

Tony R. Kuphaldt

Introducere în circuite electrice și electronice

Vol. 1 – Curent continuu



V 2.0

Prefață

Cartea de față reprezintă varianta românească a volumului de „Curent continuu”, primul din seria lucrărilor „Lessons in Electric Circuits” scrise de Tony R. Kuphaldt sub licența „DESIGN SCIENCE LICENSE”.

Prezenta versiune se distribuie **gratuit** prin intermediul site-ului oficial. Ultimele noutăți și varianta on-line se găsesc la adresa www.circuiteelectrice.ro. Orice comentarii sau sugestii de îmbunătățire sunt binevenite și pot fi trimise pe adresa contact@circuiteelectrice.ro. Puteți utiliza conținutul de față în orice scop doriți 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 (+) !

Modificări fața de versiunea precedentă

Au fost adăugate următoarele capitole și subcapitole:

05 – Circuite serie și paralel (subcapitolele 5, 6, 7 și 8)

08 – Aparatură de măsură (integral)

11 – Baterii și surse de alimentare (subcapitolele 4, 5, și 6)

13 – Condensatorul și câmpul electric (subcapitolul 6)

14 – Bobina (subcapitolul 5)

CUPRINS

01 - CONCEPTE DE BAZĂ ÎN ELECTRICITATE	1
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
02 - LEGEA LUI OHM.....	26
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
03 - PROTECȚIA LA ELECTROCUTARE	46
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
04 - NOTAȚIA ȘTIINȚIFICĂ ȘI PREFIXE METRICE	79
1. NOTAȚIA ȘTIINȚIFICĂ.....	79
2. ARITMETICA NOTAȚIEI ȘTIINȚIFICE.....	81
3. NOTAȚIA METRICĂ.....	82
05 - CIRCUITE SERIE ȘI PARALEL.....	85
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
06 - CIRCUITE DIVIZOARE ȘI LEGILE LUI KIRCHHOFF.....	107
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

07 - CIRCUITE SERIE-PARALEL COMBinate.....	122
1. CE ESTE UN CIRCUIT SERIE-PARALEL.....	122
2. METODE DE ANALIZĂ A CIRCUITELOR SERIE-PARALEL.....	123
08 - APARATE DE MĂSURĂ.....	130
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
09 - SEMNALE ELECTRICE DE INSTRUMENTAȚIE	170
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
10 - ANALIZA REȚELOR DE CURENT CONTINUU.....	183
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
11 - BATERII ȘI SURSE DE ALIMENTARE	225
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
12 - CONDUCTORI ȘI DIELECTRICI	239
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

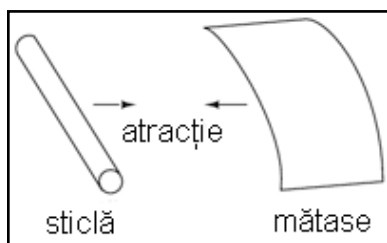
6. SUPRACONDUCTIBILITATEA	252
7. STRĂPUNGerea DIELECTRICĂ	255
13 - CONDENSATORUL ȘI CÂMPUL ELECTRIC.....	256
1. CÂMPUL, FORȚA ȘI FLUXUL MAGNETIC ȘI ELECTRIC	256
2. CONDENSATORUL.....	258
3. RELAȚIA TENSIUNE-CURRENT A CONDENSATORULUI	261
4. FACTORI CE AFECTEAZĂ CAPACITATEA ELECTRICĂ	266
5. CONECTAREA ÎN SERIE ȘI ÎN PARALEL A CONDENSATORILOR	269
6. CONSIDERAȚII PRACTICE (CONDENSATORUL).....	270
14 – ELECTROMAGNETISM.....	272
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
15 - BOBINA ȘI CÂMPUL MAGNETIC.....	287
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
16 - CONSTANTELE DE TIMP RC ȘI L/R	300
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

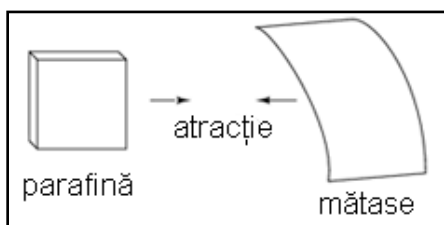
1. Electricitate statică

- 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

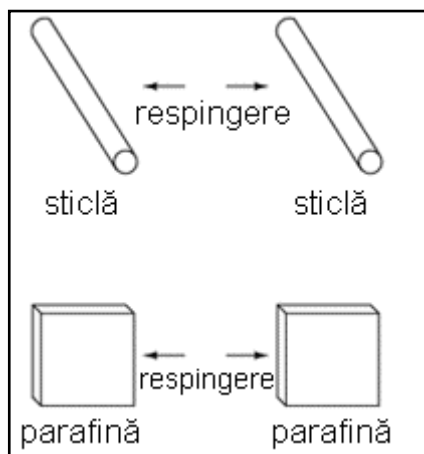
Atracția electrostatică



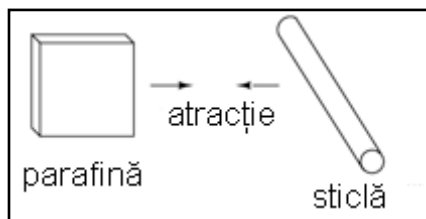
Cu secole în urmă, a fost descoperit faptul că anumite tipuri de materiale se atrag „misterios” după frecare. De exemplu: după frecarea unei bucăți de mătase de o bucată de sticlă, cele două materiale vor tinde să se lipească unul de celălalt. Într-adevăr, există o forță de atracție ce acționează chiar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

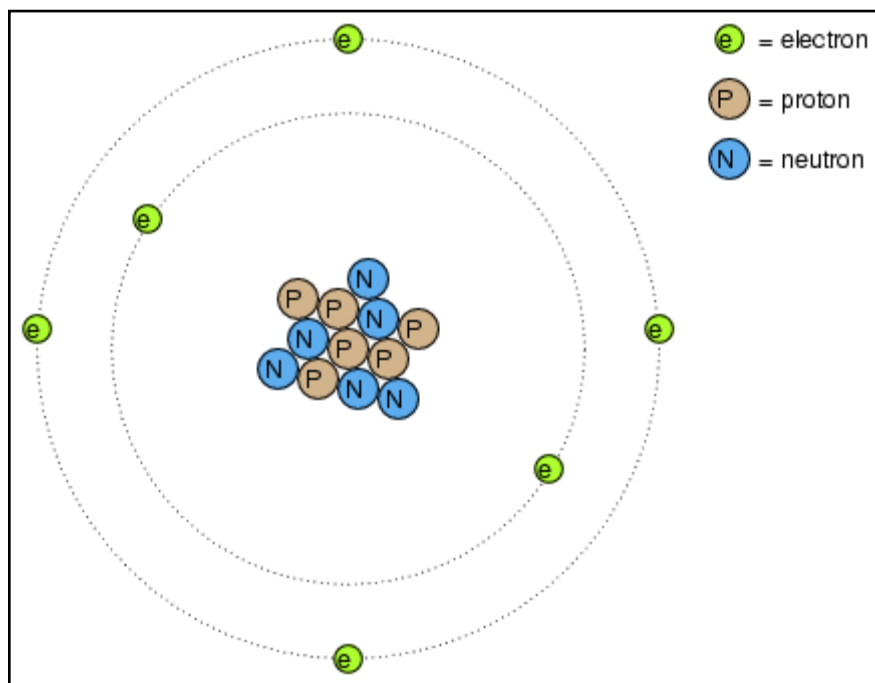
a întâmplat niciodată ca două materiale frecate unul de celălalt, să devină amândouă în același timp fie pozitive, fie negative.

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 10¹⁸) de electroni. Sau invers, un electron are o sarcină de aproximativ 0.00000000000000000016 Coulombi (1,6 x 10⁻¹⁹). 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

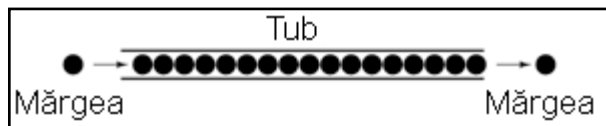
Dimensiunea fizică afectează de asemenea conductivitatea. De exemplu, dacă luăm două fâșii din același material conductiv - una subțire, alta groasă - cea groasă se va dovedi un conductor mai bun decât cea subțire la o aceeași lungime. Dacă luăm o altă pereche de fâșii - de data aceasta amândouă cu aceeași 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 exacți, 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.

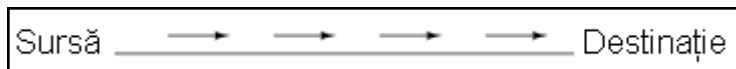
Deplasarea electronilor necesită un drum neîntrerupt

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.



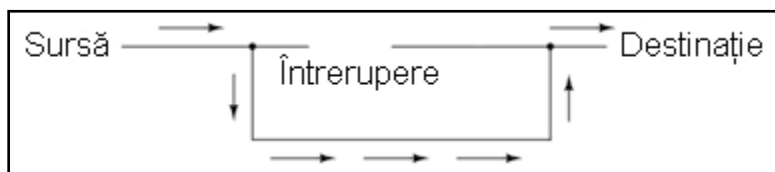
Să presupunem prin urmare o sursă și o destinație a electronilor.

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.

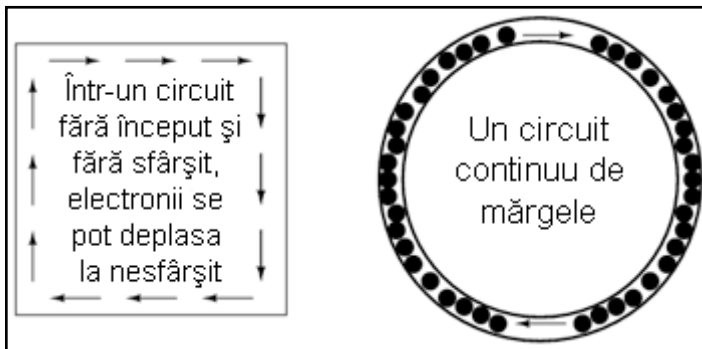
Acum avem continuitate dinspre Sursă, prin noua conexiune, în jos, în dreapta, și apoi în sus, spre Destinație. Acest aranjament este analog instalării unui teu într-o instalație de apă pentru dirijarea apei prin această nouă țevă, spre destinație. Atenție, segmentul de fir întrerup nu conduce curent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

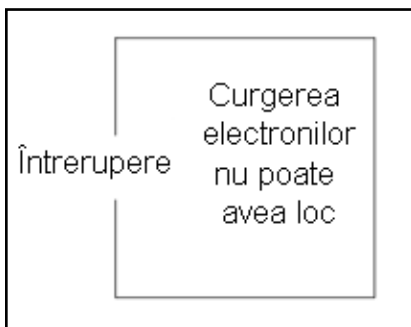
Poate vă întrebați cum este posibil ca electronii să se deplaseze continuu într-o direcție uniformă prin fire dacă nu am lua în considerare aceste Surse și Destinații ipotetice. Pentru ca aceste idealizări să funcționeze, ambele ar trebui să posede o capacitate infinită pentru a putea susține o curgere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

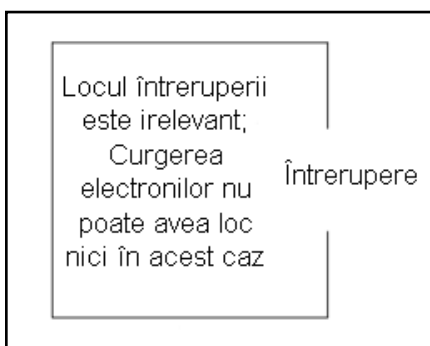
În cadrul acestui circuit, în sensul acelor de ceasornic, fiecare electron împinge electronul din fața lui, ce împinge electronul din fața lui, și așa mai departe, precum un circuit din mărgel. astfel, putem susține o deplasare continuă a electronilor fără a recurge la sursele și destinațiile infinite (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.

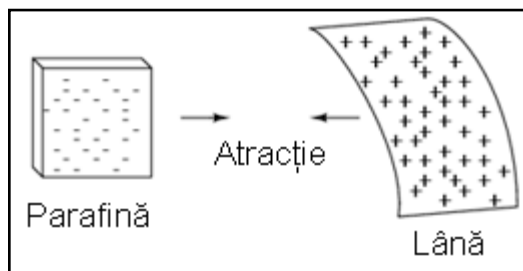
4. Tensiunea și curentul

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

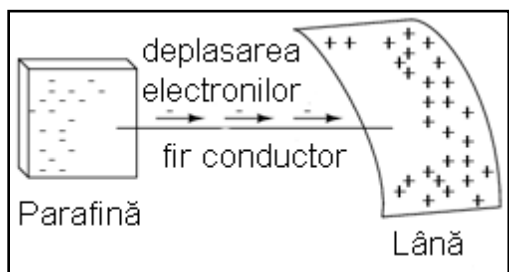
- Tensiunea este măsura energiei potențiale specifice (energie potențială pe unitate de sarcină electrică) dintre două puncte. În termeni non-științifici, este măsura „împingerii” disponibile pentru motivarea electronilor
- Tensiunea, ca și expresie a energiei potențiale, se măsoară tot timpul între 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 $\pm$ 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 țeavă, 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.



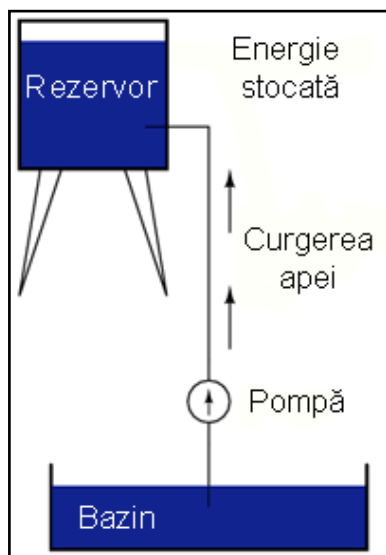
Dacă introducem un fir conductor între cele două corpuri încărcate din punct de vedere electric, vom observa o curgere a electronilor prin acesta datorită faptului că electronii în exces din parafină trec prin fir înapoi pe lână, restabilind dezechilibrul creat.

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

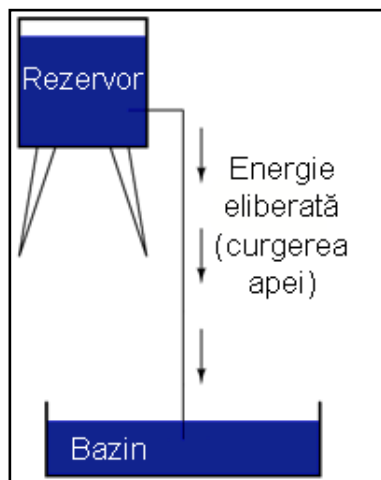
foarte scurt, până în momentul în care sarcina electrică este neutralizată în această zonă (restabilirea echilibrului), iar forța dintre cele două materiale se reduce.

Stocarea energiei

Analogia rezervorului de apă

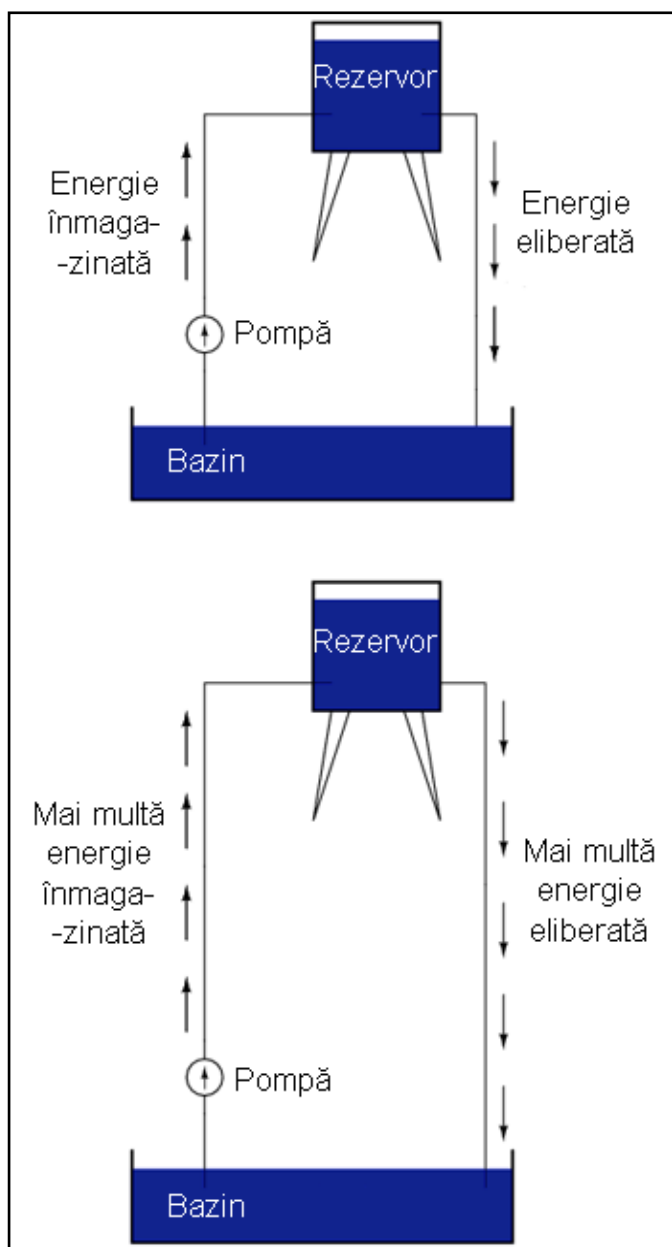


Sarcina electrică formată prin frecarea celor două materiale reprezintă stocarea unei anumite cantități de energie. Această energie este asemănătoare energiei înmagazinate într-un rezervor de apă aflat la înălțime, umplut cu ajutorul unei pompe dintr-un bazin aflat la un nivel mai scăzut.



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.

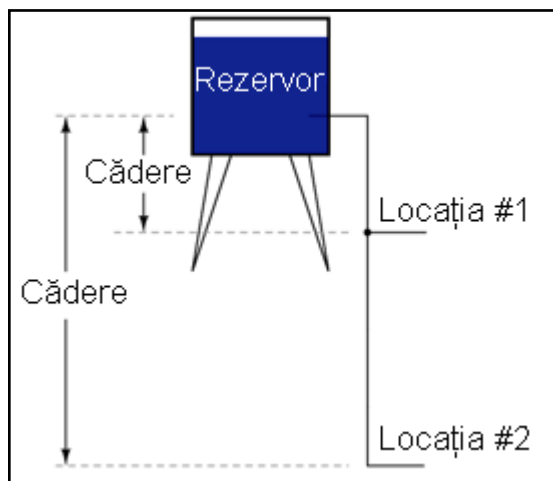
Tensiunea electrică

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).

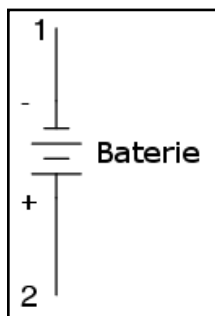
Nu putem aprecia valoarea energiei înmagazinate într-un rezervor de apă prin simpla măsurare a volumului de apă: trebuie să luăm de asemenea în considerare căderea (distanța parcursă) apei. Cantitatea de energie eliberată prin căderea unui corp depinde de distanța dintre punctul inițial și cel final 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



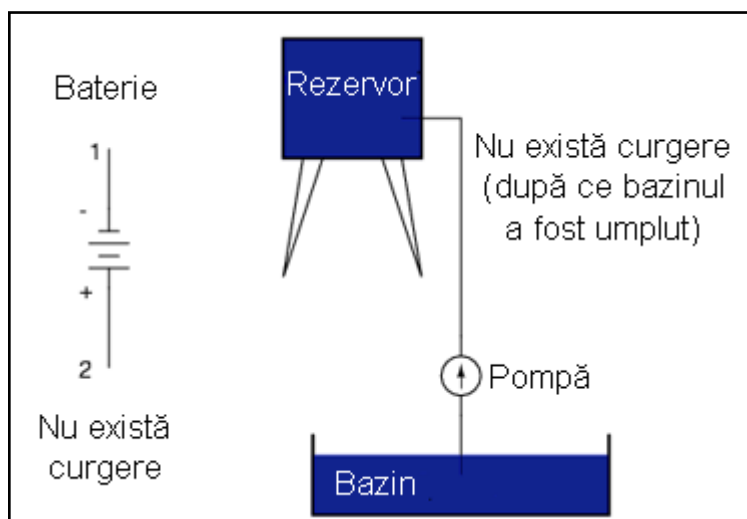
Să luăm pentru început simbolul bateriei electrice și să construim apoi un circuit pas cu pas. Orice sursă de tensiune, incluzând bateriile, are două puncte de contact electric. În acest caz avem punctul 1 și punctul 2 de pe desenul de mai sus. Liniile orizontale de lungimi diferite indică faptul că 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.

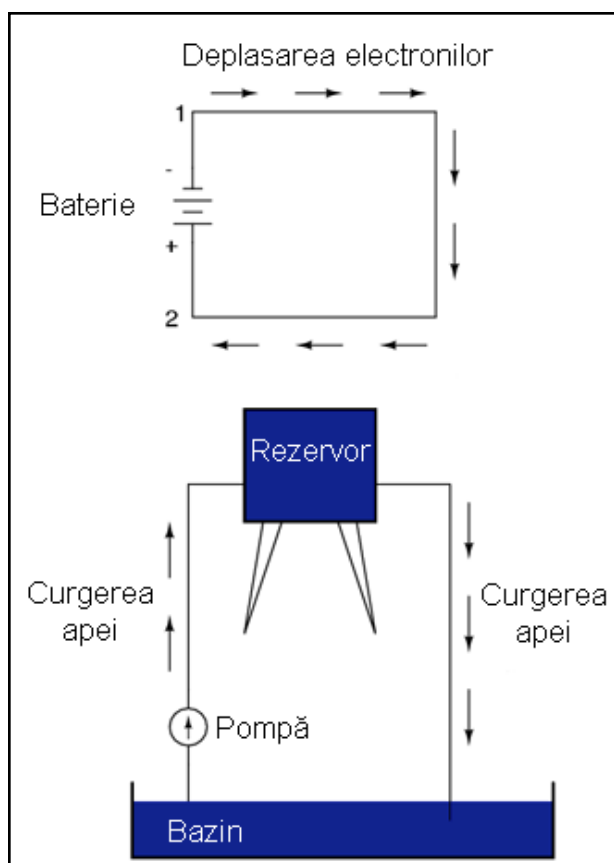
Deplasarea electronilor

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).

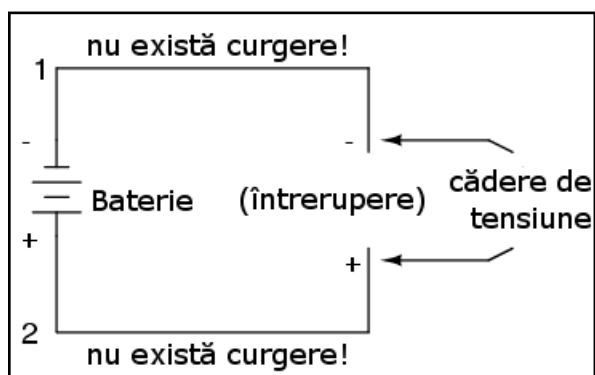
Curentul electric

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

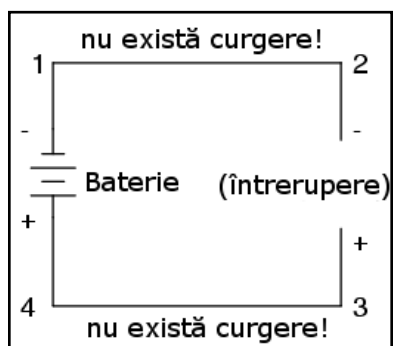
Curentul electric fiind compus din electroni individuali ce se deplasează la unison printr-un conductor împingând electronii de lângă ei, precum mărgelele dintr-un tub sau apa dintr-o țeavă, cantitatea deplasată în oricare punct din circuit este aceeași (circuit serie). Dacă ar fi să monitorizăm o secțiune 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



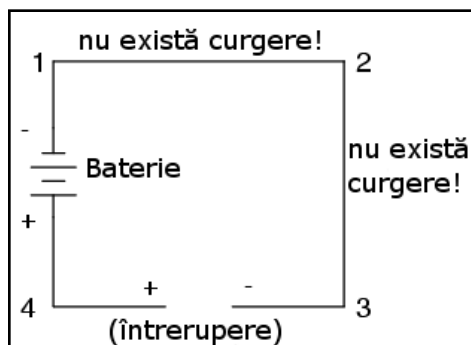
Dacă întrerupem continuitatea circuitului în oricare punct, curentul electric se va întrerupe în întreg circuitul, iar întreaga tensiune electrică produsă de baterie se va regăsi acum la capetele firelor întrerupte, ce erau înainte conectate.

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.

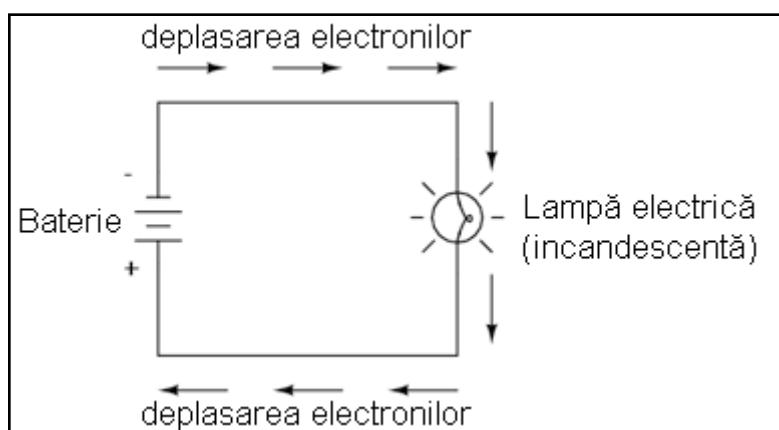
Rezistența și rezistorul sunt doi termeni diferiți

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.

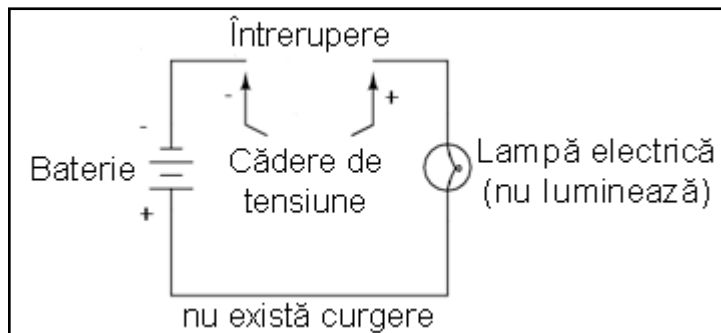
Opoziția față de trecerea electronilor prin conductori poartă numele de rezistență

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 (tehnic, 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.

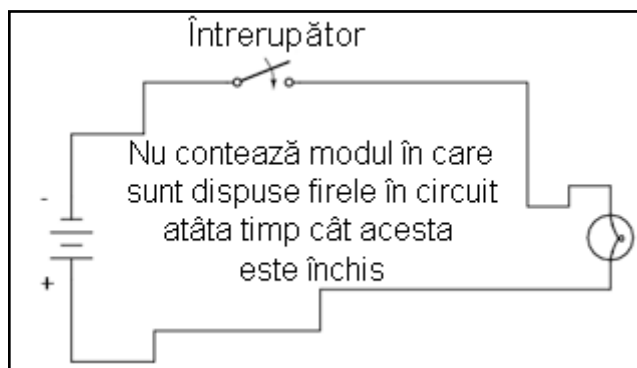


Ca și în cazul scurt circuitului, dacă continuitatea circuitului este întreruptă în oricare punct, curgerea electronilor va înceta prin întreg circuitul. Cu o lampă conectată la acest circuit, acest lucru înseamnă că aceasta va înceta să mai lumineze.

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.

Înterupătorul 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).

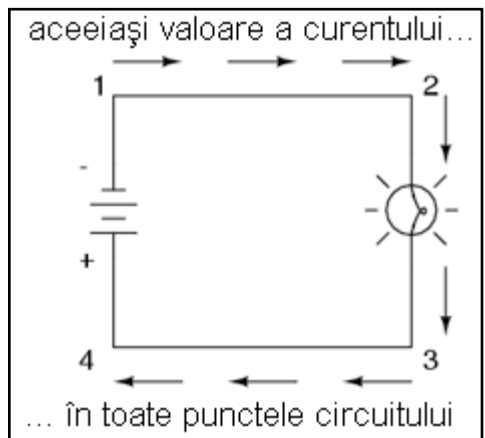
Întrerupător închis și întrerupător deschis

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.

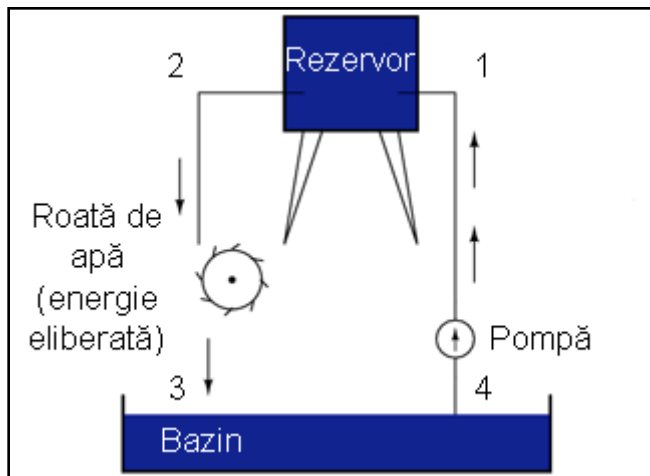


Să luăm acest circuit ca și exemplu. Dacă luăm patru puncte din acest circuit (1, 2, 3 și 4), vom descoperi că valoarea curentului ce trece prin fir între punctele 1 și 2 este exact aceeași cu valoarea curentului ce trece prin bec între punctele 2 și 3. aceeași cantitate de curent trece prin fir și între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

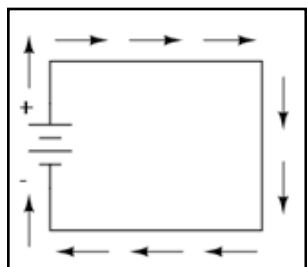
Purtătorii sarcinii electrice

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

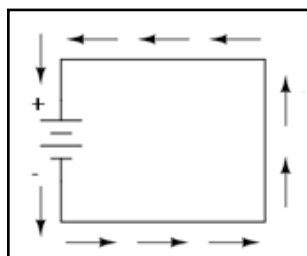
În momentul în care a fost descoperită adevărata direcție de deplasare a electronilor, nomenclatura „pozitiv” și „negativ” era atât de bine stabilită în comunitatea științifică încât nu a fost făcut niciun efort spre modificarea ei, deși numirea electronilor „pozitivi” ar fi mult mai potrivită ca și 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.

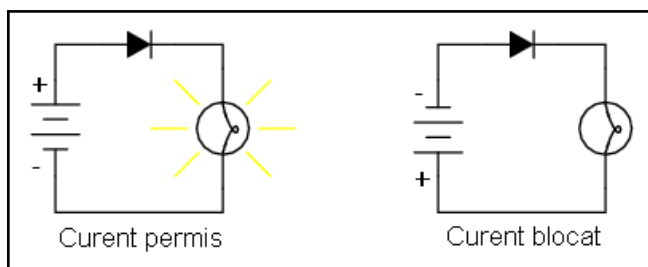
Dispozitive polarizate și dispozitive nepolarizate

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.



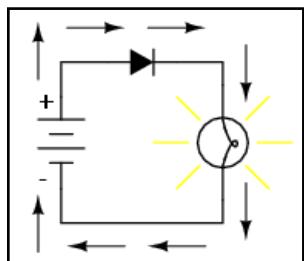
Probabil că cel mai bun exemplu de dispozitiv polarizat o reprezintă dioda. O diodă este o „valvă” electrică cu sens unic. Ideal, dioda oferă deplasare liberă electronilor într-o singură direcție (rezistență foarte mică), dar previne deplasarea electronilor în direcția opusă (rezistență infinită). Simbolul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



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

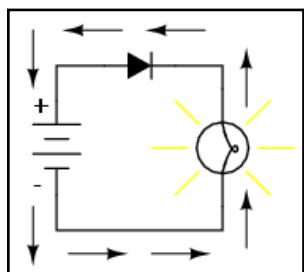
Când dioda este plasată în direcția curgerii curentului, becul se aprinde. Altfel, dioda blochează curgerea electronilor precum oricare altă întrerupere din circuit, iar becul nu va lumina.

Notația 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.

Notația 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	Ω

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.

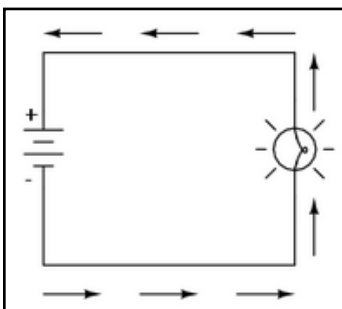
Această relație fundamentală este cunoscută sub numele de legea lui Ohm:

$$E = IR$$

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 :

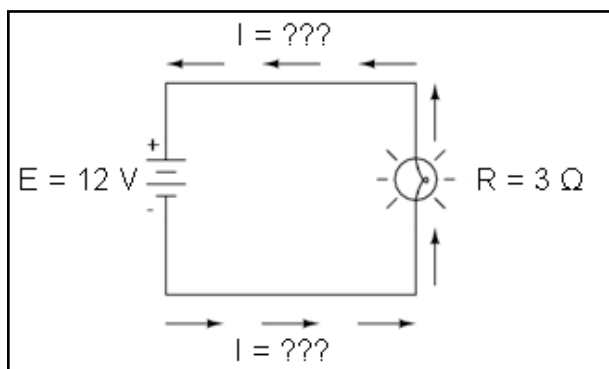
$$I = \frac{E}{R}; R = \frac{E}{I}$$

Analiza circuitelor simple folosind legea lui Ohm



Să folosim acum aceste ecuații pentru a analiza circuitele simple.

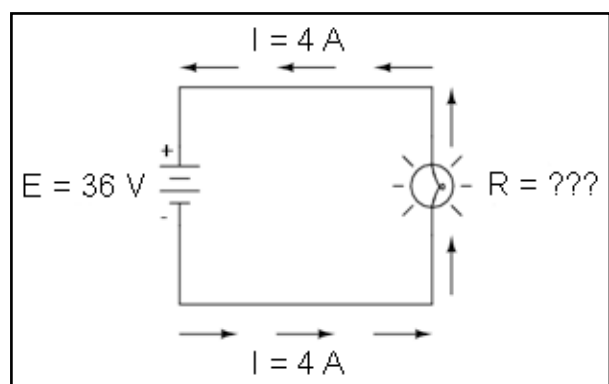
În circuitul alăturat, există doar o singură sursă de tensiune (bateria), și doar o singură rezistență (becul, neglijând rezistența datorată conductorilor). În această situație legea lui Ohm se poate aplica foarte ușor. În cazul în care cunoaștem două din cele trei variabile (tensiune, curent și rezistență)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

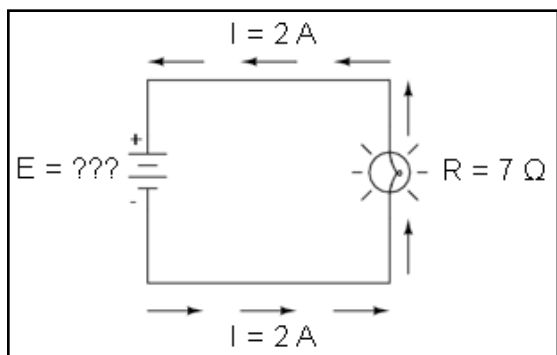
$$I = \frac{E}{R} = \frac{12\text{ V}}{3\ \Omega} = 4\text{ A}$$



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:

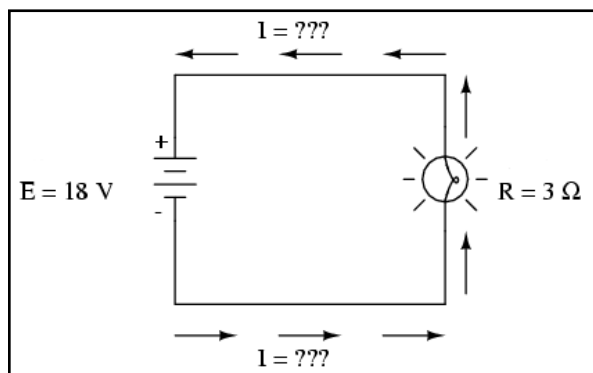
$$1 \text{ CP} = 745,7 \text{ W}$$

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

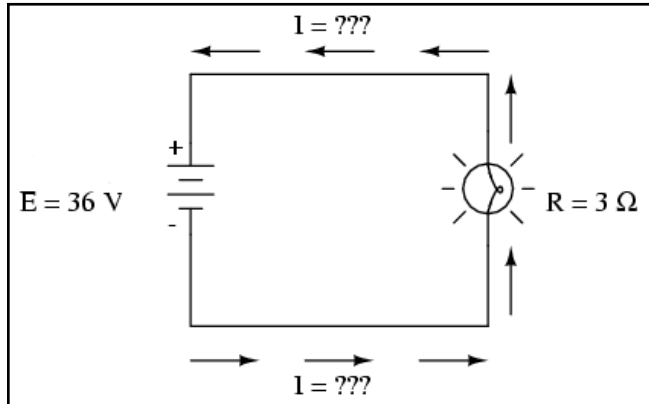
În circuitul de mai sus avem o baterie de 18 V, și un bec cu o rezistență de 3Ω . Folosind legea lui Ohm pentru determinarea curentului, obținem:

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

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 2×2 , 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.

