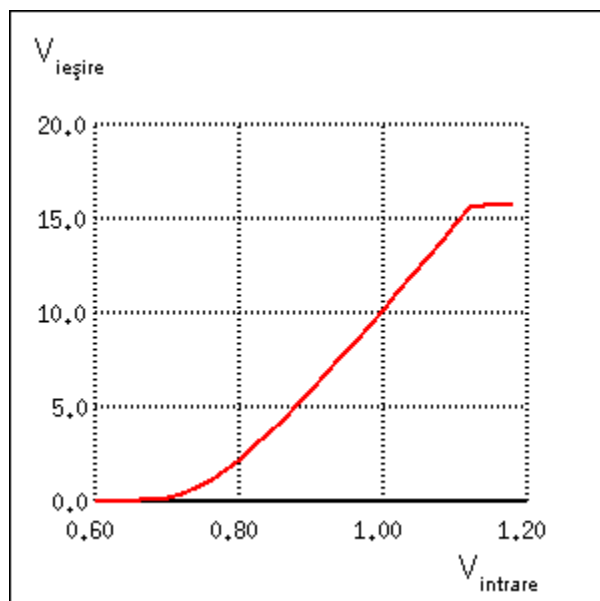
## Exemplu

### Circuitul



Circuitul practic pe care îl vom studia, este cel alăturat.

### Variația tensiunea ieșire - tensiune intrare

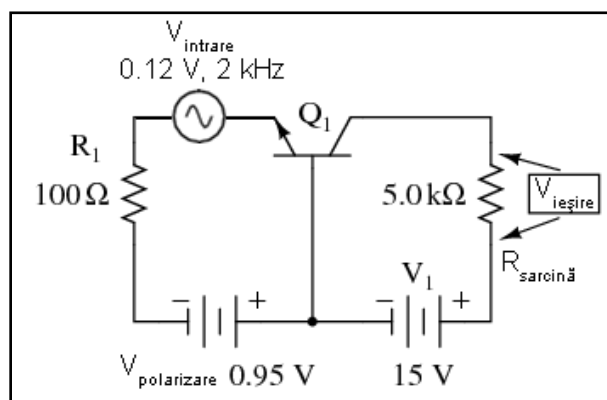


Graficul variației tensiunii de ieșire cu tensiune de intrare este cel alăturat.

Putem observa de pe grafic, că tensiune de ieșire crește de la 0 (tranzistor blocat) la 15,75 V (tranzistor saturat) pe când tensiunea de intrare crește de la 0,6 V până la doar 1,2 V. Mai precis, tensiunea de ieșire nu începe să crească decât după ce tensiunea de intrare a depășit valoarea de 0,7 V, iar nivelul de saturație este atins pentru o tensiune de intrare de 1,12 V. Acest lucru reprezintă o amplificare în tensiune destul de mare, de 37,5. Putem observa de asemenea, că tensiunea de ieșire (măsurată la bornele rezistorului de sarcină,  $R_{sarcină}$ ) crește peste valoarea sursei de tensiune (15 V) la saturație,

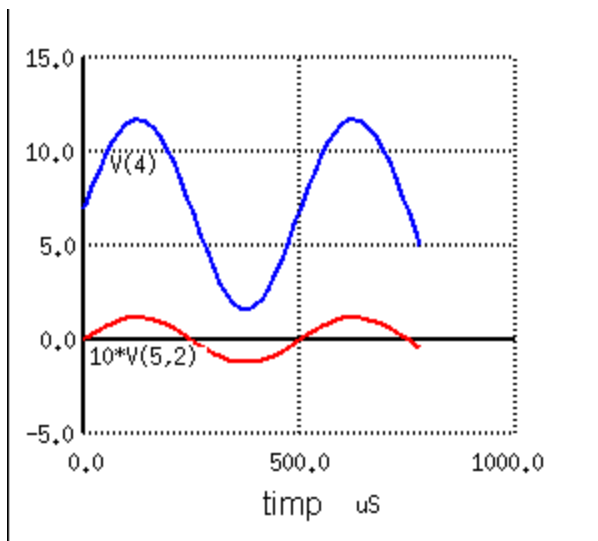
datorită conectării în serie a celor două surse de putere.

### Adăugarea unei surse de curent continuu



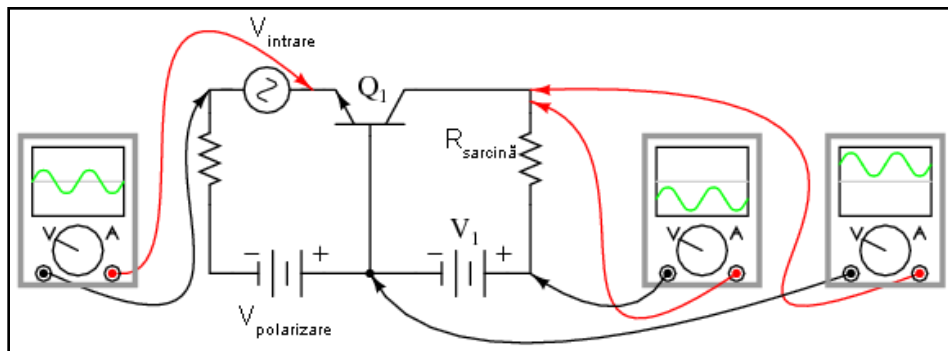
O nouă analiză a circuitului, de data aceasta cu o sursă de semnal în curent alternativ legată în serie cu o sursă de polarizare de curent continuu, dezvăluie încă odată factorul mare de amplificare în tensiune.

### Graficul tensiunilor de intrare și de ieșire



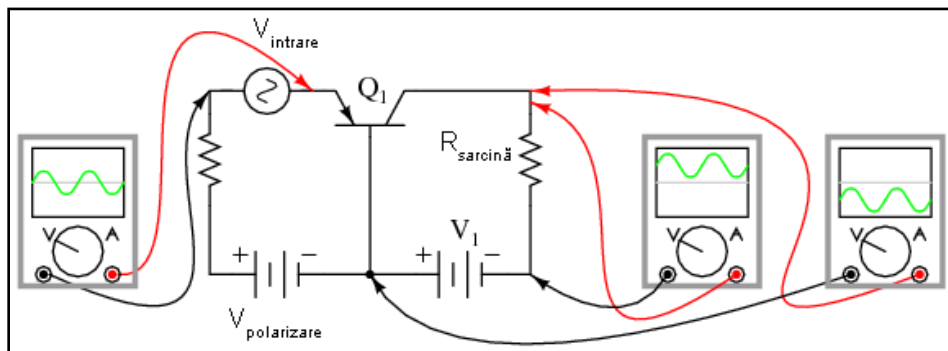
După cum se poate observa în figura alăturată, semnalul de intrare (roșu, mărit de 10 ori pentru ușurința vizualizării) este în fază cu cel de ieșire (albastru), ceea ce înseamnă că amplificatorul bază comun este non-inversor.

### Vizualizarea formelor de undă în întreg circuitul



Putem vizualiza formele de undă ale amplificatorului conectând mai multe osciloscopiae, simultan, în punctele de interes.

### Tranzistor PNP



Același lucru este valabil și pentru un tranzistor PNP.

### Factorului de amplificare în tensiune

Calcularea factorului de amplificare în tensiune pentru configurație bază comună este destul de dificilă și presupune aproximări ale comportamentului tranzistorului ce sunt greu de măsurat direct. Față de celelalte

configurații, unde amplificarea era determinată fie de raportul dintre doi rezistori (emitor comun), fie avea o valoare fixă (colector comun), în cazul de față această valoare depinde în mare măsură de valoarea tensiunii de polarizare în curent continuu a semnalului de intrare. Rezistența internă a tranzistorului între emitor și bază joacă un rol major în determinarea factorului de amplificare în tensiune, iar această rezistență variază odată cu variația curentului prin emitor.

## **Observație**

Prin urmare, un factor de amplificare în curent subunitar și un factor de amplificare în tensiune imprezvizibil, fac ca această configurație să ofere puține aplicații practice.

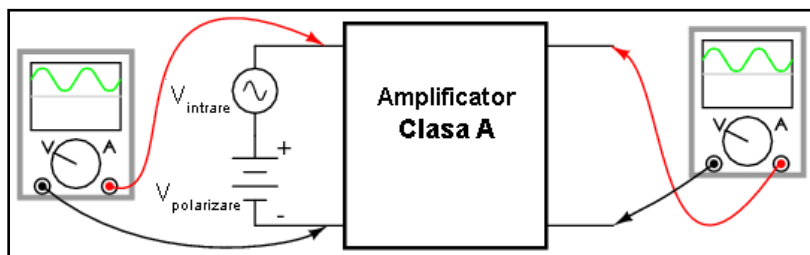
## **09. Amplificatoare clasa A, B, AB, C și D**

- Amplificatorul clasa A se află în zona activă de funcționare pe întreaga perioadă a formei de undă de la intrare, prin urmare, aceasta este reprodusă în totalitate la ieșire
- Amplificatorul clasa B reproduce la ieșire doar o jumătate din forma de undă de la intrare: fie jumătatea pozitivă, fie pe cea negativă. Tranzistorul se află doar o jumătate din timp în zona activă de funcționare, iar în rest este blocat
- Amplificatorul clasa AB este o configurație ce se află între amplificatorul de clasa A și cel de clasă B în ceea ce privește timpul petrecut de acesta în zona activă de funcționare
- Clasa D presupune (re)-proiectarea amplificatorului, și nu se bazează doar pe tensiunea de polarizare în curent continuu, așa cum este cazul claselor precedente. Forma semnalului de ieșire este dreptunghiulară, iar factorul de umplere al acestuia depinde de amplitudinea instantanee a semnalului de intrare. Tranzistorii unui astfel de amplificator nu se află niciodată în zona activă de funcționare, ei sunt fie blocați fie saturați. Eficiența acestui tip de amplificator este mare datorită puterii disipate sub formă de căldură foarte scăzută

## **Definiție**

După modul de reproducere la ieșire a formei de undă de la intrare, amplificatoarele pot fi împărțite pe clase. Aceste clase sunt desemnate cu literele A, B, AB, C și D.

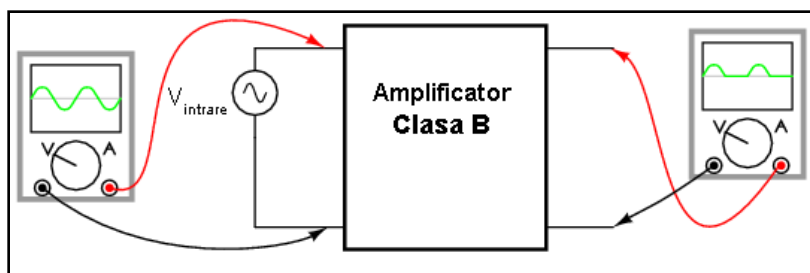
### **Amplificator clasa A**



În cazul amplificatoarelor de clasă A, întreg semnalul de intrare este reprodus la ieșire. Acest mod de operare al tranzistorului poate fi atins doar atunci când acest funcționează tot timpul în zona activă, ne-atingând niciodată punctul de saturație sau de blocare.

Pentru realizarea acestui lucru, este nevoie de o tensiune de polarizare de curent continuu suficient de mare pentru funcționarea tranzistorului între zona de blocare și cea de saturație. În acest fel, semnalul de intrare în curent alternativ va fi perfect „centrat” între limita superioară și cea inferioară a nivelului de semnal al amplificatorului.

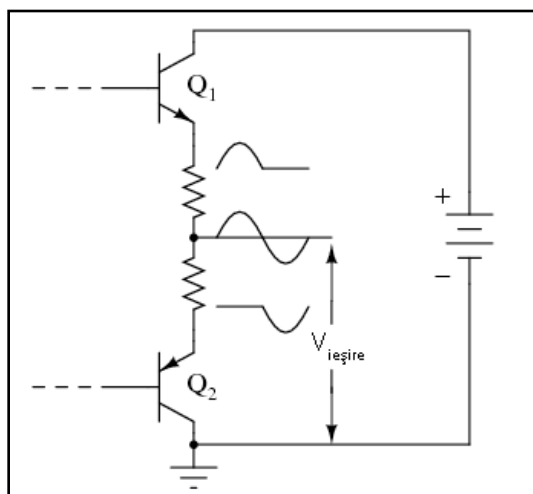
## Amplificator clasa B



Amplificatorul de clasă B este ceea ce am obținut în cazul amplificatorului emitor comun, cu semnal de intrare în curent alternativ dar fără nicio tensiune de polarizare în curent continuu conectată la intrare. În acest caz, tranzistorul petrece doar

o jumătate de timp în zona activă de funcționare, iar în cealaltă jumătate de timp este blocat, datorită faptului că tensiunea de intrare este prea mică, sau chiar de polaritate inversă, pentru a putea polariza direct joncțiunea bază-emitor.

## Configurația contratimp



Folosit individual, amplificatorul de clasă B nu este foarte folositor. De cele mai multe ori, distorsiunile foarte mari introduse în forme de undă, prin eliminarea unei semi-alternanțe, nu sunt acceptabile. Totuși, această modalitate de polarizare a amplificatoarelor este folosită dacă se folosesc două amplificatoare de clasă B în configurație contratimp (push-pull), fiecare amplificator reproducând doar o jumătate a formei de undă.

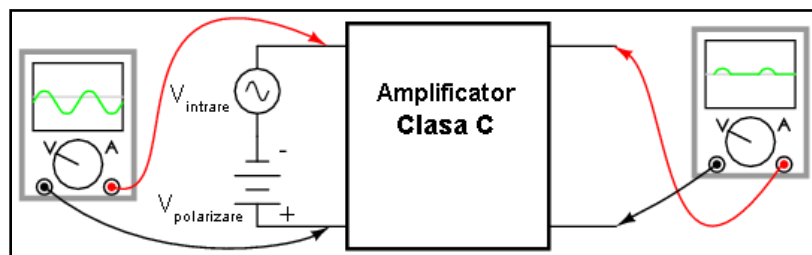
## Avantaje

Un avantaj al amplificatorului de clasă B (contratimp) față de cel de clasă A, constă într-o capacitate mai mare a puterii de ieșire. În clasa A, tranzistorul disipă o putere considerabilă sub formă de căldură datorită faptului că acesta se află tot timpul în zona activă de funcționare. În clasa B, fiecare tranzistor conduce doar jumătate din timp, iar în cealaltă jumătate este blocat, nu conduce curent electric, și prin urmare, puterea disipată sub formă de căldură este zero. Astfel, fiecare tranzistor are timp de „odihnă” și de răcire, atunci când celălalt tranzistor se află în conducție. Amplificatoarele de clasă A sunt mai simplu de construit, dar sunt limitate doar la aplicațiile de putere joasă datorită căldurii generate.

## Amplificator clasa AB

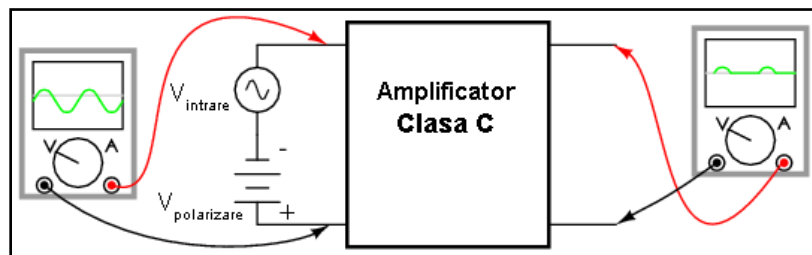
Amplificatoarele de clasă AB sunt undeva între clasa A și clasa B; tranzistorul conduce mai mult de 50% din timp, dar mai puțin de 100%.

## Amplificator clasa C



Dacă semnalul de intrare al amplificatorului este ușor negativ (sursa de tensiune în curent alternativ inversată), semnalul de ieșire va fi tăiat și mai mult față de semnalul de ieșire al amplificatorului de clasa B. Tranzistorul va petrece majoritatea timpului în stare blocată.

### Introducerea unui circuit rezonant la ieșire



a oscilatorului.

Deși această configurație nu pare practică, dacă se conectează un circuit rezonant condensator-bobină la ieșire, semnalul ocazional produs de amplificator la ieșire este suficient pentru punerea în funcționare

## Observații

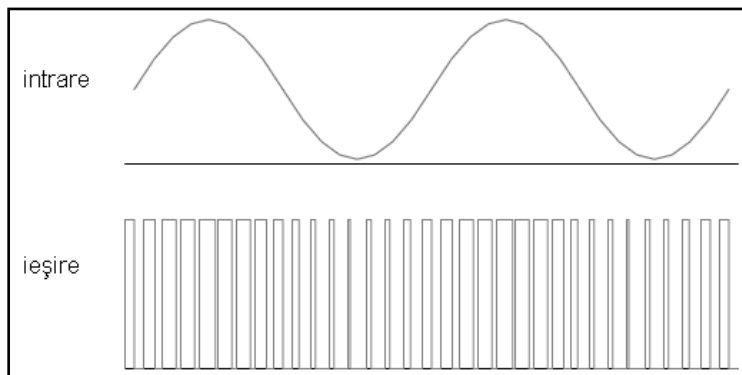
Datorită faptului că tranzistorul este în mare parte a timpului blocat, puterea la bornele sale poate fi mult mai mare decât în cazul celorlalte două configurații văzute mai sus. Datorită dependenței de circuitul rezonant de la ieșire, acest amplificator poate fi folosit doar pentru semnale de o anumită frecvență fixă.

## Factorul de umplere

Factorul de umplere reprezintă raportul dintre durata în care semnalul este maxim și durata în care semnalul este zero. Cu alte cuvinte, reprezintă durata de funcționare al unui dispozitiv, în general. Factorul de umplere variază odată cu amplitudinea instantanee a semnalului de intrare.

## Amplificator clasa D

Acest tip de amplificator este total diferit față de amplificatoarele de clasă A, B, AB sau C. Acesta nu este obținut prin aplicarea unei anumite tensiuni de polarizare, precum este cazul celorlalte clase, ci necesită o modificare a circuitului de amplificare. Nu vom intra pentru moment în detaliile construirii unui astfel de amplificator, dar vom discuta în schimb principiul său de funcționare.



Un amplificator clasa D reproduce profilul formei de undă a tensiunii de la intrare prin generarea unui semnal de ieșire dreptunghiular cu o rată de pulsație mare.

Cu cât amplitudinea instantanee a semnalului de intrare este mai mare, cu atât factorul de umplere al formei de undă dreptunghiulare este mai mare. Singurul motiv pentru folosirea amplificatorului

de clasă D, este evitarea funcționării tranzistorului în zona activă de funcționare; tranzistorul va fi tot timpul fie blocat fie saturat. Puterea disipată de tranzistor va fi foarte mică în acest caz.

## Dezavantaje

Dezavantajul metodei constă în prezența armonicilor la ieșire. Din fericire, din moment ce frecvența acestor armonici este mult mai mare decât frecvența semnalului de intrare, acestea pot fi filtrate relativ ușor cu ajutorul unui filtru trece-jos, rezultând un semnal de ieșire mult mai asemănător cu semnalul de intrare original.

## Aplicații



Amplificatoarele de clasă D sunt folosite de obicei în locurile unde este nevoie de puteri mari la frecvențe relativ joase, precum invertoarele industriale (dispozitive ce transformă curentul continuu în curent alternativ) și amplificatoarele audio de înaltă performanță.

## 10. Metode de polarizare ale tranzistorului

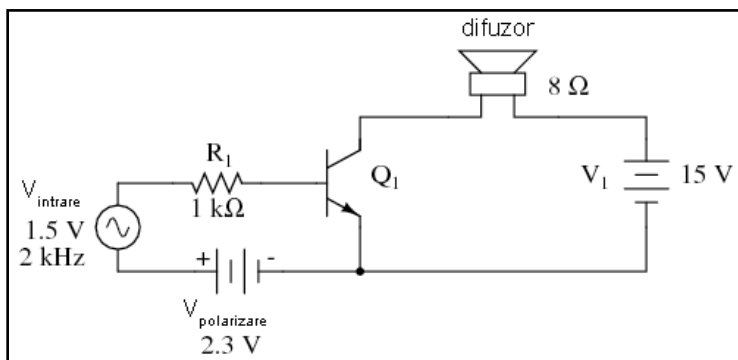
- Tensiunea de polarizare în curent continuu, necesară pentru funcționarea amplificatoarelor de clasă A și C, poate fi obținută prin utilizarea unui divizor de tensiune și un condensator de cuplaj. Această configurație este folosită practic în locul bateriei conectate în serie cu sursa de semnal de curent alternativ de la intrare
- Cuplajul capacitiv se comportă precum un filtru trece-sus față de semnalul de intrare al amplificatorului

### Scop

Până în acest moment, am folosit o sursă de tensiune de curent continuu (baterie) conectată în serie cu semnalul de intrare în curent alternativ pentru polarizarea tranzistorului, indiferent de clasa de funcționare din care făcea parte. În realitate, conectarea unei baterii cu o tensiune precisă la intrarea amplificatorului nu este o soluție deloc practică. Chiar dacă am putea găsi o baterie care să producă exact cantitatea de tensiune necesară pentru o anumită polarizare, acea tensiune nu poate fi menținută pe toată durata de funcționare a bateriei. Când aceasta începe să se descarce, tensiunea sa de ieșire scade, iar amplificatorul se va îndrepta spre clasa de funcționare B.

### Exemplu

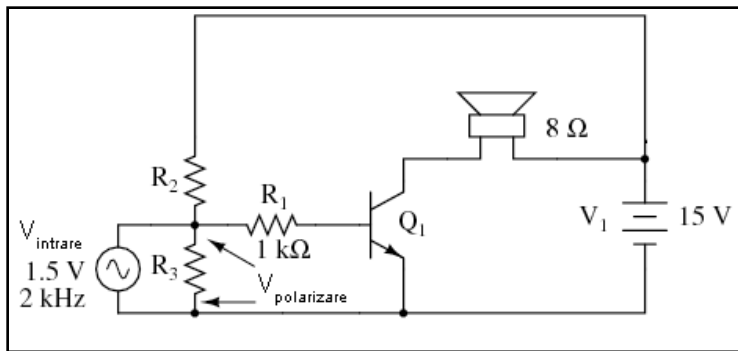
#### Circuitul inițial



Să considerăm circuitul alăturat.

Includerea unei baterii cu o tensiune de polarizare ( $V_{\text{polarizare}}$ ) într-un circuit de amplificare, nu este practică în realitate.

#### Utilizarea unui divizor de tensiune



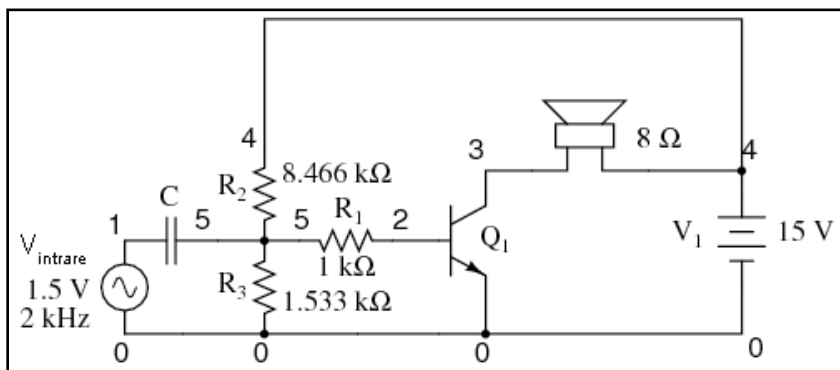
prezintă conform figurii alăturate.

O metodă mult mai practică pentru obținerea tensiunii de polarizare este folosirea unei rețele divizoare de tensiune conectată la bateria de 15 V, baterie care oricum este necesară pentru funcționarea amplificatorului. Circuitele divizoare de tensiune sunt și ele ușor de proiectat și construit, prin urmare, o astfel de configurație se

Dacă alegem o pereche de rezistori  $R_2$  și  $R_3$  a căror rezistențe să producă o tensiune de 2,3 V pe rezistorul  $R_3$  dintr-o tensiune totală disponibilă de 15 V ( $R_2 = 8,644 \Omega$ ,  $R_3 = 1,533 \Omega$ , de exemplu), vom obține o tensiune de polarizare în curent continuu de 2,3 V între baza și emitorul tranzistorului, atunci când nu există semnal de intrare. Singura problemă este că, această configurație conectează sursa de semnal de curent alternativ direct în paralel cu rezistorul  $R_3$  al divizorului de tensiune.

Acest lucru nu este acceptabil, deoarece sursa de curent alternativ va „învinge” tensiunea de curent continuu de la bornele rezistorului  $R_3$ . Componentele conectate în paralel trebuie să posede același tip de tensiune la bornele lor; prin urmare, dacă o sursă de curent alternativ este conectată direct la bornele unui rezistor dintr-un divizor de tensiune de curent continuu, sursa de curent alternativ va „învinge” tot timpul, neexistând nicio componentă de curent continuu în forma de undă a semnalului.

### Utilizarea unui condensator de cuplaj

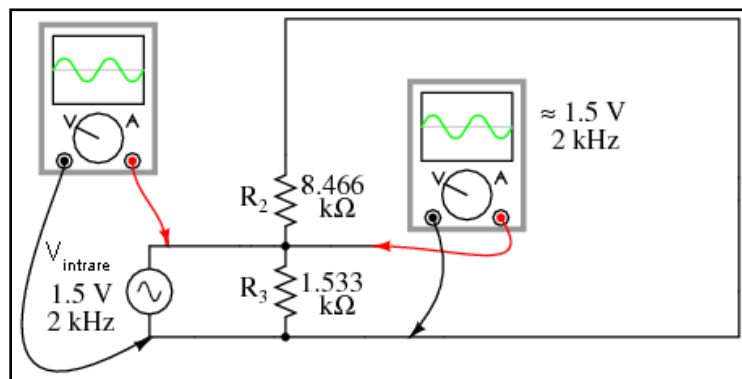


O modalitate prin care această configurație poate funcționa, deși este posibil să nu fie evident de ce, este prin conectarea unui condensator de cuplaj între sursa de curent alternativ și divizorul de tensiune, astfel.

Condensatorul formează un filtru trece-sus între sursa de tensiune în curent alternativ și divizorul de tensiune în curent continuu; întregul semnal (aproximativ) de curent alternativ va trece înspre tranzistor, iar tensiunea de curent continuu nu va putea ajunge la sursa de semnal. Acest lucru este mult mai clar dacă ne folosim de teorema superpoziției, conform căreia, orice circuit liniar poate fi analizat considerând că doar o singură sursă de alimentare funcționează în același timp în circuit. Rezultatul/efectul final poate fi aflat prin însumarea algebrică a efectelor tuturor surselor de putere luate individual. Dacă am separa condensatorul și divizorul de tensiune  $R_2$ -- $R_3$

de restul amplificatorului, am înțelege mai bine cum funcționează această superpoziție între curentul continuu și cel alternativ.

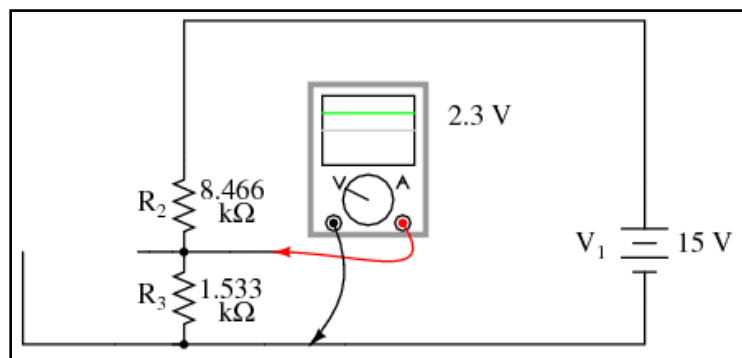
### Sursa de curent alternativ



alăturată.

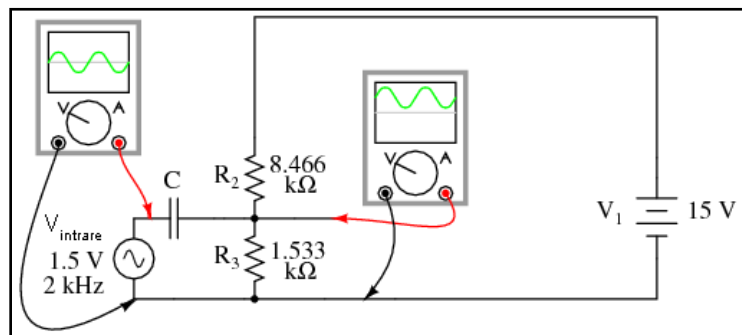
Dacă luăm în considerare doar sursa de semnal de curent alternativ și un condensator cu o impedanță arbitrară mică la frecvența semnalului, majoritatea semnalului de curent alternativ se va regăsi pe rezistorul  $R_3$ . Datorită impedanței foarte mici a condensatorului de cuplaj la frecvența de semnal, acesta se comportă precum un scurt-circuit (fir simplu), prin urmare, poate fi omis din figura

### Sursa de curent continuu

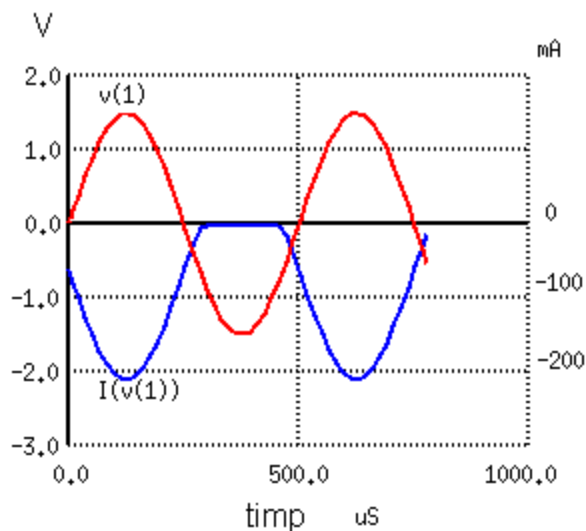


Dacă ar fi să conectăm doar sursa de tensiune de curent continuu (bateria de 15 V), condensatorul se va comporta precum un circuit deschis, prin urmare nici acesta și nici sursa de semnal de curent alternativ nu vor avea niciun efect asupra modului de funcționare al divizorului de tensiune  $R_2$ -- $R_3$ .

### Aplicarea teoremei superpoziției



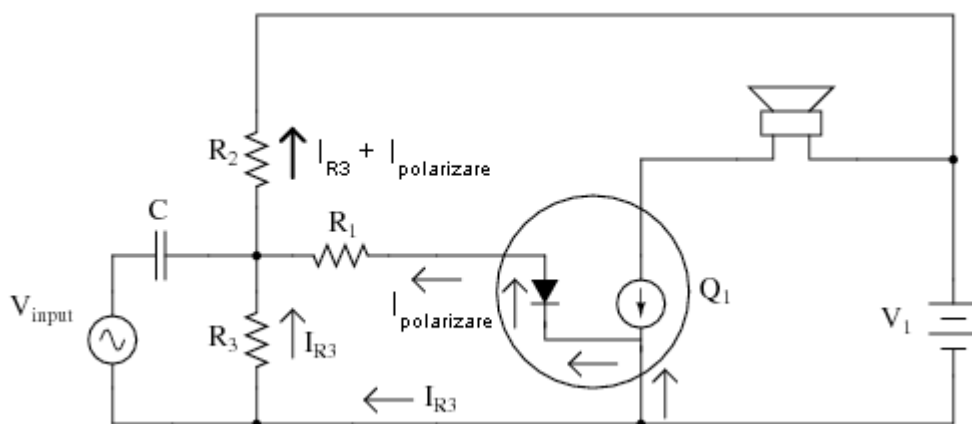
Folosind teorema superpoziției, și combinând cele două analize separate ale circuitului, obținem o tensiune (de superpoziție) de aproximativ 1,5 V curent alternativ și 2,3 V curent continuu, tensiuni ce vor fi aplicate la intrarea tranzistorului. Observați în circuitul alăturat, că tranzistorul nu a fost conectat.



Folosind un condensator de  $100 \mu\text{F}$ , putem obține o impedanță de  $0,8 \Omega$  la frecvența de  $2.000 \text{ Hz}$ .

Putem observa că acest circuit distorsionează puternic forma unde curenului de ieșire (albastru). Unda sinusoidală este tăiată pe majoritatea semi-alternanței negative a semnalului de tensiune de intrare (roșu). Acest lucru ne spune că tranzistorul intră în starea de blocare, deși nu ar trebui. De ce se întâmplă acest lucru? Această nouă metodă de polarizare ar trebui să genereze o tensiune de polarizare în curent continuu de  $2,3 \text{ V}$ .

### Conectarea tranzistorului în circuit



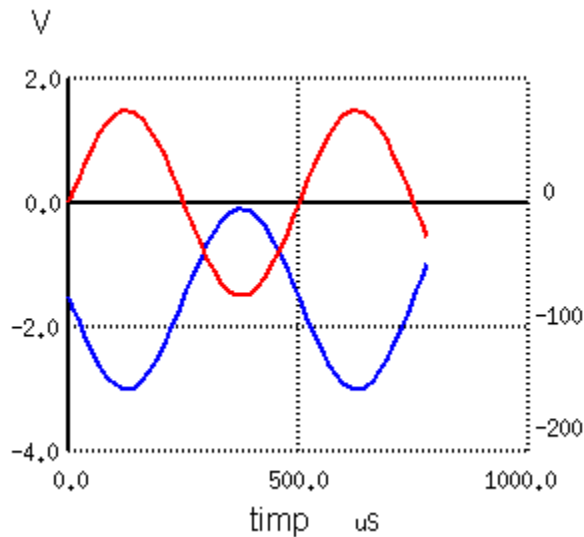
Dacă în circuit avem doar condensatorul și divizorul de tensiune format din  $R_2$ -- $R_3$ , acesta va furniza o tensiune de polarizare de exact  $2,3 \text{ V}$ . Totuși, după ce conectăm tranzistorul la acest circuit, lucrurile se schimbă. Curentul existent prin baza tranzistorului se va aduna la curentul deja existent prin divizor și va reduce tensiunea de polarizare disponibilă pentru tranzistor. Folosind modelul diodă-sursă-de-curent al tranzistorului, problema polarizării devine mai clară.

### Modificarea rezistențelor de intrare

Ieșirea unui divizor de tensiune depinde nu doar de mărimea rezistorilor săi componenți, ci și de cantitatea de curent „divizată” de aceasta spre o sarcină. Joncțiunea P-N a tranzistorului reprezintă o sarcină datorită căreia tensiunea de curent continuu la bornele rezistorului  $R_3$  scade; curentul de polarizare se însumează cu cel de pe rezistorul  $R_3$ , modificând raportul rezistențelor calculat înainte, când am luat în considerare doar cei doi rezistori,  $R_2$  și  $R_3$ . Pentru obținerea unei tensiuni de polarizare de  $2,3 \text{ V}$ , valorile rezistorilor  $R_2$  și/sau  $R_3$  trebuiesc ajustate

pentru compensarea efectului curenului de bază. Pentru creșterea tensiunii de polarizare de pe  $R_3$ , putem scădea valoarea lui  $R_2$ , crește valoarea lui  $R_3$ , sau ambele.

### Graficul formelor de undă



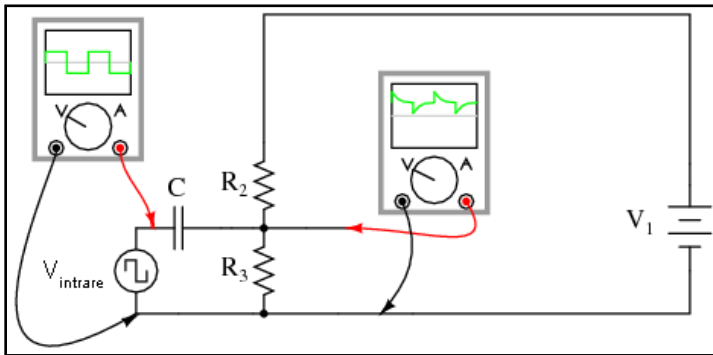
Folosind noi valori pentru cei doi rezistori ( $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 4 \text{ k}\Omega$ ), graficul formelor de undă corespunde unui amplificator de clasă A, exact ceea ce urmăream.

## 11. Cuplajul de intrare și de ieșire

### Cuplaj de intrare

#### Cuplaj capacitiv

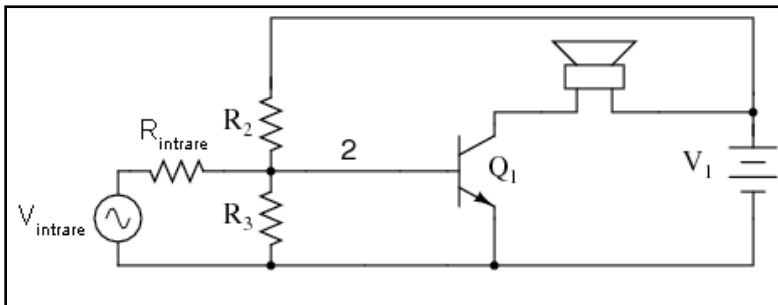
Pentru a rezolva problemele de polarizare în curent continuu ale amplificatorului, fără utilizarea unei baterii conectată în serie cu sursa de semnal de curent alternativ, am folosit un divizor de tensiune conectat la sursa de tensiune de curent continuu deja existentă în circuit. Pentru a putea folosi această configurație cu semnale de curent alternativ, am „cuplat” semnalul de intrare la divizor printr-un condensator (cuplaj capacitiv), condensator ce s-a comportat precum un filtru trece-sus. Folosind acest filtru, impedanța foarte scăzută a sursei de semnal de curent alternativ nu a putut scurt-circuita căderea de tensiune de curent continuu de pe rezistorul de jos al divizorului de tensiune. O soluție simplă la prima vedere, dar care prezintă și dezavantaje.



Cea mai evidentă problemă este că, amplificatorul poate acum să amplifice doar semnale de curent alternativ. O tensiune constantă de curent continuu, aplicată la intrare, va fi blocată de către condensatorul de cuplaj. Mai mult, din moment ce reactanța condensatorului este dependentă de frecvență, semnalele de curent alternativ de frecvențe joase nu vor fi amplificate la fel de mult

precum semnalele de frecvențe înalte. Semnalele ne-sinusoidale vor fi distorsionate, din moment ce condensatorul va răspunde diferit la fiecare dintre armonicile sale constituente. Un exemplu extrem ar fi un semnal dreptunghiular de frecvență joasă.

### Cuplaj direct



În situațiile în care problemele ridicate de cuplajul capacitiv nu pot fi tolerate, se poate folosi un cuplaj direct. Cuplajul direct folosește rezistori în locul condensatoarelor. Această configurație nu este dependentă de frecvență, fiindcă nu avem niciun condensator pentru filtrarea semnalului de intrare.

Dacă un cuplaj direct amplifică atât semnale de curent continuu cât și semnale de curent alternativ, de ce să folosim cuplaje capacitive în primul rând? Unul dintre motive ar fi evitarea tensiunii naturale de polarizare în curent continuu prezentă în semnalul de amplificat. Unele semnale de curent alternativ conțin și o componentă de curent continuu direct de la sursă, ce nu poate fi controlată, iar această tensiune necontrolată înseamnă că polarizarea tranzistorului este imposibilă.

Un alt motiv pentru utilizarea unui cuplaj capacitiv este lipsa atenuării semnalului de la intrare. În cazul cuplajului direct printr-un rezistor, atenuarea semnalului de intrare, astfel că doar o parte din acesta mai ajunge la baza tranzistorului, este un dezavantaj demn de luat în considerare. Unele aplicații necesită atenuarea semnalului de intrare într-o oarecare măsură, pentru prevenirea intrării tranzistorului în zona de saturație sau de blocare, astfel că o atenuare existentă pe cuplajul de intrare este oricum folositoare. În alte situații însă, nu este permisă atenuarea semnalului de intrare sub nicio formă, pentru obținerea unei amplificări în tensiunea cât mai bune; în acest caz, un cuplaj direct nu este o soluție foarte bună.

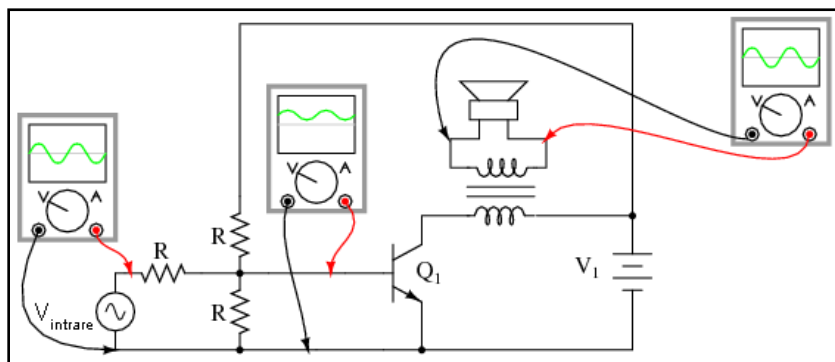
### Cuplaj de ieșire

În circuitul din exemplu, sarcina este reprezentată de un difuzor. Majoritatea difuzoarelor sunt electromagnetice: acestea folosesc forța generată de un electromagnet ușor, suspendat într-un câmp magnetic permanent, pentru deplasarea unui con de plastic sau hârtie, deplasare ce produce vibrații în aer, care mai apoi sunt interpretate de sistemul auditiv ca fiind sunete.

Aplicând o tensiune de o singură polaritate, conul se deplasează spre exterior; dacă inversăm polaritatea tensiunii, conul se deplasează spre interior. Pentru a putea utiliza întreaga libertate de mișcare a conului, difuzorul trebuie să primească o tensiune de curent alternativ pură (să nu conțină curent continuu). O componentă de curent continuu va tinde să deplaseze permanent conul de la poziția sa naturală din centru, iar deplasarea sa înainte-înapoi va fi limitată la aplicarea unei tensiuni de curent alternativ ca urmare a acestui fapt.

Dar în circuitul nostru de mai sus, tensiunea aplicată la bornele difuzorului este de o singură polaritate (tensiune alternativă + componentă de curent continuu), deoarece difuzorul este conectat în serie cu tranzistorul, iar tranzistorul nu poate conduce curent decât într-o singură direcție. Acest lucru nu este acceptabil pentru niciun amplificator audio.

### Transformator de cuplaj

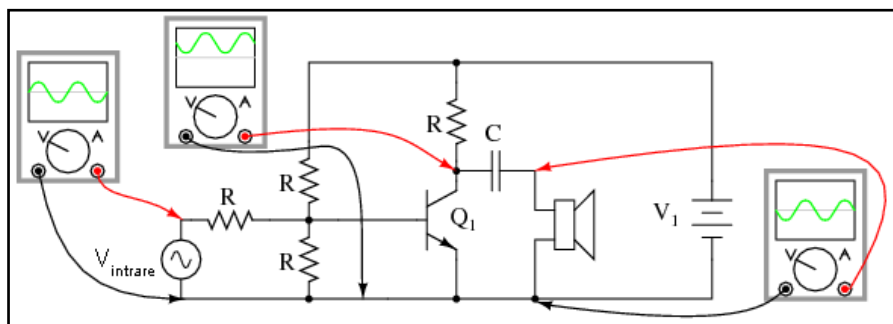


Prin urmare, trebuie să izolăm difuzorul față de componenta de curent continuu a curentului de colector, astfel încât acesta să primească doar tensiune de curent alternativ. O modalitate de realizare a acestui lucru, este cuplarea circuitului de colector al tranzistorului la difuzor prin intermediul unui transformator.

Tensiunea indusă în secundarul transformatorului (legat la difuzor) se va datora strict variațiilor curentului de colector, datorita faptului că inductanța mutuală a unui transformator funcționează doar la variațiile curentului prin înfășurare. Cu alte cuvinte, doar componenta de curent alternativ al curentul de colector va fi cuplată la secundar pentru alimentarea difuzorului.

Această metodă funcționează foarte bine, dar, transformatoarele sunt de obicei mari și grele, mai ales în aplicațiile de putere mare. De asemenea, este dificil de proiectat un transformator care să fie folosit într-o plajă largă de frecvențe, ceea ce este și cazul amplificatoarelor audio. Mai rău decât atât, curentul continuu prin înfășurarea primară duce la magnetizarea miezului doar într-o singură polaritate, ceea ce înseamnă că transformatorul se va satura mult mai ușor într-una dintre polaritățile semnalului de curent alternativ decât în cealaltă.

### Cuplaj capacitiv

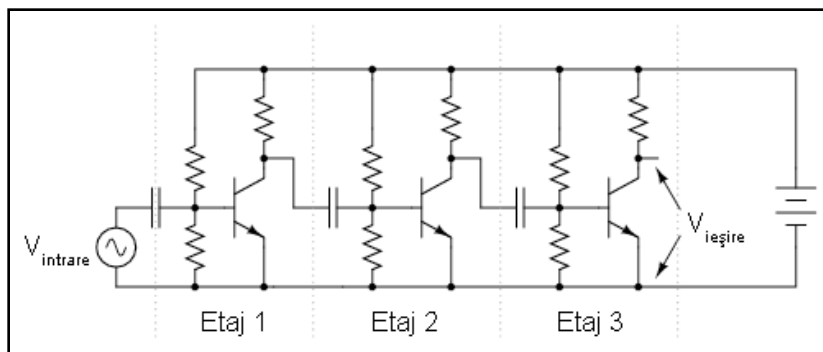


O altă metodă de izolare a componentei de curent continuu din semnalul de ieșire, este utilizarea unui condensator de cuplaj pe ieșire, într-o manieră similară cuplajului capacitiv de intrare.

Circuitul de mai sus seamănă foarte bine cu un amplificator în conexiune emitor comun, având colectorul tranzistorului conectat la baterie printr-un rezistor. Condensatorul se comportă precum un filtru trece-sus; majoritatea semnalului de curent alternativ se va regăsi pe difuzor, dar tensiunea de curent continuu va fi blocată de către filtru. Din nou, valoarea acestui condensator de cuplaj este aleasă astfel încât impedanța la frecvența semnalului să fie cât mai mică.

## Cuplarea amplificatoarelor între ele

### Cuplaj capacitiv



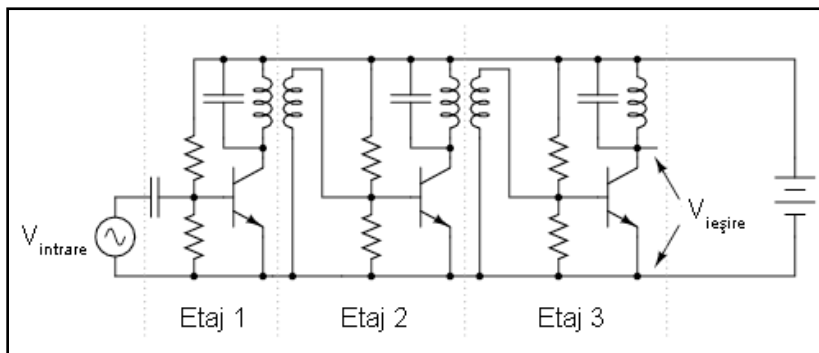
Blocarea tensiunii de c.c. de la ieșirea unui amplificator, fie prin utilizarea unui transformator sau a unui condensator, este folosită nu doar în cazul conectării unui amplificator la o sarcină, ci și la cuplarea unui amplificator la un alt amplificator. Amplificatoarele cu mai multe etaje sunt

folosite adesea pentru obținerea unor factori de amplificare mult mai mari decât este posibil utilizând un singur tranzistor.

Deși fiecare etaj se poate cupla direct cu următorul, prin intermediul unui rezistor în loc de condensator, acest lucru face ca întreg amplificatorul să fie foarte sensibil la variațiile tensiunii de polarizare în c.c., datorită faptului că această tensiune va fi amplificată în fiecare etaj odată cu semnalul de c.a. Dar, dacă etajele sunt cuplate capacitiv între ele, tensiunea de c.c. al unui etaj nu influențează tensiunea de polarizare al următorului etaj, deoarece trecerea acestuia este blocată.

### Cuplaj prin intermediul transformatoarelor





aer (fiind astfel imune la efectele de saturație), ce fac parte dintr-un circuit rezonant pentru blocarea trecerii armonicilor de frecvențe nedorite dintr-un etaj la celălalt. Circuitele rezonante se folosesc doar atunci când frecvența semnalului rămâne constantă, ceea ce este valabil în cazul circuitelor de radio frecvență.

De asemenea, etajele pot fi cuplate prin intermediul transformatoarelor, dar acest lucru nu se realizează prea des în practică, datorită problemelor menționate mai sus. O excepție o reprezintă amplificatoarele de radio-frecvență, unde se utilizează transformatoare de cuplaj mici, cu miez de

### Cuplaj direct

Trebuie menționat că este posibilă cuplarea directă a amplificatoarelor. În cazurile în care circuitul trebuie să amplifice și semnale de c.c., aceasta este singura alternativă.

## 12. Amplificatoare cu reacție

- Reacția înseamnă cuplarea ieșiri unui amplificator la intrarea acestuia
- Reacția pozitivă produce oscilații într-un circuit, astfel că acesta devine instabil
- Reacția negativă tinde să stabilizeze amplificatorul, astfel încât variația semnalului de ieșire este mai mică pentru o anumită variație a semnalului de intrare

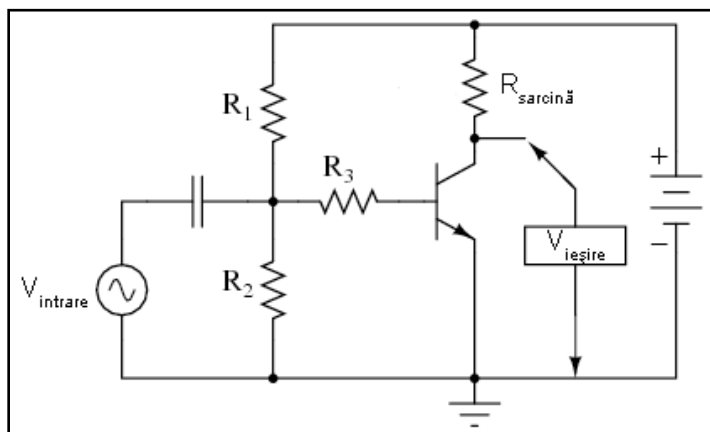
### Definiții

Dacă un anumit procent din semnalul de ieșire al amplificatorului este conectat la intrarea acestuia, astfel încât amplificatorul amplifică o parte din propriul său semnal de ieșire, rezultatul va fi un amplificator cu reacție. Prin *reacție pozitivă* se înțelege creșterea amplitudinii semnalului de intrare Prin *reacție negativă* se înțelege o scădere a amplitudinii semnalului de intrare

### Amplificator cu reacție negativă

Un amplificator echipat cu reacție negativa este mai stabil, distorsionează mai puțin semnalul de intrare și, în general, este capabil de amplificarea unor frecvențe mai largi. Dezavantajul este un factor de amplificare mai scăzut.

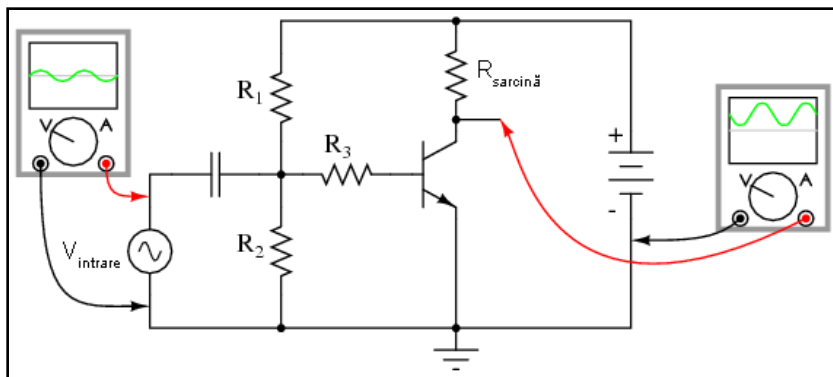
## Amplificator simplu, fără reacție



Să examinăm un amplificator simplu, inițial fără reacție.

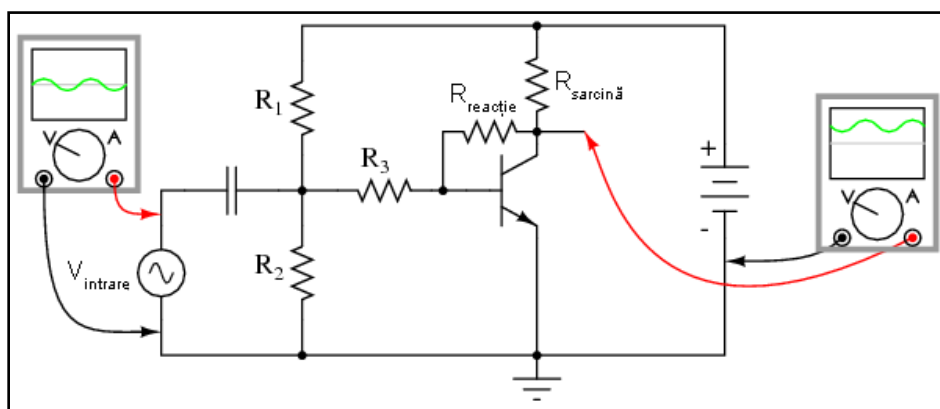
Configurația amplificatorului de mai sus este emitor comun, cu o rețea de polarizare formată din divizorul de tensiune  $R_1$ -- $R_2$ . Condensatorul cuplează semnalul de intrare în c.a., astfel încât sursa de semnal să nu conțină o componentă de c.c. datorită divizorului de tensiune  $R_1$ -- $R_2$ . Rolul rezistorului  $R_3$  este de a controla amplificarea în tensiune, și l-am putea

îndepărta pentru o amplificare în tensiune maximă.



La fel ca și în cazul tuturor amplificatoarelor emitor comun, și acesta inversează semnalul de intrare. Putem vedea alăturat formele de undă ale tensiunilor de intrare și ieșire.

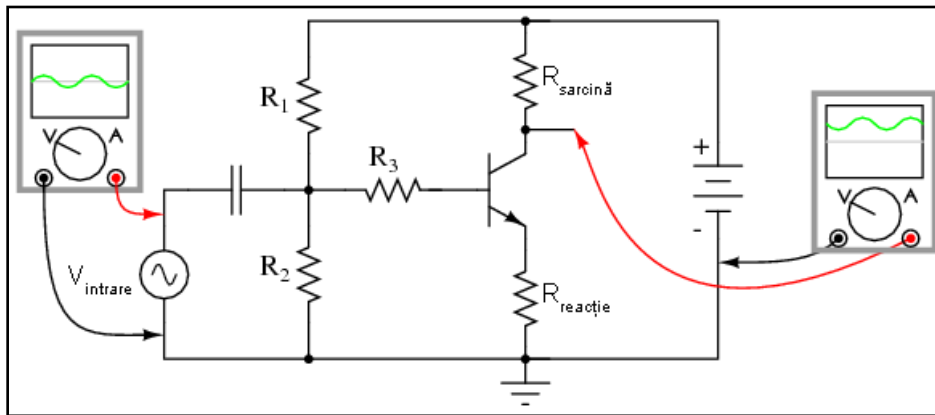
## Reacția negativă între colector și bază



Datorită faptului că semnalul de ieșire este inversat (defazat cu  $180^\circ$  (anti-fază)), orice conexiune între ieșirea (colector) și intrarea (bază) tranzistorului va duce la apariția unei reacții negative.

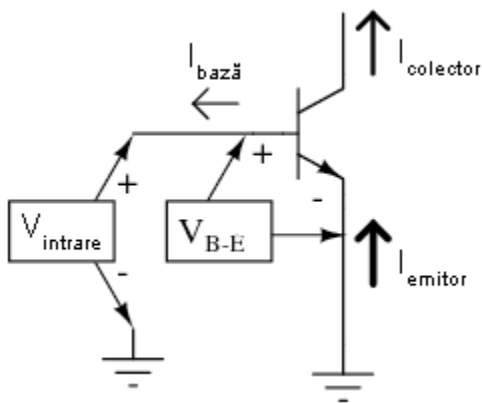
Rezistențele  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , și  $R_{\text{reacție}}$  funcționează împreună precum o rețea de semnale, astfel că tensiunea de la baza tranzistorului (față de pământ) reprezintă o medie a tensiunii de intrare și a tensiunii de reacție negativă, rezultând un semnal de o amplitudine redusă la intrarea amplificatorului. Astfel, amplificatorul de mai sus, va avea un factor de amplificare mai redus, dar o liniaritate îmbunătățită (reducerea distorsiunilor) și o bandă de frecvențe mărită.

## Reacția negativă între emitor și împământarea circuitului



Aceasta nu este însă singura modalitate de introducere a reacției negative într-un amplificator emitor comun. O altă metodă, deși mai greu de înțeles la început, constă în introducerea unui rezistor între terminalul emitorului și împământarea circuitului.

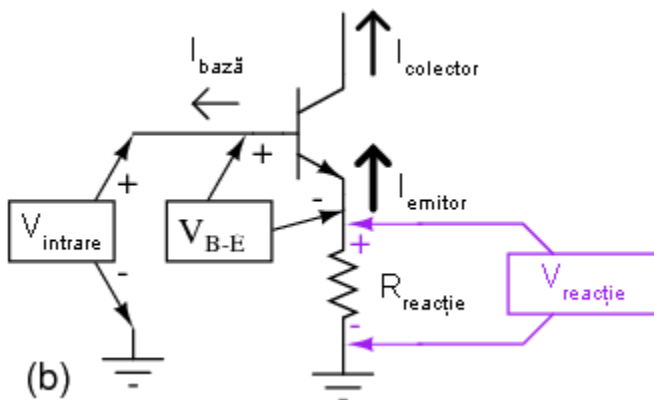
În acest caz, căderea de tensiune pe rezistorul de reacție va fi direct proporțională cu valoarea curentului prin emitorul tranzistorului, opunându-se în acest fel influenței semnalului de intrare asupra joncțiunii bază-emitor a tranzistorului.



Să ne uităm mai atent la joncțiunea emitor-bază pentru a ne da seama de efectele introducerii acestui rezistor în circuit:

Atunci când nu avem rezistorul de reacție în circuit ( $R_{\text{reacție}}$ ), tensiunea de intrare ( $V_{\text{intrare}}$ ) ce trece de condensatorul de cuplaj și de rețeaua formată din rezistorii  $R_1/R_2/R_3$ , se va regăsi în totalitate pe joncțiunea bază-emitor a tranzistorului sub forma tensiunii de intrare ( $V_{B-E}$ ). Cu alte cuvinte, fără  $R_{\text{reacție}}$ ,  $V_{B-E} = V_{\text{intrare}}$ . Prin urmare, dacă  $V_{\text{intrare}}$  crește cu 100 mV, atunci și  $V_{B-E}$  crește cu 100 mV: variația uneia este egală cu variația celeilalte, din moment ce ambele tensiunii

sunt egale.



Să examinăm acum efectele introducerii rezistorului  $R_{\text{reacție}}$  între emitor și împământare.

De data aceasta,  $V_{\text{reacție}} + V_{B-E} = V_{\text{intrare}}$ . Odată cu introducerea rezistenței de reacție în bucla ( $V_{\text{intrare}}$ ,  $V_{B-E}$ ) nu va mai fi egală cu  $V_{\text{intrare}}$ . Știm faptul că rezistorul  $R_{\text{reacție}}$  va avea o cădere de tensiune la bornele sale proporțională cu valoarea curentului prin emitor, valoare ce este controlată de curentul de bază, curent ce este la rândul lui controlat de căderea de tensiune pe

joncțiunea bază-emitor ( $V_{B-E}$ ) a tranzistorului.

Astfel, dacă tensiunea de intrare crește, acest lucru va duce la creșterea lui  $V_{B-E}$ , ce duce la creșterea curentului bazei, ce duce la creșterea curentului prin colector (sarcină), ce cauzează creșterea curentului prin emitor, care la rândul lui va determina creșterea căderii de tensiune pe rezistorul de reacție  $R_{\text{reacție}}$ . Dar această creștere a căderii de tensiune pe  $R_{\text{reacție}}$  se scade din tensiune de intrare ( $V_{\text{intrare}}$ ), lucru ce duce la reducerea căderii de tensiune între bază și emitor ( $V_{B-E}$ ); creșterea reală a lui  $V_{B-E}$  va fi de fapt mai mică decât creșterea lui  $V_{\text{intrare}}$ . O creștere de 100 mV a tensiunii de intrare nu va mai duce la o creștere de 100 mV a tensiunii de polarizare bază-emitor, întrucât cele două tensiuni nu sunt egale între ele.

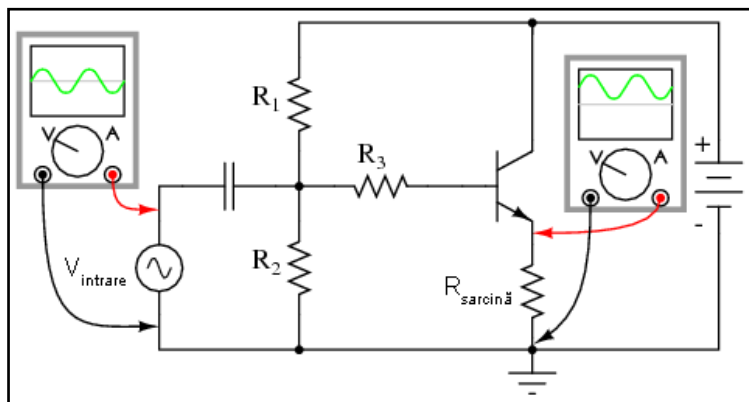
Ca urmare, tensiunea de intrare exercită un control mai redus asupra tranzistorului față de cazurile precedente, iar amplificarea în tensiune este redusă și ea ca urmare a introducerii rezistorului de reacție.

## Deriva termică

În circuitele emitor comun practice, reacția negativă nu este doar un lux, ci o necesitate pentru funcționarea stabilă a circuitului. Într-o lume perfectă, am putea construi și utiliza un amplificator emitor comun fără reacție negativă, iar acest lucru ne-ar furniza o amplificare mare în tensiune. Din păcate însă, relația dintre tensiunea bază-emitor și curentul bază-emitor variază cu temperatura, acest lucru fiind descris de ecuația diodei. Pe măsură ce tranzistorul se încălzește, căderea de tensiune pe joncțiunea bază-emitor necesară pentru aceeași valoare a curentului va fi tot mai mică.

Acest lucru nu este de dorit, întrucât divizorul de tensiune  $R_1$ -- $R_2$  este proiectat să furnizeze curentul corect pentru funcționarea tranzistorului la punctul static de funcționare. Dacă relația curent/tensiune a tranzistorului variază cu temperatura, valoarea tensiunii de polarizare în c.c, necesară pentru operarea tranzistorului în clasa dorită, se va modifica. Un tranzistor încălzit va conduce un curent și mai mare pentru aceeași valoare a tensiunii de polarizare, ducând la o încălzire și mai mare a acestuia și la un curent și mai mare de polarizare. Efectul este cunoscut sub numele de derivă termică.

## Conexiunea colector comun



Amplificatoarele colector comun nu sunt afectate de deriva termică. De ce? Răspunsul este strâns legat de reacția negativă.

Putem observa că sarcina amplificatorului colector comun este conectată în exact același loc în care am introdus  $R_{\text{reacție}}$  în circuitul precedent, și anume, între emitor și împământare. Acest lucru înseamnă că singura cădere de tensiune pe joncțiunea bază-emitor este reprezentată de diferența dintre  $V_{\text{intrare}}$  și  $V_{\text{ieșire}}$ , rezultatul fiind o amplificare în tensiune foarte mică (de obicei aproape de 1). Apariția derivei termice este imposibilă pentru acest tip de amplificator: în cazul în care curentul bazei ar crește datorită încălzirii tranzistorului, curentul emitorului va crește și el, rezultând o cădere de tensiune mai mare pe sarcină, cădere de tensiune ce se scade din tensiunea de intrare ( $V_{\text{intrare}}$ ); acest lucru duce la descreșterea căderii de tensiune între bază și emitor.

## Avantajele utilizării reacției negative

Prin adăugarea unui rezistor de reacție între emitor și împământare în cazul unui amplificator emitor comun, amplificatorul se va comporta mai puțin precum un amplificator emitor comun „pur” și puțin mai mult precum un amplificator colector comun. Valoarea acestui rezistor de reacție este în general mult mai mică decât valoarea sarcinii, minimizând cantitatea de reacție negativă și menținând amplificarea în tensiune destul de ridicată.

Un alt beneficiu al reacției negative constă în faptul că scade dependența amplificării în tensiune de caracteristicile tranzistorului. Observați că în cazul amplificatorului colector comun, amplificarea în tensiune este aproximativ egală cu 1, indiferent de factorul beta ( $\beta$ ) al amplificatorului. Acest lucru înseamnă, printre altele, că putem schimba tranzistorul din configurația colector comun cu un alt tranzistor al cărui factor beta este diferit, fără a vedea modificări semnificative față de amplificarea tensiunii. Într-un amplificator emitor comun, amplificarea în tensiune depinde foarte mult de  $\beta$ .

Dacă ar fi să înlocuim un tranzistor dintr-o configurație emitor comun, cu un tranzistor al cărui  $\beta$  este diferit, amplificarea în tensiune ar suferi modificări substanțiale. Într-un amplificator emitor comun cu reacție negativă, amplificarea în tensiune va fi de asemenea dependentă de factorul beta într-o oarecare măsură, dar nu într-o asemenea măsură precum fără reacție; circuitul va fi în acest caz mult mai previzibil, în ciuda variațiilor factorului  $\beta$  al tranzistorilor folosiți.

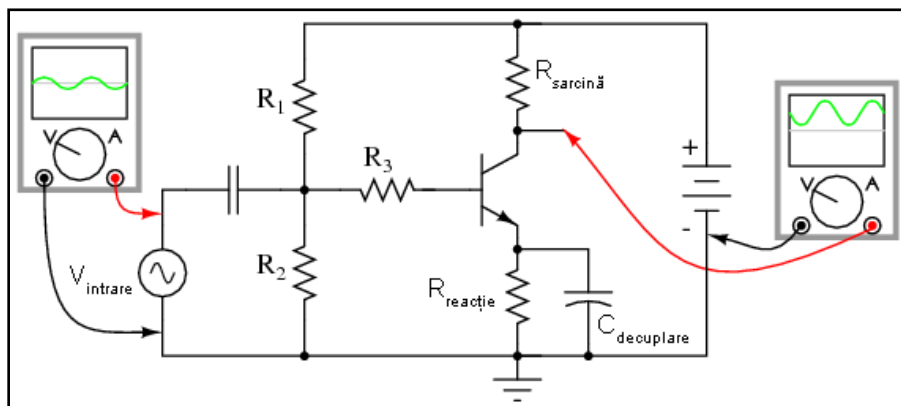
## Condensatorul de decuplare

Faptul că trebuie să introducem o reacție negativă într-un amplificator emitor comun pentru evitarea derivei termice nu este o soluție satisfăcătoare. Putem evita deriva termică fără a fi nevoiți a suprima factorul de amplificare în tensiune ridicat al acestui tip de amplificator?

Putem găsi o soluție dacă analizăm îndeaproape această problemă: tensiunea amplificată care trebuie minimizată pentru evitarea derivei termice, este cea de c.c., nu cea de c.a. Nu semnalul de intrare în c.a. este cel care duce la apariția derivei termice, ci tensiunea de polarizare în c.c., tensiune necesară pentru o anumită clasă de funcționare; este acea tensiune de c.c. folosită pentru a „păcăli” tranzistorul (un dispozitiv de c.c.) să amplifice și

semnale de c.a. Putem suprima amplificarea în c.c. fără ca acest lucru să afecteze amplificarea în c.a., dacă putem găsi o cale prin care reacția negativă să funcționeze doar în c.c. Cu alte cuvinte, dacă semnalul reintrodus de la ieșire la intrare este un semnal de c.c., nu de c.a.

Dacă vrem ca reacția negativă să conțină doar semnale de c.c., dar nu și semnale de c.a., avem nevoie de o impedanță mare pentru c.c. dar mică pentru c.a. Ce tip de circuit prezintă o impedanță mare la c.c. dar o impedanță mică la c.a.? Desigur, un filtru trece-sus.

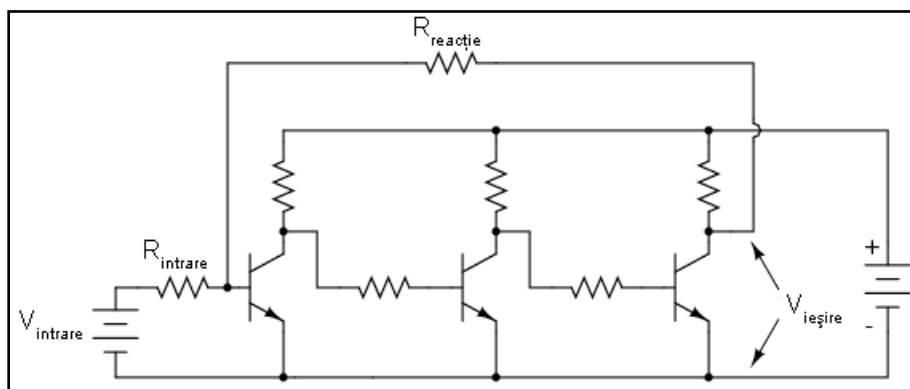


Prin conectarea unui condensator în paralel cu rezistorul de reacție, putem crea exact situația de care avem nevoie: o cale dinspre emitor spre împământare ce este mai ușor de parcurs pentru semnalele de c.a. decât cele de c.c.

Noul condensator decuplează semnalele de c.a. dinspre emitor spre împământare, astfel încât să nu existe o cădere de tensiune apreciabilă (impedanță mică, cădere de tensiune mică) între emitor și împământare, tensiunea care ar putea duce la suprimarea amplificării în tensiune a circuitului.

Curentul continuu, pe de altă parte, nu poate trece prin condensatorul de decuplare (impedanță mare în c.c.) și trebuie să treacă prin rezistorul de reacție; acest lucru duce la apariția unei căderi de tensiune între emitor și împământare ce afectează amplificarea în tensiune a circuitului și stabilizează răspunsul amplificatorului în c.c. prevenind astfel deriva termică. Deoarece vrem ca reactanța ( $X_C$ ) acestui condensator să fie cât mai mică posibilă, acesta ar trebui să fie cât mai mare. Deoarece polaritatea acestui condensator nu se va modifica niciodată, putem folosi un condensator polarizat (electrolitic) în această situație.

## Folosirea amplificatoarelor etajate



O altă abordare a problemei reducerii amplificării în tensiune datorită utilizării reacției negative, este folosirea mai multor etaje de amplificare în loc de unul singur. În cazul în care amplificarea atenuată în tensiune a unui singur tranzistor nu este suficientă pentru aplicația

respectivă, putem folosi mai mulți tranzistori pentru compensarea reducerii cauzate de reacția negativă. Circuitul alăturat constă din trei etaje de amplificare în conexiune emitor comun cu reacție negativă.

Reacția negativă de la etajul final înspre intrare se realizează prin intermediul unui singur rezistor,  $R_{\text{reacție}}$ . Din moment ce fiecare etaj este un amplificator emitor comun (inversor), numărul impar de etaje dinspre intrare spre ieșire va inversa semnalul de ieșire, iar reacția va fi negativă. Se pot folosi valori relativ mari de reacție fără a sacrifica amplificarea în tensiune, deoarece această amplificare este foarte mare de la bun început.

## Avantaje

La o privire de ansamblu, poate părea că această filozofie nu este elegantă și este chiar contra-productivă. Nu este adăugarea de etaje unul după altul o metodă cam grosolană de evitare a pierderilor de amplificare în tensiune, datorită utilizării reacției negative? Ce rost are să creăm o amplificare în tensiune foarte mare, folosind trei etaje de amplificare, dacă vom atenua oricum această amplificare prin intermediul reacției negative? „Rostul” acestei configurații este creșterea stabilității și a predictabilității circuitului, luat ca întreg. Dacă cele trei etaje de amplificare sunt proiectate pentru furnizarea unei amplificări în tensiune foarte mari (zeci de mii, sau chiar mai mult), fără reacție, vom descoperi că adăugarea reacției negative în circuit se traduce printr-o dependență mult mai mică a amplificării în tensiune față de amplificările fiecărui etaj în parte; amplificarea în tensiune va fi aproximativ egală cu raportul  $R_{\text{reacție}}/R_{\text{intrare}}$ . Cu cât circuitul prezintă o amplificare în tensiune mai mare (fără reacție), cu atât amplificarea în tensiune va fi mai apropiată de  $R_{\text{reacție}}/R_{\text{intrare}}$  odată ce este introdusă și reacția în circuit. Cu alte cuvinte, amplificarea în tensiune a acestui circuit depinde doar de valorile celor doi rezistori, și de nimic altceva.

Acest lucru este un avantaj imens pentru producția de serie a circuitelor electronice: dacă se pot construi amplificatoare cu o amplificare previzibilă folosind tranzistori cu factori beta diferiți între ei, selecția și înlocuirea componentelor este foarte ușoară. Înseamnă de asemenea că amplificarea variază foarte puțin cu temperatura. Acest principiu de stabilizare a amplificării este dus la extrem în cazul amplificatoarelor operaționale.

## **05 - Dispozitive multijoncțiune**

### **1 - Histereza**

Dispozitivele multijoncțiune sunt o clasă de componente semiconductoare cu histereză, o proprietate prin care un sistem nu se reîntoarce la starea sa inițială după ce acțiunea perturbatoare este îndepărtată. Un exemplu foarte simplu de histereză îl constituie un întrerupător mecanic: atunci când brațul este acționat, acesta se va poziționa pe una din cele două poziții extreme și va rămâne în această poziție chiar și după ce forța exterioară este îndepărtată.

Tranzistoarele bipolare cu joncțiune, cele cu efect de câmp și cele cu efect de câmp cu poartă izolată sunt toate dispozitive fără histereză. Acest lucru înseamnă că ele nu se „agață” într-o anumită stare după ce aplicarea tensiunii sau a curentului exterior încetează. Oricare ar fi semnalul de intrare al acestor dispozitive într-un anumit moment, acestea vor prezenta un răspuns de ieșire previzibil, așa cum este el definit de curbele lor caracteristice. Dispozitivele multijoncțiune, pe de altă parte, sunt dispozitive semiconductoare ce tind să rămână pornite odată ce au fost pornite și invers, oprite odată ce au fost oprite. O acțiune momentană poate duce la trecerea dispozitivelor dintr-o stare în alta, stare în care vor rămâne și după ce acțiunea externă încetează. Prin urmare, aceste dispozitive sunt folosite doar ca și întrerupătoare și nu pot fi folosite pe post de amplificatoare.

Dispozitivele multijoncțiune sunt construite folosind aceeași tehnologie precum a tranzistoarelor bipolare, și pot fi de fapt analizate ca și circuite compuse din perechi de tranzistoare. Cum poate atunci un dispozitiv cu histereză să fie construit din dispozitive ce nu prezintă această proprietate? Răspunsul este de data de reacția pozitivă. Această reacție tinde să satureze dispozitivul.

### **2 - Tuburi electronice cu descărcare în gaze**

Înainte de a studia însă dispozitivele multijoncțiune, este indicat să luăm în considerare și predecesorul tehnologic al acestora, și anume, tuburile electronice cu descărcare în gaze.

#### **Fulgerele și histereza**

Putem observa histereza electrică pe viu în cazul fulgerelor. Acțiunea vântului puternic și a ploii duce la acumularea de sarcini electrice imense între nori și între nori și pământ. Dezechilibrul de sarcină electrică se manifestă sub formă de diferență de potențial, sau tensiune electrică, iar când rezistența electrică a aerului nu mai



poate face față acestor tensiuni înalte, vor apărea cantități mari și de scurtă durată de curent electric între polii opuși ai sarcinilor electrice, fenomen ce poartă numele de fulger.

Acumularea tensiunilor înalte sub acțiunea vântului și a ploii este un proces aproximativ continuu, rata acumulărilor de sarcină crescând atunci când condițiile atmosferice sunt prielnice. Cu toate acestea, fulgerele nu sunt un fenomen continuu: acestea există sub forma curenților mari și de scurtă durată. De ce se întâmplă acest lucru? De ce nu vedem arcuri electrice de lungă durată dar de o intensitate mai redusă? Răspunsul se regăsește în rezistența neliniară a aerului.

### **Formarea plasmei**

În condiții normale, aerul posedă o rezistență electrică extrem de mare, atât de mare încât o considerăm de obicei ca fiind infinită iar conductivitatea prin aer aproape neglijabilă. Prezența apei și a prafului scade rezistența acestuia, dar practic, acesta rămâne tot un dielectric. Atunci când se aplică o tensiune suficient de mare între două puncte separate de aer, proprietățile electrice ale acestuia suferă unele modificări: electronii sunt „smulși” de pe pozițiile lor normale și de pe atomii lor respectivi, eliberarea lor constituind un curent. În această stare, aerul este considerat ca fiind ionizat și poartă numele de plasmă și nu de gaz, a patra stare a materiei, pe lângă cea solidă, lichidă și gazoasă. Plasma este un conductor relativ bun de electricitate, rezistivitatea acesteia fiind mult mai mică decât cea a aceleiași substanțe sub formă gazoasă.

### **Menținerea plasmei și revenirea la forma gazoasă**

Pe măsură ce curentul trece prin plasmă, va exista o energie disipată prin plasmă sub formă de căldură, la fel ca și în cazul curentului printr-un rezistor solid. În cazul fulgerelor, temperaturile sunt extrem de mari. Aceste temperaturi ridicate sunt la rândul lor suficiente pentru transformarea aerului din forma gazoasă în plasmă sau pentru menținerea plasmei în acea stare fără prezența tensiunilor înalte. Pe măsură ce diferența de potențial dintre nori sau dintre nor și pământ scade datorită echilibrării sarcinilor electrice, căldura degajată de fulger menține drumul dintre cele două acumulări de sarcină în stare de plasmă, iar rezistența este prin urmare scăzută. Fulgerul rămâne sub formă de plasmă până în momentul în care tensiunea scade suficient de mult încât să nu mai poată susține un curent necesar disipării unei călduri suficient de mari. În final, aerul se reîntoarce în starea sa gazoasă iar curentul încetează; din acest moment, va reîncepe acumularea sarcinilor.

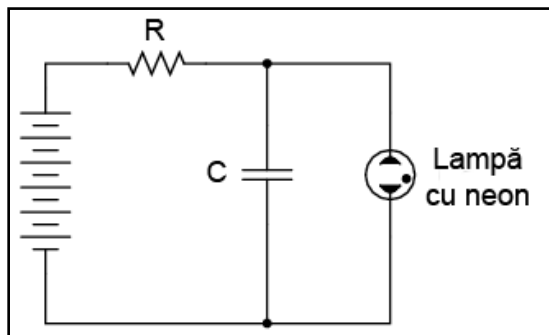
### **Histereza aerului**

Putem observa că în acest caz, aerul prezintă histereză. Atunci când nu conduce electricitate, tinde să rămână un dielectric până în momentul în care acumularea de sarcini (tensiunea) trece de un anumit prag critic. După acest punct, aerul tinde să rămână un conductor (sub formă de plasmă) până când tensiunea scade sub un anumit prag critic minim. Acest histerezis, combinat cu acumularea de tensiune datorită efectelor electrostatice ale vântului și ploii, explică în mare comportamentul de scurtă durată și intensitate mare a fulgerelor.

## Circuite oscilatoare

Din punct de vedere electronic, avem de a face cu un oscilator dinte de fierăstrău. Oscilatoarele sunt circuite electronice ce produc o tensiune alternativă dintr-o sursă de tensiune continuă. Un oscilator dinte de fierăstrău funcționează pe principiul încărcării unui condensator și descărcării bruște ale acestuia de fiecare dată când tensiunea atinge un prag critic.

Printre cele mai simple astfel de oscilatoare se numără un oscilator compus din trei componente (fără a include sursa de putere de c.c): un rezistor, un condensator și o lampă cu neon.

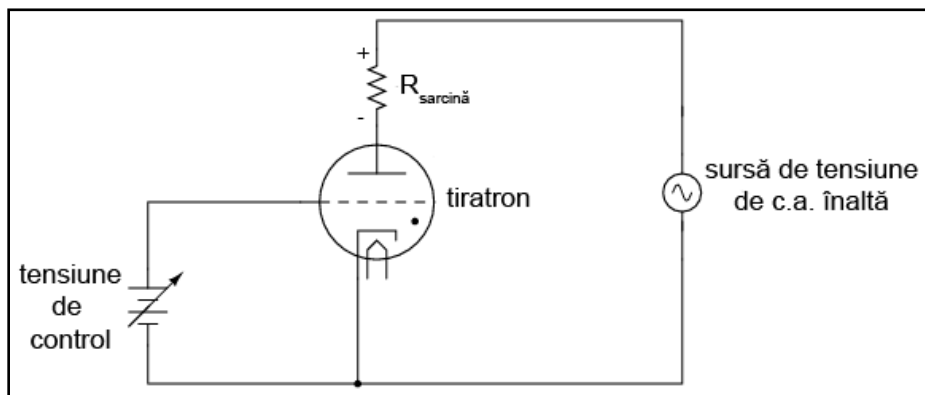


Lămpile cu neon nu sunt altceva decât doi electrozi metalici într-un tub de sticlă etanș, separați de neonul din interior. La temperatura camerei, fără existența niciunei tensiuni aplicate pe cei doi electrozi, lampa prezintă o rezistență infinită. Totuși, dacă se depășește o anumită tensiune de prag (această tensiune depinzând de presiunea gazului și de geometria tubului), neonul se va ioniza (transforma în plasmă) iar rezistența sa va scădea brusc. În

principiu, lampa cu neon prezintă aceleași caracteristici precum aerul în cazul fulgerelor.

Condensatorul din circuitul de mai sus se încarcă cu o rată exponențială inversă, rată determinată de mărimea rezistorului. Atunci când tensiunea atinge pragul critic de tensiune al lămpii, lampa se va „aprinde” brusc și va duce la descărcarea rapidă a condensatorului spre o tensiune mică. Odată descărcat, lampa se va „stinge” și va permite reîncărcarea condensatorului. Rezultatul este o serie de „fulgere” de scurtă durată pe lampă, rata acestora fiind determinată de tensiunea bateriei, rezistența rezistorului, capacitatea condensatorului și pragul critic de tensiune al lămpii.

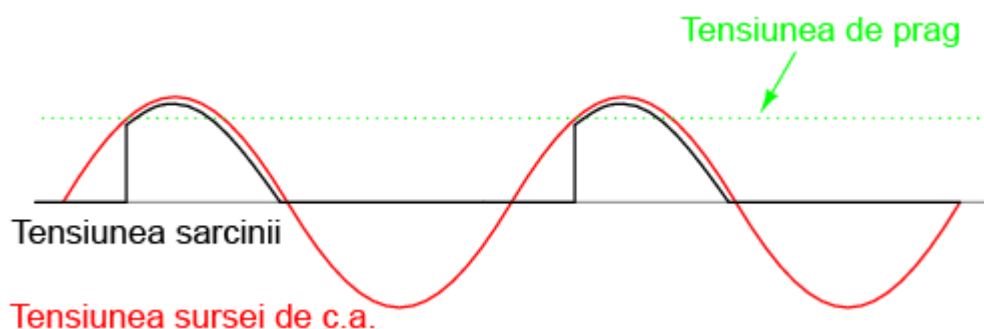
## Tiratronul



Deși lămpile cu descărcări în gaze, de genul celei de mai sus, sunt folosite de obicei ca și surse de iluminat, proprietățile lor de histereză pot fi folosite sub variante mult mai sofisticate, și anume tuburile tiratron. Fiind de fapt o triodă, tiratronul poate fi

pornit cu ajutorul unei tensiuni de control mici aplicate între grilă și catod, și poate fi oprit prin reducerea tensiunii dintre anod și catod.