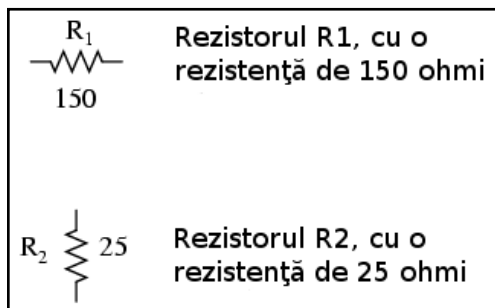
Acest lucru poate fi realizat prin schimbarea materialului, mărimii sau formei componentelor conductive (țineți minte cum filamentul metalic subțire al unui bec crează o rezistență electrică mai mare decât un fir gros?)

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.

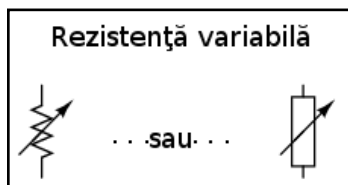


Valorile rezistențelor în ohmi sunt de obicei reprezentate printr-un număr adiacent, iar dacă într-un singur circuit sunt prezenți mai mulți rezistori, fiecare va fi notat cu R_1 , R_2 , R_3 , etc. După cum se poate vedea, simbolurile pentru rezistor pot fi prezentate fie orizontal, fie vertical.



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!

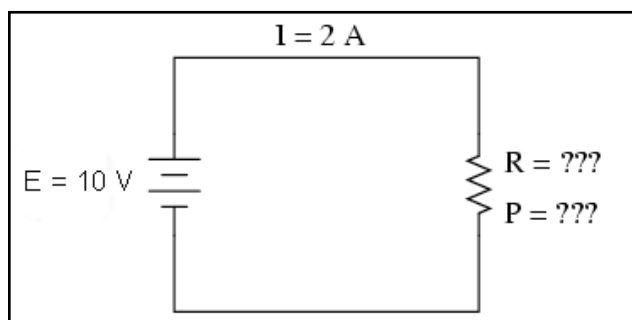
Rezistorii sunt elemente extrem de importante într-un circuit

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):

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

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

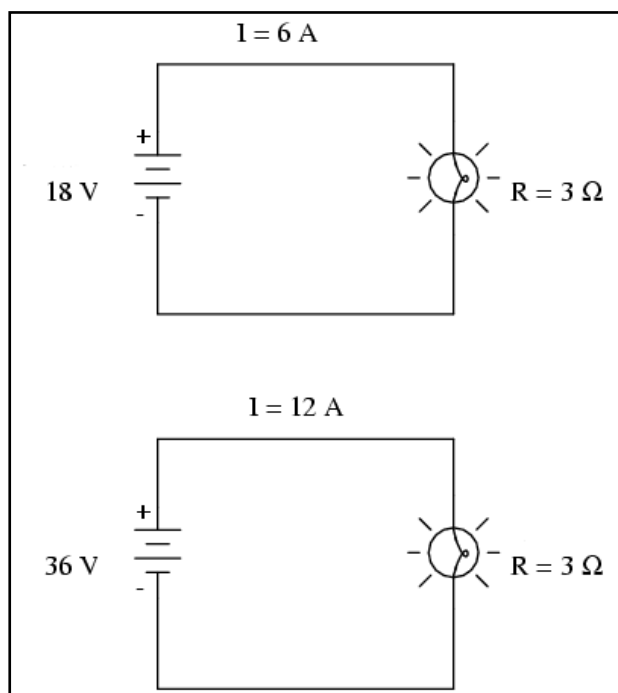
Pentru circuitul de față, în care avem 10 volți și 2 amperi, rezistența rezistorului trebuie să fie de 5 Ω. Dacă ar fi să proiectăm un circuit pentru a opera la aceste valori, ar trebui să folosim un rezistor cu o putere de minim 20 de Watti; în caz contrar, s-ar distruge din cauza supra-încălzirii.

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.



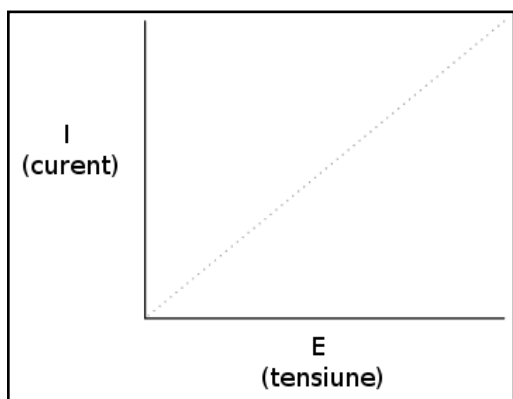
De exemplu, în cazul precedent cu becul de 3Ω , am calculat curentul prin circuit împărțind tensiunea la rezistență ($I=E/R$). Cu o baterie de 18 volți, curentul prin circuit a fost de 6 amperi. Dublând tensiunea bateriei la 36 de volți, am dublat și curentul la 12 amperi. Toate acest lucruri sunt evidente,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

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.

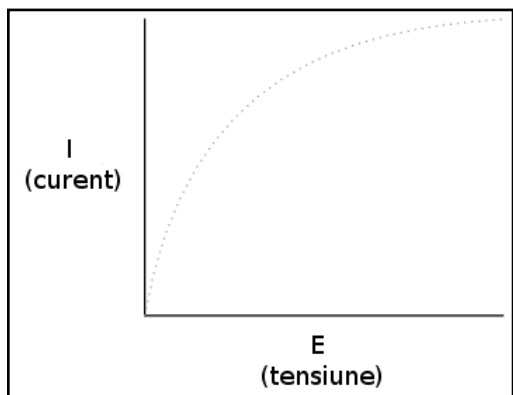
Variația liniară a curentului cu tensiunea



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

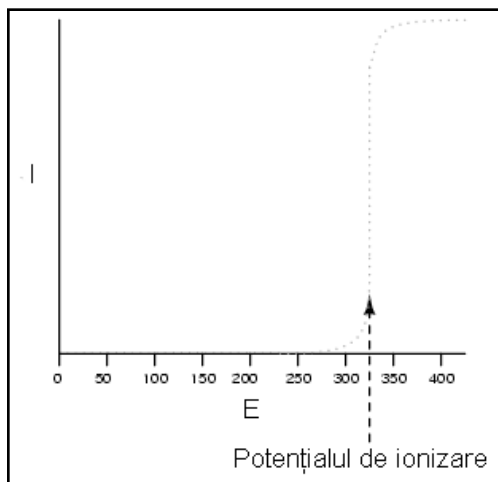


Un exemplu mai realist al unui circuit electric simplu cu bec, atunci când tensiunea la bornele bateriei variază într-un domeniu larg, este reprezentat prin graficul alăturat.

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

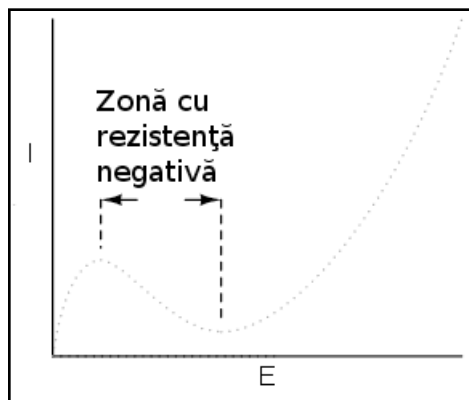
Multe materiale dielectrice solide posedă proprietăți rezistive similare: rezistență extrem de mare la trecerea curentului electric sub o anumită tensiune critică, iar apoi, o rezistență mult diminuată la depășirea acelei valori a tensiunii. Odată ce un material dielectric a trecut prin faza de străpungere (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.

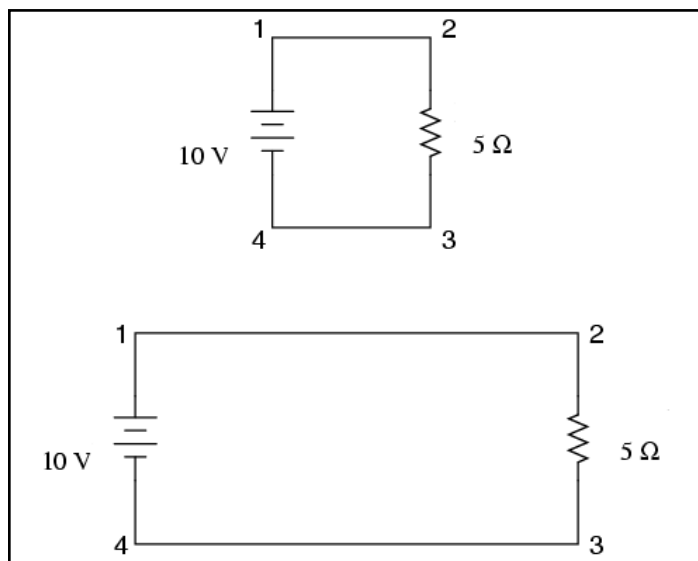
6. Conexiunea unui circuit

- 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 5Ω a rezistoarelor, și o vom considera doar pe aceasta în calculele noastre.

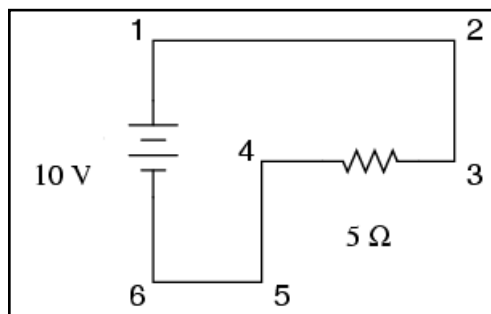
În realitate, firele metalice au o anumită rezistență (precum și sursele de tensiune!), dar acele rezistențe sunt în general mult mai mici decât rezistența prezentă în celelalte componente din circuit încât pot fi neglijate. Excepție fac firele din circuitele de putere (curenți mari), unde chiar și o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

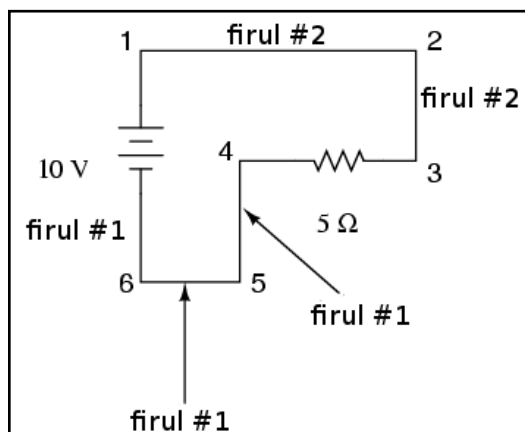
Acest lucru are sens și din punct de vedere matematic. Cu o baterie de 10 volți și un rezistor de 5 curentul va fi de 2 amperi. Rezistența firelor fiind zero, căderea de tensiune pe întregul circuit poate fi determinată cu ajutorul legii lui Ohm, astfel:

$$E = IR$$

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

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

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:

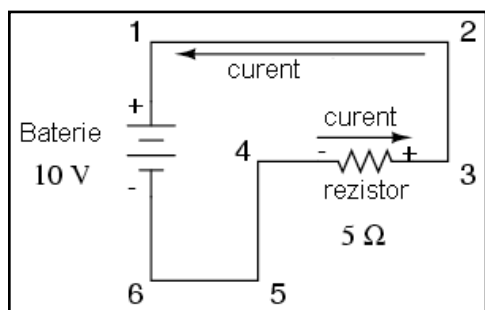


Punctele 1, 2 și 3 sunt comune, prin urmare firul ce conectează punctele 1 și 2 este notat asemenea (**firul #2**) firului ce conectează punctele 2 și 3 (**firul #2**). Într-un circuit real, firul dintre punctele 1 și 2 poate avea culori și mărimi diferite față de firul ce conectează punctele 2 și 3, 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 5Ω , 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 induce 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.

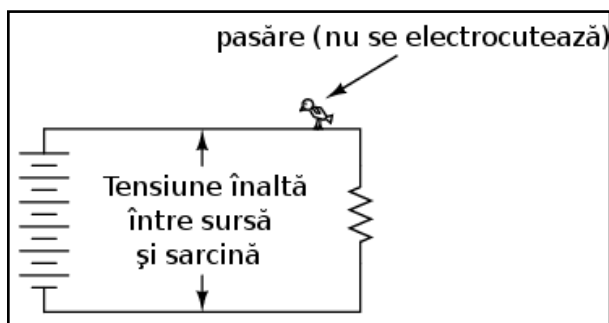
Oricare ar fi cazul, curenții electrici suficienți de mari pentru a cauza contracția involuntară a mușchilor sunt periculoși și trebuie evitați cu orice preț.

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

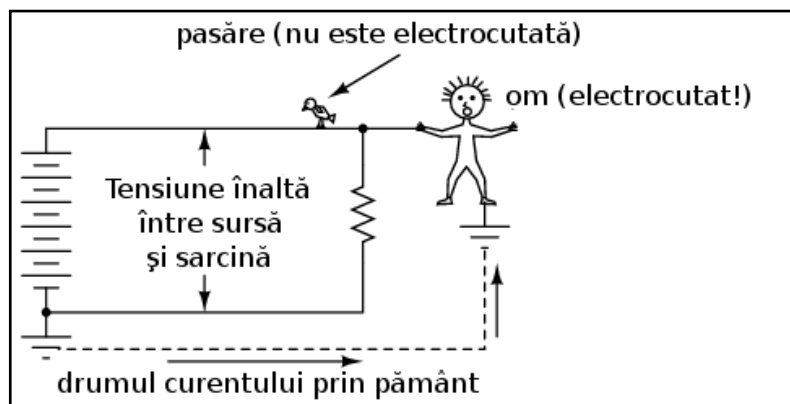
După cum am văzut deja, deplasarea continuă a electronilor necesită prezența unui circuit închis. Acesta este motivul pentru care șocul electric datorat electricității statice este doar de moment: deplasarea electronilor este de scurtă durată, până când se reface echilibrul electric dintre cele două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

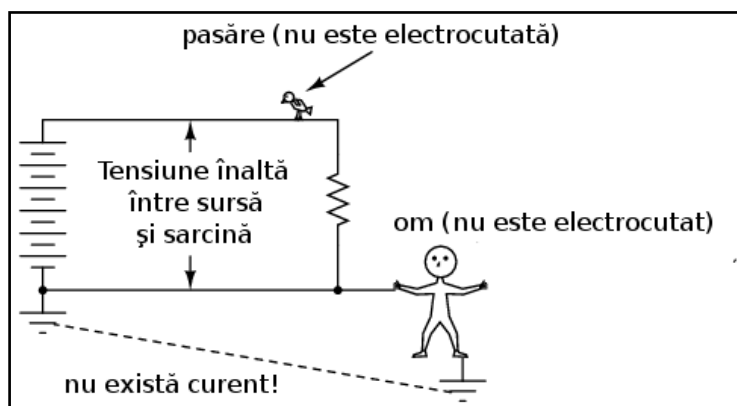
Împământarea

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)

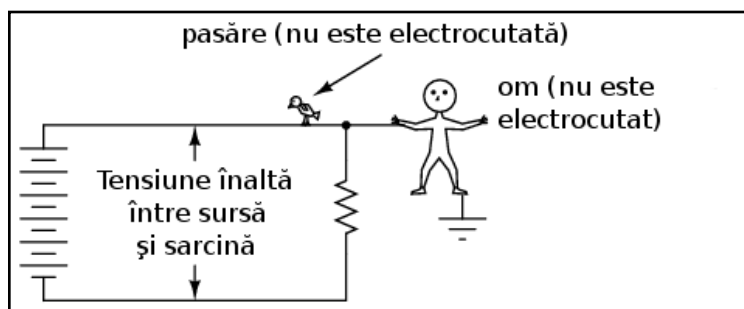


Cât privește prima întrebare, prezența unui punct de împământare „intențional” asigură că cel puțin contactul cu o parte din circuit este sigură. Dacă persoana din cazul precedent ar fi să atingă partea de jos a rezistorului, aceasta nu s-ar electrocuta, chiar dacă picioarele sale vin în contact cu pământul.

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.

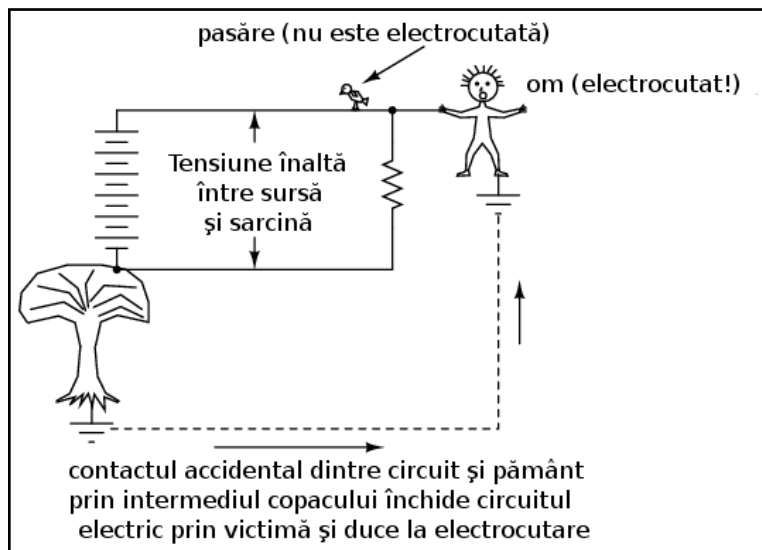
Din același motiv, firul ce conectează circuitul la împământare nu are de obicei izolație; orice obiect metalic ce vine în contact cu acesta se va transforma într-un punct electric comun cu pământul, eliminând orice pericol de electrocutare. Legarea unui circuit la pământ asigură faptul că există cel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

Defectul de împământare



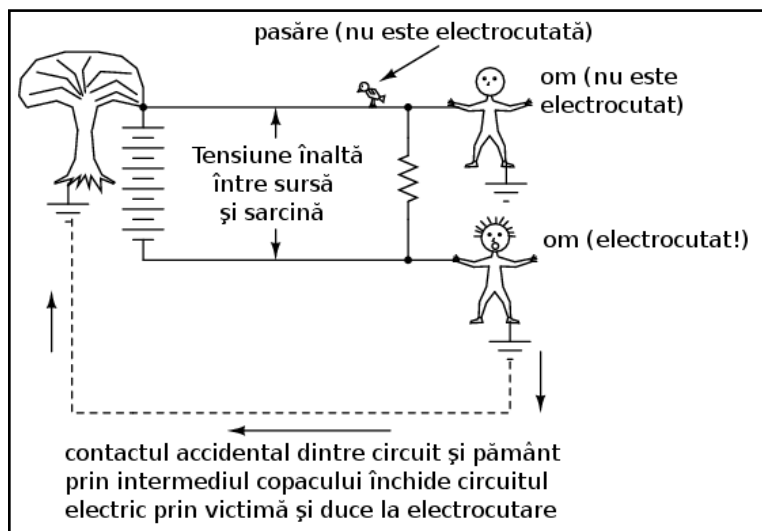
Dar dacă nu am lega circuitul deloc la pământ? Nu ar însemna acest lucru că atingerea oricărui fir ar fi la fel de sigură? Ideal, da. Practic însă, nu. Să observăm ce se întâmplă fără niciun fel de împământare.

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.

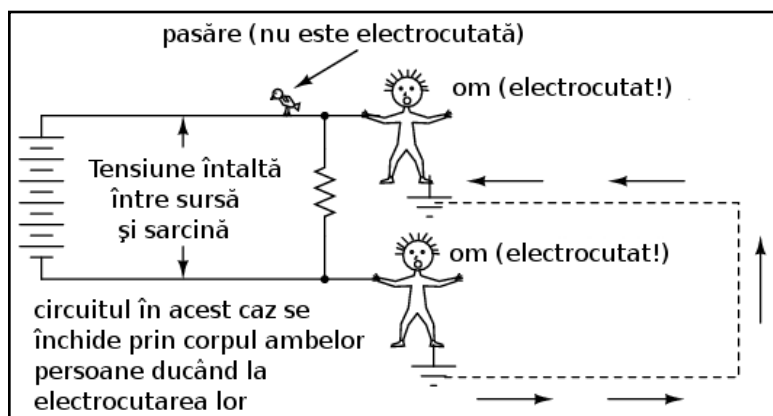


Totuși, toate acestea se pot schimba radical în momentul formării unei legături accidentale cu pământul, precum atingerea liniilor de înaltă tensiune de către o creangă ce duce la formarea unei legături directe cu pământul.

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 Ω și 500 k Ω
- Contact prin intermediul piciorului protejat cu încălțăminte de piele (ud): între 5 k Ω și 20 k Ω

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 Femei = 0.6 mA	0.4 mA 0.3 mA	7 mA 5 mA
Pragul de percepție	Bărbați = 5.2 mA Femei = 3.5 mA	1.1 mA 0.7 mA	12 mA 8 mA
Apariția durerii, dar se poate menține controlul voluntar al mușchilor	Bărbați = 62 mA Femei = 41 mA	9 mA 6 mA	55 mA 37 mA
Apariția durerii, victima nu poate lăsa firul din mână	Bărbați = 76 mA Femei = 51 mA	16 mA 10.5 mA	75 mA 50 mA
Durere severă, apar dificultăți de respirație	Bărbați = 90 mA Femei = 60 mA	23 mA 15 mA	94 mA 63 mA
Posibilitatea apariției fibrilației inimii după 3 secunde	Bărbați = 500 mA Femei = 500 mA	100 mA 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.

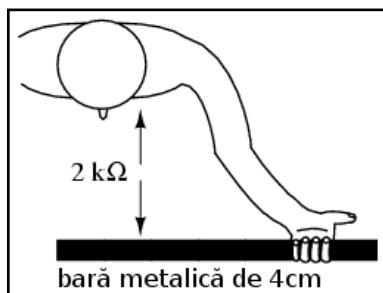
Șaptesprezece volți nu este o valoare foarte mare din punct de vedere al rețelilor electrice. Desigur, aceasta este situația cea mai proastă posibil, cu o tensiune alternativă la 60 Hz și conductivitate excelentă a corpului, dar utilitatea ei constă în exemplificarea faptului că o tensiune foarte mică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

„Înghițarea” victimei pe fir agravează efectele electrocutării

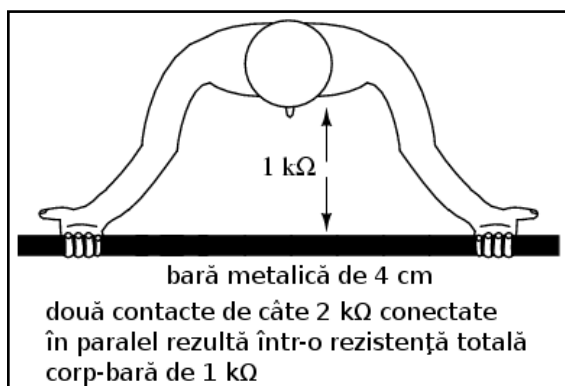
Nu este necesar ca aceste condiții de realizare a rezistenței electrice de 1 k Ω să fie atât de extreme precum a fost prezentat mai sus. Rezistența corpului poate scădea odată cu aplicarea tensiunii (în special dacă tetanosul face ca victima să strângă și mai bine conductorul în mână), astfel încât cu 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 (condiții uscate)	Rezistența electrică (condiții umede)
Fir atins de deget	40 k Ω - 1 M Ω	4 k Ω - 15 k Ω
Fir prins în mână	15 k Ω - 50 k Ω	3 k Ω - 5 k Ω
Clești metalici ținuti în mână	5 k Ω - 10 k Ω	1 k Ω - 3 k Ω
Contact cu palma mâinii	3 k Ω - 8 k Ω	1 k Ω - 2 k Ω
Bară metalică de 4 cm ținută cu o mână	1 k Ω - 3 k Ω	0.5 k Ω - 1,5 k Ω
Bară metalică de 4 cm ținută cu ambele mâini	0.5 k Ω - 1,5 k Ω	0.25 k Ω - 0.75 k Ω
Mână introdusă în lichid conductor	0.2 k Ω - 0.5 k Ω	
Picior introdus în lichid conductor	0.1 k Ω - 0.3 k Ω	



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

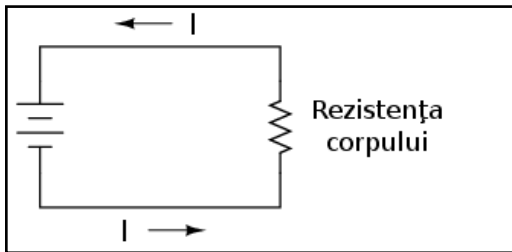
Drumul urmat de curent prin corpul uman este foarte important atunci când vorbim de efectele sale asupra organismului. Curentul afectează orice fel de țesut/mușchi prin care trece, și din moment ce mușchii inimii și ai plămânilor sunt cei mai importanți pentru supraviețuire, șocurile de curent ce traversează 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

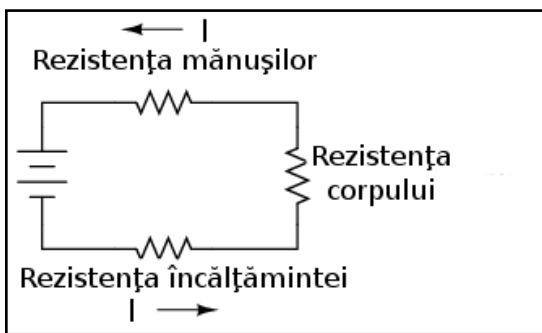


Cea mai bună protecție împotriva electrocutării este rezistența electrică, iar aceasta poate fi adăugată rezistenței corpului prin folosirea instrumentelor de lucru, echipamentelor, mănușilor și încălțămintei izolate electric. Curentul prin circuit (factorul periculos la electrocutare) este raportul 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 conductoarelor 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.

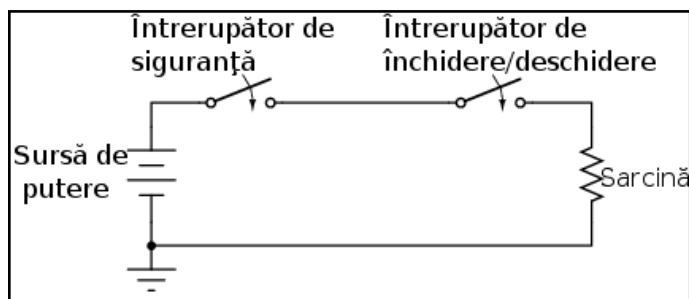
4. Practici de bază

- 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



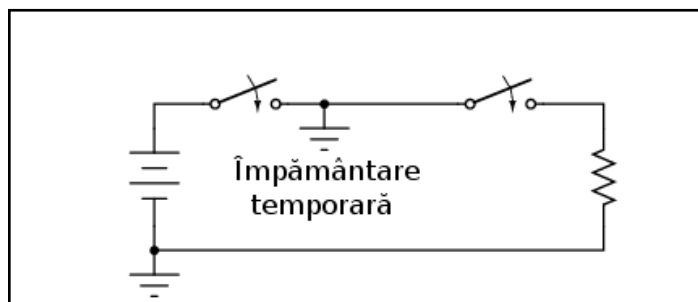
Toate circuitele trebuie prevăzute cu mecanisme de „deconectare” pentru asigurarea tensiunii din circuit. În unele cazuri, aceste dispozitive servesc un scop secundar în circuit, și anume, deschiderea automată a acestuia în cazul în care valoarea curentului depășește valoarea nominală permisă în circuit.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

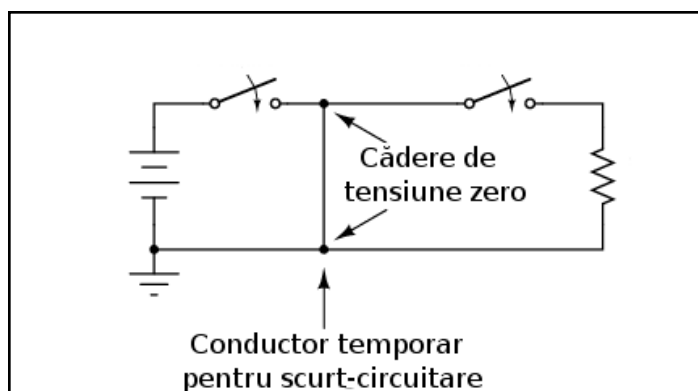
Pentru o siguranță maximă se pot realiza împământări temporare



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 bateri, 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.

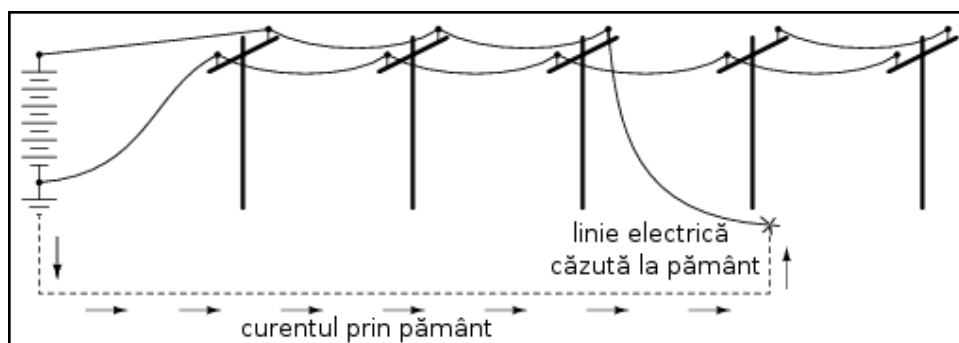
Tăiați capătul prelungitoarelor defecte pentru evitarea electrocutărilor

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).

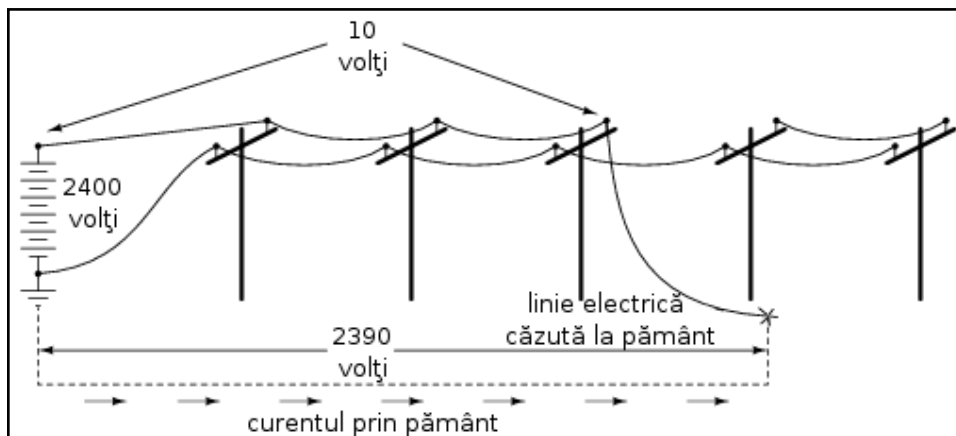
Evitați liniile electrice căzute la pământ și stâlpii de înaltă tensiune



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

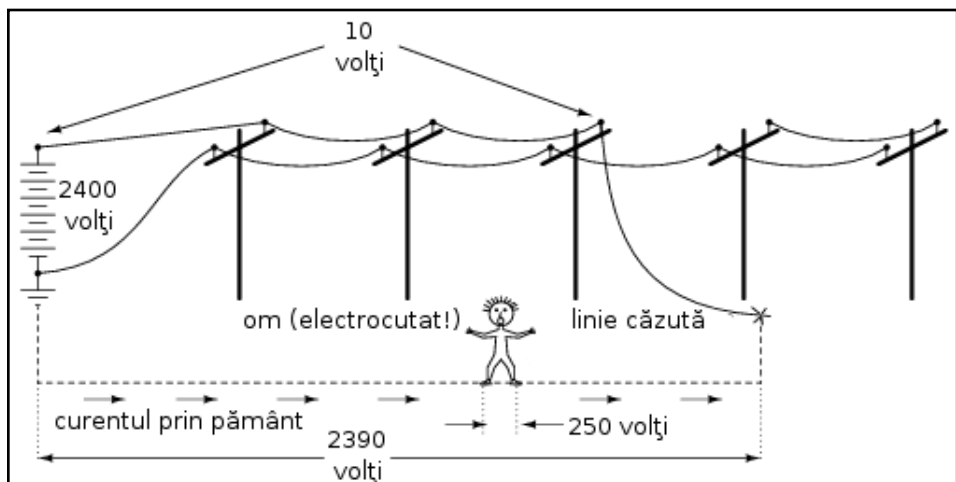
Tensiunile prezente între liniile de alimentare sau între o linie de alimentare și pământ sunt în mod normal foarte mari. Dacă o linie electrică se rupe iar conductorul metalic cade la pământ, rezultatul imediat este producerea arcurilor electrice (scântei) suficient de puternice pentru smulgerea bucăților 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

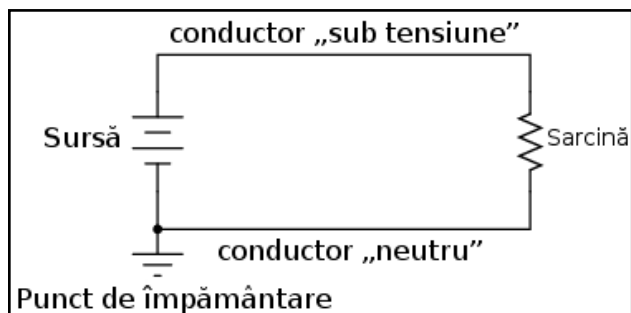
Un mod de a evita acest tip de electrocutare este ca atunci când observăm o linie electrică căzută la pământ să facem contact cu pământul doar într-un singur punct; acest lucru îl putem realiza alergând (când alergăm, doar un singur picior atinge pământul deodată), sau, dacă nu avem unde fugi, să stăm 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



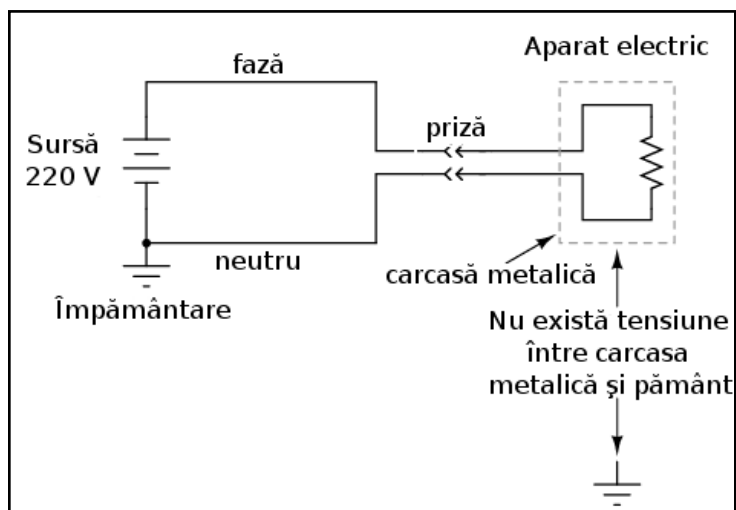
Odată cu realizarea împământării circuitului, cel puțin un punct din circuit este comun cu pământul și prin urmare nu prezintă niciun risc de electrocutare. Într-un sistem electric simplu, format din două fire, conductorul conectat la împământare se numește neutru, iar conductorul aflat sub tensiune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

Atingerea neutrului și a fazei

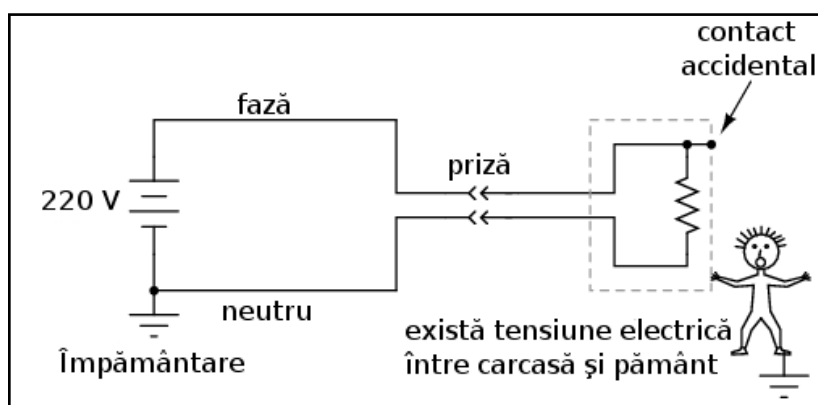
În ceea ce privește sursa de alimentare și sarcina propriu-zisă, existența punctului de împământare nu are niciun efect asupra funcționării circuitului. Acesta există doar pentru siguranța persoanelor ce intră în contact cu circuitul, și înseamnă o cădere de tensiunea de 0 volți între circuit și pământ, 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

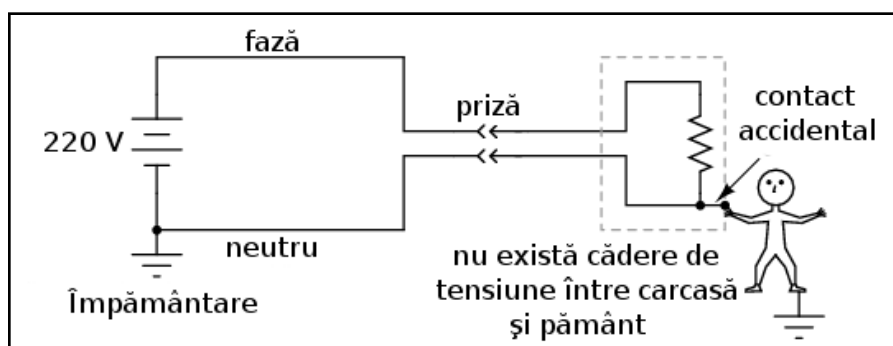


Dacă luăm, de exemplu, un aparat electric, precum un prăjitor de pâine, cu o carcasă metalică, putem observa că teoretic acesta nu ar trebui să prezinte niciun pericol de electrocutare în cazul în care funcționează corespunzător. Firele metalice din interiorul aparatului ce conduc curentul spre elementul 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

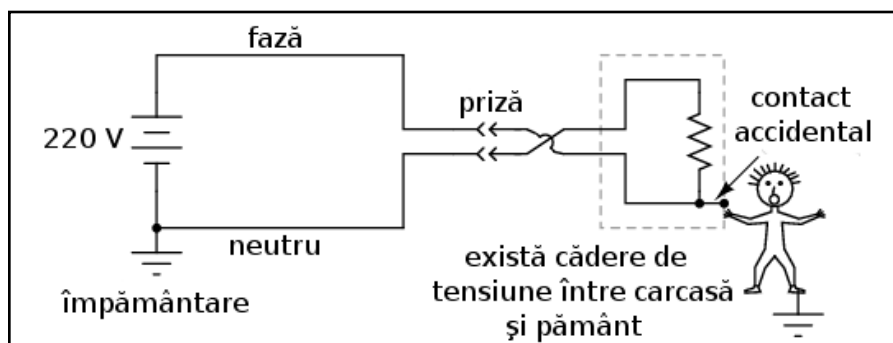
de natura firului ce atinge carcasa.



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.

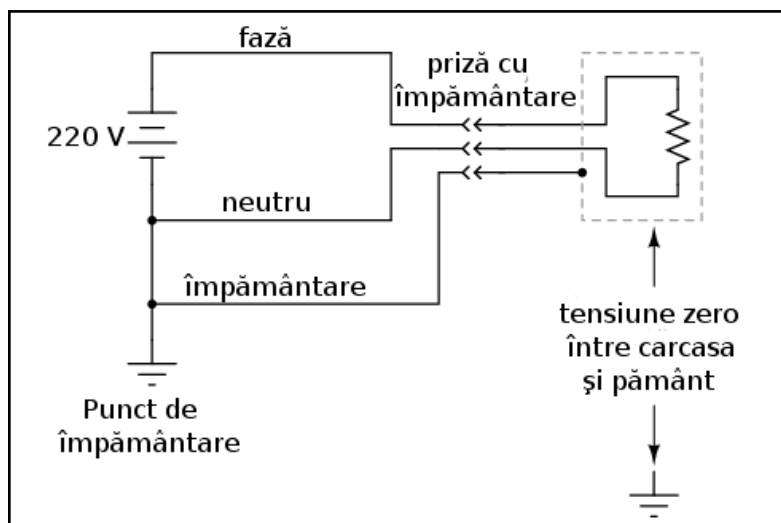
Totuși, această măsură preventivă este eficientă doar în cazurile în care polaritatea prizei poate fi garantată. Dacă polaritatea acesteia poate fi inversată, atunci firul ce intră în contact cu carcasa poate la fel de bine să fie cel aflat sub tensiune.

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

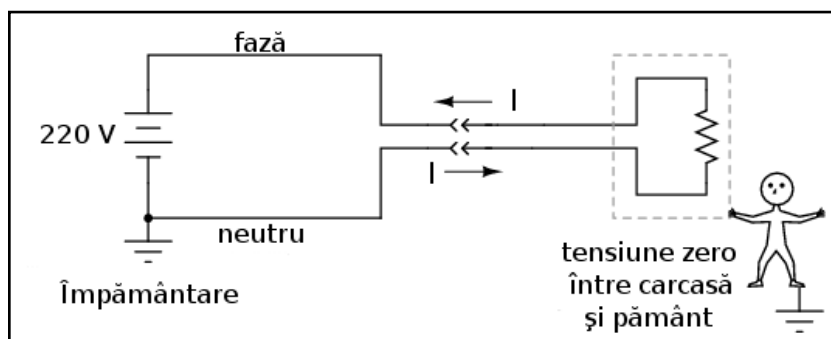


Iar o altă metodă constă în menținerea carcasei metalice, dar și adăugarea unui al treilea conductor între punctul de împământare și carcasa metalică pentru asigurarea unei legături directe și sigure între aceasta și pământ.

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.

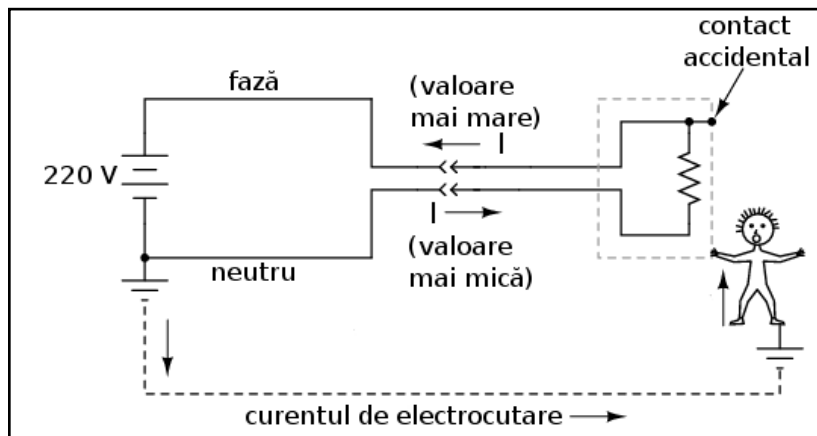
Datorită acestui lucru, nu îndepărtați niciodată al treilea contact al prizei în cazul în care doriți să introduceți un conector fără împământare într-o priză cu împământare. Aparatul va funcționa în continuare fără nicio problemă, dar, prin îndepărtarea acestui contact, nu va mai exista nicio legătură 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

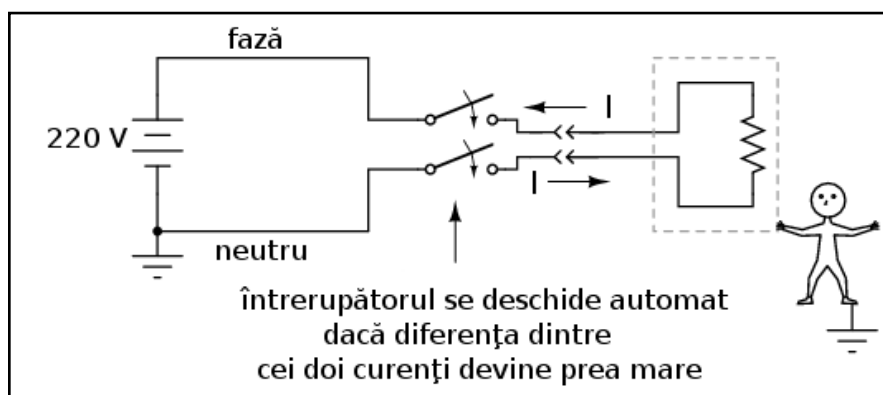


Asigurarea împotriva electrocutării se poate realiza și în altă parte, nu doar asupra aparatului electric.

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

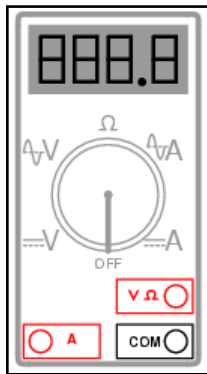
- Multimetrul este un aparat de măsură capabil să măsoare tensiunea, curentul și rezistența

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.

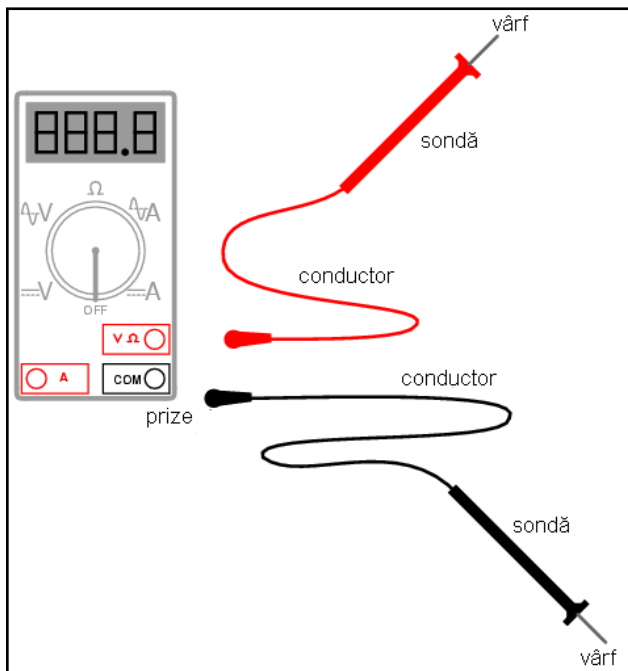
Prezentarea generală a unui multimetru



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.

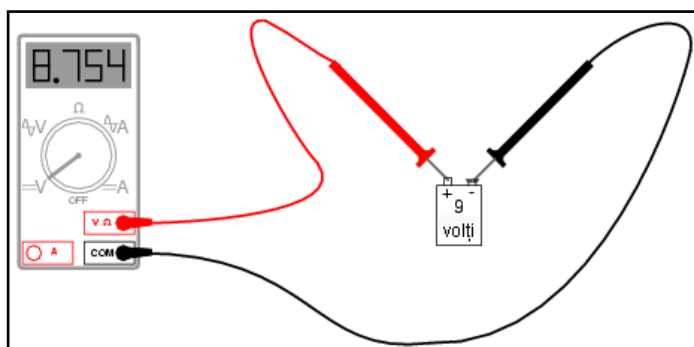


Pe suprafața multimetrului există trei prize în care putem introduce sondele de test. Sondele nu sunt altceva decât conductori speciali utilizați pentru realizarea legăturii dintre circuit și multimetru. Conductorii sunt acoperiți de o izolație colorată, neagră sau roșie, pentru a preveni contactul direct,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

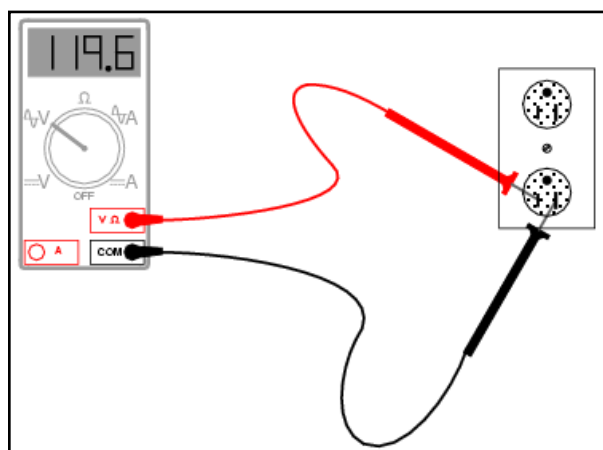
Utilizarea multimetrului – exemple

Măsurarea unei tensiuni de curent continuu



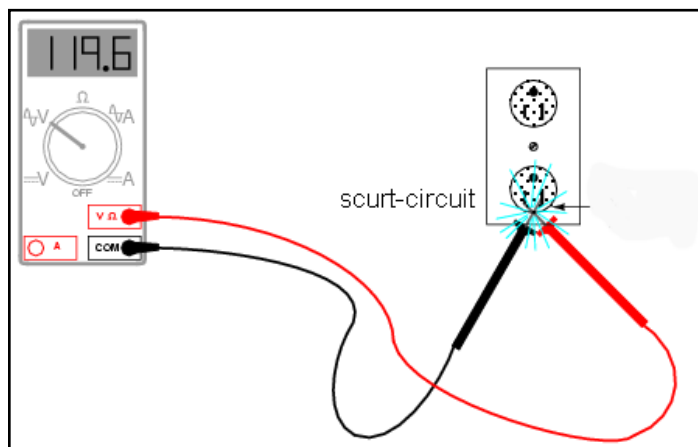
Primul exemplu constă din măsurarea unei tensiuni de c.c. la bornele unei baterii. Observați prizele la care sunt conectate cele două sonde ale multimetrului (V Ω și COM) și faptul că selectorul este setat pe „V” în curent continuu.

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.

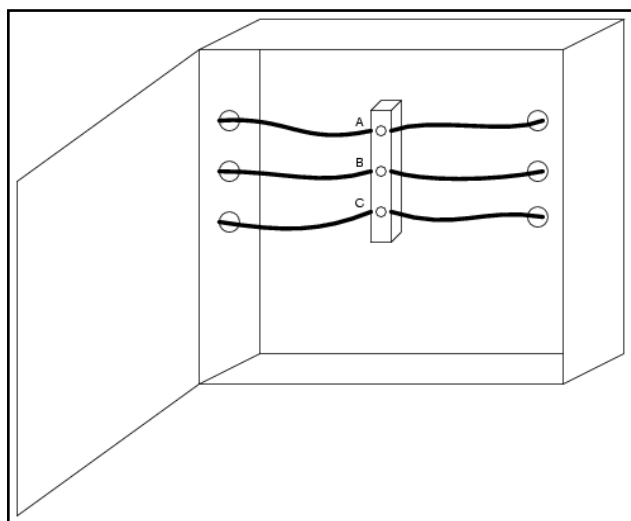
Dacă izolația sondelor este deteriorată sau crăpată, degetele utilizatorului pot intra în contact direct cu conductorii de curent în timpul măsurătorilor. Dacă putem folosi doar o singură mână pentru ambele sonde, aceasta ar fi cea mai sigură metodă de efectuare a măsurătorilor. Câteodată este posibilă „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.

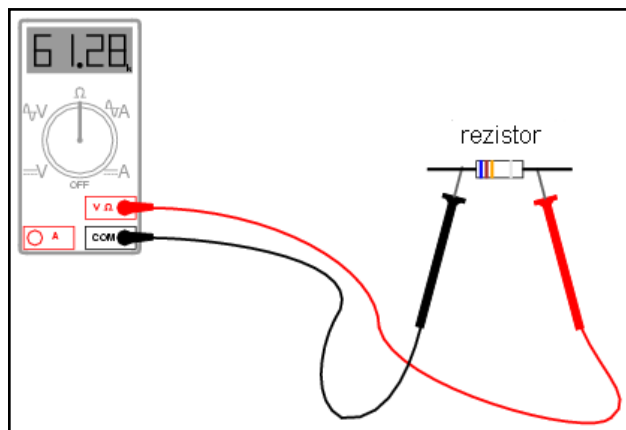
Prima dată verificăm aparatul de măsură asupra unei surse de tensiune cunoscute, pentru a ne asigura de funcționarea sa corectă (priză de c.a., de exemplu). Facem acest lucru și observăm ca multimetrul funcționează corect. Apoi, trebuie să măsurăm căderea de tensiune dintre aceste fire ale panoului. 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 măsurărilor 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).

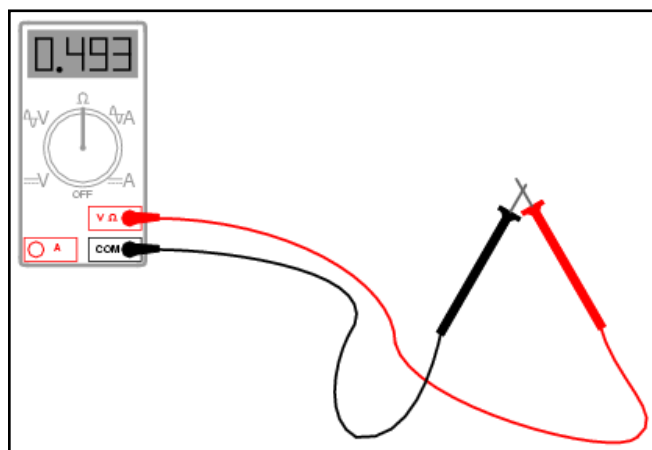
Măsurarea rezistențelor



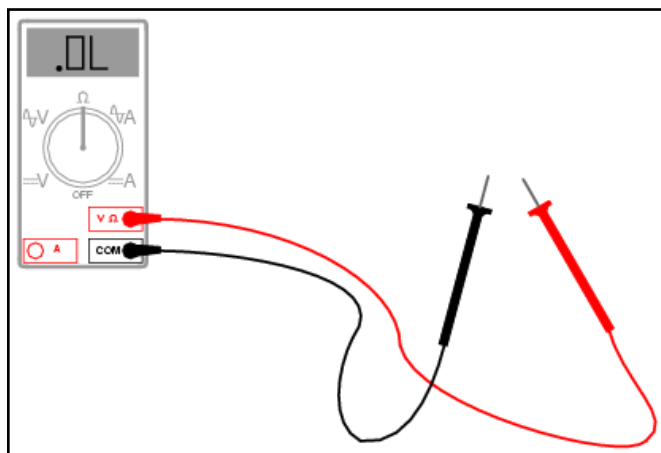
În cazul măsurării rezistențelor, sondele vor rămâne conectate în aceleași prize ale multimetrului ca și în cazul măsurătorilor de tensiune, dar selectorul trebuie poziționat pe Ω (vezi figura). Măsurătoarea se realizează simplu, prin poziționarea vârfurilor celor două sonde pe capetele libere ale rezistorilor.

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

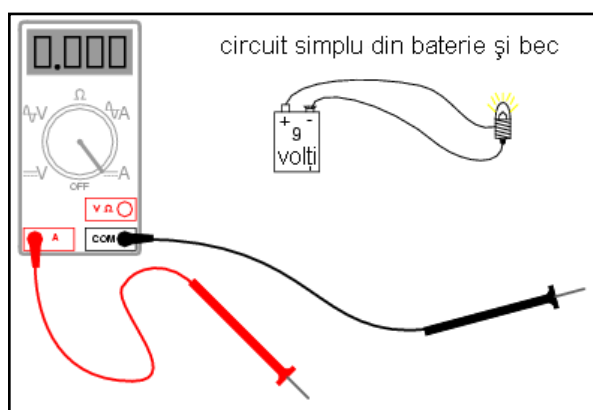


Modul „rezistență” a unui multimetru este foarte folositor și pentru determinarea continuității conductorilor. Atunci când există un contact bun între vârfurile sondelor, aparatul va indica o valoare aproximativ egală cu 0Ω . Dacă sondele nu ar prezenta nicio rezistență internă, această măsurătoare ar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



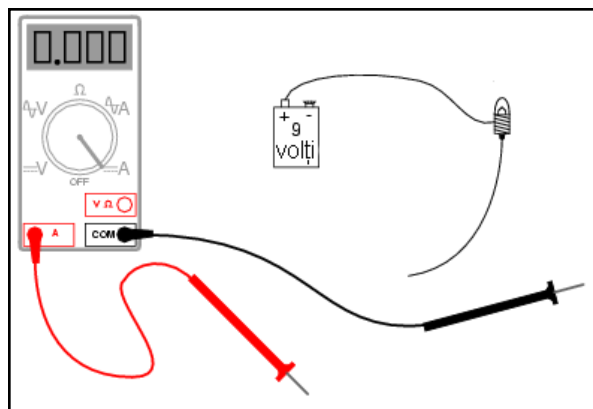
Dacă sondele nu se află în contact direct una cu cealaltă, sau dacă sunt conectate la capetele opuse ale unui conductor întrerupt, acesta va indica o rezistență infinită, reprezentată de obicei pe afișajul multimetrului prin prescurtarea „O.L.” (open loop (eng.) - circuit deschis).

Măsurarea curentului cu ajutorul multimetrului

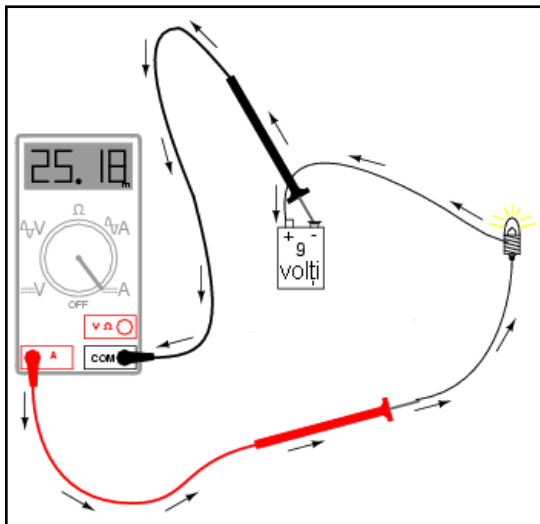


Aceasta reprezintă cea mai complexă și periculoasă aplicație a multimetrului. Motivul este destul de simplu: curentul de măsurat trebuie să treacă prin aparatul de măsură, ceea ce înseamnă că multimetrul trebuie integrat în circuit.

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).



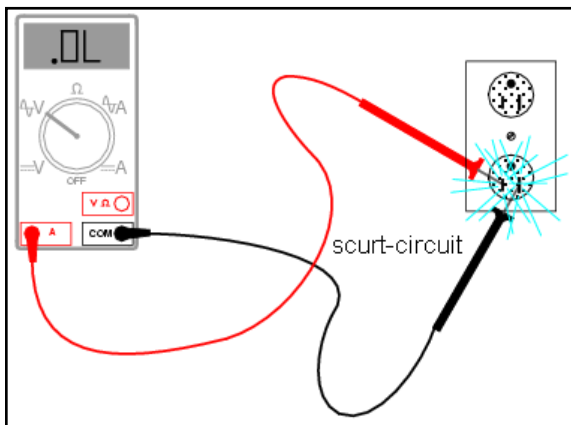
Următorul pas este deschiderea circuitului pentru a putea conecta multimetrul.



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



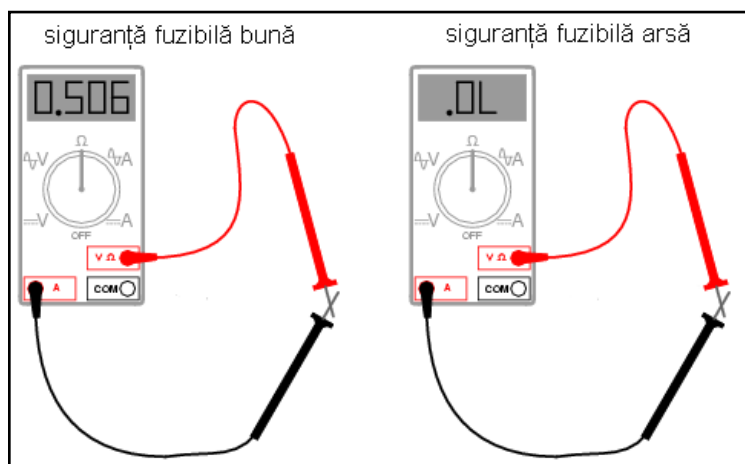
La modificarea poziției multimetrului din modul „curent” (ampermetru) în modul „tensiune” (voltmetru), se întâmplă adesea să schimbăm poziția de pe „A” pe „V” dar să uităm sonda roșie în priza „A” și nu în priza (V Ω).

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 Ω . În poziția „V”, lucrurile stau exact invers, rezistența dintre vârful sondelor este de ordinul mega-ohmilor (M Ω).

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:

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

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:

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

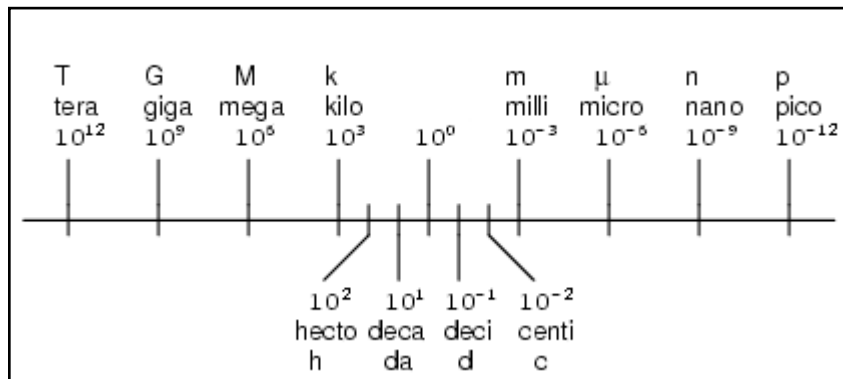
Putem vedea că am ajuns la aceeași valoarea, 3.600 secunde ($3,6 \times 10^3$).

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 (μ) 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

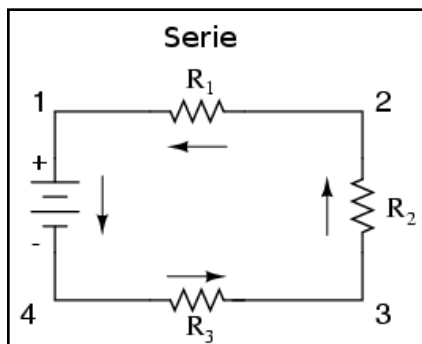
1. Ce sunt circuitele „serie” și „paralel”

- 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.

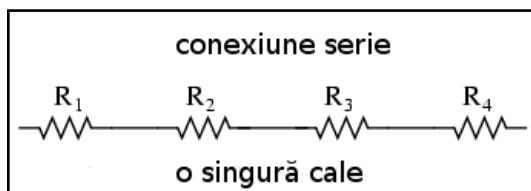
Circuitele formate dintr-o singură baterie și o singură rezistență sunt foarte ușor de analizat, dar nu sunt foarte des întâlnite în practică. De obicei circuitele conțin mai mult de două componente conectate între ele.

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:



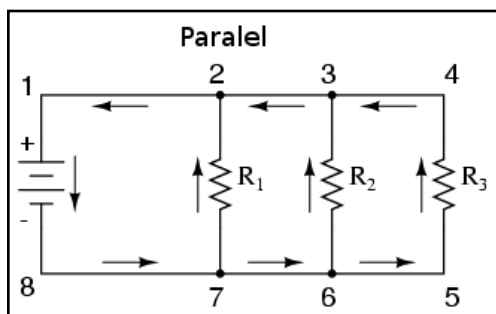
În acest circuit avem 3 rezistori (R_1 , R_2 și R_3) conectați într-un singur lanț de la un terminal al bateriei la celălalt. Caracteristica principală a unui circuit serie este existența unei singure căi pentru curgerea electronilor.



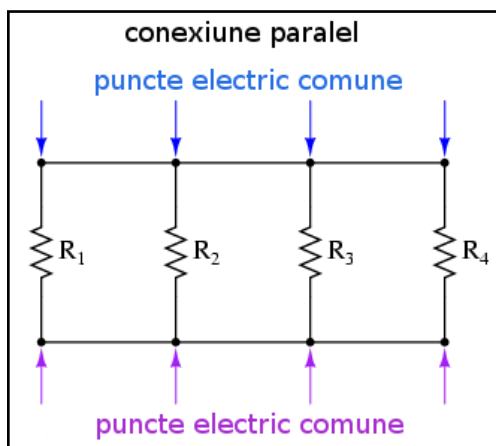
Idea de bază într-o conexiune serie este conectarea componentelor de la un capăt la altul într-o linie dreaptă.

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.

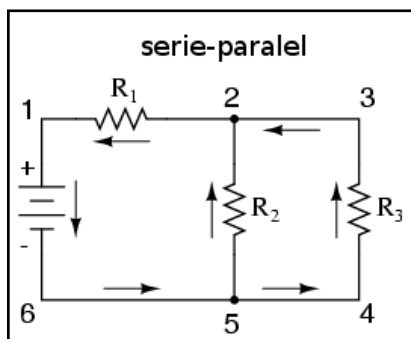


Caracteristica definitorie pentru un circuit paralel este faptul că toate componentele sunt conectate electric între aceleași seturi de puncte. În circuitul de mai sus, punctele 1, 2, 3 și 4 sunt toate comune din punct de vedere electric. La fel și punctele 8, 7, 6 și 5. Toate rezistoarele, precum și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

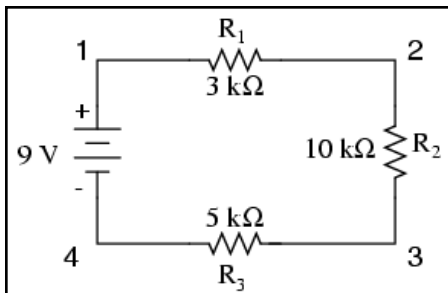
Cele două tipuri de configurații, serie și paralel, prezintă proprietăți electrice total diferite.

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:

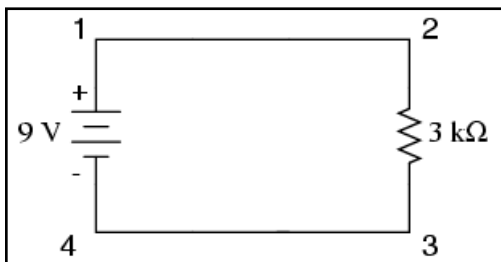


Primul principiu pe care trebuie să-l înțelegem legat de circuitele serie este păstrarea constantă a valorii curentului în întreg circuitul, și prin urmare, prin fiecare component (prin fiecare component va trece aceeași cantitate de curent electric). Acest lucru se datorează existenței unei singure 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?



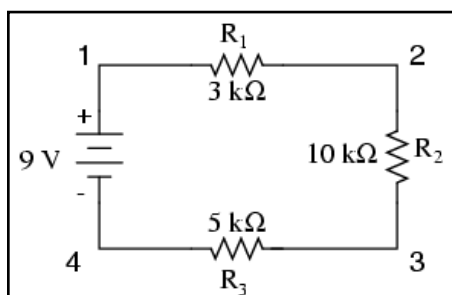
Un principiu important de ținut minte legat de legea lui Ohm, este relația dintre tensiune, curent și rezistență între aceleași două puncte din circuit. De exemplu, în cazul unei singure baterii și a unui singur rezistor în circuit, putem calcula foarte ușor valorile curentului, pentru că acestea se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

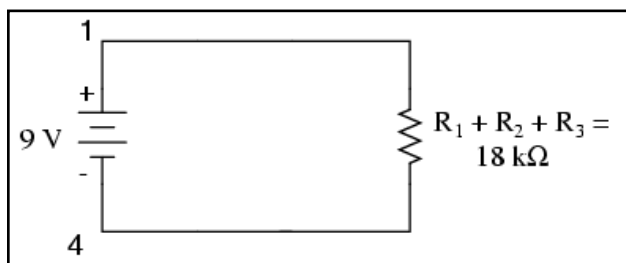
Cu această observație putem enunța al doilea principiu al circuitelor serie: în oricare circuit serie, rezistența totală a circuitului este egală cu suma rezistențelor individuale a fiecărui rezistor, prin urmare, cu cât avem mai multe rezistențe în circuit, cu atât mai greu le va fi electronilor să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

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

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

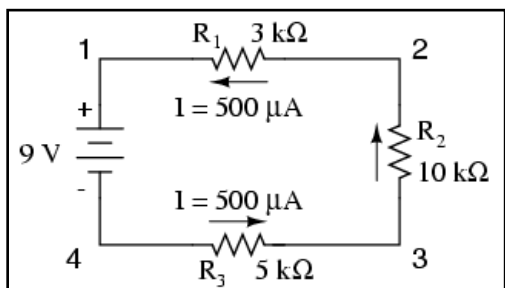
$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 = 3 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega = 18 \text{ k}\Omega$$

Ceea ce am făcut de fapt, a fost să calculăm rezistența echivalentă a rezistorilor de 3 kΩ, 10 kΩ și 5 kΩ 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 kΩ):

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



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:

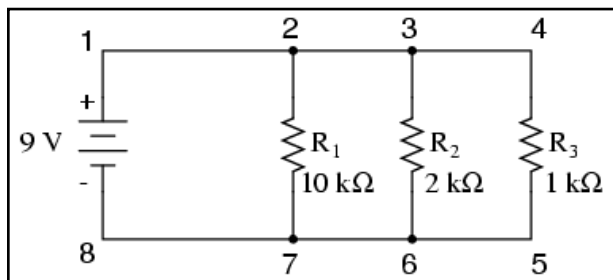
$$E_{total} = E_1 + E_2 + \dots + E_n$$

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:

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

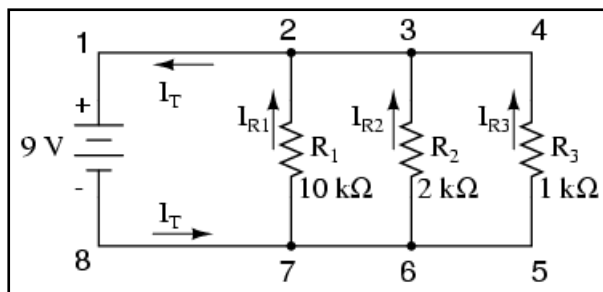
$$I_{R2} = \frac{E_{R2}}{R_2} = \frac{9\text{ V}}{2\text{ k}\Omega} = 4,5\text{ mA}$$

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

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 Ω : 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: $G=1/R$

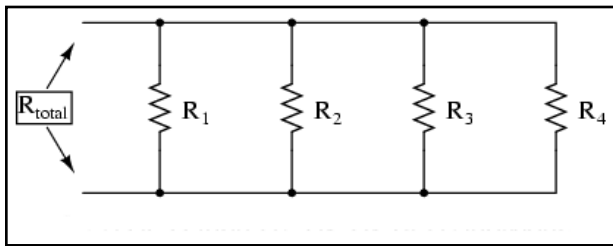
Conductanța reprezintă inversa rezistenței

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.

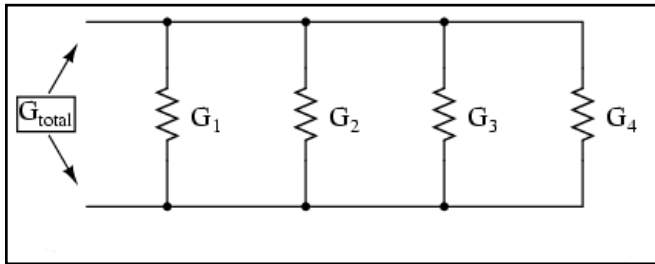


Întorcându-ne la circuitul paralel studiat, putem vedea că existența mai multor ramuri în circuit reduce rezistența totală a circuitului, pentru că electronii sunt capabili să curgă mult mai ușor prin circuit atunci când există mai multe ramuri decât atunci când există doar una.

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 ₁	R ₂	R ₃	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					Ω
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)

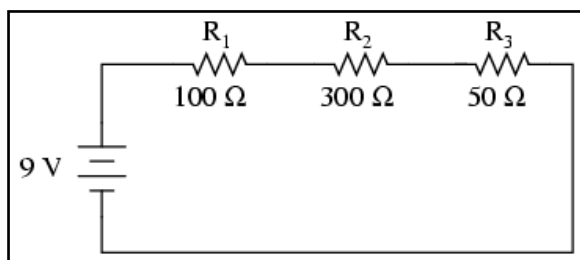
- Defectarea rezistorilor constă cel mai adesea în deschiderea acestora, nu în scurt-circuitarea lor, iar acest lucru nu se întâmplă decât dacă sunt supuși unui stres fizic sau electric peste limitele normale de funcționare

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

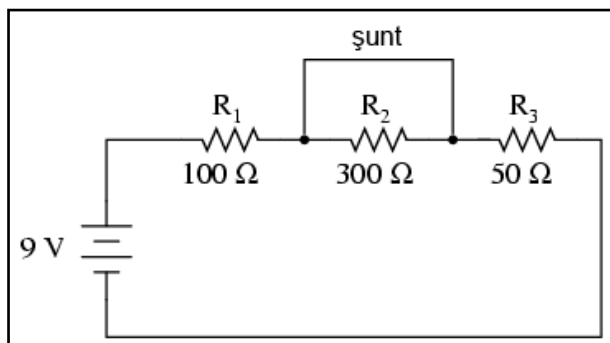


Să considerăm circuitul alăturat.