În principiu, tiratroanele erau versiuni controlate ale lămpilor cu neon, proiectate special pentru comutarea curentului pe sarcină. Punctul din interiorul simbolului indică faptul că acest dispozitiv este umplut cu gaz, spre deosebire de celelalte tuburi cu vid. În circuitul de sus tiratronul permite trecerea curentului prin sarcină într-o singură direcție (observați polaritatea rezistorului) atunci când este pornit de către o tensiune de comandă de c.c. dintre grilă și catod. Sursa de putere a sarcinii este în c.a., indicând modul în care dispozitivul este oprit: din moment ce tensiunea de c.a. trece periodic printr-o condiție de 0 V, curentul prin sarcina alimentată în c.a. va atinge periodic o valoare de 0 A. Această pauză scurtă dintre semi-perioade permite tubului să se răcească și să se reîntoarcă în starea „oprit”. Conducția va reîncepe doar dacă va exista o tensiune suficient de mare aplicată de sursa de putere în c.a. și dacă sursa de c.c. o va permite.



Tensiunea de sarcină într-un astfel de circuit va arăta aproximativ precum în figura alăturată.

Pe măsură ce tensiunea de c.a. crește de la zero volți spre primul vârf, tensiunea pe sarcină rămâne de zero volți (curent de sarcină zero) până când este atinsă valoarea tensiunii de prag. În acel moment, tubul trece în starea „pornit” și începe să conducă, tensiunea de sarcină fiind aceeași cu tensiunea sursei de alimentare în c.a. pentru restul perioadei. Chiar și după ce forma de undă de c.a. scade sub valoarea tensiunii de prag, va mai exista tensiune pe sarcină, și prin urmare și curent. Acest lucru se datorează histerezei: dispozitivul rămâne în starea de conducție (pornit) dincolo de punctul de pornire inițial, continuând să conducă până în momentul în care tensiunea de alimentare scade spre aproximativ zero volți. Datorită faptului că tiratroanele sunt dispozitive uni-direcționale (precum diodele), căderea de tensiune pe sarcină în cazul semi-perioadei negative a semnalului de c.a. este zero. În circuitele practice, se vor folosi mai multe dispozitive aranjate sub forma unei punți redresoare pentru a permite trecerea întregii forme de undă spre sarcină.

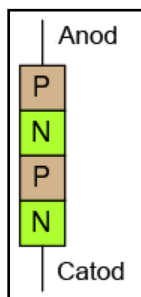
Tuburile tiratron au fost înlocuite complet de către componentele semiconductoare moderne, exceptând câteva aplicații speciale. Dispozitivele multijoncțiune moderne realizează însă același lucru precum dispozitivul prezentat mai sus: pornirea și oprirea curenților prin intermediul histerezei.

### 3 - Dioda Shockley

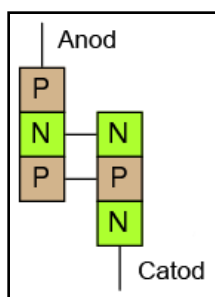
- Dioda Shockley este un dispozitiv semiconductor format din patru straturi PNPN. Aceste straturi se comportă precum o pereche de tranzistori PNP și NPN interconectați
- La fel ca toate dispozitivele multijoncțiune, diodele Shockley tind să rămână în starea de conducție odată pornite și în starea blocată odată oprite
- Pentru trecerea unei diode Shockley în starea de conducție, este necesară depășirea tensiunii de străpungere anod-catod
- Pentru blocarea unei diode Shockley, este necesară reducerea curentului prin aceasta sub un anumit prag critic

#### Reprezentarea echivalentă și simbol

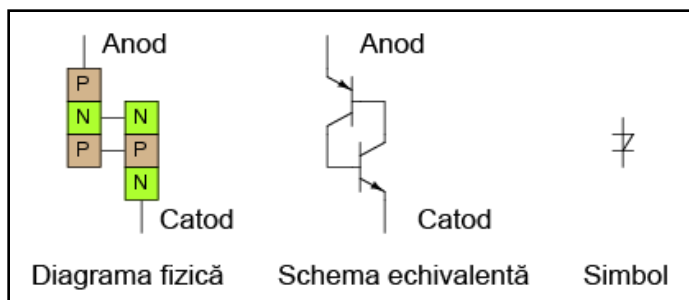
Primul dispozitiv din seria dispozitivele multijoncțiune pe care îl vom studia este o diodă cu patru straturi, cunoscută sub numele de diodă PNPN, sau dioda Shockley, după cel care a inventat-o, William Shockley. Acest dispozitiv nu trebuie confundat cu dioda Schottky, dispozitivul metal-semiconductor cunoscut pentru viteza mare de comutație.



O reprezentare brută a diodei Shockley, reprezentare întâlnită adesea în manuale, constă din patru straturi de material semiconductor P-N-P-N, unul peste altul.

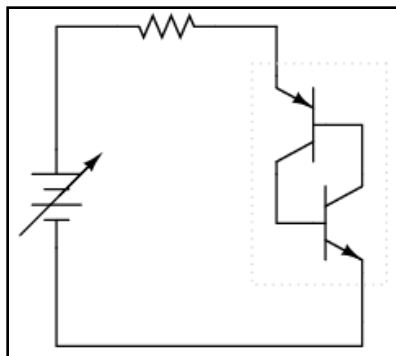


Din păcate, această reprezentare nu explică deloc modul de funcționare al acestui dispozitiv. Să considerăm așadar o reprezentare alternativă a construcției dispozitivului în figura alăturată.



Sub această reprezentare, dispozitivul pare a fi un set de tranzistori bipolari interconectați, unul de tip PNP iar celălalt de tip NPN. Utilizând simbolurile standard și respectând concentrațiile dopărilor, dioda Shockley arată conform figurii alăturate.

## Modul de funcționare



Să conectăm un astfel de dispozitiv la o sursă variabilă de tensiune pentru a observa comportamentul acestuia.

Desigur, fără nicio tensiune aplicată, nu va exista niciun curent. O creștere inițială a tensiunii nu va duce la apariția niciunui curent datorită faptului că ambii tranzistori se vor afla în stare blocată. Pentru a înțelege motivul unui astfel de comportament, trebuie să înțelegem ce anume este necesar pentru trecerea unui tranzistor în faza de conducție, și anume, existența unui curent

prin joncțiunea bază-emitor. Dar, după cum putem observa din diagramă, curentul de bază prin tranzistorul de jos este controlat de către tranzistorul de sus, iar curentul de bază al tranzistorului de sus este controlat de către tranzistorul de jos. Cu alte cuvinte, niciunul dintre tranzistori nu poate intra în starea de conducție până când celălalt nu se află și el în starea de conducție.

## Pornirea diodei Shockley

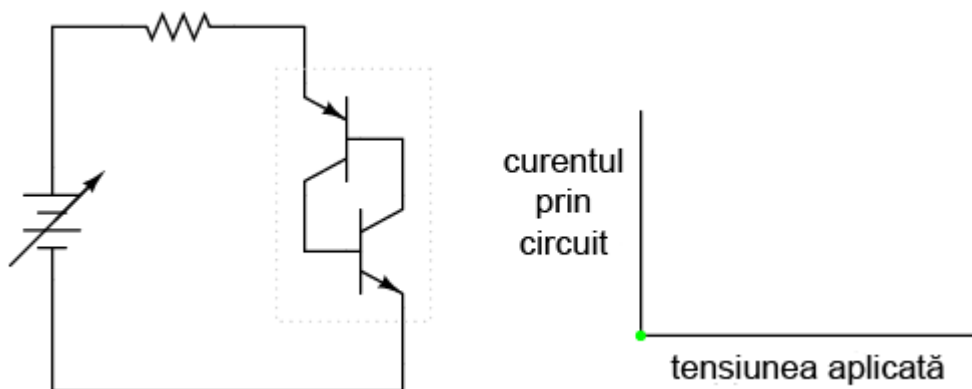
Prin urmare, cum poate o diodă Shockley să conducă curent, dacă tranzistorii săi constituenți se află tot timpul în stare blocată? Răspunsul este dat de comportamentul tranzistorilor reali, spre deosebire de tranzistorii ideali. Un tranzistor bipolar real nu va conduce niciodată curent prin colector fără existența unui curent de bază, indiferent de valoarea tensiunii aplicate între colector și emitor. Tranzistorii reali pe de altă parte, posedă limite finite ale valorilor tensiunii colector-emitor pe care aceștia le pot susține înainte de a intra în starea de conducție. Cu alte cuvinte, peste o anumită valoare a tensiunii colector-emitor, tranzistorul va intra în starea de conducție, indiferent de curentul de bază. Dacă doi tranzistori sunt conectați în acest mod pentru formarea unei diode Shockley, fiecare dintre ei va conduce dacă se va aplica o tensiune suficient de mare prin intermediul bateriei dintre anod și catod. Odată ce unul dintre tranzistori intră în starea de conducție, acesta va duce la apariția unui curent de bază prin celălalt tranzistor, ducând la funcționarea normală a aceluia tranzistor, ceea ce duce la apariția unui curent de bază prin tranzistorul inițial. Rezultatul final este că ambii tranzistori se vor satura, menținându-se unul pe celălalt în conducție.

## Oprirea diodei Shockley

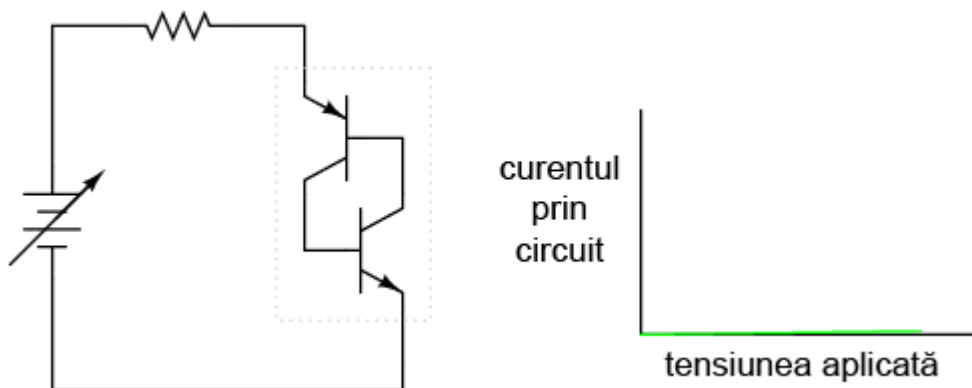
Prin urmare, putem forța intrarea în conducție a unei diode Shockley prin aplicarea unei tensiuni suficient de mari între anod și catod. După cum am văzut, acest lucru va duce inevitabil la pornirea unuia dintre tranzistori, ceea ce duce la rândul său și la pornirea celuilalt tranzistor și „agățarea” ambilor tranzistori în starea de conducție, acolo unde vor și rămâne. Dar cum putem opri cei doi tranzistori acum? Chiar dacă tensiunea aplicată este redusă cu mult sub punctul necesar intrării în conducție a diodei, aceasta va rămâne în starea de conducție datorită faptului

că prin ambii tranzistori există acum un curent de bază suficient pentru menținerea conducerii controlate. Răspunsul este reducerea tensiunii aplicate sub un nivel mult mai mic, astfel încât valoarea curentului să fie mai mică decât valoarea necesară polarizării directe a tranzistorilor, punct în care unul dintre tranzistori va intra în starea de blocare, ducând la oprirea curentului prin baza celui alt tranzistor și intrarea ambilor în starea de blocare inițială.

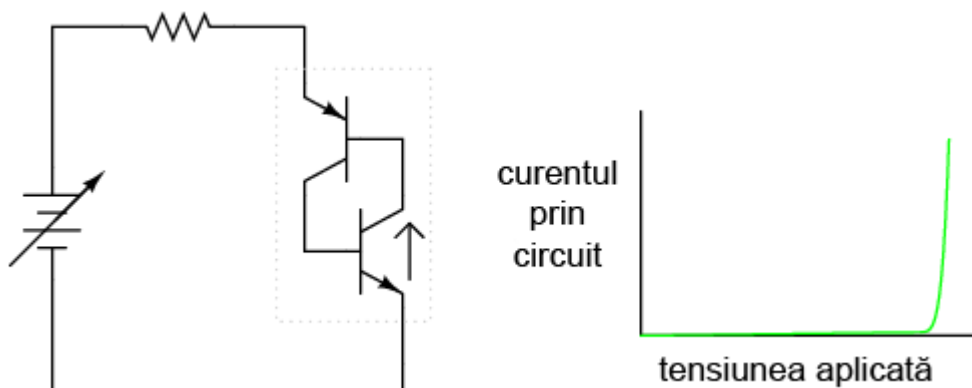
### Vizualizarea histerezei pe grafic



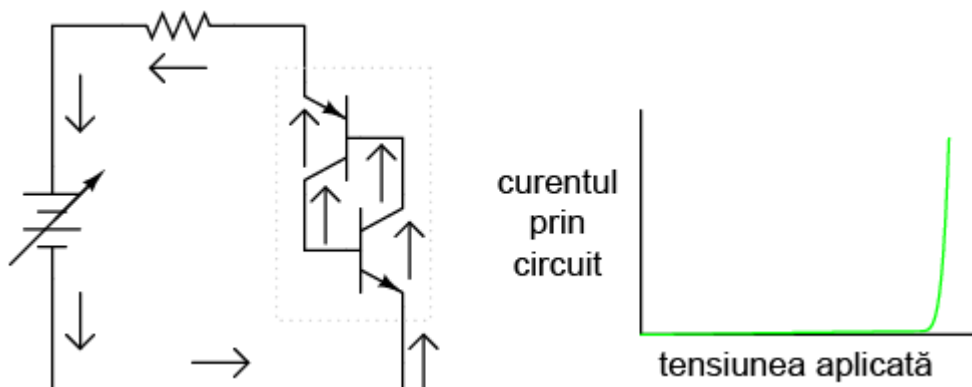
Dacă trecem această serie de evenimente pe un grafic curent-tensiune, histerezisul este evident. Inițial, observăm circuitul atunci când sursa de tensiune de c.c. (bateria) este de zero volți.



Următorul pas este creșterea treptată a tensiunii de c.c. aplicate. Curentul prin circuit este zero sau foarte apropiat de această valoare, datorită faptului că limita de intrare în conducție a tranzistorului nu a fost încă atinsă pentru niciunul din cele două dispozitive.

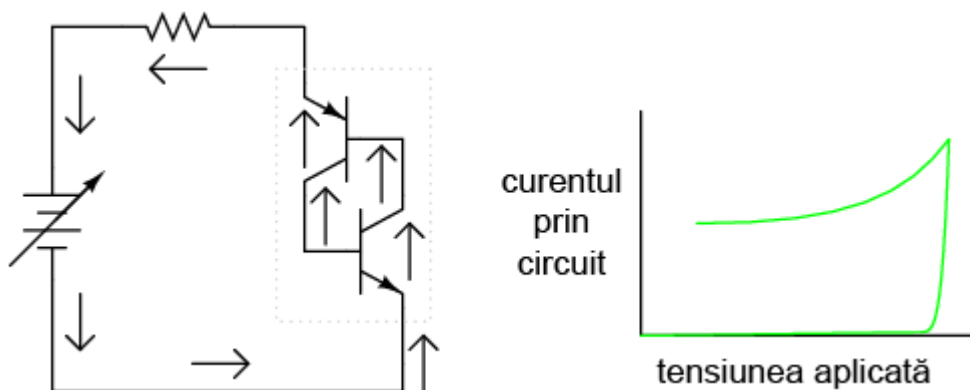


Atunci când limita de străpungere a unuia dintre tranzistori este atinsă, acest lucru va duce la apariția unui curent prin colector chiar și fără existența unui curent de bază prin acesta. În mod normal, un astfel de scenariu ar distruge un tranzistor bipolar cu joncțiune, dar joncțiunile PNP ale unei diode Shockley sunt proiectate să suporte acest tip de abuz, într-un mod similar diodelor Zener, ce suporta tensiuni de străpungere inverse fără a se distruge. De dragul exemplificării, vom presupune că tranzistorul inferior este cel care va intra prima dată în conducție, ducând la apariția unui curent de bază prin tranzistorul superior.

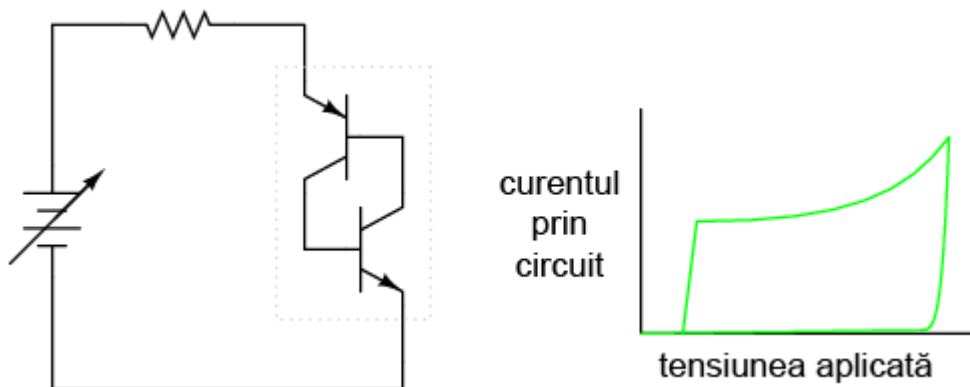


După ce tranzistorul de sus primește un curent de bază, și acesta va intra în conducție. Acest fapt duce la intrarea în conducție normală (existența curentului de bază) și a tranzistorului de jos, ambii tranzistori rămânând în starea de conducție. Curentul prin circuit trece rapid la valoarea maximă.

Reacția pozitivă este evidentă în această situație. Atunci când are loc străpungerea unuia dintre tranzistori, acest lucru duce la existența unui curent prin întreaga structură. Acest curent poate fi considerat semnalul de ieșire al dispozitivului. Odată ce s-a stabilit un curent de ieșire, acesta tinde să mențină ambii tranzistori în saturație, asigurând continuitatea unui curent de ieșire substanțial. Cu alte cuvinte, curentul de ieșire este reintrodus la intrare (curentul de bază al tranzistorului) pentru menținerea ambilor tranzistori în starea de conducție.



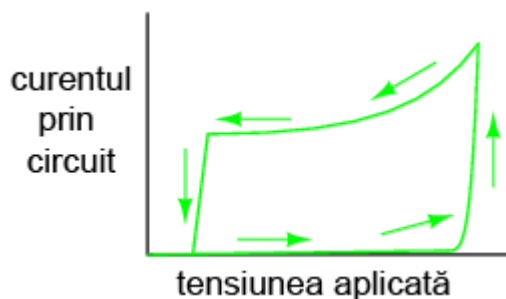
Cu ambii tranzistori menținuți într-o stare de saturație prin prezența unui curent de bază substanțial, fiecare va continua să conducă chiar și atunci când tensiunea aplicată este redusă mult sub nivelul de străpungere inițial. Efectul reacției pozitive este de menținere a ambilor tranzistori într-o stare de saturație în ciuda pierderii semnalului de intrare inițial (tensiunea necesară străpungerii unuia dintre tranzistori).



Dacă tensiunea sursei de alimentare în c.c. scade la o valoare mult prea mică, circuitul va atinge eventual un punct în care curentul nu va fi suficient pentru menținerea ambilor tranzistori în starea de conducție. Pe măsură ce curentul de colector al unuia dintre tranzistori scade tot mai mult, va duce la scăderea curentului de bază prin celălalt tranzistor, fapt ce duce la reducerea curentului de bază prin primul tranzistor. Acest cerc vicios continuă rapid până în momentul în care ambii tranzistori intră în starea de blocare.

Din nou putem observa efectele reacției pozitive: faptul că ciclul cauză-efect dintre cei doi tranzistori este „vicios” (o descreștere a curentului prin unul dintre ei duce la descreșterea curentului prin celălalt, ceea ce duce la rândul său la o nouă descreștere a curentului prin primul tranzistor) indică o relație pozitivă dintre ieșire (curent controlat) și intrare (curent de control prin baza tranzistorilor).





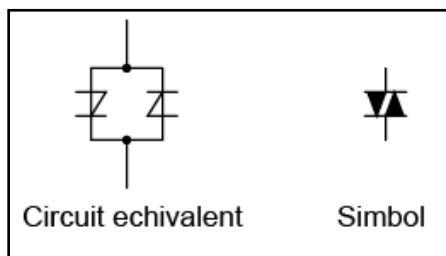
Curba graficului rezultată este un exemplu clasic de histereză: pe măsură ce semnalul de intrare (tensiune) crește și scade, ieșirea (curent) nu urmărește aceeași cale la creșterea și scăderea acesteia.

Pe scurt, dioda Shockley tinde să rămână în stare de conducție odată ce a fost pornită și în stare blocată odată ce a fost oprită. Nu există un mod de operare între aceste două extreme și nu există o zonă activă de funcționare precum în cazul tranzistoarelor bipolare de exemplu: acesta este un dispozitiv pur oprit-pornit, asemenea tuturor dispozitivelor semiconductoare multijoncțiune.

## 4 - Diacul

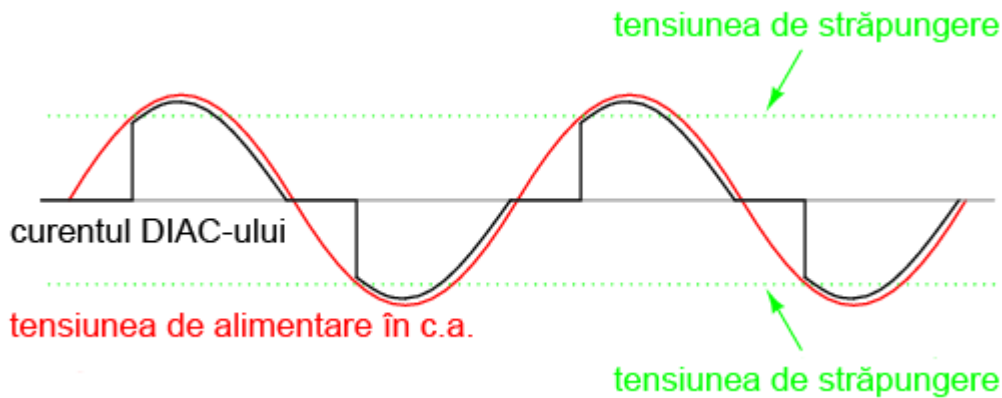
- Din punct de vedere funcțional, diacul reprezintă două diode Shockley conectate în paralel și având direcții opuse

### Reprezentarea echivalentă și simbol



Și diodele Shockley sunt dispozitive unidirecționale, la fel ca toate diodele: acestea conduc curentul doar într-o singură direcție. Dacă dorim în schimb funcționarea bidirecțională (c.a.), putem folosi două diode Shockley, conectate în paralel și având direcții opuse pentru a forma un nou tip de dispozitiv multijoncțiune, și anume, diacul.

### Modul de funcționare



Diacul se comportă asemeni unei diode Shockley atunci când tensiunea la bornele sale este o tensiune de curent continuu. Cu o tensiune de curent alternativ însă, comportamentul este puțin diferit. Datorită inversării periodice a direcției curentului alternativ, diacul nu se va agăța într-una din stările pornit/oprit mai mult de o semi-periodadă. Dacă diacul va intra în starea de conducție, acesta va continua să conducă curent atâta timp cât tensiunea disponibilă este suficientă pentru susținerea unui curent suficient de mare în acea direcție. La inversarea polarității tensiunii de c.a., diacul va intra în starea de blocare datorită unui curent insuficient pentru menținerea acestuia în starea de conducție, necesitând o nouă străpungere înainte de a putea conduce din nou. Rezultatul este o formă de undă asemănătoare cu cea din figura alăturată.

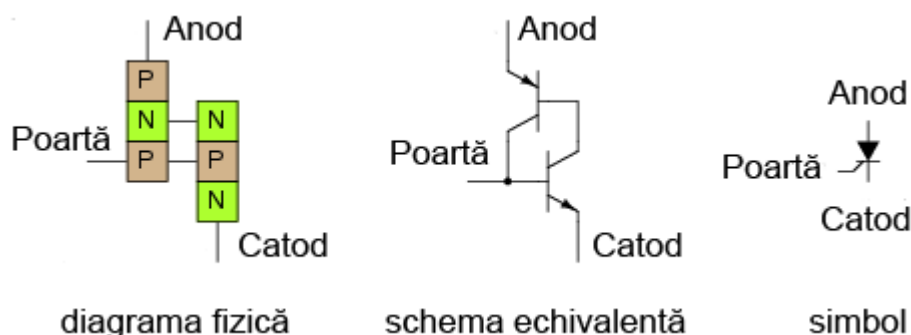
DIAC-ul nu este aproape niciodată folosit singur ci combinat cu alte dispozitive multijoncțiune.

## 5 - Tiristorul

- Tiristorul este practic o diodă Shockley cu un terminal în plus, terminal denumit poartă și folosit pentru aprinderea dispozitivului folosind o tensiune mică
- Pentru aprinderea tiristorului, tensiunea trebuie aplicată între poartă și catod, pozitivă pe poartă și negativă pe catod

Diodele Shockley sunt dispozitive interesante, dar aplicațiile lor sunt limitate. Utilitatea lor poate fi extinsă prin echiparea lor cu o altă modalitate de agățare. Dispozitivele astfel rezultate sunt dispozitive de amplificare în adevăratul sens al cuvântului, chiar dacă singurele stări existente sunt pornit și oprit. Aceste dispozitive poartă numele de tiristoare.

### Reprezentare echivalentă și simbol



Trecerea de la dioda Shockley la tiristor se realizează cu o singură modificare, și anume, adăugarea unui al treilea contact structurii PNPN existente.

## Aprinderea tiristorului

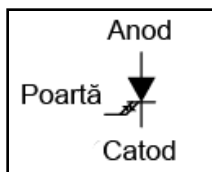
Dacă poartă unui tiristor nu este conectată în circuit, dispozitivul se comportă exact ca o diodă Shockley. Totuși, datorită faptului că poarta este conectată direct la baza tranzistorului inferior, aceasta poate fi folosită ca și alternativă la pornirea dispozitivului. Prin aplicarea unei tensiuni reduse între poartă și catod, tranzistorul inferior va fi forțat să intre în starea de conducție datorită curentului de bază rezultat, ceea ce va duce la intrarea în conducție și a tranzistorului superior ce va furniza la rândul lui un curent de bază către tranzistorul inferior, curent suficient de mare astfel încât tensiunea pe poartă să nu mai fie necesară pentru rămânerea dispozitivului în starea de conducție. Curentul necesar pentru pornirea dispozitivului va fi desigur mult mai mic decât curentul prin tiristor dinspre catod spre anod, astfel încât există un anumit nivel de amplificare existent în circuit.

Această metodă de intrare a tiristorului în conducție poartă numele de aprindere, și este cea mai folosită metodă de „agățare” a dispozitivului în practică. De fapt, tiristoarele sunt de obicei astfel alese încât tensiunea de străpungere este mult mai mare decât cea mai mare valoare a tensiunii existente în circuit, astfel încât acestea să nu poate fi pornite decât printr-o aprindere intenționată.

## Stingerea tiristorului

Trebuie menționat că în unele cazuri, stingerea tiristorului se poate realiza prin conectarea directă dintre poartă și catod, sau prin „aprinderea inversă” a porți cu o tensiune negativă (față de catod), astfel încât tranzistorul inferior este forțat să intre în starea blocată. Acest lucru este posibil doar în unele cazuri deoarece implică șuntarea întregului curent de colector al tranzistorului superior față de baza tranzistorului inferior. Acest curent poate să fie substanțial, implicând o stingere dificilă a tiristorului.

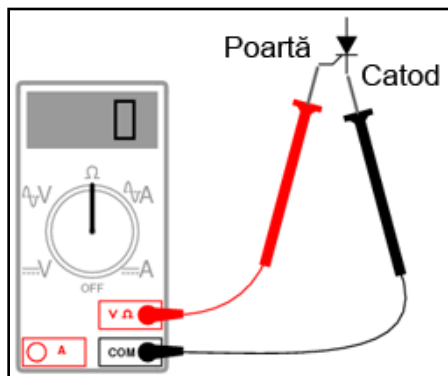
## Tiristorul GTO



O variație a tiristorului simplu o constituie tiristorul cu stingere pe poartă, sau tiristorul GTO. Dar chiar și în acest caz, curentul pe poartă necesar stingerii dispozitivului poate urca până la o valoare de 20% din curentul sarcinii. Simbolul tiristorului GTO este prezentat în figura alăturată.

Singura diferență dintre cele două tipuri de tiristoare sunt detaliile proiectării acestora. În cazul GTO-ului, tranzistorul NPN posedă un factor de amplificare în curent  $\beta$  mai mare decât tranzistorul PNP. Acest lucru permite unui curent pe poartă mult mai mic (direct sau invers) să exercite un grad de control mult mai mare asupra conducerii dintre catod și anod, agățarea tranzistorului PNP fiind mult mai dependentă de tranzistorul NPN și invers.

### Verificarea tiristorului cu ohmmetrul

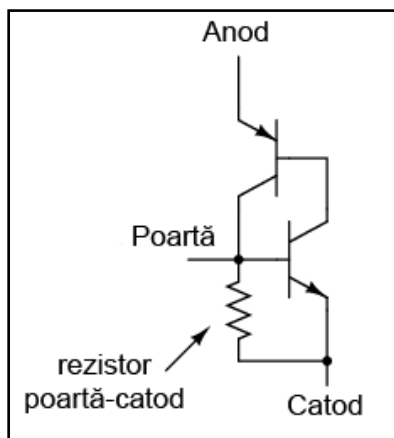


Un test rudimentar prin care se poate verifica un tiristor poate fi realizat cu ajutorul unui ohmmetru. Datorită faptului că intern, conexiunea dintre poartă și catod reprezintă o singură joncțiune PN, un aparat de măsură ar trebui să indice o continuitate între aceste terminale, atunci când sonda roșie este conectată pe poartă iar sonda neagră pe catod.

Toate celelalte măsurători de continuitate vor indica un circuit deschis („OL” pe afișajul multimetrului). Trebuie înțeles că acesta este un test foarte crud al tiristorului. Este posibil ca indicația ohmmetrului să fie bună

dar tiristorul să fie totuși defect. Până la urmă, singura modalitate de testare a unui tiristor este supunerea acestuia unui curent de sarcină.

### Rezistorul intern dintre poartă și catod

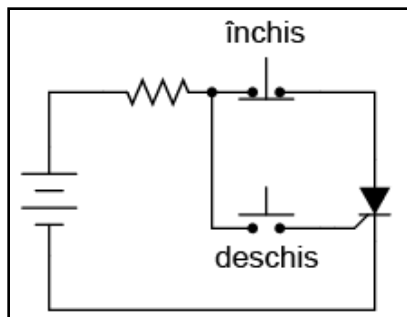


Dacă folosiți un multimetru echipat cu funcția „verificare diodă”, tensiunea joncțiunii poartă-catod s-ar putea să nu corespundă celei prevăzute de o joncțiune PN de siliciu (aproximativ 0,7 V), fiind mult mai mică. Acest lucru se datorează rezistorului intern conectat în cazul unor tiristoare între poartă și catod. Acest rezistor este introdus pentru a preveni aprinderea accidentală datorată creșterii bruște și de scurtă durată a tensiunii din cauza zgomotului prezent în circuit sau datorită descărcării sarcinilor electrice statice. Cu alte cuvinte, având un rezistor conectat între joncțiunea poartă-catod, necesită un semnal de aprindere mult mai mare (curent substanțial) pentru a porni tiristorul.

Această caracteristică se regăsește în cazul tiristoarelor mari și nu în cazul celor mici. Trebuie menționat faptul că un tiristor echipat cu un rezistor intern între poartă și catod va indica o continuitate în ambele direcții ale acestor terminale.

Tiristoarele „normale”, fără rezistor intern, poartă câteodată numele de tiristoare cu poartă sensibilă, datorită faptului că acestea pot fi foarte ușor aprinse printr-un semnal pozitiv mic pe poartă.

## Verificare tiristorului cu ajutorul unui circuit de test



Circuitul de test al tiristorului reprezintă atât un instrument de diagnosticare al tiristoarelor suspecte cât și o modalitate excelentă de înțelegere a funcționării de bază ale acestora. Se utilizează o sursă de tensiune de c.c. și două întrerupătoare folosite pentru aprinderea și stingerea tiristorului.

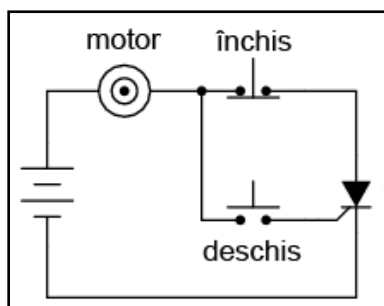
Acționarea întrerupătorului normal-deschis duce la conectarea porții la anod, permițând trecerea curentului dinspre terminalul negativ al bateriei, prin joncțiunea PN catod-poartă, prin întrerupător, prin rezistorul de sarcină și înapoi la baterie. Acest curent prin poartă ar trebui să forțeze aprinderea tiristorului, permițând trecerea curentului dinspre catod direct spre anod fără a mai fi nevoie de un curent prin poartă. Când întrerupătorul normal-deschis revine la poziția sa inițială (deschisă), sarcina va rămâne energizată.

Acționarea întrerupătorului normal-închis duce la deschiderea circuitului, forțând încetarea curentului prin tiristor și implicit stingerea acestuia.

Dacă aprinderea tiristorului nu are loc, se poate ca problema să fie sarcina și nu tiristorul. Pentru menținerea tiristorului în stare de conducție este necesară o anumită valoare minimă a curentului prin acesta. Această valoare minimă poartă numele de curent de menținere. O sarcină cu o rezistență mult prea mare nu va putea permite existența unui curent suficient de mare pentru menținerea tiristorului în stare de conducție la încetarea curentului pe poartă, dând impresia unui tiristor stricat în circuitul de test. Valorile curenților de menținere pentru diferite tiristoare sunt disponibile de la producători. Valorile tipice se situează în jurul a 1 mA-50 mA, sau mai mult pentru tiristoarele mai mari.

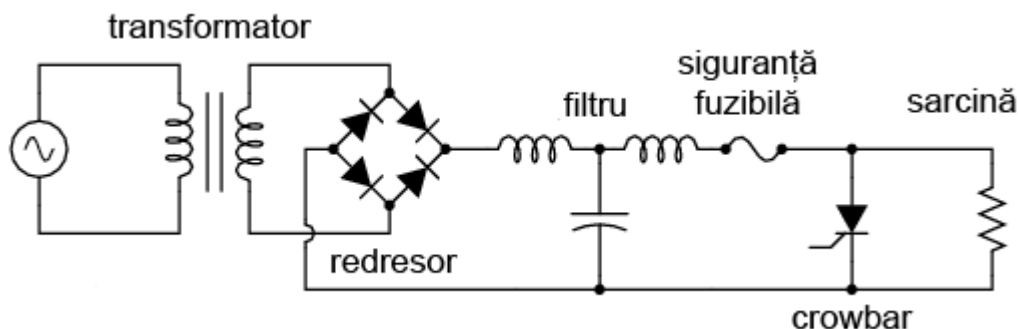
## Limita directă a tensiunii de străpungere

Testul nu este însă complet dacă nu se verifică și limita tensiunii de străpungere directe a tiristorului prin creșterea tensiunii sursei de c.c. (fără acționarea întrerupătorului normal-deschis) până în momentul în care tiristorul intră în conducție fără existența unui curent pe poartă. Atenție însă, un astfel de test s-ar putea să necesite o tensiune extrem de mare: majoritatea tiristoarelor de putere au o tensiune de străpungere de 600 V sau chiar mai mult !



În această formă simplă, circuitul de test al tiristorului poate fi folosit pe post de circuit de control al pornirii/opririi unui motor, lampă sau orice altă sarcină practică.

### Circuit de protecție crowbar



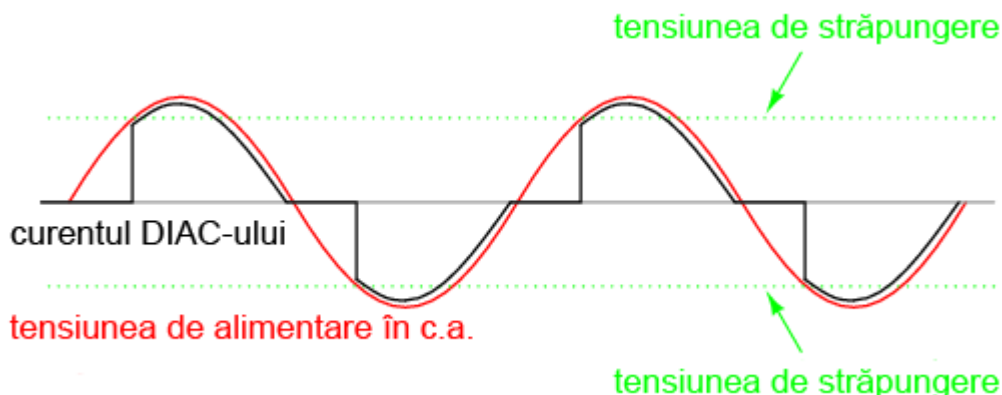
O altă utilizare practică a unui tiristor într-un circuit de c.c. o reprezintă un dispozitiv crowbar pentru protecția la supratensiune. Un circuit crowbar este compus dintr-un tiristor conectat în paralel cu ieșirea unei surse de tensiune de c.c.; scopul este plasarea unui scurt-circuit pe ieșirea sursei de tensiune pentru prevenirea unei tensiuni excesive pe sarcină. Distrugerea tiristorului și a sursei de tensiune se poate preveni prin amplasarea unei siguranțe fuzibile sau a unei rezistențe serie considerabile înaintea tiristorului pentru limitarea curentului de scurt-circuit. În figura alăturată, circuitul de aprindere al tiristorului este omis pentru simplitate.

Se poate utiliza un dispozitiv sau un circuit de detectare a tensiunii de ieșire pe poarta tiristorului, astfel încât, în momentul apariției unei supra-tensiuni, se va aplica o tensiune între poartă și catod, tensiune ce duce la aprinderea tiristorului și arderea siguranței fuzibile. Efectul este aproximativ similar cu așezarea unei răngi solide de fier (din engl. crowbar) direct între terminalele de ieșire ale sursei de tensiune, de aici și denumirea circuitului.

### Comanda circuitelor de putere

Majoritatea aplicațiilor tiristoarelor însă sunt pentru comanda circuitelor de putere în c.a., chiar dacă aceste dispozitive sunt uni-direcționale (dispozitive de c.c.). În cazul curenților bidirecționali, se pot utiliza mai multe tiristoare în același circuit. Principalul motiv pentru care tiristoarele sunt folosite pentru circuitele de putere în c.a. este răspunsul unic al acestora față de curentul alternativ. După cum am văzut și în cazul tiratronului și al diacului, aceste dispozitive intră în starea de conducție peste un anumită valoare a formei de undă alternative și rămâne în această stare pentru tot restul semi-perioadei, până în momentul în care curentul scade la zero. Cu puțin înainte de

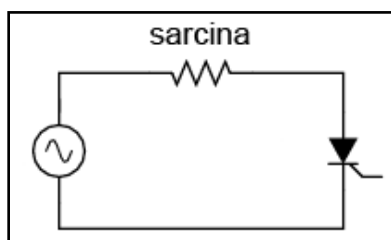
trecerea prin zero a formei de undă de curent, tiristorul va intra în starea blocată datorită curentului prea mic (acest comportament mai poartă numele și de comutație naturală) și va trebui re-pornit (re-aprins) în următoarea semi-perioadă. Rezultatul este o formă de undă a curentului echivalentă cu o undă sinusoidală „tăiată”.



Graficul formei de undă al diacului ca și răspuns la o tensiune de c.a a cărei vârf depășește tensiunea de străpungere este reluat în figura alăturată.

În cazul diacului, acea tensiune de străpungere are o valoare fixă. În cazul tiristoarelor, putem controla exact momentul în care dispozitivul intră în starea de conducție prin aprinderea porții în orice moment de-a lungul formei de undă. Prin conectarea unui circuit de control adecvat pe poarta tiristorului, putem „tăia” unda sinusoidală în orice punct; rezultatul este un tiristor comandat în timp.

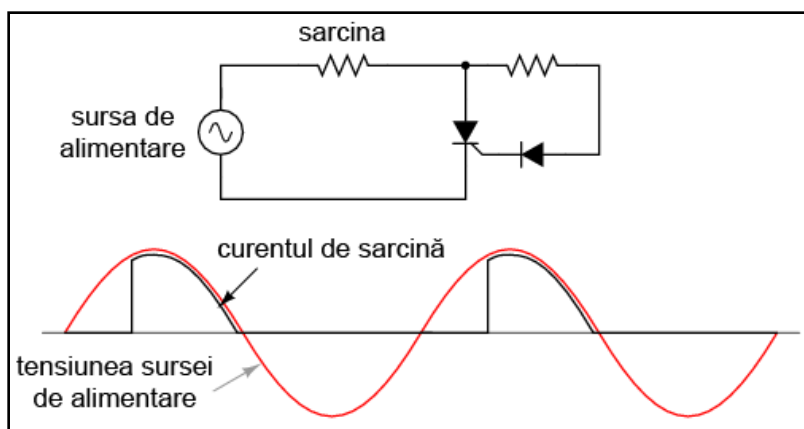
## Exemplu de utilizare



Să considerăm circuitul alăturat, de exemplu. În acest caz, un tiristor este conectat într-un circuit ce controlează puterea pe o sarcină de la o sursă de curent alternativ.

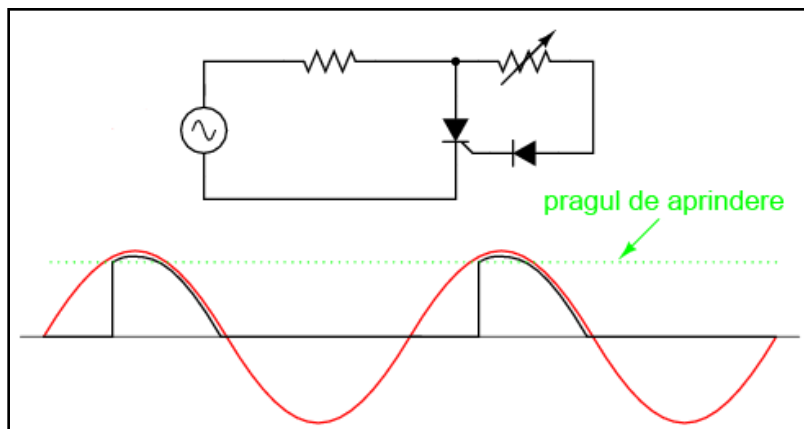
Fiind un dispozitiv uni-direcțional, tot ceea ce poate să realizeze este să transmită doar o semi-perioadă spre sarcină. Totuși, pentru a putea demonstra conceptul de comandă a tiristorului, acest circuit simplu este mai bun decât un circuit folosind două tiristoare pentru comanda întregii forme de undă.

Fără existența unui semnal pe poartă și cu valoarea tensiunii c.a. mult sub tensiunea de străpungere a tiristorului, dispozitivul nu va intra niciodată în starea de conducție.



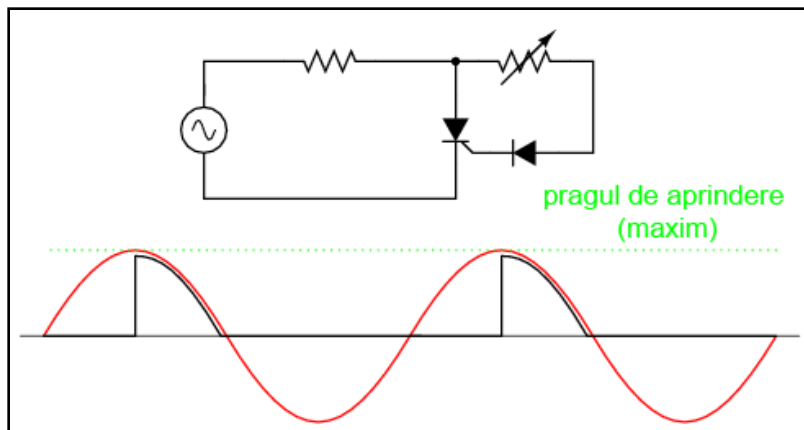
Conectând poarta tiristorului la anod prin intermediul unei diode redresoare standard (pentru prevenirea curentului invers prin poartă în cazul în care tiristorul posedă un rezistor intern între poartă și catod), pornirea tiristorului va fi posibilă aproape instant la începutul fiecărei semi-perioade pozitive.

Putem întârzia pornirea tiristorului prin introducerea unei rezistențe în circuitul porții, rezistență ce crește valoarea căderii de tensiune necesară pe poartă. Cu alte cuvinte, dacă mărim rezistența la care sunt supuși electronii în drumul lor către poartă, tensiunea de c.a. va trebui să atingă un punct mai mare în cadrul semi-alternanței pentru a crea un curent suficient de mare necesar aprinderii tiristorului.



Odată cu tăierea alternanței pozitive a unei sinusoidale la un nivel mai mare decât în cazul precedent prin întârzierea intrării în conducție a tiristorului, puterea medie pe sarcină este mai mică. Dacă înlocuim rezistorul fix din circuitul porții cu un rezistor variabil, putem controla puterea pe sarcină în timp. Creșterea rezistenței duce la creșterea pragului de aprindere, ducând la o

putere mai mică pe sarcină și invers.

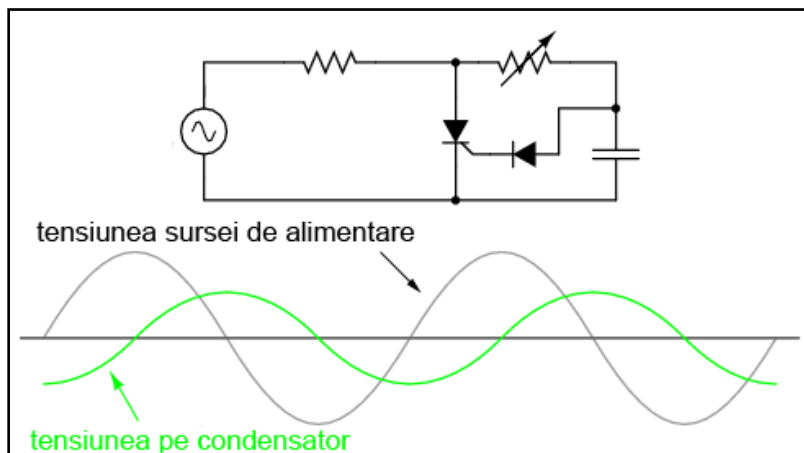


Din păcate, acest circuit are un neajuns destul de mare. Folosind semnale de curent alternativ pentru aprinderea tiristorului, controlul asupra dispozitivului este limitat pe prima jumătate a alternanței pozitive. Cu alte cuvinte, nu putem amâna pornirea tiristorului până după atingerea vârfului formei de undă. Astfel că putem opri puterea pe sarcină doar



până în punctul maxim în care tiristorul intră în conducție, punct situat spre vârful forme de undă. În figura alăturată circuitul este setat la puterea minimă la care sarcina poate fi alimentată în această configurație.

Dacă în această situație vom continua să mărim pragul de aprindere, tiristorul nu va mai intra deloc în conducție, din moment ce nici măcar vârful forme de undă de c.a. nu va mai fi necesar pentru aprinderea tiristorului. Rezultatul este lipsa totală a puterii pe sarcină.

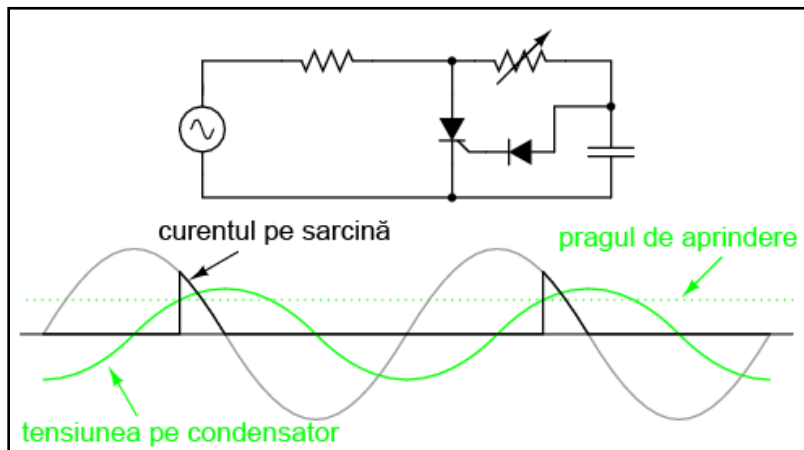


O soluție ingenioasă la această problemă constă în introducerea în circuit a unui condensator pentru modificarea fazei.

Forma de undă de amplitudine mai mică reprezintă căderea de tensiune la bornele condensatorului.

Pentru simplitatea exemplificării, presupunem o rezistență de comandă maximă, adică tiristorul nu va intra deloc în conducție iar curentul pe sarcină va fi zero

exceptând un curent foarte mic ce trece prin rezistorul de comandă și prin condensator. Căderea de tensiune pe acest condensator va fi defazată cu un unghi între  $0^\circ$  și  $90^\circ$  în urma undei de c.a. Atunci când această tensiune defazată va atinge un nivel suficient de mare, tiristorul va intra în conducție.

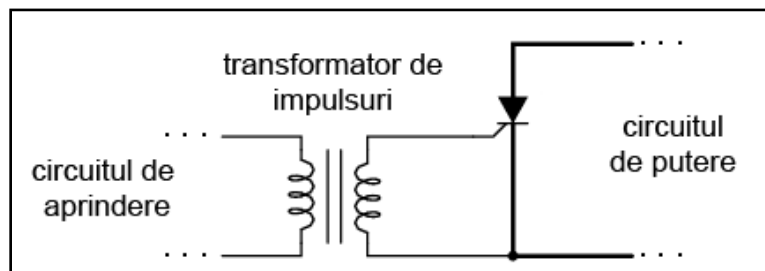


Cu o cădere de tensiune suficient de mare la bornele condensatorului pentru aprinderea periodică a tiristorului, rezultatul forme de undă a sarcinii va fi aproximativ cel alăturat.

Datorită faptului că forma de undă a condensatorului se află în creștere chiar și după ce forma de undă a c.a. și-a depășit vârful și este în scădere, aprinderea tiristorului este posibilă la un prag ce se

situează dincolo de acest vârf, reușindu-se tăierea forme de undă dincolo de limita maximă admisă de configurația precedentă. În realitate, forma de undă a tensiunii condensatorului este puțin mai complexă cea prezentată aici, forma sa sinusoidală fiind distorsionată de fiecare dată când tiristorul intră în conducție.

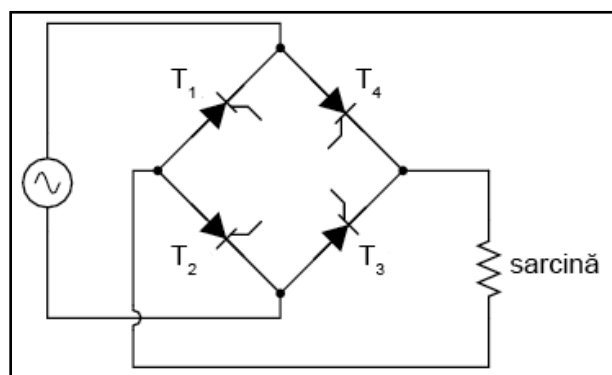
## Utilizarea transformatoarelor de impulsuri



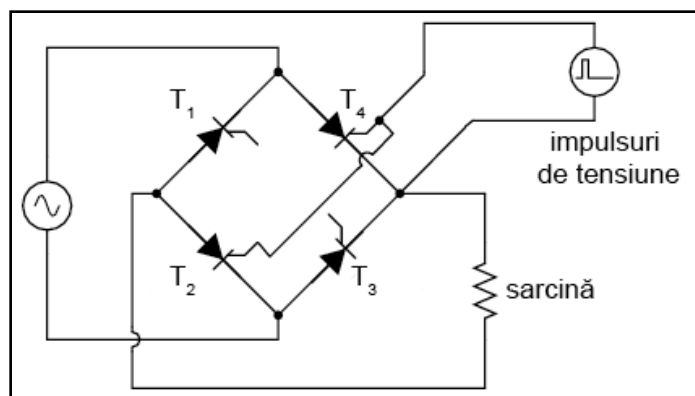
Tiristoarele pot fi aprinse cu ajutorul unor circuite mult mai complexe. Chiar dacă circuitul precedent este suficient pentru o aplicație simplă precum comanda unei lămpi, comanda motoarelor electrice industriale necesită metode mult mai sofisticate de aprindere. Câteodată se

pot folosi transformatoare de impulsuri pentru cuplarea unui circuit de aprindere pe poarta și catodul tiristorului pentru asigurarea izolației electrice dintre aprindere și circuitele de putere.

## Redresor comandat în punte cu tiristoare

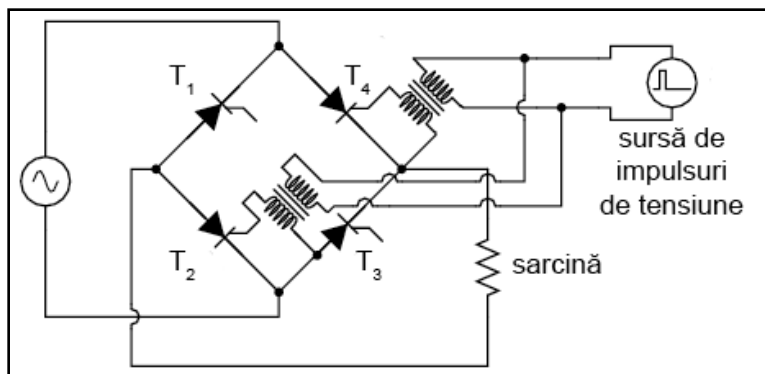


Atunci când se folosesc mai multe tiristoare pentru comanda puterii pe sarcină, adesea catodii nu sunt comuni din punct de vedere electric, făcând dificilă conectarea unui singur circuit de aprindere pentru toate tiristoarele. Un astfel de exemplu îl reprezintă un redresor în punte comandat cu tiristoare.



În oricare circuit redresor în punte, diodele redresoare (în acest caz, tiristoarele) trebuie să conducă în perechi opuse:  $T_1$  și  $T_3$  trebuie aprinse simultan; același lucru este valabil și pentru perechea  $T_2 - T_4$ . După cum putem vedea însă, aceste perechi de tiristoare nu posedă aceleași conexiuni ale catodilor, ceea ce înseamnă că nu putem pur și simplu să utilizăm o singură sursă de tensiune pentru aprinderea

ambelor dispozitive, precum în figura alăturată.

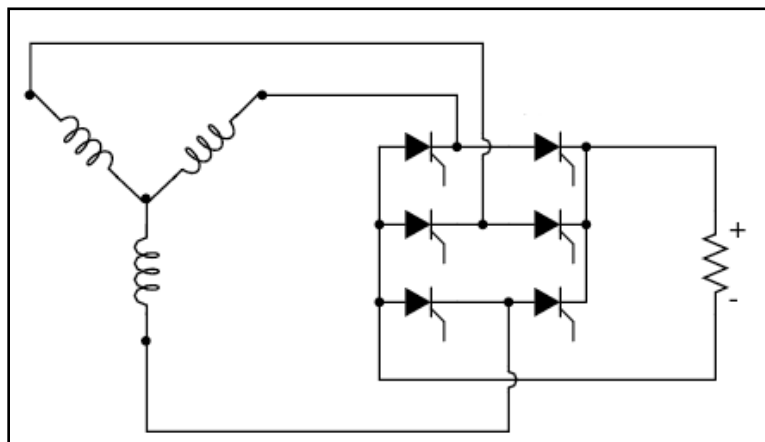


Deși sursa de impulsuri de tensiune prezentată mai sus va produce aprinderea tiristorului  $T_4$ , tiristorul  $T_2$  nu se va aprinde corespunzător datorită faptului că cele două tiristoare nu au o conexiune comună a catodilor, conexiune utilizată ca și punct de referință a tensiunii de aprindere. Folosind transformatoare de impulsuri pentru conectarea porților celor două

tiristoare la o sursă de impulsuri de tensiune continuă, vom obține rezultatul așteptat, aprinderea simultană a celor două dispozitive.

Trebuie menționat faptul că acest circuit prezintă doar conexiunile porților tiristoarelor  $T_2$  și  $T_4$ . Transformatoarele de impulsuri și sursele de tensiune pentru tiristoarele  $T_1$  și  $T_3$ , la fel și detaliile surselor de impulsuri de tensiune, au fost omise pentru simplitatea prezentării.

### Redresoare comandate trifazate



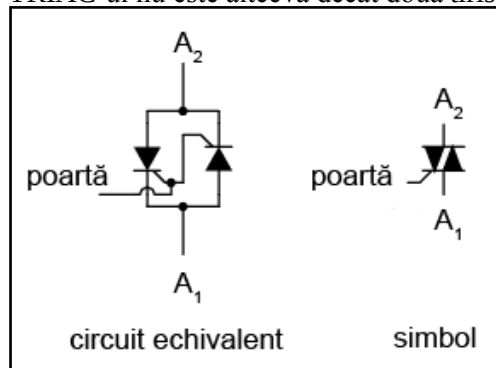
Redresoarele comandate în punte cu tiristoare pot fi folosite și pentru redresarea tensiunilor trifazate. Un astfel de redresor este prezentat în figura alăturată, fără a include și transformatoarele de impulsuri și circuitele de aprindere.

## 6 - Triacul

- Comportamentul triacului este asemănător cu două tiristoare conectate în paralel și în direcții opuse
- Triacele se folosesc adesea în circuitele simple și de puterea joasă
- Terminalii  $A_1$  și  $A_2$  nu se pot interschimba! Pentru o aprindere corectă a triacului, curentul pe poartă trebuie să treacă prin terminalul  $A_2$

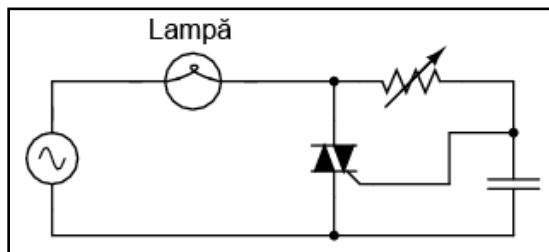
## Reprezentarea echivalentă și simbol

TRIAC-ul nu este altceva decât două tiristoare în paralel așezate spate în spate.

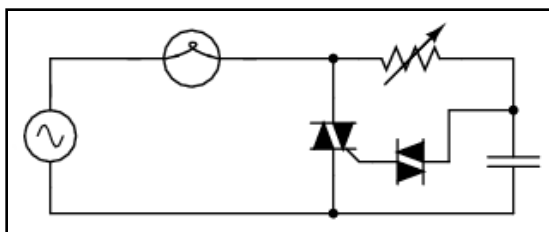


## Circuit dimmer cu triac

Deoarece tiristoarele individuale sunt mult mai flexibile într-un sistem de comandă, acestea sunt adesea întâlnite în aplicațiile cu motoare electrice. triacele sunt de obicei folosite în aplicații mai simple, de putere mică, precum dimmer-ele. Un astfel de circuit simplu, pentru controlul unei lămpi, este prezentat în figura alăturată. De observat că acest circuit include și condensatorul de defazare necesar pentru aprinderea dispozitivului dincolo de valoarea de vârf a formei de undă de c.a.



Triacele sunt recunoscute pentru aprinderea lor nesimetrică. Acest lucru înseamnă că tensiunea de străpungere este diferită pentru fiecare din cele două polarități a formei de undă. De obicei, acest lucru nu este dorit, datorită faptului că rezultatul aprinderii nesimetrice a dispozitivului înseamnă o formă de undă cu un conținut armonic mai mare. Formele de undă simetrice față de axa orizontală sunt compuse doar din armonici impare. Formele de undă nesimetrice însă, conțin armonici pare, dar care pot fi, în funcție de situație, însoțite și de armonici impare.



În interesul reducerii conținutului armonic al sistemelor de putere, cu cât numărul armonicilor este mai scăzut și mai puțin diversificat, cu atât mai bine - un motiv în plus pentru care tiristoarele sunt preferate triacelor în sistemele de control complexe de putere mare. O modalitate de aducere a formei de undă de curent a triacului la o formă mai simetrică este utilizarea unui dispozitiv extern pentru declanșarea impulsurilor pe poartă. Acest lucru se poate realiza cu ajutorul unui diac.

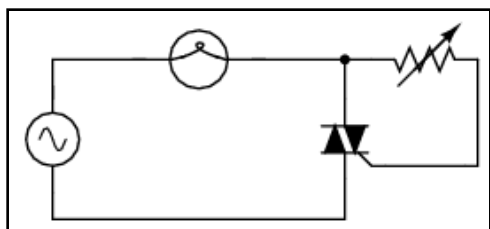
Tensiunile de străpungere ale diacurilor tind să fie mult mai simetrice (aceeași valoare pentru ambele polarități ale formei de undă) față de tensiunile triacelor. Din moment ce diacul împiedică orice curent pe poarta triacului până în momentul în care tensiunea de străpungere a atins un anumit nivel precis, repetabil în ambele

direcții, punctul de aprindere al triacului de la o semi-alternanță la alta tinde să fie mult mai consistent, simetria formei de undă rezultată fiind mult îmbunătățită față de axa orizontală.

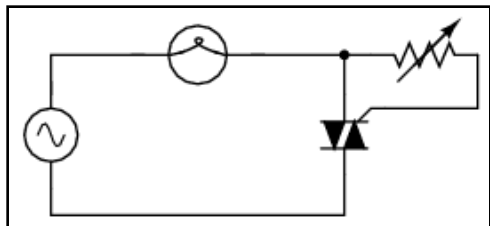
## Aprinderea corectă a triacului

Practic, toate caracteristicile tiristoarelor se aplică și triacelor, cu excepția faptului că triacele sunt dispozitive bidirecționale (pot conduce curenți în ambele direcții). Nu este necesar prin urmare să facem alte observații cu privire la acest dispozitiv, cu excepția modului de numerotare al terminalelor.

Din circuitul echivalent prezentat mai sus, s-ar putea înțelege faptul că terminalii 1 și 2 se pot interschimba între ei. Acest lucru nu este însă corect! Cu toate că ne putem imagina triacul ca fiind compus din două tiristoare, adevărul este că acest dispozitiv este construit dintr-o singură bucată de material semiconductor, cu straturi și dopaje corespunzătoare. Caracteristicile actuale de operare pot să difere ușor față de modelul echivalent format din două tiristoare.



Acest lucru poate fi scos în evidență considerând două circuite simple, unul funcțional, celălalt nefuncțional. Circuitele considerate sunt variante ușor modificate ale circuitului cu lampă prezentat mai sus, fără a lua în considerare condensatorul de defazaj. Cu toate că circuitul rezultat nu posedă același grad de control precum versiunea mai complexă (cu condensator și diac), acesta este funcțional.

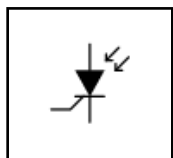


Să presupunem acum că inversăm terminalii principali ai triacului între ei. Conform circuitului echivalent cu două tiristoare de mai sus, această modificare nu ar trebui să afecteze în niciun fel funcționarea circuitului.

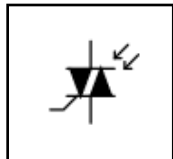
Presupunerea noastră nu este însă corectă! Dacă ar fi să construim acest circuit, vom observa că el nu funcționează. Puterea pe sarcină va fi zero, deoarece triacul nu va intra niciodată în starea de conducție, indiferent de valoarea rezistenței de comandă. Aprinderea corectă a triacului se realizează asigurându-ne că poarta primește curentul de comandă de la terminalul principal  $A_2$ . Identificarea terminalilor  $A_1$  și  $A_2$  se face folosind catalogul producătorului.

## 7 - Optotiristorul

Asemenea tranzistorilor bipolar, atât tiristoarele cât și triacele se pot construi sub forma dispozitivelor sensibile la lumină; în acest caz, tensiunea de aprindere a dispozitivelor este înlocuită de acțiunea luminii.



Tiristoarele controlate cu ajutorul luminii sunt adesea cunoscute sub acronimul LASCR (Light Activated Silicon-Controlled Rectifier). Simbolul acestora este prezentat în figura alăturată.



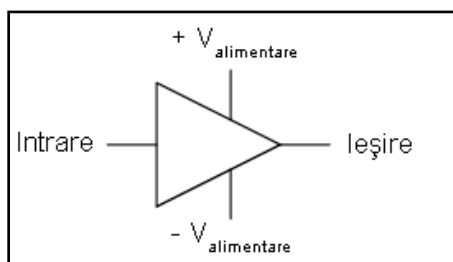
Triacele controlate cu ajutorul luminii nu au un acronim al lor, dar sunt cunoscute sub numele de opto-triace. Simbolul acestora este prezentat în figura alăturată.

## 06 - Amplificatorul operațional

### 01. Amplificatorul cu potențial de referință și amplificatorul diferențial

- Simbolul amplificatorului electronic este un triunghi, unde baza semnifică intrarea iar vârful semnifică ieșirea acestuia. Alimentarea amplificatorului este adesea omisă pentru simplificarea desenului
- Pentru amplificarea semnalelor de c.a. se poate folosi o sursă de tensiune duală, constând din două surse de c.c. conectate în serie cu punctul median conectat la masă
- Majoritatea amplificatoarelor au o singură intrare și o singură ieșire. Amplificatoarele diferențiale au două intrări și o singură ieșire, semnalul de ieșire fiind direct proporțional cu diferența dintre cele două semnale de intrare
- Tensiunea de ieșire a unui amplificator diferențial este dată de ecuația:  
$$V_{ieșire} = A_V(V_{(+)} - V_{(-)})$$

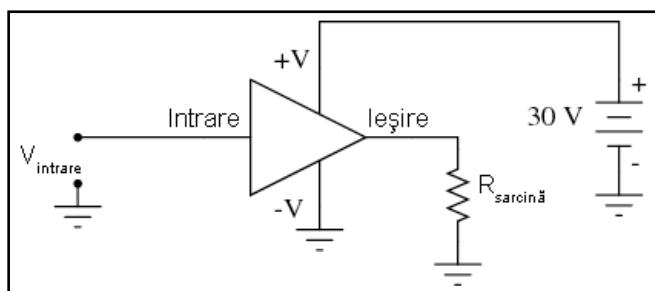
#### Simbolul amplificatorului



Pentru ușurința expunerii teoretice (desenării) a circuitelor electronice, amplificatoarele sunt adesea simbolizate printr-un simplu triunghi, iar componentele interne sunt „ascunse”. Această simplificare este foarte folositoare pentru cazurile în care construcția amplificatorului este irelevantă pentru funcționarea generală a circuitului.

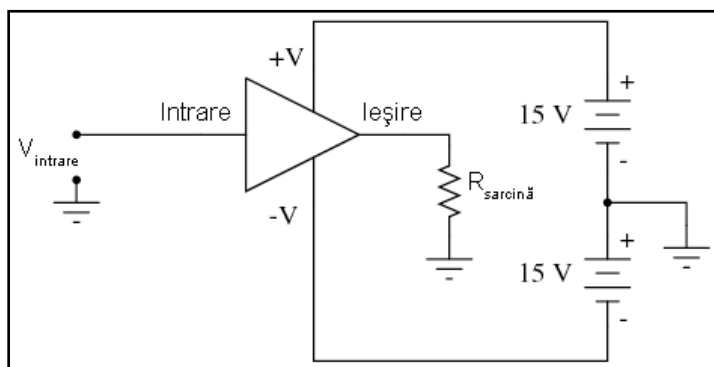
Conexiunile +V și -V simbolizează borna pozitivă, respectiv negativă, a sursei de alimentare în c.c. Tensiunile de intrare și de ieșire sunt reprezentate doar ca și conductoare individuale, deoarece se presupune că toate semnalele au ca și referință o conexiune comună din circuit, denumită masă. Adesea (dar nu tot timpul!), acest punct de referință îl reprezintă una dintre bornele sursei de alimentare în c.c., fie cea pozitivă, fie cea negativă.

#### Exemplu - amplificator cu potențial de referință



Un circuit practic cu amplificator arată astfel.

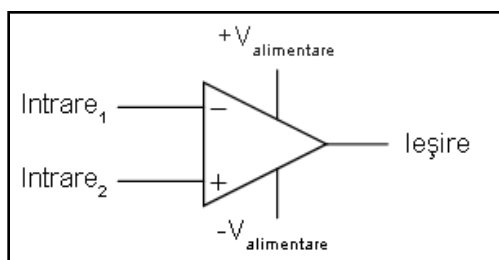
## Configurație cu sursă duală de tensiune



Dacă dorim să folosim amplificatorul și pentru semnale de c.a., va trebui să folosim două surse de c.c., iar masa să fie situată electric între +V și -V. Această configurație poartă numele de sursă de tensiune duală.

Tensiunea de alimentare a amplificatorului este tot 30 V, dar cădere de tensiune de pe sarcină poate lua acum valori teoretice între +15 V și -15V, în loc de +30 V și 0 V. Aceasta este o modalitate simplă de obținere a c.a. la ieșirea unui amplificator fără a fi nevoiți să folosim cuplaje capacitive sau cuplaje cu transformator la ieșire.

## Amplificatorul diferențial



Prin simbolizarea unui circuit complex printr-un singur triunghi, putem studia mult mai ușor amplificatoare și circuite mult mai complexe. Unul dintre aceste amplificatoare mai complexe pe care le vom studia, poartă numele de amplificator diferențial. Față de amplificatoarele „normale” ce amplifică un singur semnal de intrare (amplificatoare cu potențial de referință), cele diferențiale amplifică diferența de tensiune

dintre două semnale de intrare.

Ca și în circuitul precedent, toate tensiunile au ca și referință masa circuitului. Se poate observa că un terminal de intrare este marcat cu minus (-) iar celălalt cu plus (+). Întrucât un amplificator diferențial amplifică diferența dintre cele două semnale de la intrare, fiecare intrare influențează tensiunea de la ieșire în mod diferit (opus).

|                          |   |   |     |    |    |     |     |   |    |     |
|--------------------------|---|---|-----|----|----|-----|-----|---|----|-----|
| (-) Intrade <sub>1</sub> | 0 | 0 | 0   | 0  | 1  | 2,5 | 7   | 3 | -3 | -2  |
| (-) Intrade <sub>2</sub> | 0 | 1 | 2,5 | 7  | 0  | 0   | 0   | 3 | 3  | -7  |
| Ieșire                   | 0 | 4 | 10  | 28 | -4 | -10 | -28 | 0 | 24 | -20 |

Să considerăm următorul tabel alăturat cu tensiunile de intrare/ieșire pentru un amplificator diferențial cu un factor de amplificare în tensiune de 4.

Unde ecuația tensiunii de ieșire arată astfel:

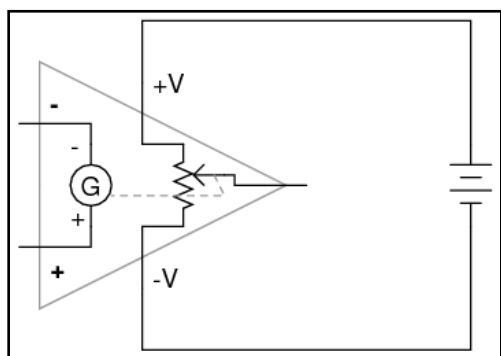
$$V_{ieșire} = A_V(Intrade_1 - Intrade_2) \text{ sau } V_{ieșire} = A_V(Intrade_+ - Intrade_-)$$



## Explicarea modului de funcționare

O creștere a tensiunii pe intrarea pozitivă (+) duce la creșterea pozitivă a amplificării, iar o creștere a tensiunii pe intrarea negativă (-) duce la o creștere negativă a amplificării. De asemenea, o scădere a tensiunii pe (+) duce la scăderea tensiunii de ieșire, iar o creștere a tensiunii pe (-) are un rezultat opus. Datorită acestei relații dintre cele două terminale de intrare, intrarea negativă (-) mai poartă numele de intrare inversoare **iar** intrarea pozitivă (+) poartă numele de intrare ne-inversoare.

## Modelul amplificatorului diferențial

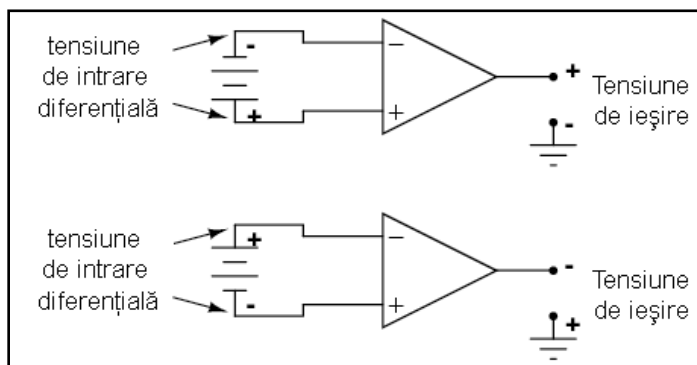


Pentru a înțelege mai bine modul de funcționare, putem reprezenta un amplificator diferențial ca și o sursă variabilă de tensiune controlată de un voltmetru sensibil.

Desigur, figura alăturată este doar un model, și nu reprezintă schema reală de construire a amplificatorului. Simbolul „G” reprezintă un galvanometru, o deplasare sensibilă a unui voltmetru. Potențiometrul conectat între +V și -V furnizează o tensiune variabilă la contactul de ieșire (ce are ca și referință una dintre bornele sursei de tensiune în

c.c.), tensiune stabilită de indicația galvanometrului. Trebuie înțeles faptul că orice sursă conectată la ieșirea unui amplificator diferențial este alimentată de sursa de tensiune de c.c. (baterie), și nu de semnalul de intrare. Semnalul de intrare (galvanometru) doar controlează ieșirea.

## Ieșirea a unui amplificator diferențial



Cu toate aceste polarități, este foarte ușor să greșim și să nu ne dăm seama care va fi ieșirea unui amplificator diferențial. Pentru evitarea acestor situații, putem observa următoarea regulă.

Când polaritatea tensiunii diferențiale de la intrare este aceeași cu polaritatea intrărilor (inversoare și ne-inversoare) amplificatorului, tensiunea de ieșire va fi pozitivă. Când polaritatea tensiunii diferențiale este

inversă față de cea a intrărilor, ieșirea amplificatorului va fi negativă.

## Utilizarea practică a amplificatoarelor diferențiale

Dacă tensiunile de intrare ale amplificatorului diferențial reprezintă cantități matematice (cum este cazul circuitelor analogice ale calculatoarelor), sau mărimi fizice de proces (cum este cazul circuitelor electronice de instrumentație), putem vedea utilitatea unui astfel de dispozitiv. Am putea folosi amplificatoare operaționale pentru a compara două cantități și a vedea care este mai mare (prin intermediul polarității tensiunii de ieșire), sau am putea face o comparație a diferenței dintre două cantități (precum nivelul apei din două bazine) și acționarea unei alarme luminoase și/sau sonore dacă diferența este prea mare (în funcție de valoarea absolută a semnalului de ieșire).

În circuitele de control automat, cantitatea controlată poartă numele de variabilă de proces și este comparată cu o valoare fixă denumită punct de referință; deciziile sistemului automat sunt luate în funcție de diferența dintre aceste două valori. Primul pas într-o astfel de schemă constă în amplificarea diferenței dintre variabila de proces și punctul de referință cu ajutorul unui amplificator diferențial. În circuitele simple, ieșirea amplificatorului poate fi utilizată pentru acționarea unui element final de control (precum o valvă) și menținerea procesului cât mai aproape de punctul de referință.

## 02. Amplificatorul operațional

- Dacă nu este specificat altcumva, toate tensiunile din circuitele folosind amplificatoare au ca și referința un punct comun, denumit masă. Acest punct este de obicei conectat la unul dintre terminalele sursei de alimentare. În acest fel, putem vorbi despre o anumită tensiune ca fiind „pe” un singur fir, dar neuitând faptul că tensiunea se măsoară tot timpul între două puncte
- Un amplificator diferențial este un dispozitiv ce amplifică diferența dintre două semnale de intrare. Una dintre intrări poartă numele de intrare inversoare(-), iar cealaltă de intrare ne-inversoare(+)
- Un amplificator operațional (AO) este un amplificator diferențial cu o amplificare în tensiune foarte mare ( $A_V = 200.000$ , sau mai mult)
- AO au de obicei impedanțe de intrare și de ieșire foarte mari, respectiv foarte mici
- AO pot fi folosite pe post de comparatoare, funcționând saturate sau blocate în funcție de care dintre intrări are o tensiune mai mare
- Una dintre aplicațiile comparatorului este modularea în durată a pulsurilor (PWM), și constă în compararea unui semnal de c.a. cu o tensiune de referință de c.c. Factorul de umplere a formei de undă de la ieșire poate fi controlat prin ajustarea tensiunii de c.c. de referință, ce controlează, sau modulează durata (lățimea) pulsului semnalului de ieșire

### Scurt istoric

Cu mult înainte de apariția tehnologiei digitale, calculatoarele erau construite electronic pentru efectuarea calculelor, folosind curenți și tensiuni pentru reprezentarea cantităților numerice. Acest lucru a fost folosit în special pentru simularea proceselor fizice. O tensiune variabilă, de exemplu, ar putea reprezenta viteza, sau forța, într-un sistem fizic. Prin utilizarea divizorilor de tensiune rezistivi și a amplificatoarelor de tensiune, operațiile matematice de înmulțire și împărțire putea să fie foarte ușor efectuate pe aceste semnale.

Proprietățile reactive ale condensatoarelor și bobinelor au fost utilizate pentru simularea variabilelor folosite în funcții ce necesitau utilizarea analizei matematice. Curentul printr-un condensator depinde de rata de variație a tensiunii, variație desemnată prin intermediul unei derivate. Prin urmare, dacă tensiunea la bornele unui condensator ar reprezenta viteza de deplasare a unui obiect, curentul prin acesta ar reprezenta forța necesară pentru accelerarea sau decelerarea acelui obiect, capacitatea condensatorului reprezentând în acest caz masa obiectului respectiv.

$$i_c = C \frac{dv}{dt}$$

unde,

$i_c$  = curentul instantaneu prin condensator

$C$  = capacitatea condensatorului(F)

$dv / dt$  = variația curentului cu timpul

$$F = m \frac{dv}{dt}$$

unde,

$F$  = forța aplicată obiectului

$m$  = masa obiectului

$dv / dt$  = variația vitezei cu timpul (acelerația)

Această operație electronică poartă numele de derivare, și este o funcție naturală a curentului prin condensator în relație cu tensiunea aplicată la bornele sale. Observați că acest circuit nu are nevoie de nicio „programare” pentru efectuarea acestei funcții matematice relativ avansate, lucru care nu se întâmplă în cazul unui calculator digital.

Circuitele electronice sunt ieftine și foarte ușor de construit în comparație cu sistemele fizice complexe, iar asemenea simulări electronice au fost folosite pe bandă largă pentru cercetarea și dezvoltarea sistemelor mecanice. Pentru simulări realiste totuși, au fost necesare circuite amplificatoare de precizie înaltă și ușor de configurat pentru aceste prime calculatoare.

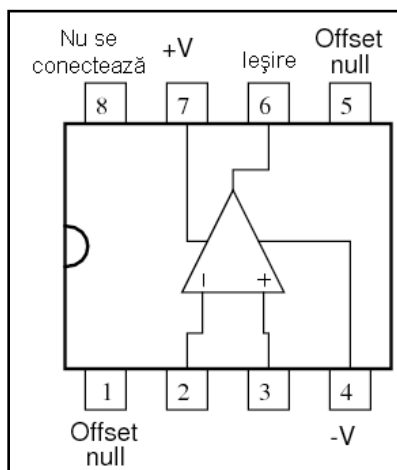
Pe parcursul dezvoltării calculatoarelor, s-a ajuns la concluzia că amplificatoarele diferențiale cu amplificări în tensiune foarte mari, erau candidații perfecți pentru aceste necesități. Folosind componente simple, conectate la intrarea și la ieșirea amplificatorului diferențial, s-a putut obține practic orice factor de amplificare era necesar și se putea calcula orice funcție matematică, fără modificarea sau ajustarea circuitului intern al amplificatorului însăși. Aceste amplificatoare diferențiale cu amplificări foarte mari, au ajuns să fie cunoscute sub

numele de amplificatoare operaționale, pe scurt AO, datorită folosirii lor în cadrul operațiilor matematice efectuate de calculatoarele analogice.

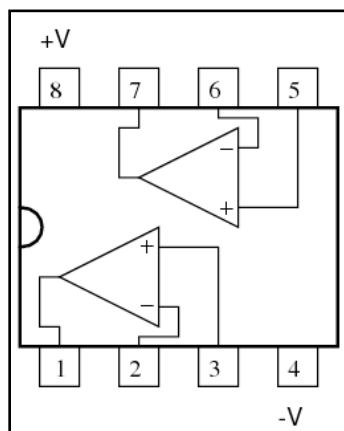
## Avantajele utilizării amplificatoarelor operaționale

Amplificatoarele operaționale moderne, precum modelul popular 741, sunt circuite integrate de o înaltă performanță și ieftine pe de altă parte. Impedanțele lor de intrare sunt foarte mari, curenții pe la bornele acestora se situează în jurul valorii de 0,5 mA pentru modelul 741, și mult mai puțin pentru AO cu tranzistori cu efect de câmp la intrare. Impedanța de ieșire este de obicei foarte mică, aproximativ  $25\Omega$  pentru modelul 741, multe modele având protecție integrată la scurt-circuit, ceea ce înseamnă că ieșirile acestora pot fi scurt-circuitate fără ca acest lucru să afecteze circuitul intern al amplificatorului. Cu un cuplaj direct între etajele interne cu tranzistori ale AO, acestea pot amplifica semnale de c.c., precum și de c.a. Costurile de timp și de bani pentru proiectarea unui circuit amplifcător utilizând componente discrete se ridică mult peste costului unui amplificator operațional. Din aceste motive, AO au scos aproape complet din uz amplificatoarele de semnal folosind tranzistori discreți.

## Structura unui circuit integrat



În diagrama alăturată sunt prezentate conexiunile pinilor pentru un singur AO (la fel și pentru modelul 741) dintr-un circuit integrat DIP (**D**ual **I**ncline **P**ackage) cu 8 pini.



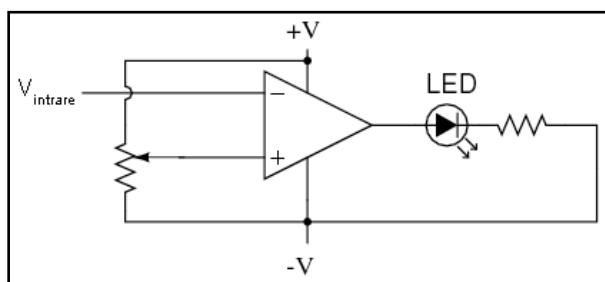
Unele circuite integrate conțin două AO într-un singur pachet, incluzând modelele populare TL082 și 1458. Aceste unități „duale” sunt împachetate tot într-un integrat DIP cu 8 pini.

## Factorul de amplificare

AO practice au un factor de amplificare în tensiune în jurul a 200.000 sau chiar mai mult, ceea ce înseamnă că sunt inutile ca și amplificatoare diferențiale în sine. Pentru un AO cu o amplificare în tensiune,  $A_V = 200.000$ , și o tensiune maximă de ieșire între +15V și -15V, o diferență de tensiune de doar 75  $\mu V$  între cele două intrări este suficientă pentru intrarea amplificatorului în saturație sau blocare!

Înainte de a examina utilizarea componentelor externe pentru reducerea amplificării la un nivel rezonabil, putem investiga mai întâi aplicațiile AO „pur”.