Mărime	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	Ω

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



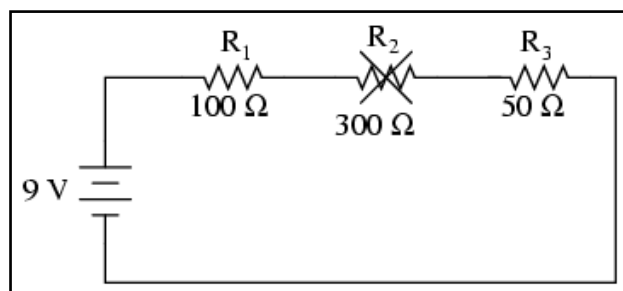
Să presupunem acum că rezistorul R_2 este scurt-circuitat; acest lucru înseamnă de fapt că, în locul rezistorului avem un simplu fir ce prezintă o rezistență aproape nulă. Practic, în circuitul alăturat, spunem că am realizat o șuntare a rezistorului R_2 iar firul utilizat poartă numele de conductor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

Mărimie	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	Ω

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

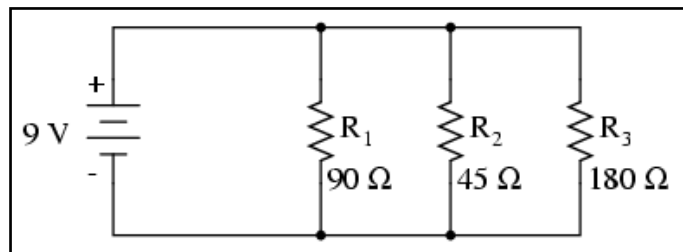


Pe de altă parte, dacă defectul suferit de rezistorul R_2 este de așa natură încât circuitul va rămâne deschis în acel punct - rezistența dintre cele două capete libere ale conductorilor rămași crește practic spre infinit - efectele asupra circuitului inițial vor fi diferite, dar la fel de radicale.

Mărimie	R_1	R_2	R_3	Total	Unitate
E	0	9	0	9	V
I	0	0	0	0	A
R	100	∞	50	∞	Ω

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

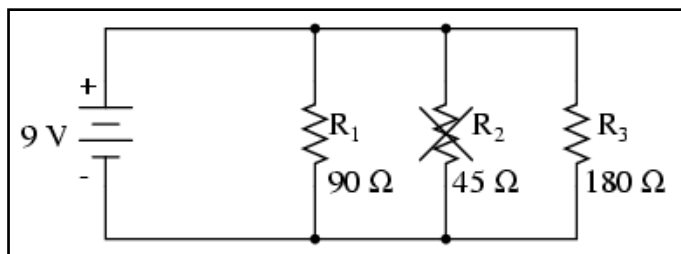


Putem aplica aceleași metode și în cazul unui circuit paralel.

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	Ω

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

Înlăturarea rezistorului



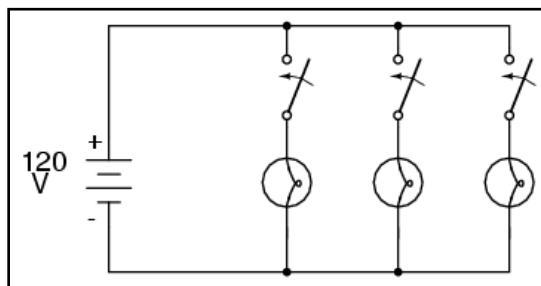
Să presupunem acum deschiderea rezistenței R_2 în acest circuit paralel.

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	Ω

Efectele acestui defect le putem observa în tabelul alăturat.

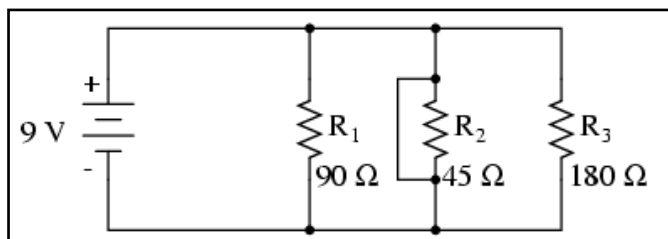
În cazul acestui circuit paralel, deschiderea unei ramuri afectează doar curentul prin acea ramură precum și curentul total din circuit. Căderea de tensiune, fiind egală pe toate componentele va rămâne neschimbată pe toți rezistorii.

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



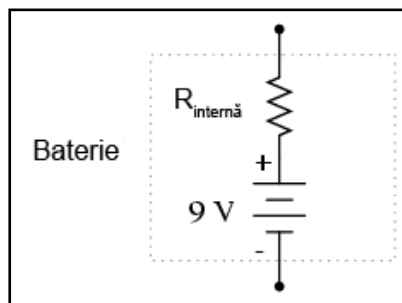
observa din exemplul alăturat.

Mărime	R_1	R_2	R_3	Total	Unitate
E	9	9	9	9	V
I	100 m	∞	50 m	∞	A
R	90	0	180	0	Ω

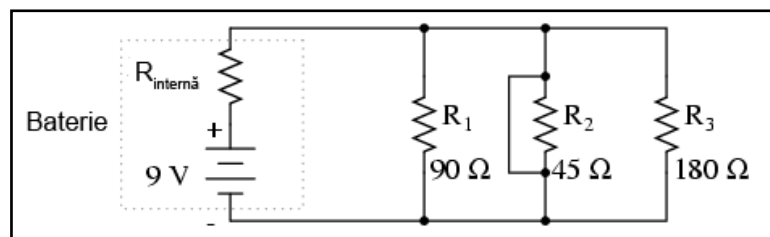
Un rezistor scurt-circuitat (rezistența de 0Ω) va permite, teoretic, trecerea unui curent infinit de la orice sursă finită de tensiune ($I = E / 0$). În acest caz, rezistența nulă a rezistorului R_2 descrește rezistența totală a circuitului la zero Ω , ducând la creșterea valorii curentului spre infinit.

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_1	R_2	R_3	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.

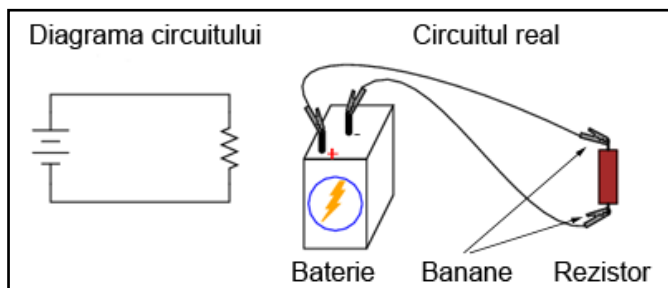
8. Realizarea practică a circuitelor simple

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

Scop

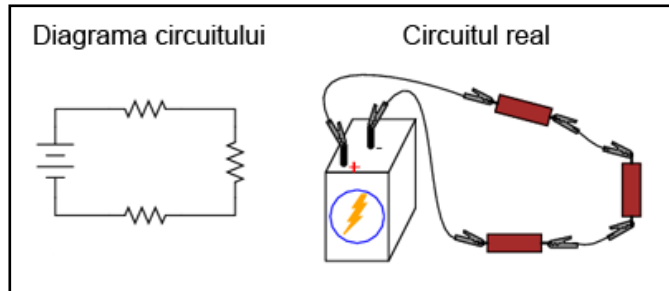
Pe măsura studierii circuitelor electrice, vom dori probabil la un moment dat să construim propriile circuite utilizând baterii și rezistori (becuri, de exemplu). Există câteva opțiuni pentru realizarea acestor circuite, unele mai simple decât altele, opțiuni pe care le vom prezenta în acest capitol.

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.

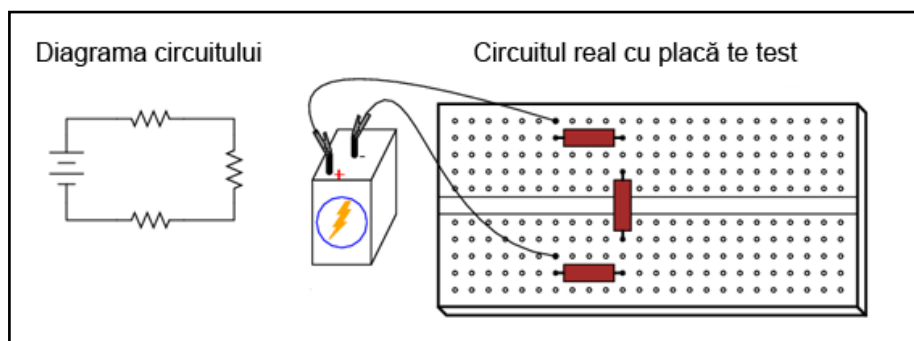


Dacă am dori să realizăm un circuit simplu cu o baterie și trei rezistori, putem utiliza aceeași metodă de conectare a conductorilor.

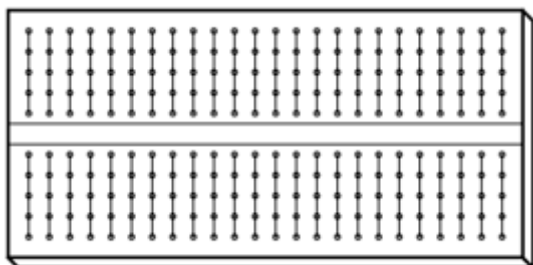
Placa electronică de test



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.



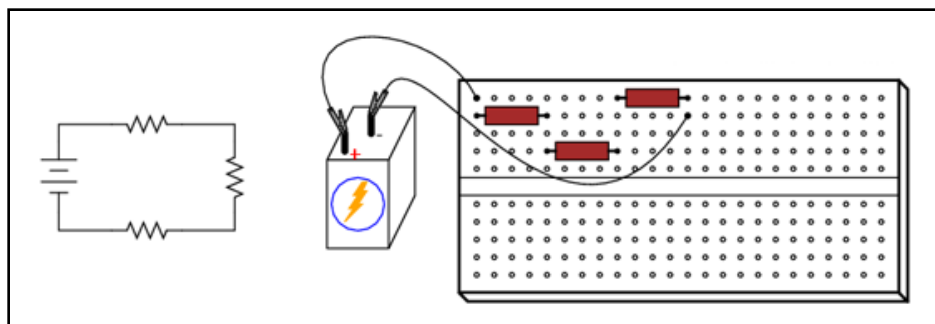
Alăturat este un exemplu de circuit realizat cu ajutorul plăcii de test.



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

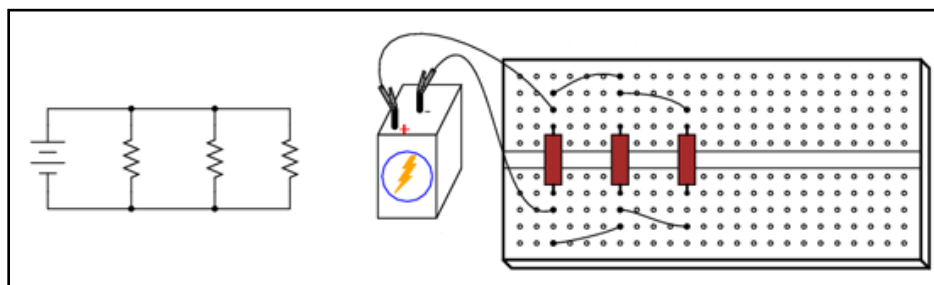
vertical între ele, conform figurii alăturată.

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 alăturată.

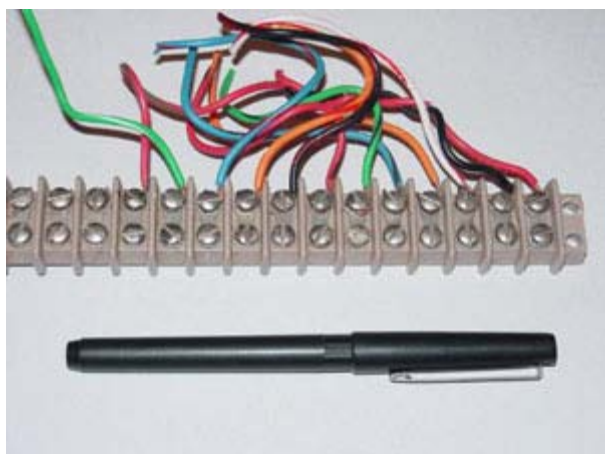
Un alt exemplu, de această dată a unui circuit paralel cu trei rezistori, este prezentat în figura alăturată.



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

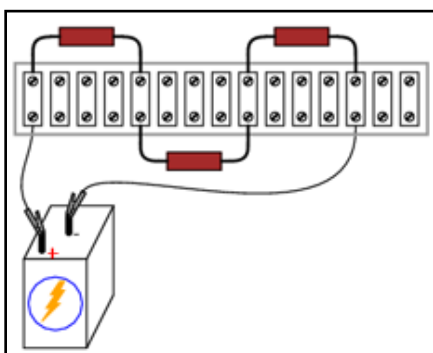
O metodă alternativă constă în utilizarea unei reglete de conexiuni (regletă de borne). Acestea sunt compuse dintr-un material izolator prevăzut cu spații metalice pentru prinderea conductorilor cu ajutorul unor șuruburi; acest procedeu este similar modului de conectare al prizelor sau întrerupătoarelor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



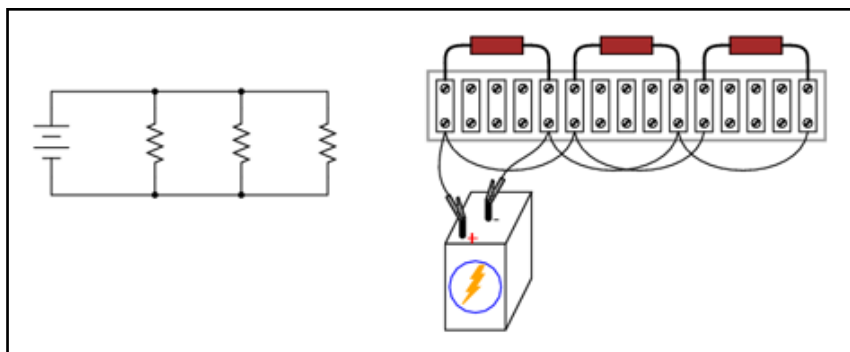
În figura alăturată, este prezentat un circuit serie compus dintr-o singură baterie și trei rezistori folosind o regletă de conexiuni.

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

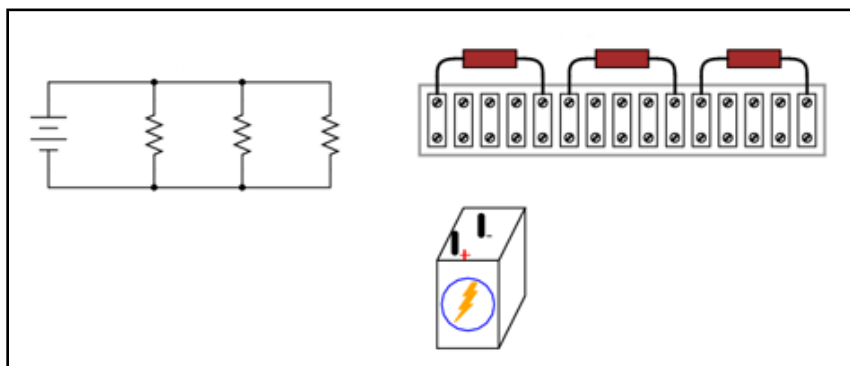
Una dintre deprinderile esențiale ale celor care vor să pună în practică lecțiile învățate despre circuitele electrice și electronice, este „traducerea” unei diagrame într-un circuit real. Diagramele circuitelor sunt de obicei

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

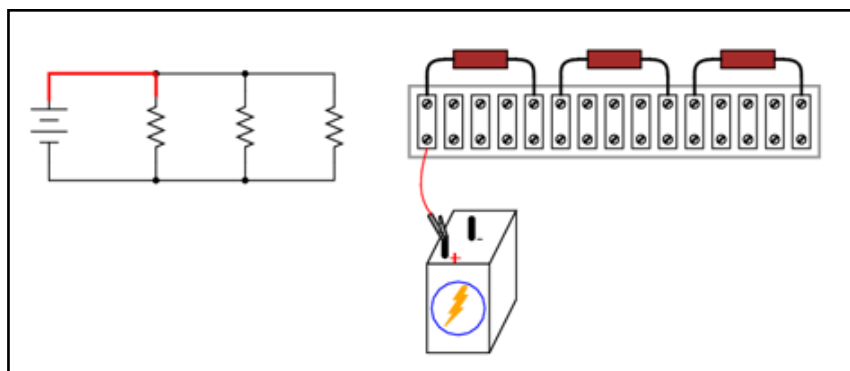


Să luăm ca și exemplu un circuit paralel format dintr-o singură baterie și trei rezistori.

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.



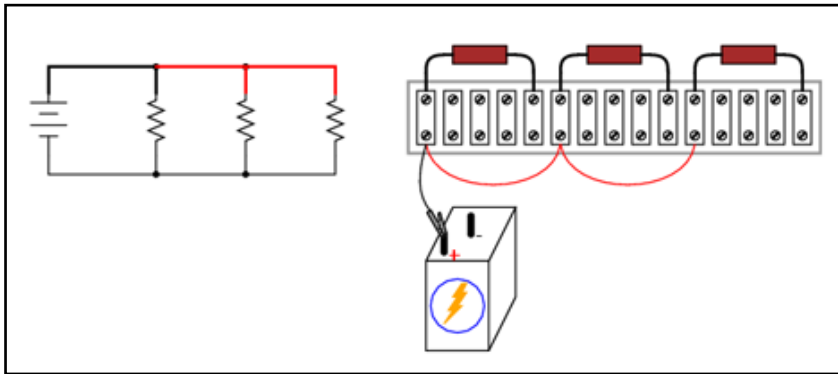
Pentru început, considerăm diagrama inițială a circuitului și toate componentele prinse pe regleta de conexiuni dar fără niciun conductor electric între ele.



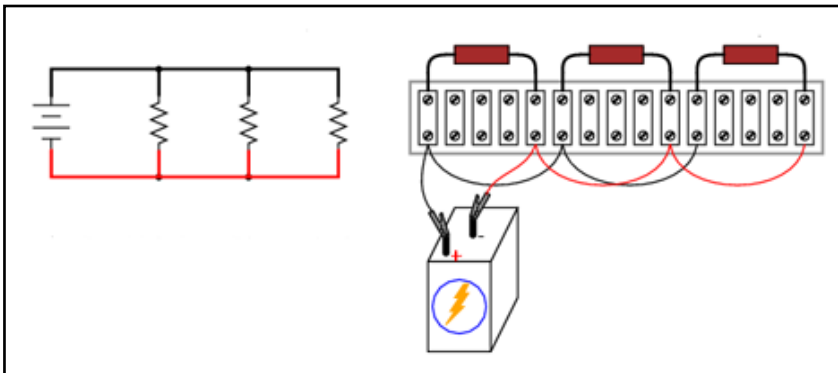
Apoi, urmărim conductorul dinspre terminalul pozitiv al bateriei spre primul component al diagramei, realizând în același timp o legătură fizică, prin intermediul unui conductor, între aceste două puncte pe circuitul real. Dacă ne este mai ușor, putem trasa o linie de o

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.

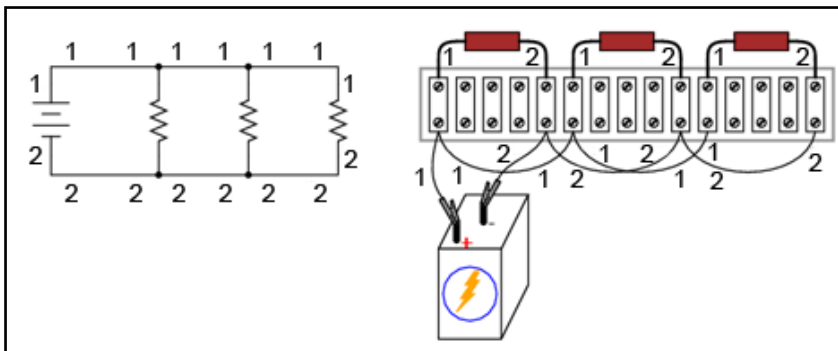


Următorul pas, așadar, constă în conectarea bornelor superioare a celor doi rezistori rămași.

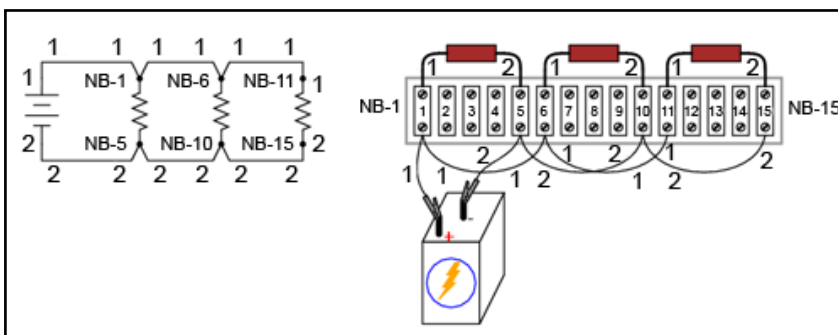


Având toate bornele superioare ale tuturor rezistorilor din circuit conectate la borna pozitivă a bateriei, următorul pas este să conectăm bornele inferioare ale acestora la borna negativă a bateriei.

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.

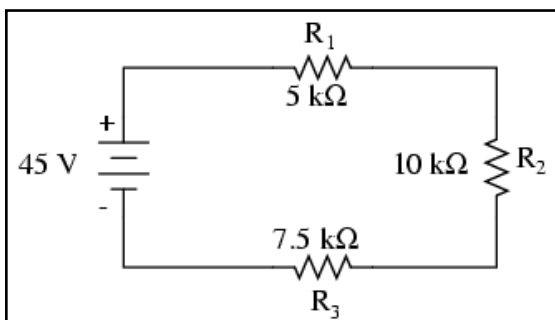
Pentru circuite permanente, se pot folosi plăci imprimate, un subiect destul de vast în ale cărui detalii nu vom intra aici.

06 - Circuite divizoare și legile lui Kirchhoff

1. Circuite divizoare de tensiune

- Circuitele serie proporționează, 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.

Mărime	R ₁	R ₂	R ₃	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).

Mărime	R ₁	R ₂	R ₃	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.

Mărime	R ₁	R ₂	R ₃	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	Ω

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	Ω

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

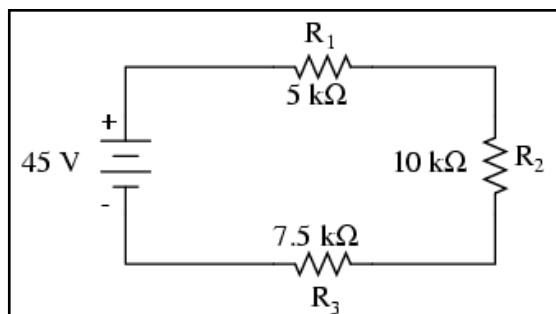
$$E_n = E_{total} \frac{R_n}{R_{total}}$$

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:

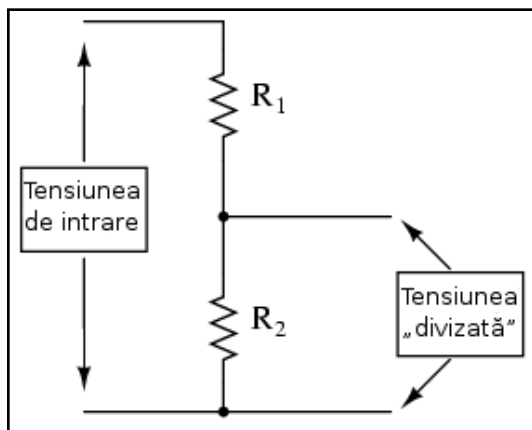


$$E_{R1} = 45 \text{ V} \frac{5 \text{ k}\Omega}{22,5 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ V}$$

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

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

Aplicații

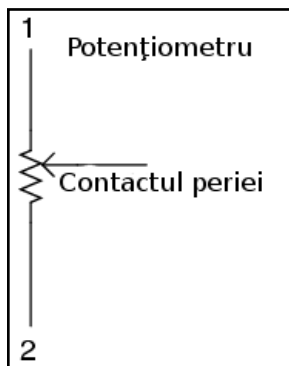


Circuitele divizoare de tensiune se folosesc acolo unde o combinație specifică de rezistori serie este folosită pentru a „diviza” tensiunea în cantități precise (în cazul aparatelor de măsură, de exemplu).

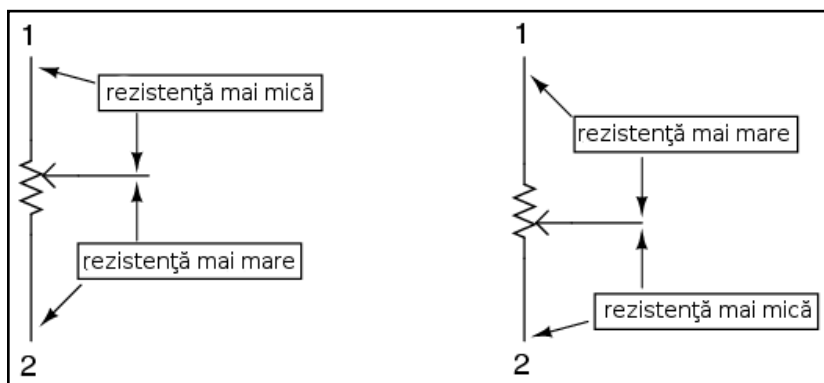
2. Potențiometrul

- Un potențiometrul 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



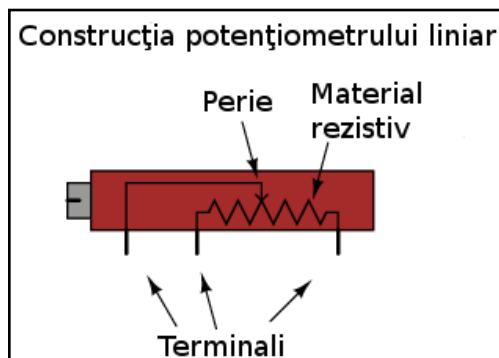
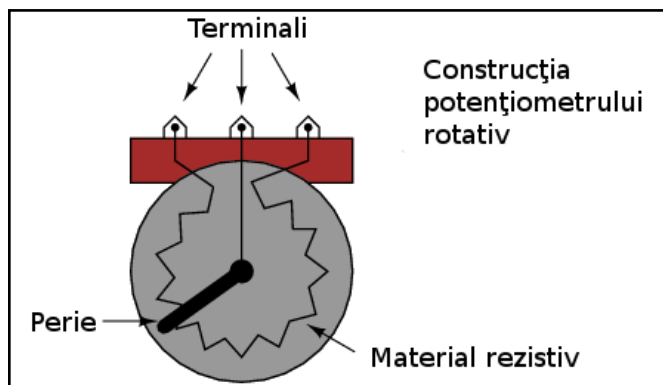
Unul dintre dispozitivele folosite frecvent ca și divizor de tensiune este potențiometrul, un rezistor cu un element mobil poziționat cu ajutorul unei manete. Elementul mobil, denumit și perie, face contact cu un material rezistiv dezizolat, în oricare dintre punctele selectate manual.



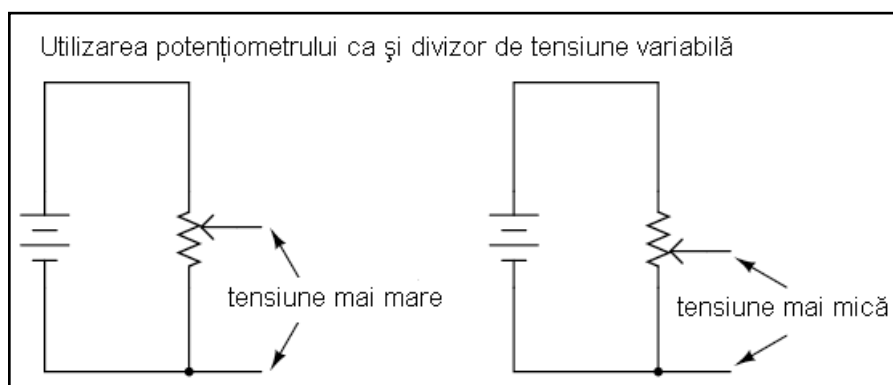
Pe măsură ce contactul periei se apropie de terminalul 1 și se îndepărtează de terminalul 2, rezistența spre terminalul 1 scade iar cea către terminalul 2 crește. Dacă apropiem contactul de terminalul 2, vom obține efectul contrar. Rezistența între cele două puncte (1 și 2) este constantă indiferent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

Potențiometre rotative și potențiometre liniare

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

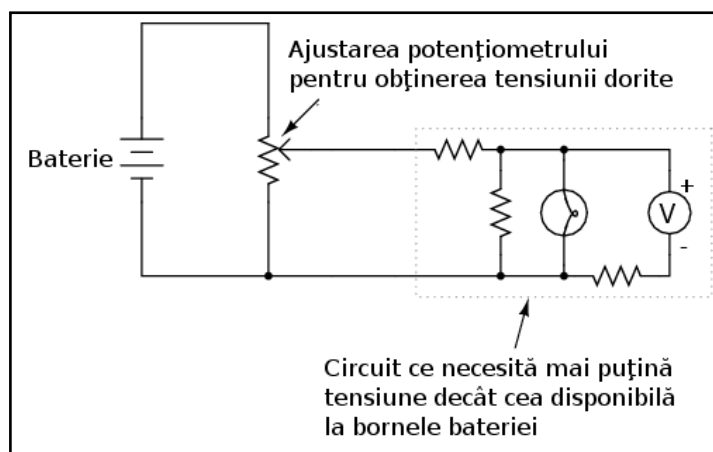


Raportul de divizare



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 potențiomtru acționează precum un divizor variabil de tensiune, iar coeficientul de diviziune este stabilit de poziția periei.

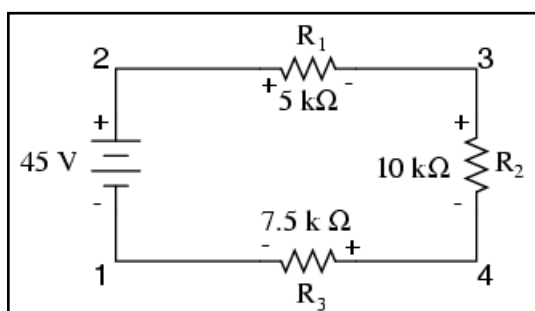
Această aplicație a potențiometrului este una foarte folosită pentru obținerea unei tensiuni variabile cu ajutorul unei surse fixe de tensiune precum bateria.

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

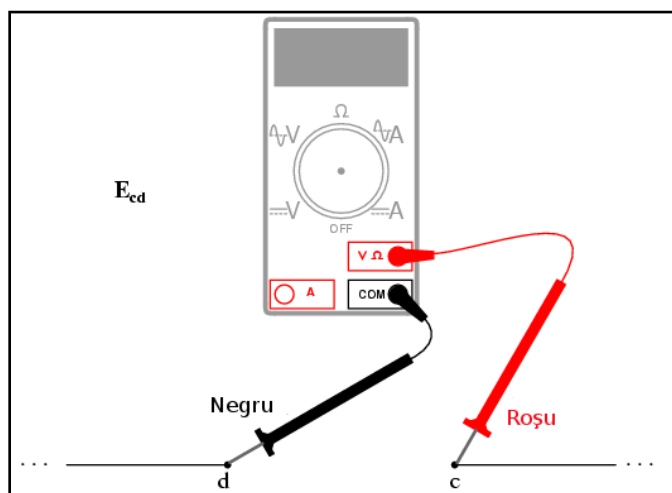
Analiza unui circuit serie simplu



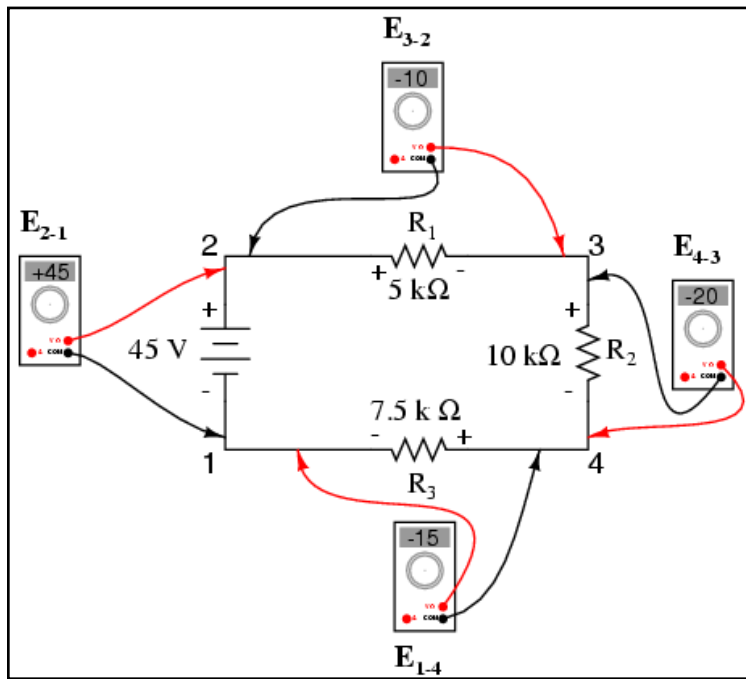
Să luăm un circuit serie cu trei rezistori și să notăm punctele din circuit.

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:

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

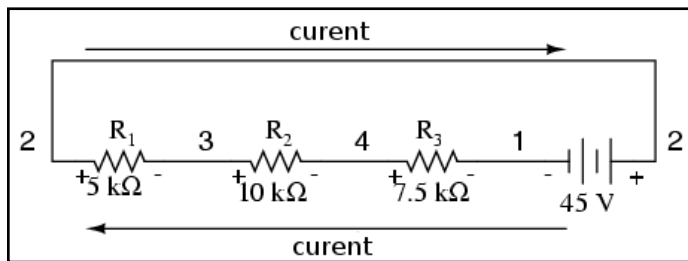
Definiție

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):

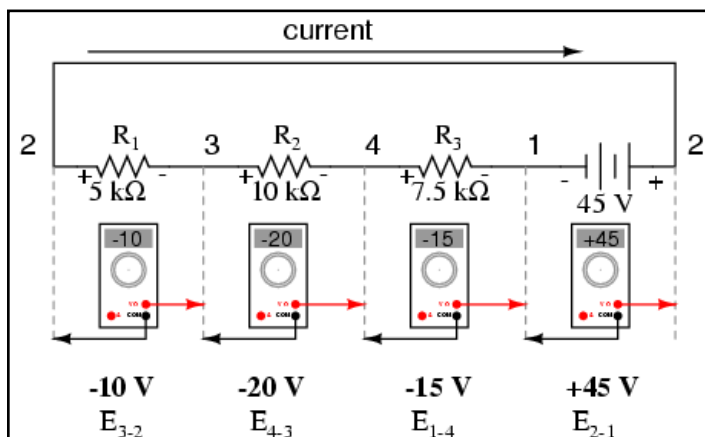
$$E_{2-3} + E_{1-2} + E_{4-1} + E_{3-4} = +10 \text{ V} - 45 \text{ V} + 15 \text{ V} + 20 \text{ V} = 0 \text{ V}$$



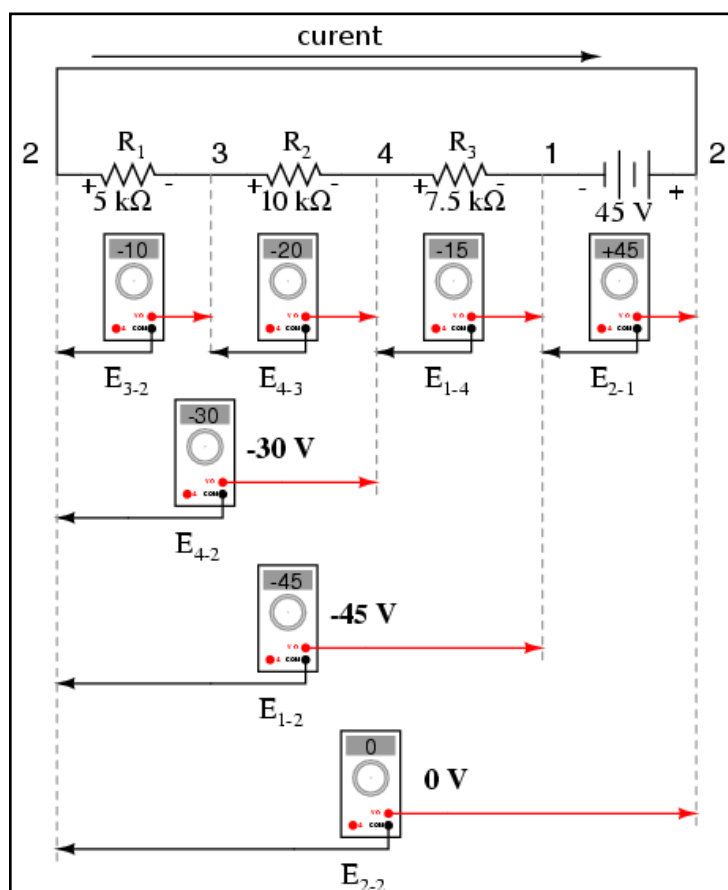
Pentru o mai bună vizualizare, putem redesena circuitul serie de mai sus, astfel încât toate componentele să se regăsească pe aceeași linie dreaptă:

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).



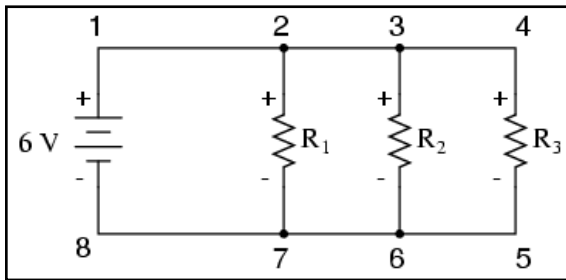
Dacă am fi să luăm același voltmetru pentru a citi căderile de tensiune pentru combinațiile componentelor din circuit începând cu R_1 , putem observa adunarea algebrică a tensiunilor (spre zero).

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



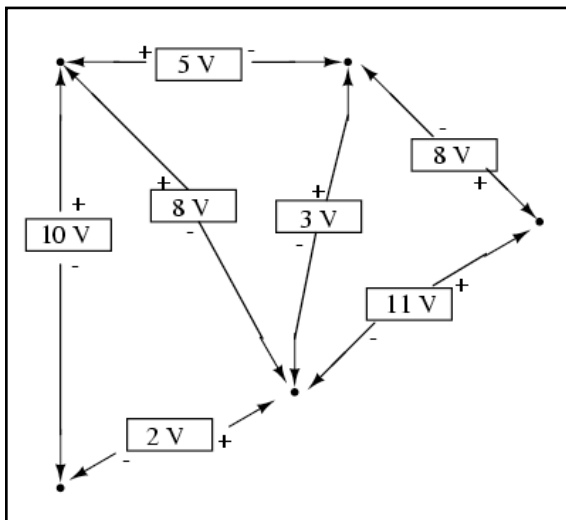
Legea lui Kirchhoff pentru tensiune (prescurtat LKT) funcționează pentru orice configurație a circuitului, nu doar pentru cele serie. Să considerăm prin urmare un circuit paralel simplu.

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



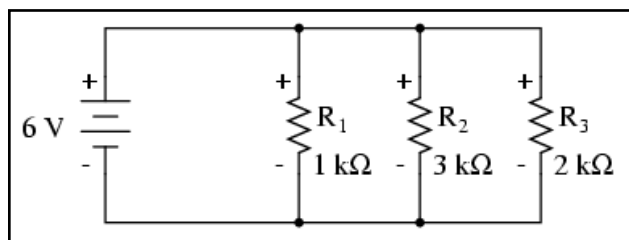
Faptul că acest circuit este paralel și nu serie, nu încurcă cu nimic aplicarea legii lui Kirchhoff pentru tensiune. Din punctul nostru de vedere, întregul circuit ar putea să fie o „cutie neagră” - configurația componentelor să fie complet ascunsă și să avem la dispoziție doar un set de puncte unde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

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		Ω

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		Ω

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	Ω

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	Ω

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

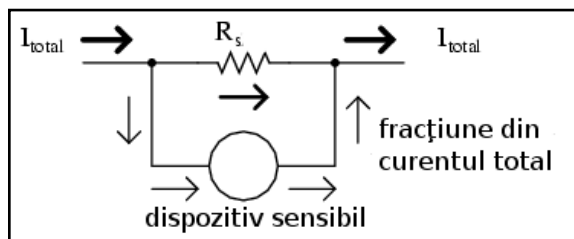
$$E_n = E_{total} \frac{R_n}{R_{total}} - \text{formula divizorului de tensiune}$$

$$I_n = I_{total} \frac{R_{total}}{R_n} - \text{formula divizorului de curent}$$

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



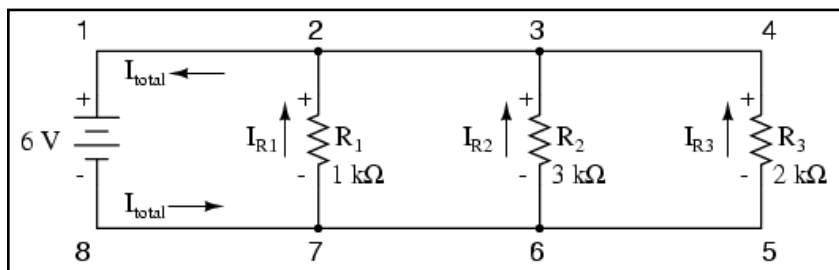
Circuitele divizoare de curent își găsesc aplicație (de exemplu) în circuitele de măsură, acolo unde o fracție din curentul de măsurat trebuie să fie redirecționat spre un dispozitiv sensibil de

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

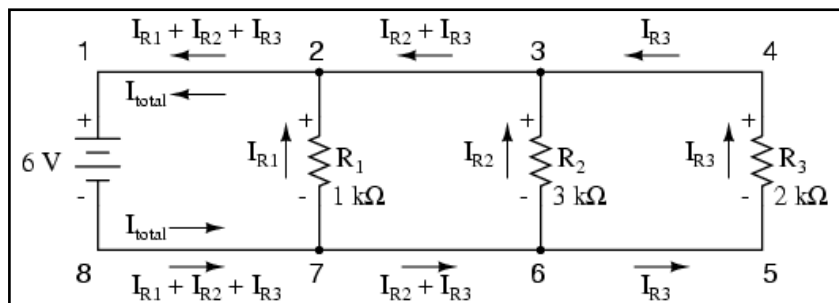
Analiza unui circuit paralel simplu



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	Ω

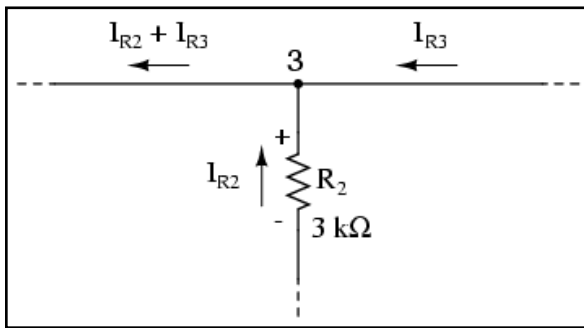
Calculând toate valorile tensiunilor și curenților din acest circuit, obținem tabelul alăturat.



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:

$$I_2 + I_3 + I = 0$$

$$2 \text{ mA} + 3 \text{ mA} + I = 0$$

$$I = -2 \text{ mA} - 3 \text{ mA} = -5 \text{ mA}$$

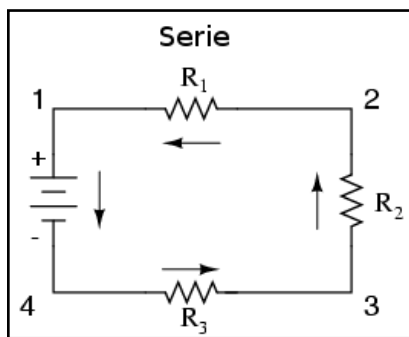
Semnul negativ (-) pentru valoarea de 5 mA ne spune faptul că, curentul iese din acest nod, în contradicție cu cei doi curenți de 2 mA și 3 mA ce sunt cu semnul pozitiv (+), și prin urmare intră în nod. Cele două notații („+” și „-”) pentru intrarea, respectiv ieșirea curentului din nod sunt pur arbitrare, atâta timp cât reprezintă semne diferite pentru direcții diferite și prin urmare putem aplica legea lui Kirchhoff pentru curenți.

07 - Circuite serie-paralel combinate

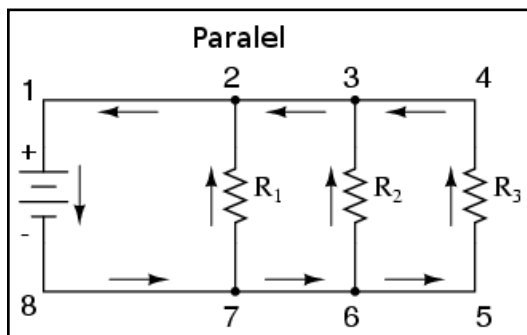
1. Ce este un circuit serie-paralel

- 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



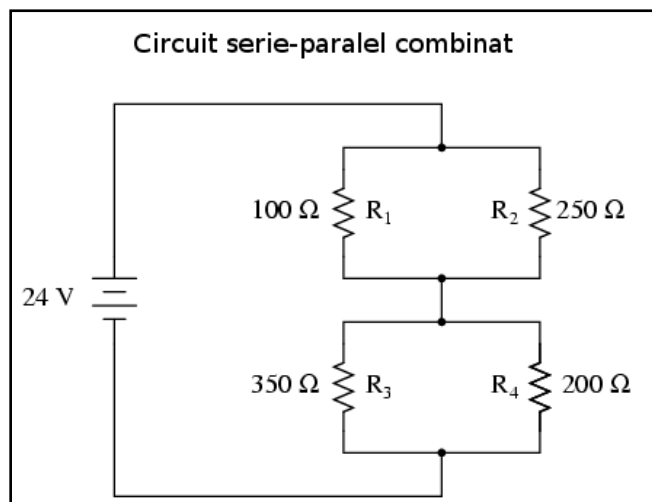
În cazul circuitelor serie simple, toate componentele sunt legate cap la cap și formează o singură cale pentru curgerea electronilor prin circuit.



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		Ω

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 conexiunilor 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

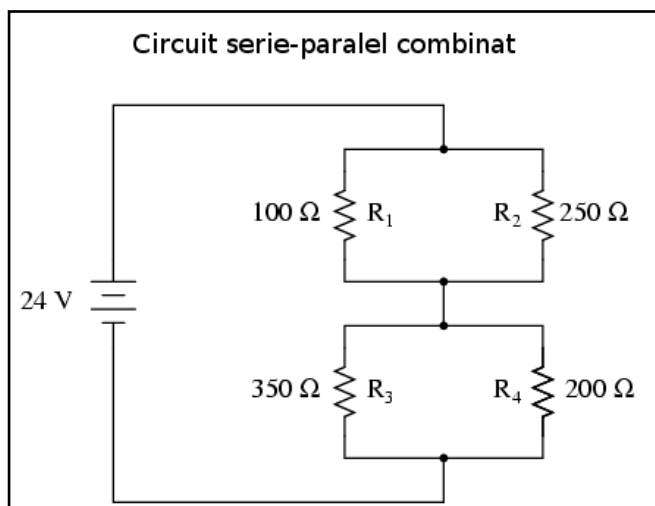
Pașii necesari pentru rezolvarea unui circuit serie-paralel

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

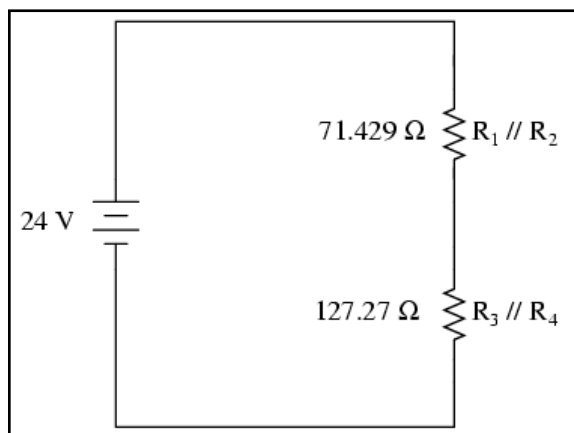
Deși sună destul de complicat, vom înțelege întregul proces mult mai ușor dacă luăm un exemplu practic:



Mărimă	R_1	R_2	R_3	R_4	Total	Unitate
E					24	V
I						A
R	100	250	350	200		Ω

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:



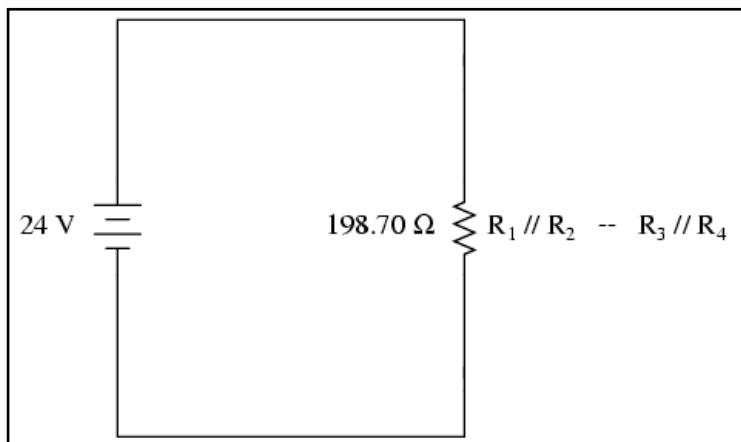
Simbolul (//) este folosit pentru a reprezenta faptul că valoarea celor două rezistoare a fost obținută cu ajutorul formulei $1/(1/R)$. Rezistorul de 71.429Ω de sus este echivalentul celor doi rezistori R_1 și R_2 legați în paralel. Rezistorul de 127.27Ω de jos este echivalentul celor doi rezistori R_3 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		Ω

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 198.7Ω . 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”.



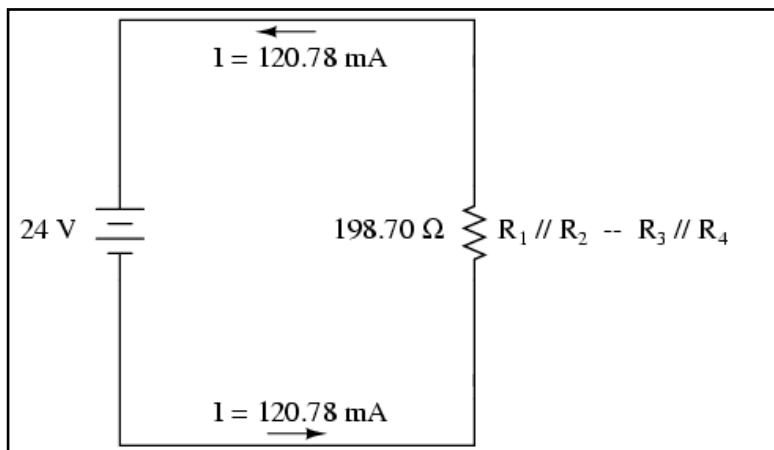
Mărimē	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁ // R ₂	R ₃ // R ₄	R ₁ // R ₂ -- R ₃ // R ₄ (Total)	Unitate
E							24	V
I								A
R	100	250	350	200	71,429	127,27	198,70	Ω

Determinarea curentului total din circuit

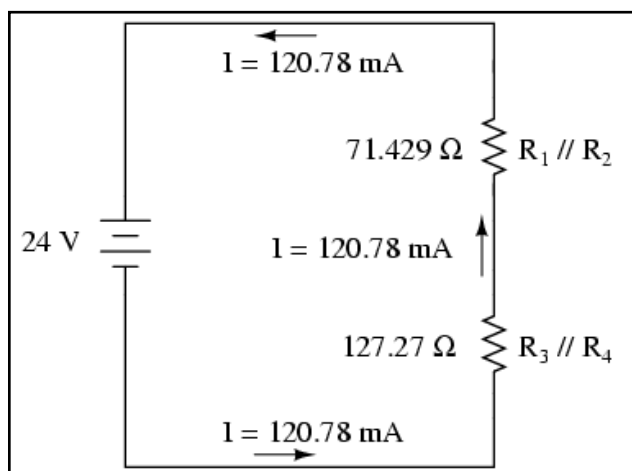
În acest moment, putem folosi legea lui Ohm ($I = E / R$) pentru determinarea curentului total prin circuit și completarea coloanei corespunzătoare din tabel:

Mărimē	R 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	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.

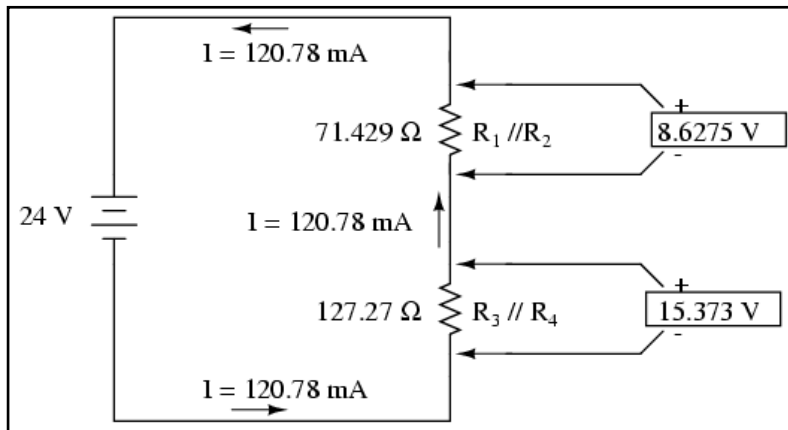
Valoarea curentului prin ambele seturi de rezistori echivalenți este aceeași

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:

Mărimă	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	Ω

Determinarea căderilor de tensiune pe fiecare grup echivalent

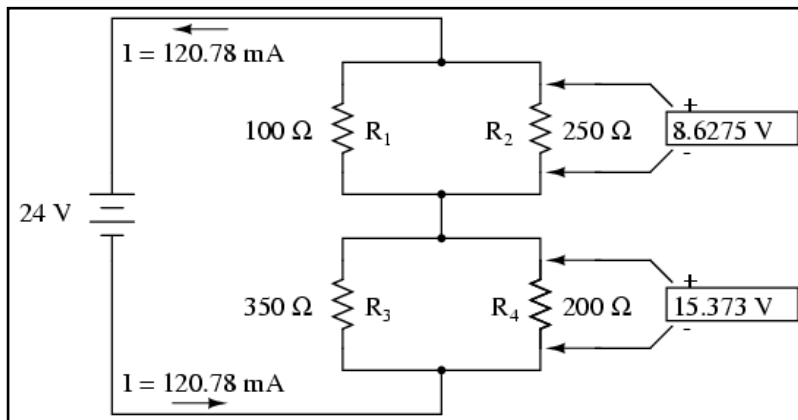
Cunoscând curentul prin rezistențele echivalente $R_1//R_2$ și $R_3//R_4$, putem aplica legea lui Ohm ($E=IR$) pentru aflarea căderilor de tensiune pentru fiecare grup în parte, completând și tabelul:



Mărimă	R 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	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:



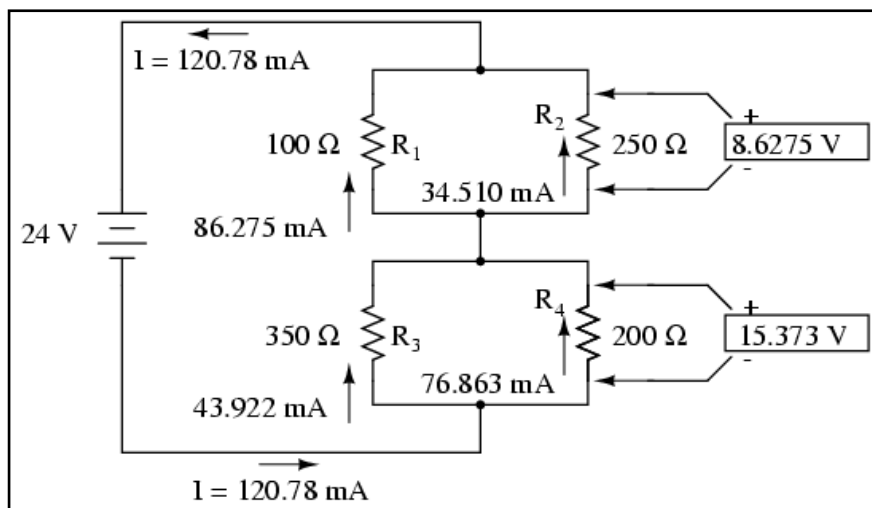
Mărimă	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₁ // R ₂	R ₃ // R ₄	R ₁ // R ₂ -- R ₃ // R ₄ (Total)	Unitate
E	8,6275	8,6275	15,373	15,373	8,6275	15,373	24	V
I					120,78	120,78	120,78	A
R	100	250	350	200	71,429	127,27	198,70	Ω

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	Ω

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.

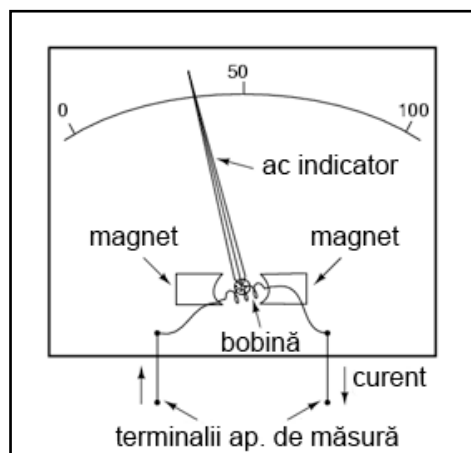
Galvanometrul



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

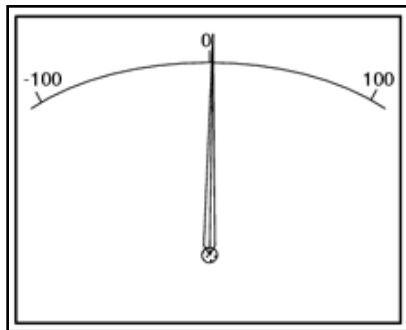


Aparatele de măsură electromagnetice sunt realizate în prezent dintr-o bobină suspendată într-un câmp magnetic, protejată de majoritatea influențelor externe. Astfel de dispozitive sunt cunoscute sub numele de aparate de măsură cu magnet permanent.

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.

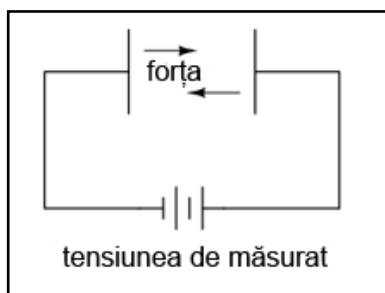


Majoritatea aparatelor pot detecta polaritatea curentului, o direcție a acestuia ducând la deplasarea acului într-un anumit sens, iar direcția opusă a curentului ducând la o deplasare în sens contrar al acului indicator. Modele D'Arsonval și Weston sunt de acest tip.

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.

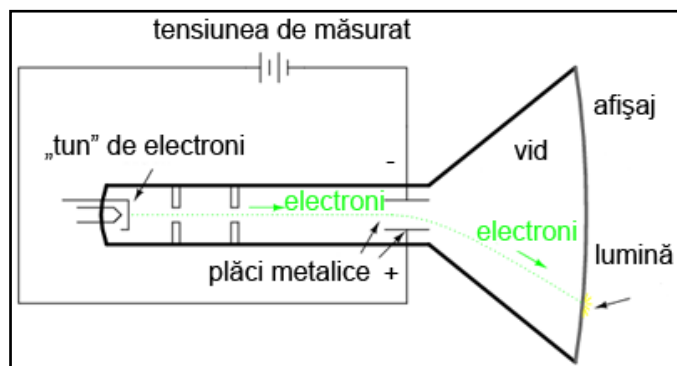


Dacă aplicăm o tensiune între două suprafețe conductoare separate printr-un dielectric format din aer, va exista o forță fizică de atracție între cele două suprafețe, forța capabilă să indice valoarea tensiunii. Această forță este direct proporțională cu tensiunea aplicată între plăci și invers proporțională 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.

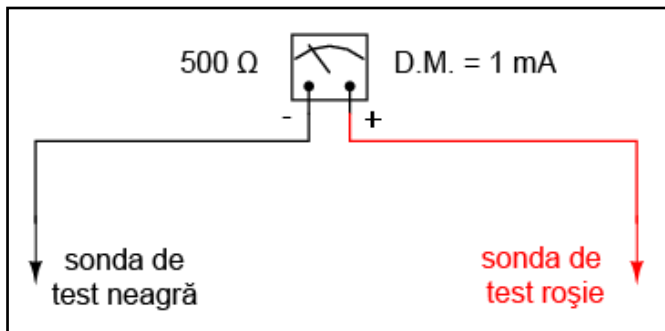
02. Voltmetrul

- 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:

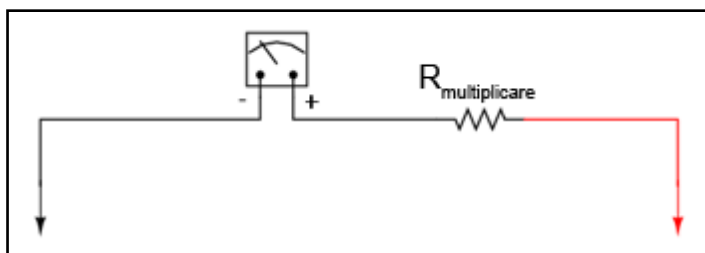
$$E = IR$$

$$E = (1\ \text{mA})(500\ \Omega)$$

$$E = 0,5\ \text{V}$$

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 Ω) să poată măsura tensiuni de până la 10 V.

Mărime	Deplasare	$R_{\text{multiplicare}}$	Total	Unitate
E				V
I				A
R				Ω

Putem folosi metoda tabelului pentru a ne ușura calculele.

Mărime	Deplasare	$R_{\text{multiplicare}}$	Total	Unitate
E			10	V
I	1 m	1 m	1 m	A
R	500			Ω

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.

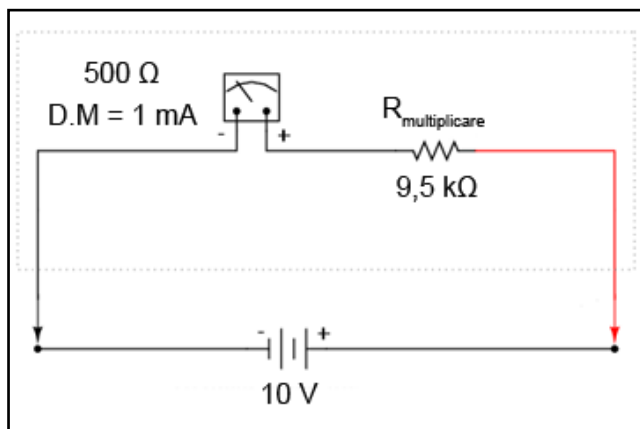
Mărime	Deplasare	$R_{\text{multiplicare}}$	Total	Unitate
E			10	V
I	1 m	1 m	1 m	A
R	500	9,5 k	10 k	Ω

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	0,5	9.5	10	V
I	1 m	1 m	1 m	A
R	500	9,5 k	10 k	Ω

Ultimul pas constă în aplicarea legii lui Ohm ($R = E / I$) pentru determinarea rezistenței rezistorului de multiplicare.



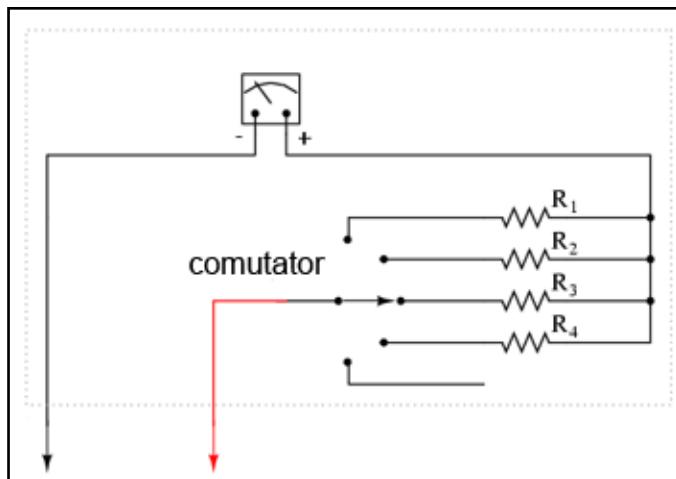
Indiferent de metoda folosită, răspunsul final este același (9,5 kΩ). Putem aplica ambele metode, pentru a ne asigura că rezultatul final este corect.

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.

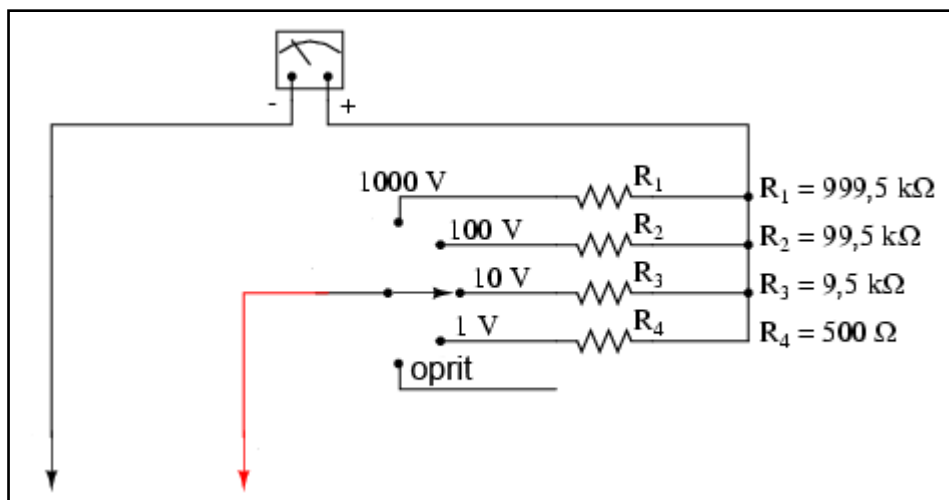
Acesta este într-adevăr și modul de realizare și utilizare al aparatelor de măsură: dispozitivul de detectare al mărimii de măsurat este construit astfel încât să fie necesară doar o cantitate foarte mică de tensiune și de curent pentru funcționarea acestuia, pentru o sensibilitatea cât mai ridicată. 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

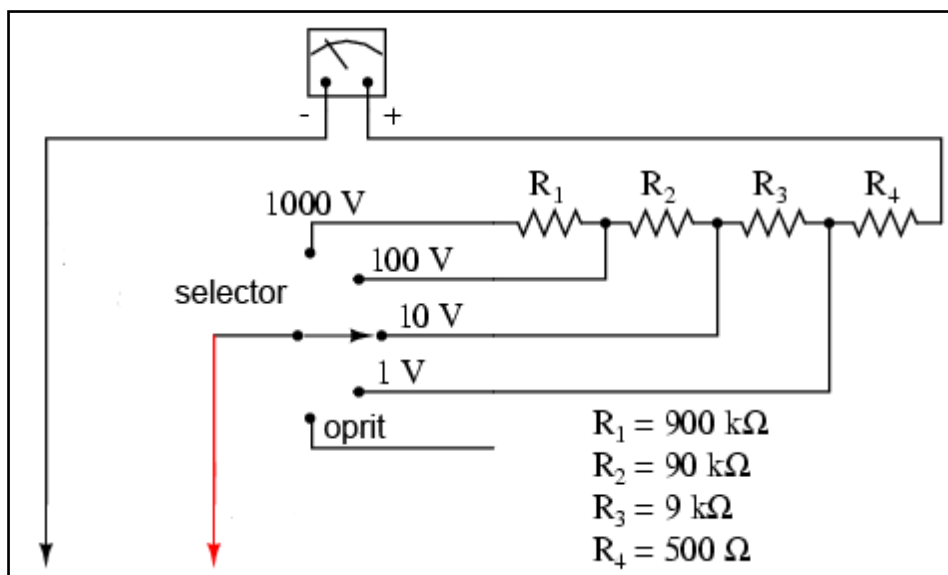


În general, este foarte utilă prezența mai multor astfel de circuite divizoare, pentru a putea măsura o plajă destul de largă de valori folosind același mecanism de bază pentru detectarea semnalului. Acest lucru se poate realiza printr-un comutator multi-polar și câțiva rezistori de multiplicare, fiecare 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

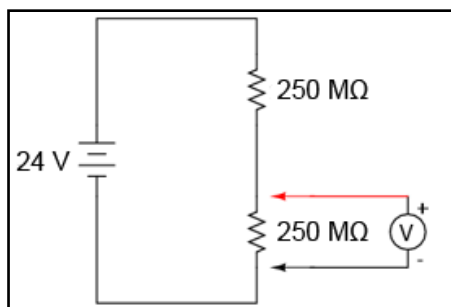
- Un voltmetru ideal posedă o rezistență internă infinită
- Un detector de nul este un dispozitiv pentru determinarea curenților și a tensiunilor. Acesta se evidențiază prin sensibilitatea sa extrem de ridicată

Voltmetrul ideal și voltmetrul real

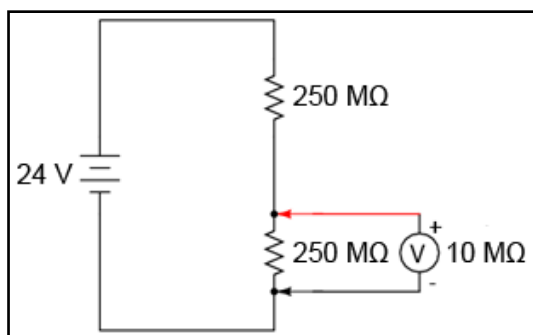
Orice aparat de măsură introdus în circuit modifică comportamentul acestuia din urmă într-o oarecare măsură. Deși impactul este inevitabil, acesta poate fi minimizat printr-o proiectare bună a aparatului de măsură în cauză.

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!

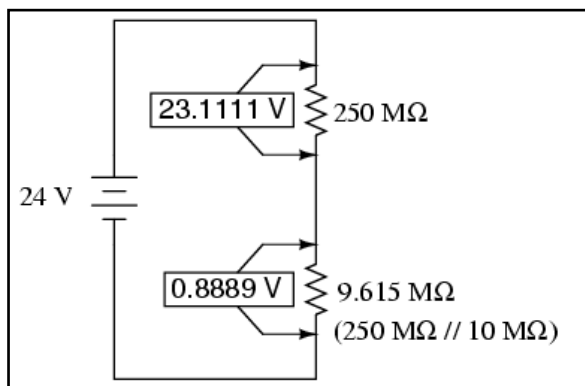
Efectul voltmetrului asupra circuitului; exemplu



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~~ 10 M (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.

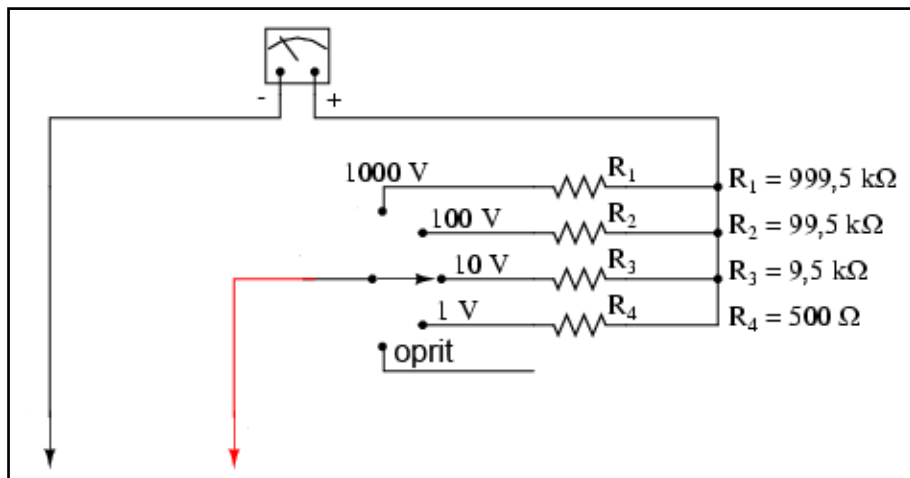
Un divizor de tensiune cu rezistențele de 250 MΩ, respectiv 9,61 MΩ va diviza o tensiune de 24 V în 23,11 V, respectiv 0,88 V. Din moment ce voltmetrul face parte din rezistența de 9,61 MΩ aceasta este și valoarea pe care o va indica: 0,88 V.

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: $10 \text{ k}\Omega / 10 \text{ V} = 1 \text{ k}\Omega / \text{V}$

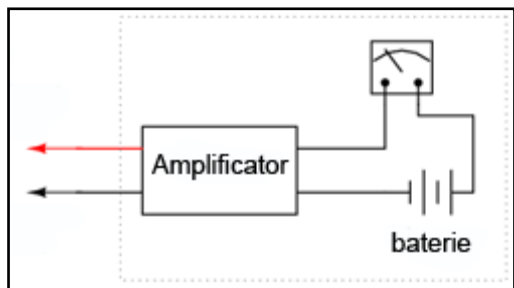
domeniul 1 V; sensibilitatea: $1 \text{ k}\Omega / 1 \text{ V} = 1 \text{ k}\Omega / \text{V}$

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

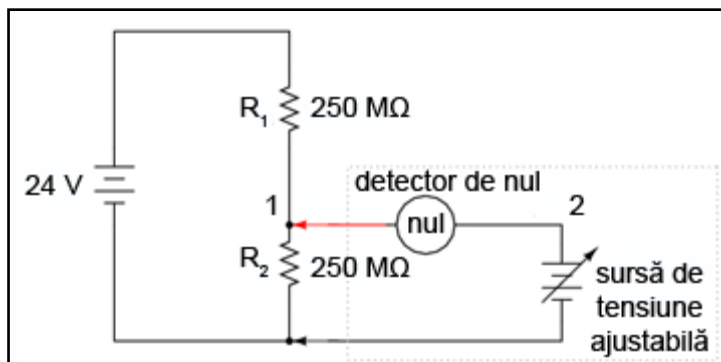


O altă modalitate constă în amplificarea electronică a curentului necesar deplasării, astfel încât curentul ce este absorbit de către aparat din circuit să fie cât mai mic. Acest tip de circuit electronic poartă numele de amplificator.