## Comparatorul

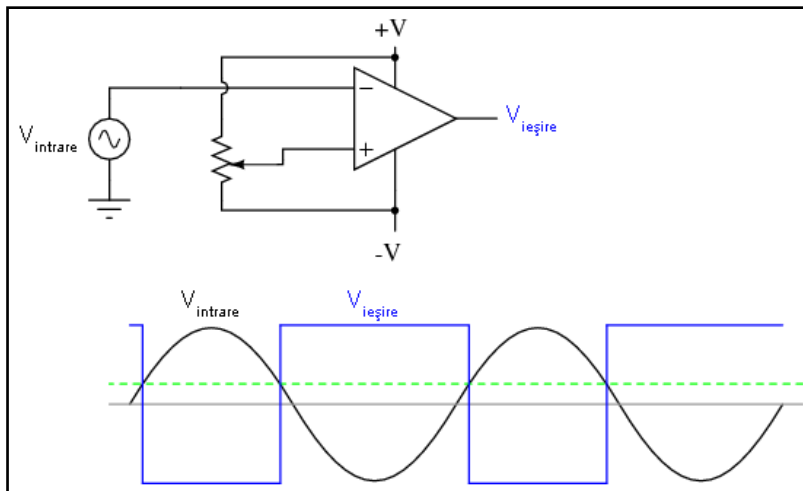


Una dintre aceste aplicații o reprezintă comparatorul. Practic, putem spune că ieșirea unui AO va fi saturată pozitiv dacă intrarea pozitivă (+) este mai pozitivă decât cea negativă (-), și saturat negativ dacă intrarea (+) este mai puțin pozitivă decât intrarea (-). Cu alte cuvinte, amplificarea foarte mare în tensiune a unui AO, înseamnă că acesta poate fi folosit pentru

a compara două tensiuni (una reprezentând o mărime de stare și alta un punct de referință), și folosirea semnalului de la ieșire pentru semnalizarea cazului în care există o diferență între cele două semnale de intrare.

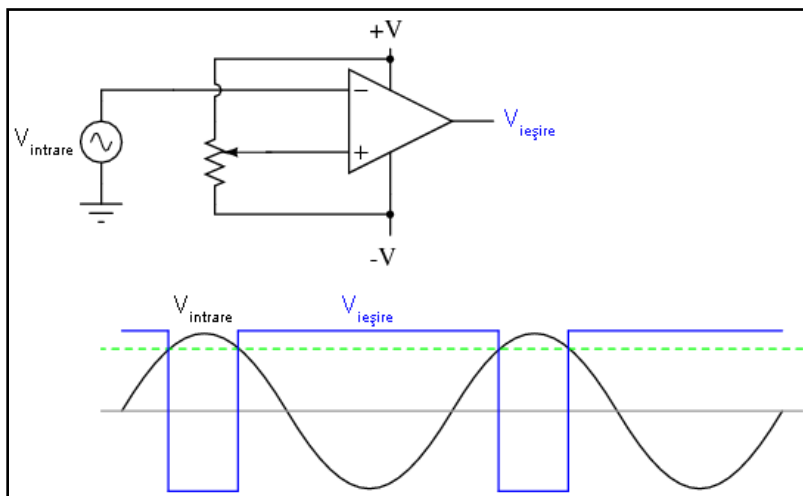
Comparatorul cu AO de mai sus, compară tensiunea de la intrare cu o tensiune de referință stabilită printr-un potențiomtru ( $R_1$ ). Dacă  $V_{intrare}$  scade sub tensiunea stabilită de  $R_1$ , ieșirea AO se va satura la +V, iar LED-ul se va aprinde. Invers, dacă  $V_{intrare}$  se află sub valoarea tensiunii de referință, LED-ul va fi polarizat invers, cu -V, și nu se va aprinde. Dacă  $V_{intrare}$  este un semnal de tensiune produs de un instrument de măsură, acest circuit comparator ar putea funcționa precum o alarmă de „nivel”, nivel stabilit de  $R_1$ . În loc de LED, am putea conecta un releu, un tranzistor sau orice alt dispozitiv capabil să pună în funcțiune un mecanism de acțiune în cazul unei „alarme”.

## Convertor de semnal dreptunghiular



O altă aplicația a circuitului comparator este un convertor de semnal dreptunghiular. Presupunând că tensiunea de intrare aplicată la terminalul inversor (-) al AO ar fi o undă sinusoidală de c.a. în loc de c.c., tensiunea de ieșire ar oscila între saturație pozitivă și saturație negativă de câte ori tensiunea de intrare va fi egală cu tensiunea de referință produsă de potențiometru. Rezultatul va fi un semnal dreptunghiular.

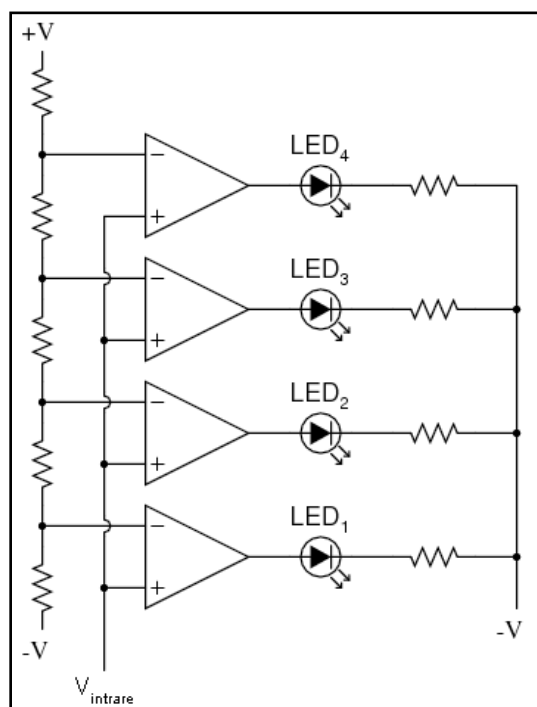
### Ajustarea potențiometrului



Ajustarea potențiometrului modifică tensiunea de referință aplicată la intrarea ne-inversoare (+), iar acest lucru modifică punctele de intersecție ale unei sinusoidale; rezultatul este o formă de undă dreptunghiulară cu un factor de umplere diferit.

Semnalul de c.a. de la intrare nu trebuie să fie neapărat un semnal sinusoidal pentru ca acest circuit să-și îndeplinească funcția. Semnalul de intrare ar putea la fel de bine să fie triunghiular, dinte de fierăstrău, sau orice alt semnal periodic cu semi-alternanțe pozitive și negative. Acest circuit comparator este foarte folositor pentru formarea undelor dreptunghiulare cu factori de umplere diferiți. Această tehnică mai este denumită și modularea în durată a pulsurilor sau PWM, adică variația, sau modularea unei forme de undă în funcție de un semnal de control, în acest caz, semnalul produs de potențiometru.

### Bargraph-ul



Bargraph-ul este o altă aplicație unde se poate folosi un comparator. Dacă am conecta mai multe AO pe post de comparatoare, fiecare având propria sa tensiune de referință conectată la intrarea ne-inversoare (+), dar fiecare primind același semnal de tensiune la intrarea inversoare (-), putem construi un bargraph de tipul celor văzute la egalizatoarele grafice sau în sistemele stereo. Pe măsură ce semnalul de tensiune (reprezentând puterea semnalului radio sau nivelul sunetului audio) crește, comparatoarele vor „porni” unul după altul și vor pune în funcțiune LED-ul lor respectiv. Cu fiecare comparator pornind la un nivel diferit al sunetului audio, numărul LED-urilor aprinse va indica puterea semnalului de intrare.

În circuitul prezentat, LED<sub>1</sub> va fi primul care se va aprinde pe măsură ce tensiunea de intrare va crește într-o direcție pozitivă. Pe măsură ce tensiunea va continua să crească, și celelalte LED-uri vor începe să pornească, unul după altul, până când toate vor fi aprinse.

## Convertor analog-digital (CAD)

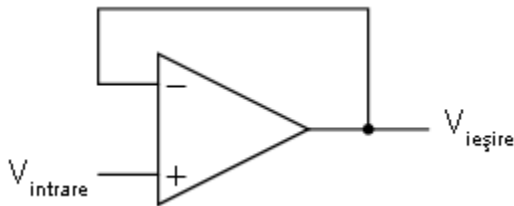
aceeași tehnologie este folosită și în cazul convertorului analog-digital (CAD), pentru „traducerea” unui semnal analog într-o serie de tensiuni pornit/oprit, reprezentând un număr digital.

## 03. Reacția negativă

- Conectarea ieșiri unui AO la intrarea sa inversoare (-) poartă numele de reacție negativă
- Când ieșirea unui AO este conectată direct la intrarea inversoare (-), configurația creată poartă numele de repetor de tensiune. Oricare ar fi semnalul de tensiune aplicat pe intrarea ne-inversoare (+), valoarea semnalului de ieșire va fi egală cu acesta
- Un AO cu reacție negativă tinde să aducă tensiunea sa de ieșire la nivelul necesar pentru ca diferența de tensiune dintre cele două intrări ale sale să fie practic zero. Cu cât amplificarea AO este mai mare, cu atât mai apropiată de zero va fi valoarea diferenței de tensiune

- Unele AO nu pot produce la ieșire o tensiune egală cu tensiunea de alimentare atunci când sunt saturate. Limita superioară și inferioară a tensiunii de saturație poartă numele de tensiunea pozitivă de saturație, respectiv tensiunea negativă de saturație

## Realizarea reacției negative

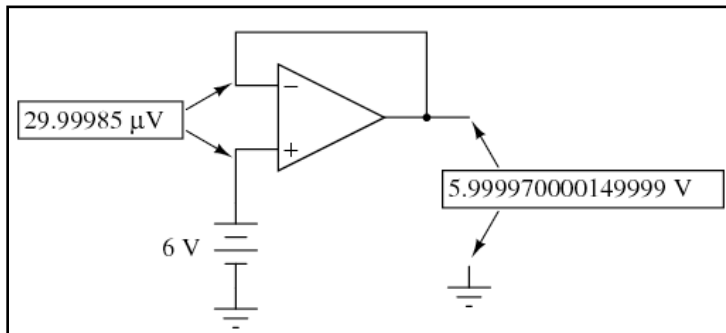


Dacă ar fi să conectăm ieșirea unui AO la intrarea sa inversoare (-) și în același timp să aplicăm un semnal de tensiune la intrarea sa ne-inversoare (+), vom vedea că tensiunea de ieșire a AO este foarte apropiată de cea de intrare (pentru simplitate, sursa de putere, circuitul +V/-V și masa nu au mai fost desenate în figură).

Pe măsură ce  $V_{intrare}$  crește,  $V_{ieșire}$  crește și ea pe măsura amplificării diferențiale. Totuși, pe măsură ce  $V_{ieșire}$  crește, această tensiune de ieșire este furnizată înapoi spre intrarea inversoare, ducând astfel la scăderea diferenței de tensiune dintre cele două intrări și scăderea tensiunii de ieșire. Rezultatul este că, pentru oricare valoare a tensiunii de intrare, tensiunea de ieșire va fi aproape egală cu  $V_{intrare}$ , dar suficientă pentru menținerea unei diferențe de tensiune între  $V_{intrare}$  și intrarea (-) a cărei amplificare generează tensiunea de ieșire.

## Explicația reacției negative

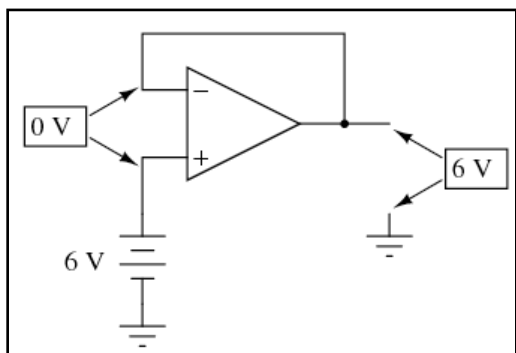
Circuitul va atinge foarte repede un punct de echilibru, unde valoarea tensiunii de ieșire este astfel încât să mențină o diferență necesară de tensiune la intrare, ce produce la rândul ei o tensiune de ieșire suficientă. Introducerea la intrarea inversoare a amplificatorului a tensiunii sale de ieșire este o tehnică numită reacție negativă, și este un concept fundamental și esențial pentru stabilizarea unui sistem în general. Această stabilitate oferă amplificatorului operațional posibilitatea funcționării în zona sa liniară, și nu doar saturat sau blocat, așa cum a fost cazul comparatorului (fără reacție).



Deoarece amplificarea AO este atât de mare, tensiunea pe intrarea inversoare poate fi menținută aproximativ egală cu  $V_{intrare}$ . Să presupunem de exemplu că AO din exemplu are o amplificare de 200.000. Dacă  $V_{intrare} = 6 \text{ V}$ , tensiunea de ieșire va fi de 5,999970000149999 V. Această valoare este suficientă pentru ca tensiunea diferențială de 6 V -

5,999970000149999 V = 29,99985  $\mu\text{V}$ , amplificată cu factorul de 200.000 să producă la ieșire exact 5,999970000149999 V; sistemul este astfel în echilibru, iar valoarea tensiunii de ieșire nu se (mai) modifică.



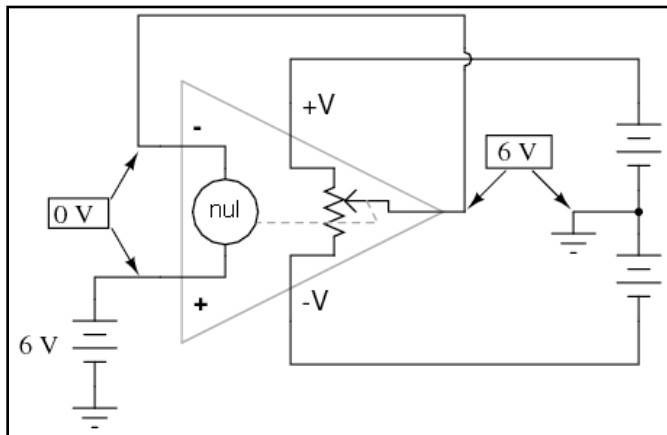


După cum se poate vedea, diferența de tensiune nu este prea mare ( $29,99985 \mu\text{V}$ ); din considerente practice, putem presupune că această diferență de tensiune dintre cele două intrări este menținută prin intermediul reacției negative la exact  $0 \text{ V}$ .

### Avantajele utilizării reacției negative

Un mare avantaj al utilizării AO cu reacție negativă este că valoarea amplificării în tensiune nu este importantă, atâta timp cât este foarte mare. Dacă amplificarea diferențială ar fi fost  $250.000$  în loc de  $200.000$ , atunci tensiunea de ieșire ar fi și mai apropiată de valoarea  $V_{\text{intrare}}$ . În circuitul prezentat însă, tensiunea de ieșire ar fi (din punct de vedere practic) și în acest caz egală cu tensiunea de la intrarea ne-inversoare. Amplificările AO, prin urmare, nu trebuie să fie foarte precise din fabricație pentru a putea fi folosite cu succes în circuitele electronice. Circuitul de mai sus va urma pur și simplu semnalul la intrare, cu o amplificare stabilă de  $1$ .

### Modelul amplificatorului operațional



Reîntorcându-ne la modelul amplificatorului operațional, putem să ne imaginăm AO ca fiind o sursă de tensiune variabilă controlată de un detector de nul extrem de sensibil. „Potențiometrul” din interiorul AO ce crează o tensiune variabilă, se va deplasa spre orice poziție este nevoie, astfel încât să „balanseze” intrările inversoare și ne-inversoare, iar căderea de tensiune pe detectorul de nul, ca urmare a acestui fapt, să fie zero (indicația detectorului de nul =  $0$ ).

Peria potențiometrului se va mișca astfel încât tensiunea de ieșire să ducă acul indicator al detectorului de nul la zero volți. Tensiune de ieșire va fi egală cu tensiunea de intrare,  $6 \text{ V}$  în acest caz. Dacă tensiunea de intrare se modifică, potențiometrul din interiorul AO își va modifica poziția astfel încât detectorul de nul să fie echilibrat ( $0 \text{ V}$ ). Rezultatul este o tensiune de ieșire aproximativ egală cu cea de intrare.

### Repetor de tensiune

Acest lucru este valabil pentru întregul domeniu de tensiuni pe care AO îl poate susține la ieșire. Cu o sursă de putere de +15V/-15V, și un amplificator ideal ce poate amplifica tensiunea de la intrare între aceste limite maxime, ieșirea AO va „urmări” tot timpul intrarea sa între -15 V și + 15 V. Din acest motiv, circuitul de mai sus poartă numele de repetor de tensiune. Amplificarea în tensiune este 1 pentru această configurație, impedanța de intrare mare, cea de ieșire mică și un factor de amplificare în curent mare.

### **Tensiunea pozitivă și negativă de saturație**

Trebuie menționat faptul că multe AO nu pot genera la ieșire căderi de tensiune exact cât tensiunea de alimentare. Tensiunea de ieșire a modelului 741, de exemplu, la saturație, este mai mică cu un volt pe partea pozitivă (+V), și cu doi volți pe partea negativă (-V). Astfel, cu o sursă de tensiune duală de +15/-15 V, ieșirea unui AO poate fi maxim +14 V și minim -13 V (cu aproximare), dar nu poate crește mai mult de atât datorită metodei de confecționare al AO. Aceste două limite sunt cunoscute sub numele de tensiunea pozitivă de saturație, respectiv tensiunea negativă de saturație. Alte AO, precum modelul 3130, ce folosesc tranzistori cu efect de câmp pe etajul de ieșire, pot urma tensiunea de alimentare cu o aproximație de câțiva milivolți, în ambele părți. Practic, tensiunile de saturație pozitivă, respectiv negativă, sunt egale cu tensiunile de alimentare.

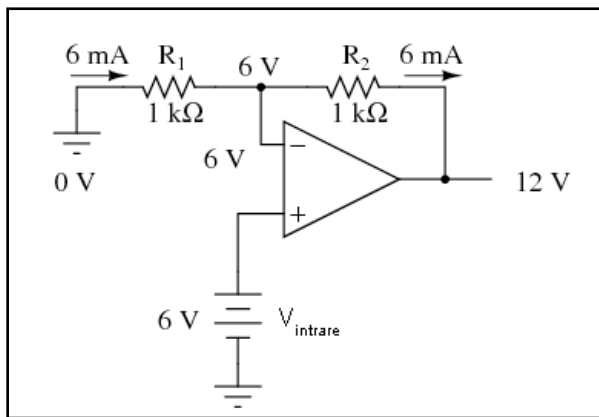
## **04. Reacția negativă prin divizor de tensiune**

- Prin conectarea reacției negative a unui AO prin intermediul unui divizor de tensiune, tensiune de ieșire devine un multiplu al tensiunii de intrare
- Un AO cu reacție negativă, a cărui semnal de intrare este conectat la intrarea non-inversoare (+), poartă numele de amplificator ne-inversor. Polaritatea tensiunii de ieșire va fi aceeași cu a tensiunii de intrare. Amplificarea în tensiune a circuitului este dată de următoarea formula:  
$$A_V = (R_2 / R_1) + 1$$

### **Adăugarea divizorului de tensiune**

Dacă adăugăm un divizor de tensiune la reacția negativă, astfel încât doar o fracțiune din tensiunea de ieșire este reintrodusă la intrarea inversoare, și nu întreaga valoare, tensiunea de ieșire va fi un multiplu al tensiunii de intrare. Din nou, pentru simplitate, conexiunile alimentării în c.c. a AO au fost omise. Toate tensiunile au ca și referință punctul de masă (0 V).

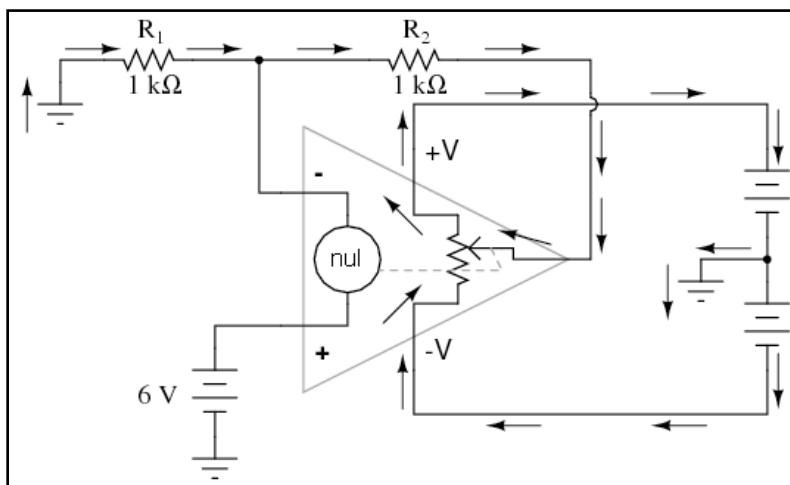
### **Sursa de semnal conectată la intrarea ne-inversoare (+)**



### Analiza circuitului

O altă metodă de analiză a acestui circuit constă în calcularea amplitudinii și direcției curentului prin  $R_1$ , cunoscând tensiunea pe fiecare parte (și prin urmare pe  $R_1$ ), și rezistența rezistorului  $R_1$ . Din moment ce partea stângă a rezistorului  $R_1$  este conectată la masă (0 V), iar partea dreaptă are un potențial de 6 V (datorită reacției negative ce menține tensiunea aceluși punct egală cu  $V_{intrare}$ ), putem vedea că avem 6 V la bornele lui  $R_1$ . Acest lucru înseamnă un curent de 6 mA prin  $R_1$ , de la stânga la dreapta. Deoarece știm că ambele intrări ale AO au impedanțe foarte mari, putem afirma că, curentul prin acestea este zero, și nu se comportă precum un divizor de curent în punctul de conectare cu divizorul de tensiune. Cu alte cuvinte, putem considera că  $R_1$  și  $R_2$  sunt conectate în serie: toți electronii ce trec prin  $R_1$  ajung în  $R_2$ . Cunoscând curentul prin  $R_2$  și rezistența lui  $R_2$ , putem calcula căderea de tensiune la bornele acestui rezistor (6 V) și polaritatea acestuia. Calculând tensiunea totală dintre punctul de masă (0 V) la dreapta rezistorului  $R_2$ , ajungem la o valoare de 12 V.

### Explicație utilizând modelul AO



Dacă ne uităm pe desenul precedent, ne putem întreba „unde anume se duce curentul de 6 mA”. Figura de mai sus nu prezintă întregul drum, dar în realitate, acest curent vine de la sursa de putere de c.c., trece prin masă,  $R_1$ ,  $R_2$ , prin ieșirea AO și înapoi la borna pozitivă a sursei. Utilizând modelul AO - potențiomtru/detector de nul, calea curentului arată astfel.

Sursa de semnal de 6 V nu trebuie să furnizeze niciun curent în circuit: aceasta doar comandă amplificatorului operațional echilibrul de tensiune dintre cele două intrări, iar ca urmare a acestui fapt, AO produce la ieșire o tensiune de două ori mai mare decât tensiunea de semnal datorită reacției divizate a celor doi rezistori de 1 kΩ.

### Factorul de amplificare

$$A_v = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

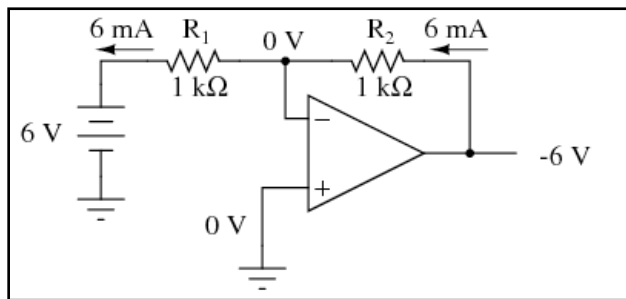
Putem modifica factorul de amplificare în tensiune al acestui circuit, prin simpla modificare a valorilor celor doi rezistori. Amplificarea poate fi calculată cu formula alăturată.

### Amplificator ne-inversor

Se poate observa că amplificarea unui astfel de amplificator nu poate să scadă sub valoarea 1. Dacă ar fi să coborâm valoarea lui  $R_2$  la zero ohmi, circuitul rezultat ar fi identic cu repetorul de tensiune, unde ieșirea este conectată direct la intrarea inversoare. Această amplificare poate fi mărită mult peste 1, prin creșterea valorii rezistorului  $R_2$  față de  $R_1$ .

Polaritatea tensiunii de ieșire este aceeași cu cea a tensiunii de intrare. O tensiune pozitivă de intrare înseamnă o tensiune pozitivă de ieșire, și invers (față de masă). Din acest motiv, acest circuit poartă numele de amplificator ne-inversor.

### Sursa de semnal conectată la intrarea inversoare (-)



Să reluăm circuitul de mai sus, dar de data aceasta să aplicăm tensiunea de intrare în altă parte.

Prin conectarea la masă a intrării ne-inversoare, reacția negativă de la ieșire va încerca să mențină tensiunea intrării inversoare la 0 V. Din acest motiv, intrarea inversoare, în acest circuit, poartă numele de masă virtuală (având un

potențial de 0 V, dar nefiind conectată direct la masă).

Tensiunea de intrare este aplicată de această dată din stânga divizorului de tensiune  $R_1$ -- $R_2$  ( $= 1 \text{ k}\Omega$ ). Prin urmare, tensiune de ieșire trebuie să ia valoarea de -6 V pentru echilibrarea punctului de mijloc la potențialul masei (0 V). Folosind metodele amplificatorului ne-inversor, putem analiza funcționarea circuitului prin determinarea amplitudinilor și direcțiilor curenților.

## Factorul de amplificare

$$A_V = \frac{-R_2}{R_1}$$

Din nou, putem modifica amplificarea în tensiune a circuitului prin modificarea valorilor rezistorilor  $R_1$  și  $R_2$ . Amplificarea poate fi calculată cu formula alăturată.

## Amplificator inversor

De această dată, amplificarea în tensiune a circuitului poate fi sub 1, depinzând doar de raportul valorilor celor doi rezistori. Polaritatea ieșirii este tot timpul opusă polarității tensiunii de intrare. O tensiune de intrare pozitivă înseamnă o tensiune de ieșire negativă, și invers (față de masă). Din acest motiv, acest circuit este cunoscut sub numele de amplificator inversor. Semnul „-” din formula de mai sus scoate în evidență această inversare a polarităților.

## Observație

Astfel de circuite studiate mai sus sunt folosite pentru efectuarea operațiilor matematice de înmulțire și împărțire în circuitele analogice ale calculatoarelor.

## 05. Amplificatorul tensiune-curent

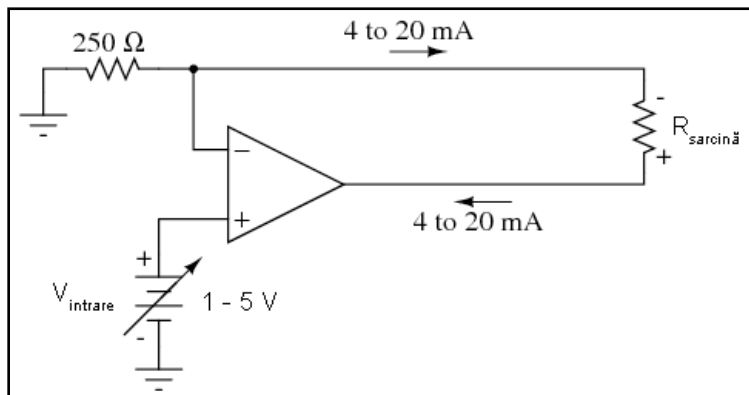
- În industrie, semnalele de curent în c.c. sunt adesea folosite în dauna semnalelor de tensiune în c.c., pentru reprezentarea mărimilor fizice
- Semnalele de tensiune se pot produce relativ ușor direct de la dispozitivele traductoare, pe când semnalele de curent nu.
- AO pot fi folosite pentru realizarea „conversiei” unui semnal de tensiune într-un semnal de curent. În acest mod de funcționare, AO vor genera la ieșire o cădere de tensiune necesară pentru menținerea curentului prin circuitul de semnal la o valoare bine stabilită

## Avantajele utilizării semnalelor de c.c.

În circuitele de instrumentație, semnalele de c.c. sunt folosite adesea pentru reprezentarea analogică a unei mărimi fizice precum temperatura, presiunea, greutatea și mișcarea. De obicei se preferă utilizarea semnalelor de curent și nu a celor de tensiune, deoarece semnalele de curent sunt egale prin întreaga buclă a circuitului serie, de la

sursă (aparatură de măsură) până la sarcină (indicator, controler), pe când semnalele de tensiune în circuitele paralele pot varia de la un capăt la celălalt datorită pierderilor rezistive din lungul conductoarelor. Mai mult, instrumentele de măsură ale curentului posedă în general o impedanță mică de intrare, pe când instrumentele de măsură ale tensiunii au impedanțe mari de intrare; acest lucru înseamnă că cele de curent au o imunitate crescută față de zgomotul electric.

## AO pe post de sursă de curent



Pentru a putea folosi curentul ca și metodă de reprezentare a mărimilor fizice, trebuie să putem genera o cantitate precisă de curent în circuitul de semnal. Dar cum putem genera o cantitate precisă de curent dacă nu cunoaștem rezistența buclei de circuit.

Răspunsul constă în utilizarea unui amplificator cu scopul menținerii curentului prin circuit la o valoare prestabilită, aplicând o cădere de tensiune mai mică sau mai mare pentru îndeplinirea acestui obiectiv. Un astfel de amplificator se comportă precum o sursă de curent. Un AO cu reacție negativă este o soluție foarte bună pentru această problemă.

## Explicație

Se presupune că tensiunea de intrare a acestui circuit este generată de un circuit traductor/amplificator, calibrat pentru producerea valorii de 1 V pentru 0% din mărimea de măsurat și 5 V pentru 100% din valoarea mărimii de măsurat. Semnalul de curent analog standard este între 4 mA (0%) și 20 mA (100%). Pentru o tensiune de intrare de 5 V, rezistorul (de precizie) de 250 Ω va avea o cădere de tensiune de 5 V la bornele sale, rezultând un curent de 20 mA prin bucla circuitului (incluzând rezistorul de sarcină,  $R_{sarcină}$ ). Nu contează rezistența rezistorului  $R_{sarcină}$ , sau valoarea rezistenței adiționale prezentă în circuit datorită conductorilor, atâta timp cât AO are o sursă de putere suficient de mare pentru generarea celor 20 mA prin  $R_{sarcină}$ . Rezistorul de 250 Ω stabilește relația dintre tensiunea de intrare și curentul de ieșire, ducând în acest caz la echivalența 1-5 V intrare / 4-20 mA ieșire.

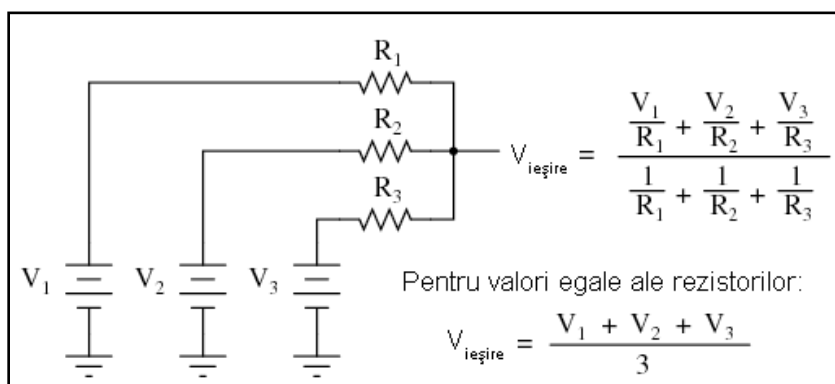
## Amplificator de transconductanță

Acest circuit mai este cunoscut și sub numele de amplificator de transconductanță. În electronică, transconductanța este raportul dintre variația curentului și variația tensiunii ( $\Delta I / \Delta V$ ), și se măsoară în Siemens, aceeași unitate de măsură pentru exprimarea conductanței, reciproca matematică a rezistenței. În acest circuit, valoarea raportului de transconductanță este fixată de către valoarea de 250 a rezistorului, asigurând o relație liniară curent-ieșire/tensiune-intrare.

## 06. Circuite sumatoare și de mediere

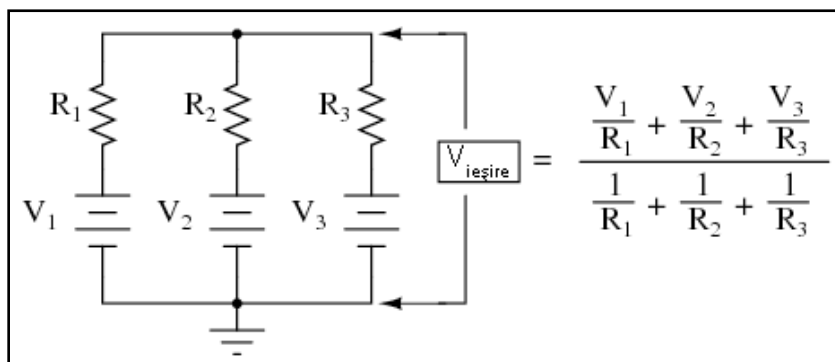
- Un circuit de mediere realizează media aritmetică a tensiunilor de intrare
- Un circuit sumator realizează suma algebrică a semnalelor de tensiune de la intrare

### Circuit de mediere



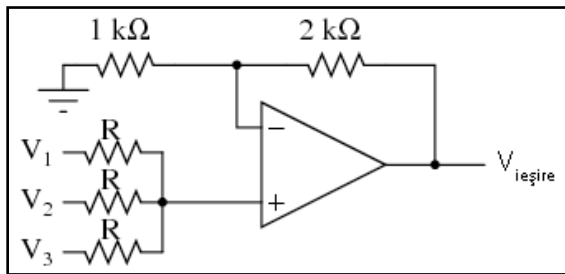
Dacă luăm trei rezistori egali și conectăm unul din capetele fiecăruia dintre ei la un punct comun și aplicăm apoi trei tensiuni de intrare, câte o tensiune pe fiecare din capetele libere ale rezistorilor, tensiunea văzută la punctul comun reprezintă media aritmetică a celor trei tensiuni de intrare.

### Teorema lui Millman



Acest circuit nu este altceva decât o aplicație practică a teoremei lui Millman.

### Circuit sumator ne-inversor

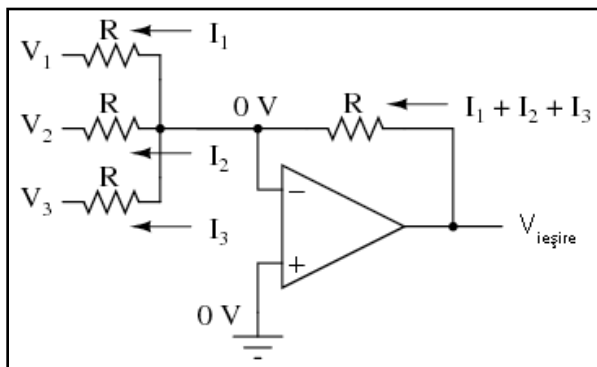


Dacă luăm un circuit de mediere pasiv și îl folosim la intrarea unui AO cu un factor de amplificare de 3, putem transforma această funcție de mediere într-o funcție de adunare. Rezultatul este un circuit sumator neinvertor.

$$V_{ieșire} = 3 \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} = V_1 + V_2 + V_3$$

Cu un divizor de tensiune a cărei raport este  $2k/1k\Omega$ , circuitul amplificator ne-invertor va avea o amplificare în tensiune de 3. Având ca și intrare media celor trei tensiuni  $((V_1 + V_2 + V_3) / 3)$ , prin circuitul de mediere pasiv, și înmulțind această medie cu 3, ajungem la o tensiune de ieșire egală cu *suma* celor trei tensiuni de intrare  $(V_1 + V_2 + V_3)$ .

### Circuit sumator inversor



Același lucru este realizabil și cu un AO inversor, folosind un circuit de mediere pasiv ca și componentă a circuitului de reacție negativă. Rezultatul este cunoscut sub numele de circuit sumator inversor.

Acum, cu partea dreaptă a circuitului de mediere pasiv conectată la punctul de masă virtual al intrării inversoare, teorema lui Millman nu se mai poate aplica precum înainte. Tensiunea masei virtuale este menținută la valoarea de 0 V de către reacția negativă a AO, pe când înainte, această valoare putea să oscileze spre valoarea medie a celor trei tensiuni,  $V_1, V_2, V_3$ . Totuși, fiindcă valorile rezistorilor sunt egale între ele, curentul prin fiecare dintre cei trei va fi proporțional cu valoarea tensiunii de intrare a fiecărui rezistor. Din moment ce curentul la nodul comun va fi suma celor trei curenți, acest curent total prin rezistorul de reacție va produce o tensiune de ieșire egală cu suma celor trei tensiuni, cu polaritate inversă, de aici și denumirea de sumator inversor.

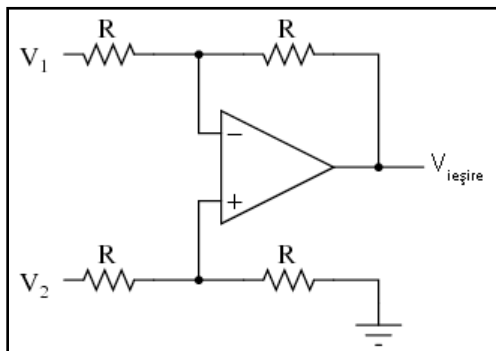
$$V_{ieșire} = -(V_1 + V_2 + V_3)$$



## 07. Realizarea unui amplificator diferențial

Un amplificator fără reacție negativă este deja un amplificator diferențial, amplificând diferența de tensiune dintre cele două intrări. Totuși, factorul său de amplificare nu poate fi controlat și este de obicei prea mare pentru orice aplicație practică. Folosirea reacției negative în circuitele cu AO a dus la „pierderea” unei intrări, amplificatorul rezultat putând fi folosit doar pentru amplificarea unui singur semnal de intrare.

### Circuitul amplificatorului diferențial



Putem însă construi un circuit cu AO, menținând ambele intrări, dar cu un factor de amplificare controlat de elemente (rezistori) externe.

#### Amplificarea în tensiune unitară

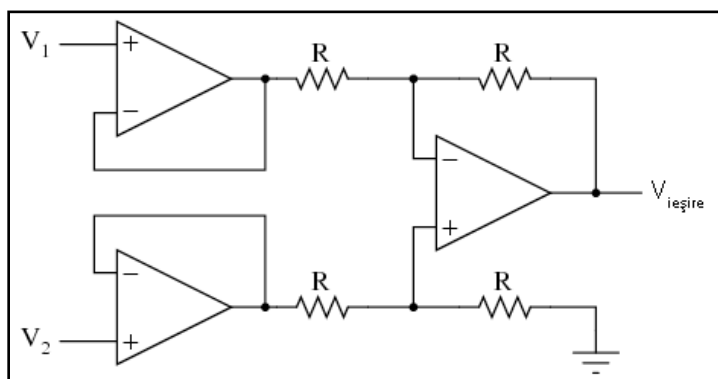
Dacă valorile tuturor rezistorilor sunt egale, acest amplificator va avea o amplificare diferențială a tensiunii de 1. Analiza acestui circuit este practic identică cu cea a unui amplificator inversor, cu diferența că tensiunea pe intrarea ne-inversoare (+) a AO este egală cu o fracțiune din  $V_2$ , și nu este conectată la masă cum era cazul amplificatorului inversor. Prin urmare,  $V_2$  reprezintă semnalul pe intrarea ne-inversoare, iar  $V_1$  reprezintă semnalul pe intrarea inversoare.

$$V_{iesire} = V_2 - V_1$$

#### Amplificarea în tensiune ne-unitară

Dacă dorim realizarea unei amplificări diferențiale de tensiune diferită de 1, va trebui să ajustăm valorile ambelor divizoare de tensiune. Acest lucru necesită multiple schimbări ale rezistorilor și echilibrarea celor doi divizori de tensiune pentru funcționarea simetrică a circuitului, ceea ce nu este foarte practic.

#### Cuplarea repetoarelor de tensiune la intrare



O altă limitare a acestui circuit este faptul că impedanțele sale de intrare sunt mici în comparație cu alte configurații cu AO, în special amplificatorul ne-inversor (cu o singură intrare). Fiecare sursă de tensiune de intrare trebuie să genereze curenți prin rezistori, ceea ce contribuie la o impedanță mult mai mică decât impedanța de intrare a unui AO „pur”. Soluția la această problemă, din fericire, este destul

de simplă. Tot ceea ce trebuie să facem este să trecem fiecare semnal de intrare printr-un repetor de tensiune.

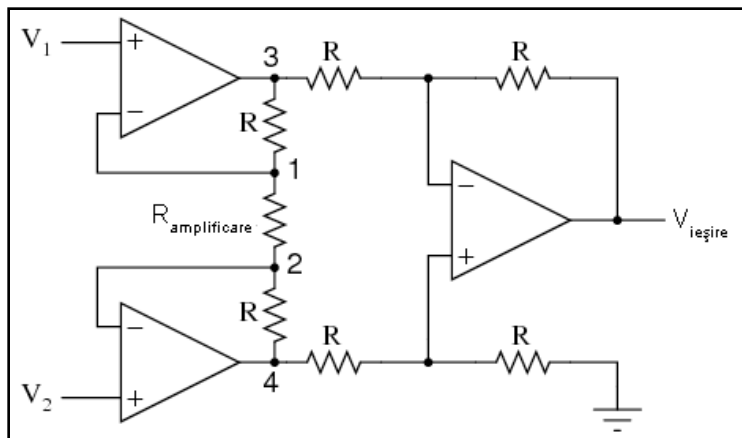
De data aceasta, semnalele de intrare  $V_1$  și  $V_2$  sunt conectate direct la intrările celor două AO repetitoare de tensiune, rezultând o impedanță foarte mare de intrare. Cele două AO din stânga sunt folosite pentru generarea curentului (prin intermediul unei surse de tensiune de c.c. exterioare) necesar prin rezistori în locul surselor de tensiune de la intrare.

## 08. Amplificatorul de instrumentație

### Scop

După cum am spus și în secțiunea precedentă, este de dorit modificarea factorului de amplificare al circuitului fără a schimba mai mult de un rezistor, așa cum era cazul exemplului precedent. Această posibilitatea se poate realiza cu ajutorul amplificatorului de instrumentație.

### Circuitul amplificatorului de instrumentație



Circuitul este construit din două amplificatoare diferențiale și trei rezistori ce conectează cele două amplificatoare împreună. Considerăm că toți rezistorii din circuit sunt egali, cu excepția rezistorului  $R_{amplificare}$ . Reacția negativă a AO din stânga sus duce tensiunea din punctul 1 (deasupra lui  $R_{amplificare}$ ) la o valoare egală cu  $V_1$ . Asemănător, tensiunea la punctul 2 (sub  $R_{amplificare}$ ) este menținută la o valoare egală cu  $V_2$ .

Căderea de tensiune la bornele lui  $R_{\text{amplificare}}$  va fi egală cu diferența de tensiune dintre  $V_1$  și  $V_2$ . Această cădere de tensiune duce la apariția unui curent prin  $R_{\text{amplificare}}$ , și din moment ce curentul prin buclele de reacție ale celor două amplificatoare este zero, curentul prin  $R_{\text{amplificare}}$  trebuie să fie egal cu valoarea curentului prin cele două rezistoare  $R$  din imediata sa vecinătate.

Căderea de tensiune între punctele 3 și 4 va fi prin urmare egală cu:

$$V_{3-4} = \frac{V_2 - V_1}{1 + \frac{2R}{R_{\text{amplificare}}}}$$

### Factorul de amplificare în tensiune

Amplificatorul diferențial din dreapta va amplifica această cădere de tensiune dintre punctele 3 și 4 cu un factor de 1 (presupunând că valorile tuturor rezistorilor  $R$  sunt egale).

Din formula de mai sus reiese și factorul de amplificare în tensiune al unui amplificator de instrumentație:

$$A_v = 1 + \frac{2R}{R_{\text{amplificare}}}$$

Cea mai mică amplificare posibilă cu ajutorul configurației de mai sus este 1, atunci când  $R_{\text{amplificare}}$  este deschis (rezistența infinită).

### Avantaje

Deși modul de realizare al acestui AO pare greoi, avantajul constă în impedențele de intrare extrem de mari pentru  $V_1$  și  $V_2$ , iar amplificarea se poate ajusta prin variația valorii unui singur rezistor.

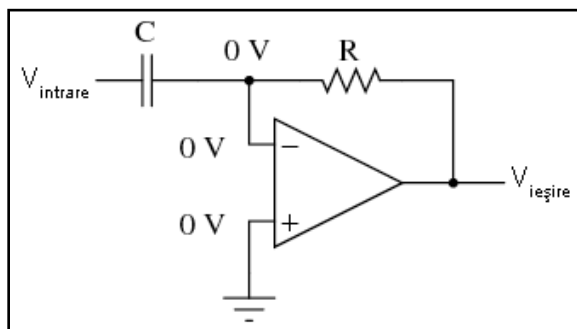
## 9. Circuite de derivare și integrare

- Un circuit derivator produce o tensiune constantă la ieșire pentru o tensiune variabilă la intrare
- Un circuit integrator produce o tensiune variabilă la ieșire pentru o tensiune de intrare constantă
- Ambele tipuri de dispozitive se construiesc ușor, folosind componente reactive (de obicei condensatoare și nu bobine) în bucla de reacție a circuitului amplificatorului operațional

## Scop și definiții

Prin introducerea reactanței în buclele de reacție ale amplificatoarelor operaționale, ieșirea acestora va depinde de variația tensiunii de intrare cu timpul. Folosind nomenclatura analizei matematice, integratorul produce o tensiune de ieșire proporțională cu produsul dintre tensiunea de intrare și timp; derivatorul produce o tensiune de ieșire proporțională cu variația tensiunii de intrare ( $dv / dt$ ).

## Circuit de derivare



Putem construi un circuit cu AO ce măsoară variația de tensiune prin determinarea curentului printr-un condensator; tensiunea de ieșire va fi proporțională cu valoarea celui curent.

Partea dreaptă a condensatorului este menținută constantă la o tensiune de 0 V, datorită efectului „masei virtuale”. Prin urmare, curentul „prin” condensator se datorează doar variației tensiunii de intrare. O tensiune constantă nu va duce la apariția unui

curent prin condensator, ci doar o tensiune de intrare variabilă.

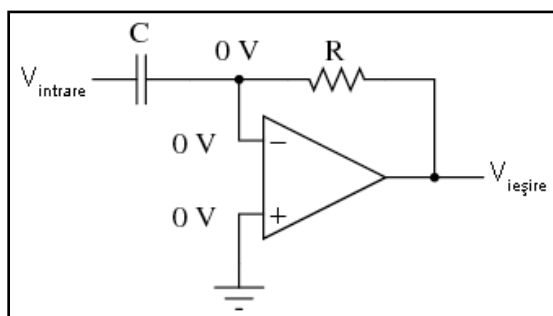
Curentul condensatorului va trece și prin rezistorul de reacție, producând o cădere de tensiune la bornele sale, tensiune ce este egală cu tensiunea de ieșire. O variație liniară și pozitivă a tensiunii de intrare va rezulta într-o tensiune negativă la ieșirea AO, și invers. Această inversare a polarității se datorează faptului că semnalul de intrare este trimis la intrarea inversoare a AO, iar acesta se comportă precum un amplificator inversor. Cu cât variația tensiunii de la intrare este mai mare (negativă sau pozitivă), cu atât tensiunea de la ieșire va fi mai mare. Formula pentru determinarea tensiunii de ieșire a derivatorului:

$$V_{ieșire} = -RC \frac{dv_{intrare}}{dt}$$

## Aplicații ale circuitelor de derivare

Pe lângă utilizarea acestor circuite ca și funcție matematică de derivare în calculatoarele numerice, acestea se folosesc ca și indicatoare de variație a mărimilor în instrumentație. O astfel de aplicație include monitorizarea (sau controlul) ratei de variație a temperaturii într-un furnal, unde o creștere sau scădere prea bruscă a temperaturii poate crea probleme. Tensiunea de c.c. produsă de circuitul integrator poate fi folosită pentru acționarea unui comparator, ce ar putea activa o alarmă sau ar putea controla rata de variație, dacă aceasta depășește o anumită valoare prestabilită.

## Circuit de integrare



În acest caz, AO va genera la ieșire o tensiune proporțională cu amplitudinea și durata de timp în care semnalul a deviat de la valoarea de 0 V. Altfel spus, un semnal de intrare constant va genera o anumită variație a tensiunii de ieșire: inversul derivatorului. Pentru a realiza acest lucru, trebuie doar să inversăm locul rezistorului cu cel al condensatorului din circuitul precedent.

Ca și în cazul precedent, AO asigură faptul că intrarea inversoare va fi menținută la o tensiune de 0 V (masa virtuală). Dacă tensiunea de intrare este exact 0 V, nu va exista curent prin rezistor, condensatorul nu se va încărca, și prin urmare, tensiunea de ieșire nu se va modifica. Nu putem garanta valoarea tensiunii de la ieșire față de masă în această situație, dar putem afirma că aceasta va fi constantă.

Totuși, dacă aplicăm o tensiune constantă și pozitivă la intrare, tensiunea de ieșire va scădea spre negativ, într-un mod liniar, în încercarea de a produce o variația de tensiune pe condensator necesară menținerii curentului stabilit datorită diferenței de tensiune la bornele rezistorului. Invers, o tensiune constantă și negativă va duce la apariția unei variații de tensiune liniară și pozitivă la ieșire. Rata de variație a tensiunii de ieșire este proporțională cu valoarea tensiunii de intrare.

Formula de determinare a tensiunii de ieșire a integratorului este următoarea:

$$\frac{dv_{ieșire}}{dt} = -\frac{V_{intrare}}{RC} \text{ sau}$$
$$V_{ieșire} = \int_0^t -\frac{V_{intrare}}{RC} dt + c$$

unde,

$c$  = tensiunea de ieșire inițială ( $t = 0$ )

### Aplicații ale circuitelor de integrare

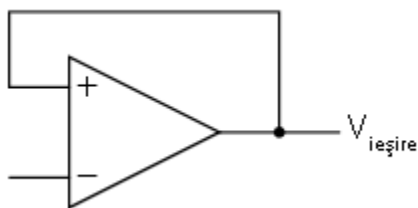
O aplicație a acestui circuit ar fi menținerea expunerii totale la radiație, sau dozajul, în cazul în care tensiunea de intrare ar fi conectată la un detector electronic de radiație. Un circuit integrator trebuie să ia în calcul atât intensitatea radiației (amplitudinea tensiunii de intrare) cât și timpul de expunere, generând o tensiune de ieșire ce reprezintă expunerea totală suferită.

Circuitul de integrare poate fi folosit și pentru integrarea unui semnal ce reprezintă curgerea unui lichid, producând la ieșire un semnal ce reprezintă cantitatea totală de lichid ce a trecut printr-un anumit punct, într-o anumită perioadă de timp.

## 10. Reacția pozitivă

- Reacția pozitivă crează o condiție de histereză: tendința de „agățare” într-una dintre cele două situații extreme, saturație pozitivă sau saturație negativă

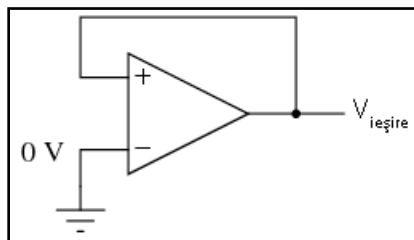
### Definiție



Spre deosebire de reacția negativă, ce conectează ieșirea amplificatorului la intrarea sa inversoare (-), reacția pozitivă introduce semnalul de ieșire al AO la intrarea sa ne-inversoare (+), astfel.

### Circuitul bistabil

Intrarea inversoare nu este conectată la bucla de reacție, prin urmare, se poate aplica o tensiune externă pe aceasta. Să vedem pentru început efectele conectării intrării inversoare la masă (0 V).



negativ.

În acest caz, tensiunea de ieșire va depinde de amplitudinea și de polaritatea tensiunii intrării ne-inversoare. Dacă această tensiune este pozitivă, ieșirea AO va fi și ea pozitivă, ducând la saturația pozitivă a amplificatorului ca urmare a reacției pozitive pe intrarea ne-inversoare. Pe de altă parte, dacă tensiunea intrării ne-inversoare pornește de la o valoare negativă, AO se va satura negativ.

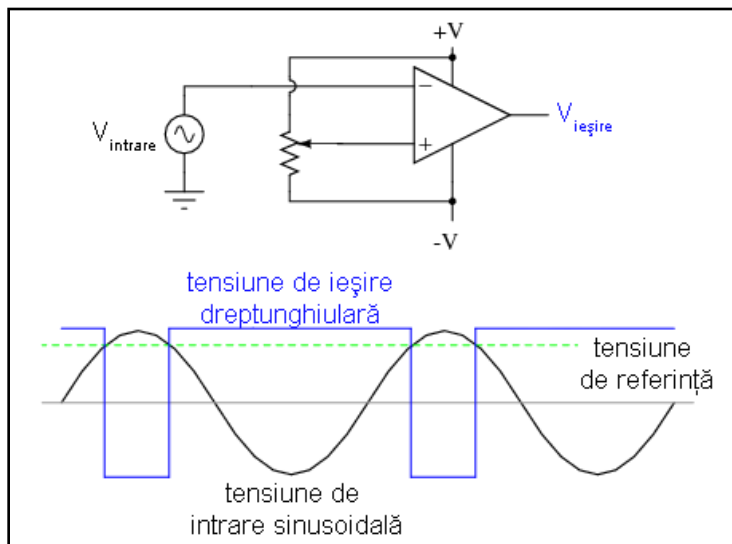
Ceea ce avem în cazul de față poartă numele de circuit bistabil, și anume stabil într-una dintre cele două stări (saturat pozitiv sau saturat negativ). După atingerea uneia dintre aceste stări, circuitul tinde să rămână în aceea stare, nemodificat. Pentru aducerea circuitului dintr-o stare în cealaltă, este necesară aplicarea unei tensiuni de aceeași polaritate pe intrarea inversoare (-), dar de o amplitudine mai mare. De exemplu, dacă circuitul este saturat pozitiv la +12 V, va fi necesară o tensiune pe intrarea inversoare de cel puțin +12 V pentru ca AO să intre în saturație negativă.

Prin urmare, un AO cu reacție pozitivă tinde să rămână în starea în care se află deja. Tehnic, acest lucru este cunoscut sub numele de histerezis.

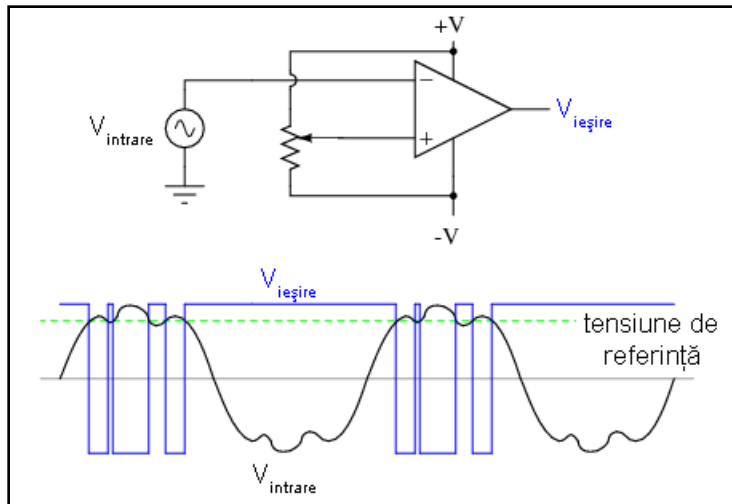
## Comparatorul cu histereză

După cum am mai văzut, comparatoarele pot fi utilizate pentru producerea unei unde dreptunghiulare folosind orice tip de undă periodică (sinusoidală, triunghiulară, dinte de fierăstrău, etc.) pe intrare.

### Comparatorul cu AO simplu



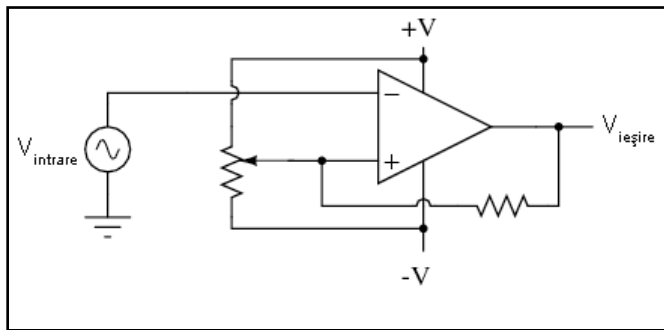
Dacă forma de undă în c.a. este pură, un comparator simplu este suficient pentru realizarea acestei transformări.



Pe de altă parte, dacă semnalul de intrare conține zgomot, ce cauzează creșterea sau descreșterea semnificativă a amplitudinii în decurs de o perioadă, ieșirea unui astfel de comparator poate varia neașteptat.

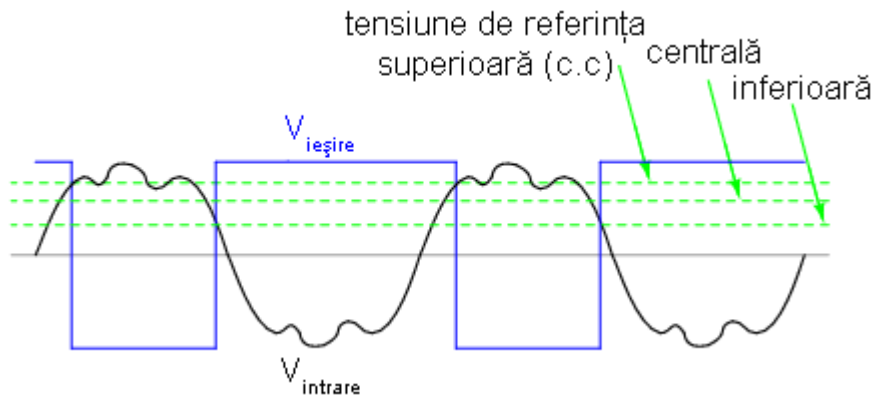
Ori de câte ori există o tranziție a semnalului de intrare prin semnalul de referință, indiferent cât de mică ar fi, ieșirea comparatorului își va modifica starea.

### Introducerea histerezei prin reacția pozitivă



Dacă adăugăm o mică reacție pozitivă circuitului comparator, vom introduce histereză în circuit. Această histereză va determina rămânerea circuitului în starea sa actuală, modificându-și starea doar dacă amplitudinea tensiunii de intrare în c.a. suferă o modificarea majoră.

Acest rezistor de reacție crează o referință duală pentru circuitul comparator. Tensiunea aplicată la intrarea ne-inversoare (+) ca și referință pentru comparația tensiunii de c.a, depinde de valoarea tensiunii de ieșire a AO. Când ieșirea AO este saturată pozitiv, tensiunea de referință pe intrarea ne-inversoare va fi mai pozitivă decât înainte. Invers, când ieșirea AO este saturată negativ, tensiunea de referință a intrării ne-inversoare va fi mai negativă decât înainte. Rezultatul poate fi transpus pe un grafic, astfel:

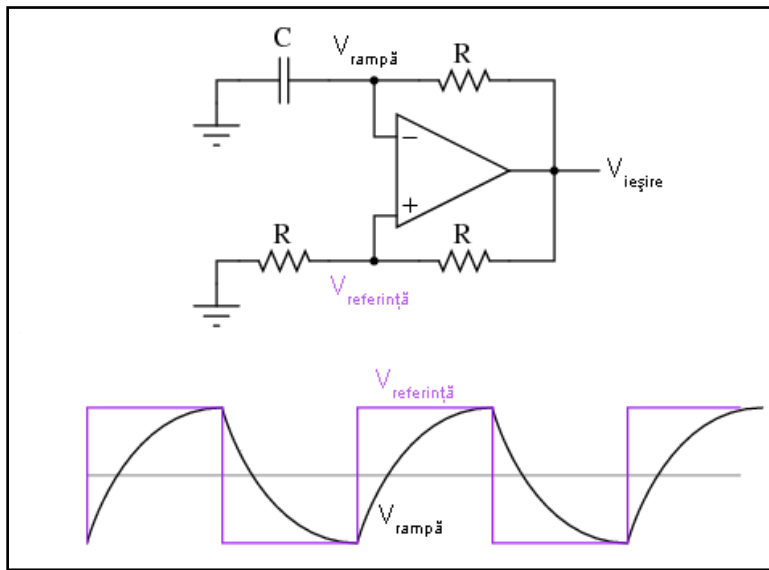


Când ieșirea AO este saturată pozitiv, tensiunea de referință va fi cea superioară; ieșirea nu va fi saturată pozitiv decât dacă intrarea de c.a. crește peste această referință superioară. Invers, când AO este saturat negativ, tensiunea de referință luată în considerare este cea inferioară; ieșirea nu va crește spre saturatie pozitivă decât dacă intrarea de c.a. scade sub nivelul de referință inferior. Rezultatul este un semnal de ieșire dreptunghiular curat, în ciuda existenței unor distorsiuni mari ale semnalului de intrare de c.a. Pentru ca ieșirea comparatorului să sară de la o stare la alta (lucru nedorit), este nevoie ca diferența dintre amplitudinile semnalului de intrare să fie cel puțin la fel de mare precum diferența dintre tensiunile de referință superioară și inferioară.

## Circuite oscilatoare (circuite astabile)

Un oscilator este un dispozitiv ce produce o tensiune de ieșire alternativă sau pulsatorie. Tehnic, este cunoscut sub numele de dispozitiv *astabil*: nu posedă o ieșire stabilă.





variația mărimii oricărui component.

Să vedem un circuit oscilator cu AO și reacție pozitivă.

Când ieșirea este saturată pozitiv,  $V_{\text{referința}}$  va fi pozitivă, iar condensatorul se va încărca în direcția pozitivă. Când  $V_{\text{rampă}}$  este mai mare decât  $V_{\text{referința}}$  (chiar și cu o valoare foarte mică), ieșirea se va satura negativ, iar condensatorul se va încărca în direcția (polaritatea) opusă. Oscilația are loc datorită faptului că reacția negativă este instantanee iar reacția negativă este întârziată (printr-o constantă de timp RC). Frecvența acestui oscilator poate fi setată prin

Tony R. Kuphaldt



INTRODUCERE ÎN CIRCUITE ELECTRICE  
ȘI ELECTRONICE

**Volumul 4: Electronica digitală**

Traducere: Mihai Olteanu

**SCIENTIA**ro

## Prefață

Cartea de față reprezintă varianta românească, tradusă de Mihai Olteanu, a volumului „Electronica digitală” din seria „Lessons in Electric Circuits” scrisă de Tony R. Kuphaldt sub licența „Design Science License”.

Cartea în limba română se distribuie gratuit prin intermediul site-ului Scientia.ro. Orice comentarii sau sugestii de îmbunătățire sunt binevenite și pot fi trimise pe adresa [admin@scientia.ro](mailto:admin@scientia.ro). Puteți utiliza conținutul de față în orice scop, respectând condițiile impuse de licența DSL, în principal, menționarea sursei originale.

*Atenție, pe tot parcursul cărții se va folosi notația reală de deplasare a electronilor prin circuit, și anume, dinspre borna negativă (-) spre borna pozitivă (+) !*

## CUPRINS

|          |                                                              |            |
|----------|--------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1</b> | <b>SISTEME DE NUMERAȚIE .....</b>                            | <b>1</b>   |
| 1.1      | NUMERE ȘI SIMBOLURI .....                                    | 1          |
| 1.2      | SISTEME DE NUMERAȚIE .....                                   | 2          |
| <b>2</b> | <b>ARITMETICĂ BINARĂ .....</b>                               | <b>6</b>   |
| 2.1      | VALORI ȘI SISTEME DE NUMERAȚIE.....                          | 6          |
| 2.2      | ADUNAREA BINARĂ .....                                        | 6          |
| 2.3      | NUMERE BINARE NEGATIVE .....                                 | 7          |
| 2.4      | SCĂDEREA BINARĂ .....                                        | 10         |
| 2.5      | DEPĂȘIREA BINARĂ.....                                        | 12         |
| 2.6      | GRUPĂRI DE BIȚI.....                                         | 15         |
| <b>3</b> | <b>PORTI LOGICE .....</b>                                    | <b>18</b>  |
| 3.1      | DEFINIȚIA UNEI PORTI LOGICE.....                             | 18         |
| 3.2      | PORTI LOGICE SIMPLE.....                                     | 20         |
| 3.3      | PORTI LOGICE CU DOUĂ INTRĂRI .....                           | 23         |
| 3.4      | PORTI LOGICE EXCLUSIVE .....                                 | 30         |
| 3.5      | PRINCIPIUL UNIVERSALITĂȚII .....                             | 33         |
| 3.6      | 6. MODUL DE ÎMPACHETARE .....                                | 38         |
| <b>4</b> | <b>COMUTATOARE.....</b>                                      | <b>40</b>  |
| 4.1      | TIPURI DE COMUTATOARE .....                                  | 40         |
| 4.2      | POZIȚIA „NORMALĂ” A CONTACTELOR.....                         | 47         |
| <b>5</b> | <b>RELEE ELECTROMECHANICE .....</b>                          | <b>52</b>  |
| 5.1      | 1. CONSTRUCȚIA RELEELOR .....                                | 52         |
| 5.2      | RELEE TEMPORIZATE.....                                       | 54         |
| 5.3      | RELEE SEMICONDUCTOARE .....                                  | 58         |
| <b>6</b> | <b>LOGICA LADDER.....</b>                                    | <b>61</b>  |
| 6.1      | DIAGrame LADDER .....                                        | 61         |
| 6.2      | FUNCȚII LOGICE DIGITALE .....                                | 65         |
| 6.3      | CIRCUITE PERMISIVE ȘI DE BLOCARE .....                       | 73         |
| 6.4      | CIRCUITE LOGICE CU AUTOPROTECȚIE .....                       | 76         |
| 6.5      | AUTOMATE PROGRAMABILE (PLC).....                             | 79         |
| <b>7</b> | <b>ALGEBRA BOOLEANĂ.....</b>                                 | <b>95</b>  |
| 7.1      | ARITMETICA BOOLEANĂ.....                                     | 95         |
| 7.2      | IDENTITĂȚI ALGEBRICE BOOLEENE.....                           | 99         |
| 7.3      | PROPRIETĂȚI ALGEBRICE BOOLEENE .....                         | 104        |
| 7.4      | REGULI DE SIMPLIFICARE BOOLEANĂ .....                        | 107        |
| 7.5      | SIMPLIFICAREA CIRCUITELOR LOGICE .....                       | 110        |
| 7.6      | FUNCȚIA SAU-EXCLUSIV.....                                    | 116        |
| 7.7      | TEOREMELE LUI DeMORGAN .....                                 | 117        |
| 7.8      | TRANSFORMAREA TABELELOR DE ADEVĂR ÎN EXPRESII BOOLEENE ..... | 124        |
| <b>8</b> | <b>HĂRȚI KARNAUGH.....</b>                                   | <b>135</b> |
| 8.1      | DE CE HĂRȚI KARNAUGH.....                                    | 135        |
| 8.2      | DIAGrame VENN .....                                          | 135        |
| 8.3      | RELAȚII BOOLEENE CU DIAGrame VENN.....                       | 138        |
| 8.4      | TRANSFORMAREA DIAGrameLOR VENN ÎN HĂRȚI KARNAUGH.....        | 142        |
| 8.5      | HĂRȚI KARNAUGH, TabeLE DE ADEVĂR ȘI EXPRESII BOOLEENE .....  | 146        |
| 8.6      | SIMPLIFICAREA CIRCUITELOR LOGICE CU HĂRȚI KARNAUGH.....      | 153        |

|      |                                                             |     |
|------|-------------------------------------------------------------|-----|
| 8.7  | HĂRȚI KARNAUGH CU PATRU VARIABLE .....                      | 160 |
| 8.8  | MINTERMENI ȘI MAXTERMENI .....                              | 166 |
| 8.9  | EXEMPLU DE IMPLEMENTARE PRACTICĂ A CIRCUITELOR LOGICE ..... | 173 |
| 8.10 | NOTAȚIA $\Sigma$ (SUMĂ) ȘI NOTAȚIA $\Pi$ (PRODUS) .....     | 181 |
| 8.11 | HĂRȚI KARNAUGH DE 5 ȘI 6 VARIABLE .....                     | 183 |

# 1 Sisteme de numerație

## 1.1 Numere și simboluri

- Cantitățile fizice pot fi exprimate sub două forme principale: analogică sau digitală

### 1.1.1 Reprezentarea valorilor

Exprimarea cantităților sub formă numerică ni se pare un lucru natural. Această situație este atât în avantajul cât și în dezavantajul nostru atunci când studiem electronica. Pe de o parte, suntem obișnuiți să facem calcule atunci când analizăm circuitele electrice sau electronice, iar acesta este un lucru bun. Pe de altă parte, sistemul de notație utilizat zi de zi, încă din școala primară, nu este sistemul intern folosit și de echipamentele electronice moderne. Adoptarea unui nou sistem de notație și o re-examinare a ideilor și conceptelor deja învățate nu este tocmai un lucru peste care să putem trece cu ușurință.

În primul rând, trebuie să facem o diferențiere între numere și simbolurile utilizate pentru reprezentarea acestor numere. Un număr este o cantitate matematică, corelată de obicei în cazul electronicii cu o cantitate fizică precum tensiune, curent sau rezistență. Există o multitudine de tipuri de numere. De exemplu: numere naturale (1, 2, 3, ...), numere întregi (... , -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, ...), numere iraționale ( $\pi$  - aproximativ 3,1415927,  $e$  - aproximativ 2,718281828), rădăcina pătrată a oricărui număr prim, etc.), numere reale (toate valorile numerice unidimensionale, negative și pozitive, incluzând zero, numerele naturale, întregi și iraționale) și complexe ( $3 - j4$ ,  $34 \angle 20^\circ$ ).

În funcție de aplicația practică în cauză, se utilizează diferite tipuri de numere. Numerele naturale sunt perfecte și suficiente pentru „inventarierea” obiectelor discrete, precum numărul de rezistori dintr-un circuit. Numerele întregi sunt necesare atunci când avem nevoie și de echivalentul negativ al celor naturale. Numerele iraționale reprezintă acele numere ce nu pot fi exprimate exact ca și raport dintre două numere întregi; raportul dintre circumferința unui cerc și diametrul acestuia ( $\pi$ ) este un astfel de număr irațional. Valorile pentru tensiune, curent și rezistență ce le-am întâlnit în analiza circuitelor electrice de curent continuu pot fi exprimate sub forma numerelor reale, atât sub formă de fracții cât și sub formă decimală. Pentru analiza circuitelor de curent alternativ însă, numerele reale nu pot exprima esența duală a amplitudinii și a unghiului de fază, astfel încât am fost nevoiți să utilizăm numerele complexe, fie sub forma rectangulară, fie sub formă polară.

### 1.1.2 Forma analogică și forma digitală

În cazul în care utilizăm numere pentru înțelegerea proceselor fizice din lumea reală, realizarea predicțiilor științifice sau pentru calcule economice, avem nevoie de o simbolică aparte. Aceste notații pot fi sub două forme: analogică sau digitală. În cazul reprezentării analogice, cantitatea simbolizată este divizibilă la infinit. În cazul reprezentării digitale, cantitatea simbolizată prezintă o diviziune discretă.

De exemplu, un termometru „clasic” precum cel de jos, reprezintă un aparat de măsură analogic. Practic putem măsura orice temperatură din intervalul 0-50°C, rezoluția termometrului fiind practic infinită. De exemplu, putem spune că temperatura măsurată în acest caz este de 35°C, dar, dacă avem ochi buni, putem fi mai preciși și spune că ea este de fapt 35,7°C. Sau, dacă avem ochi foarte buni, sau un mijloc mult mai precis de citire a scalei, s-ar putea să vedem că temperatura reală este de fapt 35,72545°C.



Fig. 1-1 termometru analogic

Acest lucru nu este valabil și în cazul unui termometru digital. De exemplu, termometrul de mai jos nu poate măsura temperatura cu o precizie mai mare de 0,1°C. Astfel că putem citi o temperatură fie de 33,0°C, fie o temperatură de 33,1°C, dar în niciun caz nu putem citi o valoare între aceste două puncte (de exemplu, 33,0125°C), așa cum am fi putut face cu un termometru analogic.



Fig. 1-2 termometru digital

## 1.2 Sisteme de numerație

### 1.2.1 Sistemul de numerație roman

Romanii au pus la punct un sistem de numerație pe bază de simboluri (cifre) pentru reprezentarea cantităților, astfel:

$$X = 10; L = 50; C = 100; D = 500; M = 1000$$

Dacă o cifră este urmată de o altă cifră a cărei valoare este egală sau mai mică decât prima, niciuna dintre cifre nefiind mai mare decât cele din stânga sa, valoarea acestei cifre se adaugă la valoarea totală. Astfel, VIII reprezintă valoarea 8, iar CLVII reprezintă 157. Pe de altă parte, dacă o cifră este precedată la stânga sa de o altă cifră a cărei valoare este mai mică decât prima, valoarea primei se scade din a doua. Prin urmare, IV = 4 (V minus I), iar CM = 900 (M minus C). De exemplu, anul 1987 poate fi reprezentat în notația romană astfel: MCMLXXXVII. O analiză a acestei notații este bine-venită:

$$M(1000) + CM(900) + L(50) + XXX(30) + V(5) + II(2) = 1987$$

Numerele mari sunt dificil de reprezentat prin intermediul acestei notații. Adunarea și scăderea cifrelor ne poate și ea da bătăi de cap. O altă problemă majoră a acestui sistem este imposibilitatea reprezentării numerelor negative sau a valorii nule (zero), ambele fiind concepte foarte importante în matematică.

### 1.2.2 Sistemul de numerație zecimal

Una dintre cele mai importante idei ale sistemului zecimal de numerație se datorează babilonienilor. Aceștia au fost aparent prima civilizație ce s-a folosit de poziția cifrei pentru reprezentarea numerelor mari (sistem de numerație pozițional). În loc să inventeze cifre noi pentru reprezentarea cantităților mari, precum romanii (sistem de numerație ne-pozițional), aceștia au refolosit aceleași cifre, dar plasate în poziții diferite de la dreapta spre stânga. Sistemul zecimal actual utilizează acest concept, folosind doar 10 cifre (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 și 9) pentru reprezentarea valorilor în funcție de poziția acestora. Fiecare cifră reprezintă o valoare întreagă, iar fiecare poziție de la dreapta spre stângă reprezintă o constantă de multiplicare pentru fiecare dintre aceste valori întregi. De exemplu, notația zecimală „1206”, poate fi desfăcută în următorul produs:

$$1206 = 1000 + 200 + 6$$

$$1206 = (1 \cdot 1000) + (2 \cdot 100) + (0 \cdot 10) + (6 \cdot 1)$$



Fiecare simbol poartă numele de cifră, iar fiecare poziție este de zece ori mai mare decât poziția imediat următoare (din dreapta). Astfel că, în cazul de mai sus, avem poziția sau cifra unităților (6), cifra zecilor (0), cifra sutelor (2) și cifra miilor (1), de la dreapta spre stânga.

### 1.2.3 Sistemul de numerație binar

Ce s-ar întâmpla dacă am realiza un sistem de numerație cu aceleași principii de bază precum sistemul zecimal, dar cu mai puține sau mai multe cifre?

Sistemul binar este un astfel de sistem „modificat” ce utilizează doar două cifre, constanta de multiplicare a fiecărei cifre fiind în acest caz de două ori mai mare decât a cifrei precedente (de la dreapta la stânga). Cele două cifre sunt „0” și „1”. Poziția din dreapta este poziția unităților, la fel ca în cazul notației zecimale. Spre stânga, constantele de multiplicare sunt după cum urmează: 2, 4, 8, 16, etc. De exemplu, următorul număr binar poate fi exprimat, la fel ca și numărul zecimal 1206, ca și sumă dintre produsul fiecărei cifre cu, constanta de multiplicare (în funcție de poziție):

$$11010 = 2 + 8 + 16 = 26$$

$$11010 = (1 \cdot 16) + (1 \cdot 8) + (0 \cdot 4) + (1 \cdot 2) + (0 \cdot 1)$$

### 1.2.4 Specificarea bazei

Mai sus, am scris un număr sub formă binară (11010) și l-am transformat în formă zecimală ( $16 + 8 + 2 = 26$ ). Prin urmare, am amestecat două notații diferite în același loc. Pentru a nu crea confuzii, va trebui să explicităm tipul notației folosite. Acest lucru se realizează prin specificarea bazei numărului respectiv prin folosirea indicilor, 2 pentru notația binară, și 10 pentru cea zecimală, astfel:  $11010_2$  (baza doi) și  $26_{10}$  (baza zece).

Acești indicii nu sunt operatori matematici, precum exponenții (puteri). Tot ceea ce fac este să indice tipul de sistem de numerație utilizat pentru reprezentarea numărului respectiv. De obicei, atunci când nu este specificată nicio bază, se presupune că se lucrează în baza zece ( $_{10}$ ).

De remarcat că, în cazul notației binare, fiecare poziție poartă numele de bit

### 1.2.5 Scopul sistemului binar de numerație

De ce am vrea să folosim acest sistem de numerație binar? Sistemul decimal, cu cele zece cifre ale sale, este intuitiv și ușor de înțeles. Sistemul binar este folosit în principal de electronica digitală (utilizată de calculatoare, de exemplu), datorită ușurinței de reprezentare electronică a celor două stări (0 și 1). Cu un circuit relativ simplu, putem efectua operații matematice asupra numerelor binare reprezentând fiecare bit printr-un circuit

care este fie pornit (curent) fie oprit (curent zero). La fel ca și în cazul unui abac, putem adăuga mai multe circuite pentru a reprezenta numere din ce în ce mai mari. Acest sistem este ideal pentru stocarea și redarea informației sub format numeric: benzi magnetice, CD-uri, hard-disk-uri, etc.

## 2 Aritmetică binară

### 2.1 Valori și sisteme de numerație

#### 2.1.1 Invariabilitatea valorilor

Este foarte important să înțelegem că sistemul de numerație ales pentru reprezentarea valorilor (numerelor) nu are absolut niciun impact asupra rezultatului aplicării operațiilor aritmetice de adunare, scădere, înmulțire, împărțire, rădăcini, puteri sau algoritmi. O valoare este tot timpul aceeași, indiferent de modul în care alegem să o simbolizăm. Fie că reprezentăm temperatura de  $35^{\circ}$  sub această formă (zecimală) sau sub forma 100011 (binară), aceasta nu schimbă valoarea reală a temperaturii ce o resimțim. Ea rămâne aceeași, ceea ce se modifică este modul de reprezentare a acesteia. Operațiile esențiale și legăturile matematice nu sunt afectate de modificarea sistemului de numerație pentru reprezentarea valorilor. Această distincție între valori și sisteme de numerație este foarte importantă și trebuie înțeleasă.

Această distincție esențială dintre cei doi termeni este asemănătoare distincției dintre cuvinte și obiectele asociate acestor cuvinte. O casă este tot o casă, indiferent de limba pe care o folosim pentru desemnarea acesteia (română, engleză, germană, etc.). Obiectul este ceva real, palpabil, pe când cuvântul este doar un simbol pentru reprezentarea acelui obiect.

Acestea fiind spuse, o simplă operație de aritmetică sub formă binară, precum adunarea, pare ciudată pentru o persoană obișnuită să lucreze doar cu sistemul de numerație zecimal. În acest capitol vom analiza tehnicile folosite pentru efectuarea operațiilor aritmetice simple cu numere binare. Aceste tehnici vor fi folosite pentru proiectarea circuitelor electronice care să realizeze exact același lucru. Chiar dacă suntem obișnuiți cu operațiile de adunare și scădere folosind un calculator de mână, calculatorul folosește numerele binare pentru obținerea rezultatului final.

### 2.2 Adunarea binară

Adunarea numerelor binare este relativ simplă, foarte asemănătoare cu adunarea numerelor zecimale. Adunarea se realizează adunând pe coloane fiecare bit, pe rând, de la dreapta la stânga, la fel ca în cazul adunării zecimale. Spre deosebire de aceasta însă, există puține reguli de memorat:

|  |   |   |   |   |   |       |
|--|---|---|---|---|---|-------|
|  |   |   |   |   |   |       |
|  |   |   | 0 | + | 0 | = 0   |
|  |   |   | 0 | + | 1 | = 1   |
|  |   |   | 1 | + | 0 | = 1   |
|  |   |   | 1 | + | 1 | = 1   |
|  | 1 | + | 1 | + | 1 | = 1 1 |
|  |   |   |   |   |   |       |

Când rezultatul adunării pe coloane este format din doi biți (de ex,  $1 + 1 = 10$ ), bitul din dreapta (0, în acest caz) se scrie iar cel din stânga se trece mai departe (1, în acest caz):

[illegible]

Adunarea din stânga nu a dat niciunde doi biți, pe fiecare coloană suma fiind fie 1, fie 0. În celelalte două adunări, există sume care dau fie 10 fie 11, iar în acest caz bitul din stânga (0 sau 1) se trece mai departe la următoarea adunare.

După cum vom vedea mai târziu, se pot construi circuite electronice care să realizeze exact această operație aritmetică de adunare, prin reprezentarea fiecărui bit a fiecărui număr prin intermediul unui semnal de tensiune. Acest principiu reprezintă baza efectuării tuturor operațiilor aritmetice realizate de calculatoarele moderne.

### 2.3 Numere binare negative

### 2.3.1 Operația de scădere prin adunare

Operația de scădere se poate realiza asemănător cu cea de adunare prin considerarea unuiu dintre numere ca fiind negativ. De exemplu, operația de scădere „7 - 5” este aceeași cu cea de adunare „7 + (-5)”, adică, adunarea unui număr pozitiv cu un număr negativ. Din moment ce știm deja cum se realizează reprezentarea numerelor pozitive sub formă binară, tot ceea ce trebuie să facem este să reprezentăm și numerele negative sub formă binară. De aici va rezulta direct operația de scădere.

Un număr zecimal negativ se reprezintă de obicei prin introducerea semnului minus(-) la stânga, la fel ca în exemplul de sus (-5). Totuși, scopul notației binare este realizarea circuitelor tip pornit/oprit pentru reprezentarea valorilor sub forma căderilor de tensiune (două valori alternative: „înaltă” și „joasă”). În această situație, nu ne putem permite să introducem un al treilea simbol, precum semnul minus, din moment ce aceste circuite au doar două stări posibile, pornit sau oprit.

### 2.3.2 Bit-ul de semn

O soluție o reprezintă utilizarea unui bit (circuit) doar pentru reprezentarea acestui semn matematic și pentru nimic altceva:

$$101_2 = 5_{10} \text{ (pozitiv)}$$

Utilizând un bit adițional (0 = pozitiv, 1 = negativ):

$$0101_2 = 5_{10} \text{ (pozitiv)}$$

$$1101_2 = -5_{10} \text{ (pozitiv)}$$

Dar, în această situație în care folosim biți pentru alt scop decât pentru reprezentarea valorilor, trebuie să fim foarte atenți, altfel, riscăm ca numărul  $1101_2$  să fie interpretat ca fiind  $13_{10}$  în loc de  $-5_{10}$ . Pentru a nu crea astfel de confuzii, trebuie să ne decidem în primul rând de câți biți avem nevoie pentru a reprezenta cel mai mare număr posibil cu care vom lucra în aplicația noastră. Ne putem apoi asigura că nu vom depăși această lungime (în biți) atunci când aplicăm operațiile aritmetice. În exemplul de mai sus, limita inferioară este -7 ( $1111_2$ ) iar cea superioară 7 ( $0111_2$ ), deoarece al patrulea bit este folosit pe post de semn. Doar prin stabilirea acestor numere putem fi siguri că nu vom amesteca un număr negativ cu un număr pozitiv, mai mare.

Pe cât de simplă pare această abordare, ea nu este foarte practică din punct de vedere al aritmeticii. De exemplu, cum efectuăm adunarea unui număr negativ ( $1101_2$ ) cu un oricare alt număr, folosind tehnica standard al adunării binare? Ar trebui să inventăm o nouă metodă de realizare a adunării pentru ca această tehnică să fie practică. Dar, dacă realizăm acest lucru, nu vom mai avea avantajul utilizării numerelor negative pentru realizarea scăderii prin adunare obișnuită.