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.



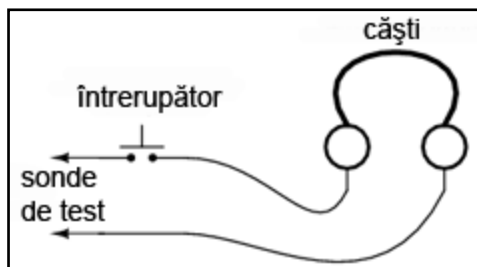
Într-un detector de nul, o sursă de tensiune de precizie, ajustabilă, este comparată cu tensiunea de măsurat iar aparatul indică diferența de tensiune dintre cele două. În cazul în care indicația este zero (nulă), căderea de tensiune din circuitul de test este egală cu tensiunea sursei de tensiune de 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.

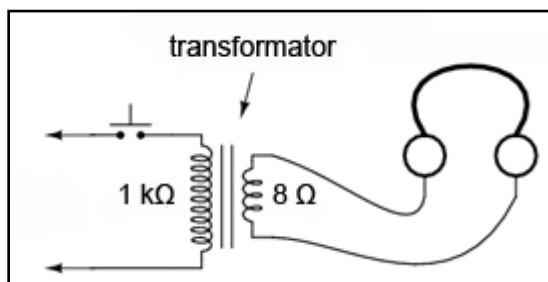
Deoarece scopul unui detector de nul este indicarea precisă a condiției de zero (volți), și nu indicarea unei valori specifice diferite de zero, scala de valori folosită este irelevantă. Aceste dispozitive sunt proiectate a fi cât mai sensibile cu putință.

Detector de nul realizat cu căști audio

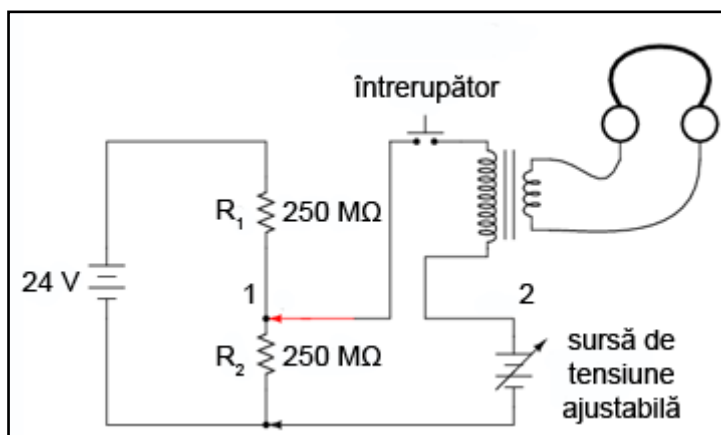
Un detector de nul extrem de simplu constă dintr-un set de căști, utilizând difuzoarele pe post de „ac indicator”. Dacă aplicăm o tensiune de c.c. unui difuzor, curentul rezultat va deplasa conul acestuia, iar difuzorul va produce un „clic” scurt. Un alt „clic” se poate auzi la deconectarea sursei de c.c.



Luând în considerare acest principiu, un detector de nul sensibil poate fi realizat dintr-o simplă pereche de căști și un întrerupător.

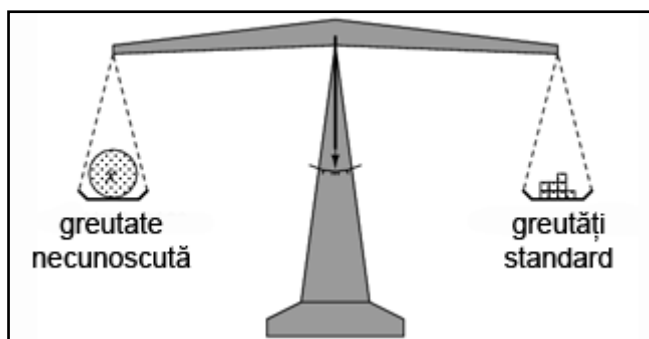


Dacă folosim o pereche de căști de $\text{8 } \Omega$, sensibilitatea aparatului poate fi crescută prin conectarea sa la un transformator coborâtor de tensiune. La închidere/deschiderea întrerupătorului, curentul mic de la intrare va avea o valoare mult mai mare la ieșirea transformatorului. Rezultatul este un „clic” mai puternic și mai ușor de sesizat, chiar și pentru curenți mult mai mici.



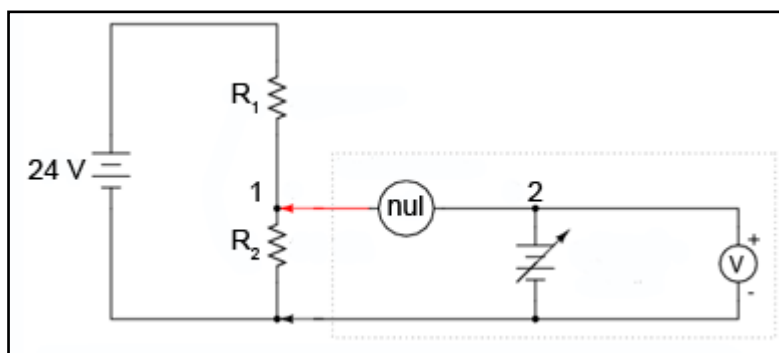
Conectat în circuitul cu detector de nul prezentat mai sus, configurația arată precum în figura alăturată.

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 Ω/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 detectarea 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

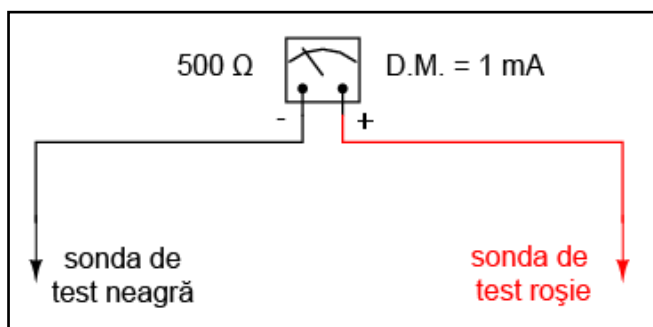
Definiție

Un aparat de măsură conceput special pentru măsurarea valorii curentului electric (în amperi), poartă numele de ampermetru.

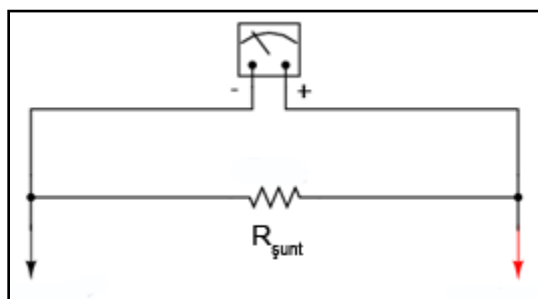
Introducerea rezistorilor de șunt

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			Ω

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			Ω

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			Ω

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			Ω

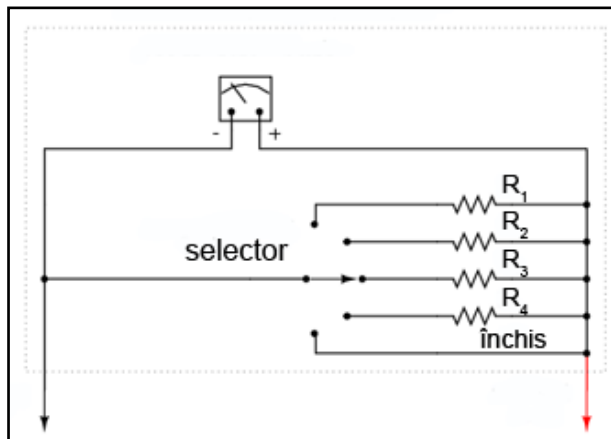
Știm de asemenea ca prin șunt, curentul trebuie să fie egal cu diferența dintre curentul total (5 A) și curentul deplasării (1 mA), datorită adunării curenților de ramuri în configurația paralel.

Mărime	Deplasare	$R_{\text{șunt}}$	Total	Unitate
E	0,5	0,5	0,5	V
I	1 m	4,99	5	A
R	500	100,02 m		Ω

Aplicând apoi legea lui Ohm ($R = E / I$), determinăm rezistența de șunt necesară.

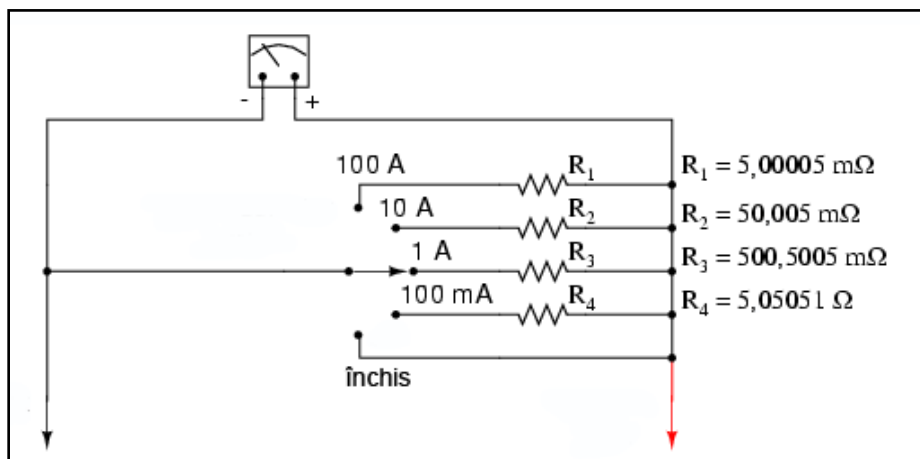
Desigur, în realitate, rezistența de șunt se regăsește în interiorul aparatului de măsură.

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 Ω).



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:

$$P_{R1} = \frac{E^2}{R_1} = \frac{0,5^2}{5,00005} = 50 \text{ W}$$

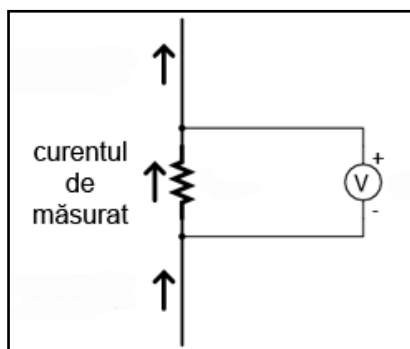
$$P_{R2} = \frac{E^2}{R_2} = \frac{0,5^2}{50,005} = 5 \text{ W}$$

$$P_{R3} = \frac{E^2}{R_3} = \frac{0,5^2}{500,5} = 0,5 \text{ W}$$

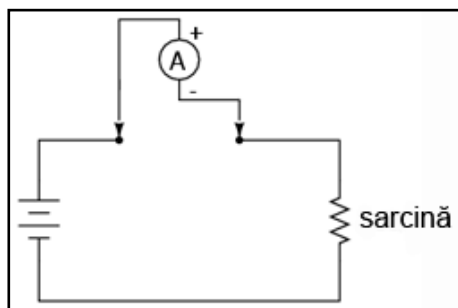
$$P_{R4} = \frac{E^2}{R_4} = \frac{0,5^2}{5,05} = 49,5 \text{ mW}$$

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



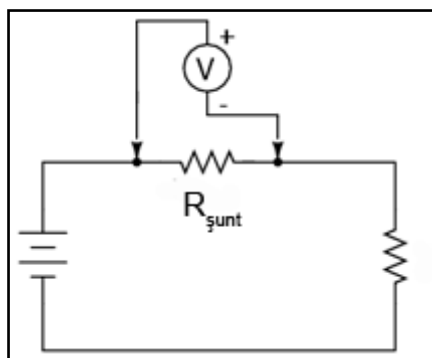
În unele cazuri, rezistorii de șunt sunt utilizați în combinație cu voltmetre cu rezistența de intrare ridicată pentru măsurarea curentilor. Curentul prin voltmetru va fi suficient de mic pentru a-l putea neglija, iar rezistența de șunt poate fi dimensionată în funcție de numărul de volți sau milivolți 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 Ω , 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.

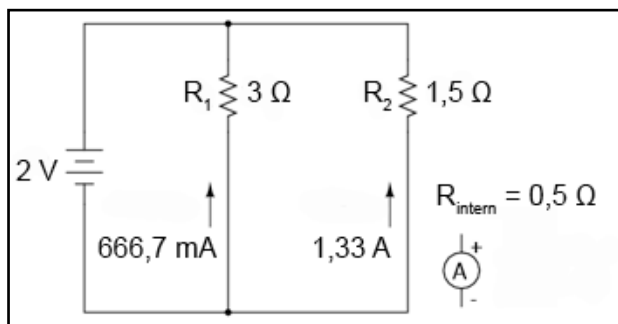
05. Impactul ampermetrului asupra circuitului

- Rezistența unui ampermetru ideal este zero
- Un clampmetru măsoară valoarea curentului prin determinarea câmpului magnetic din jurul conductorului

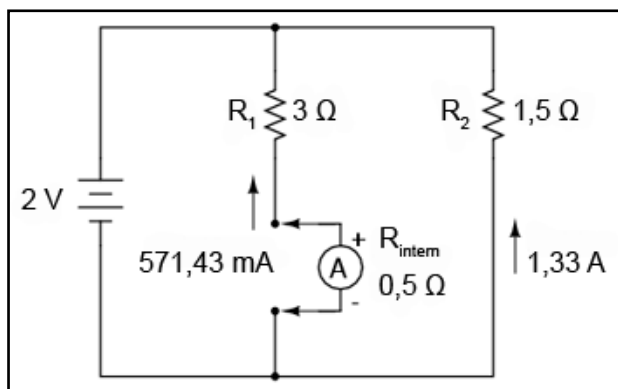
Ampermetrul ideal

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).

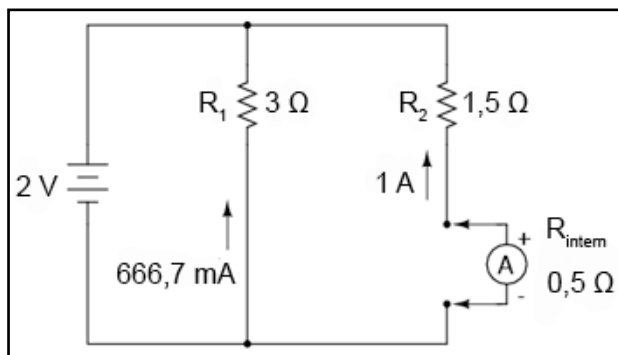
Efectul ampermetrului asupra circuitului; exemplu



Să vedem un exemplu pentru identificarea efectelor unui ampermetru asupra circuitului. Atunci când ampermetrul nu este introdus în circuit, curentul prin rezistorul de 3Ω este de 666,7 mA, iar curentul prin rezistorul de $1,5\Omega$ este de 1,33 A.



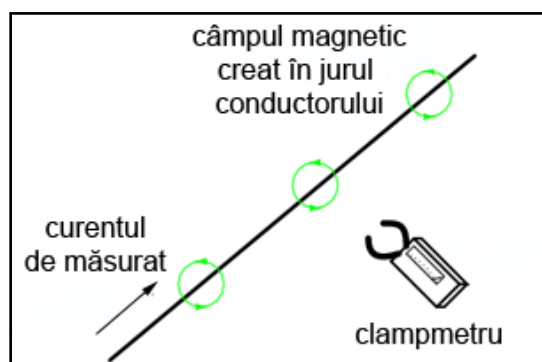
Dacă ampermetrul cu care efectuăm măsurătorile are o rezistență internă de $0,5\Omega$, introducerea acestuia într-una din ramurile circuitului va afecta puternic circuitul. Modificând practic rezistența ramurii din stânga de 3Ω la $3,5\Omega$, ampermetrul va indica un curent de 571,43 mA în loc de 666,7 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.

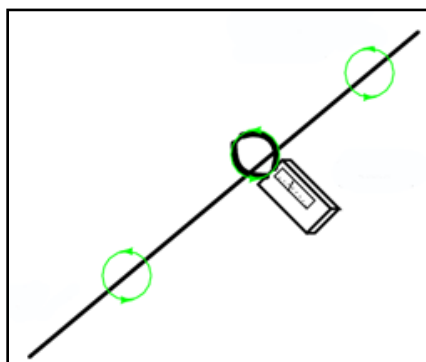
La utilizarea ampermetrelor standard, ce se conectează în serie cu circuitul de măsurat, reproiectarea aparatului pentru o rezistență mai mică între cele două terminale, nu este practică sau poate chiar imposibilă. Totuși, dacă măsurăm curentul cu ajutorul unui voltmetru și a unui rezistor de șunt, cel 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

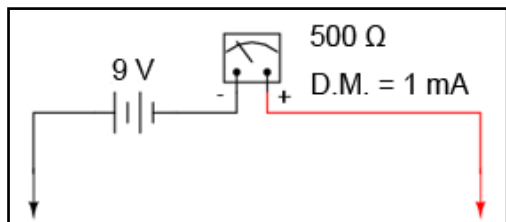
Scopul ohmmetrului

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.

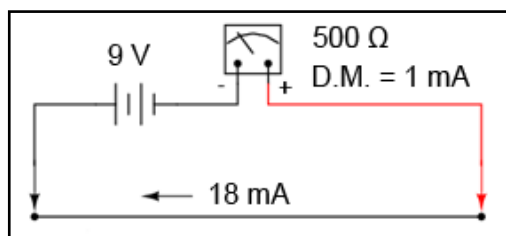
Realizarea unui ohmmetru simplu

Începem cu un circuit simplu, format din mecanismul de măsură și o baterie:



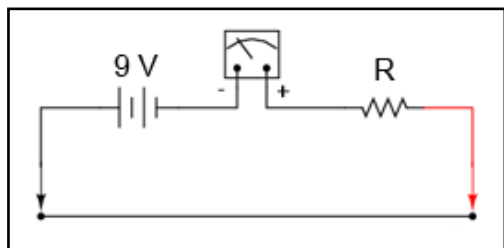
este la stânga scalei. Indicația voltmetrelor și ampermetrelor este chiar inversă.

Dacă sondele acestui ohmmetru sunt conectate împreună (scurt-circuitate, rezistența 0Ω), 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 500Ω , 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 0Ω . 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:

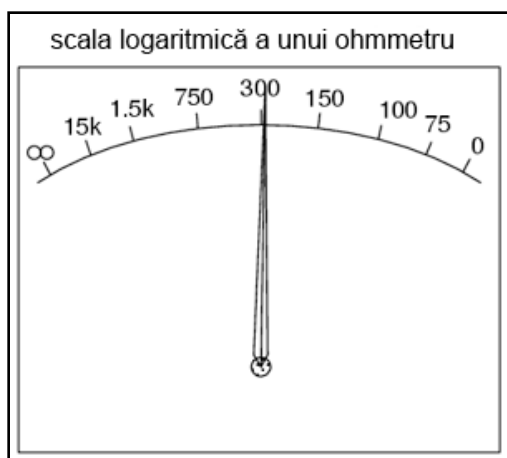
$$R_{total} = \frac{E}{I} = \frac{9\text{ V}}{1\text{ mA}} = 9\text{ k}\Omega$$

$$R = R_{total} - 500\Omega = 8,5\text{ k}\Omega$$

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 μ 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 Ω , 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):

$$R_{total} = \frac{E}{I} = \frac{9 \text{ V}}{250 \mu\text{A}} = 36 \text{ k}\Omega$$

$$R_{test} = R_{total} - R_{intern}$$

$$R_{test} = 36 \text{ k}\Omega - 9 \text{ k}\Omega = 27 \text{ k}\Omega$$

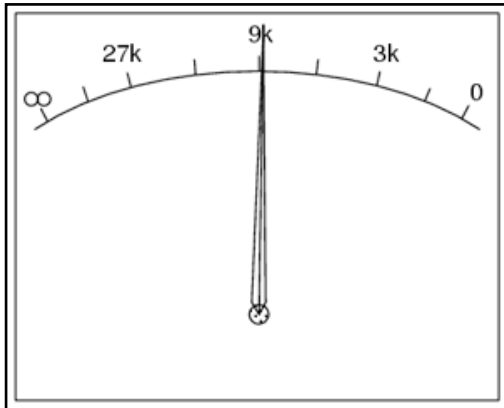
Deplasare la 3/4 (0,75 mA):

$$R_{total} = \frac{E}{I} = \frac{9 \text{ V}}{750 \text{ }\mu\text{A}} = 12 \text{ k}\Omega$$

$$R_{test} = R_{total} - R_{intern}$$

$$R_{test} = 12 \text{ k}\Omega - 9 \text{ k}\Omega = 3 \text{ k}\Omega$$

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 (0Ω). Identic, o rezistența 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

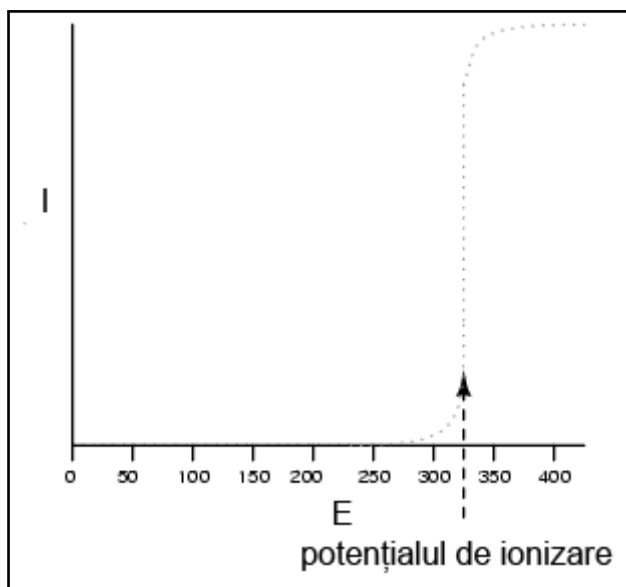
putem măsura rezistența cu un ohmmetru, atunci când circuitul este alimentat (conectat la o sursă de tensiune). Motivul este simplu: indicația precisă a ohmmetrului se bazează pe faptul că singura sursă de tensiune din circuit este propria sa baterie internă. Prezența unei alte căderi de tensiune la 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

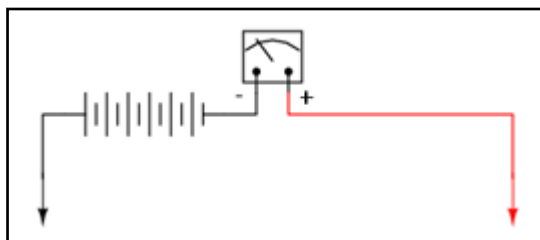
Majoritatea ohmmetrelor de tipul celui prezentat în secțiunea precedentă folosesc o baterie cu o tensiune relativ mică, de 9 V sau chiar mai puțin. Acest lucru este suficient pentru măsurarea rezistențelor cu valori mai mici de câțiva mega-ohmi ($M\Omega$). Pentru a măsura însă rezistențe extrem de mari, 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:

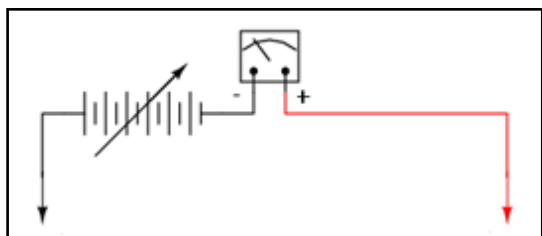


Deși acesta este un exemplu extrem de conducție non-liniară, aceleași proprietăți izolatoare/conductoare se regăsesc și în cazul altor substanțe când sunt supuse tensiunilor înalte. Evident, un ohmmetru echipat cu o baterie de tensiune joasă ca și sursă de putere, nu poate măsura rezistența gazului în 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



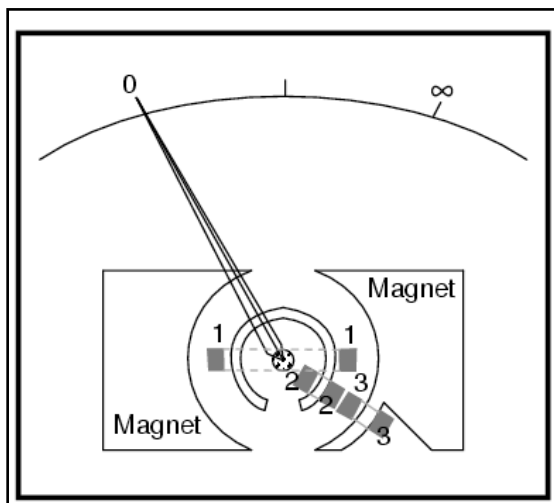
Metoda cea mai directă de măsurare a rezistențelor folosind tensiuni înalte, constă în simpla înlocuire a bateriei, păstrând structura precedentă a ohmmetrului neschimbată.



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:

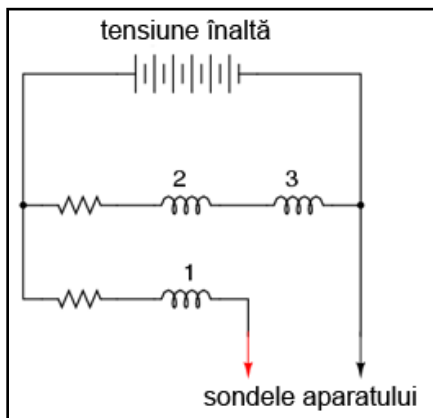
Din păcate, această situație crează o problemă de calibrare a ohmmetrului. Dacă deplasarea acului indicator este maximă cu o anumită valoare a curentului prin aparat, scala aparatului de măsură (în ohmi) se va modifica odată cu variația tensiunii sursei de alimentare. Imaginați-vă că am conecta o rezistență 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

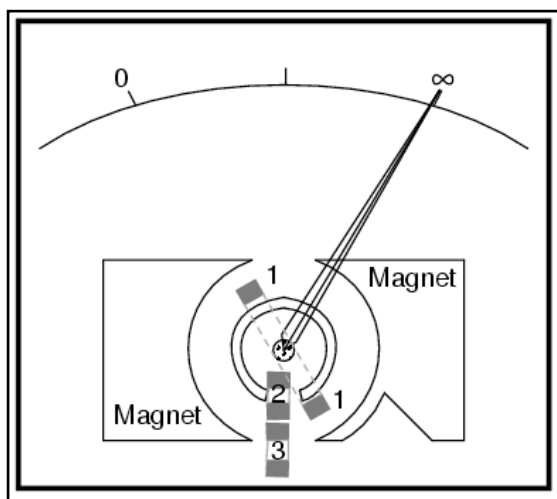


Avem nevoie prin urmare de un sistem electromecanic ce produce o deplasare stabilă, indiferent de rezistența de măsurat și de tensiunea aplicată. Această nevoie poate fi îndeplinită folosind un sistem electromecanic special, sistem tipic megohmmetrelor.

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 Ω .

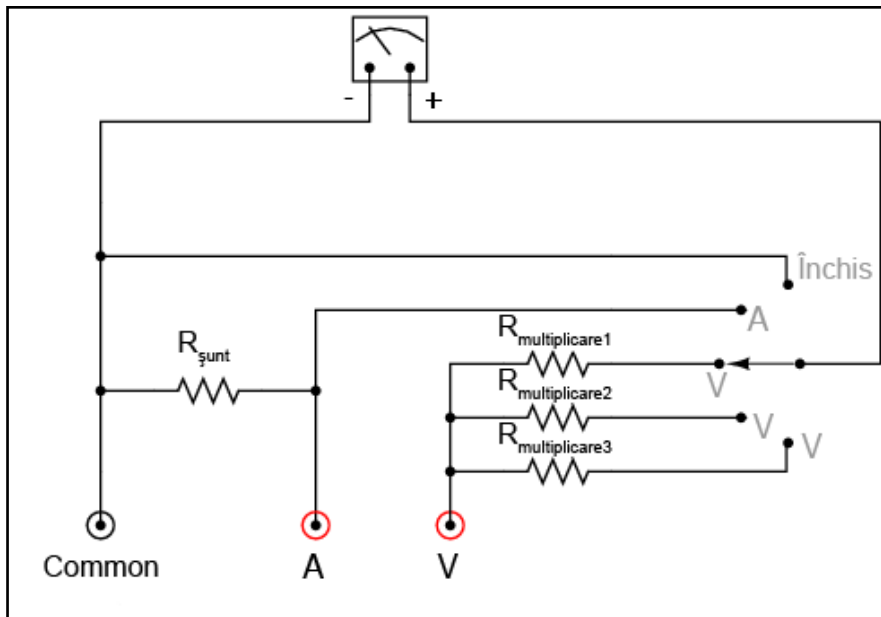
Datorită faptului că orice variație a tensiunii bateriei interne va afecta cuplul generat de *ambele* seturi de bobine (bobinele 2 și 3, ce deplasează acul indicator spre dreapta, și bobina 1 ce deplasează acul spre stânga), aceste variații nu vor avea niciun efect asupra setării deplasării. Cu alte 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:

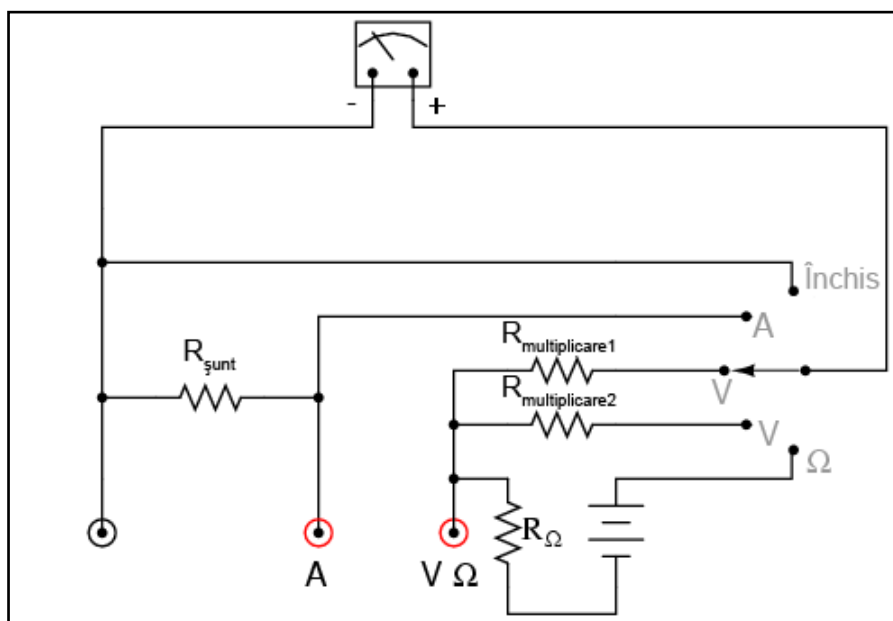


În cele trei poziții de jos ale comutatorului, mecanismul de detecție al aparatului este conectat la prizele „common” și V printr-unul din cei trei rezistori serie ($R_{\text{multiplicare}}$). În acest caz, aparatul se comportă precum un voltmetru. În cea de a patra poziție, mecanismul de deplasare este 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:

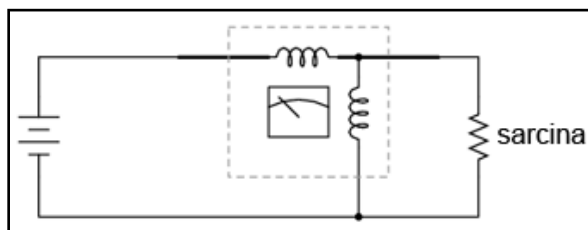


Cu toate cele trei funcții disponibile, acest multimetru mai este cunoscut și sub numele de volt-ohm-miliampermetru.

09. Wattmetrul

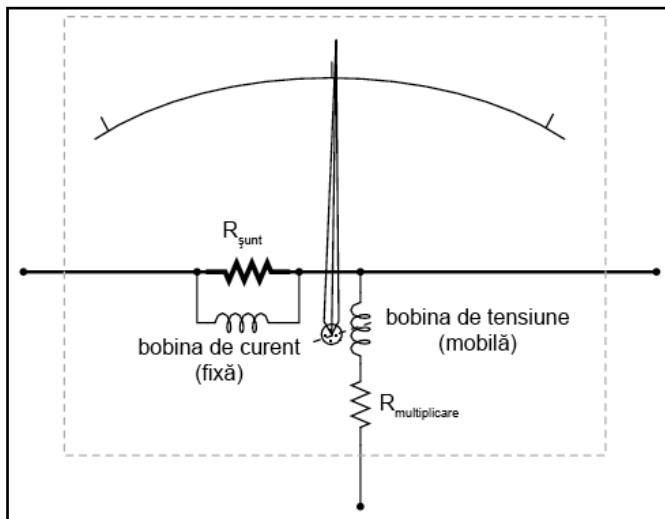
Puterea într-un circuit electric este produsul dintre tensiune și curent. Prin urmare, orice aparat de măsură a puterii trebuie să poată măsura ambele variabile.

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:



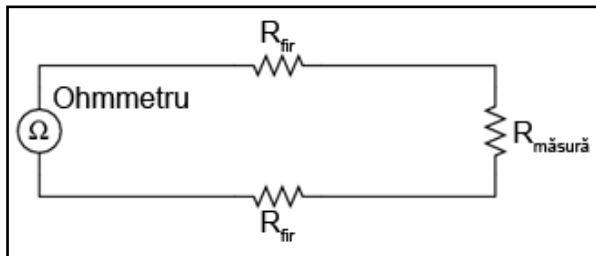
Bobina de sus (orizontală) măsoară curentul, în timp ce bobina de jos (verticală) măsoară căderea de tensiune. La fel ca în cazul voltmetrelor, deplasarea dinamometrului este de obicei conectată în serie cu un rezistor pentru a nu aplica întreaga cădere de tensiune pe mecanism.

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 ($R_{\text{măsură}}$).

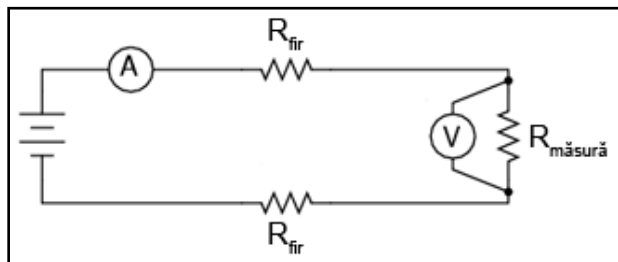
În mod normal, rezistența firelor conductoare este foarte mică. Dar, dacă firele conductoare sunt foarte lungi, sau în cazul în care componentul de măsurat are o rezistență foarte mică, eroarea de măsură introdusă de conductori poate fi substanțială:

$$\text{indicația ohmmetrului} = R_{\text{fir}} + R_{\text{măsură}} + R_{\text{fir}}$$

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

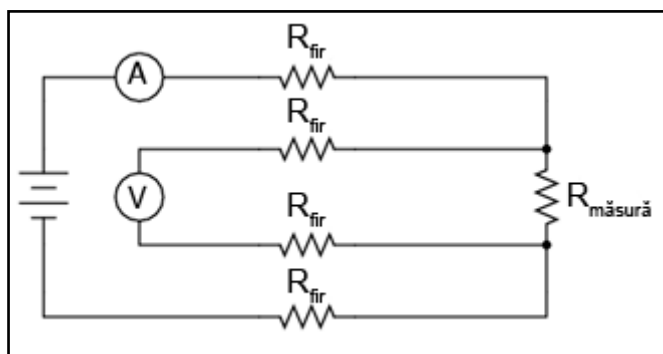
($R = E / I$). Putem determina prin urmare rezistența componentului dacă măsurăm curentul ce trece prin el și căderea de tensiune la bornele sale:



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.

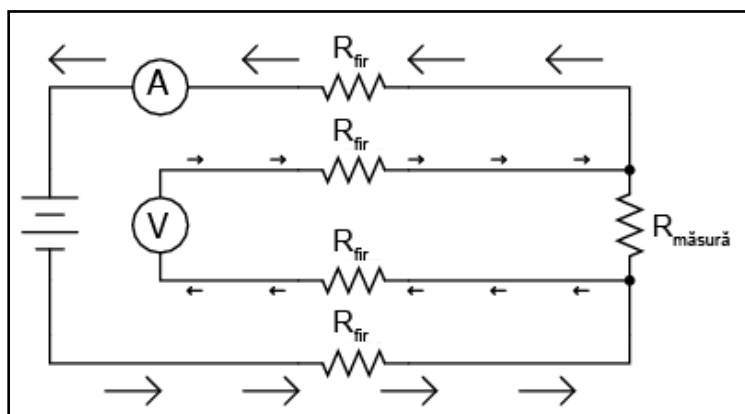
$$R_{\text{măsură}} = \text{indicația voltmetrului} / \text{indicația ampermetrului}$$

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?