### 2.3.3 Reprezentarea în complement față de doi

Din fericire, există o altă metodă pentru reprezentarea numerelor negative ce este compatibilă cu operația de adunare obișnuită, și anume, complementarea. Cu această strategie, bit-ul din stânga primește un statut special, asemenea bit-ului de semn din exemplul precedent. Totuși, de această dată, bit-ul din stânga nu este doar un bit de semn, ci posedă și o valoare. De exemplu, -5 este reprezentat astfel:

$$1011_2 = -5_{10}(1 \cdot -8_{10}) + (0 \cdot 4_{10}) + (1 \cdot 2_{10}) + (1 \cdot 1_{10}) = -5_{10}$$

Utilizând cei trei biți din dreapta pentru reprezentarea valorilor de la zero la șapte, bit-ul din stânga reprezentând fie zero fie -8, putem reprezenta orice număr întreg de la -7 ( $1001_2 = -8_{10} + 1_{10} = -7_{10}$ ) la +7 ( $01112 = 010 + 710 = 710$ ).

Reprezentarea numerelor pozitive utilizând această notație nu este diferită față de notația normală (bit-ul din stânga va fi tot timpul zero). Totuși, reprezentarea numerelor negative nu este chiar așa de intuitivă.

|     |   |   |   |   |  |      |   |   |   |   |  |
|-----|---|---|---|---|--|------|---|---|---|---|--|
| 0 = | 0 | 0 | 0 | 0 |  |      |   |   |   |   |  |
| 1 = | 0 | 0 | 0 | 1 |  | -1 = | 1 | 1 | 1 | 1 |  |
| 2 = | 0 | 0 | 1 | 0 |  | -2 = | 1 | 1 | 1 | 0 |  |
| 3 = | 0 | 0 | 1 | 1 |  | -3 = | 1 | 1 | 0 | 1 |  |
| 4 = | 0 | 1 | 0 | 0 |  | -4 = | 1 | 1 | 0 | 0 |  |
| 5 = | 0 | 1 | 0 | 1 |  | -5 = | 1 | 0 | 1 | 1 |  |
| 6 = | 0 | 1 | 1 | 0 |  | -6 = | 1 | 0 | 1 | 0 |  |
| 7 = | 0 | 1 | 1 | 1 |  | -7 = | 1 | 0 | 0 | 1 |  |
|     |   |   |   |   |  | -8 = | 1 | 0 | 0 | 0 |  |

Observăm că numerele binare negative din coloana dreaptă, fiind suma celor trei biți din dreapta plus bitul negativ din dreapta, egal cu minus opt, nu se „numără” în aceiași ordine precum numerele binare pozitive din coloana stângă. În schimb, cei trei biți trebuie aduși la forma necesară, astfel încât, după adunarea cu minus opt să se obțină rezultatul negativ dorit.

Spunem că cei trei biți din dreapta sunt o reprezentare în complement față de doi al numărului pozitiv corespunzător. Să facem o comparație:

| număr pozitiv |   |   | complementul față de doi |   |   |
|---------------|---|---|--------------------------|---|---|
| 0             | 0 | 1 | 1                        | 1 | 1 |
| 0             | 1 | 0 | 1                        | 1 | 0 |
| 0             | 1 | 1 | 1                        | 0 | 1 |
| 1             | 0 | 0 | 1                        | 0 | 0 |
| 1             | 0 | 1 | 0                        | 1 | 1 |
| 1             | 1 | 0 | 0                        | 1 | 0 |
| 1             | 1 | 1 | 0                        | 0 | 1 |

### 2.3.4 Obținerea numărului în complement față de doi

În acest caz (bit-ul al patrulea are valoarea de minus opt), reprezentarea în complement față de doi a oricărui număr pozitiv este valoarea necesară însumării cu minus opt pentru a rezulta aceeași valoare, dar cu semn schimbat. Din fericire, există o cale ușoară de calcul al complementului, pentru oricare număr binar: inversăm toți biții aceluși număr, schimbând 1 cu 0 și invers. Ajungem astfel la reprezentarea în complement față de unu a numărului. Pentru soluția dorită de noi, mai trebuie să adăugăm un unu.

De exemplu, pentru obținerea complementului lui cinci ( $101_2$ ), inversăm toți biții și obținem  $010_2$  (complement față de unu), apoi adăugăm un unu și obținem  $011_2$ , sau  $-5_{10}$  în complement față de doi.

Este interesant de menționat faptul că, obținerea complementului față de doi a unui număr binar funcționează la fel de bine și dacă aplicăm inversarea tuturor biților, inclusiv bit-ului din stânga. Să luăm exemplul precedent, inversarea lui 5 în  $-5$ , dar aplicând operația de inversare tuturor biților. Trebuie să includem însă și bit-ul din stânga numărului inițial ( $0101_2$ ). După inversarea tuturor biților, obținem complementul față de unu ( $1010_2$ ). Apoi, adăugăm un unu pentru obținerea răspunsului final:  $1011_2$ , sau  $-5_{10}$  în complement față de doi, exprimat cu patru biți.

## 2.4 Scăderea binară

- Scăderea numerelor binare se realizează prin adunarea binară a unui număr pozitiv și a unui număr negativ

### 2.4.1 Numere negative sub formă binară

Putem realiza operația de scădere binară utilizând aceleași metode standard împrumutate de la scăderea zecimală. Totuși, dacă putem utiliza metoda deja cunoscută (și mai ușoară) a adunării binare pentru efectuarea

scăderii, ne va fi mai ușor. După cum am văzut, putem reprezenta numerele binare negative utilizând reprezentarea în complement față de doi plus un bit adițional cu o valoare negativă. Să considerăm un exemplu:

$$7_{10} - 5_{10} \text{ (scădere)}$$

$$7_{10} + (-5_{10}) \text{ (adunare echivalentă)}$$

Tot ce trebuie să facem este să reprezentăm numărul 7 și -5 sub formă binară:

$$0111_2 = 7$$

$$1011_2 = -5$$

Nu ne mai rămâne decât să efectuăm adunarea binară:

|  |  |   |   |   |   |   |   |
|--|--|---|---|---|---|---|---|
|  |  |   |   |   |   |   |   |
|  |  |   | 1 | 1 | 1 | 1 |   |
|  |  |   | 0 | 1 | 1 | 1 |   |
|  |  | + | 1 | 0 | 1 | 1 |   |
|  |  |   | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
|  |  |   |   |   |   |   |   |

Prin urmare, răspunsul căutat este:

$$0010_2 = 2_{10}$$

Din moment ce am definit numărul nostru ca fiind compus din trei biți plus bitul cu valoare negativă, putem ignora al cincilea bit din răspuns (1), iar rezultatul final este  $0010_2$ , sau +2, ceea ce reprezintă răspunsul corect.

## 2.4.2 Înlăturarea bit-ului suplimentar

O altă modalitate de a înțelege de ce înlăturăm al cincilea bit, este să ținem minte că bit-ul din stânga are o valoare negativă, egală cu minus opt în cazul de față. Atunci când adunăm aceste două numere binare, realizăm de fapt o scădere a biților. În cazul operației de scădere, cifrele nu sunt „duse” mai departe spre următoarea operație, ci sunt împrumutate.

## 2.4.3 Alte exemple

Să considerăm un alt exemplu, cu numere mai mari de data aceasta. Dacă vrem să adunăm  $-25_{10}$  cu  $18_{10}$ , trebuie să stabilim în primul rând numărul de biți pe care numărul nostru îl va conține în reprezentarea binară.



Pentru a putea reprezenta cea mai mare valoare absolută posibilă în acest caz, 25, avem nevoie de cel puțin cinci biți, plus un al șaselea bit pentru valoarea negativă. Să începem prin a reprezenta numărul 25 sub formă binară, și apoi sub forma complementului față de doi:

$$+25_{10} = 011001_2 \text{ (toți cei șase biți)}$$

$$11001_2 = 100110_2 \text{ (complementul față de unu)}$$

$$\text{complementul față de unu} + 1 = \text{complementul față de doi} = 100111_2$$

$$-25_{10} = 100111_2 \text{ (forma finală)}$$

Mai exact, -25 sub formă binară este de fapt suma dintre bit-ul negativ de pe poziția a șasea cu valoarea de -32 și ceilalți cinci biți ( $00111_2 = 7_{10}$ ).

Să reprezentăm acum și numărul 17 sub formă binară, folosind toți cei șase biți:

$$18_{10} = 010010_2$$

Adunarea lor ne conduce la următorul rezultat:

|  |   |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|---|
|  |   |   |   |   |   |   |   |
|  |   |   |   | 1 | 1 |   |   |
|  |   | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
|  | + | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
|  |   | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

În acest caz nu avem un „surplus” de biți după adunare, prin urmare, nu trebuie să „scăpăm” de niciunul din ei. Bitul din stânga este 1, ceea ce înseamnă că răspunsul, în complement față de doi, este negativ (ceea ce este corect). Pentru verificare, putem realiza conversia înapoi în forma zecimală prin însumarea produsului tuturor biților cu valorile lor respective, astfel:

$$(1 \cdot -32_{10}) + (1 \cdot 16_{10}) + (1 \cdot 8) + (1 \cdot 1_{10}) = -7_{10}$$

Răspunsul obținut este corect:

$$18_{10} - 25_{10} = -7_{10}$$

## 2.5 Depășirea binară

### 2.5.1 Depășirea valorii maxime

Una din problemele numerelor binare cu semn, este bit-ului de depășire. Acesta apare în cazul în care rezultatul adunării sau scăderii efectuate între două numere binare este mai mare decât valoarea maximă ce poate fi reprezentată cu numărul de biți alocați. Țineți minte că poziția bit-ului de semn este fixată la începutul problemei. În exemplul precedent, am utilizat cinci biți pentru reprezentarea unui număr, iar bit-ul din stânga a fost utilizat pe post de bit de semn, cu pondere negativă. Cu cinci biți rămași pentru reprezentarea valorilor, cel mai mare număr ce-l putem scrie astfel este  $+31_{10}(011111_2)$ , iar cel mai mic  $-32_{10}(100000_2)$ . Dacă aplicăm o operație de adunare unor astfel de numere, iar rezultatul este mai mare decât  $31_{10}$  sau mai mic decât  $-32_{10}$ , răspunsul obținut nu va fi corect.

### 2.5.2 Adunarea a două numere binare

Să luăm un exemplu:

$$17_{10} = 10001_2$$

$$19_{10} = 10011_2$$

Adăugând bit-ul de semn, adunarea celor două numere arată astfel:

|  |  |  |   |   |   |   |   |   |   |
|--|--|--|---|---|---|---|---|---|---|
|  |  |  |   |   |   |   |   |   |   |
|  |  |  |   |   |   |   |   |   |   |
|  |  |  | 1 |   |   | 1 | 1 |   |   |
|  |  |  | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |   |
|  |  |  | + | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
|  |  |  |   | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
|  |  |  |   |   |   |   |   |   |   |

Răspunsul ( $100100_2$ ) este egal cu  $-28_{10}$ , nu cu  $+36_{10}$ , așa cum ar trebui să obținem adunând  $+17_{10}$  cu  $+19_{10}$ . Evident, acest răspuns nu este corect. Dar unde am greșit? Din moment ce valoarea reală a sumei ( $36_{10}$ ) depășește limita permisă de cei cinci biți (plus bit-ul de semn), ajungem la o eroare de depășire binară.

### 2.5.3 Scăderea a două numere binare

O eroare similară obținem și în cazul adunării a două numere negative (scădere binară) a cărei sumă este mai mică decât  $-32_{10}$ :

$$-17_{10} = 101111_2$$



Cea mai elegantă metodă de rezolvare a acestei situații constă în verificarea „semnului” sumei și compararea acestuia cu semnele numerelor însumate. Desigur, rezultatul sumei a două numere pozitive este un număr pozitiv, iar suma a două numere negative, este un număr negativ. Putem observa că, de fiecare dată când avem o situație de depășire, semnul sumei este invers față de semnul celor două numere adunate:  $+17_{10}$  plus  $+19_{10}$  ne-a dat  $-28_{10}$ , sau,  $-17_{10}$  plus  $-19_{10}$  ne-a dat  $+28_{10}$ . Prin simpla verificare a semnelor, putem să ne dăm seama că exista o eroare iar rezultatul este fals.

Ce se întâmplă în cazul în care unul din numere este pozitiv iar celălalt negativ? Care ar trebui să fie semnul sumei? Răspunsul este simplu: atunci când numerele însumate sunt de semne diferite, nu va exista niciodată o eroare de depășire. Motivul este la fel de simplu: depășirea are loc atunci când valoarea unui număr este mai mare decât cea permisă de numărul de biți utilizați. În cazul numerelor de semn contrar, valoarea rezultatului trebuie să fie între cele două numere, prin urmare, nu poate fi mai mare sau mai mică decât limita maximă permisă de numărul de biți.

Din fericire, această metodă de identificare a erorii de depășire este ușor de implementat într-un circuit electronic.

## 2.6 Grupări de biți

### 2.6.1 Numărul de biți necesar

La reprezentarea numerelor binare cu ajutorul circuitelor electronice, suntem nevoiți să utilizăm un număr suficient de circuite cu tranzistori pentru reprezentarea tuturor biților. Cu alte cuvinte, la proiectarea unui circuit digital, trebuie să ne decidem câți biți vom utiliza (maxim) pentru reprezentarea valorilor, din moment ce fiecare bit necesită un circuit pornit/oprit separat.

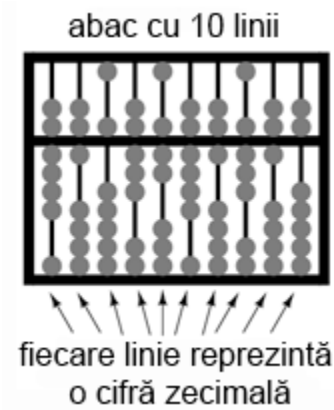


Fig. 2-1 abac

Acest principiu este analog proiectării unui abac pentru reprezentarea digitală a numerelor zecimale: trebuie mai întâi să ne decidem câte cifre dorim să reprezentăm cu acest dispozitiv primitiv. Fiecare cifră necesită o nouă linie de mărgele.

Un abac cu 10 linii poate reprezenta un număr zecimal cu 10 cifre, sau o valoare maximă de 9.999.999.999. Dacă am dori reprezentarea unui număr mai mare decât atât, va trebui să mai adăugăm una sau mai multe linii.

## 2.6.2 Numărul de biți

Orice circuit digital se proiectează pe un anumit număr de biți: numărul maxim de biți alocați pentru reprezentarea valorilor numerice. Calculatoarele digitale inițiale erau proiectate pe patru sau pe opt biți. Sistemele moderne sunt proiectate pe 32 sau pe 64 de biți.

Pentru a vorbi mai ușor de numărul de biți dintr-o grupare, cele mai uzuale au primit și un nume, astfel:

**Bit:** unitatea fundamentală a notației binare; echivalentă cu o cifră zecimală

**Crumb, Tydbit sau Tayste:** 2 biți

**Nibble sau Nybble:** 4 biți

**Nickle:** 5 biți

**Byte:** 8 biți

**Deckle:** 10 biți

**Playte:** 16 biți

**Dynner:** 32 biți

**Word:** (în funcție de sistem)

Cel mai ambiguu termen este word-ul. Pentru un sistem pe 32 de biți, un word înseamnă 32 de biți. Dacă sistemul utilizează 16 biți, atunci word-ul este de 16 biți. Termenul playte și dynner se referă tot timpul la 16, respectiv 32 de biți, indiferent de contextul în care sunt folosiți.

Tot în funcție de sistem sunt folosiți și termenii de „double word” sau „longword” (ambii termenii desemnând o lungime dublă față de lungimea standard), „half-word” (jumătatea lungimii) sau quad (de patru ori lungimea standard).

## 3 Porți logice

### 3.1 Definiția unei porți logice

- O poartă logică este un amplificator special proiectat pentru reprezentarea numerelor binare sub forma tensiunilor de nivel logic

#### 3.1.1 Principiul de bază al circuitelor digitale

Deși sistemul de numerație binar reprezintă un concept matematic abstract și interesant, încă nu am spus nimic despre aplicațiile practice în electronică. Acest capitol este dedicat prin urmare aplicării conceptelor binare circuitelor electronice. Importanța sistemului binar de numerație în electronica digitală este importantă datorită ușurinței cu care putem reprezenta biții sub formă fizică. Deoarece un bit poate avea doar două stări diferite, fie 0 fie 1, orice mediu fizic ce poate funcționa cu două stări saturate diferite, poate fi folosit pentru reprezentarea unui bit. În consecință, orice sistem fizic ce este capabil să reprezinte biți sub formă binară, poate reprezenta de asemenea și valori numerice. Prin urmare, are potențialul de a manipula aceste numere.

Circuitele electronice sunt perfecte pentru reprezentarea numerelor binare. Tranzistorii, atunci când funcționează la limită, se pot afla într-un din cele două stări: fie în stare blocată (curent de control zero), fie în stare de saturație (curent de control maxim). Dacă un circuit cu tranzistor este proiectat pentru maximizarea probabilității de funcționare într-una din cele două stări (evitarea funcționării tranzistorului în zona activă de funcționare), acesta poate fi folosit ca și reprezentare fizică a unui bit. Căderea de tensiune măsurată la ieșirea unui astfel de circuit poate fi folosită pentru reprezentarea unui singur bit. O tensiune joasă reprezentând „0”, și o tensiune (relativ) înaltă reprezentând „1”.

#### 3.1.2 Funcționarea tranzistorului în stare blocată/saturată

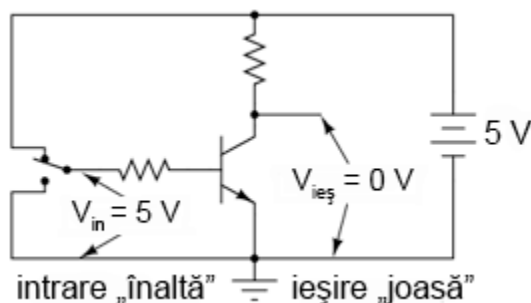


Fig. 3-3-1 tranzistor aflat în saturație

În figura de sus, tranzistorul este saturat datorită tensiunii de intrare de 5 V (prin intermediul comutatorului cu două poziții). Deoarece este saturat, căderea de tensiune dintre colector și emitor este foarte mică, rezultând o tensiune de ieșire de practic 0 V. Dacă am folosi acest circuit pentru reprezentarea numerelor binare, am spune că semnalul de intrare este „1” binar, iar semnalul de ieșire este „0” binar.

Orice tensiune apropiată de tensiunea de alimentare (având ca referință masa), este considerată a fi „1”, iar o lipsă de tensiune este considerată a fi „0”. Alternativ, se folosesc termenii de „înalt” (1 binar) sau jos (0 binar). Termenul general pentru reprezentarea unui bit prin intermediul unei tensiuni poartă numele de „nivel logic”.

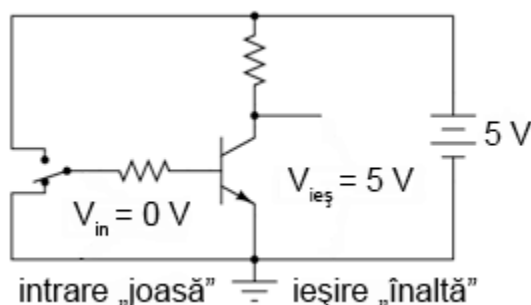


Fig. 3-3-2 tranzistor aflat în saturație

Trecând comutatorul pe cealaltă poziție, aplicăm o intrare de 0 binar și obținem la ieșire 1 binar.

### 3.1.3 Poarta logică

Ceea ce am creat mai sus poartă numele de poartă logică, sau simplu, poartă. O poartă nu este altceva decât un circuit amplificator special conceput pentru acceptarea și generarea semnalelor de tensiune. Aceste semnale corespund numerelor binare 0 și 1. Prin urmare, porțile nu sunt concepute pentru amplificarea semnalelor analogice (semnale de tensiune între 0 și tensiunea maximă). Mai multe porți conectate împreună se pot folosi pentru stocare



(circuite de memorare) sau manipulare (circuite de calcul). Ieșirea fiecărei porți reprezintă în acest caz un singur bit dintr-un număr binar compus din mai mulți biți.

## 3.2 Porți logice simple

### 3.2.1 Poarta inversoare (NU sau NOT)

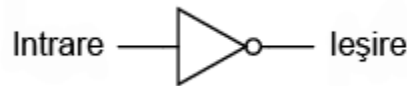


Fig. 3-3-3 - poartă inversoare (NU)

Mai sus este simbolul folosit pentru reprezentarea unei porți inversoare (NU). Aceasta se comportă identic cu circuitul analizat înainte, și anume: ieșirea porții este inversă față de intrare (intrare 0, ieșire 1 sau intrare 1, ieșire 0). Aceste porți sunt de fapt circuite cu tranzistoare de genul celui prezentat mai sus, dar, pentru simplificarea analizei circuitelor, se vor folosi aceste simboluri specifice fiecărei porți.

Un simbol alternativ pentru o poartă inversoare este următorul:



Fig. 3-3-4 poartă inversoare (simbol alternativ)

Forma triunghiulară este asemănătoare simbolului amplificatorului operațional. După cum am spus mai sus, porțile sunt de fapt amplificatoare. Metoda standard de reprezentare a unei funcții inversoare este prin intermediul aceluia mic cerc desenat pe terminalul de intrare sau de ieșire. Dacă îndepărtăm acest cerc din simbolul porții, lăsând doar triunghiul, acest simbol nu ar mai indica o inversare, ci o amplificare. Un astfel de simbol, și o astfel de poartă chiar există, și poartă numele de poarta ne-inversoare, sau buffer.

### 3.2.2 Poarta ne-inversoare (buffer)

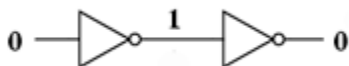


Fig. 3-3-5 inversare dublă (două porți inversoare conectate cap-coadă)

Dacă ar fi să conectăm două porți inversoare, una în continuarea celeilalte, cele două funcții de inversare s-ar „anula” reciproc. În acest caz, semnalul de ieșire va fi același cu cel de intrare.



Fig. 3-3-6 poartă ne-inversoare (buffer)

Pentru acest scop, există o poartă logică separată, denumită buffer (sau poartă ne-inversoare). Simbolul este un triunghi simplu, precum în figura alăturată.

### 3.2.3 Reprezentarea conexiunilor

Asemănător simbolului amplificatorului operațional, conexiunile de intrare și de ieșire sunt reprezentate printr-un singur fir, punctul de referință implicit pentru fiecare cădere de tensiune fiind masa. În circuitele logice, masa este aproape tot timpul reprezentată de conexiunea negativă a sursei de alimentare. Sursele de alimentare duale sunt rareori folosite în astfel de circuite. Datorită faptului că circuitele logice (cu porți) sunt de fapt niște amplificatoare, acestea necesită o sursă de putere pentru funcționare. La fel ca în cazul AO, conexiunile surselor de alimentare sunt omise pentru simplitate.

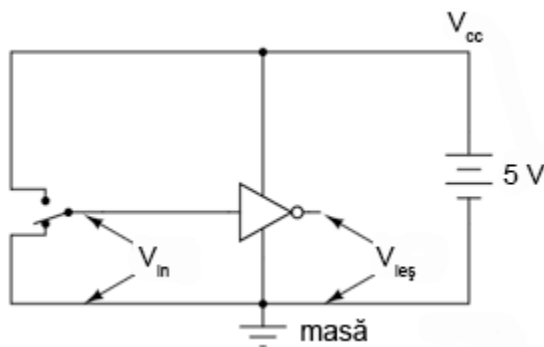


Fig. 3-7 poartă inversoare; circuit de alimentare complet

Dacă ar fi să reprezentăm toate conexiunile necesare pentru utilizarea acestei porți, circuitul ar arăta precum cel din figura de sus.

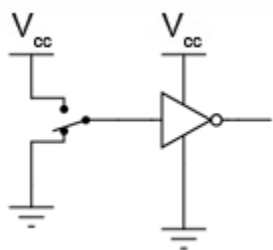


Fig. 3-8 poartă inversoare; circuit de alimentare complet

Conductorii surselor de alimentare sunt rareori reprezentați în circuitele electronice, chiar și atunci când sunt reprezentate conexiunile pe fiecare poartă. Astfel, eliminând liniile ce nu sunt necesare, obținem rezultatul de sus.

$V_{cc}$  reprezintă tensiunea constantă de alimentare a colectorului din circuitul cu tranzistor bipolar. Punctul de referință este, desigur, masa. Punctele marcate cu  $V_{cc}$  sunt toate conectate la același punct, iar acel punct este borna pozitivă a sursei de alimentare de curent continuu. Valoarea acesteia este de obicei de 5 V.

### 3.2.4 Tabelul de adevăr

O modalitate de exprimare a funcției unei porți logice, poartă numele de tabel de adevăr. Aceste tabele descriu toate combinațiile posibile ale intrărilor și rezultatul ieșirilor. Pentru poarta inversoare, sau NU, prezentată mai sus, tabelul de adevăr arată astfel:

| Intrare | Ieșire |
|---------|--------|
| 0       | 1      |
| 1       | 0      |

Pentru poarta ne-inversoare, tabelul de adevăr este puțin diferit:

| Intrare | Ieșire |
|---------|--------|
| 0       | 0      |
| 1       | 1      |

Pentru porți mai complexe, tabelele de adevăr sunt mai mari decât acesta. Numărul liniilor unui astfel de tabel trebuie să fie egal cu  $2^n$ , unde  $n$  reprezintă numărul intrărilor porții logice considerate.

### 3.3 Porți logice cu două intrări

- Poarta logică ȘI: ieșirea este 1 doar dacă ambele intrări sunt 1
- Poarta logică SAU: ieșirea este 1 dacă intrarea A sau intrarea B este 1

#### 3.3.1 Numărul de intrări

Având doar o intrare, singurele porți „disponibile” sunt cele inversoare și cele ne-inversoare. Pentru a lucra cu mai multe posibilități, trebuie să mărim numărul de intrări.

O poartă cu o singură intrare prezintă doar două posibilități: fie intrarea este „înaltă” (1), fie este „joasă” (0). În schimb, o poartă cu două intrări are patru posibilități (00, 01, 10, 11). O poartă cu trei intrări are opt combinații posibile (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 și 111). După cum am mai spus, numărul combinațiilor posibile este egal cu  $2^n$ , unde  $n$  este numărul de intrări.

Datorită faptului că există așa de multe posibilități folosind doar două terminale, există mai multe tipuri de porți logice cu două intrări. Vom prezenta mai jos fiecare tip.

#### 3.3.2 Poarta logică ȘI (AND)

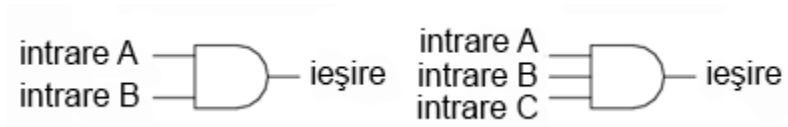


Fig. 3-9 poarta logică ȘI cu două respectiv trei intrări; simbol

Una dintre cele mai ușor de înțeles porți este poarta ȘI. Denumirea vine de la faptul că ieșirea porții va fi 1 dacă și numai dacă toate intrările sunt 1. Asemenea, ieșirea va fi 0, dacă și numai dacă toate intrările sunt 0. Alăturat este prezentat simbolul porții ȘI cu două, respectiv trei intrări. Tabelul de adevăr pentru poarta ȘI cu două intrări arată astfel:

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 0      |
| 1 | 0 | 0      |
| 1 | 1 | 1      |

Practic, ceea ce se înțelege din tabelul de adevăr de mai sus poate fi ilustrat în cele ce urmează. Poarta logică ȘI este supusă tuturor posibilităților de intrare. Pentru determinarea nivelului logic de ieșire, se folosește un LED:

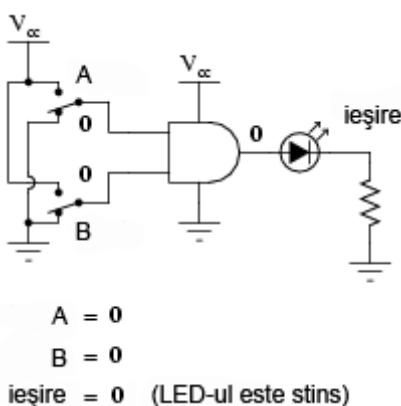


Fig. 3-10 exemplificarea tabelului de adevăr a porții logice ȘI printr-un circuit practic

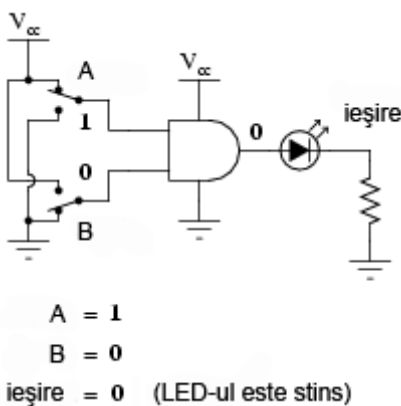


Fig. 3-11 exemplificarea tabelului de adevăr a porții logice ȘI printr-un circuit practic

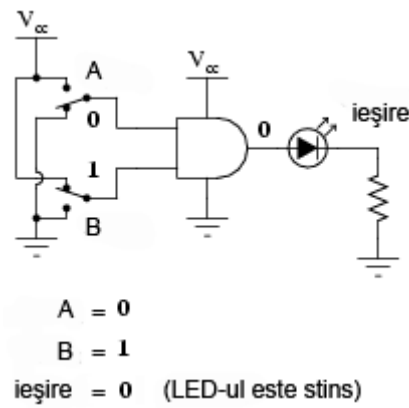


Fig. 3-12 exemplificarea tabelului de adevăr a porții logice ȘI printr-un circuit practic

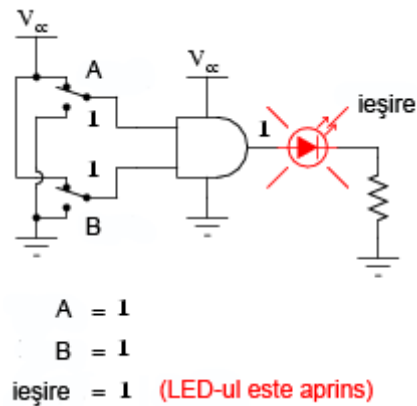


Fig. 3-13 exemplificarea tabelului de adevăr a porții logice ȘI printr-un circuit practic

LED-ul este alimentat cu energie electrică doar atunci când ambele intrări logice sunt 1.

### 3.3.3 Poarta logică ȘI-negat (NAND)



Fig. 3-14 circuitul echivalent al unei porți logice ȘI negat (NAND)

Poarta ȘI negat este o variație a porții ȘI. Practic, comportamentul porții este același cu al porții ȘI, doar că la ieșire este conectată o poartă NU (inversoare).

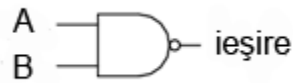


Fig. 3-15 poarta logică ȘI negat (NAND); simbol

Pentru simbolizarea acestui lucru se trece un mic cerculeț pe terminalul de ieșire.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 1      |
| 0 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 0      |

Tabelul de adevăr este exact invers față de cel prezentat anterior pentru poarta ȘI. După câte se poate observa, principiul este asemănător: ieșirea este 1 dacă toate intrările sunt 0 și invers.

### 3.3.4 Poarta logică SAU (OR)



Fig. 3-16 poarta logică SAU (OR); simbol

Ieșirea unei porți logice SAU este 1 dacă oricare dintre intrări este 1. Ieșirea este 0 doar dacă toate intrările sunt 0. Să vedem tabelul de adevăr:

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 1      |

Următoarele ilustrații redau modul de funcționare a porții SAU, atunci când cele două intrări formează toate combinațiile posibile. Indicația vizuală a ieșirii este furnizată de un LED:

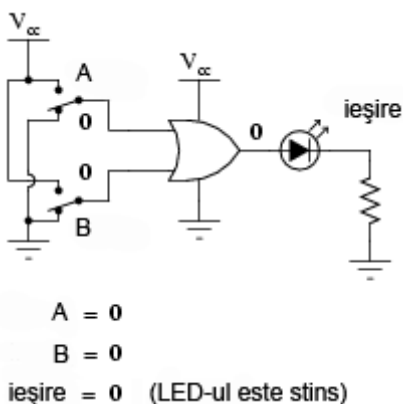


Fig. 3-17 exemplificarea tabelului de adevăr a porții logice SAU printr-un circuit practic

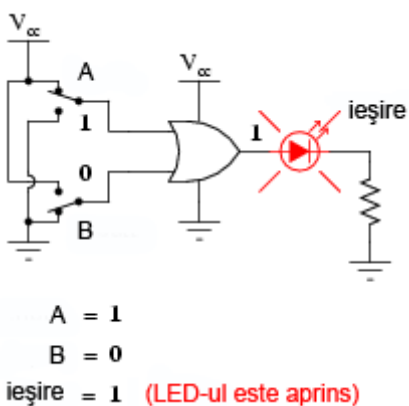


Fig. 3-18 exemplificarea tabelului de adevăr a porții logice SAU printr-un circuit practic

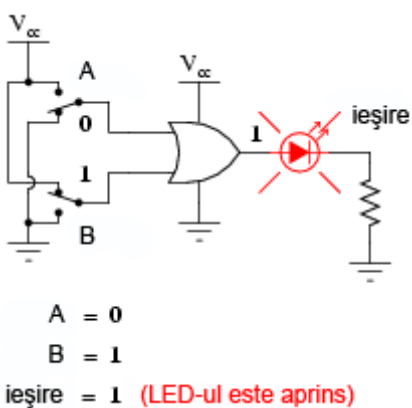


Fig. 3-19 exemplificarea tabelului de adevăr a porții logice SAU printr-un circuit practic



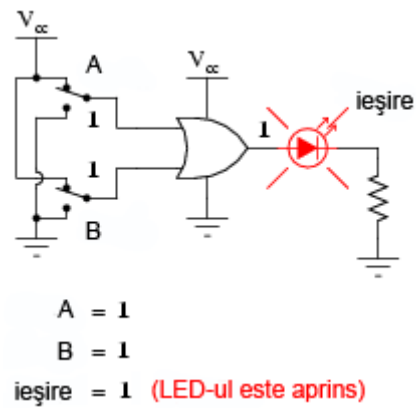


Fig. 3-20 exemplificarea tabelului de adevăr a porții logice SAU printr-un circuit practic

Dacă oricare dintre intrări se află în poziția 1, LED-ul va fi alimentat cu energie electrică.

### 3.3.5 Poarta logică SAU-negat (NOR)

După cum probabil v-ați dat seama, poarta SAU-negat este o partă SAU cu valoarea de ieșire negată (0 negat este 1, iar 1 negat este 0). Schema echivalentă arată astfel:

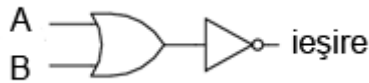


Fig. 3-21 schema echivalentă a unei porți SAU-negat (NOR)

Pentru simplificarea reprezentării însă, există desigur un simbol special:

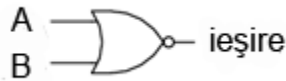


Fig. 3-22 simbolul unei porți SAU negate (NOR)

Tabelul de adevăr este exact invers față de cel al porții SAU.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 1      |
| 0 | 1 | 0      |
| 1 | 0 | 0      |
| 1 | 1 | 0      |

Principiul de bază este următorul: ieșirea este zero dacă cel puțin una dintre intrări este 1 și este 1 doar atunci când ambele intrări sunt 0.

### 3.3.6 Poarta logică ȘI negativă

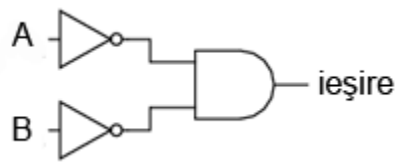


Fig. 3-23 schema echivalentă a unei porți logice ȘI negative

O poartă logică ȘI negativă funcționează la fel ca o poartă ȘI având toate intrările inversate (conectate la porți NU).



Fig. 3-24 simbolul unei porți logice ȘI negative

Conform standardului de notare, aceste intrări sunt simbolizate cu ajutorul unor cerceulețe.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 1      |
| 0 | 1 | 0      |
| 1 | 0 | 0      |
| 1 | 1 | 0      |

Contrar intuiției, comportamentul logic al unei porți ȘI negative nu este același cu al unei porți ȘI-negat. De fapt, tabelul său de adevăr este identic cu al unei porți logic SAU-negat.

### 3.3.7 Poarta logică SAU negativă

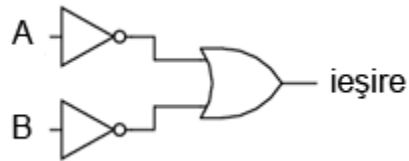


Fig. 3-25 schema echivalentă a unei porți logice SAU negative

Conform aceluiași principiu, o poartă logică SAU negativă se comportă asemenea unei porți SAU cu toate intrările inversate.

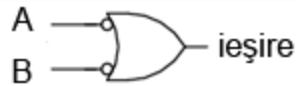


Fig. 3-26 simbolul unei porți logice SAU negative

Conform standardului de notare, aceste intrări inversate sunt simbolizate prin ceruțele.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 1      |
| 0 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 0      |

Comportamentul logic și tabelul de adevăr este exact același cu al unei porți logice ȘI-negat.

### 3.4 Porți logice exclusive

- Ieșirea unei porți SAU-exclusiv este 1 dacă intrările sunt diferite
- Ieșirea unei porți ȘI-negat-exclusiv este 1 dacă toate intrările sunt identice

#### 3.4.1 Poarta logică SAU-exclusiv (XOR)



Fig. 3-27 simbolul unei porți logice SAU-exclusiv

Ultimele șase variante de porți logice au fost variații directe ale celor trei funcții de bază: ȘI, SAU și NU. Poarta SAU-exclusiv este însă diferită.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 0      |

Ieșirea este 1 doar dacă intrările se află la nivele logice diferite, fie 0 și 1, fie 1 și 0. Altfel, ieșirea este 0 dacă toate intrările se află la același nivel logic.

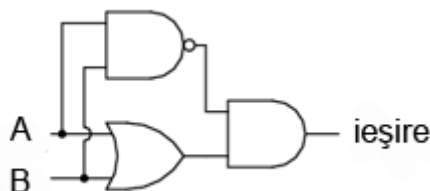


Fig. 3-28 schema echivalentă a unei porți logice SAU-exclusiv formată din porți ȘI, SAU și NU

Circuitele echivalente pentru o poartă SAU-exclusiv sunt formate din porți ȘI, SAU și NU. O metodă directă de simularea a unei porți SAU-exclusiv este constă în introducerea în circuit pentru început a unei porți SAU. Apoi adăugăm porți astfel încât să împiedicăm o valoare de 1 pe ieșire atunci când ambele intrări sunt 1.

Putem verifica faptul că tabelul de adevăr al circuitului echivalent de mai sus este același cu tabelul de adevăr prezentat inițial.

În acest circuit, poarta ȘI de ieșire se comportă ca un repetor (memorie) pentru poarta SAU atunci când ieșirea porții ȘI-negat este 1. Acest lucru se întâmplă pentru primele trei combinații (00, 01 și 10). Totuși, atunci când ambele intrări sunt 1, ieșirea porții SAU-negat este 0, forțând o valoare de 0 pe ieșirea porții SAU.

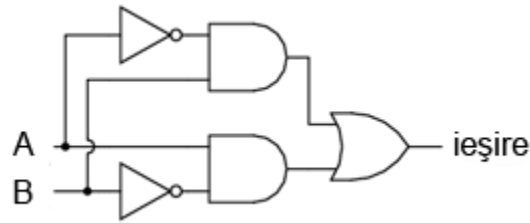


Fig. 3-29 schema echivalentă a unei porți logice SAU-exclusiv formată din porți ȘI, SAU și NU

Un alt circuit echivalent pentru o poartă SAU-exclusiv este format din două porți ȘI-negat (cu ajutorul unei porți NU). Acestea generează la ieșire o valoare de 1 dacă intrările sunt 01, respectiv 10. O poartă finală SAU permite o ieșire de 1 dacă cel puțin o poartă ȘI are o ieșire de 1.

Porțile SAU-exclusiv sunt utilizate în circuitele unde este necesară o comparație bit cu bit a două sau mai multe numere binare.

### 3.4.2 Poarta logică SAU-negat-exclusiv (XNOR)

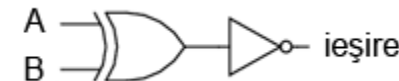


Fig. 3-30 schema echivalentă a unei porți logice SAU-negat-exclusiv

Ultima poartă pe care o vom analiza este poarta SAU-negat-exclusiv. Aceasta este echivalentă cu poarta SAU-exclusiv, doar că ieșirea este inversată.



Fig. 3-31 simbolul unei porți logice SAU-negat-exclusiv

Desigur, și pentru această poartă există un simbol special. Și, în sfârșit, să vedem cum arată tabelul de adevăr pentru această poartă:

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 1      |
| 0 | 1 | 0      |
| 1 | 0 | 0      |
| 1 | 1 | 1      |

Așa cum reiese din acest tabel, scopul unei porți logice SAU-negat-exclusiv este de a genera un nivel logic 1 atunci când ambele intrări sunt la același nivel (fie 00, fie 11).

### 3.5 Principiul universalității

- Toate porțile logice pot fi construite cu ajutorul porților ȘI-negat și SAU-negat

#### 3.5.1 Definiția principiului universalității

Porțile logice ȘI-negat și SAU-negat posedă o proprietate specială: sunt universale. Cu alte cuvinte, având un număr suficient de astfel de porți, fiecare din ele poate simula modul de funcționare al oricărei alte porți. De exemplu, putem construi un circuit care să se comporte precum o poartă SAU, folosind trei porți ȘI-negat interconectate. Această abilitate este caracteristică doar acestor două tipuri de porți. Practic, multe sisteme de control digital sunt construite doar cu ajutorul porților ȘI-negat și SAU-negat, toate funcțiile logice necesare fiind derivate prin interconectarea acestor tipuri de porți. Vom lua mai jos câteva astfel de exemple.

#### 3.5.2 Realizarea funcției NU

Să revedem prima dată simbolul și tabelul de adevăr pentru poarta NU:

| Intrare | Ieșire |
|---------|--------|
| 0       | 1      |
| 1       | 0      |



Fig. 3-32 poartă logică NU

Mai jos este prezentat și modul de realizare a acestei funcții folosind porți logice ȘI-negat și SAU-negat:

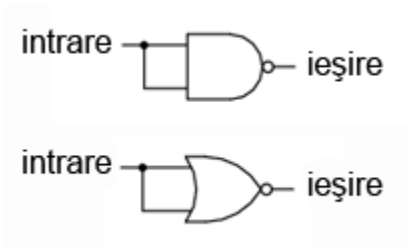


Fig. 3-33 funcția logică NU realizată cu porți logice ȘI-negat și SAU-negat prin interconectarea intrărilor

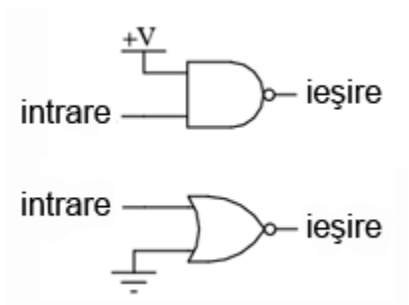


Fig. 3-34 funcția logică NU realizată cu porți logice ȘI-negat și SAU-negat prin legarea uneia dintre intrări la masă

Această metodă de conectare împreună a intrărilor duce la creșterea curentului de intrare. Prin urmare, atât în cazul de față, cât și în exemplele ce urmează, se va folosi conectarea la masă a unuia dintre terminali (celălalt terminal de intrare va fi legat la sursa de alimentare). Funcțional, rezultatul este același.

### 3.5.3 Realizarea funcției ne-inversoare (buffer)

Să revedem prima dată simbolul și tabelul de adevăr pentru o poartă ne-inversoare:

| Intrare | Ieșire |
|---------|--------|
| 0       | 0      |
| 1       | 1      |

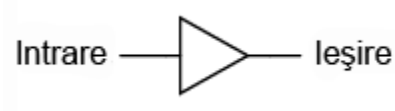


Fig. 3-35 simbolul unei porți ne-inversoare

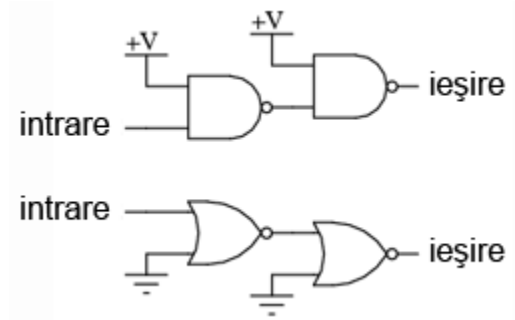


Fig. 3-36 realizarea funcției ne-inversoare cu două etaje de porți ȘI-negat și SAU-negat conectate împreună

Conform celor spuse mai sus, realizarea acestei funcții folosind porți logice ȘI-negat și SAU-negat se realizează conectând două etaje împreună, conform figurii alăturate.

### 3.5.4 Realizarea funcției ȘI

Simbolul și tabelul de adevăr al porții logice ȘI:

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 0      |
| 1 | 0 | 0      |
| 1 | 1 | 1      |



Fig. 3-37 simbolul porții logice ȘI

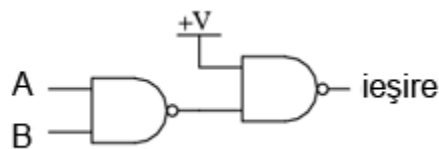


Fig. 3-38 realizarea funcției ȘI prin intermediul a două porți logice ȘI-negat

Folosind porți logice ȘI-negat pentru realizarea funcției ȘI, avem nevoie de adăugarea unui etaj inversor (poartă NU) pe ieșirea porții ȘI-negat. Dar, am văzut mai sus cum se poate realiza o poartă NU folosind o poartă ȘI-negat. Prin urmare, schema finală este cea din figura alăturată.



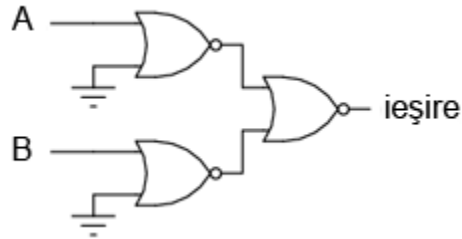


Fig. 3-39 realizarea funcției ȘI prin intermediul a două porți logice ȘI-negat

Același lucru se poate realiza folosind porți logice SAU-negat, prin inversarea (poartă NU) tuturor intrărilor printr-o poartă SAU-negat. Din nou, am văzut mai sus cum se poate realiza o poartă NU dintr-o poartă SAU-negat.

### 3.5.5 Realizarea funcției ȘI-negat

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 1      |
| 0 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 0      |

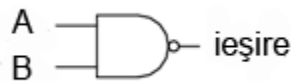


Fig. 3-40 simbolul unei porți logice ȘI-negat

Desigur, nu avem ce „construi” la o funcție ȘI-negat cu ajutorul porților ȘI-negat, pentru că nu este nimic de făcut.

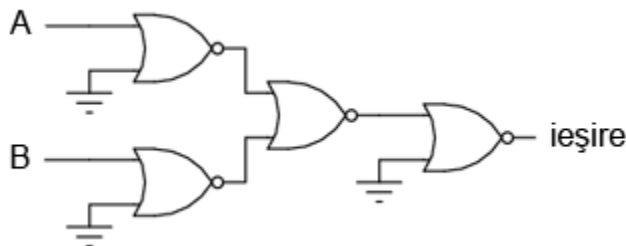


Fig. 3-41 realizarea funcției logice ȘI-negat cu ajutorul porților SAU-negat

Cu ajutorul porților SAU-negat însă, va trebui să inversăm atât intrările cu o poartă SAU-negat, precum și ieșirea acesteia din urmă (cu o poartă NU). Din nou, am văzut mai sus cum se poate realiza o poartă NU cu ajutorul porții SAU-negat.

### 3.5.6 Realizarea funcției SAU

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 1      |



Fig. 3-42 simbolul porții logice SAU

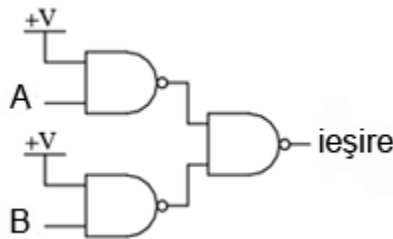


Fig. 3-43 realizarea funcției logice SAU cu ajutorul porților logice SAU-negat

Inversarea ieșirii unei porți SAU-negat (cu ajutorul unei alte porți SAU-negat conectată ca și poartă NU) are ca rezultat funcția SAU.

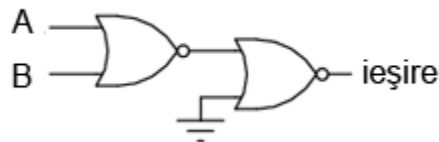


Fig. 3-44 realizarea funcției logice SAU cu ajutorul porților logice SAU-negat

Folosind porți SAU-negat, trebuie să inversăm toate intrările pentru simularea funcției SAU, la fel cum a trebuit să inversăm toate intrările unei porți SAU-negat pentru a obține funcția ȘI.

Țineți minte că inversarea tuturor intrărilor unei porți logice rezultă în schimbarea funcției esențiale ale acesteia. Astfel, poarta ȘI devine SAU, iar poarta SAU devine ȘI, plus o ieșire inversată. Astfel, cu toate intrările inversate, o poartă ȘI-negat se comportă precum o poartă SAU; o poartă SAU-negat se comportă precum o poartă ȘI; o poartă ȘI se comportă precum o poartă SAU-negat; și, în fine, o poartă SAU se comportă precum o poartă ȘI-negat. În cadrul algebrei booleene, aceste transformări sunt cunoscute sub numele de „teorema lui DeMorgan”.

### 3.5.7 Realizarea funcției SAU-negat

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 1      |
| 0 | 1 | 0      |
| 1 | 0 | 0      |
| 1 | 1 | 0      |



Fig. 3-45 simbolul porții SAU-negat

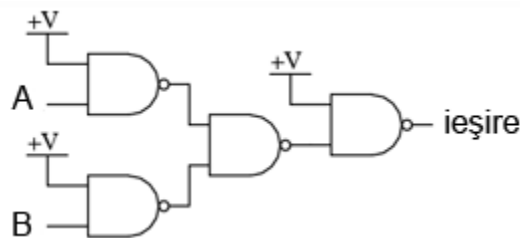


Fig. 3-46 realizarea funcției SAU-negat prin intermediul porților ȘI-negat

Pentru realizarea acestei funcții folosind porți ȘI-negat, trebuie să inversăm toate intrările și ieșirea. Procedul este asemănător cu cel prin care am realizat funcția ȘI-negat folosind porți logice SAU-negat.

## 3.6 Modul de împachetare

### 3.6.1 Circuite integrate

Circuitele digitale cu porți logice sunt confecționate ca și circuite integrate: toți tranzistori și rezistorii ce intră în componența circuitului sunt construiți pe o singură bucată de material semiconductor. Prin urmare, dacă avem nevoie de un număr relativ mare de porți logice, putem folosi circuite integrate sub forma capsulelor DIP. Aceste circuite integrate sunt disponibile cu un număr par de pini, cele mai comune fiind cu 8, 14, 16, 18 sau 24 de pini

Numărul de catalog al acestor capsule indică numărul și tipul porților conținute în pachet. Aceste numere de catalog sunt standardizate, ceea ce înseamnă că un circuit „74LS02” produs de Motorola este identic ca și funcționalitate cu un circuit „74LS02” produs de Fairchild sau de oricare alt producător. Codul de litere ce precedă aceste numere de catalog sunt însă unice fiecărui producător în parte. De exemplu „SN74LS02” reprezintă o capsulă cu patru porți logice SAU-negat, produsă de Motorola. Un „DM74LS02” este același circuit din punct de vedere funcțional, dar produs de Fairchild. Mai jos sunt date ca și referință câteva capsule DIP dintre cele mai utilizate:

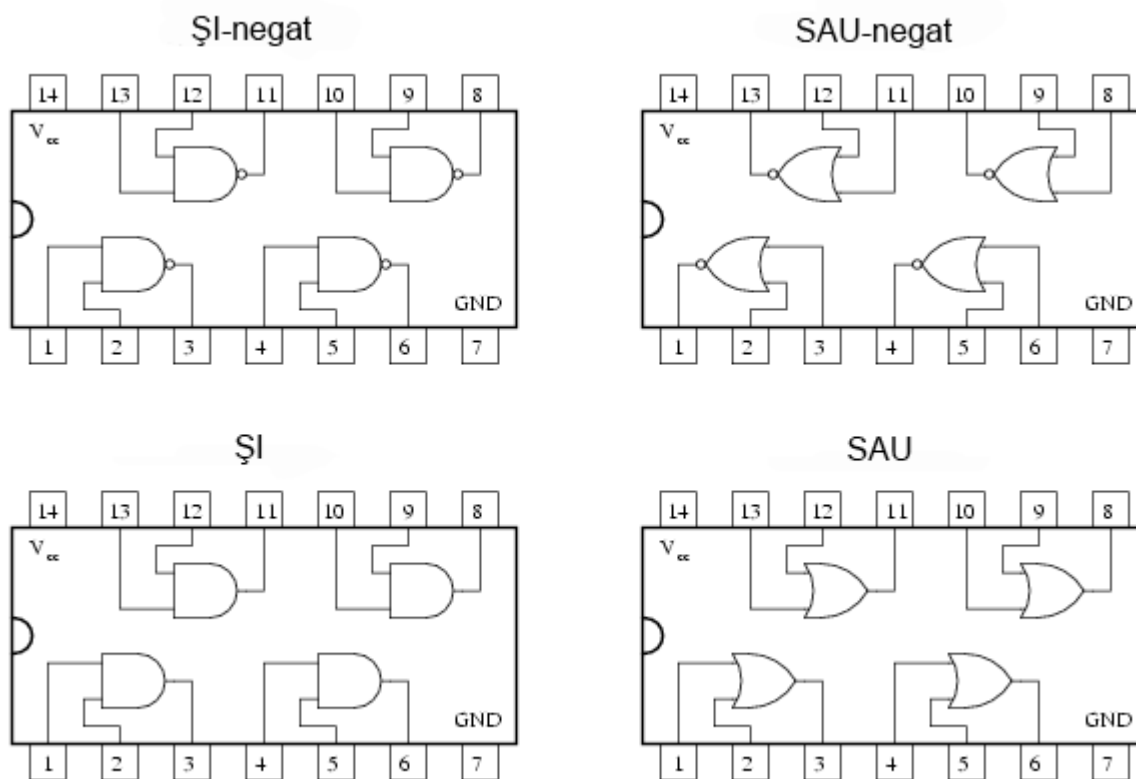


Fig. 3-47 capsule DIP

## 4 Comutatoare

### 4.1 Tipuri de comutatoare

- Un comutator este un dispozitiv electric, de obicei electromecanic, folosit pentru a controla continuitatea electrică dintre două puncte distincte
- Comutatoarele manuale sunt acționate de operatori umani
- Comutatoarele de limitare sunt acționate de poziția elementelor mecanice
- Comutatoarele de proces sunt acționate de variația unei anumite variabile fizice de proces, precum temperatură, presiune, nivel, etc.

#### 4.1.1 Definiția și scopul comutatorului electric

Un comutator electric este orice dispozitiv folosit pentru întreruperea deplasării electronilor prin circuit. Comutatoarele sunt practic dispozitive binare: fie sunt complet închise, fie complet deschise. Există o multitudine de tipuri de comutatoare. Vom prezenta câteva din ele mai jos.

Deși pare ciudat să prezentăm acest subiect elementar așa de târziu, în capitolele următoare vom explora un domeniu mai vechi al tehnologiei digitale. Aceasta din urmă se bazează pe contacte realizate cu ajutorul comutatoarelor mecanice și nu pe circuite digitale cu porți. Prezentarea ambelor metode conduce la o mai bună înțelegere a subiectului de față. Acest lucru ne va fi de folos atunci când vom învăța despre algebra booleană, matematica din spatele circuitelor logice digitale.

Cel mai simplu tip de comutator este acela în care contactul dintre doi conductori electrici se realizează prin acționarea unui mecanism de deplasare. Există și comutatoare mult mai complexe, comutatoare conținând circuite electronice capabile să închidă sau să deschidă circuitul în funcție de un stimul fizic (precum lumină sau câmp magnetic). Indiferent de caz, rezultatul final al unui comutator este o pereche de terminali ce vor fi conectați prin intermediul mecanismului intern al aparatului (comutator închis), fie vor fi separați (comutator deschis).

Orice comutator proiectat să fie folosit de către un operator uman, poartă numele de comutator manual. Există mai multe tipuri de astfel de comutatoare.

#### 4.1.2 Comutator basculant

**Fig. 4-1 comutator basculant; simbol**

Aceste tipuri de comutatoare sunt acționate cu ajutorul unei manete. Această manetă se poate regăsi într-una dintre cele două sau mai multe poziții disponibile (în funcție de tip). Comutatorul obișnuit folosit pentru aprinderea și stingerea luminii în casă, este un bun exemplu de comutator basculant. Majoritatea comutatoarelor basculante se pot regăsi în oricare dintre poziții. Unele comutatoare sunt însă echipate cu un mecanism intern prin intermediul căruia maneta revine tot timpul într-o poziție normală, bine stabilită. În acest ultim caz, funcționarea (închiderea sau deschiderea circuitului, în funcție de caz) comutatorului se face doar pentru o perioadă scurtă de timp, după care acesta revine la poziție inițială.

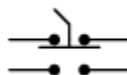
### 4.1.3 Comutator buton

**Fig. 4-2 comutator buton; simbol**

Comutatoarele buton sunt dispozitive bi-pозиtionale acționate prin intermediul unui buton care este apăsat iar apoi eliberat. Majoritatea butoanelor posedă un mecanism intern prin care butonul se reîntoarce la poziția sa inițială (ne-apăsat sau eliberat). Prin urmare, acest dispozitiv funcționează doar pe perioada în care butonul este apăsat, revenind apoi la poziția sa inițială. Un bun exemplu de astfel de comutator este butonul de pornire al calculatorului, sau de chemare al liftului. După apăsare, acestea revin la poziția inițială.

Unele comutatoare pot rămâne în poziția apăsat până când acesta este tras înapoi. Aceste tipuri de comutatoare sunt prevăzute cu un buton de tip ciupercă pentru ușurarea acțiunii.

### 4.1.4 Comutator selector

**Fig. 4-3 comutator selector; simbol**

Comutatoarele selectoare sunt acționate prin intermediul unui buton rotativ pentru selectarea uneia sau a mai multor poziții. La fel ca și comutatoarele basculante, acestea se pot regăsi în oricare dintre poziții, sau pot conține mecanisme pentru funcționarea de scurtă durată (revenirea la poziția normală).

#### 4.1.5 Comutator joystick



Fig. 4-4 comutator joystick; simbol

Un comutator joystick este acționat prin intermediul unei manete cu un grad de libertate sporit. În funcție de direcția de deplasare a manetei, există unul sau mai multe mecanisme de contact ce intră în acțiune. Câteodată, acest lucru depinde și de distanța de deplasare a manetei. Cercul și punctul din simbolul comutatorului indică direcția de deplasare a manetei pentru acționarea contactului. Aceste tipuri de comutatoare sunt folosite de obicei pentru macarale și pentru control industrial.

#### 4.1.6 Comutatoare de limitare

Unele comutatoare sunt special concepute pentru acționarea lor nu de către un operator uman, ci de către mișcarea unui dispozitiv mecanic. Aceste comutatoare de mișcare poartă numele de comutatoare de limitare, datorită faptului că sunt folosite pentru limitarea deplasării unei mașini. Acest lucru se realizează prin întreruperea alimentării unui anumit component, dacă acesta se deplasează prea departe. La fel ca în cazul comutatoarelor manuale, există mai multe tipuri de comutatoare de limitare.

#### 4.1.7 Comutator de limitare cu manetă



Fig. 4-5 comutator de limitare cu manetă; simbol

Aceste limitatoare sunt asemănătoare comutatoarelor basculante sau selectoare. În cazul acestora însă, maneta este acționată de un dispozitiv mecanic, și nu de către un operator uman.

### 4.1.8 Comutator de proximitate



Fig. 4-6 comutator de proximitate; simbol

Comutatoarele de proximitate detectează apropierea unei părți metalice, fie prin intermediul unui câmp magnetic, fie prin intermediul unui câmp electromagnetic de frecvență înaltă. Comutatoarele de proximitate simple utilizează un magnet permanent pentru acționarea unui mecanism întrerupător atunci când componenta metalică se apropie prea mult (2-3 cm). Comutatoarele de proximitate mai complexe funcționează asemenea unui detector de metale, alimentând o bobină cu un curent de frecvență înaltă și măsurând electronic amplitudinea aceluși curent. Dacă o componentă metalică (nu neapărat magnetică) se apropie prea mult de bobină, curentul va crește și va acționa mecanismul de monitorizare a circuitului. Simbolul alăturat este al unui comutator de proximitate de tip electronic, indicat prin romb. Simbolul unui dispozitiv non-electric este același cu simbolul comutatorului de limitare cu manetă.

O altă variantă a comutatorului de proximitate o reprezintă comutatorul optic. Acesta este compus dintr-o sursă de lumină și un element fotosensibil. Poziția elementului mecanic este detectată prin întreruperea sau reflexia unei de lumină. Comutatoarele optice sunt folosite în aplicații de siguranță, unde o sursă de lumină poate fi folosită pentru detectarea intrării persoanelor neautorizate într-o zonă periculoasă.

### 4.1.9 Comutatoare de proces

În multe aplicații industriale, este necesară o monitorizare a diferitelor mărimi fizice cu ajutorul comutatoarelor. Astfel de dispozitive pot fi folosite pentru pornirea unei alarme, indicând faptul că variabila de proces a depășit parametrii normali de funcționare. Sau pot fi folosite pentru oprirea proceselor sau a echipamentelor dacă acele variabile au atins un nivel periculos sau distructiv. Desigur, există mai multe variante de astfel de comutatoare de proces, prezentate mai jos.

### 4.1.10 Comutator de viteză





Fig. 4-7 comutator de viteză; simbol

Aceste comutatoare pot detecta viteza de rotație a unui ax prin intermediul unui mecanism montat pe acesta. Desigur, acest lucru este de preferat a se realiza fără un contact fizic între ax și comutator, caz în care detecția se realizează optic sau magnetic.

#### 4.1.11 Comutator de presiune



Fig. 4-8 comutator de presiune; simbol

Presiunea gazului sau a lichidului poate fi utilizată pentru acționarea unui mecanism de comutare. Această presiune trebuie să fie aplicată unui piston sau unei diafragme, care la rândul ei va converti presiunea în forță mecanică.

#### 4.1.12 Comutator de temperatură



Fig. 4-9 comutator de temperatură; simbol

Un mecanism relativ ieftin de detectare a temperaturii constă dintr-o bandă bimetalică: o bandă subțire formată din două metale diferite poziționate spate-în-spate. Fiecare metal posedă un coeficient de dilatare termică diferit. Această dilatare termică nu este altceva decât tendința corpurilor de a-și crește volumul în urma variației temperaturii (de obicei în urma creșterii acesteia, dar există și excepții). Fenomenul opus poartă numele de contracție termică.

Atunci când banda se răcește sau se încălzește, coeficienții de dilatare diferiți ale celor două metale cauzează curbarea acestei benzi. Curbarea benzii poate fi folosită apoi pentru acționarea unui mecanism de comutare.

Alte comutatoare de temperatură utilizează un bec de alamă umplut fie cu gaz fie cu lichid, și un tub ce conectează acest bec de un comutator de presiune. Pe măsură de becul este încălzit, volumul gazului sau al lichidului crește, generând o creștere de presiune care mai apoi acționează mecanismul de comutare.

### 4.1.13 Comutator de nivel



Fig. 4-10 comutator de nivel; simbol

Un obiect plutitor poate fi folosit pentru acționarea unui mecanism atunci când nivelul de lichid dintr-un bazin trece peste o anumită limită. Dacă lichidul este conductor din punct de vedere electric, acesta poate fi folosit ca și conductor pentru închiderea circuitului dintre două sonde metalice. Acestea sunt plasate în bazin la adâncimea corespunzătoare. În majoritatea cazurilor însă, acest lucru nu este practic, ba mai mult, este chiar periculos.

Acest tip de comutatoare poate fi folosit și pentru detectarea nivelului materialelor solide, precum rumeguș, grâu, cărbune sau plante furajere. O metodă des întâlnită pentru această aplicație este utilizarea unei mici roți cu pale metalice sau din lemn, plasată în interiorul recipientului la înălțimea dorită. Această roată este conectată la un motor electric ce o rotește cu o anumită viteză. Atunci când recipientul este umplut cu material solid până la acel nivel, materialul blochează roata și împiedică rotirea ei. Răspunsul motorului este cel care acționează mecanismul de comutare.

O altă metodă utilizează un diapazon (instrument format dintr-o bară metalică în formă de U, ce vibrează la lovire). Acesta este introdus în recipient din exterior, la înălțimea dorită. Diapazonul este supus unei vibrații la frecvența de rezonanță prin intermediul unui circuit electronic și un magnet/electromagnet. Când materialul solid trece de înălțimea la care este montat diapazonul, vibrațiile acestuia vor fi atenuate. Această modificare a amplitudinii vibrațiilor și/sau frecvenței este detectată de circuitul electronic.

#### 4.1.13.1 Comutator nuclear

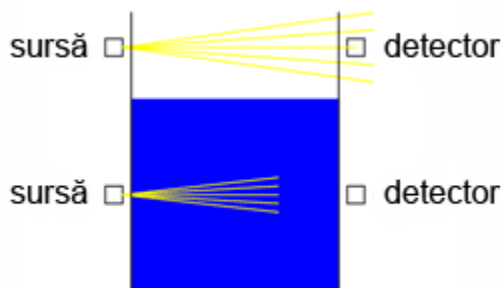


Fig. 4-11 comutator nuclear de nivel; simbol

O ultimă metodă de realizare a unui comutator de nivel pe care o luăm aici în considerare, o reprezintă comutatorul nuclear. Acesta este compus dintr-un material radioactiv ca și sursă și un detector de radiație. Ambele elemente sunt montate în lungul diametrului recipientului pentru lichid sau pentru material solid. Dacă înălțimea materialului trece de nivelul mecanismului sursă/detector, acesta va atenua puterea recepționată de detectorul de radiație. Această descreștere a radiației pe detector poate fi folosită pentru acționarea unui mecanism de comutare, fie pentru măsurarea nivelului, fie pentru declanșarea unei alarme sau chiar și pentru controlul nivelului din recipient.

Atât sursa cât și detectorul sunt montate în exteriorul recipientului, singurele elemente ce pătrund în interior sunt radiațiile. Sursele de radiație sunt extrem de slabe și nu prezintă niciun risc imediat operatorilor sau personalului de întreținere.

#### 4.1.14 Comutator de curgere



Fig. 4-12 comutator de curgere; simbol

Introdus într-o conductă, un comutator de curgere va detecta viteza de curgere a unui gaz sau a unui lichid. În momentul în care această viteză depășește o anumită limită, se va acționa mecanismul de comutare. De obicei se folosesc pale sau aripi ce sunt împinse de curgerea substanței respective. O metodă alternativă constă în detectarea căderii de presiune pe o anumită porțiune a conductei.

#### 4.1.15 Observație

Desigur, există tot timpul mai multe metode de implementare a unui comutator pentru monitorizarea sau controlul unui proces fizic. De obicei nu există un singur comutator „perfect” pentru nicio aplicație, deși unele prezintă câteva avantaje clare față de altele. Comutatoarele trebuie alese inteligent în funcție de aplicația în cauză. Acest lucru va determina funcționarea lor eficientă și sigură în orice împrejurare

## 4.2 Poziția „normală” a contactelor

- Poziția normală a contactelor este poziția în care acestea se regăsesc atunci când nu sunt conectate încă în circuit
- Contactele deschise în poziția normală poartă numele de contacte normal-deschise
- Contactele închise în poziția normală poartă numele de contacte normal-închise

### 4.2.1 Contacte normal-închise și normal-deschise

Orice tip de comutator poate fi proiectat astfel încât contactele sale să se închidă (stabilirea continuității circuitului), sau să se deschidă (întreruperea continuității), atunci când este acționat. Pentru comutatoarele prevăzute cu un mecanism de re-întoarcere la poziția inițială, direcția de re-întoarcere a comutatorului, atunci când nu este aplicată nicio forță externă, poartă numele de poziție normală. Prin urmare, contactele ce sunt deschise în poziția normală, poartă numele de „normal-deschise”. Contactele ce sunt închise în poziția normală, poartă numele de „normal-închise”.

Pentru comutatoarele de proces, poziția normală, este acea poziție în care nu există nicio influență de proces asupra comutatorului. O metodă simplă de determinare a poziției normale a unui comutator de proces, constă în determinarea poziției comutatorului atunci când acesta nu a fost încă instalat (se află încă în cutie).

### 4.2.2 Exemple de utilizare

Să luăm câteva exemple de poziții normale de proces. Comutator de viteză: axul este staționar; comutator de presiune: presiunea aplicată este zero; comutator de temperatură: temperatură ambientală (temperatura camerei); comutator de nivel: recipient gol; comutator de curgere: viteza de curgere a lichidului este zero.

Este important să facem diferența între poziția „normală” a comutatorului și funcționarea sa „normală” într-un proces. Să considerăm exemplul unui comutator de curgere ce este utilizat pentru semnalizarea (pe cale sonoră sau vizuală) scăderii debitului de apă dintr-un sistem de răcire. Funcționarea normală a sistemului de răcire constă într-un debit constant și suficient de lichid de răcire prin conducte. Să presupunem că urmărim închiderea

contactelor comutatorului în cazul pierderii de lichid de răcire (pentru completarea unui circuit electric ce activează alarma vizuală sau auditivă, de exemplu). În acest caz, va trebui să folosim un comutator de curgere cu contacte în poziția normal-închis și nu în poziția normal-deschis. În momentul în care există un debit normal și suficient de lichid prin conducte, contactele comutatorului rămân în poziția deschis. Atunci când debitul lichidului scade sub un anumit nivel critic, contactele se re-întorc în poziția lor normală, și anume, normal-închis.

Gândiți-vă tot timpul la starea normală a unui comutator ca la acea stare în care se regăsește dispozitivul când nu este introdus în sistem (este încă în magazin, de exemplu).

### 4.2.3 Simbolul contactelor



Fig. 4-13 simbolul comutatorului tip buton în poziția normal-deschis, respectiv normal-închis

Simbolul comutatoarelor este diferit în funcție de scopul și de modul de acționare. Un comutator normal-deschis este reprezentat în așa fel încât să reprezinte un contact deschis, care în momentul acționării să se închidă. Invers, un comutator normal-închis este reprezentat ca și un contact închis ce se deschide la acționarea dispozitivului. Alăturat este reprezentat simbolul comutatorului tip buton în poziția normal-deschis, respectiv normal-închis.

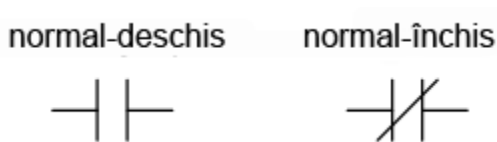


Fig. 4-14 simbolul general al comutatorului în poziție normal-deschis, respectiv normal-închis

Există de asemenea un simbol generic pentru poziția oricărui tip de comutator, fie normal-deschis, fie normal-închis, asemeni figurii alăturate. Comutatorul din stânga se închide când este acționat și este deschis în poziția normală (atunci când nu este acționat din exterior). Comutatorul din dreapta se deschide când este acționat și este închis în poziția sa normală (când nu este acționat). Dacă se folosesc astfel de simboluri pentru reprezentarea comutatoarelor, tipul acestora este de obicei trecut în vecinătatea simbolului, în cuvinte.

Atenție, nu confundați simbolul (în figura de mai sus) cu simbolul condensatorului. În cazul în care se dorește reprezentarea unui condensator într-un circuit logic, se va folosi simbolul de jos:

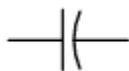


Fig. 4-15 simbolul condensatorului folosit în circuitele logice digitale

În electronica standard, acest simbol este rezervat condensatoarelor polarizate. În circuitele logice digitale, acest simbol este folosit pentru orice tip de condensator, chiar și în situația când condensatorul nu este un condensator polarizat.

#### 4.2.4 Secvența realizării contactelor

În cazul comutatoarelor cu mai multe poziții, trebuie luat în considerare și modul de deschidere și de închidere a contactelor, pe măsură ce selectorul se deplasează de pe o poziție pe alta.

##### 4.2.4.1 Comutator cu întrerupere

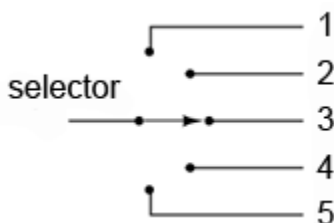


Fig. 4-16 comutator cu întrerupere; realizarea contactelor

Selectorul comutatorului din figura alăturată realizează contactul (închiderea circuitului) într-una din cele cinci poziții diferite. Pozițiile sunt numerotate de la 1 la 5. Configurația cea mai des întâlnită a unui comutator cu pas reglabil, este aceea în care contactul cu o anumită poziție este deschis înainte de realizarea contactului (închiderea contactului) cu poziția următoare. Sub această configurație, comutatorul este cunoscut sub numele de comutator cu întrerupere.

Ca și exemplu, să presupunem cazul în care comutatorul se află pe poziția 3. Dacă selectorul este întors în sensul acelor de ceasornic, acesta va deschide contactul 3, deschizând practic circuitul, și se va deplasa între poziția 3 și 4. În acest moment, ambele circuite (3 și 4) sunt deschise, ambele contacte fiind deschise. Dacă se continuă deplasarea selectorului în sensul acelor de ceasornic, se va ajunge în poziția 4, moment în care contactul se închide.

##### 4.2.4.2 Comutator cu suprapunere

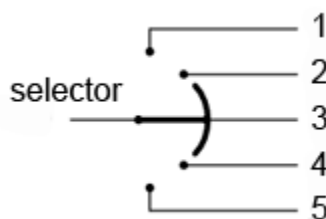


Fig. 4-17 comutator cu suprapunere (comutator fără întrerupere); realizarea contactelor

Există însă situații în care nu este permisă în nicio clipă deschiderea completă a circuitului atașat selectorului. Pentru astfel de aplicații, există o altă variantă de comutator, denumită comutator cu suprapunere, sau comutator fără întrerupere. În acest caz, selectorul nu deschide circuitul precedent înainte de realizarea contactului cu circuitul următor (în sensul de rotire). În exemplul precedent, contactul 4 este realizat înaintea deschiderii contactului 3. Compromisul constă în faptul că circuitul trebuie să poată tolera asemenea contacte adiacente realizate simultan (1 cu 2, 2 cu 3, 3 cu 4 și 4 cu 5).

#### 4.2.5 Comutatoare multipolare

Când contactul(e) mobil poate fi adus pe unul dintre contactele fixe, acele poziții sunt denumite „direcții”. Numărul contactelor mobile poartă numele de poli. Ambele comutatoare prezentate mai sus cu un contact mobil și cinci contacte staționare pot fi desemnate ca și comutatoare monopolare cu cinci direcții.

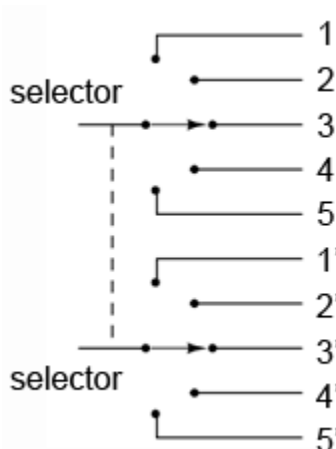


Fig. 4-18 comutator bipolar cu cinci direcții

Să presupunem că două comutatoare bipolare cu cinci direcții sunt legate împreună, astfel încât ele să fie acționate prin intermediul aceluiași mecanism. Întregul dispozitiv astfel format poartă numele de comutator bipolar cu cinci direcții. Simbolul unui astfel de comutator este prezentat în figura alăturată. De menționat că linia

întreruptă trasată între cele două selectoare, desemnează faptul că acestea sunt acționate simultan de același mecanism extern. Să luăm și alte exemple de comutatoare:

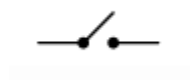


Fig. 4-19 comutator monopolar cu o direcție

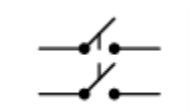


Fig. 4-20 comutator bipolar cu o direcție



Fig. 4-21 comutator monopolar cu două direcții

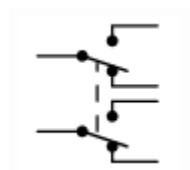


Fig. 4-22 comutator bipolar cu două direcții

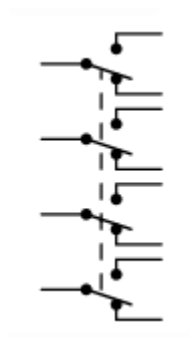


Fig. 4-23 comutator cvadripolar cu patru direcții



## 5 Relee electromecanice

### 5.1 Construcția releelor

- Un relee electromecanic este compus dintr-o bobină și un element magnetic mobil, ce poartă numele de armătură.
- La trecerea curentului prin bobină, aceasta produce un câmp magnetic ce atrage armătura. Armătura acționează la rândul său contactele unui comutator

#### 5.1.1 Electromagnetul

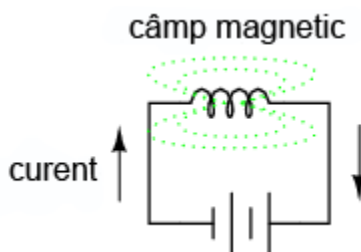


Fig. 5-1 o bobină produce un câmp magnetic la trecerea curentului prin aceasta

La trecerea curentului electric printr-un conductor, va lua naștere un câmp magnetic în jurul acestuia. În cazul în care conductorul este construit sub forma unei bobine, câmpul magnetic produs se va orienta în lungimea bobinei. Cu cât intensitatea curentului este mai mare, cu atât puterea câmpului magnetic este mai mare, toți ceilalți factori rămânând neschimbați.

Bobinele reacționează la variația curentului prin ele datorită energiei stocate sub forma acestui câmp magnetic. La construirea unui transformator din două bobine înfășurate în jurul unui miez magnetic comun, utilizăm de fapt acest câmp magnetic pentru a transfera energie electrică de la o înfășurare la alta. Totuși, există și alte metode mai simple și mai directe de utilizare a câmpurilor electromagnetice.

Câmpul magnetic produs de o bobină poate fi folosit pentru exercitarea unei forțe mecanice asupra oricărui obiect magnetic. În același fel folosim și magneți permanenți pentru atragerea obiectelor magnetice. Diferența constă în faptul că acest electromagnet (format din bobină) poate fi pornit și oprit prin închiderea și deschiderea circuitului bobinei.

### 5.1.2 Deplasarea armăturii sub influența electromagnetului

Dacă plasăm un obiect magnetic (un obiect metalic, de exemplu) în apropierea unei astfel de bobine, acest obiect se va deplasa atunci când prin bobină trece un curent electric. Obiectul magnetic deplasabil poartă numele de armătură, iar majoritatea lor pot fi deplasate fie prin intermediul curentului continuu, fie cu ajutorul curentului alternativ. Polaritatea câmpului magnetic este irelevantă din punct de vedere al atracției armăturii. Aceste dispozitive pot fi folosite pentru deschiderea pe cale electrică a încuietorilor, deschiderea sau închiderea valvelor, deplasarea brațelor mecanice, etc. Totuși, în situația în care aceste dispozitive sunt utilizate pentru acționarea unui comutator, ele sunt cunoscute sub denumirea de rele electromecanice.

### 5.1.3 Utilizarea releelor electromecanice

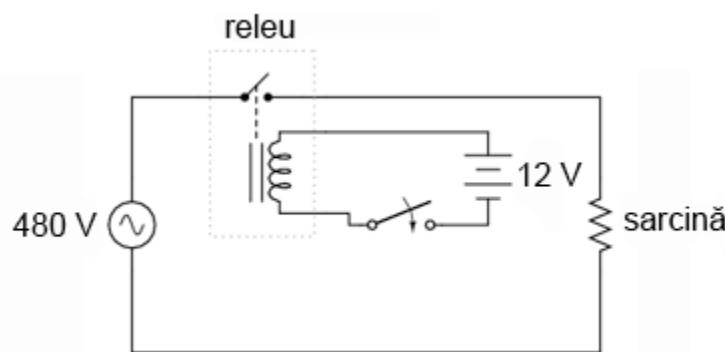


Fig. 5-2 releu electromecanic într-un circuit electric

Releele sunt foarte practice pentru controlul unei cantități mari de curent sau tensiune prin intermediul unui semnal electric de putere mică. Bobina releului ce produce câmpul magnetic poate să consume o putere mai mică de 1 watt, de exemplu, pe când contactele acționate de acest câmp magnetic pot susține o putere de sute de ori mai mare. Funcțional, un rele electromecanic se comportă precum un amplificator cu două stări: pornit și oprit.

La fel ca în cazul tranzistorilor, abilitatea releelor de a controla un semnal electric prin intermediul unui alt semnal electric este utilizat pentru realizarea funcțiilor logice. Pentru moment însă, vom explora abilitatea de „amplificare” a releelor.

În figura de mai sus, bobina releului este energizată prin intermediul unei surse de tensiune de 12 V (c.c.). În schimb, comutatorul monopolar cu o singură direcție este conectat într-un circuit electric alimentat de la o sursă de tensiune de 480 V (c.a.). În acest caz, curentul necesar energizării bobinei este de sute de ori mai mic decât curentul nominal al contactului comutatorului.

Un singur dispozitiv bobină/armătură poate fi folosit pentru acționarea mai multor seturi de contacte. Aceste contacte pot fi normal-deschise, normal-închise, sau într-o combinație a celor două. Asemeni

comutatoarelor, poziția „normal” a releelor reprezintă acea stare a contactelor atunci când bobina nu este energizată, sau mai bine spus, atunci când releul este încă „în cutie”.

Pe lângă abilitatea de control a unui curent mare prin intermediul unui curent mic, releele oferă și o izolație electrică între circuitul bobinei și circuitul contactelor. Acest lucru înseamnă că cele două elemente sunt izolate din punct de vedere electric una de cealaltă. Unul din circuite poate fi de c.c, iar celălalt de c.a., precum în exemplul anterior, sau chiar și la tensiuni diferite.

## 5.2 Relee temporizate

- Releele temporizate introduc o anumită întârziere de la momentul energizării/de-energizării bobinei și până la închiderea/deschiderea contactelor.

### 5.2.1 Definiția releelor temporizate

Unele relee sunt prevăzute cu un fel de „amortizor”. Acest mecanism, atașat arăturii releului previne deplasarea imediată și completă a armăturii atunci când bobina este energizată sau de-energizată. Datorită acestui lucru, releul are proprietatea unei acționări temporizate (întârziate în timp). Astfel de relee temporizate pot fi construite pentru temporizarea deplasării armăturii în momentul energizării bobinei, în momentul de-energizării bobinei, sau pentru ambele situații.

Releele temporizate au ca și specificație nu doar poziția normal-închisă sau normal-deschisă a contactelor, ci și modul în care acționează temporizarea (la închiderea sau la deschiderea contactelor). Mai jos este o descriere a celor patru tipuri de relee temporizate.

### 5.2.2 Releu temporizat la închidere normal-deschis

Acest tip de contact este normal-deschis atunci când bobina nu este energizată. Contactul se închide doar după aplicarea unui curent electric prin bobina releului, și doar după o anumită perioadă de timp de la aplicarea acestuia. Cu alte cuvinte, direcția deplasării contactului este identică cu cea a unui contact normal-deschis, dar există o întârziere (temporizare) la închiderea contactului. Datorită faptului că temporizarea are loc în direcția energizării bobinei, acest tip de contact mai poartă numele de contact normal-deschis cu acționare întârziată.

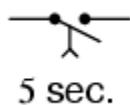


Fig. 5-3 releu temporizat la închidere normal deschis

Releul din figura alăturată este un releu temporizat la închidere, normal-deschis. Acesta se închide după cinci secunde de la energizarea bobinei. Deschiderea se realizează imediat după de-energizarea bobinei.

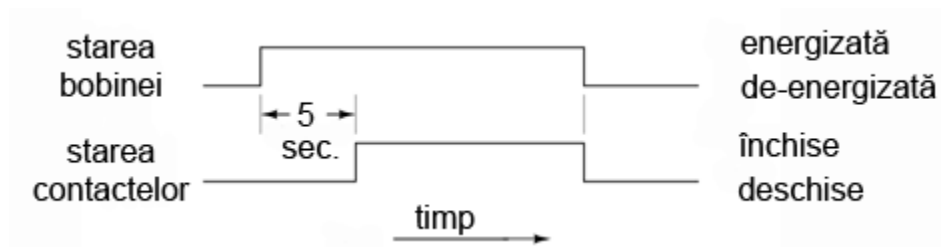


Fig. 5-4 diagrama timp de funcționare a contactelor unui releu temporizat la închidere, normal deschis

Alăturat este o diagramă de timp ce prezintă modul de funcționare a contactelor acestui tip de releu temporizat.

### 5.2.3 Releu temporizat la deschidere, normal-deschis

Asemenea releului precedent, și acest dispozitiv este normal-deschis atunci când bobina este de-energizată. La aplicarea unui curent pe bobină, contactele releului se închid. Față de cazul precedent însă, temporizarea (întârzierea) are loc după de-energizarea bobinei și nu după energizarea ei. Datorită faptului că temporizarea are loc după de-energizarea bobinei, acest tip de contact mai poartă numele de contact normal-deschis cu întârziere la revenire.

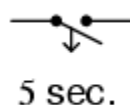


Fig. 5-5 releu temporizat la deschidere normal deschis

Releul temporizat la deschidere, normal-deschis, din figura alăturată se închide imediat după energizarea bobinei. Deschiderea contactelor are loc însă la cinci secunde după de-energizarea bobinei. Să vedem și diagrama de timp:

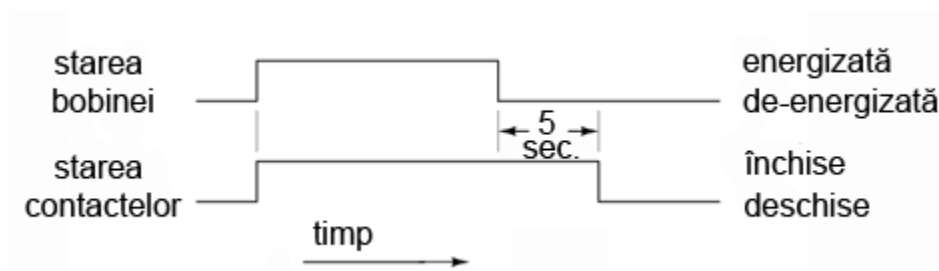


Fig. 5-6 diagrama timp de funcționare a contactelor unui relee temporizat la deschidere, normal deschis

#### 5.2.4 Releu temporizat la deschidere, normal-închis

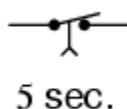


Fig. 5-7 releu temporizat la deschidere normal închis

Acest tip de contact este normal închis atunci când bobina nu este energizată. Contactul se deschide la aplicarea unui curent prin bobină, dar doar după o anumită perioadă de timp. Cu alte cuvinte, direcția de deplasare a contactului este identică cu a unui contact normal-închis, doar că există o temporizare în direcția deschiderii acestuia. Datorită faptului că temporizarea are loc în direcția energizării bobinei, acest contact mai poartă numele de contact normal-închis cu acționare întârziată.

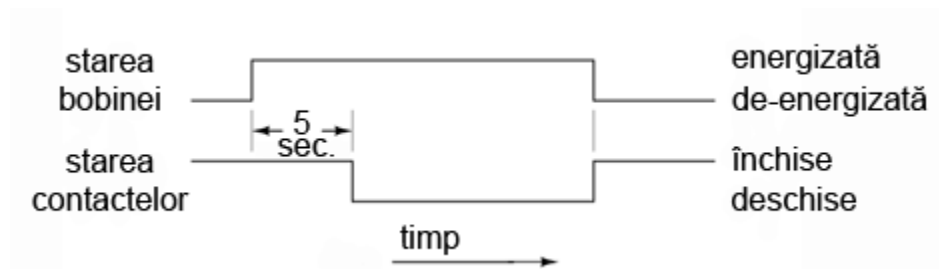


Fig. 5-8 diagrama timp de funcționare a contactelor unui relee temporizat la deschidere, normal-închis

#### 5.2.5 Releu temporizat la închidere, normal-închis

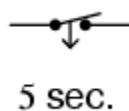


Fig. 5-9 releu temporizat la închidere normal închis

Asemenea releului temporizat la deschidere normal-închis, acest tip de contact este normal-închis atunci când bobina nu este energizată. Deschiderea se realizează prin aplicarea unui curent prin bobina releului. Totuși, la de-energizarea bobinei, contactele se închid cu o anumită întârziere de timp. Acest tip de contact mai poartă numele de contact normal-închis cu întârziere la revenire.

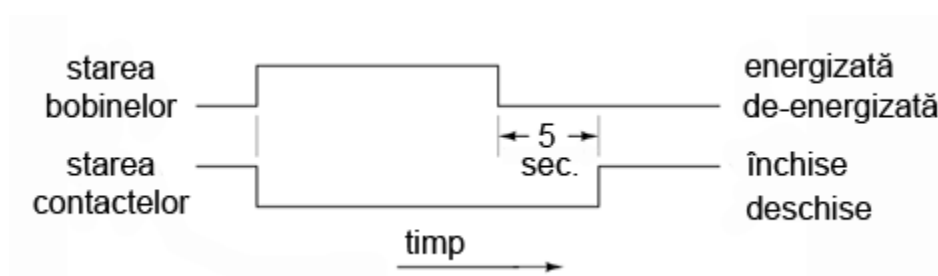


Fig. 5-10 diagrama timp de funcționare a contactelor unui releu temporizat la închidere, normal închis

### 5.2.6 Alte tipuri de rele temporizate

Releele temporizate mecanice, mai vechi, utilizau amortizoare mecanice sau dispozitive cu pistoane/cilindrii umplute cu fluid pentru întârzierea deplasării armăturilor. Modelele mai noi utilizează circuite electronice cu rețele rezistor-condensator pentru generarea întârzierii. Energizarea (instantanee) a releului electromecanic se realizează cu ajutorul semnalului de ieșire al circuitului electronic. Aceste rele electronice sunt mai adaptabile decât variantele mecanice, și mult mai durabile. Multe modele sunt capabile de efectuarea unor operații de temporizare avansate:

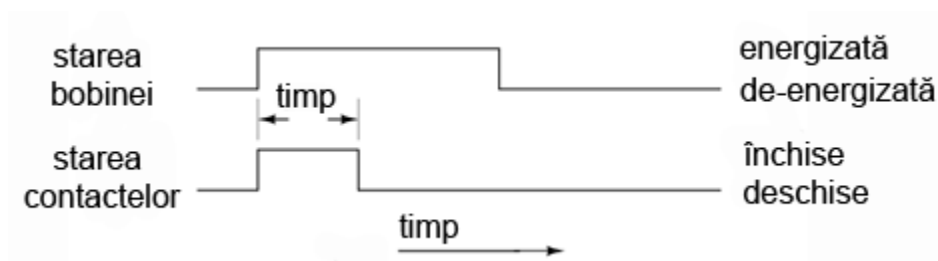


Fig. 5-11 releu temporizat normal-deschis cu o singură închidere

Releu temporizat normal-deschis cu o singură închidere. Aceste rele se închid o singură dată, un anumit interval de timp și apoi se re-deschid, la o tranziție a intrării de la starea de-energizată la starea energizată.

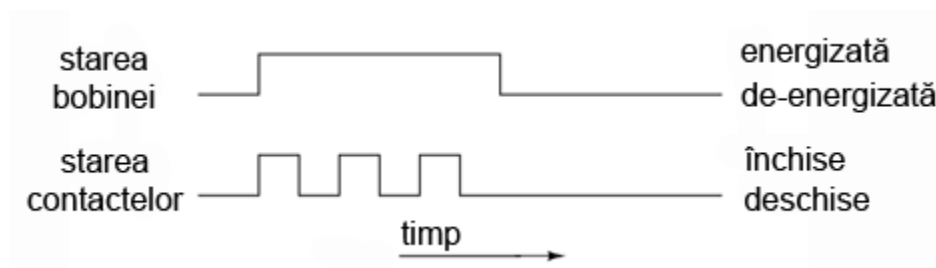


Fig. 5-12 releu temporizat normal-deschis cu deschideri/închideri repetate

Releu temporizat normal-deschis cu deschideri/închideri repetate. Acest releu se închide și se deschide pentru un anumit interval de timp atâta timp cât bobina este energizată.

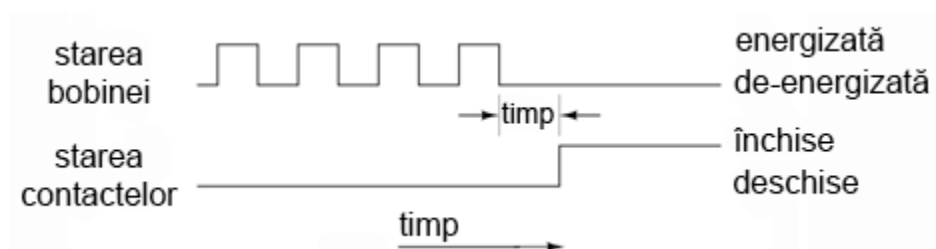


Fig. 5-13 releu temporizat de supraveghere

Releu temporizat de supraveghere. Acest releu își schimbă starea în cazul în care semnalul de intrare nu variază continuu de la starea energizată la starea de-energizată.

Această ultimă metodă de temporizare este utilă pentru monitorizarea sistemelor bazate pe calculatoare. Dacă se folosește un calculator pentru controlul unui proces critic, este recomandată de obicei instalarea unui sistem automat de alarmare în cazul în care calculatorul se blochează din diferite motive. O metodă relativ simplă de instalare a unui astfel de sistem constă în energizarea și de-energizarea unei bobine prin intermediul unui semnal trimis de calculator. Dacă sistemul se blochează, semnalul de intrare pe releu nu se va mai modifica (se va bloca la ultima stare). La puțin timp după aceasta, contactul releului se va închide semnalizând o problemă.

### 5.3 Relee semiconductoare

- Releele semiconductoare sunt realizate cu tiristori, triace și tranzistori în loc de contacte mecanice

### 5.3.1 Limitările releelor electromecanice

Pe cât de utile sunt, releele electromecanice au totuși multe inconveniente. Acestea sunt relativ scumpe, au o durată de viață a contactelor limitată, ocupă mult loc, iar timpii de comutație sunt mari în comparație cu dispozitivele semiconductoare moderne. Aceste limitări se aplică în special releelor de putere. Pentru a întâmpina aceste neajunsuri, mulți producători oferă rele semiconductoare ce folosesc tiristori, triace sau tranzistori în loc de contactele mecanice.

### 5.3.2 Structura releelor semiconductoare



Fig. 5-14 releu semiconductor

Aceste dispozitive de ieșire (tiristori, triace, tranzistori) sunt cuplate optic la o sursă de lumină (LED) în interiorul releului. Releul este pornit prin energizarea acestui LED, de obicei prin intermediul unei surse de tensiune de c.c. scăzute. Această izolare optică între intrare și ieșire se ridică la nivelul celor mai bune rele electromecanice posibile.

Fiind dispozitive semiconductoare, nu există părți mobile care să se deterioreze la uzură. Timpii de comutație sunt mult mai mici decât viteza maximă posibilă de deplasare a armăturilor în cazul releelor mecanice. Nu există pericolul apariției arcelor electrice între contacte și nici probleme corozive. Totuși, aceste dispozitive semiconductoare sunt mai scumpe, mai ales pentru curenți înalți.

### 5.3.3 Avantaje și dezavantaje

Un avantaj important al releelor cu tiristoare este tendința naturală de deschidere a contactelor, într-un circuit de c.a., doar la trecerea curentului prin zero. Histereza „naturală” a tiristoarelor menține continuitatea circuitului chiar și după de-energizarea LED-ului, până în momentul în care c.a. scade sub un anumit prag (curentul de menținere). Practic, acest lucru înseamnă că circuitul nu se va întrerupe în mijlocul unei semi-perioade (atunci când valoarea curentului este maximă, de exemplu). O asemenea întrerupere într-un circuit cu o inductanță mare, va produce în mod normal o creștere mare și de scurtă durată a tensiunii. Acest lucru se datorează „căderii” bruște a



câmpului magnetic din jurul inductanței. Acest lucru nu are loc însă în cazul unui relee semiconductor echipat cu tiristori.

Un dezavantaj al releelor semiconductoare este tendința de scurt-circuitare în caz de defect. Releele electromecanice tind să se deschidă la defect. Dintre cele două stări, deschiderea la defect este considerată mai sigură față de scurt-circuitarea la defect. Din acest motiv, în anumite aplicații, releele electromecanice sunt încă folosite în dauna celor semiconductoare.

## 6 Logica ladder

### 6.1 Diagrame ladder

- Diagramele ladder sunt scheme electrice special concepute pentru reprezentarea circuitelor logice

#### 6.1.1 Definiția diagramelor ladder

Diagramele ladder sunt diagrame speciale folosite de obicei în sistemele logice de control industrial. Denumirea de ladder (din engleză: scară) vine de la asemănarea acestora cu o scară: două linii verticale desemnând sursa de putere, și linii orizontale reprezentând circuitele de control.

#### 6.1.2 Exemplu



Fig. 6-1 diagrama ladder de control a unei lămpi prin intermediul unui comutator manual

Ca și exemplu de început, o diagramă ladder simplă reprezentând o lampă controlată de un comutator manual arată precum în figura alăturată. Notățiile  $L_1$  și  $L_2$  desemnează bornele unei surse de alimentare de 120 V c.a.  $L_1$  este faza iar  $L_2$  este conductorul neutru (legat la masă). Aceste notații nu au nicio legătură cu notația bobinelor.

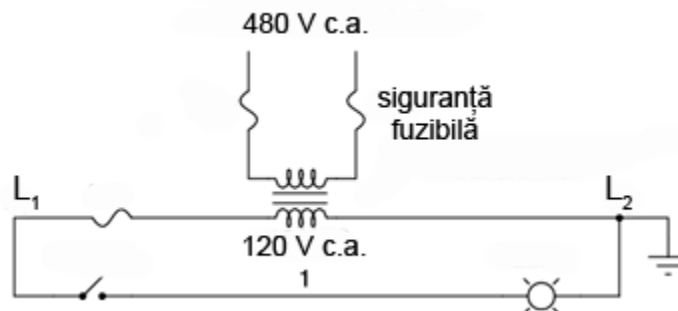


Fig. 6-2 diagrama ladder de control a unei lămpi prin intermediul unui comutator manual; schema completă

Transformatorul sau generatorul ce alimentează acest circuit este omis pentru simplitate. În realitate, circuitul este cel alăturat.

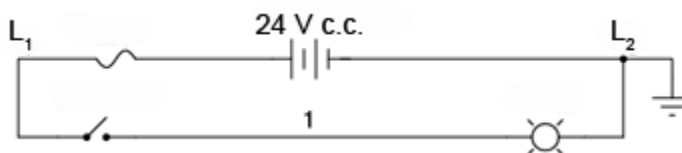


Fig. 6-3 diagrama ladder de control a unei lămpi prin intermediul unui comutator manual; alimentare în c.c. la 24 V

Deși circuitele logice industriale utilizează o tensiune de 120 V în c.a., există și sisteme realizate la tensiuni mai mici în c.a. sau chiar și în c.c.

Atâta timp cât contactele comutatoarelor și bobinele releelor sunt dimensionate corespunzător, tensiunea de alimentare a sistemului este irelevantă.

### 6.1.3 Notăția conductorilor

Observați cifra „1” notată pe conductorul dintre comutator și lampă. În realitate acel conductor este notat cu cifra „1” folosind etichete adezive sau tuburi termocontractibile, în funcție de preferință. Conductorii ce duc înspre comutator vor fi notați cu „L<sub>1</sub>”, respectiv „1”. Conductorii ce duc înspre lampă vor fi notați cu „1”, respectiv „L<sub>2</sub>”. Aceste numerotații sunt făcute pentru a ușura construirea și întreținerea întregului ansamblu. Fiecare conductor are propriul său număr unic. Numerotarea conductorilor nu se schimbă atunci când aceștia intră/ies dintr-un nod, indiferent dacă mărimea, culoarea sau lungimea lor se schimbă. Desigur, este de preferată utilizarea unei singure culori pentru desemnarea aceluiași conductor, dar acest lucru nu este tot timpul practic. Ceea ce contează este ca orice punct comun din punct de vedere electric dintr-un circuit de control să fie desemnat prin același număr de fir (conductor).

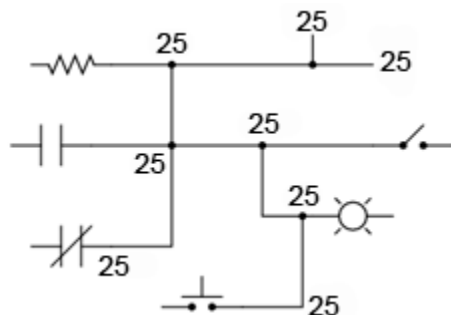


Fig. 6-4 diagramă ladder

Să luăm de exemplu diagrama ladder alăturată. Conductorul notat cu „25” reprezintă de fapt același fir din punct de vedere electric, chiar dacă acesta este conectat la mai multe dispozitive.

#### 6.1.4 Modul de conectare al sarcinii

În diagramele ladder, sarcina (lampă, releu, etc.) este aproape tot timpul conectată la dreapta „scării”. Deși din punct de vedere electric locația sarcinii nu are nicio importanță, contează totuși care capăt al „scării” este conectat la masă.

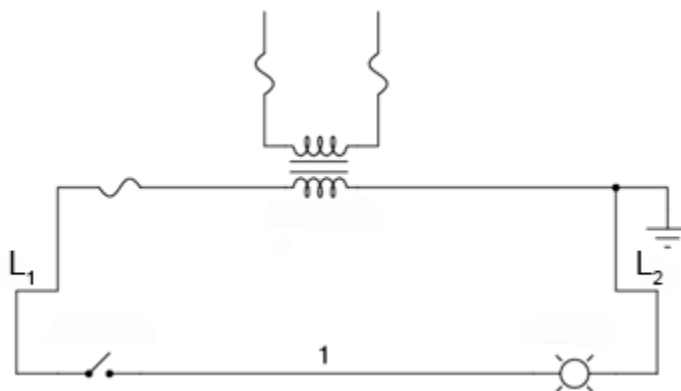


Fig. 6-5 diagramă ladder

Să considerăm exemplul alăturat. În acest caz, lampa (sarcina) este conectată în dreapta circuitului, la fel și masa sursei de alimentare. Aceasta nu este o simplă coincidență.

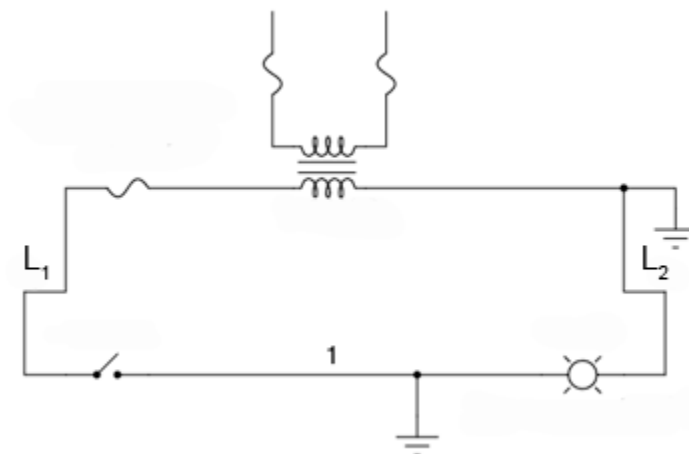


Fig. 6-6 diagramă ladder; masă accidentală

Să presupunem că la un moment dat există o conexiune accidentală între conductorul 1 și masă. Această conexiune poate fi dată de uzura izolației și contactul conductorului cu un mediu conductor conectat la pământ. Cu ambele capete ale lămpii conectate la masă (același potențial, prin urmare, cădere de tensiune zero), lampa este practic scurt-circuitată și nu se poate aprinde. În cazul închiderii comutatorului, acest scurt-circuit va duce la arderea siguranței fuzibile.

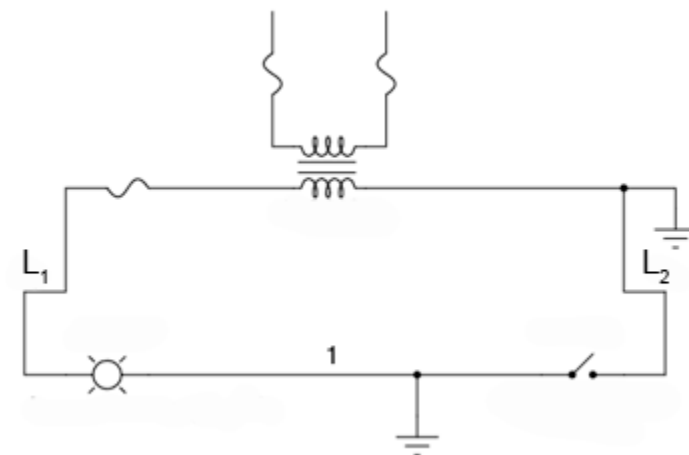


Fig. 6-7 diagramă ladder; masă accidentală

Dar, să vedem ce s-ar întâmpla în cazul unei defecțiuni identice (contactul accidental dintre conductorul 1 și masă) în cazul în care poziția comutatorului este schimbată cu cea a lămpii. Și în acest caz, L2 este conectat la masă. Masa accidentală va forța aprinderea lămpii, iar comutatorul nu va avea niciun efect asupra funcționării acesteia.

Este mult mai bine și mai sigur din punct de vedere electric să avem un sistem a cărui siguranță fuzibilă se arde în cazul unui defect de împământare, decât un sistem a cărui componente (lămpi, relee, etc.) nu pot fi controlate în cazul aceluiași defect. Din această cauză, sarcina(le) unei diagrame ladder trebuie tot timpul conectată lângă conductorul legat la masă (comun din punct de vedere electric cu acesta).

## 6.2 Funcții logice digitale

- Contactele conectate în paralel sunt echivalente cu o poartă SAU
- Contactele conectate în serie sunt echivalente cu o poartă ȘI
- Contactele normal-închise sunt echivalente cu o poartă NU
- Pentru inversarea intrărilor pe porți, se folosesc contacte normal-închis
- Pentru inversarea ieșirii unei funcții logice, se folosesc relee

### 6.2.1 Funcția logică SAU

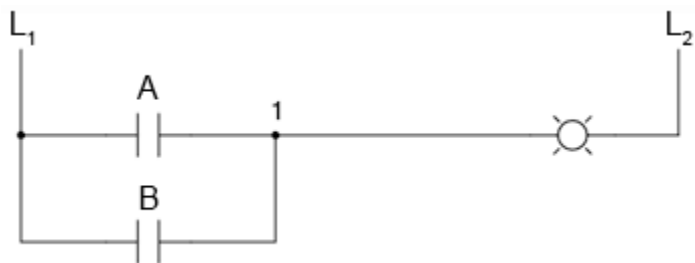


Fig. 6-8 diagramă ladder; funcția SAU

Putem construi funcții logice simple pentru circuitul cu lampă din secțiunea precedentă, folosind contacte multiple. Documentarea acestor circuite se face relativ simplu prin conectarea unor linii adiționale diagramei inițiale.

Dacă folosim notația binară standard pentru starea comutatoarelor și a lămpii (0 pentru ne-acționat sau de-energizat, 1 pentru acționat sau energizat), putem utiliza un tabel de adevăr pentru reprezentarea logicii circuitului.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 1      |

După cum se poate observa din diagrama ladder, lampa se va aprinde (energiza) în cazul în care contactul A sau contactul B este acționat. Electronii nu au nevoie decât de o singură cale (de la  $L_1$  spre 1) pentru a ajunge spre lampă. Prin urmare, indiferent care contact se închide, A sau B, lampa se va aprinde.



Fig. 6-9 poartă logică SAU; simbol

Ceea ce am implementat de fapt în acest caz nu este altceva decât o poartă logică SAU, utilizând două contacte normal-deschise și o lampă.

### 6.2.2 Funcția logică ȘI



Fig. 6-10 funcția ȘI

Putem imita funcția unei porți logice ȘI prin conectarea celor două contacte normal-deschise în serie și nu în paralel.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 0      |
| 1 | 0 | 0      |
| 1 | 1 | 1      |



Fig. 6-11 poartă logică ȘI; simbol

Putem verifica cu ajutorul tabelului de adevăr că acest lucru este într-adevăr corect.

În acest caz, lampa se va aprinde doar dacă ambele contacte sunt acționate simultan. Curentul va putea trece de la  $L_1$  la 2 doar dacă ambele contacte sunt închise.

### 6.2.3 Funcția logică NU



Fig. 6-12 funcția logică NU

Funcția logică de inversare poate fi obținută prin simpla utilizare a unui contact normal-închis, față de un contact normal-deschis precum cele folosite mai sus.

| A | Ieșire |
|---|--------|
| 0 | 1      |
| 1 | 0      |

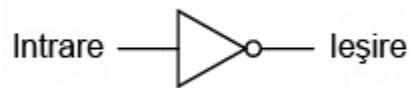


Fig. 6-13 funcția logică NU; simbol

Din nou, putem verifica prin intermediul tabelului de adevăr că acest lucru este corect.

### 6.2.4 Funcția logică ȘI-negat



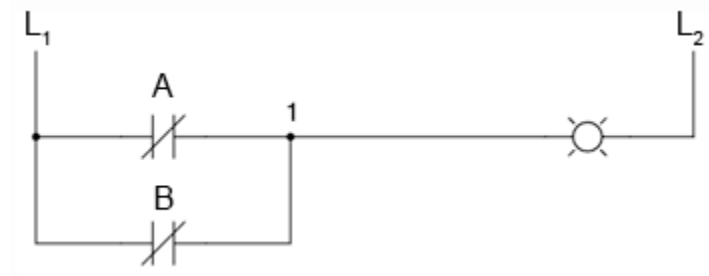


Fig. 6-14 funcția logică ȘI-negat

Dacă luăm funcția SAU prezentată mai sus și inversăm fiecare intrare vom obține funcția ȘI-negat. Intrările se inversează prin utilizarea contactelor normal-închise în loc de contacte normal-deschise.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 1      |
| 0 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 0      |

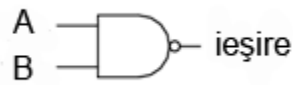


Fig. 6-15 funcția logică ȘI-negat

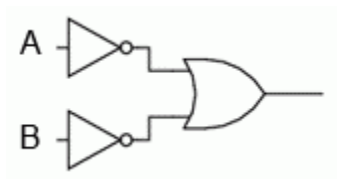


Fig. 6-16 funcția logică ȘI-negat

Lampa va fi energizată dacă unul dintre contacte nu este acționat, și se va stinge doar dacă ambele contacte sunt acționate simultan.

### 6.2.5 Funcția logică SAU-negat



Fig. 6-17 funcția logică SAU-negat

Asemănător, dacă luăm funcția ȘI implementată mai sus, și inversăm intrările, obținem funcția logică SAU-negat. Inversarea intrărilor se realizează și în acest caz prin utilizarea contactelor normal-închise în loc de contacte normal-deschise.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 1      |
| 0 | 1 | 0      |
| 1 | 0 | 0      |
| 1 | 1 | 0      |



Fig. 6-18 funcția logică SAU-negat; simbol

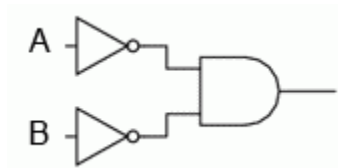


Fig. 6-19 funcția logică SAU-negat; simbol

Din cele observate mai sus, putem trage unele concluzii, și anume: contactele paralele sunt echivalente cu o poartă logică SAU; contactele serie sunt echivalente cu o poartă ȘI; contactele normal-închise sunt echivalente cu o poartă NU (negare).

### 6.2.6 Funcția logică SAU-exclusiv

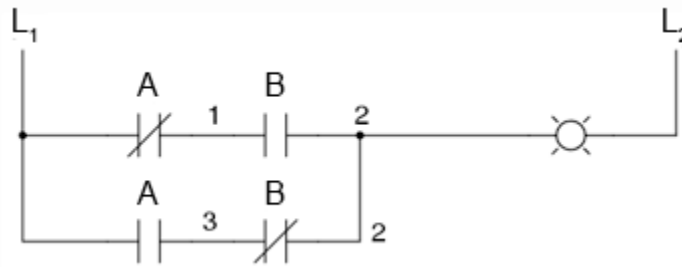


Fig. 6-20 funcția logică SAU-exclusiv

Putem construi circuite logice combinaționale prin gruparea contactelor în aranjamente serie-parallel. În exemplul alăturat, funcția SAU-exclusiv este construită prin combinarea porților ȘI, SAU și NU.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 0      |



Fig. 6-21 funcția logică SAU-exclusiv; simbol

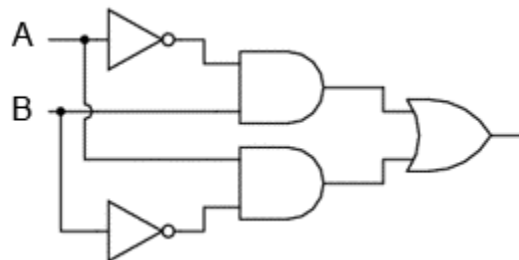


Fig. 6-22 funcția logică SAU-exclusiv; simbol

Linia de sus (contactul normal-închis A în serie cu, contactul normal-deschis B) este echivalentă cu partea de sus a combinației de porți logice NU/ȘI. Linia de jos (contactul normal-deschis A în serie cu, contactul normal-închis B) este echivalentă cu partea de jos a combinației de porți NU/ȘI. Conexiunea în paralel a celor două linii în punctul 2, formează un circuit echivalent SAU. Acest lucru permite energizarea lămpii fie prin linia 1 fir prin linia 2.

Pentru realizarea funcției SAU-exclusiv a trebuit să folosim două contacte pe o singură intrare: un contact pentru intrarea directă, iar celălalt contact pentru intrarea inversată. Cele două contacte A din diagrama de mai sus sunt acționate fizic de același mecanism. Același lucru este valabil și pentru contactele B. Această legătură „fizică” dintre contacte este scoasă în evidență prin marcarea identică a contactelor. Nu există nicio limită a numărului de contacte ce pot fi reprezentate pe același releu. Fiecare nou contact adăugat unui releu sau unui comutator, fie că este contact normal-închis sau normal-deschis) este reprezentat prin același simbol.

### 6.2.7 Marcarea compusă

În unele situații, se folosește o marcă compusă de genul „A-1” și „A-2” în loc de „A” pentru ambele contacte ale aceluiași dispozitiv. Acest lucru este folositor mai ales în cazul în care dorim să scoatem în evidență care seturi de contacte, din fiecare dispozitiv, este utilizat pentru care parte a circuitului. Pentru simplitate însă, nu vom folosi o asemenea notație în cele ce urmează. Dacă vedeți mai multe contacte marcate identic (A, B, etc.), puteți să fiți siguri că acele contacte sunt acționate de același mecanism.

### 6.2.8 Inversarea ieșirii

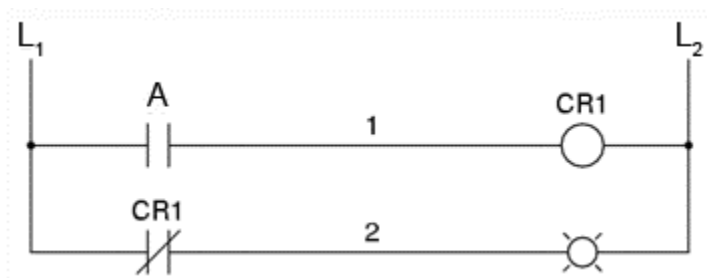


Fig. 6-23 negarea ieșirii unei funcții logice

Dacă dorim să inversăm ieșirea unei funcții logice realizate cu ajutorul unui comutator, trebuie să folosim un releu cu un contact normal-închis. De exemplu, dacă vrem să energizăm o sarcină bazându-ne pe negarea (funcția NU) unui contact normal-deschis, putem realiza diagrama de sus.

| A | CR1 | Ieșire |
|---|-----|--------|
| 0 | 0   | 1      |
| 1 | 1   | 1      |



Fig. 6-24 funcția logică NU

Releul este indicat pe figură prin notația CR1 (releu de control 1). Atunci când bobina releului, simbolizată printr-un cerc pe prima linie, este energizată, contactul de pe linia a doua se deschide. Deschiderea acestui contact de-energizează lampa. De la comutatorul la bobina CR1, funcția logică este ne-inversată. Contactul normal-închis este acționat de bobina releului CR1, asigurând o funcție logică de negare (NU) pe lampă, inversă față de starea de acționare a comutatorului (A).

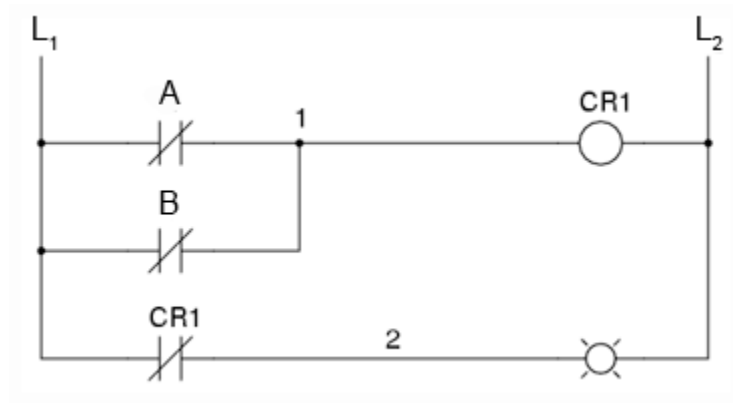


Fig. 6-25 diagrama ladder; funcția logică ȘI-negat realizată prin inversarea ieșirii

Să aplicăm această strategie de inversare uneia dintre funcțiile cu intrare inversată realizate mai sus. Spre exemplu, funcția logică ȘI folosind diagrama funcției ȘI-negat de mai sus. Putem inversa ieșirea cu ajutorul unui releu pentru realizarea unei funcții ne-inversate.

| A | B | Ieșire |
|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 0      |
| 1 | 0 | 0      |
| 1 | 1 | 1      |

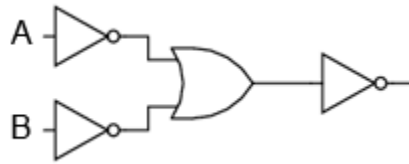


Fig. 6-26 funcția logică ȘI



Fig. 6-27 simbolul porții logice ȘI

De la comutator la bobina CR1, funcția logică realizată este cea a unei porți ȘI-negat. Contactele CR1 normal-închise inversează și transformă ieșirea funcției ȘI-negat într-o funcție ȘI.

### 6.3 Circuite permissive și de blocare

- Contactele permissive sunt instalate pentru întreruperea funcționării circuitului în cazul în care una sau mai multe condiții fizice nu sunt îndeplinite
- Contactele de blocare sunt instalate pentru întâmpinarea situației în care două acțiuni ce au loc simultan sunt incompatibile (alimentarea directă și indirectă a unui motor electric, simultan, de exemplu)

#### 6.3.1 Controlul aprinderii furnalelor

O aplicație practică a logicii digitale, bazate pe relee și comutatoare, constă în controlul sistemelor în care există o serie de condiții ce trebuie îndeplinite, înainte ca un echipament să poată porni în siguranță. Un exemplu bun este cel al aprinderii furnalelor.

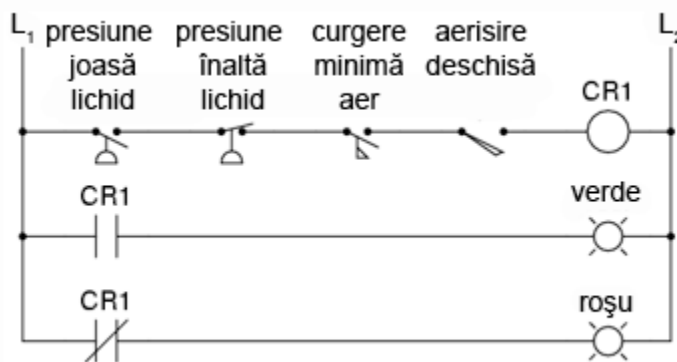


Fig. 6-28 circuit de control al aprinderii furnalelor

Pentru pornirea în siguranță a acestora, sistemul de control trebuie să ceară „permisiunea” câtorva comutatoare de proces, printre care: comutatoare de presiune joasă și înaltă, comutatoare pentru verificarea funcționării ventilatorului, a poziției ușii de acces, etc. Fiecare condiție de proces se numește permisivă, iar fiecare contact permisiv este conectat în serie. Prin urmare, dacă oricare dintre contacte detectează o condiție de nesiguranță, circuitul se va deschide.

Dacă toate condițiile sunt îndeplinite, CR1 se va energiza iar lampa verde se va aprinde. În realitate, nu doar lampa se energizează. De obicei există un releu de control, sau o valvă de fluid, ce este plasată pe acea linie a diagramei. Aceasta se va energiza când toate contactele permissive sunt „în regulă”: adică, închise. Dacă oricare dintre condițiile permissive nu este îndeplinită, linia de sus a diagramei va rămâne întreruptă, CR1 se va de-energiza, iar lampa roșie se va aprinde.

Contactul pentru presiunea înaltă a lichidului este un contact normal-închis. Acest lucru se datorează faptului că dorim deschiderea contactului doar în cazul în care presiunea lichidului devine prea mare. Din moment ce condiția „normală” a oricărui comutator de presiune este îndeplinită când presiunea aplicată asupra sa este zero, și dorim ca acest comutator să se deschidă în cazul unei presiuni excesive, trebuie să alegem un comutator ce este închis în starea sa normală.

### 6.3.2 Controlul pornirii motoarelor electrice

O altă aplicație practică a releelor constă în controlul sistemelor în care dorim ca două evenimente incompatibile să nu aibă loc în același timp.

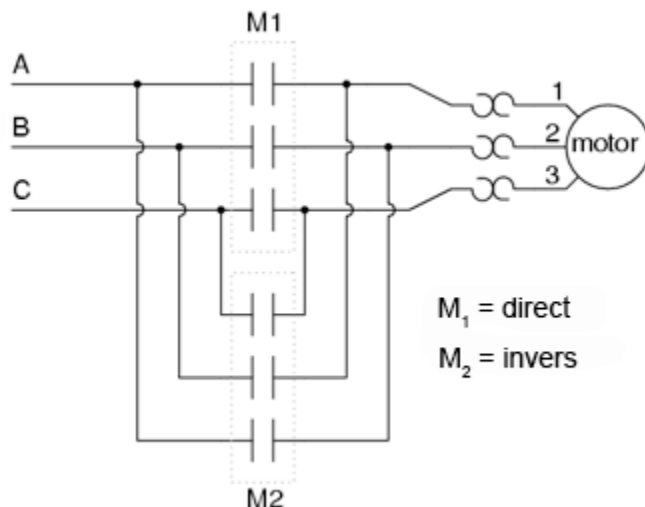


Fig. 6-29 inversarea fazei unui motor electric

Un exemplu în acest sens constă în controlul direcției de rotație a unui motor electric. Sunt utilizate contactoare pentru schimbarea polarității (sau secvenței fazelor) unui motor electric. Un contactor nu este altceva decât un releu electromecanic folosit pentru comutarea unor puteri mari pe la bornele sale. Nu dorim însă ca atât contactorul de polarizare directă cât și cel de polarizare inversă să fie energizate în același timp.

Când contactorul  $M_1$  este energizat, sistemul trifazat de alimentare (A, B și C) este conectat direct la terminalii 1, 2 și 3 ai motorului. Totuși, când contactorul  $M_2$  este energizat, fazele A și B sunt inversate, A fiind conectată la terminalul 2 al motorului, iar B la terminalul 1. Inversarea fazei duce la inversarea direcției de rotație a motorului.



Fig. 6-30 controlul pornirii unui motor electric

Să examinăm circuitul de control a acestor două contactoare. În dreapta avem un contact normal-închis (OL). Acesta este contactul termic de supra-încălzire ce este activat de elementele de „încălzire” conectate în serie cu fiecare fază a motorului de c.a. Dacă acestea se încălzesc prea tare, contactul va trece de la starea normală (închisă) la starea deschisă. Acest lucru nu va permite energizarea niciunui contactor.



Acest sistem de control este suficient, atâta timp cât nimeni nu apasă ambele butoane simultan. Dacă acest lucru se întâmplă însă, fazele A și B vor fi scurt-circuitate, datorită faptului că fazele A și B sunt conectate direct la motor prin intermediul contactorului  $M_1$ , iar contactorul  $M_2$  le inversează. Faza A se va afla în scurt-circuit cu faza B și invers. Evident, acesta nu este un sistem de control foarte bun.

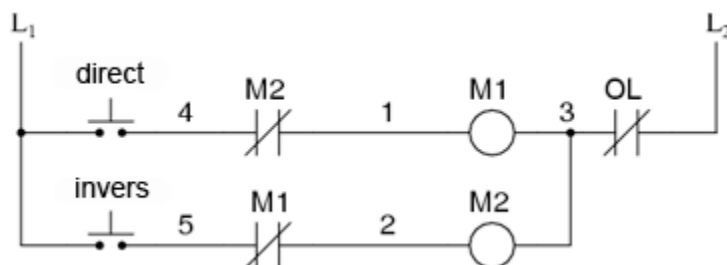


Fig. 6-31 diagrama ladder; controlul pornirii unui motor electric

Pentru a preveni acest lucru, putem să proiectăm circuitul astfel încât energizarea unuia dintre contactoare să prevină energizarea celeilalte. Acest lucru se numește blocare, și se poate realiza prin utilizarea de contacte adiționale pe fiecare contactor.

Acum când  $M_1$  este energizat, contactul auxiliar normal-închis de pe linia a două se va deschide, prevenind astfel energizarea lui  $M_2$ , chiar dacă butonul „invers” este apăsat. Asemănător, energizarea lui  $M_1$  nu este posibilă atunci când  $M_2$  este energizat. Observați că au fost adăugate numerotații suplimentare ale firelor (4 și 5) pentru a reflecta modificările.

Trebuie menționat faptul că aceasta nu este singura metodă de blocare a contactoarelor pentru prevenirea scurt-circuitului. Unele contactoare sunt echipate cu dispozitive de blocare mecanice. Pentru siguranța adițională însă, se pot folosi și metode de blocare electrice.

## 6.4 Circuite logice cu autoprotecție

### 6.4.1 Siguranța la funcționare

Circuitele logice, fie că sunt compuse din relee electromecanice sau din porți logice semiconductoare, pot fi construite sub mai multe variante pentru realizarea aceleiași funcții. Nu există în general o metodă „corectă” de proiectare a circuitelor logice complexe, dar există unele metode ce sunt mai bune decât altele.

În sistemele de control, siguranța joacă un rol important (sau cel puțin ar trebui să o facă). Dacă există mai multe metode de realizare a unui circuit digital care să realizeze aceeași funcție, iar una dintre metode este mai bună din punct de vedere al siguranței la funcționare, atunci acea metodă este mai bună decât celelalte.

### 6.4.2 Exemplu: instalarea unui sistem de alarmă în caz de incendiu

Să luăm ca și exemplu un sistem simplu și să vedem cum îl putem implementa folosind relee logice. Să presupunem că un laborator mare sau o clădire industrială urmează să fie echipată cu un sistem de alarmă în caz de incendiu. Acest sistem urmează să fie activat de oricare dintre comutatoarele instalate în întreaga clădire. Sistemul ar trebui să funcționeze astfel încât sirena să se energizeze dacă oricare dintre comutatoare este acționat.

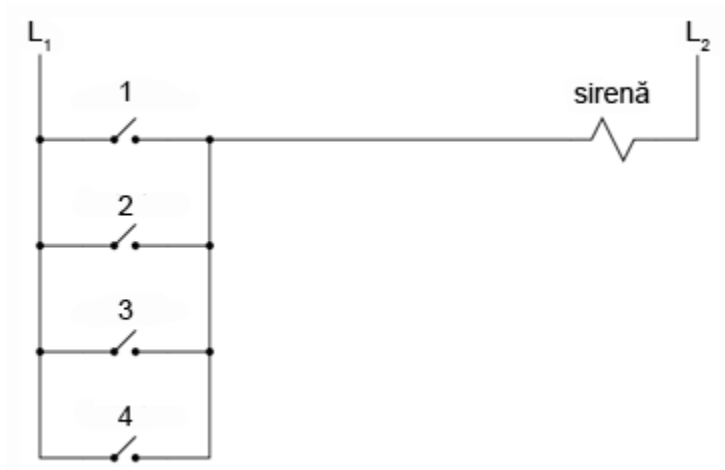


Fig. 6-32 sistem de alarmă în caz de incendiu

La o primă vedere, ar părea că circuitul logic este extrem de simplu: utilizăm contacte normal-deschise conectate în paralel, precum în figura alăturată. Practic, aceasta este o funcție logică SAU cu patru intrări. Putem extinde acest circuit pentru a include un număr oricât de mare de comutatoare, fiecare fiind adăugat în serie. Ne vom limita însă la patru în acest exemplu. În orice caz, acesta pare un sistem elementar și totul pare a fi în regulă.

#### 6.4.2.1 Defecțiunea la deschidere

Dar ce se întâmplă în cazul unui defect de circuit? Natura circuitelor electrice este astfel încât defectele de funcționare ce constau în deschiderea circuitului sunt mult mai frecvente decât oricare alt tip de defecte. Aceste deschideri ale circuitului se pot datora deschiderii contactelor releelor, întreruperea conductorilor, arderea siguranțelor fuzibile, etc. Luând acest lucru în considerare, pare normal să realizăm un circuit care să fie cât mai tolerant posibil la o astfel de defecțiune.

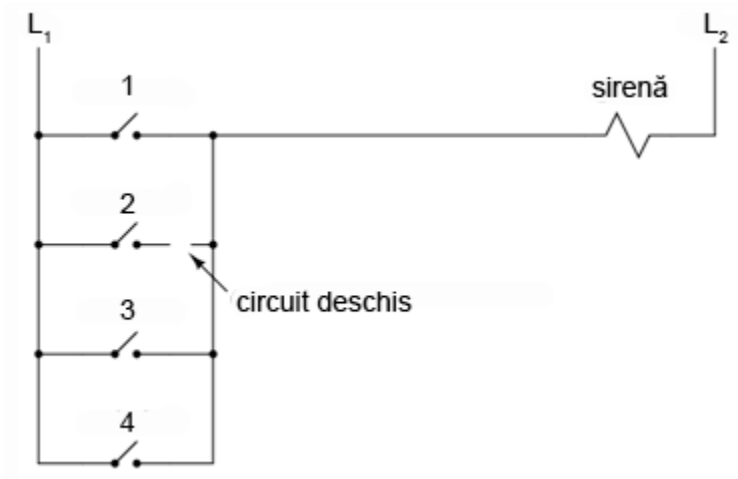


Fig. 6-33 sistem de alarmă în caz de incendiu; deschiderea accidentală

Să presupunem, de exemplu, ca firul conductor al comutatorului doi se distruge, ducând la deschiderea circuitului în acest punct. În cazul în care această defecțiune ar avea loc, comutatorul 2 nu ar mai putea alimenta sirena în cazul în care ar fi acționat (închis). Acest lucru, evident, nu este de dorit în cazul unui incendiu. Dacă sistemul nu este verificat periodic (o idee bună oricum), nimeni nu ar putea ști că există o problemă până când cineva nu ar încerca să utilizeze acel comutator în caz de urgență.

#### 6.4.2.2 Reproiectarea sistemului

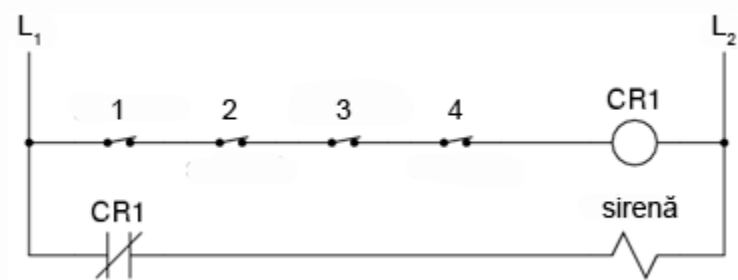


Fig. 6-34 sistem de alarmă în caz de incendiu; varianta a doua

Dar dacă am re-proiecta sistemul astfel încât alarma să se declanșeze (și) în cazul unui astfel de defect? Astfel, defectul conductorului ar duce la o alarmă de incendiu falsă. Totuși, acest scenariu este de preferat celui în care comutatorul nu funcționează deloc în cazuri de urgență. Pentru atingerea acestui scop, va trebui să refacem circuit, astfel încât alarma să fie declanșată de un comutator deschis și nu de unul închis. Comutatoarele vor trebui să fie normal-închise și în serie, alimentând bobina unui releu care la rândul ei activează un contact normal-închis ce controlează sirena.

Atunci când toate comutatoarele sunt de-energizate (starea normală a sistemului), bobina releului CR1 va fi energizată (prima linie). Contactul CR1 (linia a doua) prin urmare, va fi deschis, iar sirena nu este alimentată. Totuși, în cazul în care oricare dintre comutatoare este acționat, bobina CR1 se de-energizează, iar contactul CR1 revine la starea sa normală, și anume, închis. Alarma este în acest caz alimentată și se va declanșa. Adicional, dacă există un defect al conductorilor din prima linie a circuitului, alarma se va declanșa. Dacă se descoperă că alarma este falsă, personalul clădirii va ști că sistemul de alarmă este defect și necesită reparații.

#### **6.4.2.3 Observație**

Cu siguranța, circuitul este mult mai complex decât era înaintea introducerii releului de control CR1, iar sistemul poate și în acest caz să nu funcționeze corespunzător. Acest lucru se poate întâmpla dacă apare un defect în linia a doua a circuitului. Dar totuși, acest circuit este mai sigur și preferabil din acest punct de vedere.

## **6.5 Automate programabile (PLC)**

### **6.5.1 Scurtă istorie**

Înainte de apariția circuitelor logice cu semiconductori, sistemele logice de control erau proiectate și realizate exclusiv cu relee electromecanice. Sistemele și procesele ce necesită un control de tip „pornire/oprire” abundă în industria modernă, dar aceste sisteme sunt foarte rar realizate cu ajutorul releelor electromecanice sau a porților logice discrete. În schimb, sunt folosite calculatoare digitale ce pot fi programate și pot realiza o varietate de funcții logice.

La sfârșitul anilor 1960, o companie americană pe nume Bedford Associates, a lansat un dispozitiv de calcul denumit MODICON. Ca și acronim, acesta s-ar traduce prin „controler digital modular”. Acesta a devenit mai târziu și numele diviziei care se ocupa cu proiectarea, realizarea și vânzarea acestor calculatoare de control speciale. Desigur, au existat mai apoi și alte companii care au dezvoltat propriile lor variante ale acestui dispozitiv. Până la urmă, acest dispozitiv a primit denumirea de PLC (Programmable Logic Controller), sau, în traducere, automat programabil. Scopul unui PLC a fost de a înlocui releele electromecanice ca și elemente de logică, locul lor urmând a fi luat de calculatoare digitale semiconductoare. Un program stocat în memoria calculatorului este capabil să simuleze funcții logice realizate înainte prin interconectarea unui număr mare de relee electromecanice.

### **6.5.2 Definiția PLC-ului**

Un automat programabil (PLC) are mai multe intrări, prin intermediul cărora interpretează stări logice „înalte”, respectiv „joase”, stări transmise de senzori și comutatoare. De asemenea, există mai mulți terminali de ieșire, prin intermediul cărora dispozitivul transmite semnale „înalte” sau „joase” către contactoare, motoare, lămpi, sau orice alte dispozitive ce pot fi controlate prin intermediul semnalelor de tip „închis/deschis”. În încercarea de simplificare a modului de programare a PLC-urilor, limbajul de programare a fost proiectat astfel încât să semene cu diagramele ladder. Astfel, un inginer sau electrician obișnuit cu citirea diagramelor ladder, se poate adapta relativ ușor mediului de programare a PLC-urilor pentru realizarea acelorași funcții de control.

PLC-urile sunt „calculatoare industriale”, prin urmare, semnalele de intrare și de ieșire sunt de 120 V c.a., asemenea releelor electromecanice de control. Deși unele PLC-uri au intrări și ieșiri de c.c de amplitudini mai mici, aceasta este excepția și nu regula.

### 6.5.3 Structura unui PLC

Modul de conectare și de programare diferă puțin în funcție de modelul de PLC ales, dar aceste caracteristici sunt destul de similare pentru a permite o introducere „generală” a programării PLC-urilor în acest capitol.

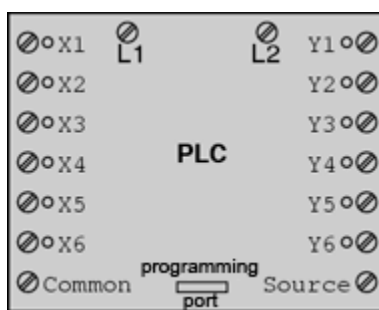


Fig. 6-35 automat programabil

Figura alăturată este cea a unui PLC, văzut din față. Cei doi terminali  $L_1$  și  $L_2$  din partea superioară sunt pentru alimentarea circuitului intern al dispozitivului cu 120 V c.a. Cei șase terminali din partea stângă se folosesc pentru conectarea dispozitivelor de intrare, fiecare terminal reprezentând un „canal” diferit cu propria sa notație (X). Terminalul din stânga jos (common), reprezintă masa, ce se conectează la  $L_2$ .

#### 6.5.3.1 Semnalele de intrare

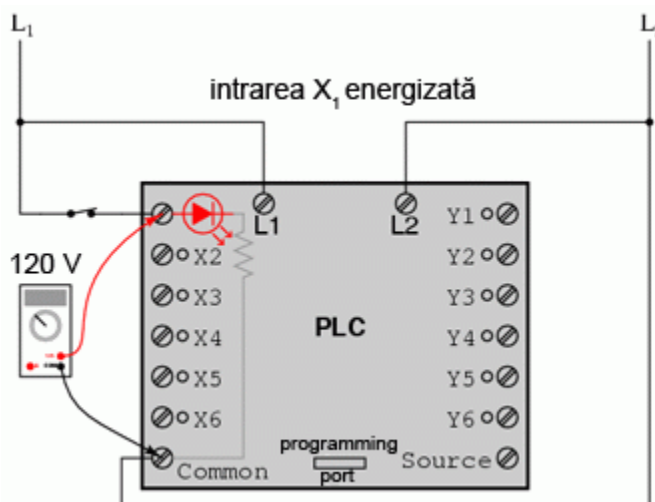


Fig. 6-36 automat programabil; intrarea X1 energizată

În interiorul carcasei PLC-ului, între fiecare terminal de intrare și terminalul de masă, există conectat câte un dispozitiv opto-izolator (LED). Acesta asigură o izolare electrică între semnalul logic „înalt” de la intrare și circuitul calculatorului, atunci când există o tensiune de 120 V c.a. aplicată între terminalul respectiv și masă. O intrare energizată poate fi „citită” prin intermediul unui LED aprins pe carcasa dispozitivului.

### 6.5.3.2 Semnalele de ieșire

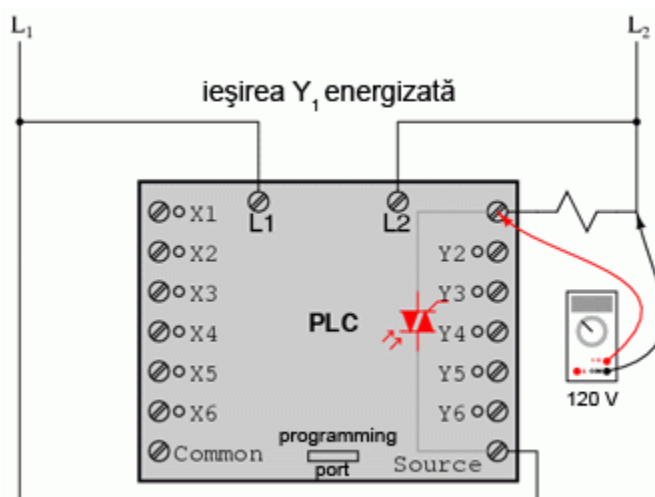


Fig. 6-37 automat programabil; ieșirea Y1 energizată

Semnalele de ieșire sunt generate de circuitul intern al PLC-ului prin activarea unui dispozitiv de comutare (tranzistor, triac, sau chiar releu electromecanic), conectând terminalul „Source” cu oricare dintre terminalii de

ieșire „Y”. Terminalul „Source” este la rândul său conectat de obicei la  $L_1$ . Din nou, o ieșire energizată poate fi citită de pe PLC prin intermediul unui LED.

În acest fel, PLC-urile sunt o interfață între dispozitivele reale precum comutatoare, lămpi, motoare, etc.

#### 6.5.4 Programarea PLC-ului

Logica circuitului este stabilită în interiorul PLC-ului prin intermediul unui program software. Acest program decide care ieșiri sunt energizate și sub ce condiții de intrare. Chiar dacă programul însuși pare a fi o diagramă logică, cu simboluri pentru rele și comutatoare, în realitate nu există astfel de dispozitive în interiorul PLC-ului. Acestea sunt doar contacte și bobine imaginare sau virtuale. Programul este introdus și vizualizat prin intermediul unui PC conectat la portul PLC-ului (programming port).

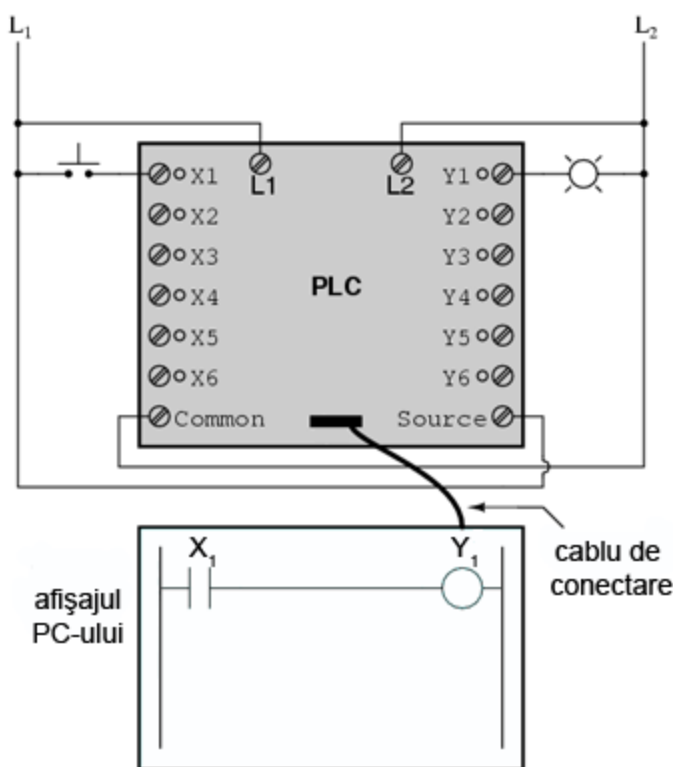


Fig. 6-38 programarea unui PLC

Să considerăm circuitul și programul alăturat. Atunci când comutatorul buton nu este apăsat, intrarea X1 a PLC-ului nu este alimentată. Urmărind programul, putem vedea un contact X1 normal-deschis în serie cu o bobină Y1. Puterea de pe bobina Y1 este și în acest caz zero. Prin urmare, ieșirea Y1 a PLC-ului rămâne de-energizată, iar lampa indicatoare conectată pe această ieșire nu se aprinde.

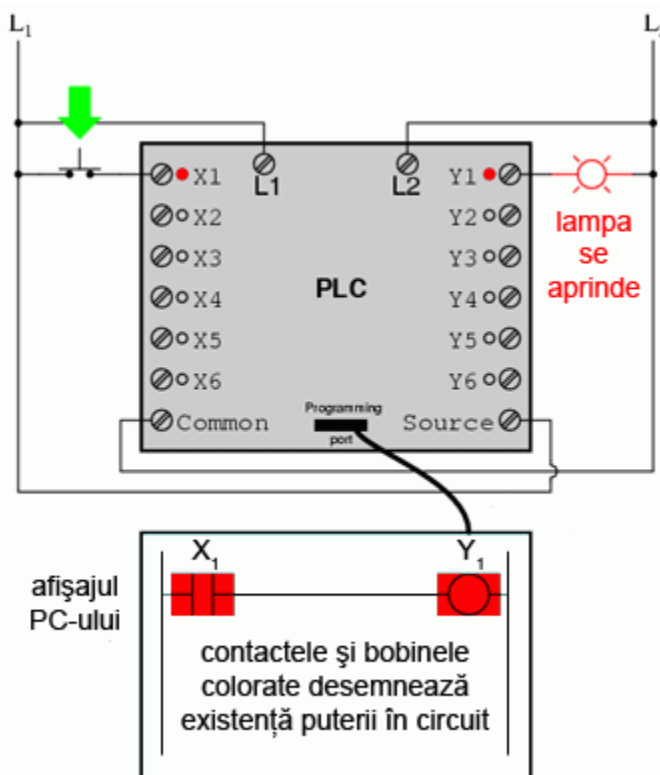


Fig. 6-39 programarea unui PLC

Apăsarea butonului însă, face ca intrarea  $X_1$  să fie alimentată. În acest caz, toate contactele  $X_1$  ce apar în program vor fi acționate. Energizarea intrării  $X_1$  va duce la închiderea contactului normal-deschis  $X_1$  alimentând bobina  $Y_1$ . Când bobina  $Y_1$  a programului este energizată, ieșirea reală  $Y_1$  va deveni energizată, iar lampa conectată pe ieșire se va aprinde.

Trebuie înțeles faptul că atât contactul  $X_1$  cât și bobina  $Y_1$ , conductorii de legătură și „puterea” ce apar pe afișajul PC-ului, toate sunt elemente pur virtuale. Acestea nu există ca și componente reale. Ele există doar ca și comenzi în interiorul programului unui calculator.

PC-ul este utilizat doar pentru vizualizarea și editarea softului PLC-ului, și nu este necesară prezența acestuia pentru funcționarea dispozitivului. Odată ce programul a fost încărcat în PLC de pe PC, calculatorul poate fi deconectat de la acesta, iar PLC-ul va continua să funcționeze conform instrucțiunilor programului. Afișajul (monitorul) calculatorului este redat în aceste figuri doar pentru a ajuta la înțelegerea principiilor de bază a funcționării PLC-urilor.

### 6.5.5 Reprogramarea funcțiilor unui PLC

Adevărata utilitate a PLC-ului o putem vedea atunci când dorim modificarea comportamentului unui sistem de control. Din moment ce PLC-ul este un dispozitiv programabil, comportamentul acestuia poate fi modificat prin



schimbarea comenzilor. Nu este nevoie de o reconfigurare a componentelor electrice conectate la intrarea și ieșirea acestuia.

De exemplu, să presupunem că dorim ca circuitul de mai sus să funcționeze exact invers: apăsarea butonului duce la închiderea lămpii, iar eliberarea acestuia la aprinderea ei. Soluția „hardware” ar consta în înlocuirea comutatorului buton normal-deschis cu un comutator buton normal-închis. Soluția software, aplicabilă cu ajutorul PLC-ului, constă în modificarea programului, astfel încât contactul  $X_1$  să fie normal-închis în loc de normal-deschis.

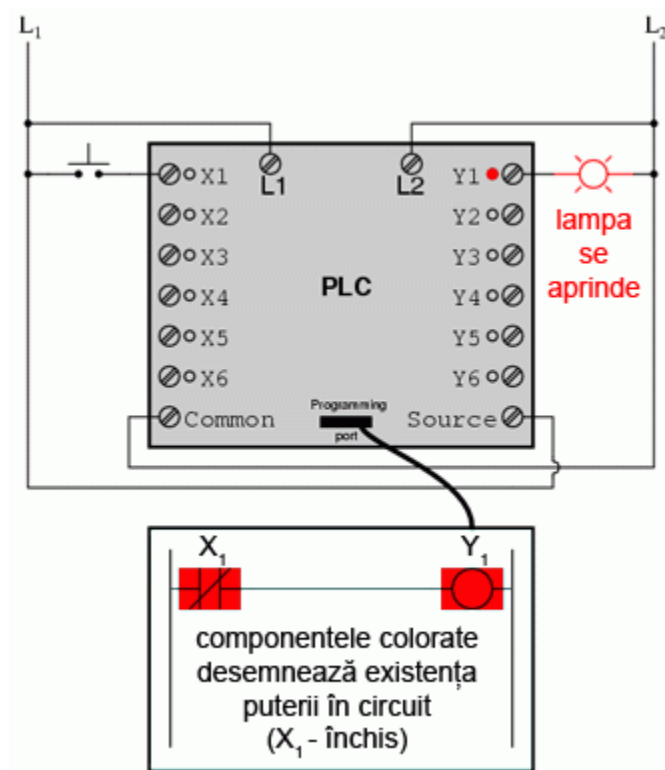


Fig. 6-40 programarea unui PLC

Sistemul modificat, în cazul în care comutatorul nu este acționat (nu este apăsat), este prezentat în figura alăturată.

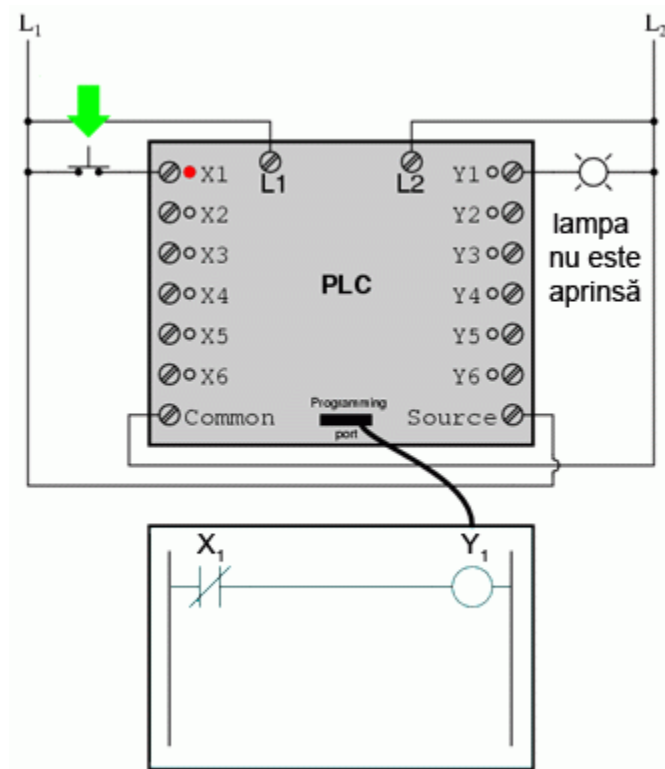


Fig. 6-41 programarea unui PLC

Când butonul este acționat, sistemul arată conform figurii alăturate.

### 6.5.6 Reutilizarea intrărilor

Un alt avantaj al implementării logicii de control în varianta software față de hardware, este că semnalele de intrare pot fi refolosite în interiorul programului ori de câte ori este necesar.

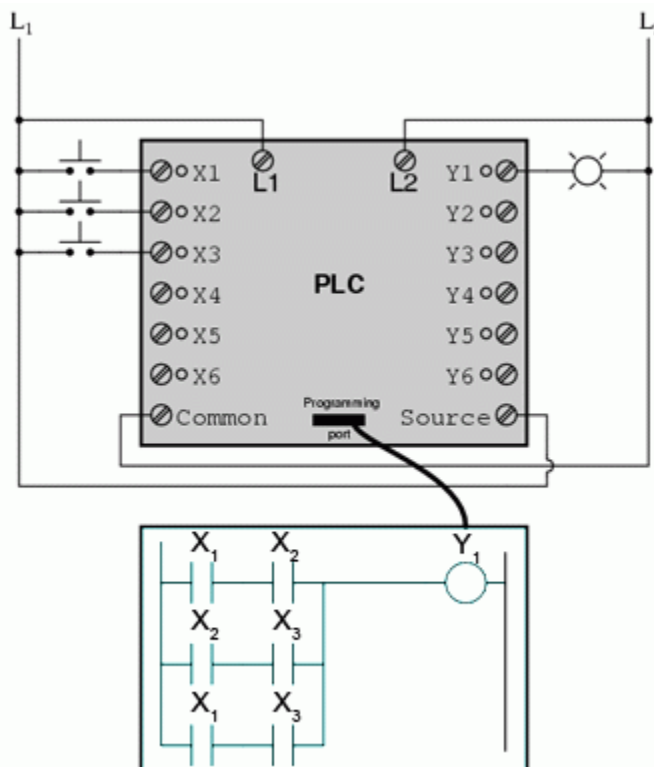


Fig. 6-42 reutilizarea intrărilor unui PLC

De exemplu, circuitul și programul alăturat sunt proiectate pentru a energiza lampa în cazul în care cel puțin două din cele trei comutatoare sunt acționate (închise) simultan.

Pentru realizarea unui circuit echivalent folosind relee electromecanice, ar fi trebuit să folosim trei relee cu câte două contacte normal-deschise fiecare. În total, am fi avut nevoie de șase contacte, câte două pe fiecare intrare. Folosind un automat programabil în schimb, putem refolosi intrările X ori de câte ori dorim prin intermediul soft-ului. Nu este necesară adăugarea unor noi componente, deoarece fiecare intrare cât și ieșire a unui PLC nu este nimic mai mult decât un simplu bit (0 sau 1) stocat în memoria digitală a dispozitivului. Nu există o limită teoretică a numărului de reutilizări ai acestor biți.

Mai mult, din moment ce fiecare ieșire este, la fel, doar un bit stocat în memoria PLC-ului, putem adăuga contacte (virtuale) în interiorul programului. De exemplu, putem adăuga un contact acționat de ieșirea Y a PLC-ului.

### 6.5.7 Controlul pornirii/opririi motorului electric

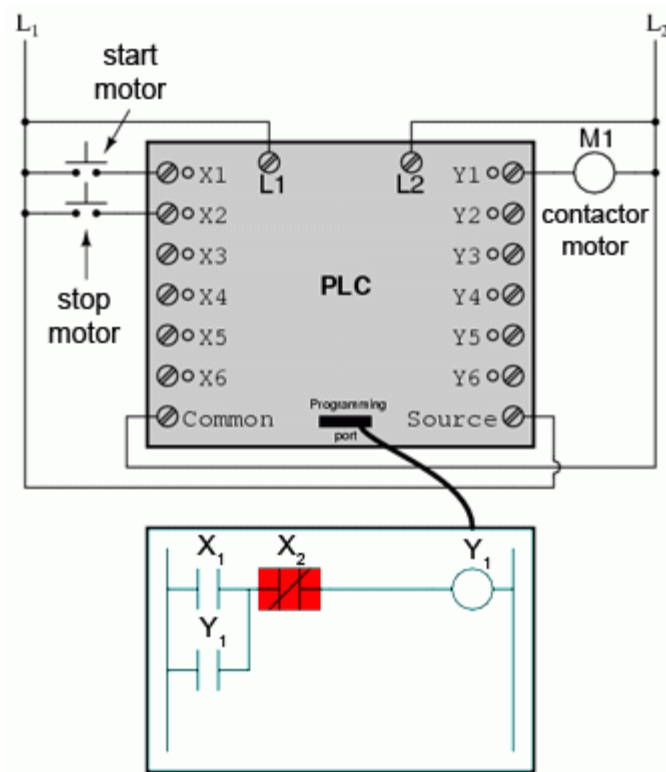


Fig. 6-43 controlul pornirii opririi motorului cu un PLC

Să considerăm exemplul alăturat. Acesta este un sistem de control al pornirii și opririi unui motor.

Comutatorul buton conectat la intrarea  $X_1$  este utilizat pentru pornirea motorului, iar comutatorul conectat la intrarea  $X_2$  pentru oprirea acestuia. Un contact adițional (virtual), adăugat în interiorul programului și denumit  $Y_1$ , utilizează bobina de ieșire ca și contact de reținere. Contactorul motorului continuă să fie energizat chiar și după ce butonul „start” este eliberat. Contactul  $X_2$  normal-închis este colorat, ceea ce înseamnă ca este închis și conduce energie electrică.

#### 6.5.7.1 Pornirea motorului

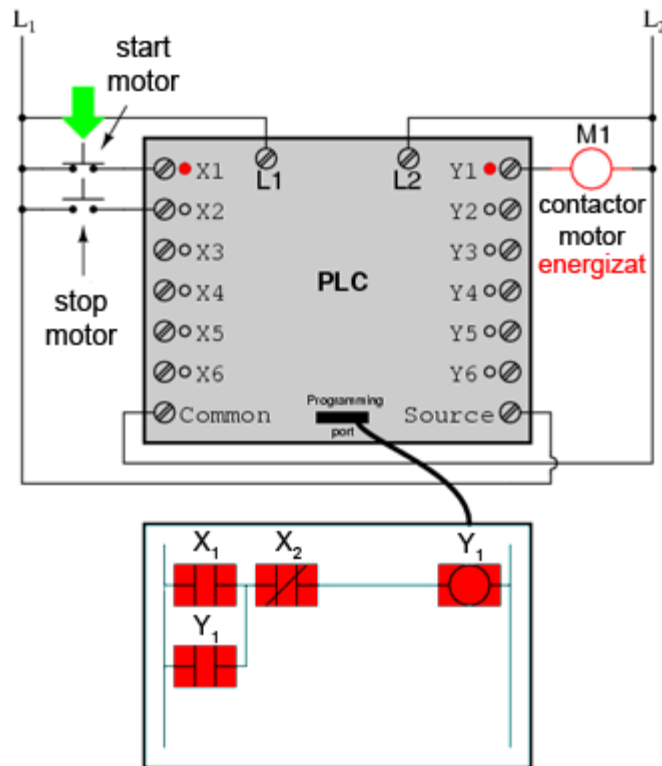


Fig. 6-44 pornirea motorului cu ajutorul PLC-ului

Dacă apăsăm butonul de „start”, intrarea  $X_1$  se va energiza, închizând contactul  $X_1$  din program. Bobina  $Y_1$  va fi energizată și se va aplica o tensiune de 120 V c.a. pe bobina contactorului motorului. Contactul paralel  $Y_1$  se va închide și el, iar circuitul va rămâne într-o stare energizată.

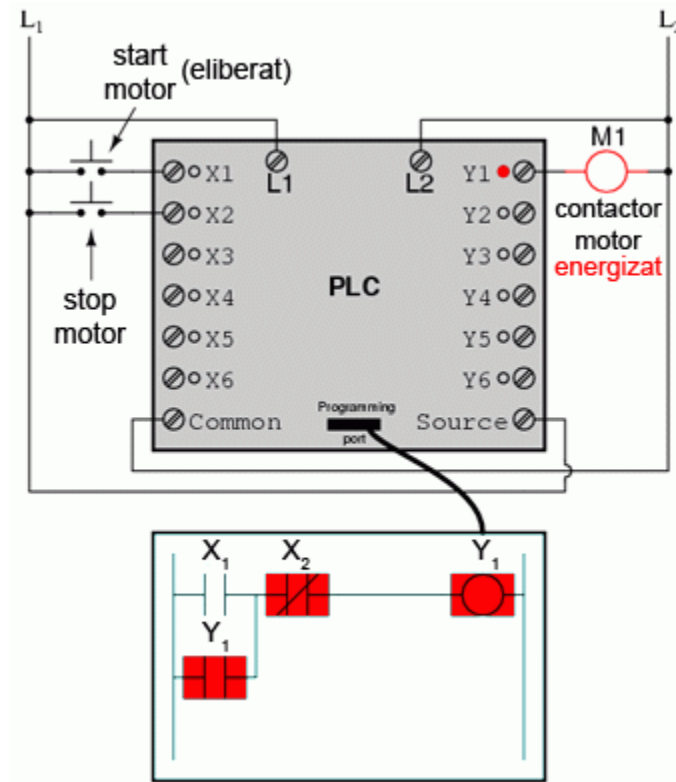


Fig. 6-45 pornirea motorului cu ajutorul PLC-ului

Acum, dacă eliberăm contactorul „start”, contactul  $X_1$  normal-deschis se va reîntoarce la poziția sa normală (deschis). Motorul va continua însă să funcționeze, deoarece contactul de reținere intern  $Y_1$  continuă să alimenteze bobina  $Y_1$ , care menține la rândul ei energizată ieșirea  $Y_1$ .

### 6.5.7.2 Oprirea motorului

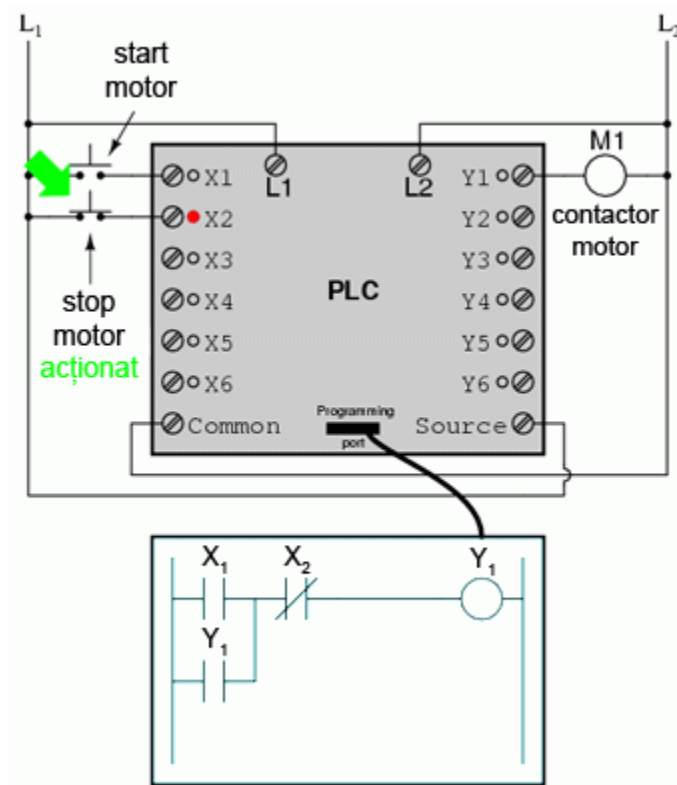


Fig. 6-46 oprirea motorului cu ajutorul PLC-ului

Pentru a opri motorul, trebuie să apăsăm pentru o durată scurtă comutatorul „stop”. Acesta va energiza intrarea  $X_2$  și va deschide contactul (virtual) normal-închis. Continuitatea circuitului înspre bobina  $Y_1$  va fi întreruptă.

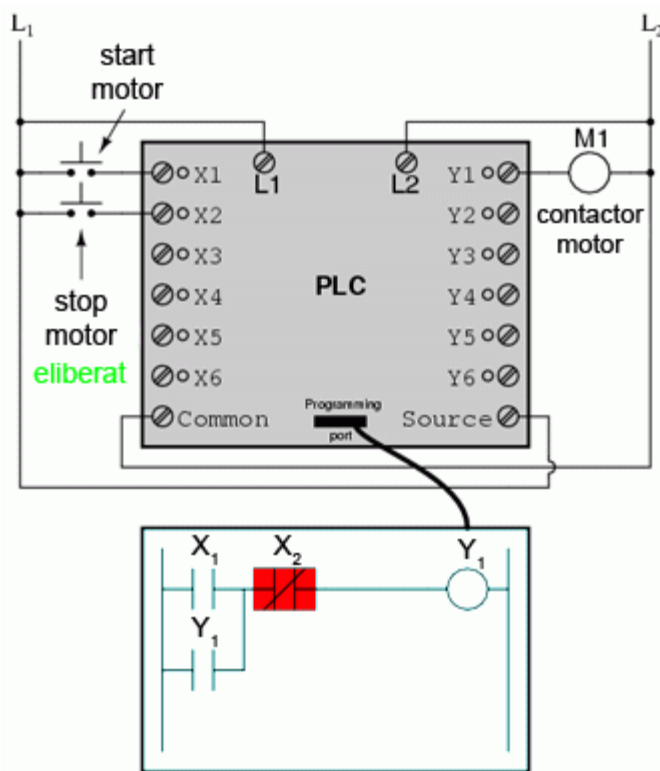


Fig. 6-47 oprirea motorului cu ajutorul PLC-ului

Când butonul de „stop” este eliberat, intrarea  $X_2$  se de-energizează. Contactul  $X_2$  se reîntoarce în poziția sa normală (închis).

Motorul nu va reporni însă până când comutatorul de „start” nu este acționat, datorită „pierderii” contactului de reținere  $Y_1$ .

### 6.5.8 Auto-protecția

Desigur, proiectarea PLC-urilor astfel încât să conțină elemente de autoprotecție este la fel de importantă precum în cazul sistemelor cu relee electromecanice. Va trebui tot timpul să luăm în considerare efectele unui circuit deschis (distrugerea firelor conductoare, de exemplu) asupra dispozitivelor controlate. În exemplul de mai sus, avem o problemă: în cazul în care conductorul comutatorului de intrare  $X_2$  (butonul de stop) prezintă un defect (circuit deschis), nu vom putea opri motorul!



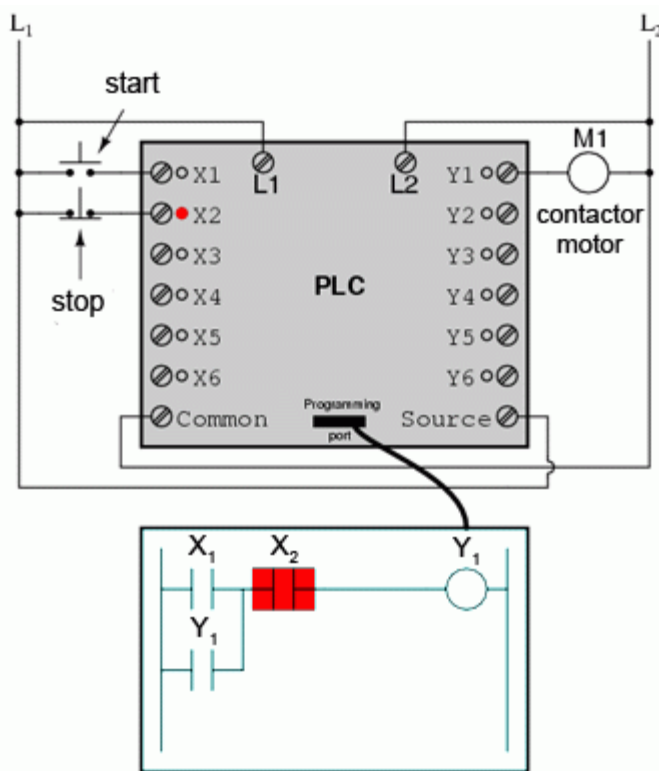


Fig. 6-48 asigurarea protecției motorului

Soluția acestei probleme constă în inversarea logicii între contactul  $X_2$  din interiorul programului PLC-ului și comutatorul „stop”. Când butonul „stop” nu este acționat, intrarea  $X_2$  este energizată, închizând contactul  $X_2$  din interiorul programului. Acest lucru permite pornirea motorului atunci când intrarea  $X_1$  este energizată, și permitea funcționarea acestuia chiar și atunci când butonul „start” este eliberat. Când butonul „stop” este acționat, intrarea  $X_2$  se va de-energiza, deschizând contactul  $X_2$  din soft-ul PLC-ului și oprind motorul. Prin urmare, nu există nicio diferență din punct de vedere funcțional între această variantă și cea precedentă.

Totuși, în caz de defect al conductorului pe intrarea  $X_2$  (circuit deschis), intrarea  $X_2$  va fi de-energizată. Efectul este similar acționării butonului de „stop”, rezultatul fiind oprirea imediată a motorului în caz de defect. Această variantă este mult mai sigură decât cea precedentă, în care, același tip de defect ar conduce la imposibilitatea opririi motorului.

### 6.5.9 Relee de control

Pe lângă elementele de intrare (X) și de ieșire (Y), PLC-urile conțin bobine și contacte ce nu a legătură propriu-zisă cu exteriorul. Acestea sunt folosite asemenea releelor de control (CR1, CR2, etc.) pentru asigurarea unui semnal logic inversor în caz de nevoie.