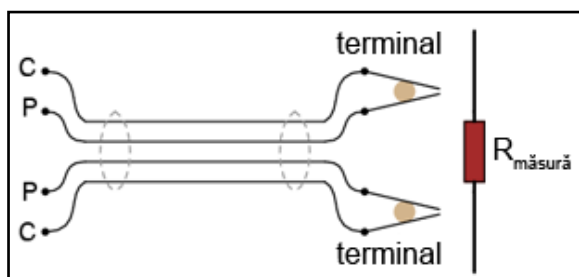
Dacă suntem puțin mai atenți, putem observa că nu există nicio problemă legată de căderea de tensiune în lungul conductorilor, deoarece valoarea curentului prin conductorii voltmetrului este minusculă.

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.

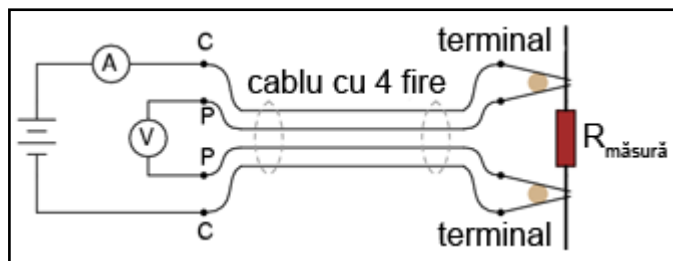


Orice cădere de tensiune existentă pe conductorii principali nu va fi măsurată de voltmetru. Precizia măsurătorii poate fi îmbunătățită dacă reducem curentul prin voltmetru la o valoare minimă, fie folosind un aparat de măsură de calitate (curent mic pentru deplasare maximă), fie un sistem cu detector 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.



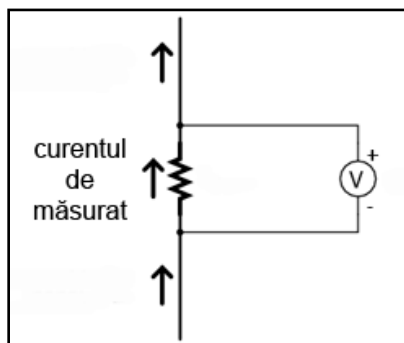
Terminalii/clemele tip crocodil (banane) au ambele jumătăți ale brațului comune din punct de vedere electric (de obicei în zona articulației). În cazul terminalilor Kelvin însă, cele două jumătăți sunt izolate între ele în zona articulației. Singurul contact se realizează în zona

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.

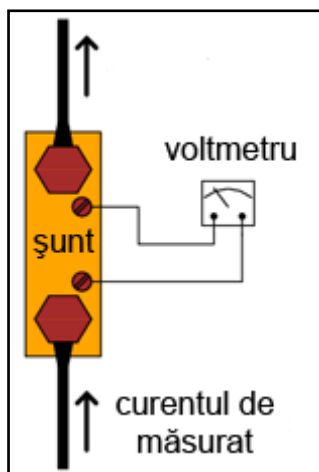
Căderea de tensiune la bornele acestora depinde strict de valoare curentului ce-i străbate, această cădere de tensiune fiind măsurată cu un voltmetru. În acest caz, un șunt de precizie „transformă” valoarea curentului în tensiune. Curentul poate fi măsurat cu o precizie ridicată prin măsurarea căderii 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.

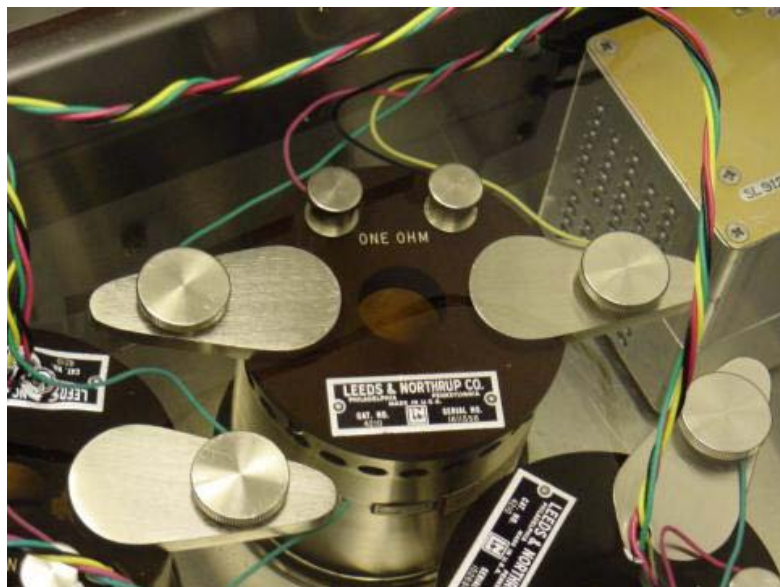


Pentru ca voltmetrul să măsoare doar căderea de tensiune la bornele șuntului, fără nicio altă cădere de tensiune parazită datorată firelor conductoare, șunturile sunt adesea prevăzute cu *patru* terminali.

Rezistori de precizie cu patru terminali

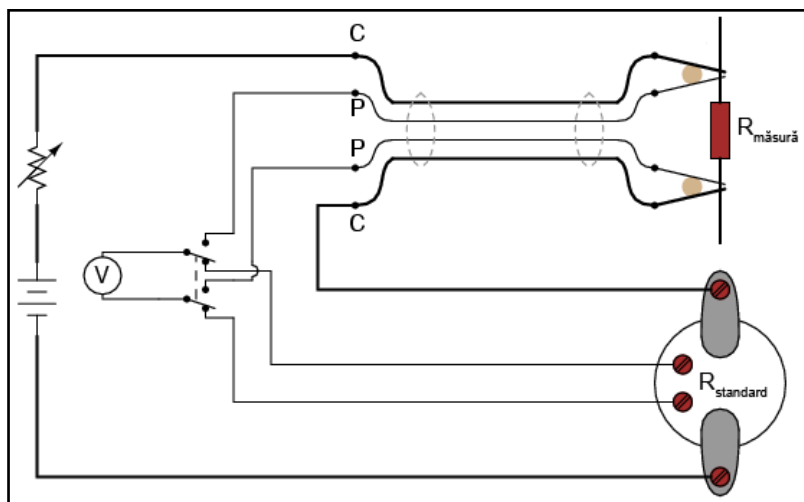
În aplicații metrologice (metrologie = "știință măsurătorilor"), unde acuratețea este de o importanță crucială, rezistorii „standard” de precizie sunt prevăzuți de asemenea cu patru terminali: doi pentru transportul curentului de măsurat, și doi pentru măsurarea căderii de tensiune cu ajutorul voltmetrului. 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:



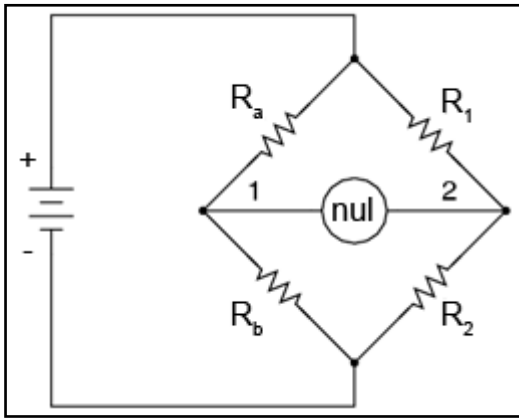
Toți conductorii din figura alăturată prin care trece curent sunt reprezentați cu linie îngroșată, pentru a face distincție între conductori.

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.

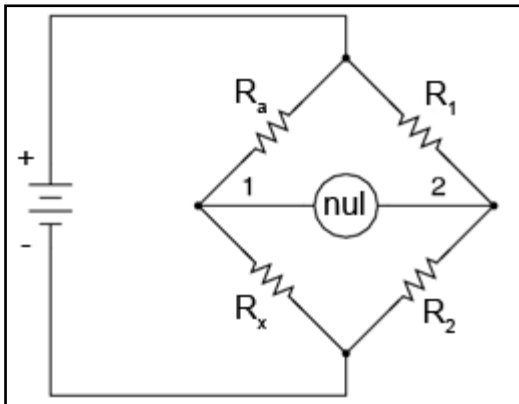
Puntea Wheatstone

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.

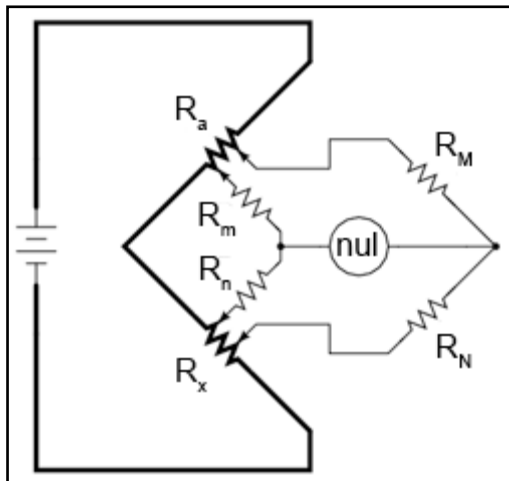
Punțile Wheatstone sunt considerate superioare circuitelor de măsură standard prezentate în secțiunea precedentă din punct de vedere al măsurării rezistențelor. Spre deosebire de acele circuite, punțile Wheatstone sunt liniare și extrem de precise.

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.

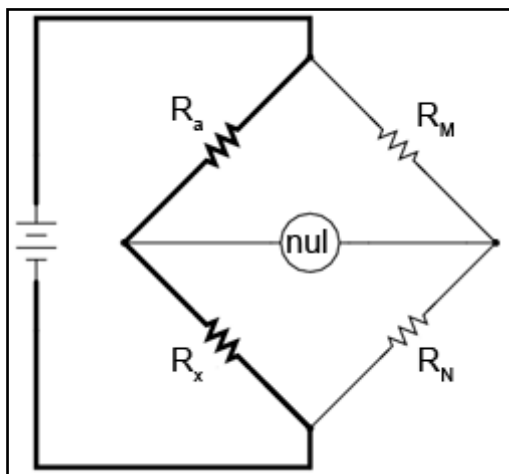
Puntea Thomson (puntea Kelvin dublă)

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):

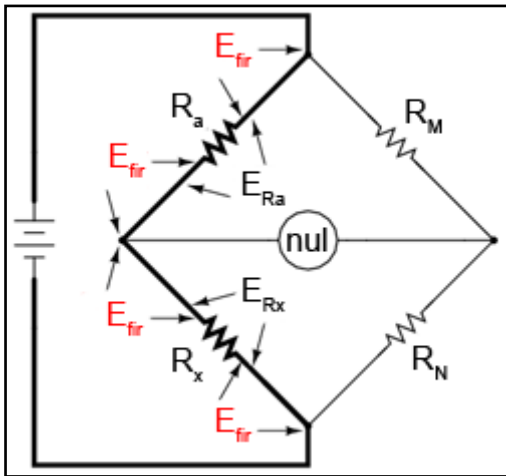


Rezistorii de valoare mică sunt reprezentați prin simboluri cu linie îngroșată, la fel și conductorii (prin care trece un curent mare) la care sunt conectați. Această punte „ciudată” poate fi cel mai bine înțeleasă dacă reluăm puntea Wheatstone standard pentru măsurarea rezistențelor mici, pentru a ajunge 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:

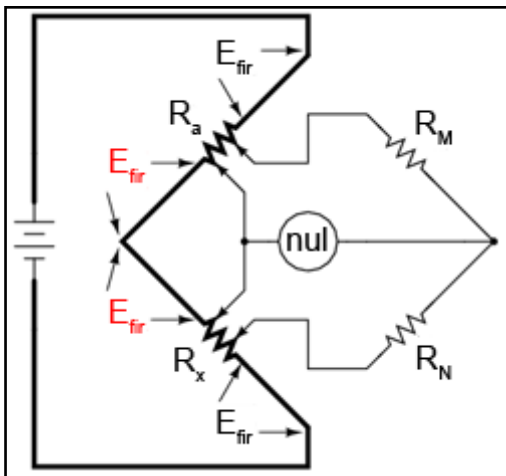


Când detectorul de nul indică o tensiune zero, știm că puntea este echilibrată iar raporturile R_a / R_b și R_M / R_N sunt egale. Cunoscând valorile rezistorilor R_a , R_M și R_N putem determina R_x ...aproximativ.

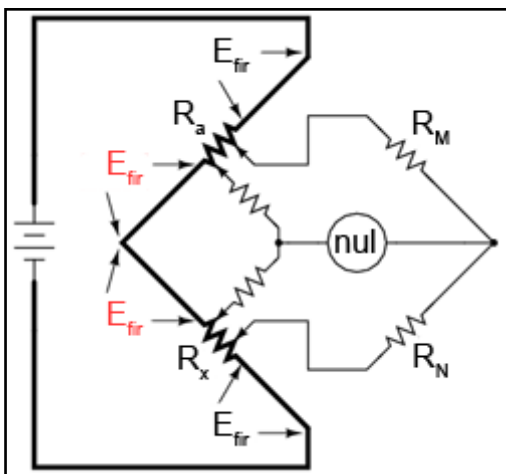


Avem totuși o problemă: contactele și firele conductoare dintre R_a și R_x prezintă și ele o anumită rezistență. Aceste rezistențe parazite pot fi substanțiale în comparație cu rezistențele mici R_a și R_x . De asemenea, căderea de tensiune pe aceste rezistențe parazite va fi suficient de mare, ducând la un curent mare prin ele. Toate aceste lucruri vor afecta indicația detectorului de nul, și prin urmare, starea de echilibru a punții.

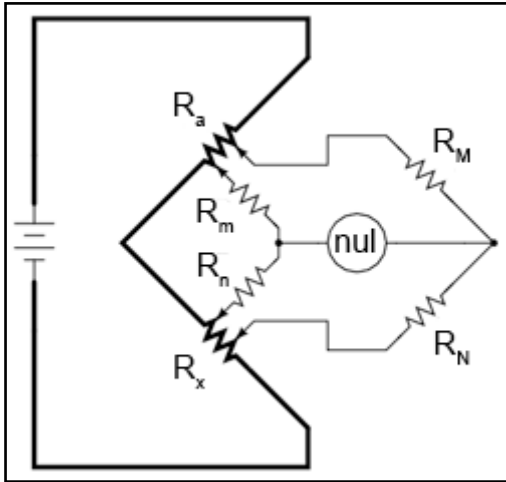
Din moment ce nu dorim măsurarea acestor rezistențe parazite, ci doar a rezistenței R_x , trebuie găsită o modalitate de corectare a detectorului de nul astfel încât acesta să nu fie influențat de căderile de tensiune din lungul acestor rezistențe parazite. În cazul în care conectăm detectorul de nul 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.

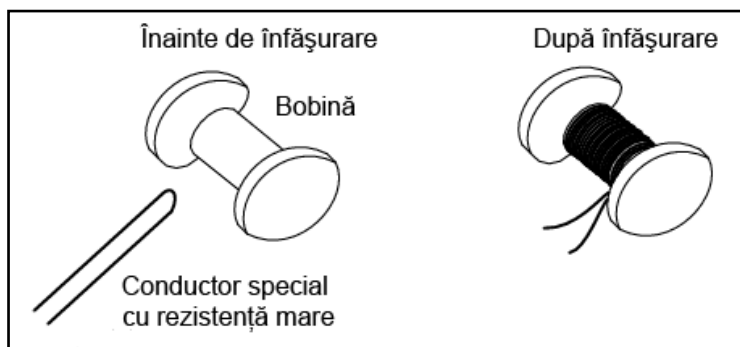
12. Realizarea practică a rezistorilor de calibrare

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.

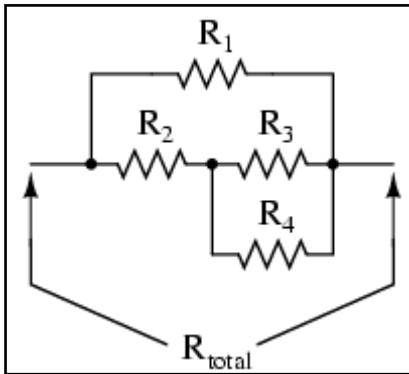
O astfel de înfășurare poartă numele de înfășurare bifilară. Orice câmp magnetic generat de trecerea curentului prin conductor este anulat. De asemenea, un câmp magnetic extern nu poate induce o cădere de tensiune în lungul conductorului:



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.

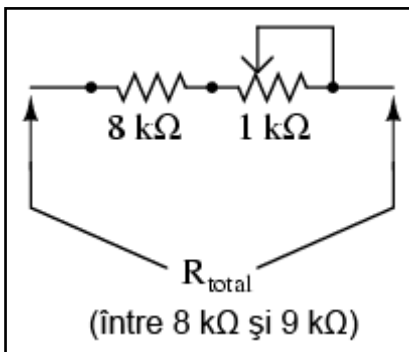
În această „lume perfectă”, rezistorii cu valori fixe sunt suficienți. Dar, în realitate, abilitatea de ajustare sau *calibrare* a instrumentelor în viitor este necesară.

Utilizarea potențioametrelor

Ne-am putea gândi ca în acest caz să folosim potențioametre (conectate ca și reostate, de obicei) ca și rezistențe variabile. Potențioametrul ar putea fi montat în interiorul aparatului de măsură, astfel încât doar o persoană autorizată să-i poată modifica valoarea.

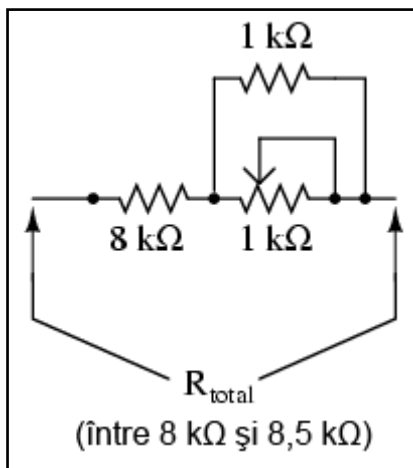
Totuși, rezistența majorității potențioametrelor variază prea mult pentru o deplasarea mică a manetei și nu pot fi ajustate cu foarte mare precizie. Să presupunem că am dori o rezistență de $8,335 \text{ k}\Omega \pm 1 \text{ }\Omega$, și folosim un potențioametrul de $10 \text{ k}\Omega$ pentru obținerea ei. O precizie de $1 \text{ }\Omega$ în cazul unui potențioametrul de $10 \text{ k}\Omega$ reprezintă 1 parte din 10.000, sau 0,01% din deplasarea maximă a potențioametrului. Un astfel de rezultat este aproape imposibil de atins folosind un potențioametrul standard. Prin urmare, cum putem obține valoarea rezistenței dorite dar cu posibilitatea ajustării ei în viitor?

Soluția problemei constă în utilizarea unui potențioametrul 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, potențioametrul 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 potențioametrului. Precizia ajustării este de 10 ori mai bună decât în cazul precedent unde am folosit un potențioametrul 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 potențioametrului 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. Vorbirea 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

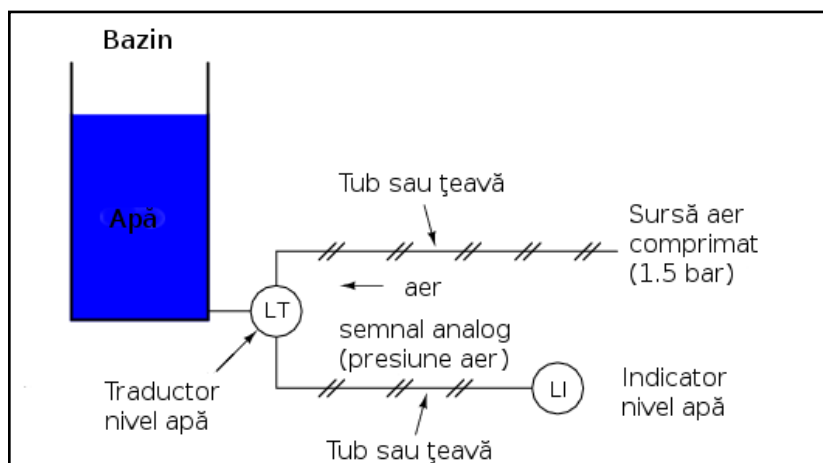
Un semnal analog este un semnal cu o variație continuă, în contradicție cu cel digital, ce are o variație în trepte. Un exemplu bun de analog vs. digital este cazul ceasurilor: cele analogice posedă ace indicatoare și practic nu au o limită de precizie în ceea ce privește indicarea exactă a orei; cele 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.



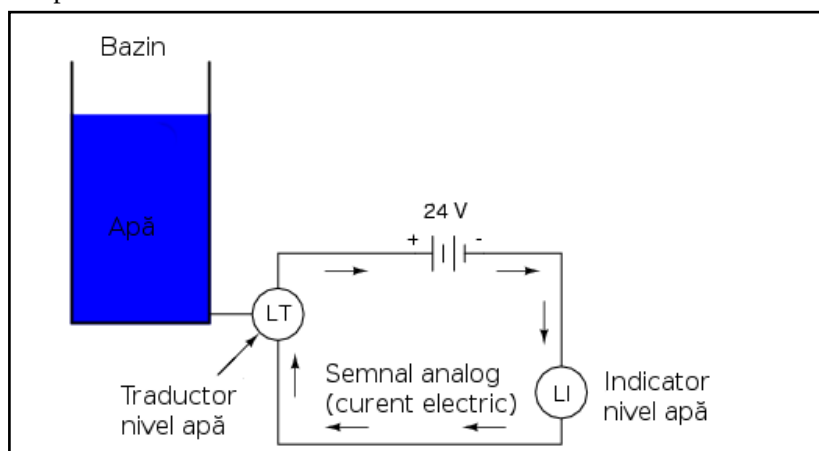
De exemplu, un dispozitiv pneumatic destinat măsurării înălțimii coloanei de apă dintr-un bazin (variabila procesului) va furniza o presiune scăzută a aerului atunci când bazinul este gol, una medie când bazinul este parțial plin și o presiune ridicată atunci când bazinul este plin.

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.).

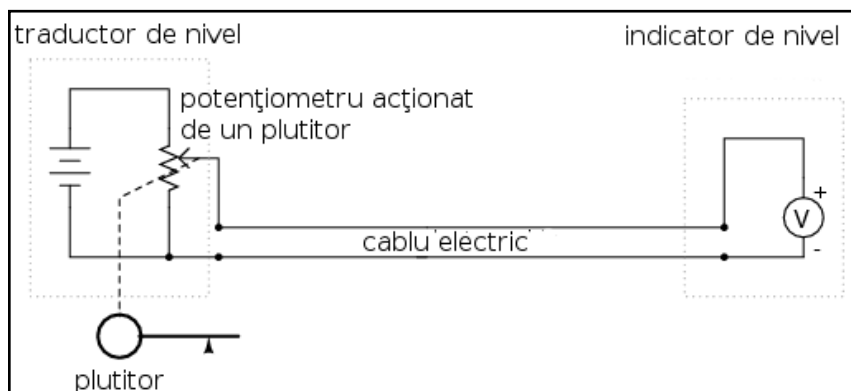
În schimb, dacă am calibra (seta) instrumentele (traductorul și indicatorul) pentru scara de 1.1 - 2 bar (1,1, 1,2, 1,3...2), astfel încât 1.1 bar să reprezinte 0% iar 2 bar 100%, orice tip de defect sau ne-funcționare a sistemului va rezulta într-o presiune de 1 bar, și orice tip de măsurători efectuate 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:

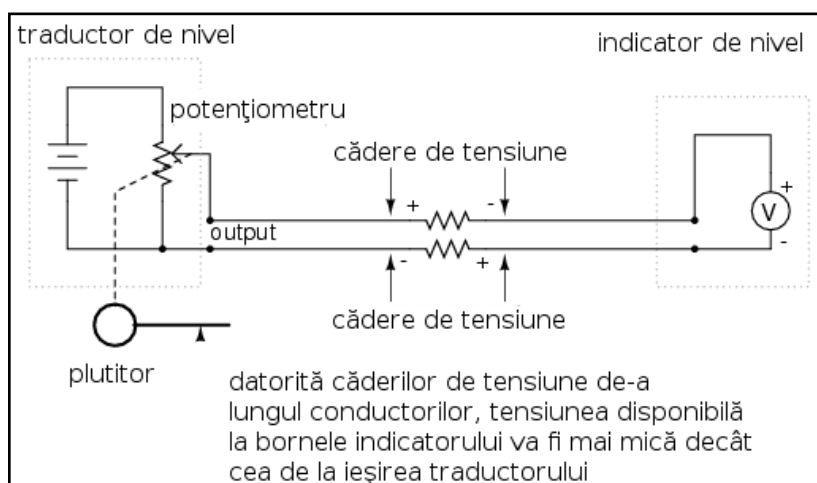


Traductorul din diagrama alăturată conține propria sursă de tensiune, iar potențiometrul este acționat de un plutitor ce se află în interiorul bazinului, poziția acestuia depinzând de nivelul apei. Indicatorul nu este nimic altceva decât un voltmetru cu o scală calibrată (modificată) pentru citirea unei 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:



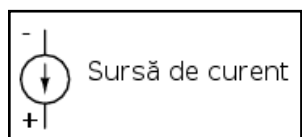
În figura alăturată au fost adăugate simbolurile rezistorului pentru cablurile electrice pentru a indica ceea ce se întâmplă de fapt într-un sistem real. Valorile acestor rezistențe pot fi reduse folosind cabluri electrice mai groase (și mai scumpe) și/sau putem evita efectele lor cu ajutorul unui voltmetru 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

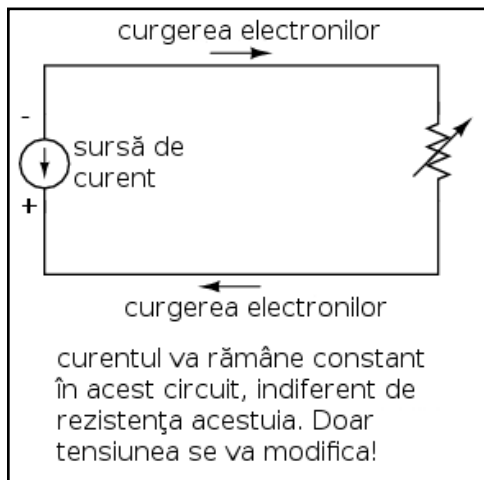
- O *sursă de curent* este un dispozitiv, de obicei constituit din mai multe componente electrice, ce păstrează o valoare constantă a curentului prin circuit precum o sursă de curent (baterie ideală) păstrează o valoare constantă a tensiunii la bornele sale
- Un sistem de instrumentație pe bază de curent 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



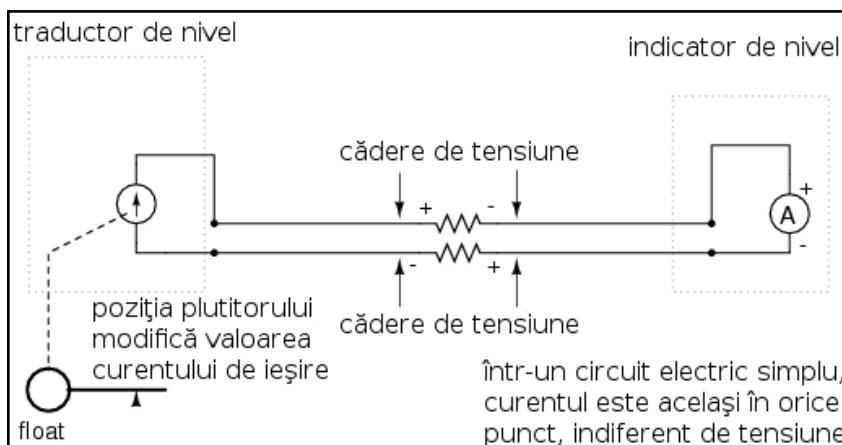
Folosind amplificatoare electronice putem construi circuite a căror ieșire să fie o cantitate constantă de curent în loc de o cantitate constantă de tensiune, precum în cazul bateriei de exemplu. Aceste componente folosite împreună poartă denumirea de sursă de curent, iar simbolul este cel alăturat.

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

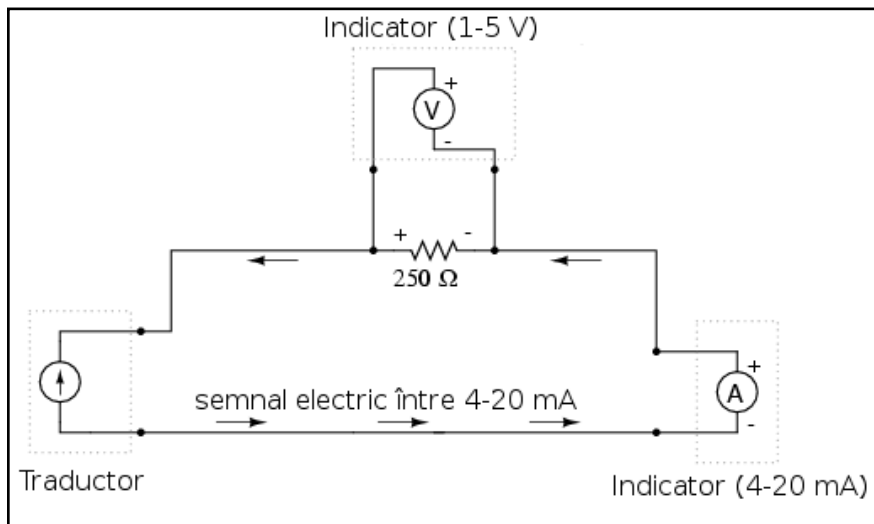


Sursele de curent pot fi construite ca și dispozitive variabile, la fel ca și sursele de tensiune, producând valori foarte precise de curent electric. Dacă am construi un traductor cu o sursă de curent variabilă în loc de o sursă de tensiune, am putea realiza un sistem de instrumentație bazat pe curent 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.).

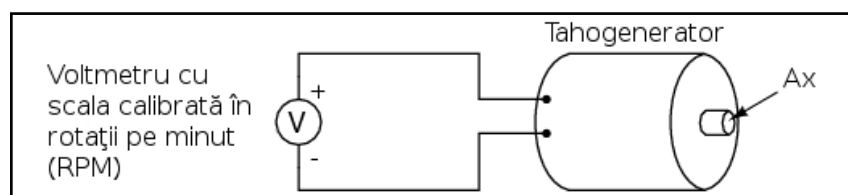
Un avantaj pentru utilizarea acestor valori o constituie ușurința folosirii instrumentelor de măsură pentru valorile de 1-5 V. Un simplu rezistor de precizie de 250 ohm conectat în serie cu acest circuit va produce o

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

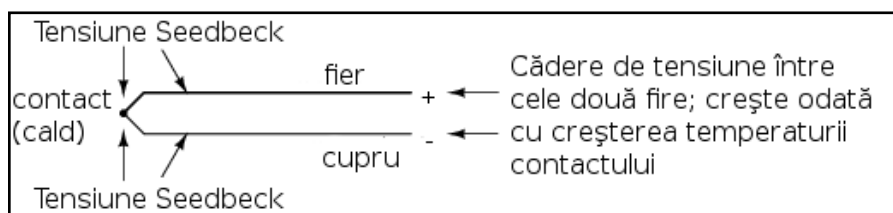
Măsurând tensiunea produsă de un tahogenerator putem determina viteza de rotație a dispozitivului conectat la bornele acestuia.

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.

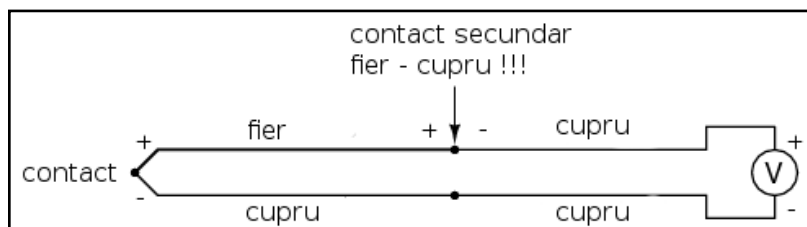
Acest efect este cel mai ușor de observat și de aplicat cu ajutorul unui contact dintre două metale diferite, fiecare metal producând un potențial electric diferit de-a lungul său, ceea ce se traduce printr-o tensiune electrică diferită între capetele libere ale celor două fire. Aproape orice pereche 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.

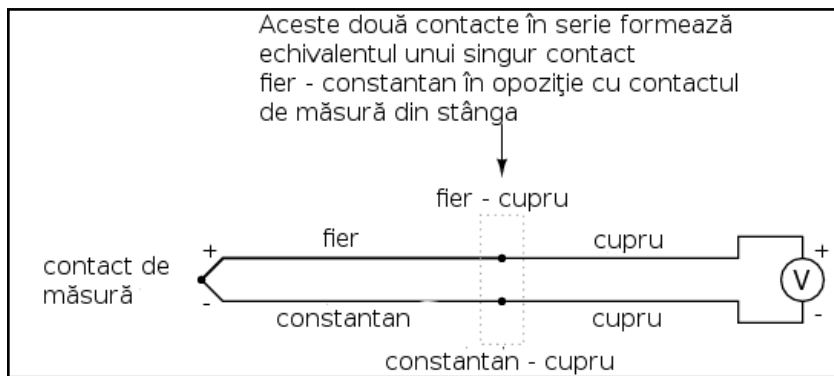
Tensiunile Seebeck sunt destul de mici, de ordinul milivolților (mV) pentru majoritatea temperaturilor. Din acest motiv sunt destul de greu de folosit pentru măsurători precise.



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

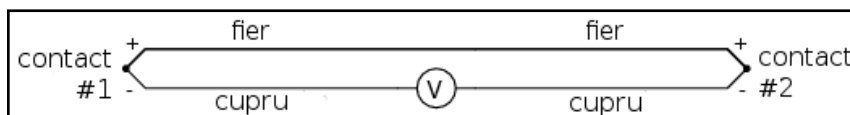
circuitului.