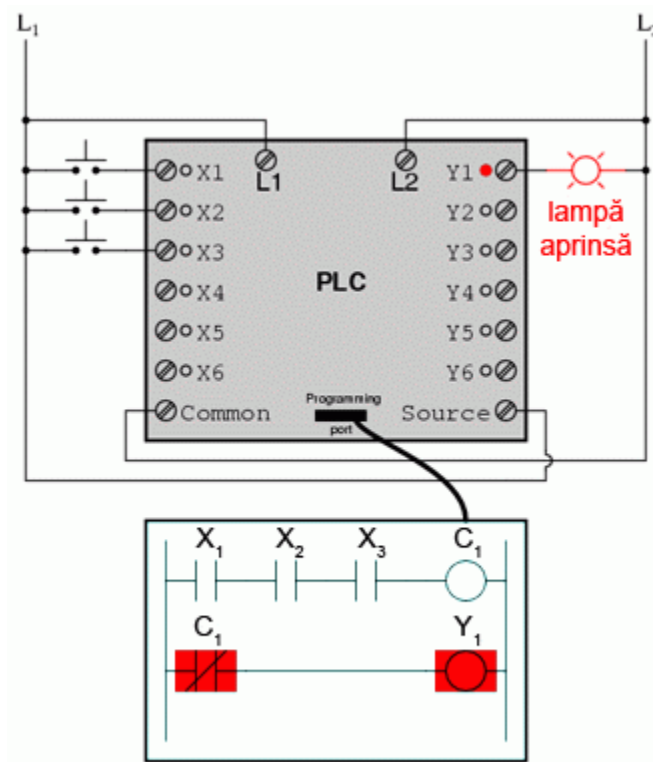


Fig. 6-49 utilizarea releelor de control interne

Pentru demonstrarea funcționării unui asemenea tip de releu „intern”, să considerăm circuitul și programul alăturat. Acesta este proiectat pentru a simula o poartă ȘI-negat cu trei intrări. Din moment ce elementele unui program PLC sunt desemnate printr-o singură literă, vom nota releul de control intern cu C1 și nu cu CR1.

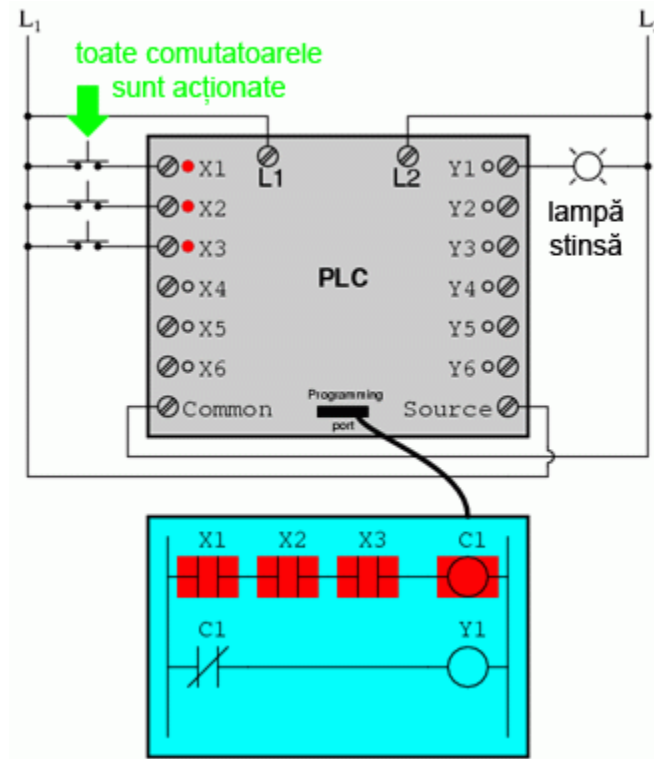


Fig. 6-50 utilizarea releelor de control interne

În acest circuit, lampa va rămâne aprinsă atâta timp cât oricare dintre butoane rămâne ne-acționat (eliberat). Pentru a opri lampa, va trebui să acționăm (apăsăm) toate cele trei butoane.

Un mare avantaj al automatelor programabile, avantaj ce nu poate fi duplicat cu ajutorul releelor electromecanice, constă în posibilitatea supravegherii și controlului la distanță a dispozitivelor prin intermediul rețelelor de calculatoare.

## 7 Algebra booleană

### 7.1 Aritmetica booleană

- Adunarea booleană este echivalentă unei porți logice SAU, precum și contactelor conectate în paralel
- Înmulțirea booleană este echivalentă unei porți logice ȘI, precum și contactelor conectate în serie
- Complementarea booleană este echivalentă unei porți logice NU, precum și contactelor normal-închise

#### 7.1.1 Numere binare și numere booleene

Trebuie înțeles încă de la început faptul că numerele booleene nu sunt tot una cu numerele binare. Numerele booleene reprezintă un sistem matematic total diferit de cel al numerelor reale, pe când notația binară este doar atât: o notație alternativă a numerelor reale. Cele două sunt adesea confundate datorită faptului că utilizează aceleași cifre: 0 și 1. Diferența constă în faptul că valorile booleene sunt limitate la un singur bit (fie 0, fie 1), pe când numerele binare pot fi compuse din mai mulți biți.

#### 7.1.2 Adunarea booleană

Să începem așadar capitolul de algebră booleană prin adunarea numerelor:

|  |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|
|  |   |   |   |   |   |
|  | 0 | + | 0 | = | 0 |
|  | 0 | + | 1 | = | 1 |
|  | 1 | + | 0 | = | 1 |
|  | 1 | + | 1 | = | 1 |
|  |   |   |   |   |   |

Primele trei sume nu sunt deloc ieșite din comun din punct de vedere al operației de adunare elementară. Ultima sumă în schimb, s-a dovedit a fi responsabilă de mai multă confuzie decât oricare alt element al electronicii digitale. Forma sa nu se supune principiilor de bază ale matematicii. Într-adevăr, aceasta contrazice principiile adunării numerelor reale, dar nu și a numerelor booleene. În cadrul matematicii booleene există doar două valori

posibile pentru oricare valoare și pentru orice operație matematică: 0 sau 1. Nu există valoarea „2”. Din moment ce suma „1 + 1” nu poate fi 0, prin eliminare, această sumă trebuie să fie 1.

De asemenea, nu contează nici câți termeni conține suma. Să considerăm următoarele sume, de exemplu:

[illegible]

Revenind la primul set de ecuații, putem observa că aceste sume nu sunt altceva decât tabelul de adevăr al unei porți logice SAU. Cu alte cuvinte, adunarea booleană corespunde funcției logice a porții SAU, precum și comutatoarelor conectate în paralel:

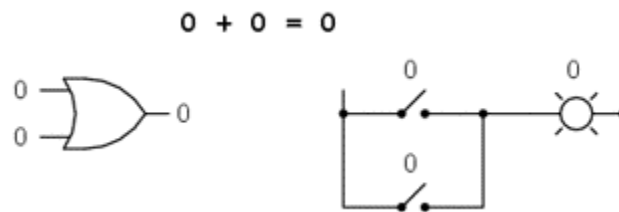


**Fig. 7-1 poartă logică SAU și comutatoare paralel (0 + 0)**

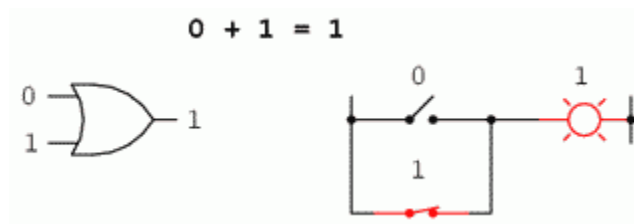


**Fig. 7-2 poartă logică SAU și comutatoare paralel (0 + 1)**

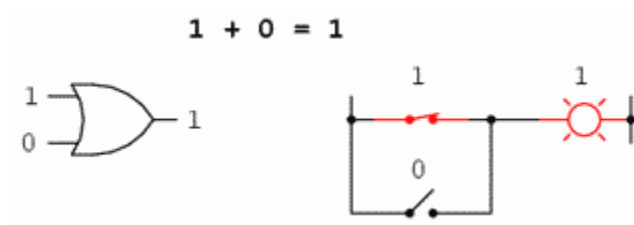


**Fig. 7-3 poartă logică SAU și comutatoare paralel (1 + 0)**

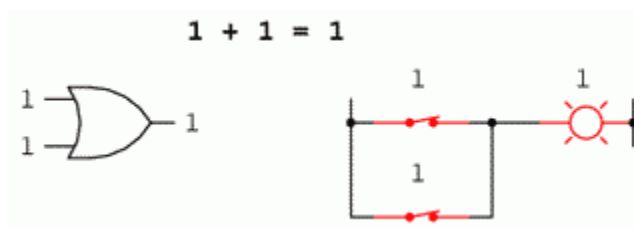


**Fig. 7-4 poartă logică SAU și comutatoare paralel (1 + 1)**

### 7.1.3 Scăderea și împărțirea booleană

În cadrul matematicii booleene nu există noțiunea de scădere. Scăderea implică existența numerelor negative:  $5 - 3$  este identic cu  $5 + (-3)$ , de exemplu. Dar în algebra booleană, nu există valori negative (doar 0 și 1).

De asemenea, nu există nici operația de împărțire booleană. Împărțirea nu este altceva decât o scădere compusă, la fel cum înmulțirea nu este altceva decât adunare compusă.

#### 7.1.4 Înmultirea booleană

Înmulțirea booleană este permisă, iar regulile sunt aceleași cu înmulțirea numerelor reale: orice număr înmulțit cu 0 este 0, și orice număr înmulțit cu 1 rămâne neschimbat:

|  |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|
|  |   |   |   |   |   |
|  | 0 | x | 0 | = | 0 |
|  | 0 | x | 1 | = | 0 |
|  | 1 | x | 0 | = | 0 |
|  | 1 | x | 1 | = | 1 |
|  |   |   |   |   |   |

Setul de ecuații ar trebui să vă fie cunoscut: sunt aceleași reguli ce se regăsesc în tabelul de adevăr al porții ȘI. Cu alte cuvinte, înmulțirea booleană corespunde funcției logice a porții ȘI, precum și comutatoarelor conectate în serie:

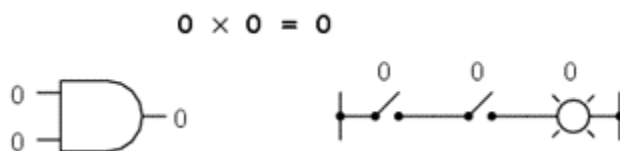


**Fig. 7-5 poartă logică ȘI și comutatoare serie (0 x 0)**

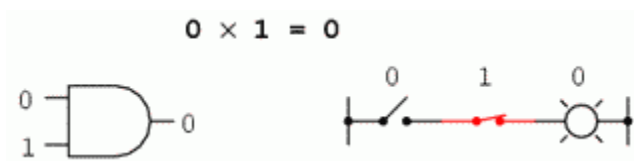


Fig. 7-6 poartă logică ȘI și comutatoare serie (0 x 1)

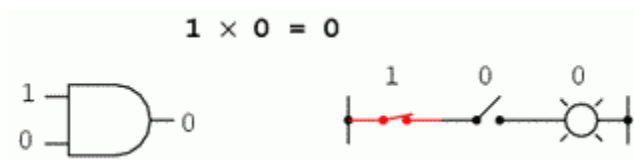


Fig. 7-7 poartă logică ȘI și comutatoare serie (1 x 0)

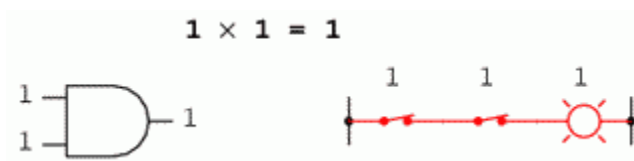


Fig. 7-8 poartă logică ȘI și comutatoare serie (1 x 1)

### 7.1.5 Variabile booleene și complementul lor

La fel ca și algebra „normală”, algebra booleană utilizează litere pentru desemnarea variabilelor. Dar, față de algebra „normală”, aceste variabile se trec tot timpul cu majuscule. Datorită faptului că există doar două stări posibile, fie 1, fie 0, fiecare variabilă posedă și un complement: valoarea opusă a acesteia. De exemplu, dacă variabila „A” este 0, atunci complementul ei este 1. Complementul se specifică prin intermediul unei linii orizontale deasupra variabilei, astfel:

|                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| Dacă: $A=0$         | Dacă: $A=1$         |
| Atunci: $\bar{A}=1$ | Atunci: $\bar{A}=0$ |

Fig. 7-9 complementul unei variabile booleene

Sub formă scrisă, complementul lui „A” este desemnat prin „A-negat”. Câteodată se utilizează simbolul „'” pentru reprezentarea complementului ( $A'$ ). De obicei însă, simbolul cu linie este mai folosit decât simbolul „'”. Motivele le vom afla puțin mai încolo.

Complementarea booleană este echivalentă cu o poartă logică NU, sau cu un contact normal-închis:

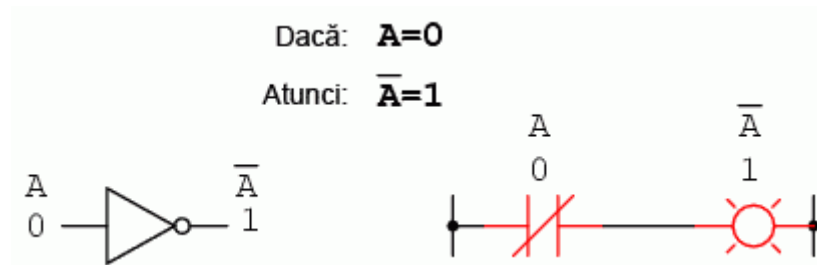


Fig. 7-10 complementul unei variabile booleene; poartă logică SAU și contact normal-închis

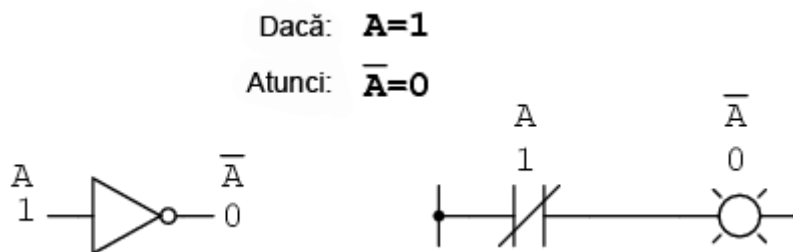


Fig. 7-11 complementul unei variabile booleene; poartă logică SAU și contact normal-închis

## 7.2 Identități algebrice booleene

- Suma dintre o variabilă booleană și 0 este variabila inițială
- Suma dintre o variabilă booleană și 1 este 1
- Suma unei variabile booleene cu ea însăși este egală cu variabila inițială
- Suma dintre o variabilă booleană și complementul ei este egală cu 1
- Produsul unei variabile booleene cu ea însăși este variabila inițială



- Produsul dintre o variabilă booleană și complementul acesteia este 0

### 7.2.1 Ce este o identitate

În matematică, o identitate este o afirmație valabilă pentru toate valorile posibile ale variabilei sau variabilelor implicate. Identitatea algebrică  $x + 0 = x$ , ne spune că suma dintre oricare variabilă ( $x$ ) și zero este egală cu variabila inițială ( $x$ ), indiferent de valoarea acesteia. Asemenea algebrei obișnuite, există identități specifice algebrei booleene. Aceste identități sunt bazate pe cele două stări posibile ale variabilelor booleene (0 sau 1).

### 7.2.2 Identități aditive

Prima identitate booleană este suma unei variabile cu zero. Rezultatul este valoarea variabilei inițiale. Această identitate nu este cu nimic diferită față de echivalentul algebric al numerelor reale:

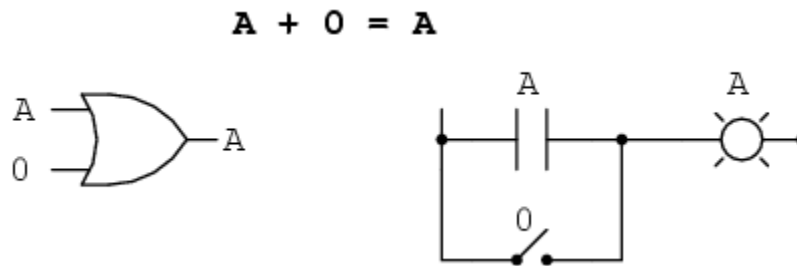


Fig. 7-12 identitate booleană; suma unei variabile cu zero

Indiferent de valoarea lui  $A$ , ieșirea va fi tot timpul aceeași. Când  $A = 1$ , ieșirea va fi 1; când  $A = 0$ , ieșirea va fi 0.

Următoarea identitate este cu siguranță diferită față de cele văzute în algebra obișnuită. Aici putem vedea că suma unei variabile cu 1 este 1:

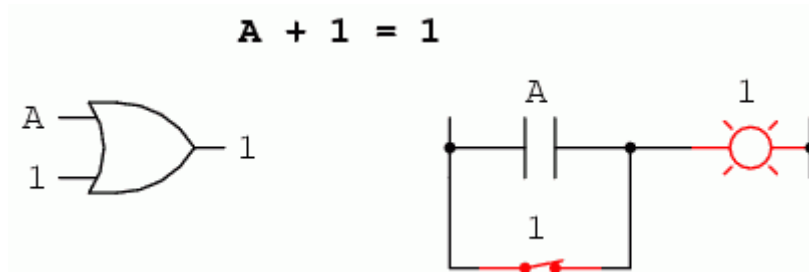


Fig. 7-13 identitate booleană; suma unei variabile cu unu

Indiferent de valoarea lui  $A$ , suma lui  $A$  cu 1 va fi tot timpul 1. Practic, ieșirea circuitului nu ține cont de valoarea lui  $A$ , ci este fixată pe 1.

Următoare identitate este suma unei variabile cu ea însăși. Practic, acest lucru înseamnă conectarea intrărilor unei porți logice SAU și activarea lor cu același semnal:

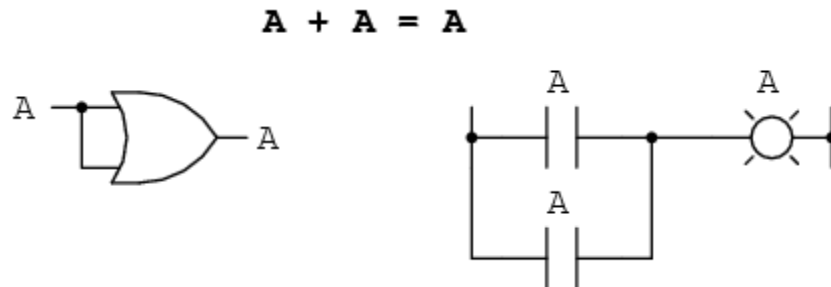


Fig. 7-14 identitate booleană; suma unei variabile cu ea însăși

În algebra numerelor reale, suma a două variabile identice este dublul variabilei inițiale ( $x + x = 2x$ ). Dar în cadrul algebrei booleene nu există „2”, ci numai 0 și 1. Prin urmare, nu putem spune că  $A + A = 2A$ . Adunarea unei variabile cu ea însăși este egală cu variabila originală:  $0 + 0 = 0$  și  $1 + 1 = 1$ .

Dacă introducem conceptul de complement într-o identitate aditivă, putem vedea un efect interesant. Din moment ce între orice variabilă și complementul acesteia trebuie să avem un 1, și din moment ce suma oricărei variabile booleene cu 1 este 1, suma dintre o variabilă și complementul ei trebuie să fie 1:

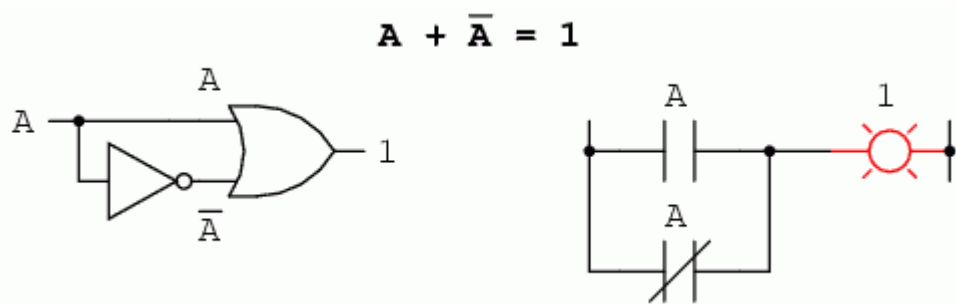


Fig. 7-15 suma booleană dintre o variabilă și complementul acesteia

### 7.2.3 Identități multiplicative

La fel cum există patru identități booleene aditive ( $A + 0$ ,  $A + 1$ ,  $A + A$  și  $A + A'$ ), există și patru identități multiplicative:  $A \times 0$ ,  $A \times 1$ ,  $A \times A$  și  $A \times A'$ . Dintre acestea, primele două nu sunt deloc diferite de identitățile echivalente ale algebrei numerelor reale:

$$0A = 0$$

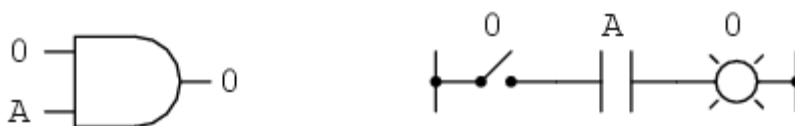


Fig. 7-16 identități algebrice multiplicative: produsul dintre o variabilă și zero

$$1A = A$$

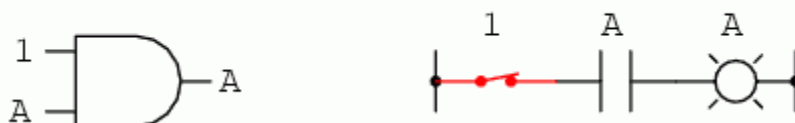


Fig. 7-17 identități algebrice multiplicative: produsul dintre o variabilă și unu

Cea de a treia identitate multiplicativă exprimă rezultatul unei variabile booleene înmulțită cu ea însăși. În algebra numerelor reale, acest tip de produs reprezintă pătratul variabilei în cauză ( $3 \times 3 = 3^2 = 9$ ). Conceptul de „pătrat” implică existența valorii 2, valoare ce nu poate fi exprimată prin algebra booleană. Nu putem spune că  $A \times A = A^2$ . În schimb, produsul unei valori booleene cu ea însăși este valoarea inițială, din moment ce  $0 \times 0 = 0$  și  $1 \times 1 = 1$ :

$$AA = A$$

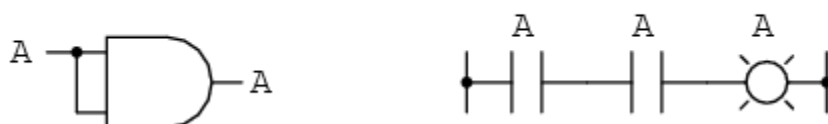


Fig. 7-18 identități algebrice multiplicative: produsul dintre o variabilă și ea însăși

A patra identitate multiplicativă nu are echivalent în algebra numerelor reale, deoarece utilizează complementul variabilei. Acest concept este unic matematicii booleene. Din moment ce trebuie să avem o valoare de „0” între oricare variabilă și complementul acesteia, și din moment ce produsul oricărei valori booleene cu 0 este 0, produsul dintre o variabilă și complementul acesteia trebuie să fie 0:

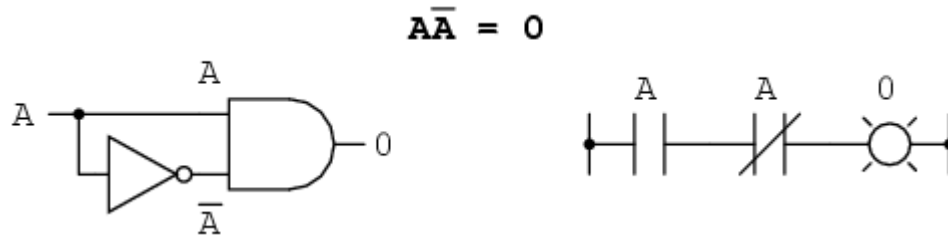


Fig. 7-19 identități algebrice multiplicative: produsul dintre o variabilă și complementul ei

În concluzie, avem patru identități booleene de bază pentru adunare și patru pentru produs (multiplicative):

| Identități aditive |  |  |  | Identități multiplicative |  |  |  |
|--------------------|--|--|--|---------------------------|--|--|--|
| $A + A = A$        |  |  |  | $0 A = 0$                 |  |  |  |
| $A + 1 = 1$        |  |  |  | $1 A = A$                 |  |  |  |
| $A + A = A$        |  |  |  | $A A = A$                 |  |  |  |
| $A + A' = 1$       |  |  |  | $A A' = 0$                |  |  |  |

Fig. 7-20 identități algebrice aditive și multiplicative

#### 7.2.4 Identitatea complementului dublu

O altă identitate caracteristică complementului unei variabile este cea a complementului dublu: o variabilă inversată de două ori. Rezultatul complementării duble a unei variabile este valoarea booleană inițială a variabilei. Acest lucru este similar înmulțirii cu -1 în algebra numerelor reale: un număr par de astfel de înmulțiri se anulează, iar rezultatul final este valoarea inițială:

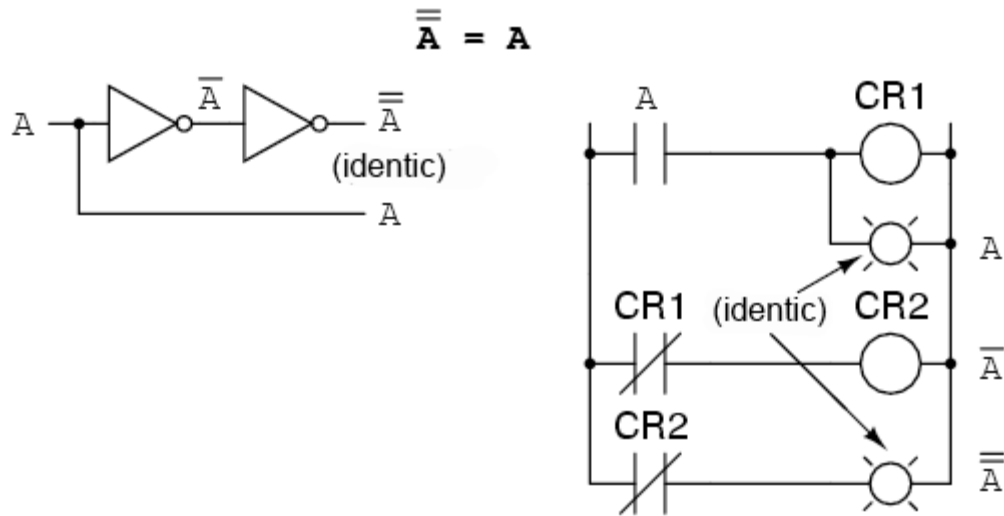


Fig. 7-21 identitate algebrică booleană; complementul dublu

### 7.3 Proprietăți algebrice booleene

- Adunarea și înmulțirea numerelor booleene este comutativă, asociativă și distributivă

Un alt tip de identitate matematică, denumită „proprietate”, descrie relația dintre variabilele unui sistem de numere.

#### 7.3.1 Comutativitatea

Una dintre aceste proprietăți poartă numele de comutativitate, și se aplică atât adunării cât și înmulțirii. Ceea ce ne spune comutativitatea este că, putem inversa ordinea variabilelor atât în cazul adunării, cât și în cazul înmulțirii. Rezultatul expresiei rămâne neschimbat în ambele situații. Comutativitatea adunării arată astfel:

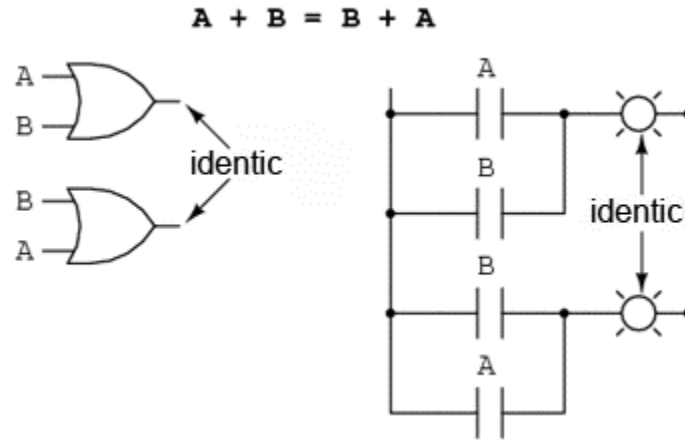


Fig. 7-22 comutativitatea adunării booleene

Comutativitatea înmulțirii:

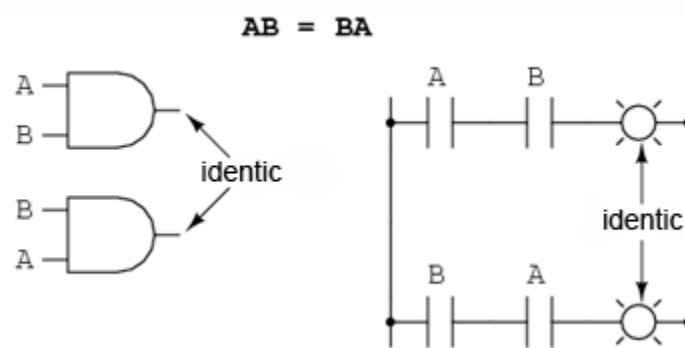


Fig. 7-23 comutativitatea înmulțirii booleene

### 7.3.2 Asociativitatea

Această proprietate spune că putem asocia grupuri de sume sau înmulțiri, prin intermediul parantezelor, fără a modifica rezultatul ecuațiilor. Și în acest caz, asociativitatea se aplică atât adunării cât și înmulțirii.

Asociativitatea adunării:

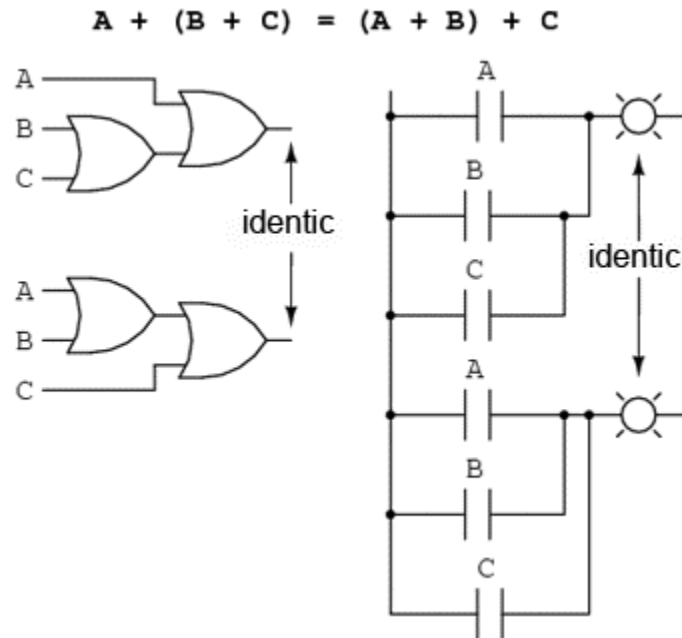


Fig. 7-24 asociativitatea adunării booleene

Asociativitatea înmulțirii:

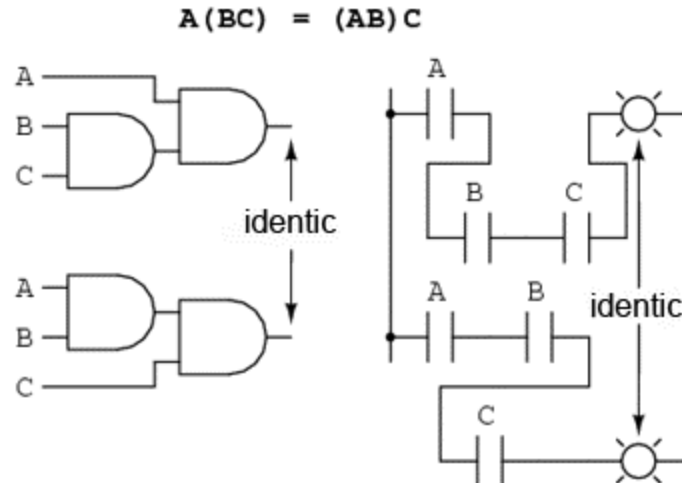


Fig. 7-25 asociativitatea adunării booleene

### 7.3.3 Distributivitatea

Proprietatea de distributivitate precizează modul de dezvoltare a unei expresii booleene formate din înmulțirea unei sume:

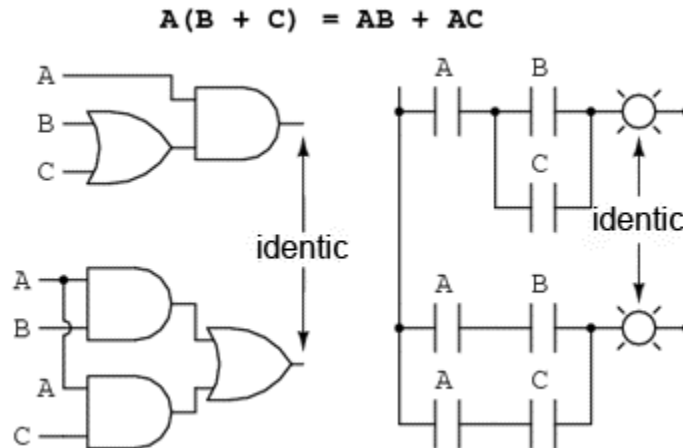


Fig. 7-26 distributivitatea booleană

În concluzie, avem trei proprietăți booleene de bază: comutativitatea, asociativitatea și distributivitatea:

| Proprietăți aditive         | Proprietăți multiplicative |
|-----------------------------|----------------------------|
| $A + B = B + A$             | $A B = B A$                |
| $A + (B + C) = (A + B) + C$ | $A (BC) = (AB) C$          |
| $A (B + C) = A B + A C$     |                            |

Fig. 7-27 proprietăți booleene: comutativitatea, asociativitatea și distributivitatea

## 7.4 Reguli de simplificare booleană

- Există trei reguli de bază ale simplificării booleene; acestea sunt folosite pentru reducerea expresiei inițiale la o formă mai simplă dar identică din punct de vedere funcțional

### 7.4.1 Scopul simplificării booleene

Una dintre cele mai practice aplicații ale algebrei booleene constă în simplificarea circuitelor logice. Dacă transcriem funcția logică a unui circuit sub formă booleană, și aplicăm anumite reguli ecuației rezultate, putem reduce numărul termenilor sau operațiilor aritmetice necesare realizării funcției inițiale. Ecuația simplificată poate fi apoi transformată înapoi sub formă de circuit logic. Sub noua formă, circuitul logic realizează aceeași funcție, dar



cu mai puține componente. Dacă un circuit echivalent poate fi realizat cu mai puține componente, costurile de realizare și de funcționare vor scădea.

Identitățile și proprietățile exprimate în secțiunile precedente sunt foarte utile simplificării booleene. Toate regulile prezentate în această secțiune sunt specifice matematicii booleene.

### 7.4.2 Prima regulă a simplificării booleene

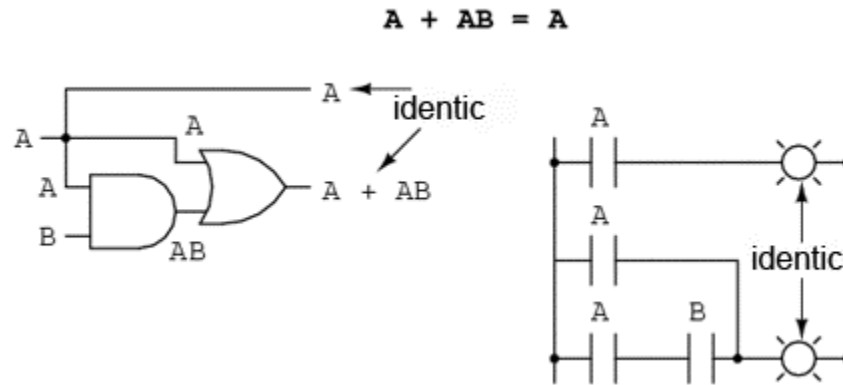


Fig. 7-28 prima regulă a simplificării booleene

Această regulă poate fi demonstrată simbolic prin scoaterea termenului comun (A) în afara sumei. Aplicând apoi regulile  $A + 1 = 1$  și  $1A = A$ , ajungem la rezultatul final:

|                                |
|--------------------------------|
| $A + AB = A(1 + B) = A(1) = A$ |
|--------------------------------|

Observați cum a fost aplicată regula  $A + 1 = 1$  pentru reducerea termenului  $(B + 1)$  la 1. Când aplicăm o regulă precum „ $A + 1 = 1$ ”, exprimată prin intermediul literei „A”, nu înseamnă că regula se aplică doar expresiilor ce conțin „A”. A-ul din această expresie exprimă faptul că aceasta se aplică oricărei variabile sau grupuri de variabile booleene.

De exemplu, expresia booleană  $ABC + 1$  se reduce tot la 1 prin intermediul aplicării identității  $A + 1 = 1$ . În acest caz, termenul standard „A” din definiția identității reprezintă întregul termen „ABC” al expresiei de mai sus.

### 7.4.3 A doua regulă a simplificării booleene

Următoarea regulă este aproximativ similară cu prima. Practic însă, ea este destul de diferită, iar demonstrația este puțin mai dificilă:

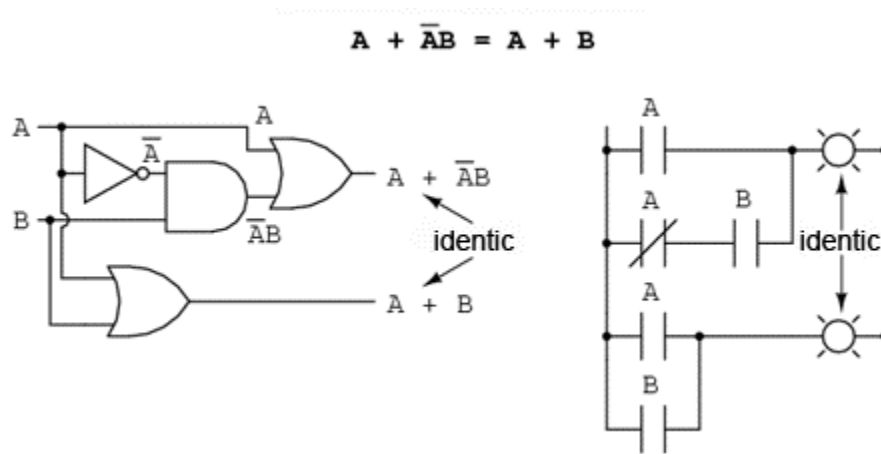


Fig. 7-29 a doua regulă a simplificări booleene

Pentru început, dezvoltăm termenul  $A$ , folosind regula precedentă ( $A + AB = A$ ). Scoatem termenul  $B$  în afara celei de-a doua sume, și aplicăm apoi identitatea  $A + A' = 1$ . La sfârșit, nu ne mai rămâne decât să aplicăm identitatea  $1A = A$  pentru obținerea rezultatului final:

|                                                             |
|-------------------------------------------------------------|
| $A + A'B = A + AB + A'B = A + B(A + A') = A + B(1) = A + B$ |
|-------------------------------------------------------------|

#### 7.4.4 A treia regulă a simplificării booleene

O altă regulă implică simplificarea expresiei unui produs de sume:

$$(A + B)(A + C) = A + BC$$

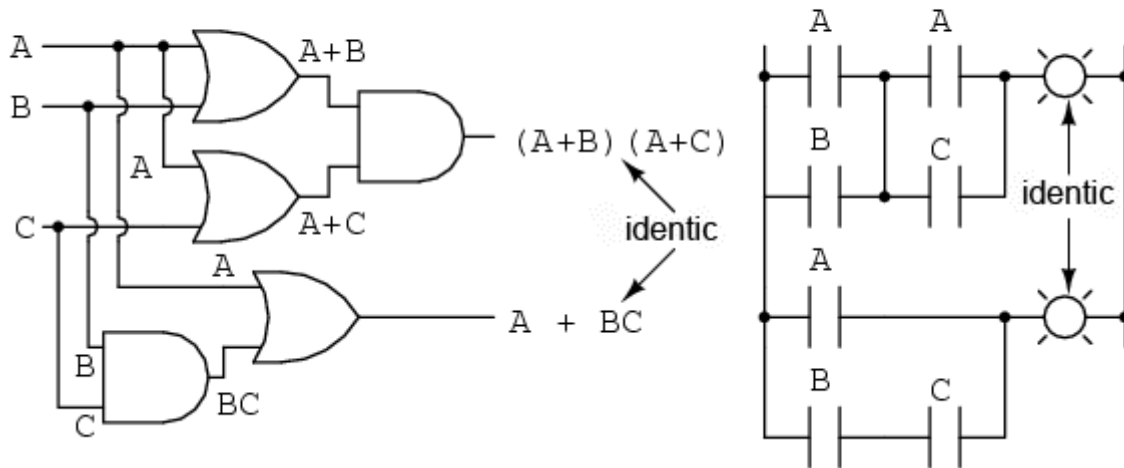


Fig. 7-30 a treia regulă a simplificări booleene

Pentru a demonstra această relație, realizăm pentru început înmulțirea celor două sume. Aplicăm apoi identitatea  $AA = A$ , apoi regula  $A + AB = A$  primilor doi termeni. Și, în sfârșit, aplicăm aceeași regulă,  $A + AB = A$  primilor doi termeni ai expresiei rezultate. Rezultatul este conform expresiei de mai sus:

$$(A + B)(A + C) = AA + AC + AB + BC = A + AC + AB + BC = A + AB + BC = A + BC$$

Pe scurt, acestea sunt cele trei reguli ale simplificării booleene:

$$\begin{aligned} A + AB &= A \\ A + A'B &= A + B \\ (A + B)(A + C) &= A + BC \end{aligned}$$

## 7.5 Simplificarea circuitelor logice

### 7.5.1 Simplificarea circuitelor cu porți logice

Să începem cu un circuit format din porți logice ce necesită o simplificare. Presupunem că intrările A, B și C sunt asigurate de comutatoare, senzori sau alte porți logice. Originea acestor semnale nu este importantă din punct de vedere al simplificării.

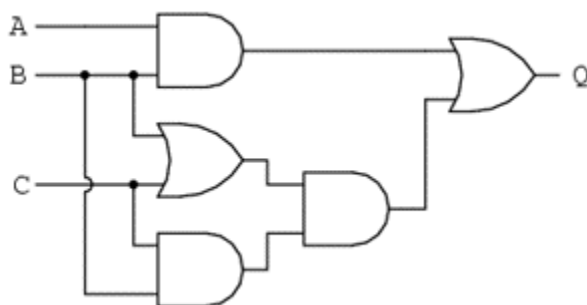


Fig. 7-31 circuit cu porți logice nesimplificat

#### 7.5.1.1 Scrierea expresiei booleene

Primul pas al simplificării constă în scrierea expresiei booleene pentru acest circuit. Acest pas este cel mai ușor de realizat dacă scriem sub-expresii pentru ieșirea fiecărei porți, corespunzător semnalelor de intrare. Este bine să reamintim faptul că o poartă SAU este echivalentă cu o adunare booleană, iar o poartă ȘI cu o înmulțire booleană. Să scriem așadar sub-expresii la ieșirea primelor trei porți:

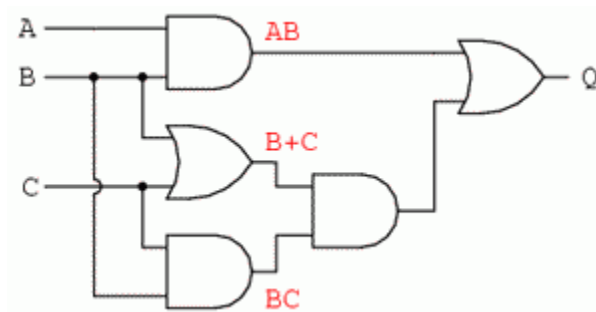


Fig. 7-32 scrierea sub-expresiilor la ieșirea porților

Scriem apoi sub-expresiile următoarelor seturi de porți. În cazul de față, avem doar o singură poartă pe nivelul următor:

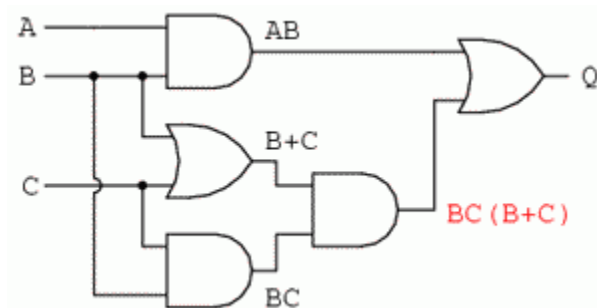


Fig. 7-33 scrierea sub-expresiilor la ieșirea porților

Și, în sfârșit, ieșirea (Q) circuitului logic este egală cu următoarea expresie:

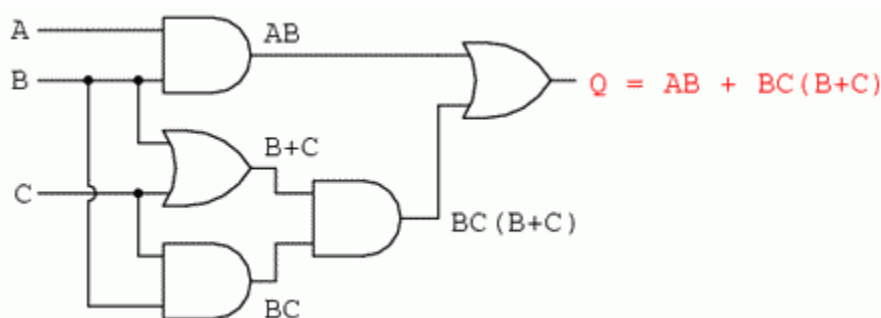


Fig. 7-34 scrierea sub-expresiilor la ieșirea porților

### 7.5.1.2 Simplificarea expresiei booleene

Acum că avem o expresie booleană, următorul pas este aplicarea regulilor algebrei booleene pentru reducerea expresiei de mai sus la forma ei cea mai simplă. Reamintim faptul că cea mai simplă formă este cea formă care necesită cele mai puține porți logice pentru implementarea ei.

Prin urmare, expresia  $AB + BC(B + C)$  poate fi redusă astfel: la primul pas realizăm înmulțirea termenilor; aplicăm apoi identitatea  $AA = A$  termenilor doi și trei; aplicăm identitatea  $A + A = A$  termenilor doi și trei rezultați; scoatem termenul comun B în față:

|                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------|
| $AB + BC(B + C) = AB + BB C + B C C = AB + B C + B C = AB + B C = B(A + C)$ |
|-----------------------------------------------------------------------------|

Expresia rezultată,  $B(A + C)$ , este mult mai simplă decât cea originală. Ea realizează însă aceeași funcție. Dacă vrei să verificai acest lucru, poți construi un tabel de adevăr pentru ambele expresii. Determinați apoi rezultatul Q (ieșirea circuitului) pentru toate cele opt combinații posibile dintre A, B și C pentru ambele circuite. Cele două tabele trebuie să fie identice.

### 7.5.1.3 Evaluarea expresiei booleene rezultate

Următorul pas constă în generarea unei scheme logice folosind această expresie booleană simplificată. Pentru realizarea acestui lucru, evaluăm expresia urmând ordinea matematică a operațiilor (înmulțirea înainte adunării, operațiile din interiorul parantezelor înainte celorlalte). La fiecare pas vom adăuga o nouă poartă. Porțile SAU sunt echivalente cu adunarea booleană, iar porțile ȘI sunt echivalente operației de înmulțirea booleană. În exemplul de față, începem construirea circuitului cu sub-expresia „ $A + C$ ”, expresie ce nu este altceva decât o poartă SAU:



Fig. 7-35 poartă logică SAU

Următorul pas în evaluarea expresiei  $B(A + C)$  constă în înmulțirea (poartă ȘI) semnalului B cu ieșirea porții precedente ( $A + C$ ):

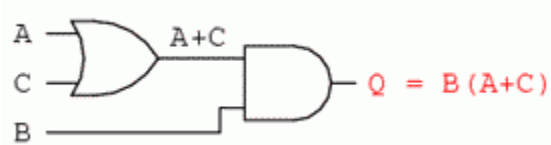


Fig. 7-36 evaluarea expresiei booleene

Evident, acest circuit este mult mai simplu decât cel original, având doar două porți logice în loc de cinci. O astfel de reducere a numărului de componente conduce la viteze de funcționare crescute (timpul de propagare a semnalului de la intrare la ieșire este mai scurt), consum de energie mai scăzut, cost mai mic și o fiabilitate mai ridicată.

### 7.5.2 Simplificarea circuitelor cu relee electromecanice

Circuitele cu relee electromecanice pot profita foarte mult de pe urma simplificării booleene. De obicei, acestea sunt mai lente, consumă mult mai multă energie, costă mai mult, iar durata de viață medie este mai scurtă decât cea a porților logice semiconductoare. Să considerăm așadar exemplul de mai jos:

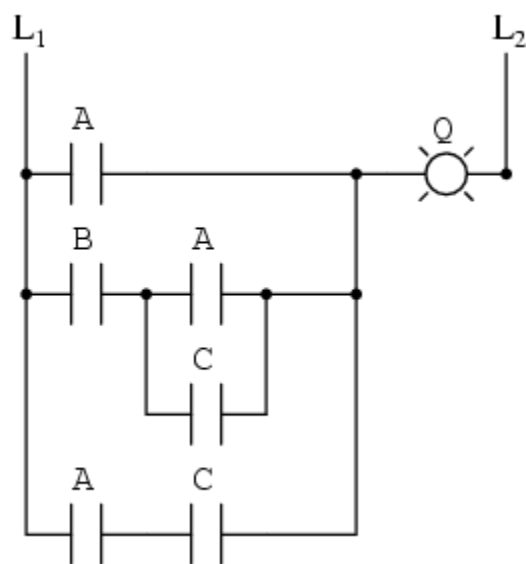


Fig. 7-37 circuit logic cu relee electromecanice

### 7.5.2.1 Scrierea expresiei booleene

Primul pas al reducerii acestui circuit la forma cea mai simplă este, din nou, scrierea circuitului sub forma unei expresii booleene. Cea mai simplă metodă de realizare a acestui lucru este asemănătoare cu metoda reducerii unui circuit rezistiv serie-paralel la o singură rezistență. De exemplu, să considerăm circuitul rezistiv de mai jos, cu rezistorii aranjați asemeni contactelor circuitului precedent.

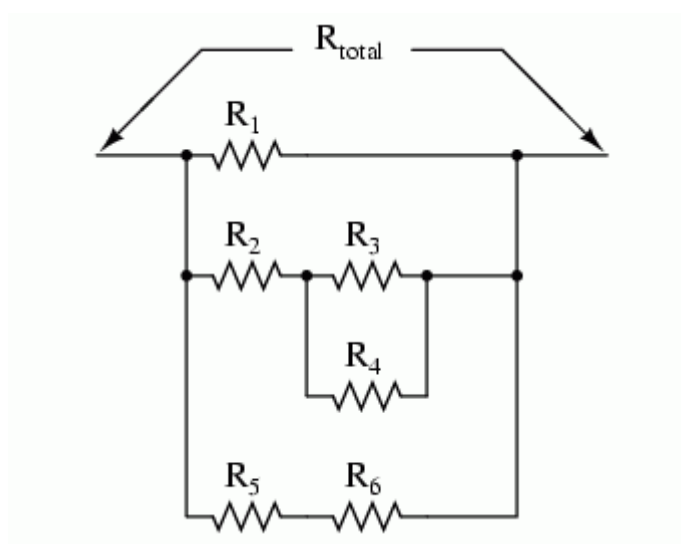


Fig. 7-38 circuit rezistiv serie-paralel

Formula corespunzătoare reducerii acestui circuit la o rezistență echivalentă, este următoarea:

$$R_{total} = R_1 // [(R_3 // R_4)] - -R_2 // (R_5 - -R_6]$$

Contactele paralele sunt echivalente cu adunarea booleană, iar contactele serie cu înmulțirea booleană. Expresia booleană a circuitului cu relee de mai sus se scrie urmând aceleași reguli care se regăsesc în cazul reducerii circuitelor serie-paralel la o rezistență totală echivalentă. Simplificarea ne este ușurată dacă scriem sub-expresii booleene la stânga fiecărei linii în parte:

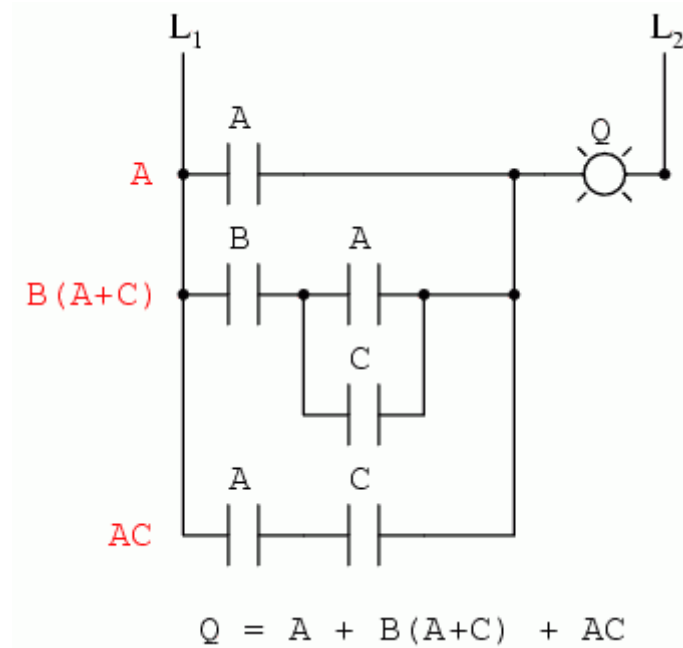


Fig. 7-39 circuit logic cu relee electromecanice

### 7.5.2.2 Simplificarea expresiei booleene

Acum că avem o expresie booleană, tot ceea ce trebuie să facem este să aplicăm regulile de simplificare pentru a aduce expresia la forma ei cea mai simplă (formă ce necesită cele mai puține relee pentru implementarea fizică).

Pașii sunt următorii: extindem termenul  $B(A + C)$ ; aplicăm regula  $A + AB = A$  primilor doi termeni; aplicăm regula  $A + AB = A$  primului termen și termenului al treilea:

|                                                               |
|---------------------------------------------------------------|
| $A + B(A + C) + AC = A + AB + BC + AC = A + BC + AC = A + BC$ |
|---------------------------------------------------------------|

### 7.5.2.3 Evaluarea expresiei booleene rezultate



După cum putem vedea, circuitul redus este mult mai simplu decât originalul, dar funcția logică pe care o îndeplinește este neschimbată:

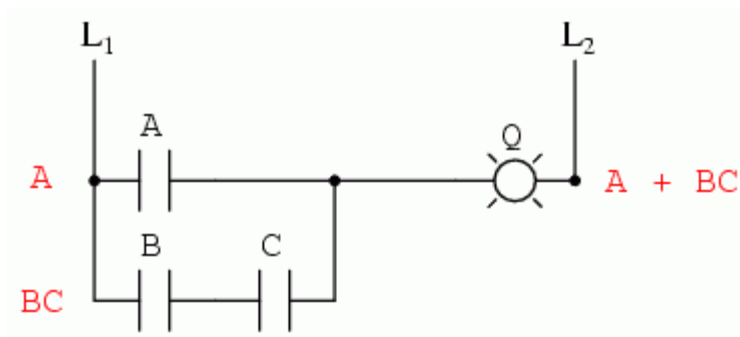


Fig. 7-40 circuit logic cu relee electromecanice; forma simplificată

## 7.6 Funcția SAU-exclusiv

- Expresia  $AB' + A'B$  (două porți ȘI și o poartă SAU), poate fi înlocuită de o singură poartă SAU-exclusiv

### 7.6.1 Simbolul operației SAU-exclusiv

Un element ce nu l-am întâlnit până în acest moment în operațiile booleene este funcția SAU-exclusiv. Deși funcția SAU este echivalentă cu o adunare booleană, funcția ȘI cu înmulțirea iar funcția NU cu complementarea, nu există un echivalent boolean pentru funcția SAU-exclusiv. Acest lucru nu ne împiedică însă să avem un simbol pentru reprezentarea ei:



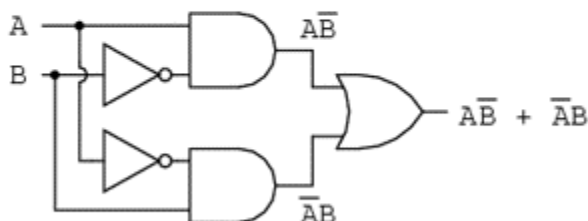
Fig. 7-41 poarta SAU-exclusiv; simbol

### 7.6.2 Echivalența operației SAU-exclusiv

Acest simbol este folosit foarte rar în expresiile booleene, deoarece identitățile, proprietățile și regulile de simplificare ce implică adunarea, înmulțirea și complementarea nu se aplică și acestei expresii. Totuși, există o modalitate de reprezentare a funcției SAU-exclusiv cu ajutorul funcțiilor SAU și ȘI:



...este echivalent cu...



$$A \oplus B = A\bar{B} + \bar{A}B$$

Fig. 7-42 funcția SAU-exclusiv realizată cu funcțiile SAU și ȘI

Ca și echivalență booleană, această regulă poate fi folositoare în cazul simplificării anumitor expresii booleene. Orice expresie de forma  $AB' + A'B$  (două porți ȘI și o poartă SAU), poate fi înlocuită de o singură poartă SAU-exclusiv.

## 7.7 Teoremele lui DeMorgan

- Teoremele lui DeMorgan descriu echivalență dintre porțile cu intrări inversate și porțile cu ieșiri inversate
- O poartă ȘI-negat este echivalentă cu o poartă SAU-negativă; O poartă SAU-negat este echivalentă cu o poartă ȘI-negativă

### 7.7.1 Definiția teoremelor lui DeMorgan

DeMorgan a dezvoltat o serie de reguli importante în algebra liniară cu privire la complementul de grup. Prin complementul de grup ne referim la complementul unui grup de termeni, și nu doar complementul unei singure variabile.

Țineți minte de la capitolul legat de porți logice, că inversând toate intrările unei porți, inversăm și funcția logică esențială a acesteia. O poartă SAU cu toate intrările inversate (o poartă SAU-negativă) se comportă precum o poartă ȘI-negat. O poartă ȘI cu toate intrările inversate (o poartă ȘI-negativă) se comportă precum o poartă SAU-

negat. Teoremele lui DeMorgan exprimă aceeași echivalență în sens invers: inversând ieșirea unei porți, funcția rezultată este aceeași cu tipul opus de poartă cu intrările inversate:

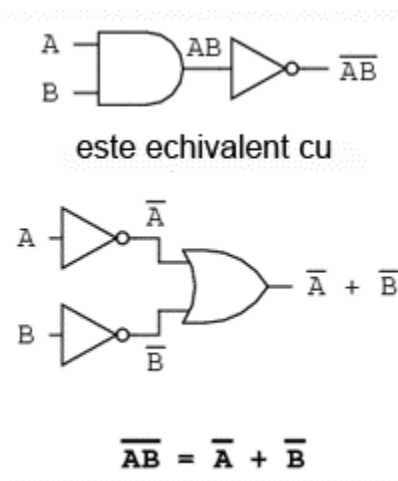


Fig. 7-43 teorema lui DeMorgan

O bară deasupra termenului  $AB$  se comportă precum un simbol de grup. Acest lucru este total diferit față de produsul  $AB$  inversat separat ( $A'B'$ ). Cu alte cuvinte,  $(AB)'$  nu este egal cu  $A'B'$ . Acest lucru are un impact profund asupra modului de evaluare și de reducere a expresiilor booleene, după cum vom vedea.

Teorema lui DeMorgan poate fi gândită ca și „întrepruperea” complementului (bara orizontală). Atunci când simbolul complementului este rupt în doua, operația de sub el se modifică din adunare în înmulțire și invers. După aplicarea teoremei, fiecare variabilă are propriul ei complement. Ca și exemplu:

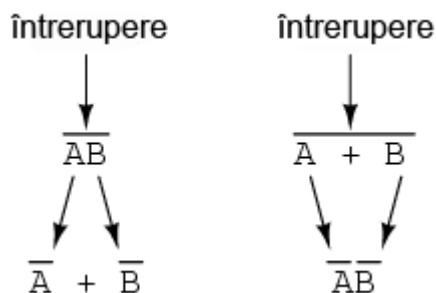


Fig. 7-44 întrepruperea complementului în aplicarea teoremei lui DeMorgan

### 7.7.2 Ruperea celui mai lung complement

Când există mai multe complemente deasupra aceleiași expresii, nu putem întrerupe decât un complement pe rând. Cel mai ușor este să începem cu cea mai lungă linie orizontală (cea de sus). Ca și exemplu, să considerăm expresia  $(A + (BC)')'$  redusă cu ajutorul teoremelor lui DeMorgan:

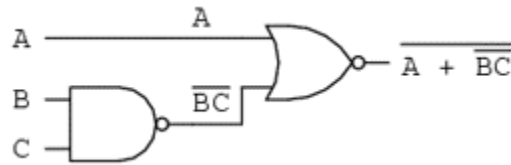


Fig. 7-45 aplicarea teoremei lui DeMorgan

Urmând considerațiile exprimate mai sus, aplicăm următorii pași:

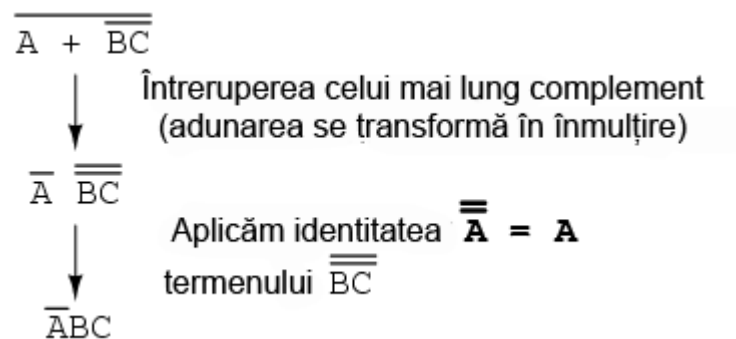


Fig. 7-46 întreruperea complementului în aplicarea teoremei lui DeMorgan

Ca și rezultat, circuitul original este redus la un circuit format dintr-o poartă ȘI cu trei intrări, unde intrarea A este inversată printr-o poartă NU:

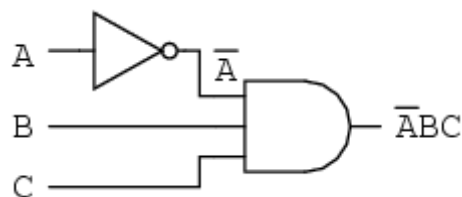


Fig. 7-47 circuit logic simplificat cu ajutorul teoremei lui DeMorgan

Ca și contra-exemplu, nu întrerupeți niciodată mai mult de un complement la un singur pas:

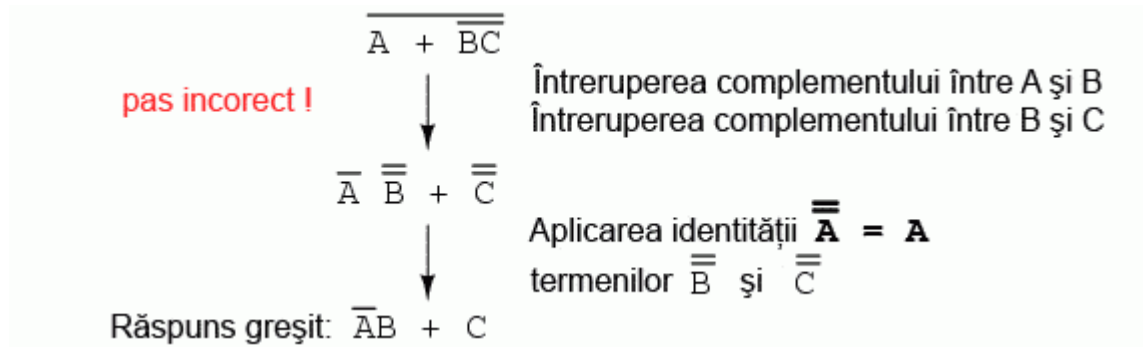


Fig. 7-48 întreruperea greșită a complementului

Pe cât de tentant pare, pe atât de incorect este să scurtăm pașii simplificării prin întreruperea mai multor complemente deodată. Prin urmare, nu faceți niciodată acest lucru!

Putem simplifica expresia de mai sus și prin întreruperea complementului scurt în primă instanță, și apoi a complementului lung:

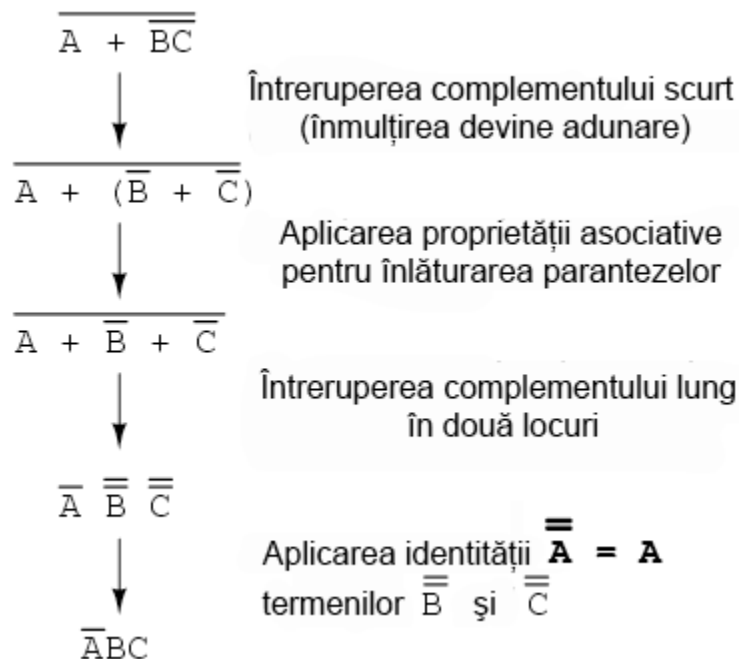


Fig. 7-49 întreruperea complementului scurt

Desigur, rezultatul final este același și în acest caz. Pașii necesari pentru simplificare sunt însă mai numeroși față de exemplul precedent (întreruperea complementului lung la primul pas). La pasul al treilea, în exemplul de mai sus, întreruperea complementului lung se realizează în două locuri simultan. Această operație matematică este permisă, și nu este identică cu întreruperea a două complemente deodată! Interdicția întreruperii mai multor complemente deodată nu interzice întreruperea complementului în mai multe locuri.

### 7.7.3 Menținerea grupărilor prin intermediul parantezelor

Poate vă întrebați de ce am folosit paranteze în jurul sub-expresiei  $B' + C'$ , din moment ce oricum le-am îndepărtat la pasul următor. Am făcut acest lucru pentru a sublinia un aspect important dar neglijat al teoremei lui DeMorgan. Din moment ce o linie orizontală lungă funcționează ca și simbol de grup, variabilele incluse sub aceasta trebuie să rămână grupate. În caz contrar, ordinea operațiilor se pierde. În exemplul anterior, nu contează dacă am fi pus sau nu aceste paranteze, dar în alte cazuri s-ar putea să conteze. Să luăm un alt exemplu, menținând parantezele:

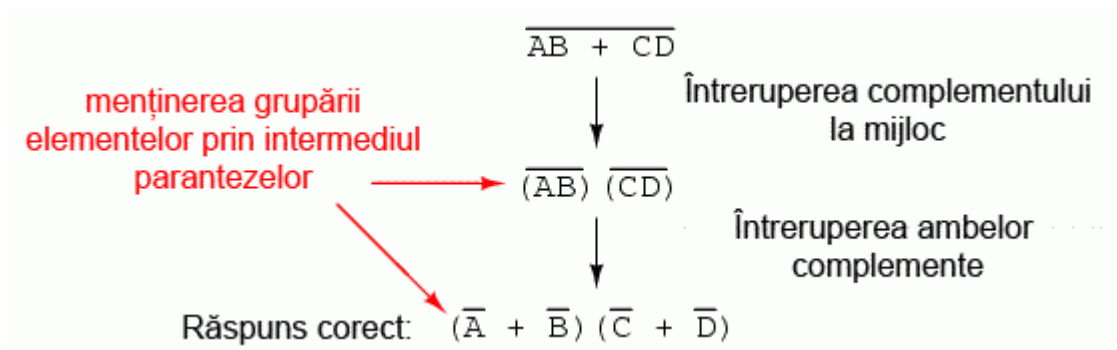


Fig. 7-50 simplificarea expresiei booleene cu ajutorul teoremei lui DeMorgan

În cazul în care nu menținem parantezele, riscăm să obținem un răspuns greșit:

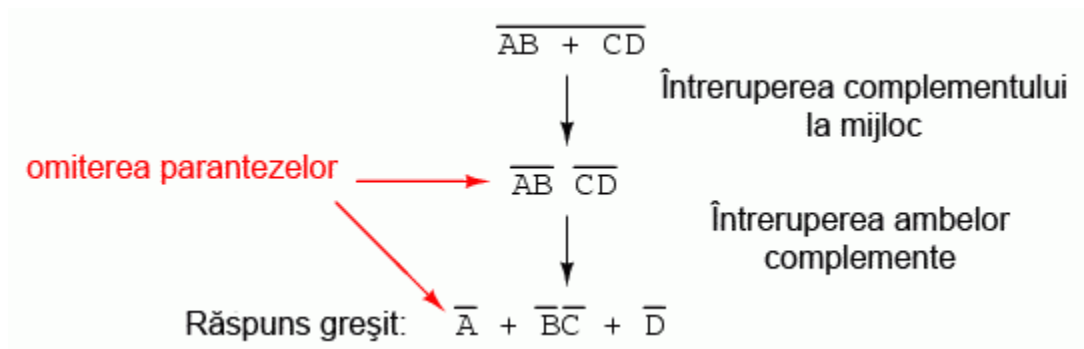


Fig. 7-51 simplificarea expresiei booleene cu ajutorul teoremei lui DeMorgan

După cum se poate observa, menținerea grupării realizate implicit prin liniile de complementare este crucială pentru obținerea răspunsului corect.

### 7.7.4 Simplificarea unui circuit logic - exemplu

Să aplicăm acum principiile teoremelor lui DeMorgan pentru simplificarea unui circuit cu porți logice:

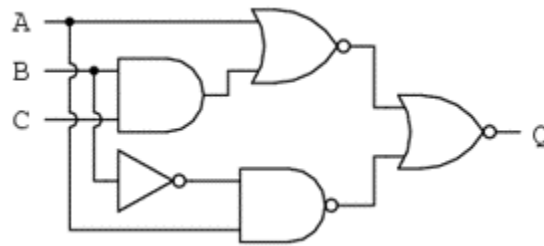


Fig. 7-52 circuit cu porți logice; forma inițială

#### 7.7.4.1 Expresia booleană echivalentă

Ca de obicei, primul pas al simplificării circuitului constă în găsirea expresiei booleene echivalente. Putem face acest lucru prin notarea sub-expresiilor la ieșirea fiecărei porți, pe măsură ce intrările ne sunt cunoscute:

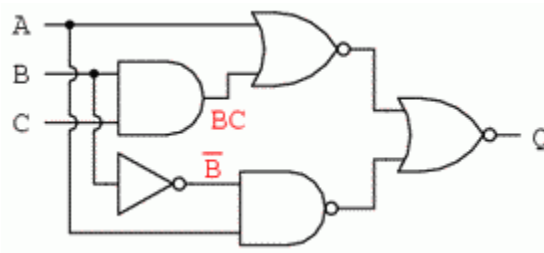


Fig. 7-53 notarea sub-expresiilor la ieșirea porților

Apoi, notăm ieșirea primei porți SAU-negat și ieșirea porții ȘI-negat. Atunci când aveam de-a face cu porți inversate pe ieșire, este mai ușor să scriem prima dată expresia fără inversarea finală. Observați și de pe figură faptul că săgeata indică ieșirea porții chiar înaintea inversării (cerculețul de la ieșire). Expresia finală, după inversare, este complementul expresiei precedente. Astfel, ne putem asigura că nu uităm introducerea complementului în cadrul expresiei:

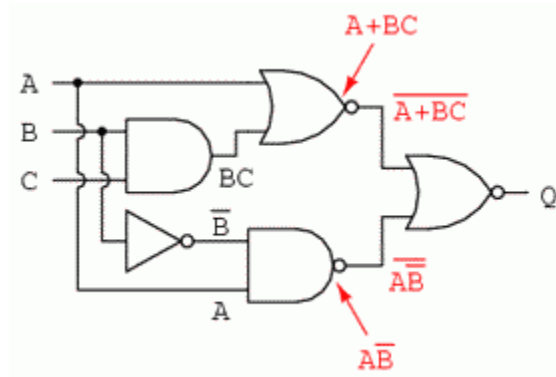


Fig. 7-54 notarea sub-expresiilor la ieșirea porților

Și, în sfârșit, ultimul pas constă în scrierea expresiei pentru poarta SAU-negat finală:

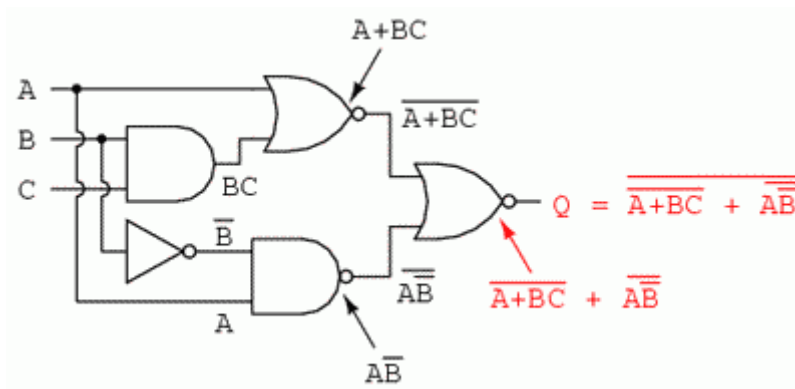


Fig. 7-55 expresia finală

#### 7.7.4.2 Simplificare expresiei echivalente

Trecem apoi la reducerea acestei expresii folosind identitățile, proprietățile, regulile și teoremele (lui DeMorgan) algebrei booleene:



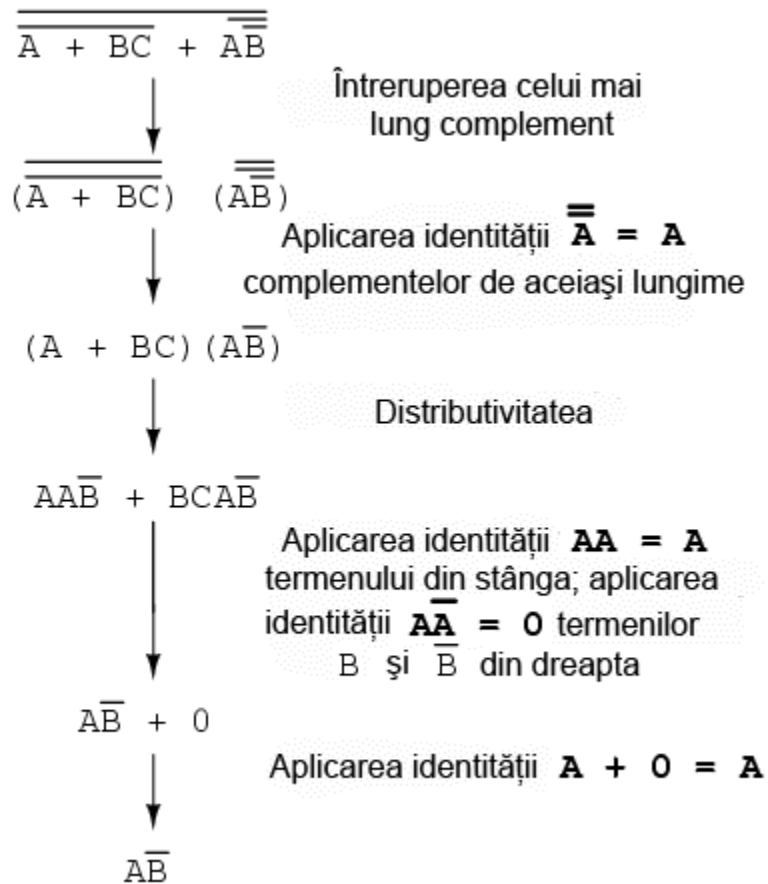


Fig. 7-56 simplificarea expresiei booleene echivalente

### 7.7.4.3 Circuitul echivalent

Circuitul echivalent al expresiei mult simplificate:

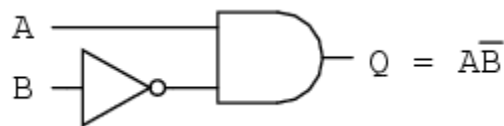


Fig. 7-57 circuit cu porți logice echivalent/simplificat

## 7.8 Transformarea tabelelor de adevăr în expresii booleene

- Expresiile booleene pot fi generate din tabelul de adevăr folosind suma-de-produse

Procesul de proiectare al circuitelor digitale începe adesea cu un tabel de adevăr. Acest tabel descrie modul de funcționare al circuitului, pe scurt, ce funcții trebuie acesta să îndeplinească. Partea de proiectare constă în mare parte în determinarea tipului de circuit ce va realiza funcția propusă în acest tabel de adevăr. Deși există unii oameni care pot determina circuitul final prin simpla privire a tabelului de adevăr, pentru noi ceilalți există o serie metode foarte utile. Se va dovedi că algebra booleană este de un real folos în această situație.

### 7.8.1 Incinerarea deșeurilor toxice - exemplu

Pentru ilustrarea acestor metode, cel mai indicat este să începem cu o problemă de proiectare practică. Să presupunem că trebuie să proiectăm un circuit de detectare a flăcării unui incinerator de deșeurile toxice. Astfel de tehnici de ardere sunt folosite de obicei pentru neutralizarea deșeurilor medicale, ce pot fi infectate cu viruși sau bacterii periculoase:

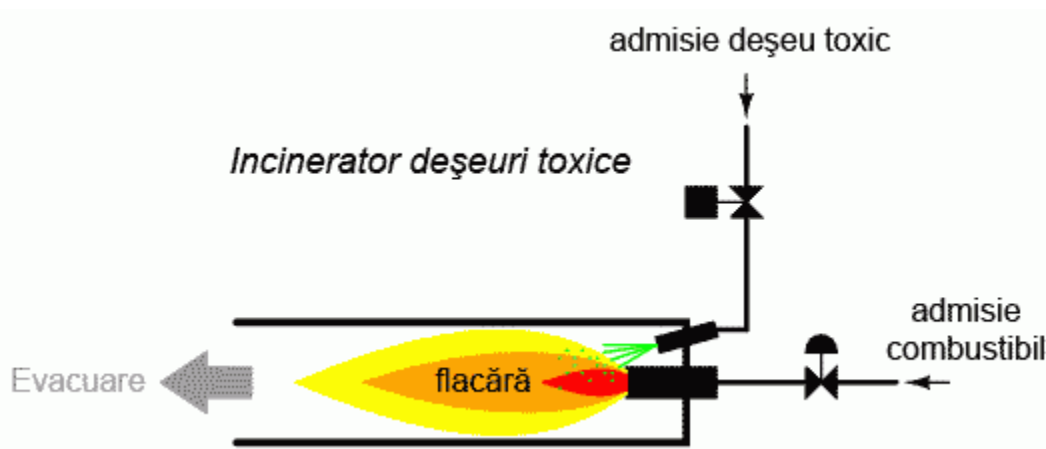


Fig. 7-58 incinerator deșeurile toxice

Atâta timp cât flacăra este menținută în incinerator, injectarea deșeurilor toxice pentru neutralizare este sigură. Dacă în schimb flacăra se stinge, această alimentare a incineratorului se poate dovedi periculoasă. Evacuarea va conține deșeurile toxice ne-neutralizate, reprezentând un pericol de sănătate pentru persoanele aflate în apropiere. Avem nevoie prin urmare de un sistem de detectare a prezenței flăcării. Injectarea deșeurilor va fi permisă doar atunci când sistemul de detectare ne asigură de prezența flăcării.

### 7.8.2 Utilizarea senzorilor redundanți

Există mai multe metode de detectare a flăcării: optic (detectarea luminii), termic (detectarea temperaturii înalte) și conducție electrică (detectarea particulelor ionizate). Fiecare din aceste metode prezintă avantaje și

dezavantaje. Să presupunem că, datorită pericolului ridicat al trecerii deșeurilor intacte prin evacuarea sistemului, s-a decis ca sistemul de detectare să fie redundant (senzori multipli). Astfel că, defectare unuia dintre senzori să nu ducă la o situație nedorită. Fiecare sensor este echipat cu un contact normal-deschis (deschis - lipsă flacără, închis - flacără detectată) necesar activării intrărilor unui sistem logic:

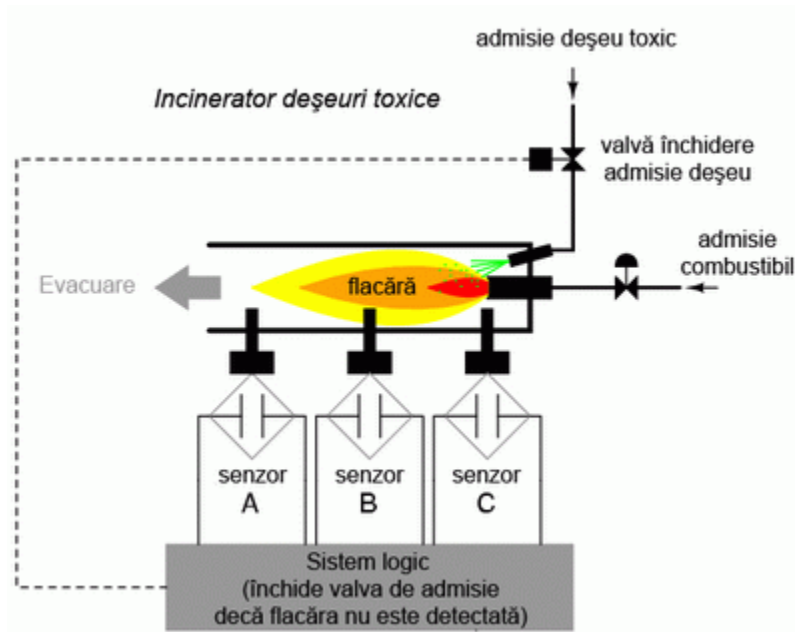


Fig. 7-59 utilizarea senzorilor și a circuitului logic pentru închiderea alimentării în cazul în care flacără nu este detectată

Scopul nostru acum, este să proiectăm circuitul logic astfel încât acesta să deschidă valva de admisie doar dacă există flacără (detectată de senzori). Prima dată trebuie să vedem comportamentul acestui sistem de control. Dorim ca valva să se deschidă în cazul în care doar unul din cei trei senzori detectează flacără? Probabil că nu. Altfel, nu ar mai avea niciun rost să folosim trei senzori în loc de unul singur. Ceea ce ne dorim de la sistemul logic, este ca acesta să deschidă valva de admisie doar în cazul în care toți cei trei senzori detectează flacără. În acest caz, tabelul de adevăr arată astfel:

| senzori de intrare |   |   |        |
|--------------------|---|---|--------|
| A                  | B | C | ieșire |
| 0                  | 0 | 0 | 0      |
| 0                  | 0 | 1 | 0      |
| 0                  | 1 | 0 | 0      |
| 0                  | 1 | 1 | 0      |
| 1                  | 0 | 0 | 0      |
| 1                  | 0 | 1 | 0      |
| 1                  | 1 | 0 | 0      |
| 1                  | 1 | 1 | 1      |

ieșire = 0  
(valvă închisă)

ieșire = 1  
(valvă deschisă)

Această funcționalitate poate fi asigurată folosind o poartă ȘI cu trei intrări: ieșirea circuitului este 1 doar dacă intrarea A ȘI intrarea B ȘI intrarea C este 1:

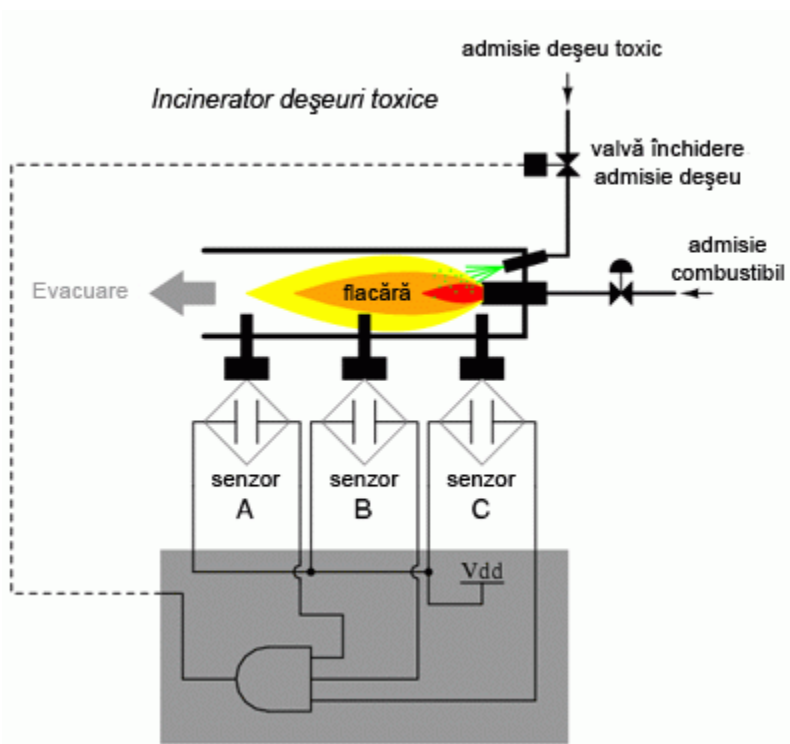


Fig. 7-60 adăugarea circuitului logic

Dacă folosim în schimb relee electromecanice, putem crea această funcție ȘI prin conectarea celor trei contacte în serie. Sau pur și simplu conectăm cei trei senzori în serie, astfel încât, singura modalitate prin care se poate deschide valva de admisie, este dacă toți cei trei senzori indică prezența flăcării:

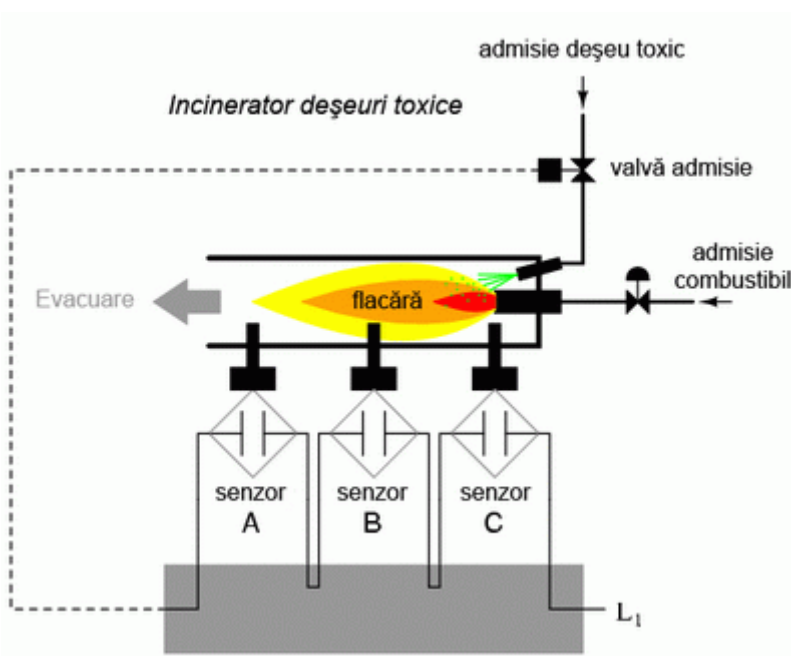


Fig. 7-61 utilizare relee electromecanice

Deși această strategie maximizează siguranța sistemului, este totuși foarte sensibilă la defect. În cazul în care unul din cei trei senzori se defectează, indicând lipsa flăcării din incinerator, întregul sistem se va opri. Asta chiar dacă ceilalți doi senzori funcționează și indică prezența flăcării. Această oprire „gratuită” a incineratorului duce la pierderi de producție și de combustibil (menținerea unei flăcări ce nu este folosită pentru incinerarea materialului toxic).

Va trebui să reprojecțăm sistemul, astfel încât, un astfel de defect să nu ducă la închiderea întregului sistem. Bazându-ne pe doi senzori în detectarea prezenței flăcării, sistemul își păstrează și în acest caz redundanța. O astfel de strategie implică un circuit logic cu trei intrări, a cărei ieșire este 1 în cazul în care cel puțin două din cele trei intrări sunt 1. Tabelul de adevăr arată astfel:

| senzori de<br>intrare |   |   |        |
|-----------------------|---|---|--------|
| A                     | B | C | ieșire |
| 0                     | 0 | 0 | 0      |
| 0                     | 0 | 1 | 0      |
| 0                     | 1 | 0 | 0      |
| 0                     | 1 | 1 | 1      |
| 1                     | 0 | 0 | 0      |
| 1                     | 0 | 1 | 1      |
| 1                     | 1 | 0 | 1      |
| 1                     | 1 | 1 | 1      |

ieșire = 0  
(valvă închisă)

ieșire = 1  
(valvă deschisă)

### 7.8.3 Suma-de-produse

În această situație nu este foarte clar ce tip de circuit logic ar satisface tabelul de adevăr. O metodă simplă de realizarea a unui astfel de circuit constă în utilizarea unei forme booleene standard, denumită sumă-de-produse. Ca și exemplu, o astfel de expresie ar putea arăta astfel:  $ABC + BC + DF$ , suma produselor  $ABC$ ,  $BC$  și  $DF$ .

Astfel de expresii sunt relativ ușor de realizat cu ajutorul tabelelor de adevăr. Trebuie doar să găsim acele rânduri din tabel unde ieșirea este 1, și să scriem apoi un produs boolean a cărui rezultat să fie 1, cunoscând condițiile de intrare. De exemplu, să luăm al patrulea rând din tabelul de adevăr de mai sus. Ieșirea acestuia este 1 (ceea ce căutăm), iar intrările sunt  $A = 0$ ,  $B = 1$  și  $C = 1$ . Produsul acestor trei variabile este unu dacă expresia arată astfel:  $A'BC$ .

senzori de  
intrare

| A | B | C | ieșire |
|---|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0      |
| 0 | 0 | 1 | 0      |
| 0 | 1 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 0 | 0      |
| 1 | 0 | 1 | 1      |
| 1 | 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 1 | 1      |

$$\overline{A}BC = 1$$

Să completăm și celelalte rânduri care au o ieșire de 1, cu produsul termenilor:

senzori de  
intrare

| A | B | C | ieșire |
|---|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0      |
| 0 | 0 | 1 | 0      |
| 0 | 1 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 0 | 0      |
| 1 | 0 | 1 | 1      |
| 1 | 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 1 | 1      |

$$\overline{A}BC = 1$$

$$A\overline{B}C = 1$$

$$AB\overline{C} = 1$$

$$ABC = 1$$

Însumăm toate aceste patru expresii, pentru a crea o singură expresie booleană ce descrie în întregime tabelul de adevăr:

senzori de  
intrare

| A | B | C | ieșire |
|---|---|---|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0      |
| 0 | 0 | 1 | 0      |
| 0 | 1 | 0 | 0      |
| 0 | 1 | 1 | 1      |
| 1 | 0 | 0 | 0      |
| 1 | 0 | 1 | 1      |
| 1 | 1 | 0 | 1      |
| 1 | 1 | 1 | 1      |

$\overline{A}BC = 1$

$A\overline{B}C = 1$

$AB\overline{C} = 1$

$ABC = 1$

$ieșire = \overline{A}BC + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC$

#### 7.8.4 Realizarea circuitului logic

După ce am obținut expresia booleană sub formă de sumă-de-produse, putem trece la realizarea circuitului logic bazat pe această expresie, fie cu porți logice:

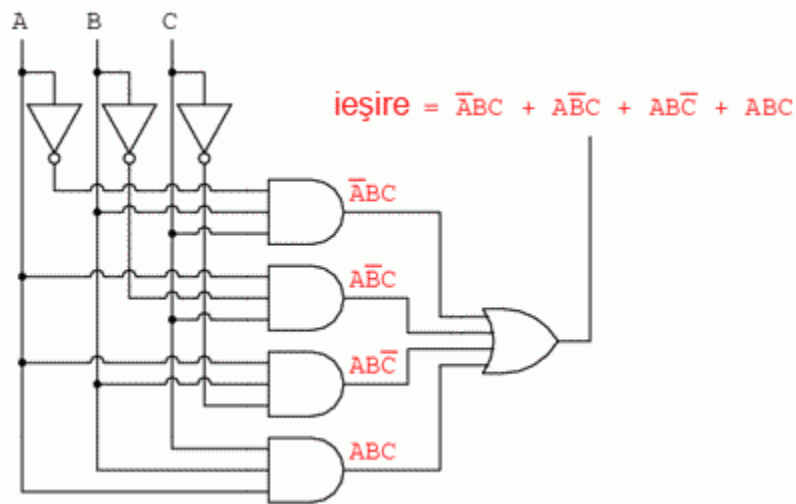


Fig. 7-62 incinerator deșeuri toxice; circuitul logic (porți logice)

Fie cu relee electromecanice:



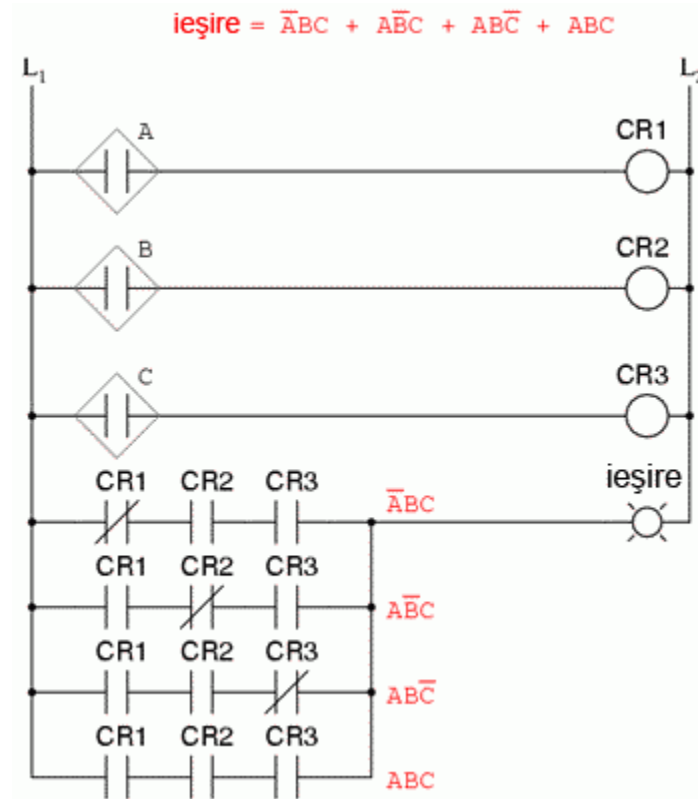


Fig. 7-63 incinerator deşeurilor toxice; circuitul logic (relee electromecanice)

### 7.8.5 Simplificarea expresiei booleene

Din păcate, ambele variante sunt destul de complexe. Din fericire însă, putem simplifica expresia inițială folosind regulile simplificării booleene:

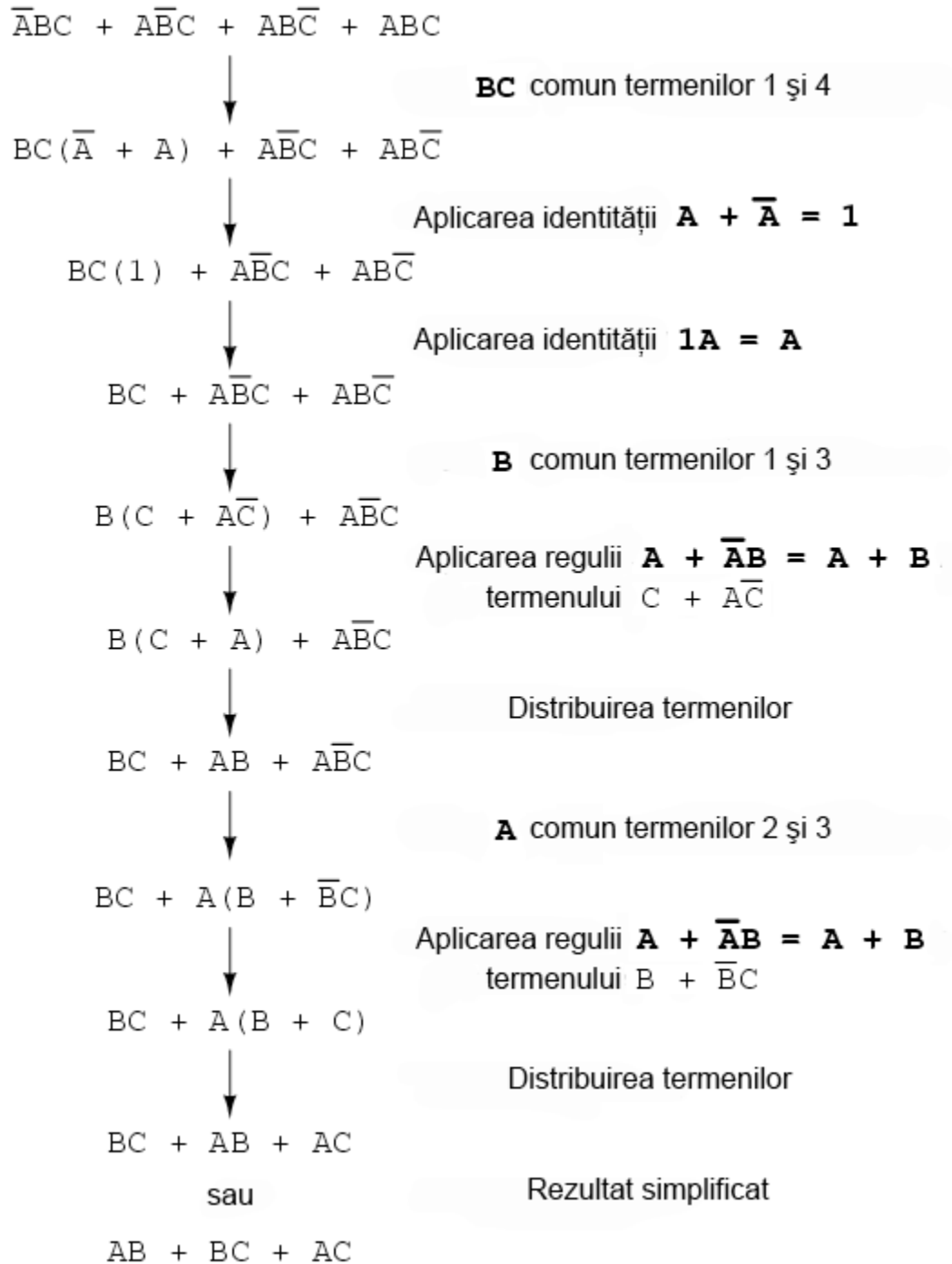


Fig. 7-64 simplificarea expresiei booleene

Ca și rezultat al simplificării, putem acum construi un circuit logic mult simplificat, dar care îndeplinește exact aceeași funcție logică, fie cu porți logice:

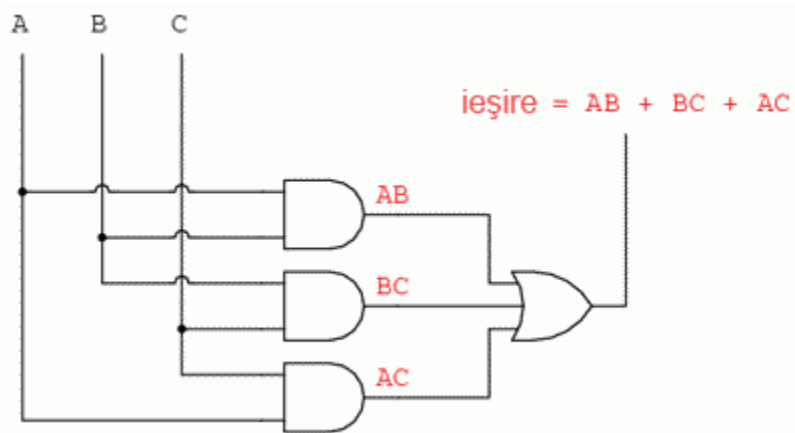


Fig. 7-65 circuitul logic (porți logice)

Fie cu relee electromecanice:

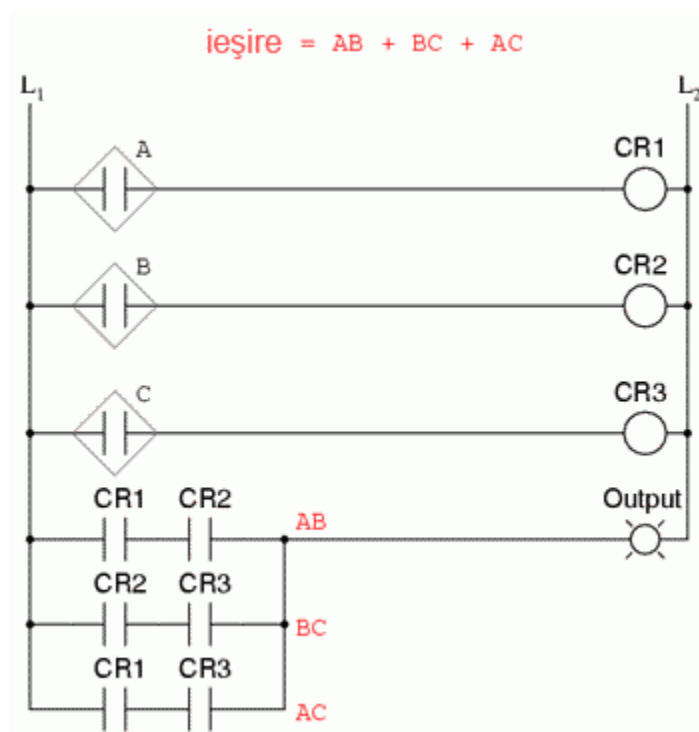


Fig. 7-66 circuitul logic (relee electromecanice)

## 8 Hărți Karnaugh

### 8.1 De ce hărți Karnaugh

La ce ne folosesc hărțile Karnaugh? Harta Karnaugh, asemenea algebrei booleene, este o metodă de simplificare a circuitelor logice digitale. Vedeți exemplul „incineratorului de deșeuri toxice” ca și metodă de simplificare booleană a unui circuit logic. Harta Karnaugh va simplifica circuitul mult mai rapid și mai ușor în majoritatea cazurilor.

Simplificarea booleană este de fapt mai rapidă în cazul în care avem maxim două variabile booleene. Putem folosi această metodă chiar și în situația în care avem trei variabile, dar metoda booleană este mai greoaie în acest caz. Cu patru variabile de intrare, algebra booleană devine „imposibilă”. Hărțile Karnaugh sunt mai rapide și mai ușor de implementat. Acestea pot fi folosite cu succes în situațiile în care avem până la șase variabile de intrare. Între șase și opt, mai putem încă folosi aceste hărți. Peste această valoare, este indicat să folosim un program software specializat pentru realizarea simplificărilor logice.

### 8.2 Diagrame Venn

Matematicienii utilizează diagramele Venn pentru reprezentarea relațiilor logice dintre mulțimi (colecții de obiecte). Ne vom folosi de diagramele Venn pentru a face tranziția dintre algebra booleană și hărțile Karnaugh.

#### 8.2.1 Mulțimi și submulțimi

O mulțime este o colecție de obiecte dintr-un univers dat. Elementele mulțimii sunt obiecte ce aparțin mulțimii. Elementele unei mulțimi au de obicei ceva în comun, deși acest lucru nu este neapărat necesar. Din universul numerelor reale, de exemplu, mulțimea tuturor numerelor întregi pozitive  $\{1, 2, 3 \dots\}$ , este o mulțime. Mulțimea  $\{3, 4, 5\}$  este o mulțime mai mică, sau o submulțime a mulțimii numerelor întregi pozitive. Un alt exemplu este mulțimea tuturor băieților dintr-o clasă, unde numărul elevilor din clasă reprezintă universul discuției. Vă puteți gândi și la alte mulțimi?

### 8.2.2 Diagrame Venn - exemple

Diagrama Venn din figura de mai jos stânga, reprezintă mulțimea  $A$  (în interiorul cercului) din universul  $U$  (aria dreptunghiulară). Dacă tot ceea ce se află în interiorul cercului este  $A$ , atunci tot ceea ce se află în exteriorul cercului nu este  $A$  ( $A$ -negat sau  $A'$ ). Prin urmare, în figura de mai jos centru, am denumit aria dreptunghiulară din afara cercului  $A$  cu  $A'$  în loc de  $U$ .  $B$  și  $B'$  se reprezintă similar (figura de mai jos dreapta).

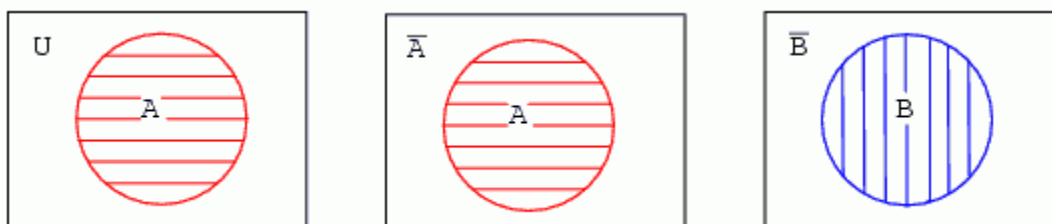


Fig. 8-1 diagrame Venn; exemple

Ce se întâmplă dacă și  $A$  și  $B$  se află în același univers? Există patru posibilități:

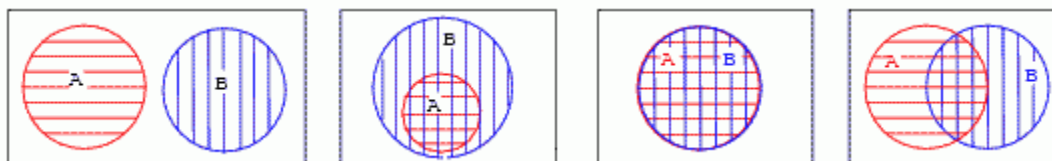


Fig. 8-2 diagrame Venn; cazuri

Să reluăm fiecare din cele patru posibilități în parte:

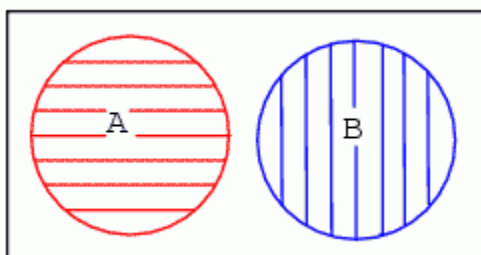


Fig. 8-3 mulțimi disjuncte

Primul exemplu indică faptul că mulțimile  $A$  și  $B$  nu au niciun element comun (disjuncte), conform diagramei Venn. Regiunile celor două mulțimi nu se suprapun în niciun punct. De exemplu, să presupunem că

mulțimile A și B ar conține următoarele elemente:  $A = \{1, 2, 3, 4\}$ ,  $B = \{5, 6, 7, 8\}$ . Niciunul dintre elementele mulțimii A nu este inclus în mulțimea B sau invers. Prin urmare, cele două cercuri nu se suprapun.

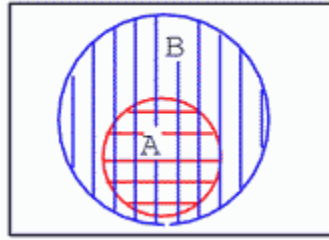


Fig. 8-4 mulțimea A inclusă în mulțimea B

În cel de al doilea exemplu, mulțimea A este inclusă total în mulțimea B. Cum putem explica această situație? Să presupunem că mulțimile A și B conțin următoarele elemente:  $A = \{1, 2\}$  și  $B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ . Toate elementele din A se regăsesc și în B. Prin urmare, mulțimea A este o submulțime a mulțimii B, iar cercul A este inclus în cercul B.

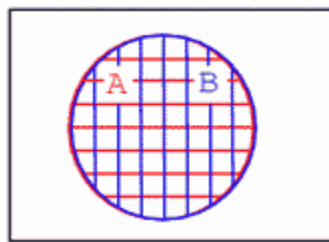


Fig. 8-5 mulțimi suprapuse perfect

În cel de al treilea caz, mulțimile A și B se suprapun perfect. Din diagrama Venn, putem deduce că cele două mulțimi conțin exact aceleași elemente. Să presupunem că mulțimile arată astfel:  $A = \{1, 2, 3, 4\}$  și  $B = \{1, 2, 3, 4\}$ . Prin urmare  $A = B$ . Cele două mulțimi sunt identic egale deoarece conțin exact aceleași elemente.

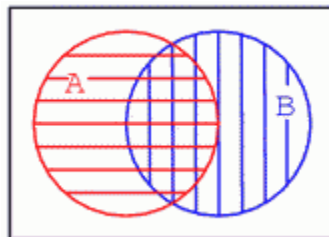


Fig. 8-6 mulțimi suprapuse parțial

În ultimul caz, cele două mulțimi se suprapun, dar nu complet ci doar parțial. Acest lucru ne spune că există elemente comune celor două mulțimi, dar că fiecare mulțime are și elementele sale unice. Să presupunem că cele două mulțimi ar arăta astfel:  $A = \{1, 2, 3, 4\}$  și  $B = \{3, 4, 5, 6\}$ . Ambele mulțimi conțin elementele 3 și 4. Acesta este și motivul pentru care cele două cercuri sunt suprapuse.

## 8.3 Relații booleene cu diagrame Venn

### 8.3.1 Funcția logică SAU (adunarea booleană)

În ultimul exemplu din secțiunea precedentă, mulțimile A și B s-au suprapus parțial. Inițial, ne vom concentra atenția asupra întregii regiuni hașurate de mai jos, abia apoi vom trece la analizarea regiunii comune celor două mulțimi. Să utilizăm expresii booleene pentru desemnarea regiunilor diagramelor Venn, conform figurii de mai jos:

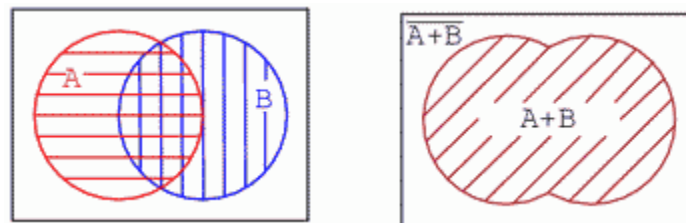


Fig. 8-7 funcția logică SAU; reprezentarea prin diagrame Venn

Aria mulțimii A este hașurată cu roșu, iar cea a mulțimii B cu albastru. Dacă analizăm întreaga aria hașurată (suma totală a tuturor ariilor hașurate), indiferent de culoare sau stil, obținem figura din dreapta sus. Aceasta corespunde funcției logice SAU, iar expresia booleană este  $A + B$ , aria fiind cea hașurată cu linii diagonale. Tot ceea ce se află în afără ariei hașurate reprezintă  $(A + B)'$ .

### 8.3.2 Funcția logică ȘI (înmulțirea booleană)

O altă metodă de interpretare a diagramei Venn cu regiuni suprapuse, este analizarea regiunii comune atât mulțimii A cât și mulțimii B, aria dublu hașurată de mai jos (stânga). Această arie corespunde funcției logice ȘI, iar expresia booleană este  $AB$  (jos dreapta). Tot ceea ce se află în afara ariei dublu hașurate  $AB$  reprezintă  $(AB)'$ :

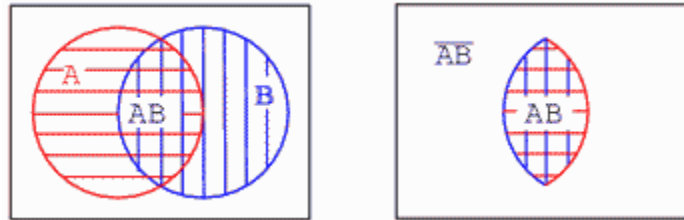


Fig. 8-8 funcția logică SAU; reprezentarea prin diagrame Venn

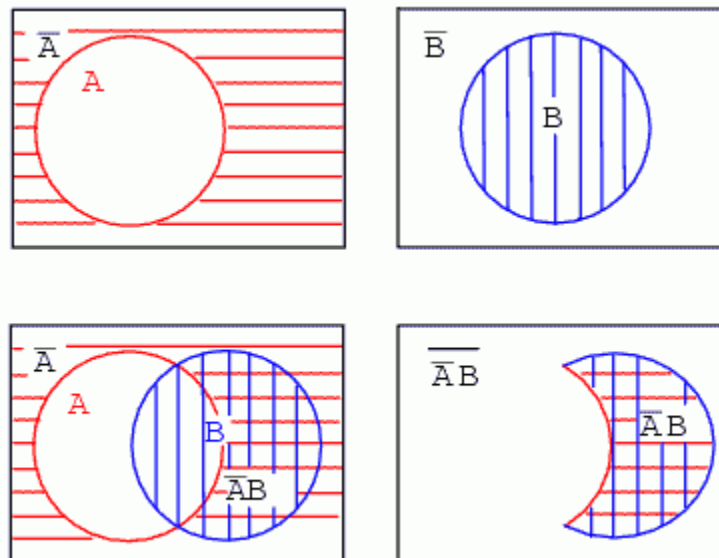
Observați că unele elemente ale mulțimilor A și B de sus, sunt elemente ale mulțimii  $(AB)'$ , dar niciunul dintre elementele mulțimii  $(AB)'$  nu se află în interiorul ariei dublu hașurate AB.

### 8.3.3 Expresii booleene cu diagrame Venn

#### 8.3.3.1 Diagrama Venn pentru $A'B$

Vom trece acum la dezvoltarea unor expresii booleene. De exemplu, să presupunem că dorim reprezentarea prin diagrame Venn a expresiei booleene  $A'B$  ( $A'$  ȘI B).

Pașii sunt următorii: hașurarea ariei  $A'$ ; hașurarea ariei B; realizarea funcției ȘI ( $A'B$ ) prin suprapunerea celor două regiuni precedente. Am putea să ne oprim aici, dar, pentru claritate, putem păstra doar aria dublu hașurată:

Fig. 8-9 diagrama Venn pentru  $A'B$



Expresia  $A'B$  reprezintă regiunea în care  $A'$  și  $B$  se suprapun. Regiunea nehașurată din afara ariei  $A'B$  este  $(A'B)'$ .

### 8.3.3.2 Diagrama Venn pentru $B' + A$

Putem încerca același lucru cu expresia booleană SAU. De exemplu, să presupunem că dorim să reprezentăm prin diagrame Venn expresia  $B' + A$ .

Pașii sunt următorii: începem cu hașurarea lui  $B$ , și apoi a regiunii  $B'$ ; suprapunem  $A$  peste  $B'$ . Din moment ce suntem interesați de realizarea funcției SAU, vom căuta să reprezentăm întreaga arie formată de cele două mulțimi, indiferent de stilul hașurării. Prin urmare  $A + B'$  reprezintă întreaga arie hașurată:

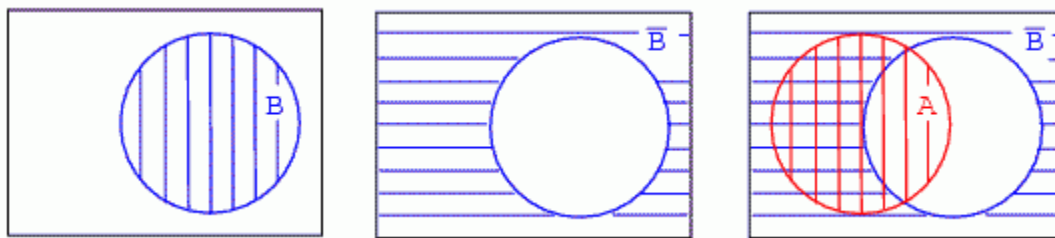


Fig. 8-10 diagrama Venn pentru  $B' + A$

Pentru claritate, putem reprezenta întreaga regiune printr-o singură hașură (jos stânga):

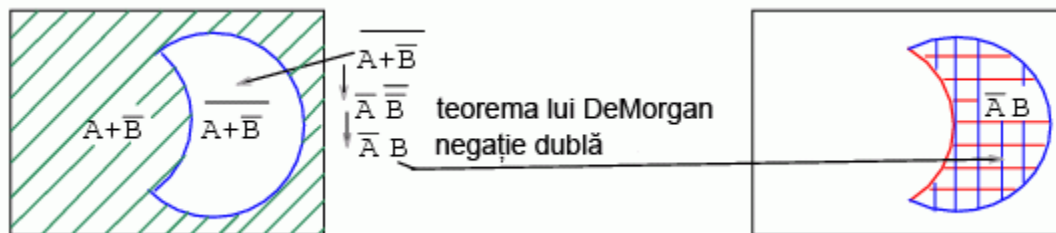


Fig. 8-11 diagrama Venn pentru  $B' + A$

### 8.3.3.3 Diagrama Venn pentru $(A + B')'$

Aria hașurată cu verde de mai sus este rezultatul expresiei  $A + B'$ . Trecând la  $(A + B')'$ , căutam complementul expresiei  $A + B'$ , reprezentat prin aria nehașurată din figura de mai sus stânga. Aplicând teorema lui DeMorgan și negarea dublă ( $A'' = A$ ), ajungem la rezultatul  $(A + B')' = AB'$ . Prin urmare, cele două regiuni sunt identice.

Putem face acum observația că diagramele Venn nu demonstrează nimic. Avem nevoie de algebra booleană pentru acest lucru. Totuși, diagramele Venn pot fi utilizate pentru verificare și vizualizare. În exemplul de mai sus, am verificat și vizualizat teorema lui DeMorgan cu ajutorul unei diagrame Venn.

#### 8.3.3.4 Diagrama Venn pentru $A' + B'$ și $(A' + B')'$

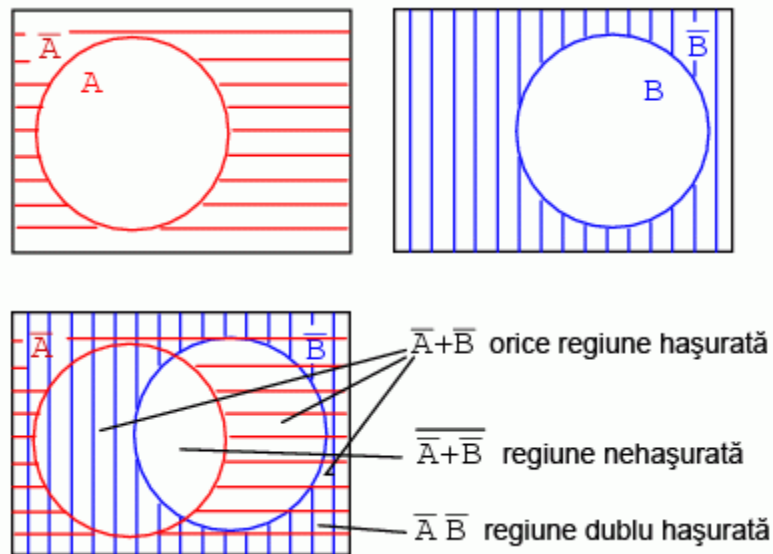


Fig. 8-12 diagrama Venn pentru  $A' + B'$  și  $(A' + B')'$

#### 8.3.3.5 Arătați că $A' + B' = AB$

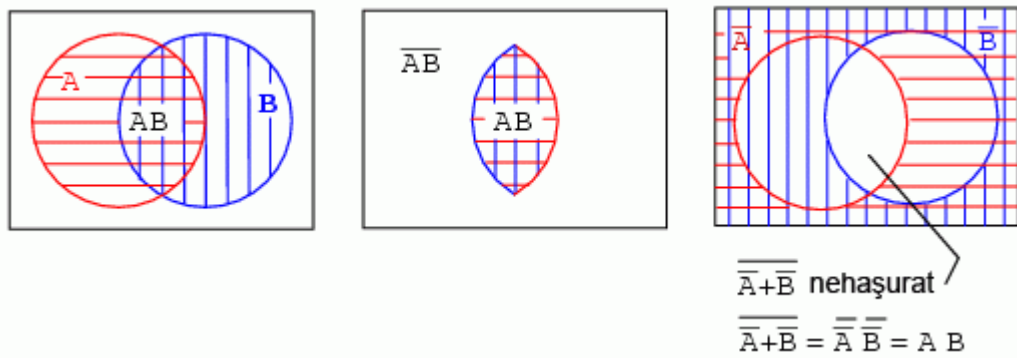


Fig. 8-13 diagrama Venn pentru  $A' + B'$

#### 8.3.4 Diagrame Venn cu 3 variabile

Diagrama Venn de mai jos conține trei regiuni hașurate, A (roșu), B (albastru) și C (verde). Intersecția tuturor regiunilor în centru reprezintă expresia booleană  $ABC$ . Există o altă regiune unde A și B se intersectează, reprezentând expresia booleană  $AB$ . Similar, intersecția ariei A cu C și B cu C reprezintă expresia booleană  $AC$ , respectiv  $BC$ .

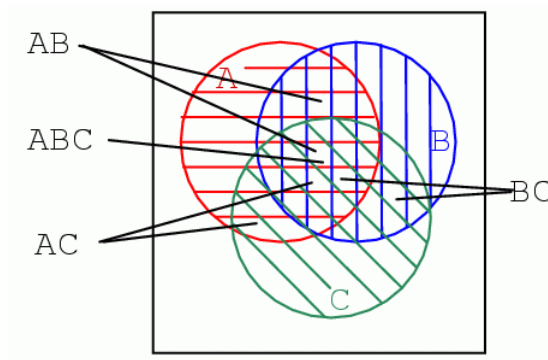


Fig. 8-14 diagrama Venn pentru trei variabile

Observând mărimea regiunilor descrise de funcția ȘI de mai sus, putem vedea că mărimea regiunii variază cu numărul variabilelor asociate expresiei ȘI.

## 8.4 Transformarea diagramelor Venn în hărți Karnaugh

### 8.4.1 Hărți Karnaugh cu două variabile

Începem transformarea unei diagrame Venn într-o hartă Karnaugh prin desenarea unei mulțimi A în universul A' (figura de mai jos, a):

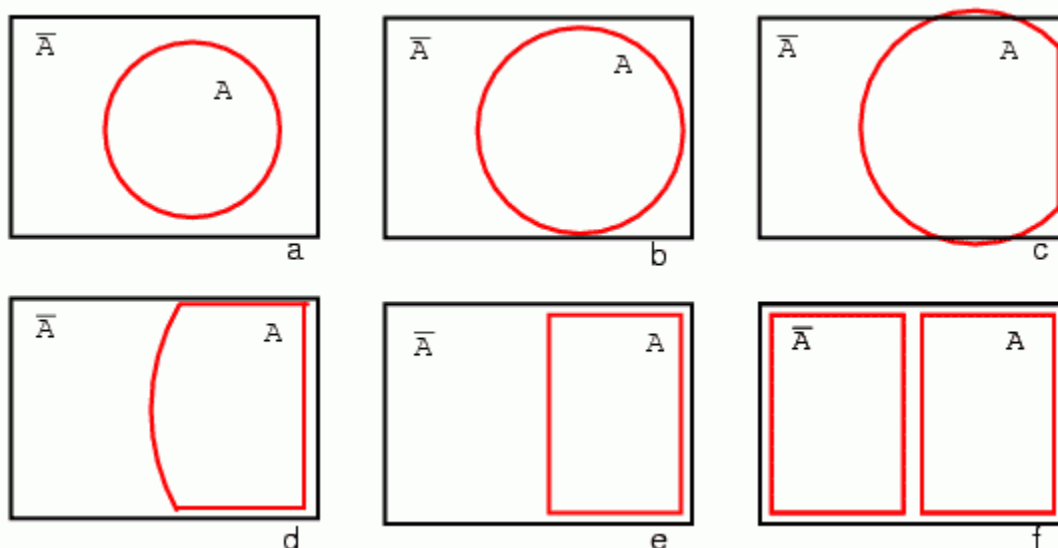


Fig. 8-15 procesul de transformarea a diagramei Venn în hartă Karnaugh

Extindem apoi cercul A (b și c), modificăm forma lui la punctul (d), și transformăm A într-un dreptunghi (e). Tot ceea ce nu se află în A este A'. Desenăm un dreptunghi și pentru A' (f). De asemenea, nu folosim hașuri pentru hărțile Karnaugh. Ceea ce avem până în acest moment este o hartă Karnaugh cu o singură variabilă. Acest lucru nu ne ajută însă. Avem nevoie de variabile multiple.

Figura (a) de mai jos este identică diagramei Venn precedente, cu diferența că notațiile A și A' se afla deasupra diagramei și nu în interior. Urmând un proces similar, putem construi „o diagramă Venn dreptunghiulară” pentru B și B' (b). Vom trece acum la suprapunerea diagramelor de la (a) și (b) pentru obținerea rezultatului (c), la fel cum am făcut pentru diagramele Venn. Motivul pentru care realizăm acest lucru este pentru a observa ceea ce este comun celor două regiuni suprapuse - de exemplu, locul în care A se suprapune cu B. Pătratul din dreapta jos (c) corespunde relației AB, unde A se suprapune cu B:

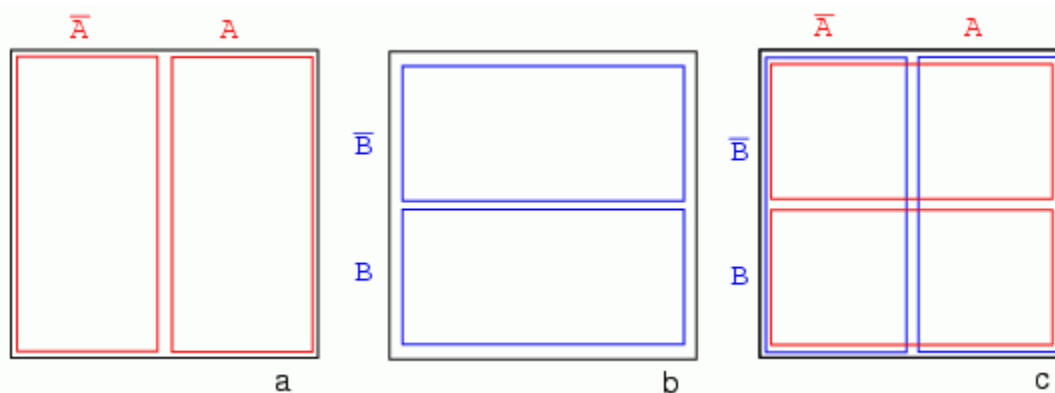


Fig. 8-16 procesul de transformarea a diagramei Venn în hartă Karnaugh

Totuși, nu vom pierde vremea desenând hărți Karnaugh precum cea de mai sus (c), ci vom folosi o versiune simplificată:

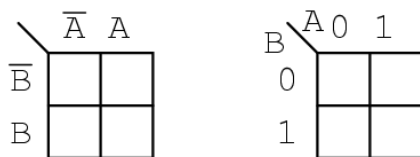


Fig. 8-17 versiunea simplificată a unei hărți Karnaugh

Coloana formată din cele două celule de sub  $A'$  este asociată mulțimii  $A'$  (stânga); similar pentru celelalte mulțimi. Pentru simplitate, regiunile nu vor fi delimitate atât de clar precum în cazul diagramelor Venn.

Harta Karnaugh din dreapta este o formă alternativă utilizată în majoritatea textelor. Numele variabilelor sunt trecute lângă linia diagonală.  $A$ -ul de deasupra diagonalei indică faptul că variabila  $A$  (și  $A'$ ) aparține coloanelor. 0 este folosit pentru  $A'$  iar 1 pentru  $A$ .  $B$ -ul de sub diagonală este asociat cu liniile: 0 pentru  $B'$  și 1 pentru  $B$ .

### 8.4.2 Exemplu

Marcați căsuțele corespunzătoare expresiei booleene  $AB$  în diagrama Karnaugh de mai sus cu 1. Soluție: hașurăm sau încercuim regiunea corespunzătoare lui  $A$ ; marcăm apoi regiunea corespunzătoare lui  $B$ . Intersecția celor două regiuni reprezintă  $AB$ ; trecem un 1 în această căsuță. Nu este însă necesar să încercuim propriu-zis regiunile  $A$  și  $B$ :

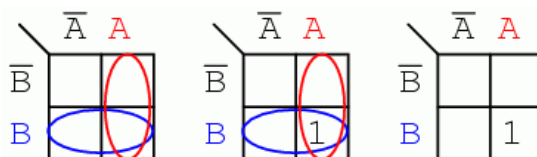


Fig. 8-18 exemplu de utilizare a hărților Karnaugh

### 8.4.3 Hărți Karnaugh cu trei variabile

Trecem acum la dezvoltarea unei hărți Karnaugh pornind de la diagrame Venn. Universul (interiorul dreptunghiului negru) este împărțit în două regiuni înguste  $A'$  și  $A$ .  $B$  și  $B'$  împart universul în două regiuni pătrate.  $C$ -ul ocupă o regiune pătrată în mijlocul dreptunghiului, iar  $C'$  este împărțit în două dreptunghiuri verticale de fiecare parte a pătratului  $C$ :

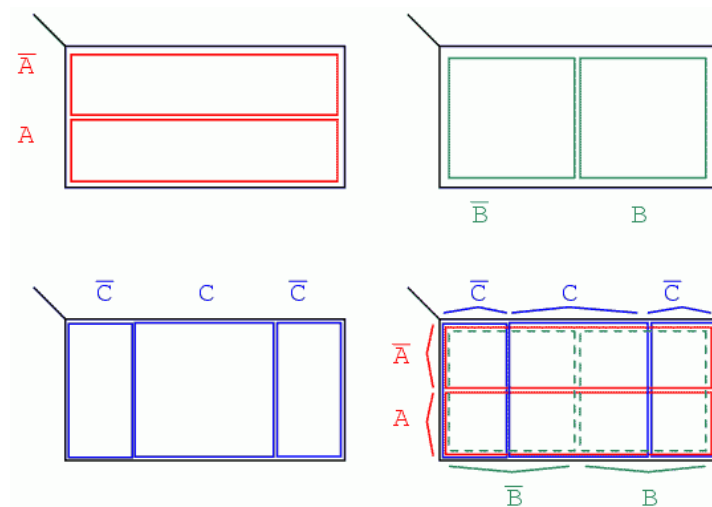


Fig. 8-19 hartă Karnaugh cu trei variabile

În figura finală suprapunem toate cele trei variabile, încercând să delimităm clar fiecare regiune. Această hartă Karnaugh cu 3 variabile are  $2^3 = 8$  regiuni, căsuțele din interiorul hărții. Fiecare regiune este unic determinată prin intermediul celor trei variabile booleene (A, B și C). De exemplu  $ABC'$  reprezintă regiunea din dreapta jos (\*), iar  $A'B'C'$  reprezintă regiunea din stânga sus (x):

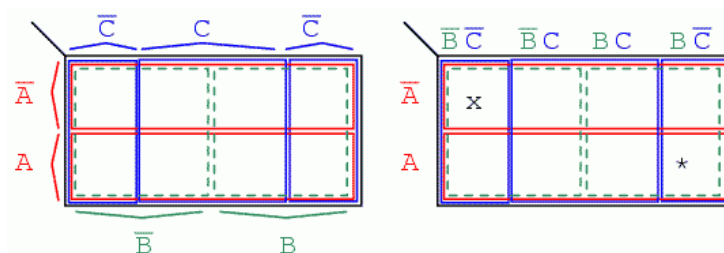


Fig. 8-20 hartă Karnaugh cu trei variabile

Totuși, în mod normal nu vom nota o hartă Karnaugh conform figurii de mai sus stânga. Notarea hărților Karnaugh se va face conform figurii din dreapta. Fiecare regiune este unic determinată printr-un produs de 3 variabile, o expresie booleană ȘI.

Cele două forme diferite de mai sus sunt echivalente, și reprezintă forma finală a acestora. Versiunea din dreapta este puțin mai ușor de folosit, din moment ce nu suntem nevoiți să scriem toate variabilele de fiecare dată, ci doar 1 și 0. Notăția  $B'C'$ ,  $B'C$ ,  $BC$  și  $BC'$  din stânga este echivalentă cu 00, 01, 11 respectiv 10 din dreapta. A și  $A'$  sunt echivalente cu 0 respectiv 1.

## 8.5 Hărți Karnaugh, tabele de adevăr și expresii booleene

### 8.5.1 Metode diferite de reprezentare a funcțiilor logice

Hărțile Karnaugh simplifică funcțiile logice mult mai rapid și mai ușor în comparație cu algebra booleană. Dorim simplificarea circuitelor logice spre cel mai mic cost posibil prin eliminarea componentelor. Definim cel mai mic cost ca fiind cel mai mic număr de porți cu cel mai mic număr de intrări pe poarta.

Mai jos am reprezentat cinci metode diferite de reprezentare a aceluiași lucru: o funcție logică aleatoare cu două intrări. Metodele sunt: logica ladder, porți logice, tabel de adevăr, hartă Karnaugh și ecuație booleană. Ceea ce vrem să subliniem este că toate acestea sunt echivalente. Două intrări A și B pot lua valori de 0 sau 1, înalt sau jos, deschis sau închis, adevărat sau fals, în funcție de caz. Există  $2^2 = 4$  combinații pentru generarea unei ieșiri. Acest lucru se aplică tuturor celor cinci exemple.

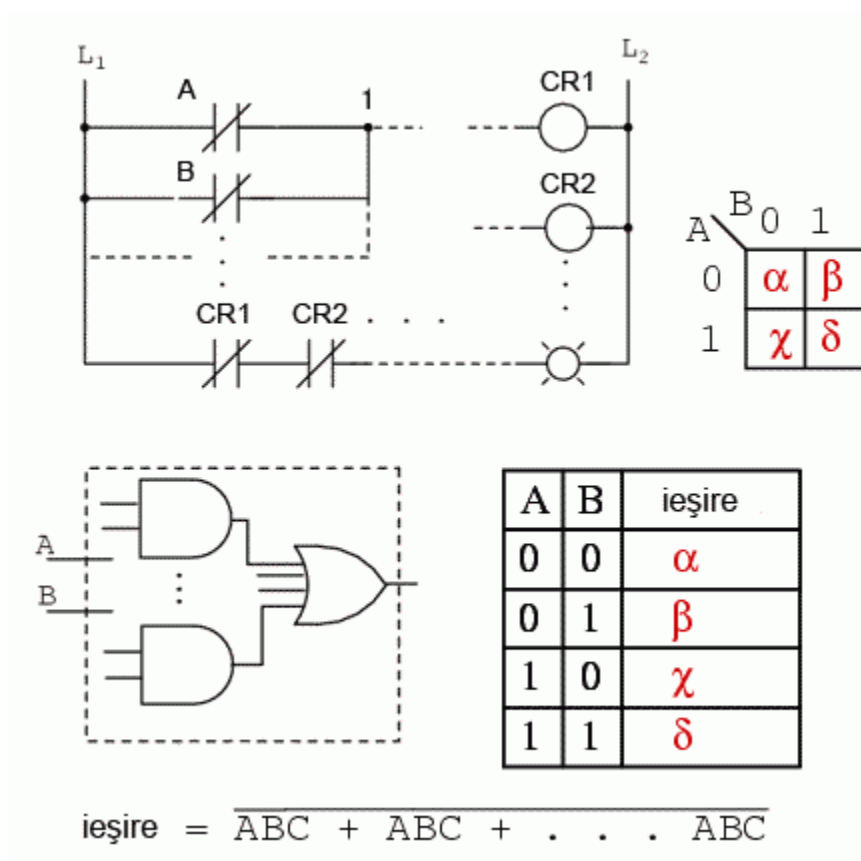


Fig. 8-21 reprezentarea unei funcții logice prin diferite metode

Aceste patru ieșiri pot fi observate prin intermediul unei lămpi la ieșirea circuitului ce utilizează logica ladder. Aceste ieșiri pot fi înregistrate într-un tabel de adevăr sau într-o hartă Karnaugh. Priviți harta Karnaugh ca și

un tabel de adevăr „cosmetizat”. Ieșirea ecuației booleene poate fi obținută cu ajutorul legilor algebrei booleene și transferată tabelului de adevăr sau hărții Karnaugh. Care din cele cinci metode echivalente de reprezentare ar trebui să o folosim? Cea mai folositoare pentru situația în cauză.

Ieșirile unui tabel de adevăr corespund unu-la-unu elementelor unei hărți Karnaugh. Începând cu partea de sus a tabelului de adevăr, intrările  $A = 0$  și  $B = 0$  produc ieșirea  $\alpha$ . Observați că aceeași ieșire  $\alpha$ , se regăsește pe harta Karnaugh la adresa  $A = 0, B = 0$ , în partea de sus stânga, la intersecția coloanei  $B = 0$  cu rândul  $A = 0$ . Celelalte ieșiri ale tabelului de adevăr,  $\beta, \chi$  respectiv  $\delta$ , corespund intrărilor  $AB = 01, 10$  respectiv  $11$  au de asemenea corespondent pe harta Karnaugh:

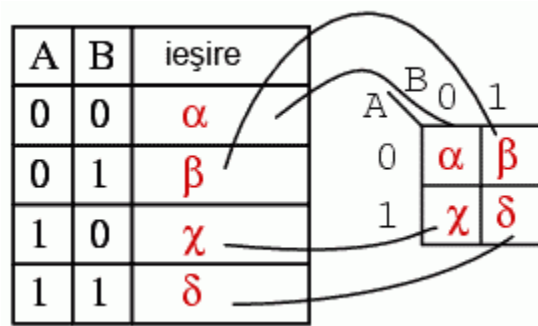


Fig. 8-22 corespondența tabel de adevăr - harta Karnaugh

### 8.5.2 Structura hărților Karnaugh

Pentru ușurința expunerii, prezentăm mai jos regiunile adiacente ale hărții Karnaugh cu două variabile folosind metoda dreptunghiulară a diagramei Venn din secțiunea precedentă:



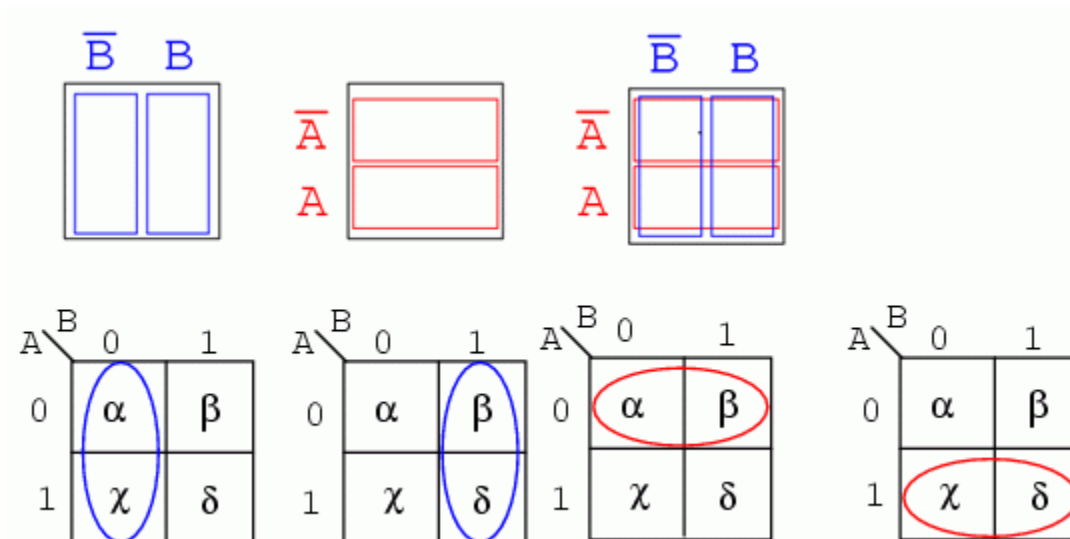


Fig. 8-23 hărți Karnaugh

Regiunile  $\alpha$  și  $\chi$  sunt adiacente pe harta Karnaugh. Nu putem spune același lucru despre tabelul de adevăr precedent, întrucât există o altă valoare ( $\beta$ ) între ele. Acesta este și motivul organizării hărților Karnaugh sub formă de matrice pătrată. Regiunile cu variabile booleene comune trebuie să se afla una lângă cealaltă. Această structură este și trebuie să fie ușor de recunoscut când privim o astfel de hartă, din moment ce  $\alpha$  și  $\chi$  au variabila  $B$  în comun. Știm acest lucru deoarece  $B$  este 0 (identic cu  $B'$ ) pentru coloana de deasupra celor două regiuni. Comparați acest lucru cu diagrama Venn de deasupra hărții Karnaugh.

În aceeași ordine de idei, putem observa că  $\beta$  și  $\delta$  au ca și variabilă comună  $B$  ( $B = 1$ ). Prin urmare,  $\alpha$  și  $\beta$  au în comun variabila booleană  $A'$  ( $A = 0$ ), iar  $\chi$  și  $\delta$  variabila  $A$  ( $A = 1$ ).

Pe scurt, am încercat să grupăm variabilele booleene pe regiuni astfel încât să reiasă elementele lor comune. Hărțile Karnaugh sunt organizate pentru a ne oferi exact această „imagine”.

### 8.5.3 Exemple de utilizare a hărților Karnaugh

#### 8.5.3.1 Exemplul 1

Tabelul de adevăr de mai jos conține două valori de 1. Harta Karnaugh trebuie să conțină și ea tot două valori de 1:

- Luăm prima valoare de 1 din rândul al doilea al tabelului de adevăr
- Observăm adresa AB a tabelului de adevăr
- Localizăm regiunea hărții Karnaugh ce conține aceeași adresă
- Scriem un 1 în acea regiune

- Repetăm procesul pentru valoarea 1 din ultima linie a tabelului de adevăr

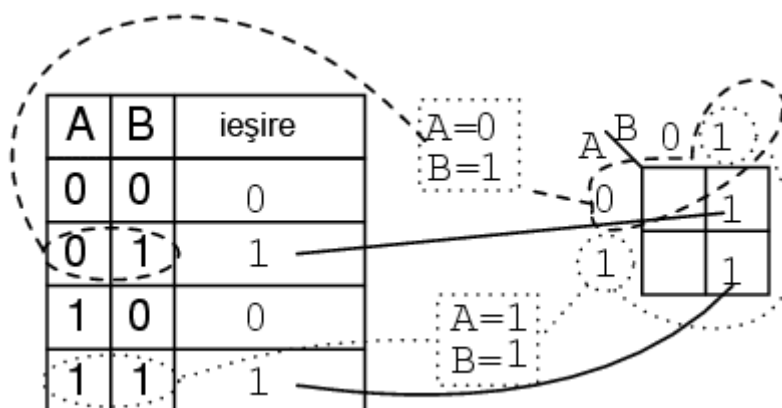


Fig. 8-24 transformarea tabelului de adevăr în harta Karnaugh

Să încercăm să scriem acum pentru harta Karnaugh de mai sus și expresia booleană. Soluția este prezentată mai jos:

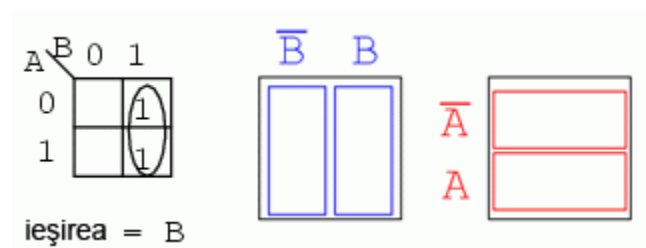


Fig. 8-25 scrierea expresiei booleene folosind harta Karnaugh

- Căutăm regiuni adiacente (regiunile diagonale nu sunt adiacente), întrucât acestea vor avea una sau mai multe variabile booleene în comun
  - Grupăm cele două valori de 1 din coloană
  - Căutăm acea sau acele variabile ce sunt comune pentru grup și scriem acest lucru ca și rezultat boolean (în cazul nostru acesta este B)
  - Ignorăm variabilele ce nu sunt identice pentru un grup de regiuni (în cazul nostru, A variază, este atât 1 cât și 0, prin urmare, ignorăm A)
  - Ignorăm de asemenea orice variabilă ce nu este asociată cu regiunile ce conțin 1 (B' nu conține niciun 1, prin urmare, ignorăm B')
  - Rezultatul final și prin urmare expresia booleană asociată hărții Karnaugh precedente este B
- Acest lucru poate fi observat mai ușor comparând diagramele Venn din dreapta, în mod special coloana B.

### 8.5.3.2 Exemplul 2

Scrieți expresia booleană asociată hărții Karnaugh de mai jos:

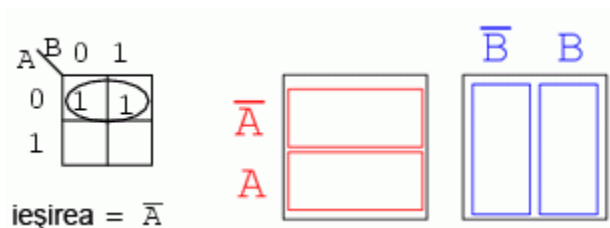


Fig. 8-26 scrierea expresiei booleene asociată hărții Karnaugh

Urmând o logică asemănătoare celei de mai sus, grupăm toate valorile de 1 și găsim variabila comună întregului grup astfel format; rezultatul este  $A'$ .

### 8.5.3.3 Exemplul 3

Pentru tabelul de adevăr de mai jos, găsiți harta Karnaugh corespunzătoare și scrieți apoi expresia booleană folosind rezultatul obținut. Soluția este prezentată mai jos:

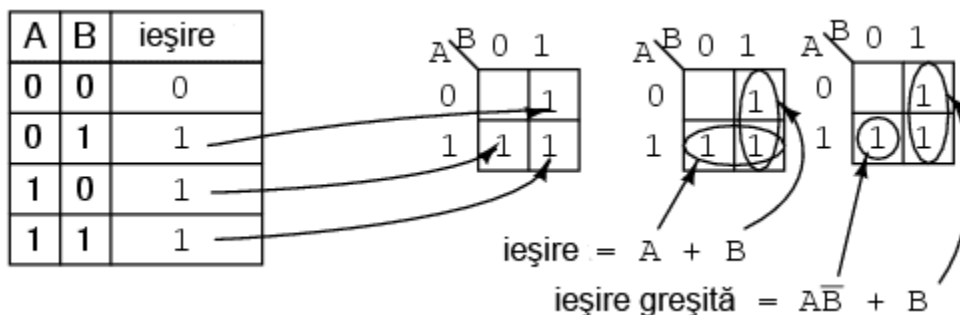


Fig. 8-27 scrierea expresiei booleene asociată hărții Karnaugh

- Transferăm valorile de 1 din tabelul de adevăr în locațiile corespunzătoare pe harta Karnaugh
- Grupăm cele două valori de 1 pe coloana de sub  $B = 1$
- Grupăm cele două valori de 1 de pe rândul  $A = 1$
- Scriem rezultatul produsului primului grup ( $B$ )
- Scriem rezultatul produsului celui de al doilea grup ( $A$ )
- Scriem suma produselor celor doi termeni de mai sus ( $A + B$ )

Soluția din mijloc este cea mai simplă și prezintă cel mai mic cost. O soluție mai puțin dorită este cea din dreapta. După gruparea valorilor 1, facem greșeala de a forma un grup cu o singură regiune. Motivul pentru care

acest lucru nu este de dorit este următorul: acest grup ce conține o singură regiune are termenul produsului egal cu  $AB'$ ; soluția întregii hărți este în acest caz  $AB' + B$ , iar aceasta nu reprezintă cea mai simplă soluție.

Metoda corectă constă în gruparea acestui 1 singur cu regiunea din dreapta lui, regiune ce conține la rândul ei o valoare de 1, chiar dacă aceasta a fost deja inclusă într-un alt grup. (coloana B). Putem refolosi regiuni pentru a forma grupuri mai mari. De fapt, este chiar indicat să facem acest lucru întrucât conduce la rezultate mai simple.

Trebuie să facem observația că oricare dintre soluțiile de mai sus, atât cea corectă cât și cea „greșită” sunt de fapt corecte din punct de vedere logic. Ambele circuite vor genera aceeași ieșire. Pur și simplu, circuitul corect presupune un cost mai redus de implementare fizică.

#### 8.5.3.4 Exemplul 4

Completați o hartă Karnaugh folosind expresia booleană de mai jos. Scrieți apoi expresia booleană a rezultatului:

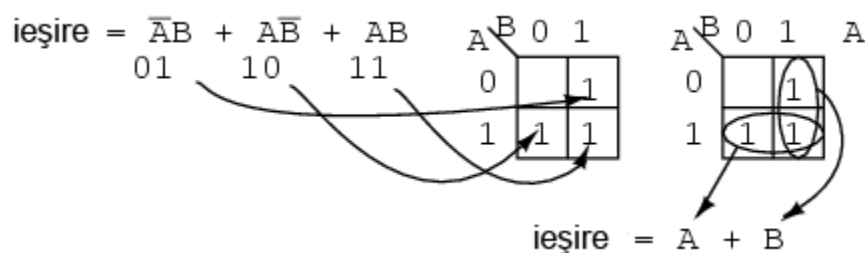


Fig. 8-28 simplificarea expresiei boolene folosind harta Karnaugh

Expresia booleană conține trei sume de produse. Va exista câte o valoare de 1 pe harta Karnaugh pentru fiecare produs. Deși, în general, numărul valorilor de 1 pe produs variază cu numărul variabilelor produsului în comparație cu mărimea hărții Karnaugh. Termenul produsului reprezintă adresa regiunii unde vom introduce valoare de 1. Primul termen este  $A'B$  și corespunde adresei 01 a hărții. Introducem un 1 în această regiune. Similar, introducem și ceilalți doi termeni de 1.

Trecem apoi la gruparea termenilor și simplificarea rezultatului conform exemplului precedent.

#### 8.5.3.5 Exemplul 5

Simplificați circuitul logic de mai jos:

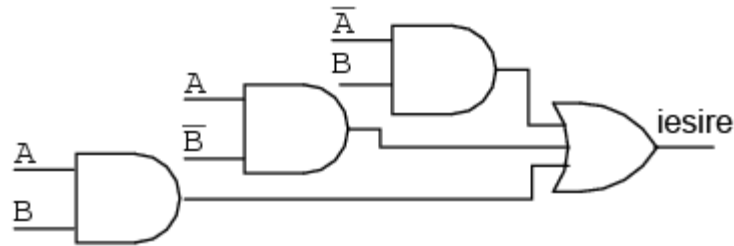


Fig. 8-29 circuit logic inițial (nesimplificat)

- Scriem expresia booleană pentru circuitul logic inițial
- Transferăm expresia booleană rezultată într-o hartă Karnaugh
- Grupăm regiunile precum în exemplele precedente
- Scriem expresii booleene pentru fiecare grup, conform exemplelor precedente
- Redesenăm circuitul logic simplificat

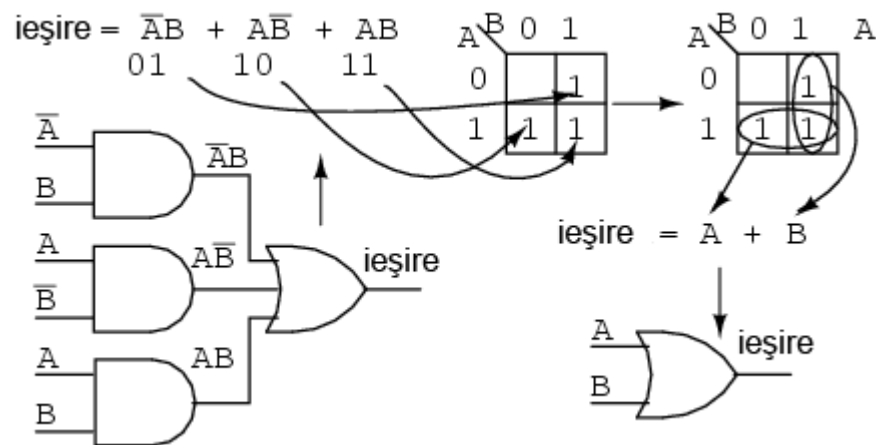


Fig. 8-30 circuit logic simplificat cu ajutorul hărții Karnaugh

### 8.5.3.6 Exemplul 6

Simplificați circuitul logic de mai jos:

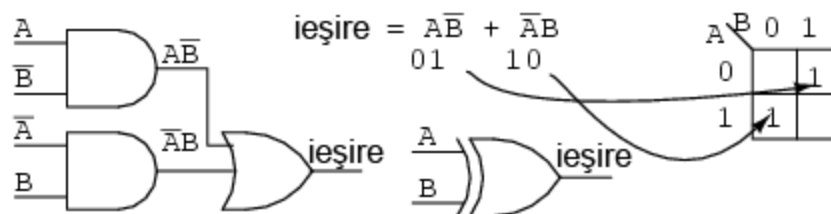


Fig. 8-31 simplificarea circuitului logic

- Scriem expresia booleană pentru circuitul logic inițial
- Completăm harta Karnaugh
- Observăm că nu putem forma niciun grup care să conțină mai mult de două regiuni 1
- Prin urmare, simplificarea nu este posibilă, iar expresia finală este identică cu cea inițială (SAU-exclusiv)

## 8.6 Simplificarea circuitelor logice cu hărți Karnaugh

Exemplele de simplificare a circuitelor logice de până acum puteau fi realizate la fel de bine și cu ajutorul algebrei booleene. Problemele de simplificare logică reale implică însă utilizarea unor hărți Karnaugh mai mari. În această secțiune vom concepe câteva exemple imaginare, lăsând aplicațiile practice pentru capitolul de logică combinațională. Aceste exemple sunt concepute doar pentru a ilustra tehnicile de simplificare.

Vom folosi harta Karnaugh dezvoltată anterior, mai exact forma din dreapta:

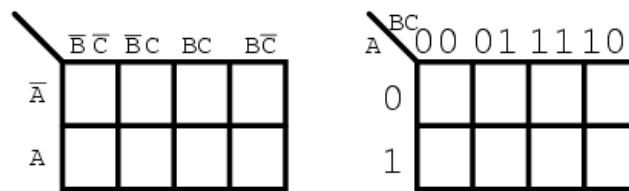


Fig. 8-32 hărți Karnaugh; variante

### 8.6.1 Codul Gray

Observați secvența numerelor din partea superioară a hărții. Aceasta nu este o secvență binară (00, 01, 10, 11), ci este o secvență de tipul 00, 01, 11, 10. Această secvență este cunoscută sub numele de cod Gray. Secvența de tip cod Gray modifică doar un singur bit pe măsură ce trecem de la un număr la următorul număr din secvență. Acest lucru nu este valabil într-o secvență binară. Regiunile adiacente diferă doar printr-un singur bit, sau variabilă booleană. Acest lucru este necesar dacă dorim organizarea ieșirilor unei funcții logice pentru observarea elementelor lor comune.

Mai mult, antetul coloanelor și rândurilor trebuie să fie în ordinea codului Gray, altfel, harta nu se va comporta precum o hartă Karnaugh. Regiunile ce au în comun variabile booleene nu vor mai fi adiacente și nu vom mai putea identifica caracteristicile specifice funcției pe cale vizuală. Regiunile adiacente variază cu un singur bit, deoarece secvența de cod Gray variază la rândul ei doar cu un singur bit.

### 8.6.2 Hărți Karnaugh cu 3 variabile - exemple de simplificare

Să folosim în continuare hărțile Karnaugh cu 3 variabile pentru simplificarea unor expresii booleene. Vom arăta cum să trecem termenii produs ai ecuației nesimplificate în harta Karnaugh. Vom ilustra și modul de identificare a grupurilor de regiuni adiacente ce duc la formarea sumei de produse simplificate a circuitului logic (expresiei booleene).

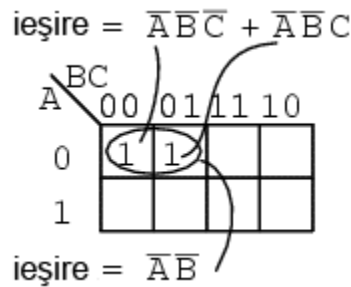


Fig. 8-33 simplificarea expresiei booleene cu harta Karnaugh

Dându-se expresia  $(A'B'C' + A'B'C)$ , primul pas este introducerea valorilor de 1 pe harta Karnaugh corespunzător poziției fiecărui produs al sumei ( $A'B'C'$  este echivalent cu 000, iar  $A'B'C$  este echivalent cu 001). Identificăm apoi un grup de regiuni alăturate ce conțin valori de 1 (în cazul de față, avem doar două astfel de regiuni). Scriem apoi produsul de termeni pentru acest grup, ceea ce reprezintă rezultatul simplificat.

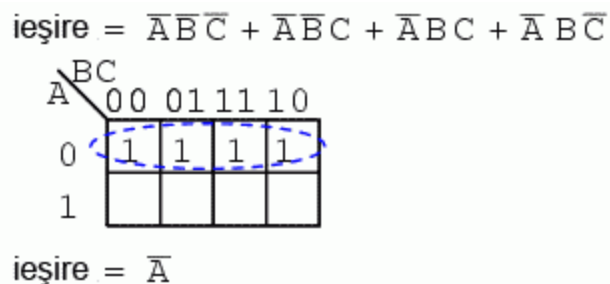


Fig. 8-34 simplificarea expresiei booleene cu harta Karnaugh

Grupând cei patru termeni de 1 pe harta Karnaugh, rezultatul este asigurat de expresia  $A'$ .

$$\text{ieșire} = \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}BC + A\bar{B}C + ABC$$

| A \ BC | 00 | 01 | 11 | 10 |
|--------|----|----|----|----|
|        |    |    |    |    |
| 0      |    | 1  | 1  |    |
| 1      |    | 1  | 1  |    |

$$\text{ieșire} = C$$

Fig. 8-35 simplificarea expresiei booleene cu harta Karnaugh

Identic, grupând cei patru termeni de 1, putem foarte ușor observa că singura variabilă ce acoperă toate cele patru regiuni este C.

$$\text{ieșire} = \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}BC + \bar{A}B\bar{C} + ABC + AB\bar{C}$$

| A \ BC | 00 | 01 | 11 | 10 |
|--------|----|----|----|----|
|        |    |    |    |    |
| 0      | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 1      |    |    | 1  | 1  |

$$\text{ieșire} = \bar{A} + B$$

Fig. 8-36 simplificarea expresiei booleene cu harta Karnaugh

Din moment ce avem două grupuri pe harta Karnaugh de mai sus, rezultatul va fi o sumă de produse, și anume,  $A' + B$ .

$$\text{ieșire} = \bar{A}BC + ABC$$

| A \ BC | 00 | 01 | 11 | 10 |
|--------|----|----|----|----|
|        |    |    |    |    |
| 0      |    |    | 1  |    |
| 1      |    |    | 1  |    |

$$\text{ieșire} = BC$$

Fig. 8-37 simplificarea expresiei booleene cu harta Karnaugh

Cele două produse de mai sus formează un grup de doi termeni ce se simplifică la BC.



$$\text{ieșire} = \overline{A}BC + \overline{A}B\overline{C} + ABC + AB\overline{C}$$

|        |    |    |    |    |
|--------|----|----|----|----|
| A \ BC | 00 | 01 | 11 | 10 |
|        |    |    |    |    |
| 0      |    |    | 1  | 1  |
| 1      |    |    | 1  | 1  |

$$\text{ieșire} = B$$

Fig. 8-38 simplificarea expresiei booleene cu harta Karnaugh

Variabila comună celor patru termeni grupați mai sus este B

$$\text{ieșire} = \overline{A}\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + AB\overline{C}$$

|        |    |    |    |    |
|--------|----|----|----|----|
| A \ BC | 00 | 01 | 11 | 10 |
|        |    |    |    |    |
| 0      | 1  |    |    | 1  |
| 1      | 1  |    |    | 1  |

$\text{ieșire} = \overline{C}$

Fig. 8-39 simplificarea expresiei booleene cu harta Karnaugh

Cei patru termeni de mai sus formează un singur grup. Putem vizualiza acest grup dacă „îndoim” extremitățile hărții pentru a forma un cilindru. În acest caz, regiunile sunt adiacente. În mod normal, un astfel de grup se notează conform figurii din stânga. Din întregul set de variabile (A, B, C), singura variabilă comună este C'. C' este zero în toate cele patru regiuni. Acesta este atunci rezultatul final al simplificării.

$$\text{ieșire} = \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} + AB\overline{C}$$

|        |    |    |    |    |
|--------|----|----|----|----|
| A \ BC | 00 | 01 | 11 | 10 |
|        |    |    |    |    |
| 0      | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 1      | 1  |    |    | 1  |

$$\text{ieșire} = \overline{A} + \overline{C}$$

Fig. 8-40 simplificarea expresiei booleene cu harta Karnaugh

Cele șase regiuni rezultate din ecuația nesimplificată pot fi organizate în două grupuri de câte patru elemente. Aceste grupuri trebuie să rezulte într-o sumă de două produse, și anume  $A' + C'$ .

### 8.6.3 Incinerator deșeuri toxice - reconsiderare

Să reluăm mai jos exemplul incineratorului de deșeuri toxice studiat într-un capitol precedent. Vom încerca simplificarea circuitului logic folosind o hartă Karnaugh:

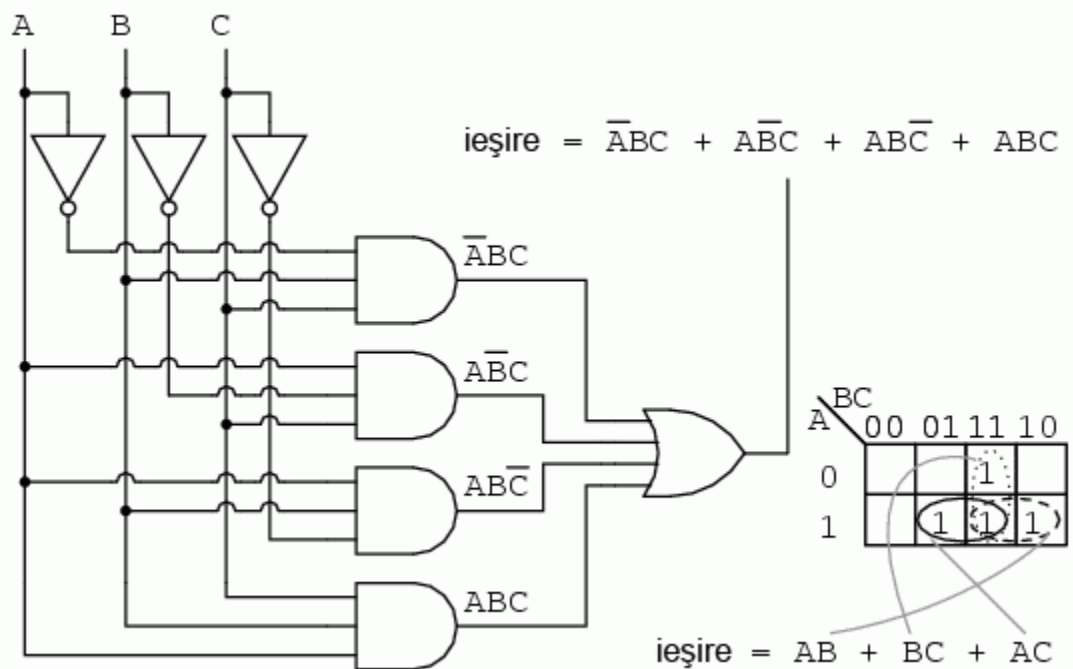


Fig. 8-41 incinerator deșeuri toxice - simplificarea circuitului logic folosind hărți Karnaugh

Ecuția booleană de ieșire este o sumă de patru produse. Prin urmare, vom avea patru regiuni de 1 pe harta Karnaugh. Grupând regiunile adiacente, avem trei grupuri de câte doi termeni. Vom avea prin urmare o sumă de trei produse, fiecare produs conținând doi termeni. Circuitul logic simplificat, identic cu cel obținut cu ajutorul regulilor de simplificare booleană, este redat mai jos:

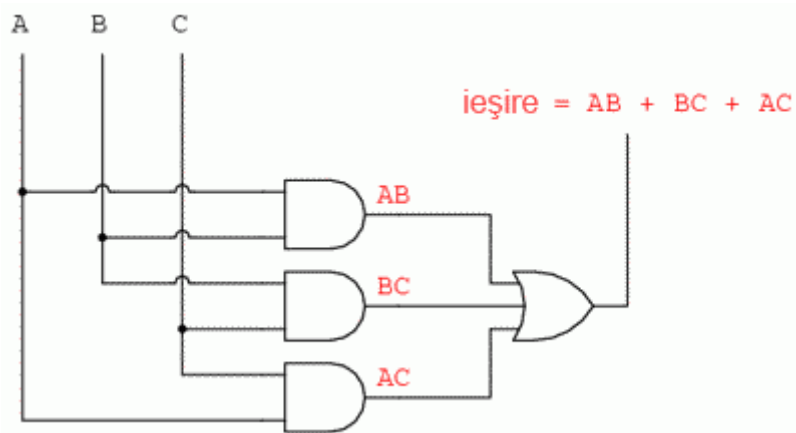


Fig. 8-42 incinerator deșeuri toxice - circuitul logic simplificat

Făcând o comparație între regulile booleene folosite pentru simplificarea circuitului logic al incineratorului...

$$\begin{array}{l}
 \bar{A}BC + A\bar{B}C + AB\bar{C} + ABC \\
 \downarrow \text{BC comun termenilor 1 și 4} \\
 BC(\bar{A} + A) + A\bar{B}C + AB\bar{C} \\
 \downarrow \text{Aplicarea identității } A + \bar{A} = 1 \\
 BC(1) + A\bar{B}C + AB\bar{C} \\
 \downarrow \text{Aplicarea identității } 1A = A \\
 BC + A\bar{B}C + AB\bar{C} \\
 \downarrow \text{B comun termenilor 1 și 3} \\
 B(C + A\bar{C}) + A\bar{B}C \\
 \downarrow \text{Aplicarea regulii } A + \bar{A}B = A + B \text{ termenului } C + A\bar{C} \\
 B(C + A) + A\bar{B}C \\
 \downarrow \text{Distribuirea termenilor} \\
 BC + AB + A\bar{B}C \\
 \downarrow \text{A comun termenilor 2 și 3} \\
 BC + A(B + \bar{B}C) \\
 \downarrow \text{Aplicarea regulii } A + \bar{A}B = A + B \text{ termenului } B + \bar{B}C \\
 BC + A(B + C) \\
 \downarrow \text{Distribuirea termenilor} \\
 BC + AB + AC \\
 \text{sau} \\
 AB + BC + AC \\
 \text{Rezultat simplificat}
 \end{array}$$

Fig. 8-43 incinerator deșeuri toxice - simplificarea booleană

...și harta Karnaugh, care duce la exact același rezultat...



Fig. 8-44 incinerator deșeuri toxice - simplificarea circuitului logic folosind hărți Karnaugh

Putem lesne vedea motivul pentru care hărțile Karnaugh sunt preferate pentru simplificarea circuitelor logice în detrimentul simplificării booleene.

## 8.7 Hărți Karnaugh cu patru variabile

Folosindu-ne de codul Gray, putem construi hărți Karnaugh mai mari. O hartă Karnaugh cu patru variabile arată precum cea de mai jos:

|       |    | CD |    |    |    |
|-------|----|----|----|----|----|
|       |    | 00 | 01 | 11 | 10 |
| A \ B | 00 |    |    |    |    |
|       | 01 |    |    |    |    |
|       | 11 |    |    |    |    |
|       | 10 |    |    |    |    |

Fig. 8-45 hartă Karnaugh cu 4 variabile

Exemplele de mai jos ilustrează simplificarea expresiilor booleene ce sunt prea greu de realizat prin intermediul regulilor de simplificare booleană. Aceste expresii pot fi simplificate cu algebra booleană. Totuși, utilizarea hărților Karnaugh este un procedeu mult mai rapid și mai ușor, mai ales dacă există multe simplificări logice de realizat.

### 8.7.1 Exemple de simplificare logică cu hărți Karnaugh de patru variabile

#### 8.7.1.1 Exemplul 1

$$\text{ieșire} = \overline{A}\overline{B}CD + \overline{A}B\overline{C}D + AB\overline{C}D + A\overline{B}CD + AB\overline{C}\overline{D} + AB\overline{C}D + ABC\overline{D}$$

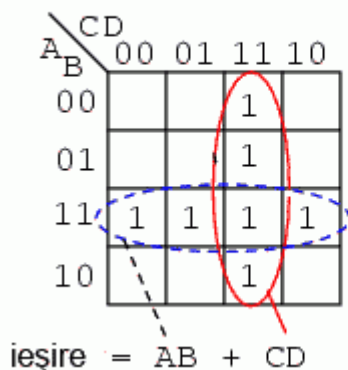


Fig. 8-46 simplificarea expresiei boolene folosind harta Karnaugh

Expresia booleană de mai sus conține 7 produse. Acești termeni sunt grupați de sus în jos și de la stânga la dreapta pe harta Karnaugh de mai sus. De exemplu, primul termen,  $A'B'CD$ , se regăsește pe rândul 1, căsuța a 3-a, și corespunde locației  $A = 0$ ,  $B = 0$ ,  $C = 1$ ,  $D = 1$ . Ceilalți termeni sunt poziționați într-o manieră similară. Grupul orizontal (albastru) corespunde termenului  $AB$ , iar grupul vertical (roșu) corespunde expresiei booleene  $CD$ . Din moment ce avem două grupuri, rezultatul trebuie să fie o sumă de două produse, prin urmare,  $AB + CD$ .

### 8.7.1.2 Exemplul 2

$$\text{ieșire} = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}C\overline{D}$$

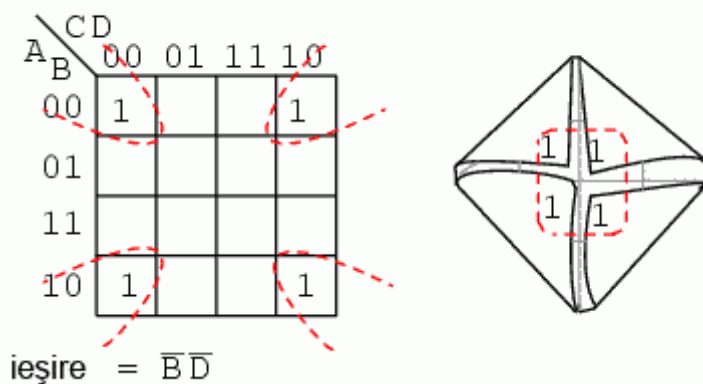


Fig. 8-47 simplificarea expresiei boolene folosind harta Karnaugh

În cazul de mai sus, „împăturim” cele patru colțuri ale hărții Karnaugh, precum un șervețel, pentru a observa mai bine adiacența celor patru regiuni.  $B = 0$  și  $D = 0$  pentru toate regiunile. Celelalte variabile,  $A$  și  $C$ , sunt 0 în unele cazuri și 1 în altele. Prin urmare, aceste variabile nu se vor regăsi în rezultatul final al expresiei simplificate.

### 8.7.1.3 Exemplul 3

$$\text{ieșire} = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}\overline{B}CD + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}BC\overline{D} + \overline{A}BCD$$

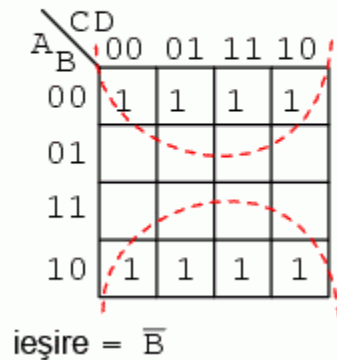


Fig. 8-48 simplificarea expresiei boolene folosind harta Karnaugh

Pentru o vizualizare mai bună, ne putem imagina că îndoiim marginile de jos și de sus a hărții sub forma unui cilindru. În acest caz, ambele grupuri sunt adiacente și formează practic un singur grup. Acest lucru ne spune că rezultatul este un singur termen. Singura variabilă comună a acestui grup de 8 variabile este  $B = 0$ . Rezultatul simplificării este prin urmare  $B'$ .

### 8.7.1.4 Exemplul 4

$$\text{ieșire} = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}\overline{B}CD + B\overline{C}\overline{D} + B\overline{C}D + A\overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}D + A\overline{B}C\overline{D}$$

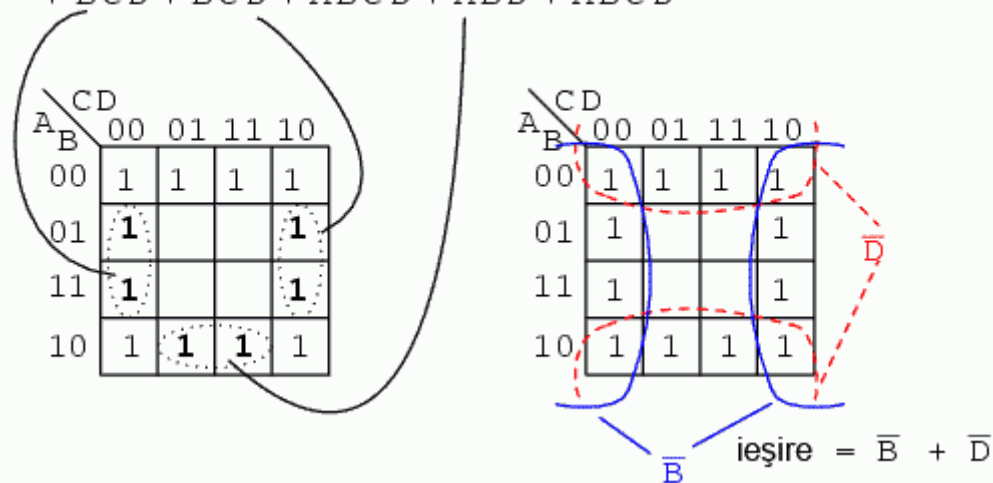


Fig. 8-49 simplificarea expresiei boolene folosind harta Karnaugh

Expresia booleană de mai sus conține 9 termeni de produse, dintre care trei au doar trei variabile booleene în loc de patru. Diferența constă în faptul că, deși termenii ce conțin patru variabile booleene acoperă o singură regiune, termenii cu trei variabile booleene acoperă o pereche de regiuni fiecare.

Trecând la simplificare, formăm două grupuri de câte opt termeni. Regiunile ce se regăsesc în colț sunt comune ambelor grupuri. Acest lucru este corect. De fapt, această strategie conduce la o soluție mai bună decât dacă am fi format un grup de opt și un grup de patru regiuni, fără nicio regiune comună celor două. Soluția finală este  $B' + D'$ .

### 8.7.1.5 Exemplul 5

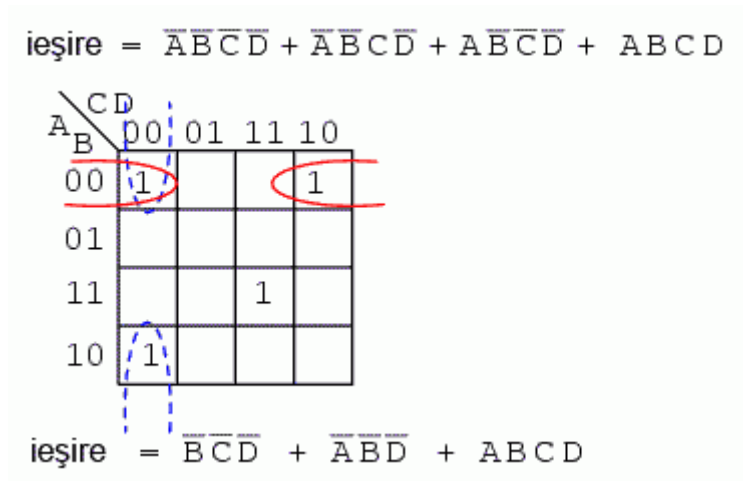


Fig. 8-50 simplificarea expresiei boolene folosind harta Karnaugh

În exemplul de mai sus, trei regiuni formează două grupuri de câte două. O a patra regiune nu poate fi combinată cu nicio altă regiune, ceea ce se întâmplă frecvent în situațiile reale. În acest caz, termenul  $ABCD$  rămâne neschimbat în cadrul procesului de simplificare a expresiei booleene inițiale. Rezultatul este  $B'C'D' + A'B'D' + ABCD$ .

### 8.7.1.6 Exemplul 6

Adeseori, există mai mult de o singură soluție cu cost minim pentru expresia nesimplificată. Un astfel de caz este cel de mai jos:



$$\text{ieșire} = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}\overline{B}CD + \\ + ABCD + ABC\overline{D} + A\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}C\overline{D}$$

| A \ B \ CD | 00 | 01 | 11 | 10 |
|------------|----|----|----|----|
| 00         | 1  | 1  |    |    |
| 01         |    | 1  | 1  |    |
| 11         |    |    | 1  | 1  |
| 10         | 1  |    |    | 1  |

| A \ B \ CD | 00 | 01 | 11 | 10 |
|------------|----|----|----|----|
| 00         | 1  | 1  |    |    |
| 01         |    | 1  | 1  |    |
| 11         |    |    | 1  | 1  |
| 10         | 1  |    |    | 1  |

$$\text{ieșire} = \overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{C}D + BCD + AC\overline{D}$$

$$\text{ieșire} = \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}BD + ABC + A\overline{B}\overline{D}$$

Fig. 8-51 simplificarea expresiei boolene folosind harta Karnaugh

Ambele rezultate de mai sus conțin patru termeni, cu trei variabile boolene fiecare. Ambele soluții sunt valide din punct de vedere al minimizării costurilor. Diferența dintre cele două soluții finale constă în modul de grupare al regiunilor. Reamintim faptul că o soluție cu cost minim este aceea soluție ce permite o implementare fizică a circuitului logic cu un număr cât mai mic de porți logice și număr de intrări.

### 8.7.1.7 Exemplul 7

$$\text{ieșire} = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}\overline{B}CD + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}BC\overline{D} + \overline{A}BCD + \\ + AB\overline{C}\overline{D} + AB\overline{C}D + ABCD$$

| A \ B \ CD | 00 | 01 | 11 | 10 |
|------------|----|----|----|----|
| 00         | 1  | 1  | 1  |    |
| 01         | 1  | 1  | 1  |    |
| 11         | 1  | 1  | 1  |    |
| 10         |    |    |    |    |

| A \ B \ CD | 00 | 01 | 11 | 10 |
|------------|----|----|----|----|
| 00         | 1  | 1  | 1  |    |
| 01         | 1  | 1  | 1  |    |
| 11         | 1  | 1  | 1  |    |
| 10         |    |    |    |    |

| A \ B \ CD | 00 | 01 | 11 | 10 |
|------------|----|----|----|----|
| 00         | 1  | 1  | 1  |    |
| 01         | 1  | 1  | 1  |    |
| 11         | 1  | 1  | 1  |    |
| 10         |    |    |    |    |

$$\text{ieșire} = \overline{A}\overline{C} + \overline{A}D + B\overline{C} + BD$$

Fig. 8-52 simplificarea expresiei boolene folosind harta Karnaugh

În următorul exemplu, cel de mai sus, după ce trecem toate valorile de 1 pe hartă Karnaugh, realizăm primul pas al simplificării, și anume, gruparea primelor patru regiuni (stânga). În acest punct, s-ar putea să nu fie foarte evident cum am putea grupa regiunile rămase.

La pasul al doilea (centru), grupăm încă patru regiuni. Mai rămân în acest moment încă două regiuni negrupate. Soluția cu cost minim este să grupăm aceste două regiuni, ca și grupuri de patru, conform figurii din dreapta.

Atenție, nu încercați să realizați grupuri de câte trei. Grupările trebuie să fie sub forma puterilor lui 2, și anume, 1, 2, 4, 8, etc.

### 8.7.1.8 Exemplul 8

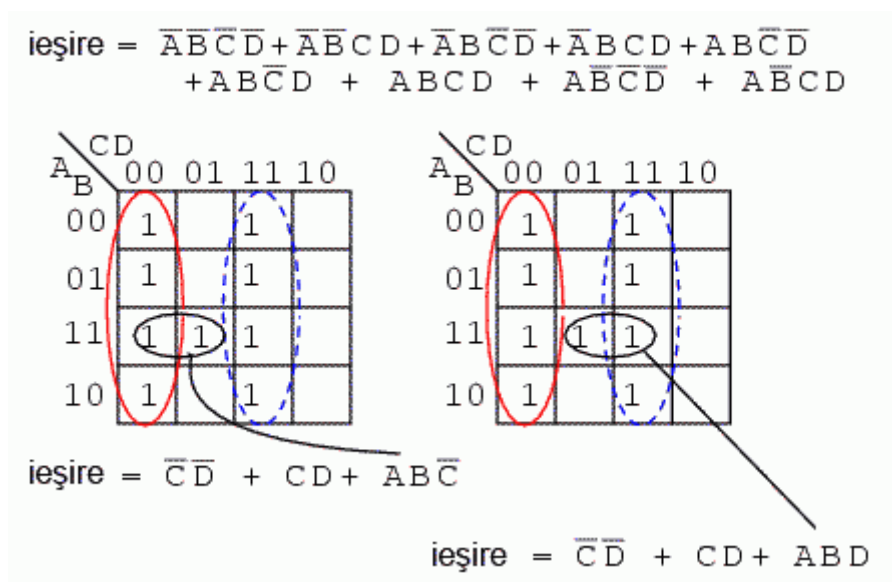


Fig. 8-53 simplificarea expresiei boolene folosind harta Karnaugh

Avem din nou mai sus un exemplu ce suportă două soluții cu cost minim. Formăm inițial cele două grupuri de câte patru regiuni (roșu și albastru). Soluția finală depinde de modul în care grupăm regiunea rămasă liberă. Dacă o introducem în grupul din stânga (roșu), soluția este  $ABC'$ . Dacă o introducem în grupul din dreapta (albastru), soluția este  $ABD$ . Indiferent de alegerea făcută, ambele soluții sunt corecte din punct de vedere al minimizării costurilor de implementare.

### 8.7.1.9 Exemplul 9

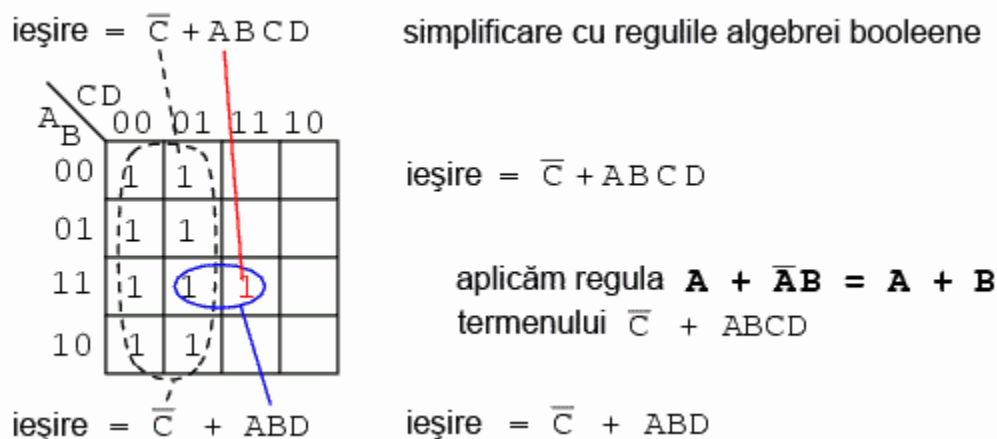


Fig. 8-54 simplificarea expresiei boolene folosind harta Karnaugh

Mai sus este un exemplu de simplificare cu hărți Karnaugh (stânga) precum și cu regulile algebrei booleene (dreapta).  $C'$  ( $C = 0$ ) reprezintă aria formată de cele opt regiuni din stânga. Regiunea rămasă negrupată este echivalentă cu expresia  $ABCD$ . Grupând această regiune cu cea din stânga ei, simplifică termenul  $ABCD$  la  $ABD$ . Rezultatul final este prin urmare  $C' + ABD$ .

Cazul de mai sus este un exemplu rar a unei probleme cu patru variabile ce poate fi redusă destul de ușor și cu algebra booleană. Asta în cazul în care vă amintiți teoremele de simplificare booleană.

## 8.8 Mintermeni și maxtermeni

### 8.8.1 Soluția sub forma produsului de sume

Până în acest moment am căutat soluții sub forma unei sume de produse la problemele de simplificare booleană. Pentru fiecare dintre aceste soluții există o altă soluție sub forma unui produs de sume. Acest tip de soluție se poate dovedi a fi mai practică, în funcție de aplicație. Dar, înainte de a scrie soluțiile sub forma unui produs de sume, trebuie să introducem câteva concepte noi. Procedura de mai jos pentru extragerea termenilor sub formă de produs nu este nouă. Vrem doar să stabilim o procedură formală pentru mintermeni, ca mai apoi, să putem face o comparație cu noua procedură pentru maxtermeni.

### 8.8.2 Analiza regiunilor ce conțin valori de 1 - mintermeni

Un mintermen este o expresie booleană rezultând într-o valoare de 1 pentru ieșirea unei singure regiuni dintr-o hartă Karnaugh. Toate celelalte regiuni ale hărții Karnaugh sau ale tabelului de adevăr fiind 0 în acest caz. Dacă un mintermen conține un singur 1, iar regiunile rămase sunt toate 0, aria minimă pe care acest mintermen o acoperă este 1.

Figura de mai jos (stânga) prezintă mintermenul ABC, un singur termen sub formă de produs, ca și o singură valoare de 1 pe o hartă Karnaugh unde toate celelalte regiuni sunt 0. Până în acest moment, nu am prezentat valorile de 0 pe hărțile Karnaugh considerate. Acestea se omit de obicei, excepție făcând cazurile speciale. Un alt mintermen, A'BC' este cel din dreapta. Ceea ce vrem să subliniem este faptul că adresa regiunii corespunde direct cu mintermenul extras de pe hartă. Regiunea 111 corespunde mintermenului ABC din stânga. Regiunea 010 corespunde la rândul ei mintermenului A'BC'. O expresie booleană sau o hartă poate avea mai mulți mintermeni.

Referindu-ne la figura de mai sus, putem scrie procedura introducerii unui mintermen pe o hartă Karnaugh:

- Identificăm mintermenul (produsul) ce vrem să-l introducem pe hartă
- Scriem valoarea numerică corespunzătoare
- Ne folosim de valoarea binară ca și adresă pe hartă
- Introducem un 1 la adresa respectivă
- Repetăm pașii de mai sus pentru un nou mintermen (termenii produs dintr-o sumă de produse)

O expresie booleană este formată de cele mai multe ori din mai mulți mintermeni, corespunzând mai multor regiuni pe o hartă Karnaugh, precum în exemplul de mai jos:

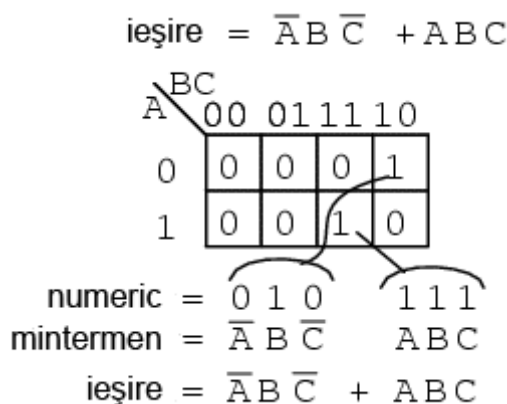


Fig. 8-55 hartă Karnaugh; mintermeni

Mintermenii multipli de pe această hartă sunt mintermenii individuali ce i-am analizat mai sus. Ceea ce vrem să reamintim este faptul că valorile de 1 sunt „traduse” de pe harta Karnaugh ca și o adresă binară transformată direct într-unul sau mai mulți termeni sub formă de produs. Prin direct, ne referim la faptul că 0 corespunde unei variabile negate, iar 1 corespunde unei variabile „pure”. De exemplu, 010 se transformă direct în

$A'BC'$ . În acest exemplu nu a existat nicio simplificare. Totuși, avem ca și rezultat o sumă de produse prin intermediul mintermenilor.

Referindu-ne la figura de mai sus, putem rezuma pe scurt procedura de urmat în cazul simplificării expresiei booleene sub forma unei sume de produse dintr-o hartă Karnaugh:

- Formăm grupuri de 1 cât mai mari posibile, acoperind toți mintermenii de pe hartă. Grupurile trebuie să conțină un număr de regiuni sub forma puterii lui 2 (1, 2, 4, 8, etc.)
- Scriem valori numerice binare pentru fiecare grup
- Transformăm valoarea binară sub forma unui produs
- Repetăm pașii de mai sus pentru toate grupurile formate. Din fiecare grup va rezulta un termen sub formă de produs
- Expresia simplificată reprezintă suma acestor termeni sub formă de produs

Nimic nou până în acest moment. Am scris doar pașii de urmat în cazul mintermenilor. Același lucru îl vom face și în cazul maxtermenilor.

### 8.8.3 Analiza regiunilor ce conțin valori de 0 - maxtermeni

Să considerăm acum o funcție booleană ce este 0 pentru o singură regiune și 1 în rest:

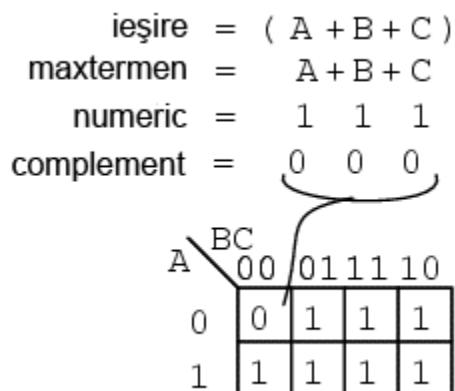


Fig. 8-56 hartă Karnaugh; maxtermeni

Un maxtermen este o expresie booleană a cărei valoare este 0 pentru o singură regiune, toate celelalte regiunii ale hărții Karnaugh sau ale tabelului de adevăr fiind 0. Vedeți și explicația de la mintermen. Figura de sus stânga prezintă un maxtermen ( $A + B + C$ ), o sumă de trei termeni simplii. Pe hartă, această sumă este reprezentată printr-un singur 0, toate celelalte regiunii ale hărții fiind 1. Dacă un maxtermen are un singur 0, iar celelalte regiuni sunt 1, aria maximă pe care o acoperă este 1.

Există câteva diferențe acum că am introdus și maxtermenii. Maxtermenul este un 0, nu un 1 pe harta Karnaugh. Un maxtermen este un termen sub formă de sumă,  $A + B + C$  în cazul nostru, și nu un termen sub formă de produs ( $ABC$ , de exemplu).

Pare ciudat că locația expresiei (termenului)  $(A + B + C)$  pe hartă este 000. Pentru ecuația „ieșire =  $(A + B + C) = 0$ ”, toate cele trei variabile ( $A, B, C$ ) trebuie să fie egale cu 0. Doar expresia  $(0 + 0 + 0) = 0$  va fi egală cu 0. Prin urmare, trecem singurul nostru maxtermen  $(A + B + C)$  în regiunea ce se află la adresa  $A, B, C = 000$  pe harta Karnaugh, unde toate intrările sunt egale cu 0. Aceasta este singura posibilitate pentru a obține valoarea de 0 pentru maxtermen. Toate celelalte regiuni conțin valori de 1 pentru că orice alte valori de intrare diferite de  $(0, 0, 0)$  pentru expresia  $(A + B + C)$  au ca și rezultat 1.

Luând în considerare figura de mai sus, pașii care trebuie urmăriți pentru introducerea unui maxtermen pe harta Karnaugh, sunt următorii:

- Identificăm termenul sub formă de sumă (maxtermenul) ce-l vom introduce pe hartă
- Scriem valoarea numerică binară corespunzătoare
- Formăm complementul
- Utilizăm complementul ca și adresă pentru introducerea valorii de 0 pe harta Karnaugh
- Repetăm pașii de mai sus pentru toți ceilalți maxtermeni (termeni-sumă dintr-o expresie sub forma de produs de sume)

Un alt maxtermen este prezentat în figura de mai jos. Valoarea numerică 000 corespunde termenului  $A' + B' + C'$ . Complementul este 111. Introducem o valoare de 0 pentru maxtermenul  $(A' + B' + C')$  la această adresă (1, 1, 1) a hărții Karnaugh de mai jos:

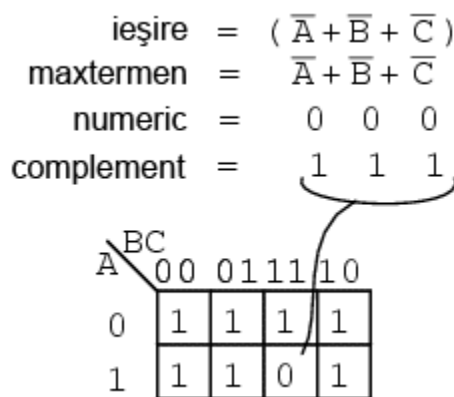


Fig. 8-57 hartă Karnaugh; maxtermeni

#### 8.8.4 Scrierea expresiei booleene simplificate ca și produs de sume

O expresie booleană sub formă produsului de sume poate avea mai mulți maxtermeni, conform figurii de mai jos:

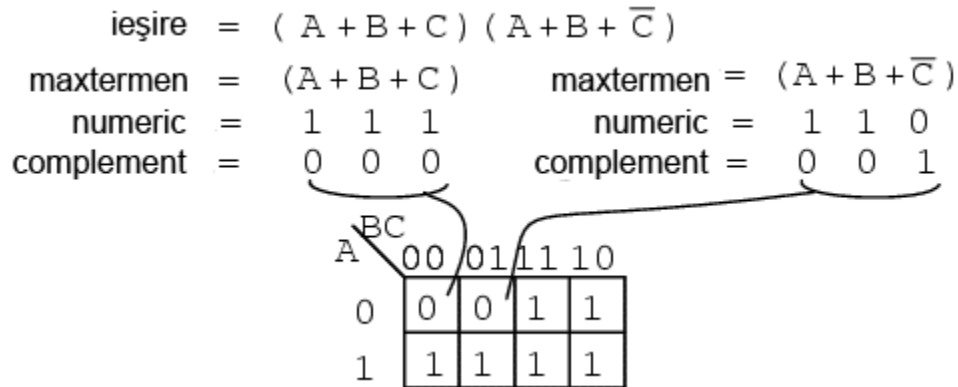


Fig. 8-58 hartă Karnaugh; maxtermeni

Maxtermenul  $(A + B + C)$  sub formă numerică este 111, iar complementat este 000. Plasăm prin urmare un 0 la adresa (0, 0, 0). Maxtermenul  $(A + B + \overline{C})$  sub formă numerică este 110, iar complementat este 001. Plasăm prin urmare un zero la adresa (0, 0, 1).

Acum că am construit harta Karnaugh, suntem interesați de modul în care putem scrie o formă simplificată a expresiei booleene inițiale sub formă de produs de sume. Primul pas este gruparea termenilor de 0, precum grupul de mai jos:

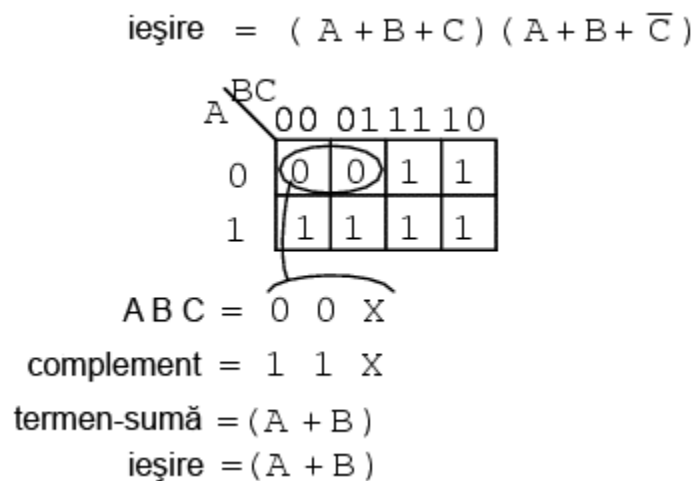


Fig. 8-59 hartă Karnaugh; maxtermeni

Scriem apoi valoarea binară corespunzătoare termenului-sumă, ce arată astfel: (0, 0, X). Pentru grupul format, atât A cât și B sunt 0. Dar C este atât 0 cât și 1. Prin urmare, scriem un X în locul valorii lui C. Formăm complementul: (1, 1, X). Scriem termenul sumă ( $A + B$ ) ignorând C-ul și X-ul ce l-a înlocuit.

Să reluăm pașii necesari pentru reducerea unei expresii booleene la un produs de sume:

- Formăm grupuri de 0 cât mai mari posibile, incluzând toți maxtermenii. Numărul termenilor trebuie să fie puteri ale lui 2
- Scriem valoarea numerică a grupului
- Complementăm această valoare numerică a grupului
- Transformăm valoarea complementată într-un termen sub formă de sumă
- Repetăm pașii de mai sus pentru toate grupurile rămase pe hartă. Rezultatul fiecărui grup este un termen sub formă de sumă, iar rezultatul final este produsul acestor termeni-sumă

#### 8.8.4.1 Exemplul 1

Simplificați expresia booleană sub forma produsului de sume de mai jos. Scrieți rezultatul final sub forma unui produs de sume:

$$\text{ieșire} = (A + B + C + \overline{D}) (A + B + \overline{C} + D) (A + \overline{B} + C + \overline{D}) (A + \overline{B} + \overline{C} + D) \\ (\overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + D) (\overline{A} + B + C + \overline{D}) (\overline{A} + B + \overline{C} + D)$$

Soluție: completăm o hartă Karnaugh cu cei șapte maxtermeni de mai sus (introducem valori de 0). Rețineți să complementați variabilele de intrare pentru găsirea adresei corespunzătoare:

$$\text{ieșire} = (A + B + C + \overline{D}) (A + B + \overline{C} + D) (A + \overline{B} + C + \overline{D}) (A + \overline{B} + \overline{C} + D) \\ (\overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + D) (\overline{A} + B + C + \overline{D}) (\overline{A} + B + \overline{C} + D)$$

|    |    | CD |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|
|    |    | 00 | 01 | 11 | 10 |
| AB | 00 |    | 0  |    | 0  |
|    | 01 |    | 0  |    | 0  |
|    | 11 |    |    |    | 0  |
|    | 10 |    | 0  |    | 0  |

The Karnaugh map shows a 4x4 grid of cells. The rows are labeled AB (00, 01, 11, 10) and the columns are labeled CD (00, 01, 11, 10). The cells contain 0s at positions (00,01), (01,01), (11,10), (10,01), (10,11), and (10,10). Curved lines group the 0s: a vertical line for CD=01, a horizontal line for AB=10, and a diagonal line for (00,11), (01,10), (11,01), (10,00).

Fig. 8-60 simplificarea expresiei booleene folosind harta Karnaugh



După ce am introdus toți maxtermenii în tabel, trecem la gruparea regiunilor, precum în figura de mai jos. Grupurile mai mari se traduc printr-un termen-sumă cu mai puține intrări. Cu cât avem mai puține grupuri, cu atât vom avea mai puțin termeni-sumă în expresia finală:

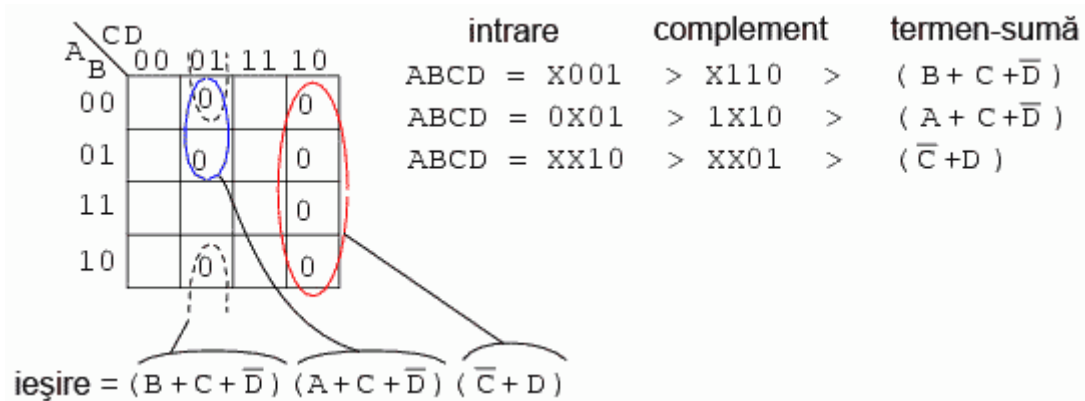


Fig. 8-61 harta Karnaugh; gruparea regiunilor

Avem trei grupuri, prin urmare, trebuie să avem trei termeni-sumă în rezultatul final. Detaliile simplificării sunt prezentate în figura de mai sus. Pentru oricare grup, scriem mai întâi adresa de intrare, o complementăm și o transformăm într-un termen boolean sub formă de sumă. Rezultatul final este produsul acestor trei termeni-sumă.

#### 8.8.4.2 Exemplul 2

Simplificați expresia booleană sub formă de produs de sume de mai jos, exprimând rezultatul sub forma unei sume de produse:

$$\text{ieșire} = (A + B + C + \overline{D}) (A + B + \overline{C} + D) (A + \overline{B} + C + \overline{D}) (A + \overline{B} + \overline{C} + D) \\ (\overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + D) (\overline{A} + B + C + \overline{D}) (\overline{A} + B + \overline{C} + D)$$

Această problemă este identică cu cea anterioară, cu diferența că expresia simplificată se cere sub formă de sumă de produse și nu sub formă de produs de sume.

Trecem maxtermenii (0) din expresia inițială pe harta Karnaugh de mai jos (stânga), exact ca în exemplul precedent:

$$\text{ieșire} = (A+B+C+\overline{D})(A+B+\overline{C}+D)(A+\overline{B}+C+\overline{D})(A+\overline{B}+\overline{C}+D) \\ (\overline{A}+\overline{B}+\overline{C}+D)(\overline{A}+B+C+\overline{D})(\overline{A}+B+\overline{C}+D)$$

| $\begin{smallmatrix} \diagup & CD \\ A \diagdown & B \end{smallmatrix}$ | 00 | 01 | 11 | 10 |
|-------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|
| 00                                                                      |    | 0  |    | 0  |
| 01                                                                      |    | 0  |    | 0  |
| 11                                                                      |    |    |    | 0  |
| 10                                                                      |    | 0  |    | 0  |

| $\begin{smallmatrix} \diagup & CD \\ A \diagdown & B \end{smallmatrix}$ | 00 | 01 | 11 | 10 |
|-------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|
| 00                                                                      | 1  | 0  | 1  | 0  |
| 01                                                                      | 1  | 0  | 1  | 0  |
| 11                                                                      | 1  | 1  | 1  | 0  |
| 10                                                                      | 1  | 0  | 1  | 0  |

Fig. 8-62 simplificarea expresiei booleene folosind harta Karnaugh

Completăm apoi toate celelalte regiuni rămase libere cu valori de 1 (dreapta sus).

Formăm grupuri de 1 pentru toate regiunile ce conțin valori de 1. Scriem apoi rezultatul simplificat sub forma sumei de produse, conform secțiunii precedente a acestui capitol. Acest lucru este identic problemei precedente:

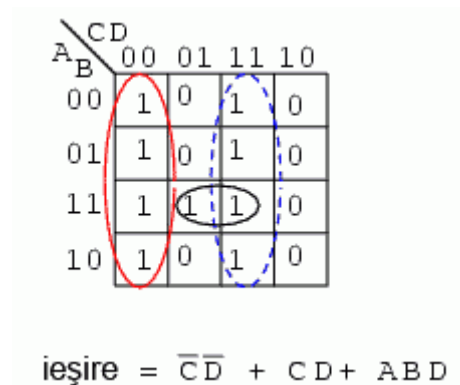


Fig. 8-63 harta Karnaugh; gruparea regiunilor

## 8.9 Exemplu de implementare practică a circuitelor logice

### 8.9.1 Comparație între soluțiile cu mintermeni și maxtermeni

În figura de mai jos sunt ambele soluții ale exemplelor din secțiunea precedentă, pentru comparație:

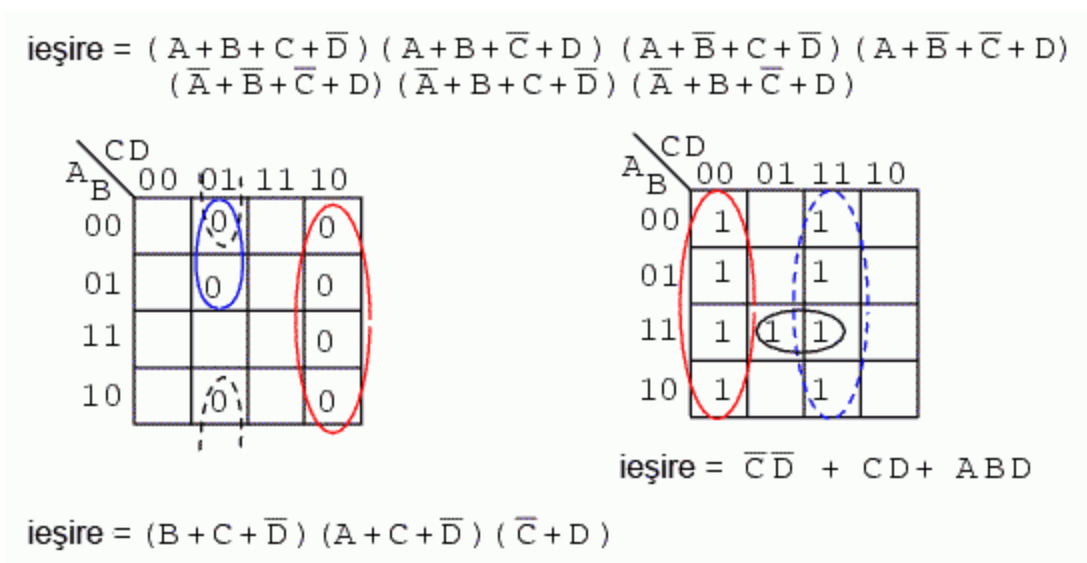


Fig. 8-64 hărți Karnaugh; comparație între soluțiile obținute cu mintermeni respectiv maxtermeni

Care soluție este mai simplă? Dacă ar fi să implementăm fizic rezultatul sub formă de produs de sume, am avea nevoie de trei porți logice SAU și o poartă logică ȘI. Invers, dacă ar fi să implementăm rezultatul sub formă de sumă de produse, am avea nevoie de trei porți ȘI și o poartă SAU. În ambele situații am avea nevoie de patru porți. Să luăm în considerare atunci și numărul de intrări ale porților. Prima variantă utilizează 8 intrări, iar a doua 7 intrări. Din definiția costului minim, soluția sub forma sumei de produse este mai simplă. Acesta este un exemplu tehnic corect, dar care nu ne este de prea mare folos în realitate.

Soluția „corectă” depinde de complexitate și de familia de porți logice folosite. Soluția sumei de produse este mai bună dacă folosim circuite TTL, a căror porți principale sunt porțile ȘI-negat. Acestea sunt foarte bune pentru implementări sub forma de sumă de produse. Pe de altă parte, soluția produsului de sume este acceptabilă dacă folosim circuite CMOS, deoarece avem astfel la dispoziție porți SAU-negat de toate mărimile.

### 8.9.2 Echivalența circuitelor ȘI-SAU cu circuitele ȘI-negat-ȘI-negat

Circuitele cu porți logice pentru ambele cazuri sunt prezentate mai jos, produsul de sume în stânga și suma de produse în dreapta:

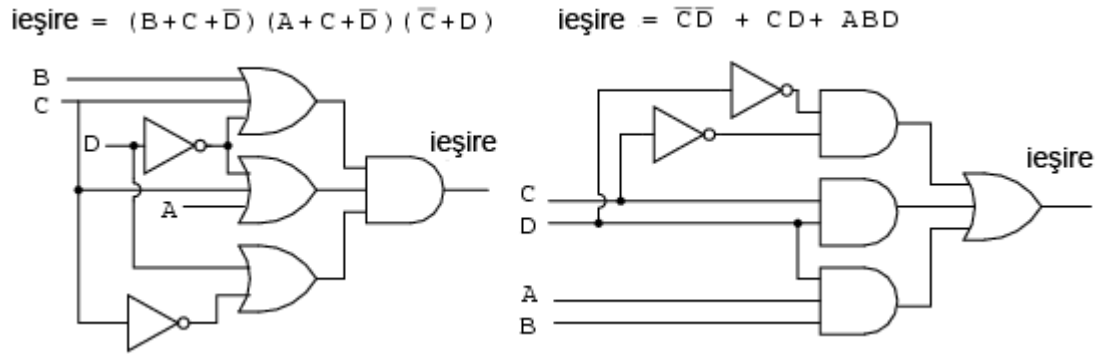


Fig. 8-65 echivalența circuitelor ȘI-SAU cu circuitele ȘI-negat-ȘI-negat

Reluăm mai jos (stânga) circuitul sub forma sumei de produse:

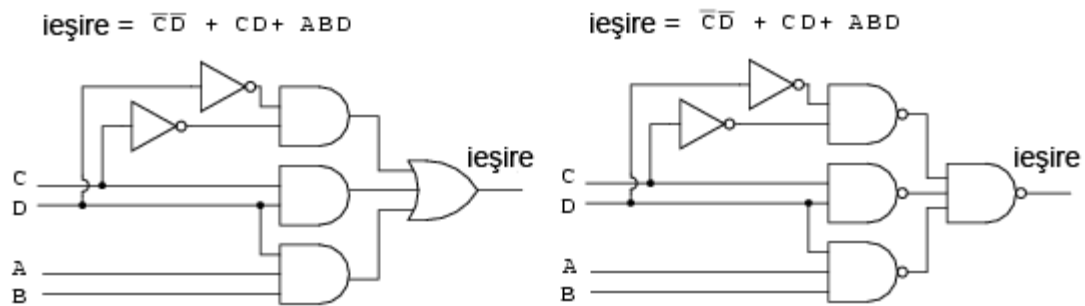


Fig. 8-66 echivalența circuitelor ȘI-SAU cu circuitele ȘI-negat-ȘI-negat

Dacă înlocuim toate porțile logice ȘI din stânga cu porți logice ȘI-negat, obținem rezultatul din dreapta sus. Poarta SAU de la intrare este înlocuită de asemenea cu o poartă ȘI-negat. Pentru a demonstra că logica ȘI-SAU este echivalentă cu logica ȘI-negat-ȘI-negat, este suficient să mutăm „cerculețele” inversoare de la ieșirea celor trei porți ȘI-negat la intrarea porții finale ȘI-negat, conform figurii de mai jos:

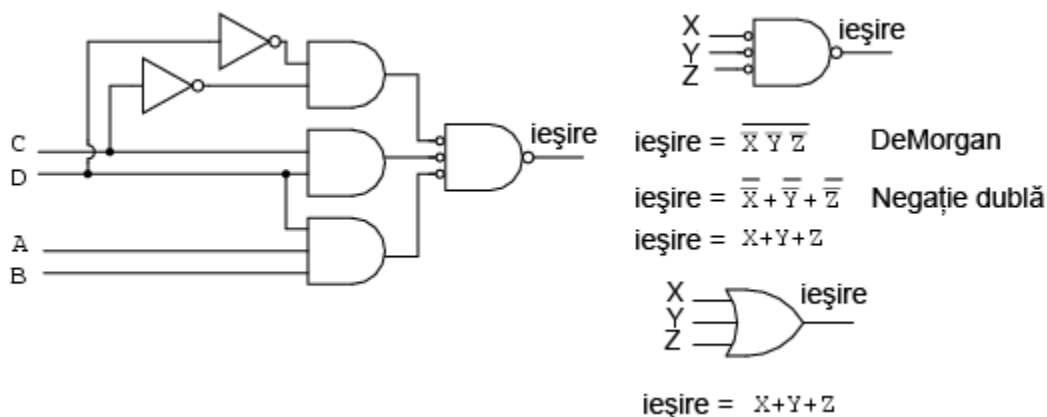


Fig. 8-67 echivalența circuitelor ȘI-SAU cu circuitele ȘI-negat-ȘI-negat

În figura de mai sus (dreapta), putem observa că ieșirea unei porți ȘI-negat cu intrări inversate este echivalentă din punct de vedere logic cu o poartă SAU, conform teoremei lui DeMorgan și a negației duble. Această informație ne este de ajutor în implementarea fizică a circuitelor digitale atunci când dispunem de circuite logice TTL cu porți ȘI-negat.

Pașii necesari construirii logicii ȘI-negat-ȘI-negat în locul logicii ȘI-SAU, sunt următorii:

- Realizăm un circuit logic (teoretic) sub formă de sumă de produse
- Când desenăm diagrama logică, înlocuim toate porțile logice (ȘI și SAU) cu porți logice ȘI-negat
- Intrările nefolosite trebuie legate la valoarea logică „înalt”
- În caz de defect, nodurile interne de la primul nivel de ieșire al porților ȘI-negat nu sunt identice cu valorile diagramei ȘI-SAU, ci sunt inversate. Folosim diagrama logică ȘI-negat-ȘI-negat. Totuși, intrările și ieșirile finale sunt identice
- Notăm fiecare capsulă (circuit integrat) cu  $U_1$ ,  $U_2$ , etc.
- Folosim catalogul producătorului pentru conectarea corectă a pinilor circuitului integrat la intrările și ieșirile porților din circuit

### 8.9.3 Exemplu

Să reluăm o problemă precedentă ce implică o simplificare sub forma sumei de produse. Vom realiza o simplificare sub forma unui produs de sume de această dată. Putem compara cele două soluții la final.

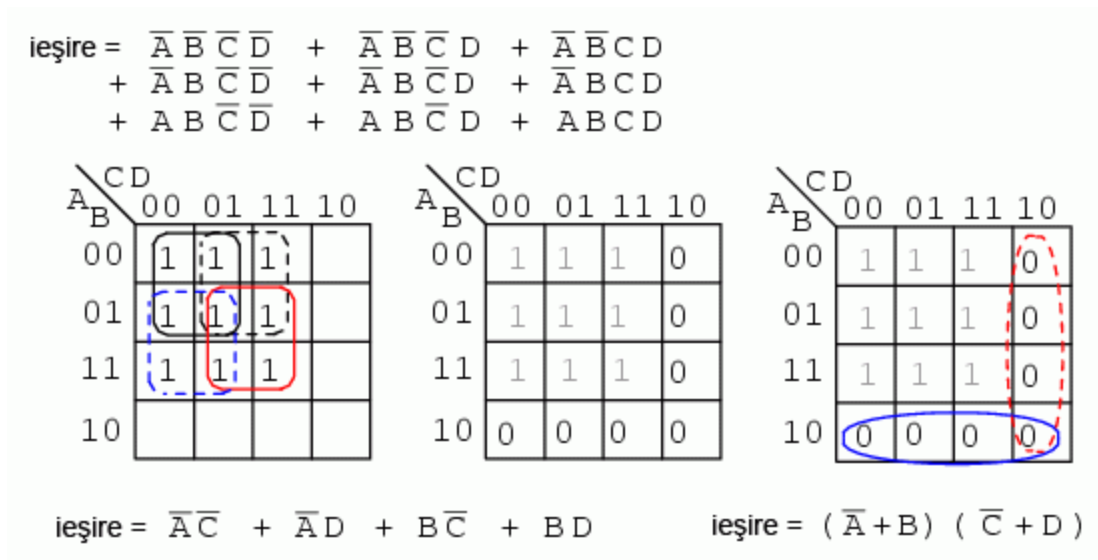


Fig. 8-68 simplificarea unui produs de sume

Soluție: în figura de sus stânga avem problema inițială, o expresie booleană cu 9 mintermeni nesimplificată. Recapitulând, am format patru grupuri de câte patru regiuni fiecare. Rezultatul a fost o sumă de patru produse (partea din stânga, jos).

În figura din mijloc, completăm regiunile rămase libere cu valori de 0. Formăm două grupuri de câte patru regiuni. Grupul de jos (albastru) este  $A' + B$ , iar grupul din dreapta (roșu) este  $C' + D$ . Rezultatul este prin urmare un produs de două sume,  $(A' + B)(C' + D)$ .

Comparând cele două soluții de mai sus, putem observa că soluția produsului de sume reprezintă soluția cu cel mai mic cost. Pentru implementarea primei soluții am avea nevoie de 5 porți, iar pentru soluția produsului de sume am avea nevoie doar de 3. Folosind circuite logice TTL, aceasta din urmă este și atractivă datorită simplității rezultatului. Putem găsi porți logice ȘI și SAU cu 2 intrări. Mai jos sunt prezentate circuitele logice pentru ambele soluții:

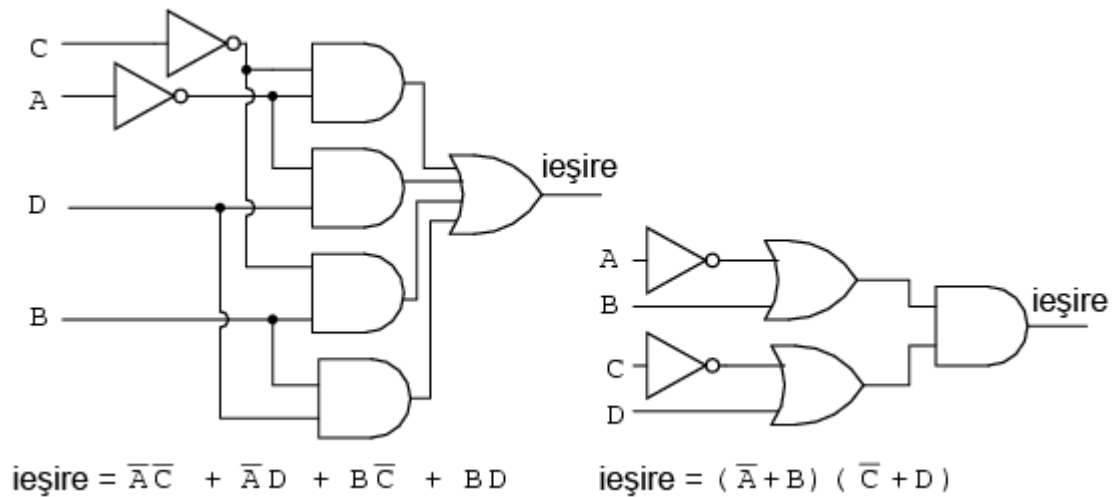


Fig. 8-69 soluția sub forma circuitelor logice

Să presupunem că avem la dispoziție circuitele logice TTL de mai jos. În acest caz, cunoaștem și poziționarea porților logice în interiorul acestora, precum în figura de mai jos:

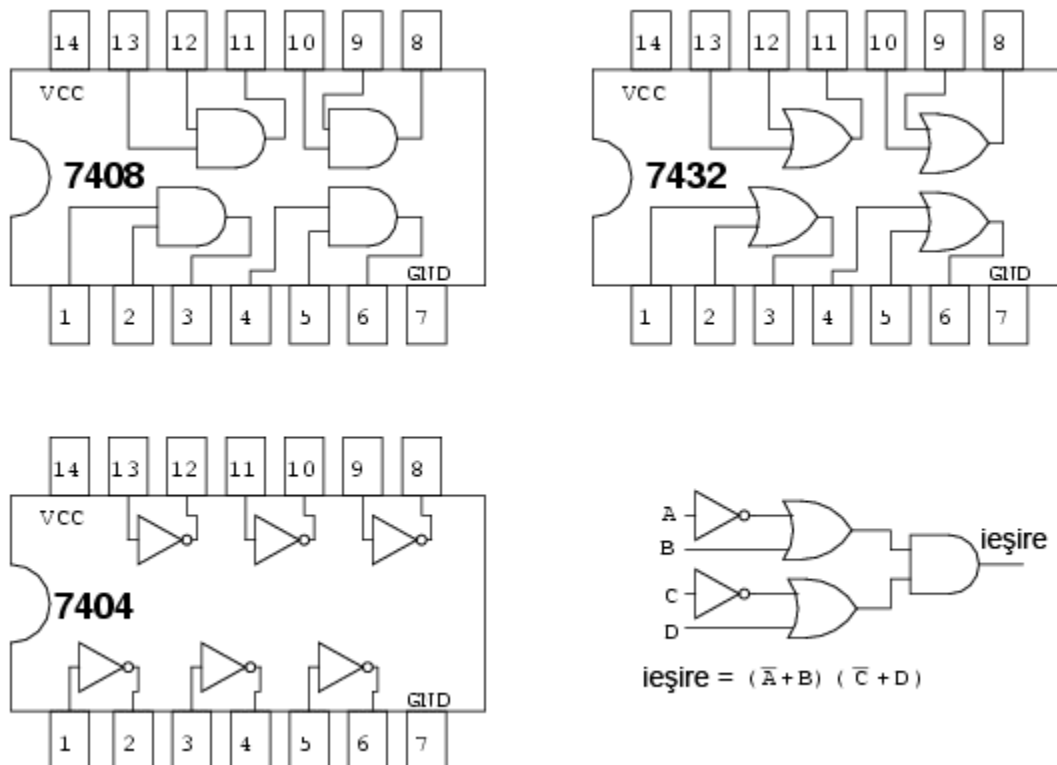


Fig. 8-70 circuite TTL

Circuitele integrate folosite (trei la număr) vor fi identificate prin notația U1, U2 respectiv U3. Pentru a face distincție între porțile individuale din fiecare capsulă, acestea vor fi identificate prin a, b, c, d, etc. Circuitul inversor 7404 va fi U<sub>1</sub>. Porțile inversoare individuale sunt U1-a, U1-b, U1-c, etc. Circuitul SAU 7432 va fi notat cu U2, iar U3 este notația folosită pentru circuitul ȘI 7408.

Luând în considerare pinul circuitelor logice folosite mai sus, vom desemna toate intrările și ieșirile circuitului logic ce vrem să-l construim, conform figurii de mai jos (intrările porților nefolosite se vor lega la masă):

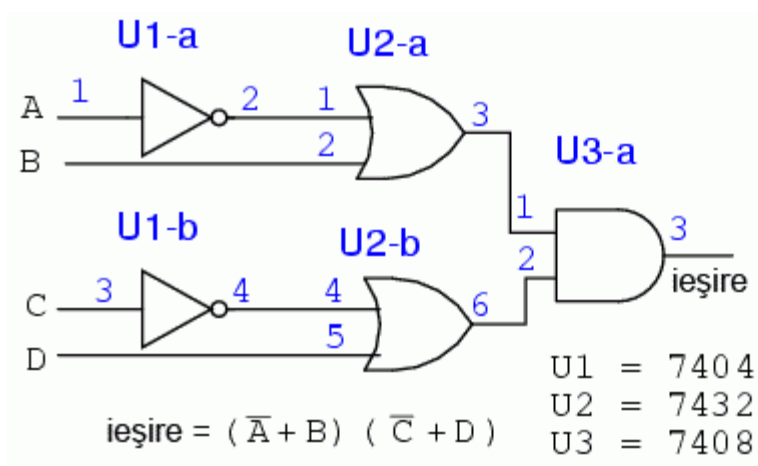


Fig. 8-71 numerotarea porților

Putem găsi cu ușurință porți logice ȘI cu două intrări (7408, stânga). Totuși, este mai greu să găsim o poartă logică SAU cu patru intrări. Singurul tip de poartă cu patru intrări este un circuit TTL 7420 cu porți ȘI-negat (dreapta):

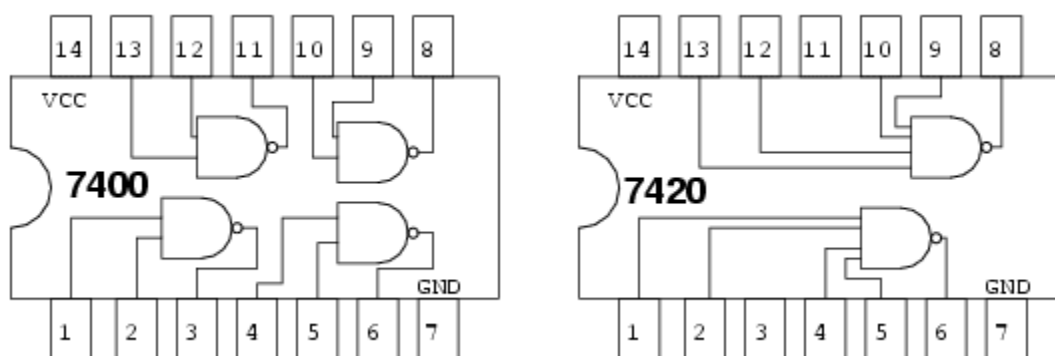


Fig. 8-72 circuite TTL

Putem transforma poarta logică ȘI-negat cu patru intrări într-o poartă logică SAU cu patru intrări prin inversarea intrărilor acesteia:



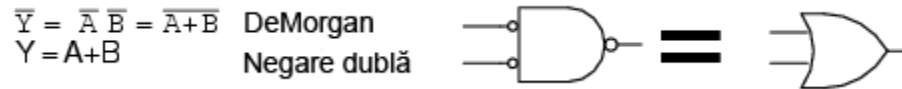


Fig. 8-73 transformarea porții ȘI-negat în poartă logică SAU

Putem prin urmare folosi circuitul 7420 cu porți logice ȘI-negat cu patru intrări ca și poartă SAU prin negarea (inversarea) intrărilor.

Nu vom folosi porți logice inversoare discrete pentru inversarea intrărilor circuitului 7420. Vom folosi în schimb porți logice ȘI-negat cu două intrări în locul porților ȘI din soluția booleană cu mintermeni (sumă de produse). Inversarea ieșirii porților ȘI-negat cu două intrări este suficientă pentru inversarea necesară realizării porții logice SAU cu patru intrări:

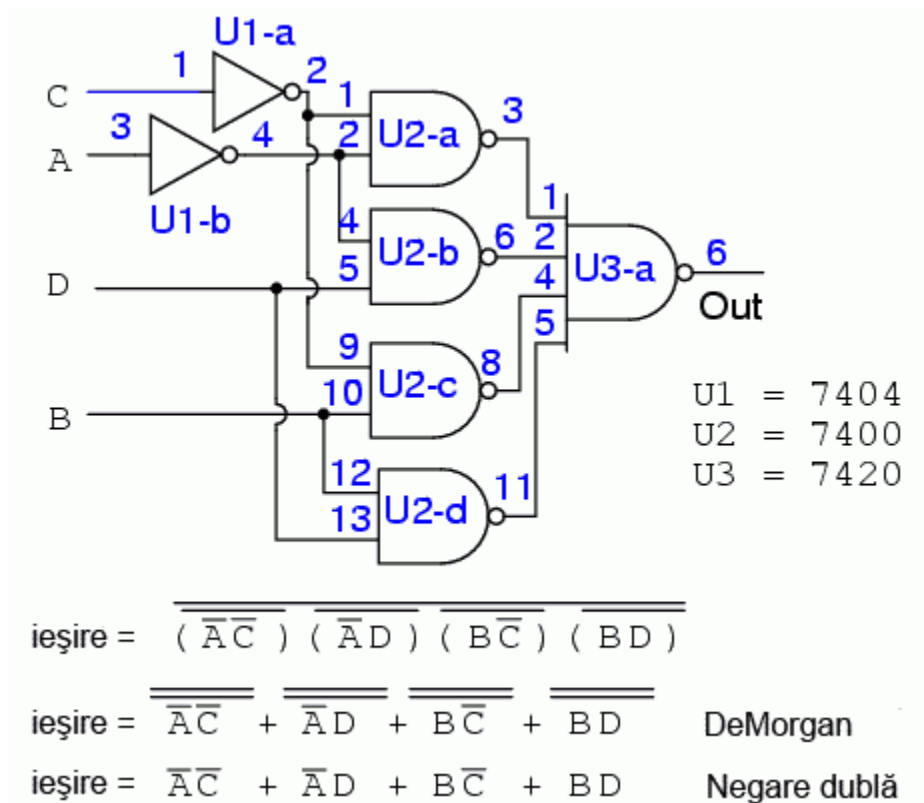


Fig. 8-74 soluția expresiei folosind circuite TTL

Rezultatul de mai sus este singura modalitate practică de realizarea a circuitului folosind TTL cu porți logice ȘI-negat-ȘI-negat în locul porților ȘI-SAU.

## 8.10 Notăția $\Sigma$ (sumă) și notăția $\Pi$ (produs)

Ca și referință, această secțiune introduce terminologia folosită în unele texte pentru descrierea mintermenilor și maxtermenilor aparținând hărților Karnaugh. Mai departe de atât, această secțiune nu conține nimic nou.

### 8.10.1 Notăția $\Sigma$ (sumă) pentru mintermeni

Simbolul  $\Sigma$  (sigma) indică o sumă iar litera „m” indică mintermenii. Prin urmare,  $\Sigma m$  reprezintă o sumă de mintermeni. Următorul exemplu ilustrează afirmația de mai sus. În loc de ecuația booleană, am ales să enumerăm mintermenii:

$$f(A, B, C, D) = \Sigma m(1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15)$$

sau

$$f(A, B, C, D) = \Sigma(m1, m2, m3, m4, m5, m7, m8, m9, m11, m12, m13, m15)$$

Indicii termenilor indică locația regiunii, sau adresa, dintr-o hartă Karnaugh. Acesta este cu siguranța un mod mult mai compact pentru descrierea mintermenilor sau regiunilor unei hărți Karnaugh.

$$\begin{aligned} \text{ieșire} = & \bar{A} \bar{B} \bar{C} \bar{D} + \bar{A} \bar{B} \bar{C} D + \bar{A} \bar{B} C D \\ & + \bar{A} B \bar{C} \bar{D} + \bar{A} B \bar{C} D + \bar{A} B C D \\ & + A B \bar{C} \bar{D} + A B \bar{C} D + A B C D \end{aligned}$$

$$f(A, B, C, D) = \sum m(0, 1, 3, 4, 5, 7, 12, 13, 15)$$

| A \ B | C D |    |    |    |
|-------|-----|----|----|----|
|       | 00  | 01 | 11 | 10 |
| 00    | 0   | 1  | 3  | 2  |
| 01    | 4   | 5  | 7  | 6  |
| 11    | 12  | 13 | 15 | 14 |
| 10    | 8   | 9  | 11 | 10 |

| A \ B | C D |    |    |    |
|-------|-----|----|----|----|
|       | 00  | 01 | 11 | 10 |
| 00    | 1   | 1  | 1  | 0  |
| 01    | 1   | 1  | 1  | 0  |
| 11    | 1   | 1  | 1  | 0  |
| 10    | 0   | 0  | 0  | 0  |

| A \ B | C D |    |    |    |
|-------|-----|----|----|----|
|       | 00  | 01 | 11 | 10 |
| 00    | 1   | 1  | 1  | 0  |
| 01    | 1   | 1  | 1  | 0  |
| 11    | 1   | 1  | 1  | 0  |
| 10    | 0   | 0  | 0  | 0  |

$$f(A, B, C, D) = \bar{A} \bar{C} + \bar{A} D + B \bar{C} + B D$$

Fig. 8-75 notația sumă pentru mintermeni

Soluția exprimată sub forma sumei de produse nu este afectată prin utilizarea acestei terminologii. Mintermenii de pe hartă (valorile de 1) sunt grupați ca de obicei, iar mai apoi putem scrie o soluție sub forma sumei de produse.

### 8.10.2 Notația $\Pi$ (produs) pentru maxtermeni

Mai jos luăm în considerare și terminologia folosită pentru descrierea unei liste de maxtermeni. Produsul este indicat prin litera  $\Pi$  (pi), iar „M” indică maxtermenii.  $\Pi$  în urmare,  $\Pi$  indică un produs de maxtermeni. Putem folosi același exemplu pentru ilustrarea celor spuse mai sus. Ecuația logică booleană nesimplificată este înlocuită cu o listă de maxtermeni:

$$f(A, B, C, D) = \Pi M(2, 6, 8, 9, 10, 11, 14)$$

sau

$$f(A, B, C, D) = \Pi(M2, M6, M8, M9, M10, M11, M14)$$

Din nou, numerele indică adresa sau locația pe harta Karnaugh. Pentru maxtermeni, acestea reprezintă locațiile valorilor de 0. Soluția sub forma produsului de sume se scrie ca de obicei.

$$\text{ieșire} = (\overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + \overline{D}) (\overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + D) (\overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + D) (\overline{A} + B + C + D) \\ (\overline{A} + B + \overline{C} + \overline{D}) (\overline{A} + B + \overline{C} + D) (\overline{A} + B + \overline{C} + D)$$

$$f(A, B, C, D) = \prod M(2, 6, 8, 9, 10, 11, 14)$$

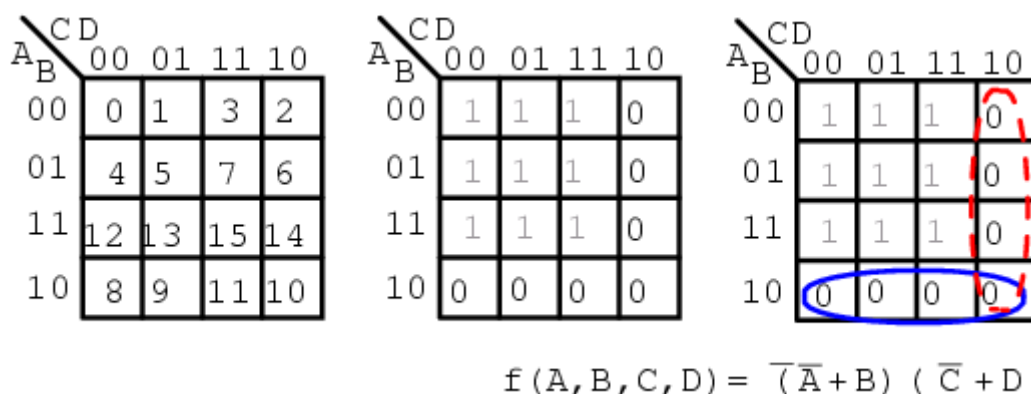


Fig. 8-76 notația produs pentru maxtermeni

## 8.11 Hărți Karnaugh de 5 și 6 variabile

Pentru reducerea circuitelor logice mai mari se folosesc, evident, hărți Karnaugh mai mari. Dar care este mărimea maximă (practică) a unei hărți Karnaugh? Acest lucru depinde de numărul de intrări a circuitului logic considerat. Practic, se poate constata că această limită este de 6 intrări. Prezентăm mai jos așadar hărțile Karnaugh de 5 și 6 variabile.

### 8.11.1 Harta Karnaugh de 5 variabile

Prima variantă a hărții Karnaugh de 5 variabile este modelul în oglindă. Desigur, numerotarea se realizează în cod Gray (partea de sus). Acesta se reflectă la mijlocul hărții. Acest stil este folosit de textele mai vechi:

| CDE<br>A/B |    |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|            |    | 000 | 001 | 011 | 010 | 110 | 111 | 101 | 100 |
| 00         | 00 |     |     |     |     |     |     |     |     |
|            | 01 |     |     |     |     |     |     |     |     |
|            | 11 |     |     |     |     |     |     |     |     |
|            | 10 |     |     |     |     |     |     |     |     |

Fig. 8-77 hartă Karnaugh de 5 variabile

Varianta preferată, cea cu suprapunere, este prezentată mai jos:

| CDE<br>A/B |    |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|            |    | 000 | 001 | 011 | 010 | 100 | 101 | 111 | 110 |
| 00         | 00 |     |     |     |     |     |     |     |     |
|            | 01 |     |     |     |     |     |     |     |     |
|            | 11 |     |     |     |     |     |     |     |     |
|            | 10 |     |     |     |     |     |     |     |     |

Fig. 8-78 hartă Karnaugh de 5 variabile; varianta utilizată

Această variantă constă pur și simplu din două (patru pentru o hartă Karnaugh de 6 variabile) hărți identice, cu excepția bitului cel mai semnificativ din adresa de 3 biți din partea superioară. Dacă ne uităm în partea de sus a hărții, observăm că numerotația este diferită față de harta precedentă (în cod Gray). Dacă ignorăm bitul cel mai semnificativ, precum am spus mai sus, secvența 00, 01, 11, 10 se regăsește în partea superioară a ambelor sub-hărți. Secvența formată din cele opt numere de 3 biți nu este cod Gray.

### 8.11.1.1 Harta Karnaugh cu 5 variabile - exemplu

Să proiectăm un circuit cu 5 intrări binare (A, B, C, D, E), A fiind bit-ul cel mai semnificativ. Circuitul va trebui să producă o ieșire „înaltă” pentru orice număr prim detectat la intrare:

Prezentăm mai jos o soluție sub forma hărții Karnaugh de 5 variabile în oglindă, folosind cod Gray:

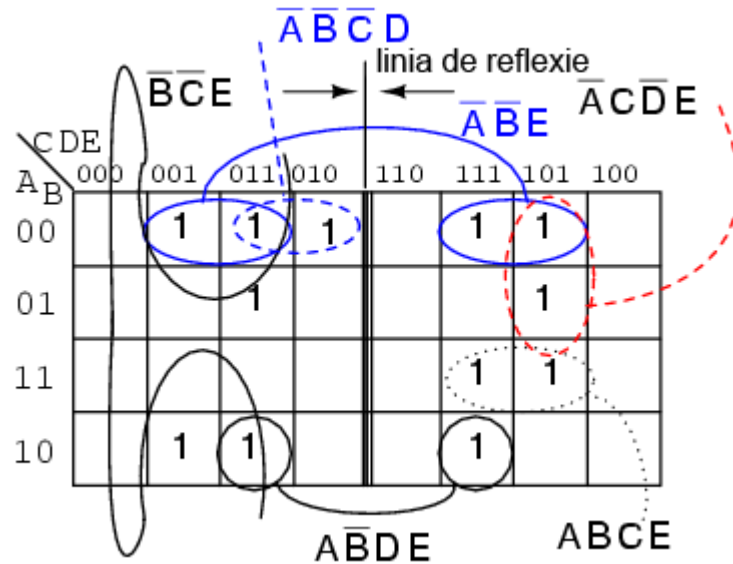


**Fig. 8-79 hartă Karnaugh de 5 variabile; exemplu**

Numerele prime sunt (1,2,3,5,7,11,13,17,19,23,29,31). Introducem o valoare de 1 în fiecare regiune corespunzătoare. Trecem apoi la gruparea regiunilor și scrierea rezultatului simplificat. Observați că grupul de patru regiuni A'B'E conține două perechi de câte două regiuni aflate de fiecare parte a liniei de reflexie. Același lucru este valabil și pentru grupul format din două regiuni AB'DE. Aceste grupuri se formează prin reflexie. Atunci când folosim acest stil de hartă Karnaugh, va trebui să căutăm astfel de grupuri reflectate. Expresia booleană simplificată mai sus este următoarea:

$$iesire = A'B'E + B'C'E + A'C'DE + ABCE + AB'DE + A'B'C'D$$

Să considerăm și varianta hărții Karnaugh cu 5 variabile, cu suprapunere:

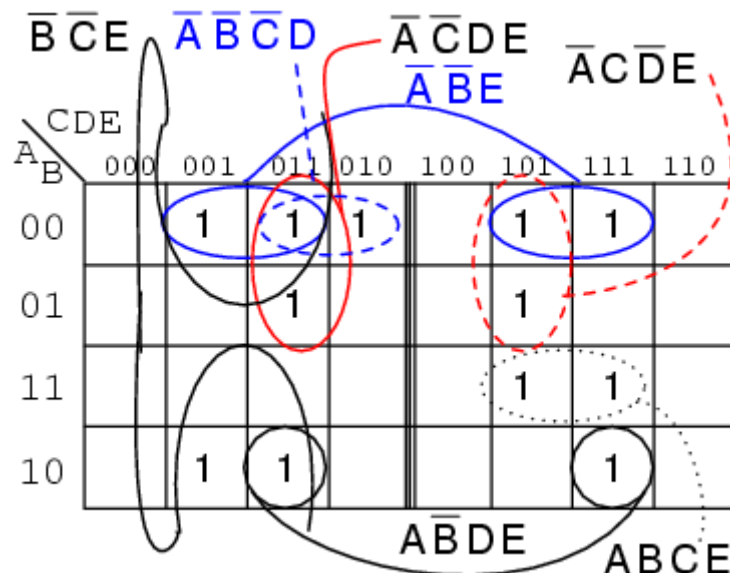


**Fig. 8-80 hartă Karnaugh de 5 variabile; exemplu**

Dacă facem o comparație între cele două variante de sus, anumite regiuni din partea dreaptă a hărții își modifică locația, din moment ce adresele din partea de sus a hărții s-au modificat. Trebuie de asemenea să găsim o altă modalitate de grupare a termenilor din cele două jumătăți ale hărții. Soluția constă în suprapunerea (imaginară) a celor două jumătăți. Orice suprapunere a hărții de deasupra cu harta de dedesubt prezintă o posibilă grupare. Figura de mai jos indică faptul că grupul AB'DE este compus din două regiuni suprapuse. Grupul A'B'E este format din două perechi de regiuni suprapuse:

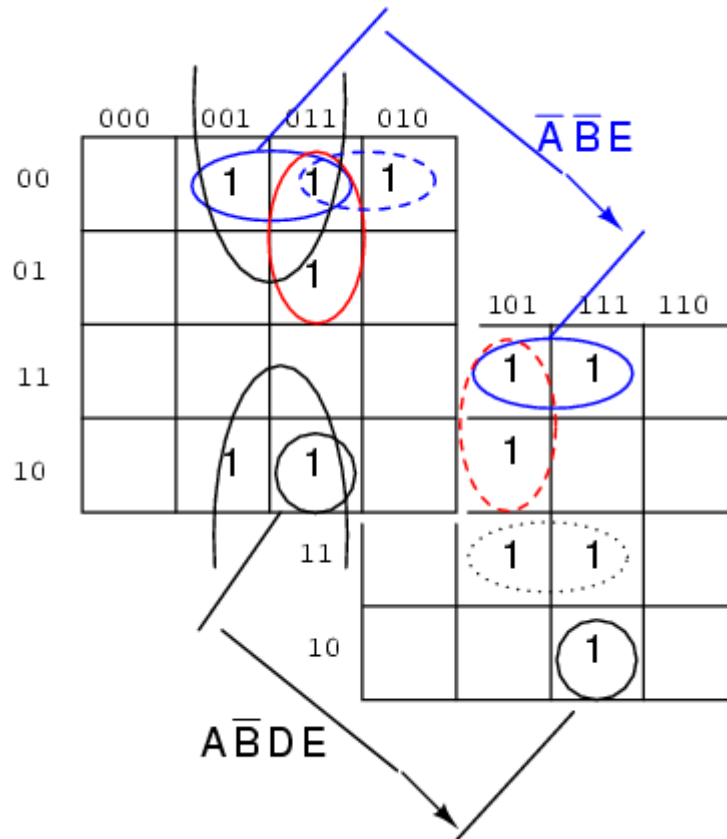


Fig. 8-81 hartă Karnaugh de 5 variabile; exemplu

Pentru grupul  $A'B'E$  de patru regiuni,  $ABCDE = 00xx1$ . Cu alte cuvinte, variabilele  $A$ ,  $B$  și  $E$  sunt aceleași (001) pentru grup. Pe de altă parte,  $CD = xx$  (aceste variabile nu sunt identice pentru grup). Din moment ce  $ABCDE = 00xx1$ , grupul de patru regiuni este acoperit de  $A'B'XXE = A'B'E$ .

### 8.11.2 Hartă Karnaugh de 6 variabile

Luăm acum un exemplu de utilizare a unei hărți Karnaugh de 6 variabile. Am suprapus (imaginar) cele patru sub-hărți pentru a putea vizualiza gruparea de patru regiuni corespunzătoare ieșirii  $C'F'$ :



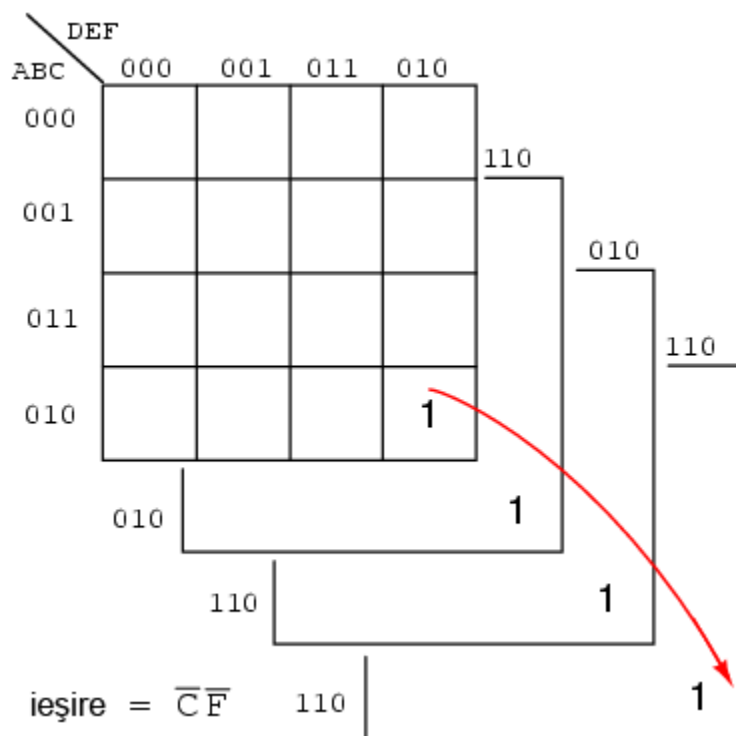


Fig. 8-82 hartă Karnaugh de 6 variabile

Un comparator de amplitudine (utilizat pentru ilustrarea utilizării hărții Karnaugh de 6 variabile) compară două numere binare. Acesta indică dacă cele două numere sunt egale, mai mici sau mai mari unul față de celălalt. Un astfel de comparator are trei ieșiri:



Fig. 8-83 comparator de amplitudine

Un comparator de amplitudine pe trei biți are două intrări:  $A_2A_1A_0$  și  $B_2B_1B_0$ . Un comparator de amplitudine sub forma unui circuit integrat (7485) are practic patru intrări. Totuși, harta Karnaugh de mai jos trebuie menținută la o mărime rezonabilă. Vom rezolva problema doar pentru ieșirea  $A > B$ .

Pentru simplificarea logicii comparatorului de amplitudine pe 3 biți, folosim harta Karnaugh cu 6 variabile de mai jos. Această variantă este cea cu suprapunere. Codul binar folosit nu este cod Gray. Găsim expresiile redundante prin suprapunerea celor patru sub-hărți, precum am arătat mai sus. Am putea găsi regiuni comune

tuturor celor patru hărți, deși, în exemplul de mai jos nu este cazul. Putem observa totuși că există regiuni comune sub-hărților:

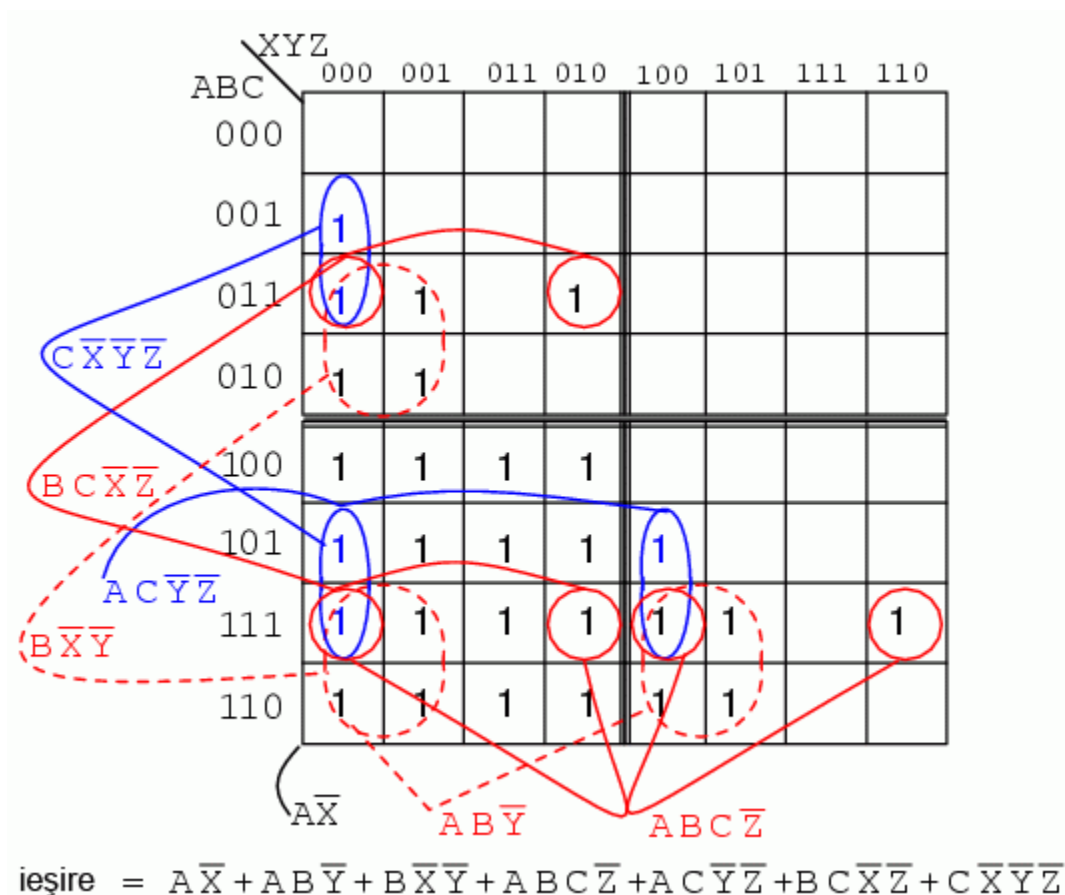


Fig. 8-84 hartă Karnaugh de 6 variabile; exemplu

Ieșirea  $A > B$  este reprezentată de  $ABC > XYZ$  pe harta de mai sus. Ori de câte ori  $ABC$  este mai mare decât  $XYZ$ , avem o valoare de 1 pe hartă. Pe prima linie,  $ABC = 000$  nu poate fi mai mare decât nicio valoare a lui  $XYZ$ . Nu avem nici o valoare de 1 pe această linie. Pe linia a doua,  $ABC = 001$ , și doar în prima regiune,  $ABCXYZ = 001000$ ,  $ABC$  este mai mare decât  $XYZ$ . Avem un singur 1 în prima regiune a celei de a doua linii. Pe linia a treia,  $ABC = 011$  și avem trei valori de 1. Pe linia a patra,  $ABC = 010$ , există o pereche de 1. Prin urmare, harta este completată cu valori de unu ori de câte ori  $ABC$  este mai mare decât  $XYZ$ .

Pentru gruparea regiunilor, acolo unde este posibil, încercăm să formăm grupuri cu sub-hărțile adiacente. Toate grupurile în afară de un grup de 16 regiuni sunt formate din regiuni aparținând sub-hărților adiacente. Rezultatul este: 1 grup de 16 regiuni; 2 grupuri de 8 regiuni; 4 grupuri de 4 regiuni. Grupul de 16 regiuni,  $A\bar{X}$ , ocupă toată sub-harta din partea de jos-stânga a hărții Karnaugh, deși, în figura de mai sus, aceasta nu este încercuită.

Numărând valorile de 1 de pe hartă, ajungem la un total de  $16 + 6 + 6 = 28$ . Înainte de reducerea logică folosind harta Karnaugh de mai sus, soluția logică sub formă de sumă de produse ar fi avut 28 de termeni, fiecare cu 6 intrări. Simplificarea logică cu ajutorul hărții Karnaugh de mai sus, a redus numărul termenilor la șapte, fiecare cu un număr de patru sau mai puțin de patru intrări. Acesta este de fapt scopul hărților Karnaugh!