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

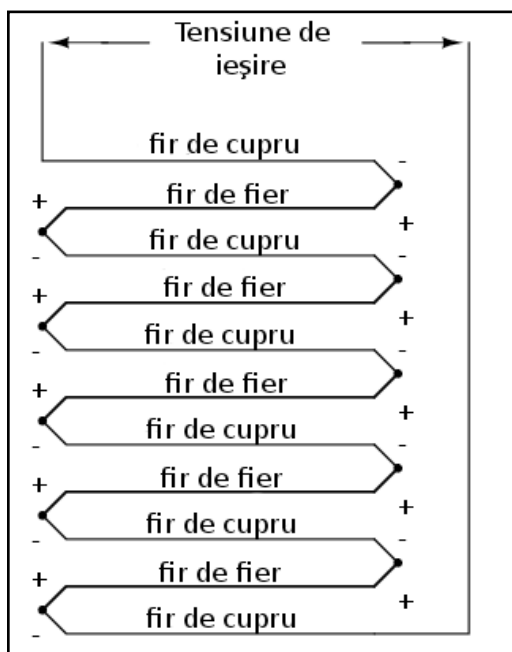
Pentru creșterea preciziei măsurărilor, voltmetrul folosit într-un circuit cu termocuplă este construit cu o rezistență foarte mare pentru evitarea căderilor de tensiune de-a lungul firelor termocuplei. Problema căderilor de tensiune de-a lungul firelor este și mai gravă în acest caz față de semnalele 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



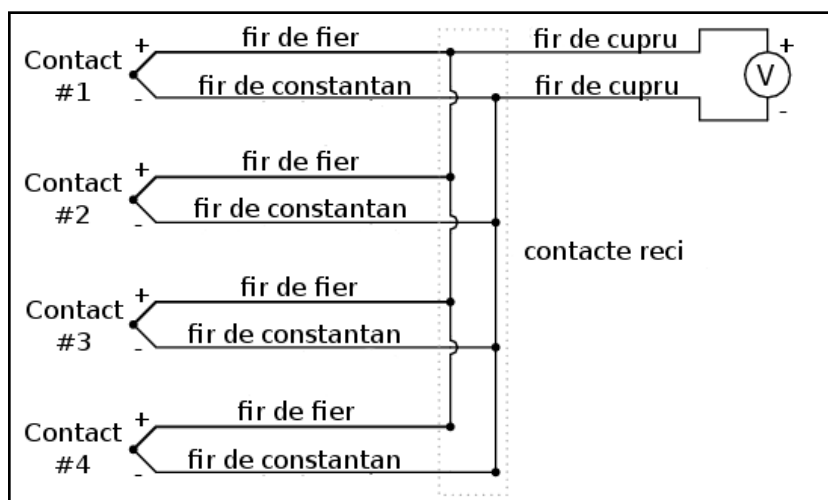
Termocuplele pot fi confecționate din conductori foarte groși pentru rezistență scăzută și conectate în așa fel încât să genereze curenți mari pentru alt scop decât măsurarea temperaturii. O astfel de aplicație este generarea puterii electrice. Conectând mai multe termocuple în serie și alternând temperaturile 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 măsura 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

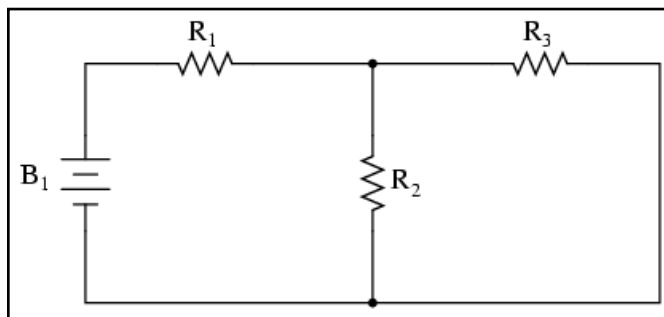
01. Ce este analiza unei rețele electrice

- 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

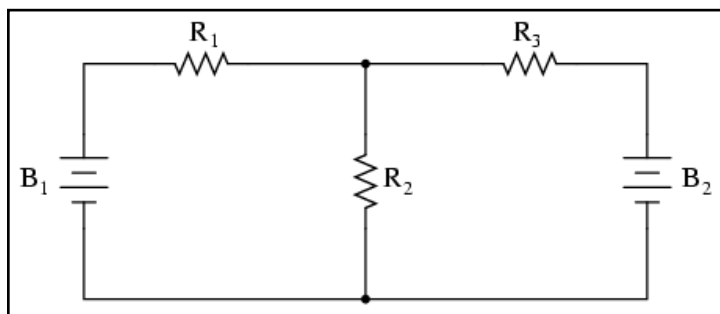
Pentru ilustrarea faptului că un circuit relativ simplu poate fi imposibil de redus în sub-circuite serie sau paralel, să luăm următorul circuit serie-paralel ca și exemplu:



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:

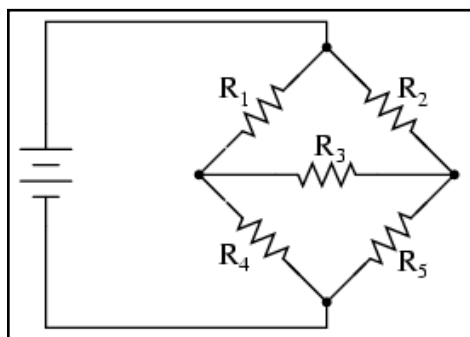


Rezistorii R_2 și R_3 nu mai sunt conectați în paralel unul cu celălalt, pentru că bateria B_2 a fost introdusă în ramura de circuit a lui R_3 .

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

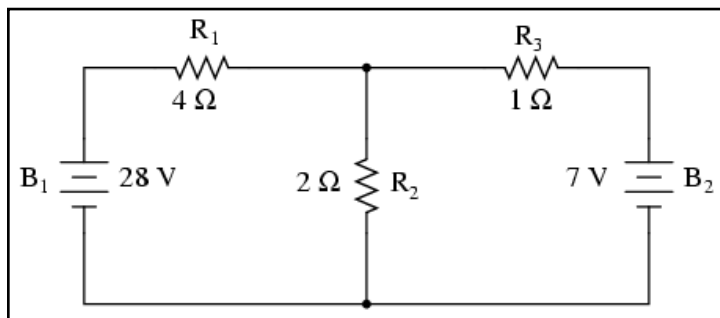
Pașii pentru aplicarea metodei ramurii de curent:

- 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

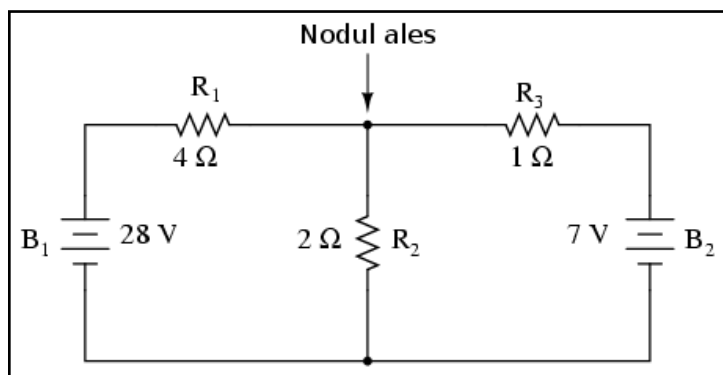
Folosind aceasta metodă, presupunem și indicăm un sens al curenților prin circuit și scriem apoi ecuațiile ce descriu relațiile dintre aceștia folosind legile lui Ohm și Kirchhoff. În momentul în care avem câte o ecuație pentru fiecare curent necunoscut, putem rezolva sistemul de ecuații pentru determinarea tuturor curenților și prin urmare a tuturor căderilor de tensiune din rețea.

Exemplu



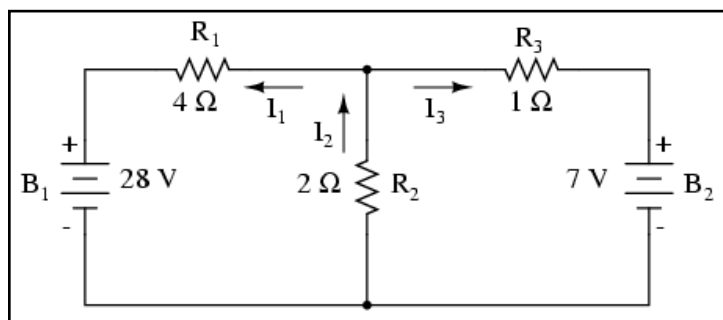
Să folosim următorul circuit pentru ilustrarea metodei.

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



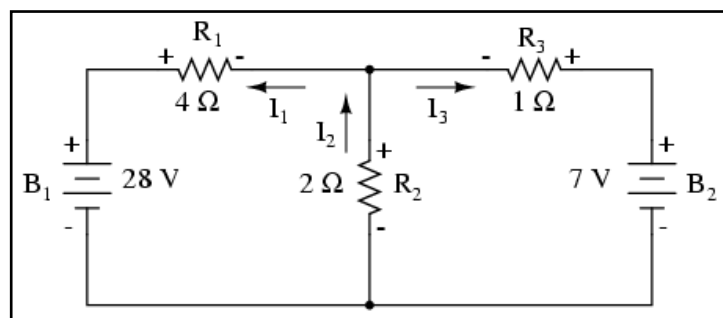
Ghicim apoi direcția curenților din acest nod, notând curenții cu I_1 , I_2 și I_3 . Nu este neapărat ca direcțiile acestea să fie cele corecte (reale), în acest moment acestea sunt pur speculative. Vom ști dacă intuiția noastră a fost greșită în momentul rezolvării ecuațiilor matematice pentru curenți; 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.

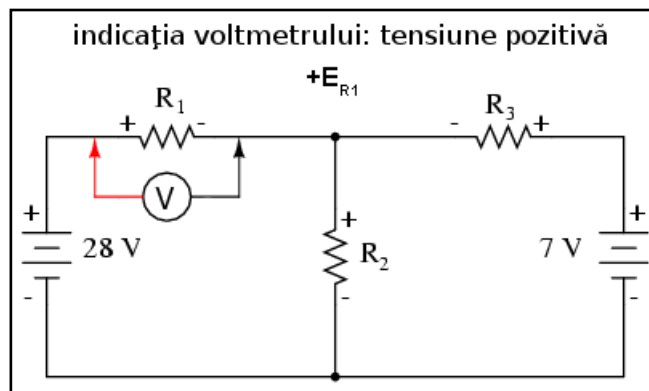
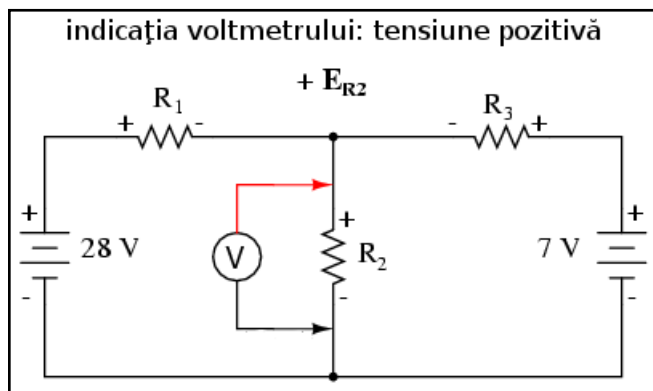
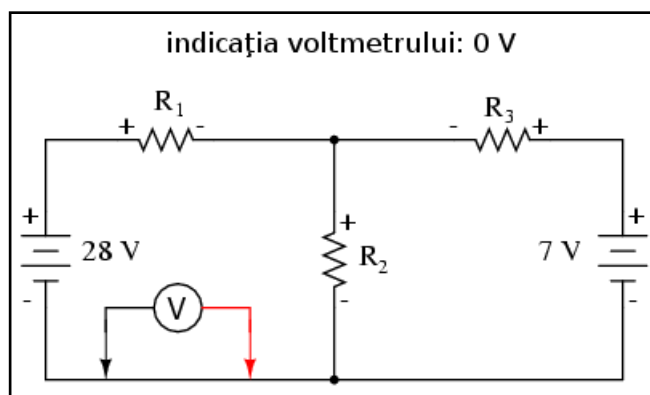
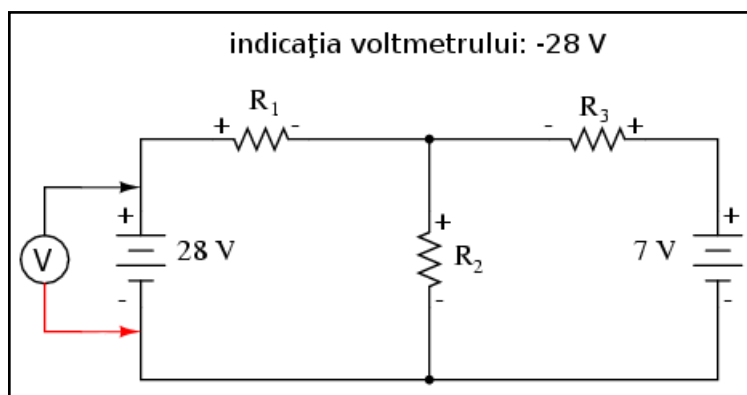
Desigur, polaritatea bateriilor rămâne aceeași. Nu este nicio problemă dacă polaritatea rezistorului nu se „asortează” cu cea a bateriei atât timp cât polaritatea rezistorului este bazată pe direcția presupusă de curgere a curentului prin acesta. Toate calculele efectuate de acum încolo se vor baza pe 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.

Parcurserea buclei din stânga

Putem începe parcurserea 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:

$$-28 + E_{R2} + E_{R1} = 0$$

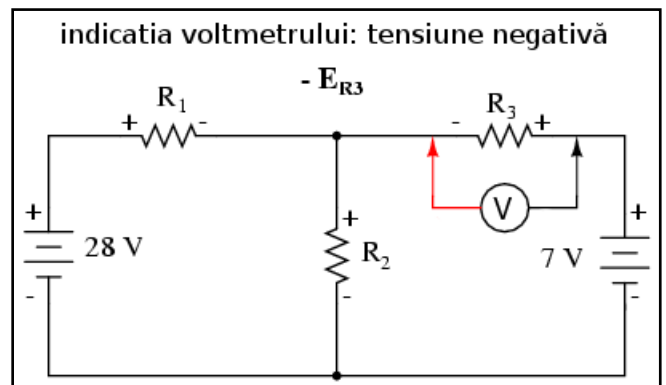
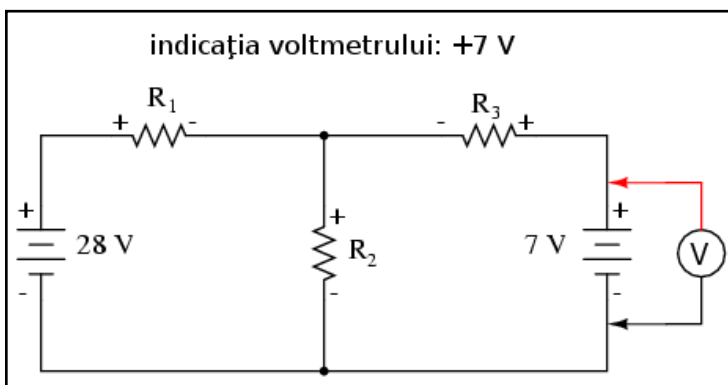
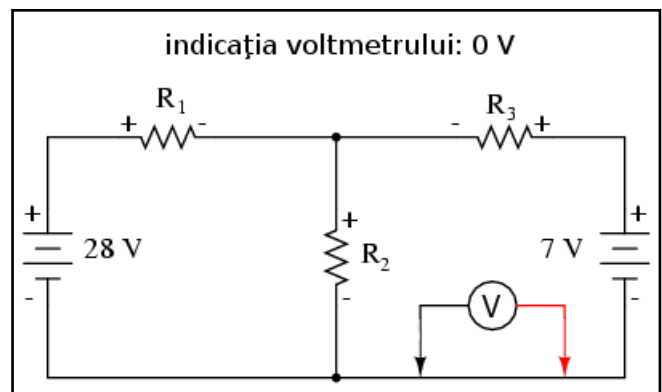
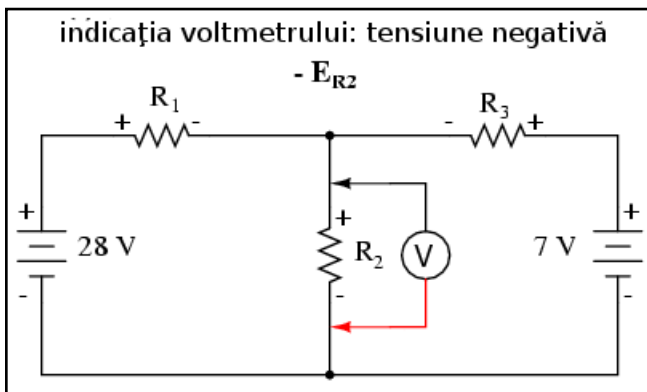
$$E = IR - 28 + I_2 R_2 + I_1 R_1 = 0$$

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:

$$-1I_1 + 1I_2 - 1I_3 = 0$$

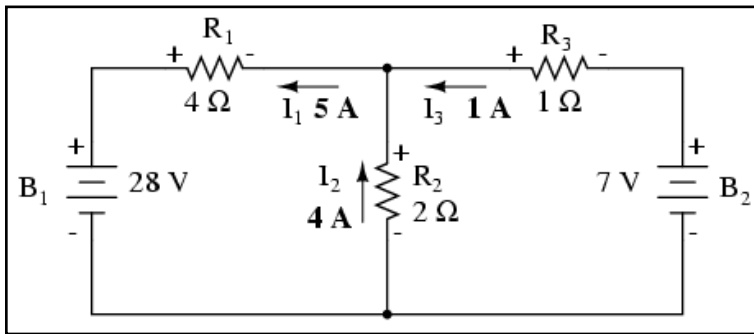
$$4I_1 + 2I_2 - 0I_3 = 28$$

$$0I_1 - 2I_2 - 1I_3 = -7$$

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

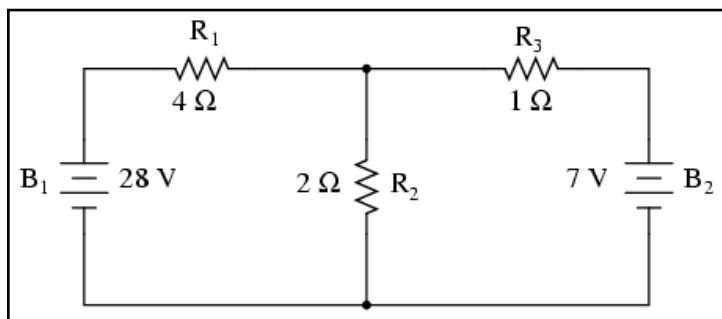
bucă se intersectează unul cu celălalt printr-un component, curentul se exprimă ca și sumă algebrică dintre cei doi curenți (ex. $I_1 + I_2$) dacă au aceeași direcție prin component; în caz contrar, curentul se va exprima ca și diferență ($I_1 - I_2$)

- 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

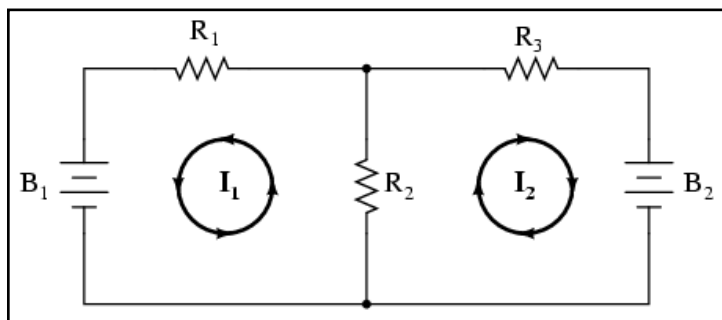
Metoda buclei de curent sau metoda ochiului de curent este asemănătoare metodei ramurii de curent prin faptul că folosește un sistem de ecuații descris de legea lui Kirchhoff pentru tensiune și legea lui Ohm pentru determinarea curenților necunoscuți din circuit. Diferă de metoda ramurii de curent prin 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

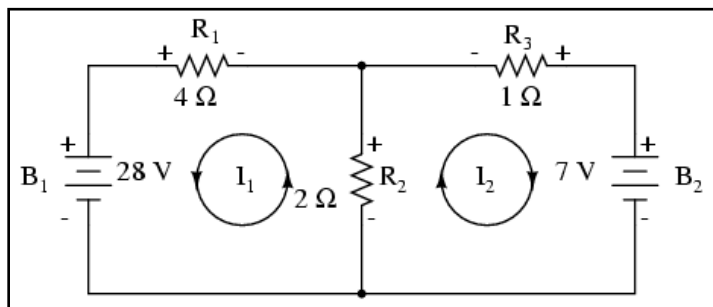


Primul pas în metoda buclei este identificarea „buclelor” din circuit astfel încât să cuprindem toate componentele. În circuitul de mai sus, prima buclă va fi cea formată de B_1 , R_1 , și R_2 , iar cea de a doua din B_2 , R_2 , și R_3 . Partea cea mai ciudată a acestei metode este imaginarea circulației 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 ($E_{R2} \cdot (I_1 + I_2)$).

Parcurerea 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:

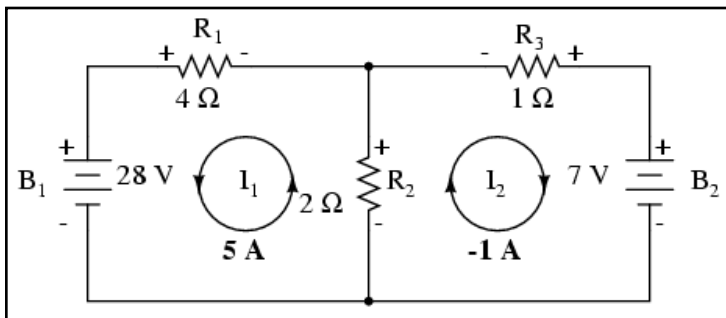
$$-2I_1 - 3I_2 + 7 = 0$$

Rezolvarea sistemului de ecuații și determinarea curenților de buclă

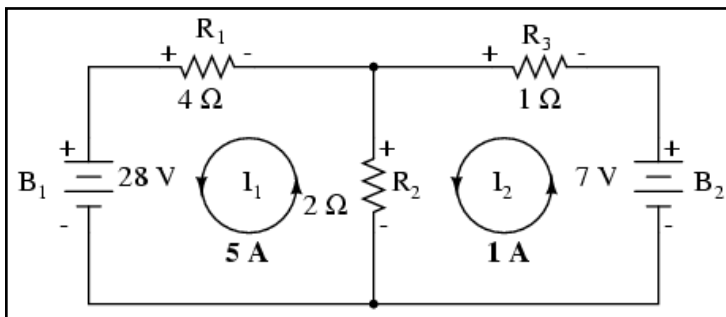
Având două ecuații putem folosi metode matematice pentru determinarea necunoscutelor I_1 și I_2 :

$$I_1 = 5 \text{ A}; \quad I_2 = -1 \text{ A}$$

Revenirea la circuitul inițial



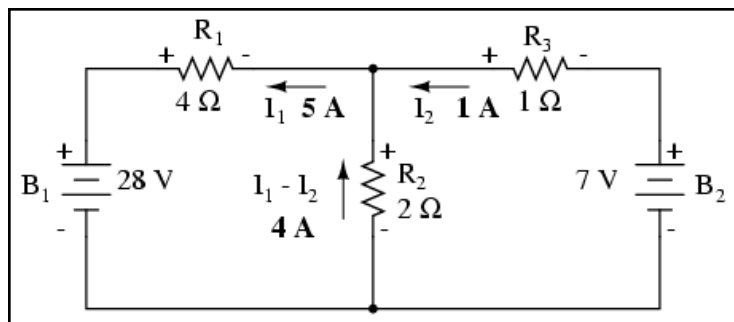
Dar, atenție, aceste valori ale curenților sunt valabile pentru bucle și nu sunt curenții efectivi ai ramurilor. Să ne întoarcem la circuitul inițial pentru a vedea care este relația dintre ei.



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

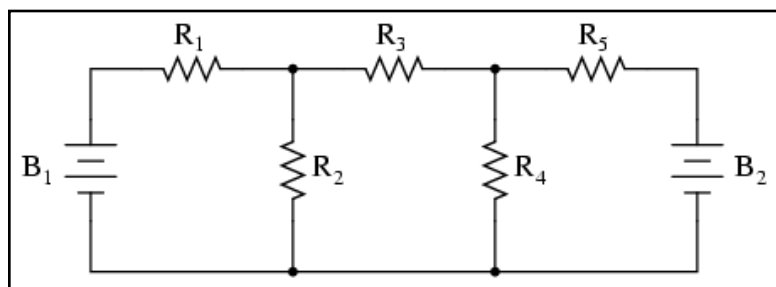
Această modificare a direcției curentului față de ceea ce am presupus inițial va modifica polaritatea căderilor de tensiune pe rezistorii R_2 și R_3 datorită curentului I_2 . De aici putem deduce curentul prin R_1 , 5 A și căderea de tensiune ($I \cdot R$), 20 V. De asemenea, curentul prin R_3 este 1 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.

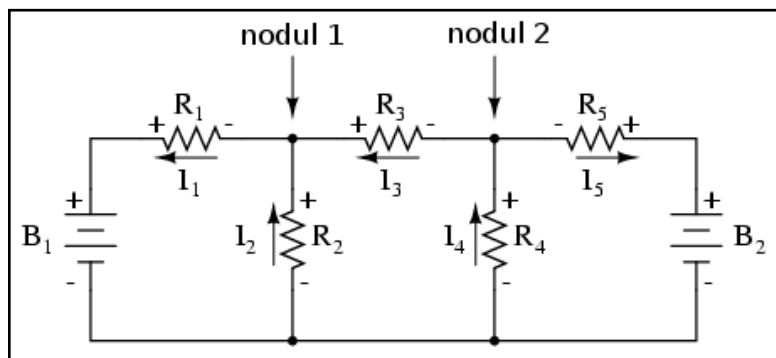
Din moment ce I_1 are 5 A într-o direcție și I_2 1 A în direcția opusă, curentul *real* prin R_2 este diferența celor doi, adică 4 A și trece prin R_2 de jos în sus. Cu un curent de 4 A prin R_2 rezultă o cădere de tensiune de 8 V.

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:

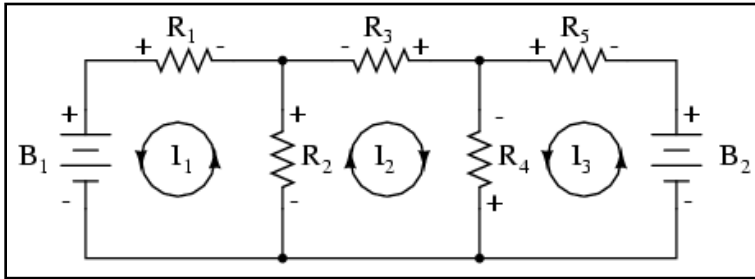
$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$-I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

$$-E_{B1} + I_2 R_2 + I_1 R_1 = 0$$

$$-I_2 R_2 + I_4 R_4 + I_3 R_3 = 0$$

$$-I_4 R_4 + E_{B2} - I_5 R_5 = 0$$



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

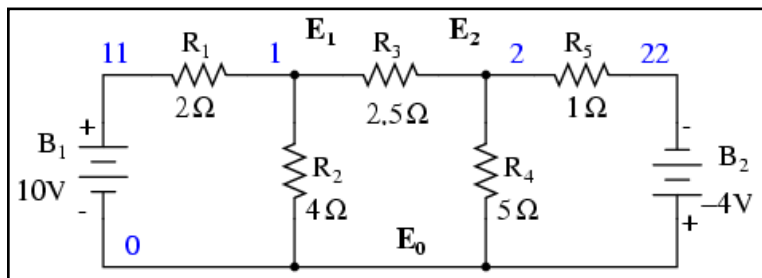
reprezintă conductanța dintre nodul 1 și nodul 3. Același lucru este valabil pentru toți ceilalți coeficienți ai tuturor ecuațiilor

- 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

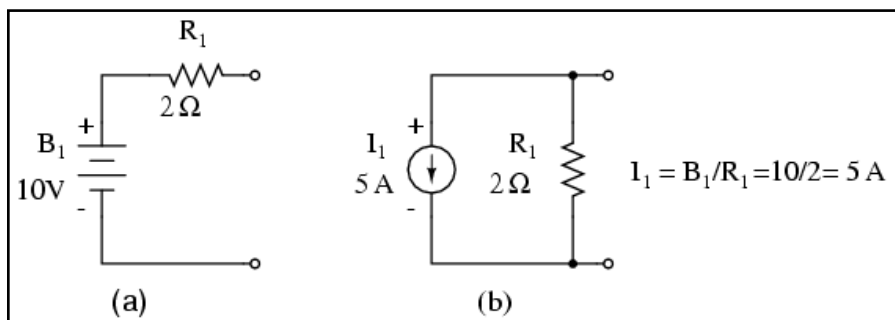
Metoda nodului de tensiune pentru analiza circuitelor determină tensiunea nodurilor în funcție de ecuațiile legii lui Kirchhoff pentru curent (LKC). Această analiză arată puțin ciudat pentru că necesită înlocuirea surselor de tensiune cu surse echivalente de curent. De asemenea, valorile rezistorilor 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:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{2} \Omega = 0,5 \text{ S}$$

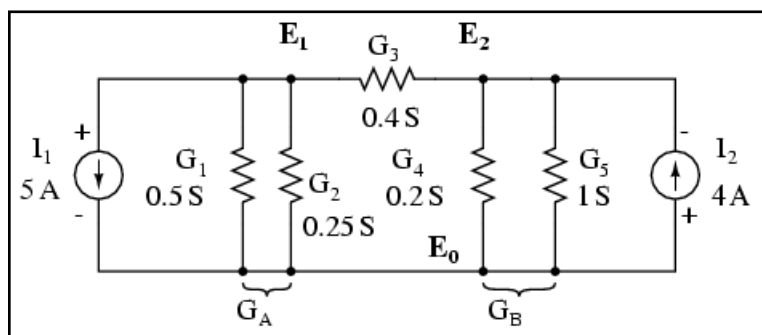
$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{4} \Omega = 0,25 \text{ S}$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{2,5} \Omega = 0,4 \text{ S}$$

$$G_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{5} \Omega = 0,2 \text{ S}$$

$$G_5 = \frac{1}{R_5} = \frac{1}{1} \Omega = 1 \text{ S}$$

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

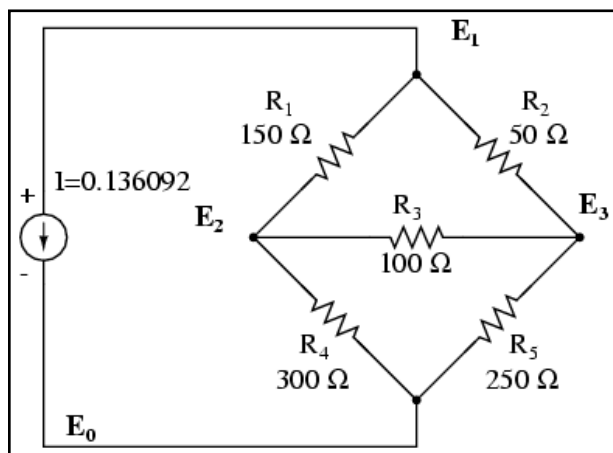
Această metodă ne permite să scriem rapid ecuațiile prin inspecție și duce la următoarele reguli pentru aplicarea metodei nodului de tensiune:

- 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:

$$E_1 = 24 \text{ V}; E_2 = 17,65 \text{ V}; E_3 = 19,31 \text{ V}$$

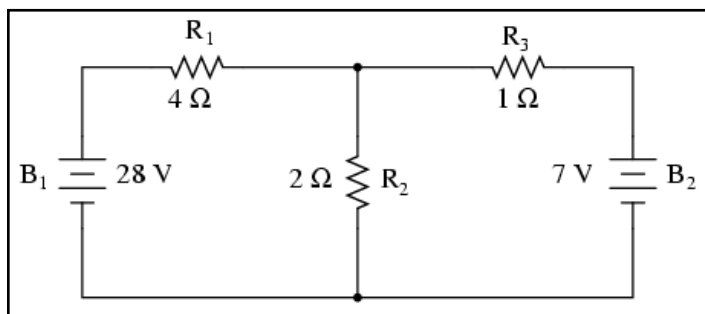
05. Teorema lui Millman

- 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

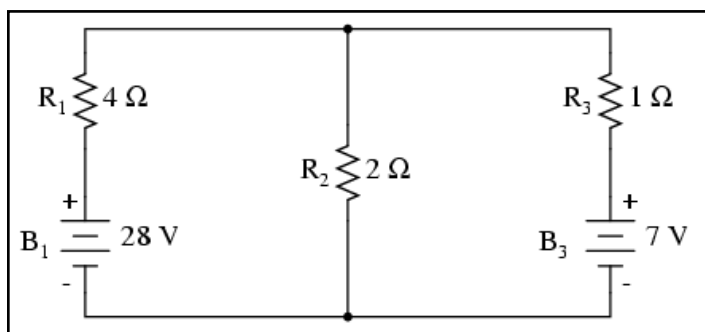
Prin intermediul teoremei lui Millman, circuitul este redesenat ca și o rețea de ramuri paralele, fiecare ramură conținând un rezistor sau o combinație serie baterie/rezistor. Această teoremă se poate aplica doar în cazul circuitelor ce pot suferi această modificare.

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

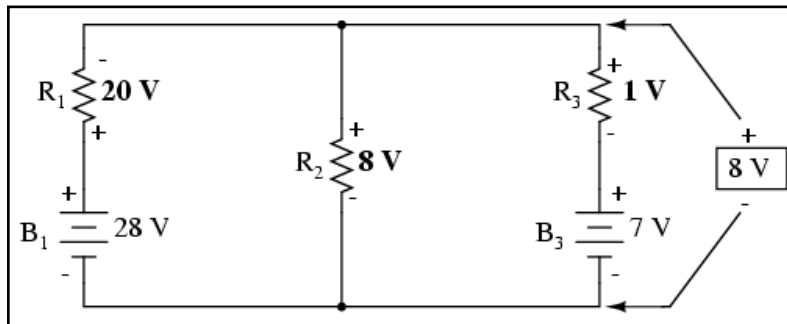
Teorema nu este altceva decât o ecuație lungă aplicabilă oricărui circuit ce poate fi redesenat ca și ramuri paralele, fiecare ramură cu propria sa sursă de tensiune și rezistență în serie:

$$\frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \text{căderea de tensiune pe toate ramurile}$$

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:

$$E_{R1} = 8 \text{ V} - 28 \text{ V} = -20 \text{ V (negativ sus)}$$

$$E_{R2} = 8 \text{ V} - 0 \text{ V} = 8 \text{ V (pozitiv sus)}$$

$$E_{R3} = 8 \text{ V} - 7 \text{ V} = 1 \text{ V (pozitiv sus)}$$

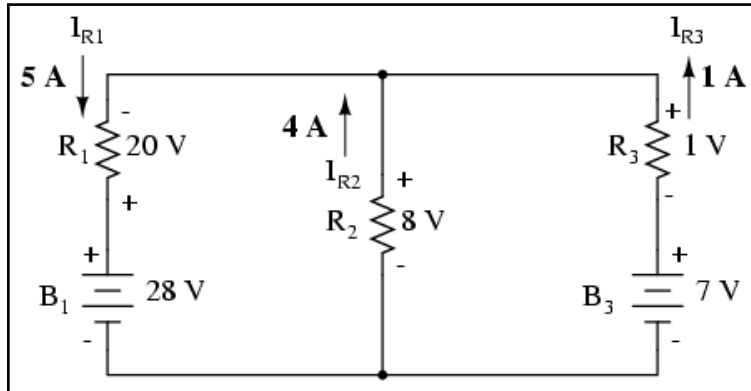
Determinarea curenților pe fiecare ramură

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 B₃.

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

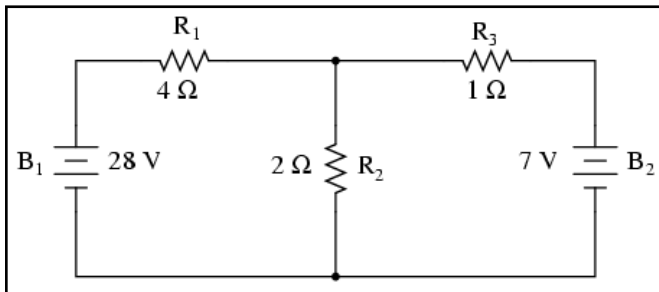
- Conform teoremei superpoziției, un circuit poate fi analizat considerând funcționarea unei singure surse de putere odată; valorile tensiunilor și curenților pentru fiecare caz în parte se adună pentru aflarea soluției finale, atunci când în circuit funcționează toate sursele de putere
- Pentru a scoate 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.

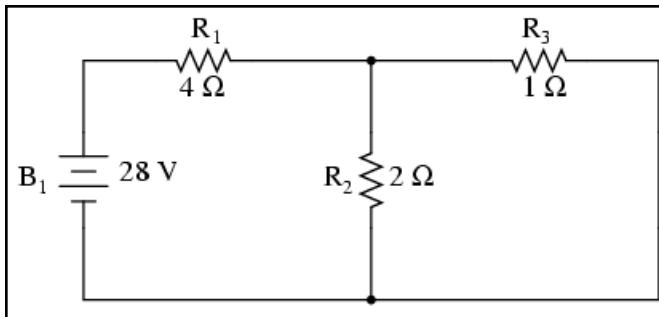
Strategia constă în eliminarea rând pe rând a tuturor surselor de putere din circuit exceptând una singură, utilizând analiza serie/paralel pentru determinarea căderilor de tensiune și a curenților din rețeaua modificată pentru fiecare sursă de putere separat. Apoi, după ce toate căderile de tensiune 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

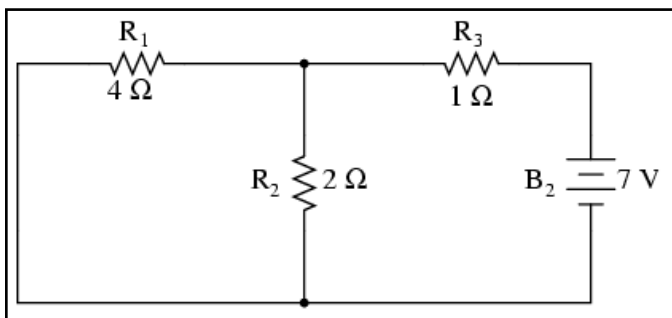


Să luăm același circuit ca și exemplu.

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.

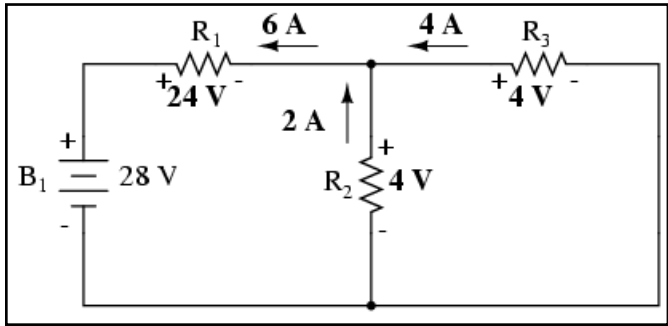
Atunci când redesenăm un circuit pentru analiza serie/paralel cu o singură sursă, toate celelalte surse de tensiune sunt înlocuite de fire (scurt-circuit), și toate sursele de curent sunt înlocuite de circuite deschise. Din

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 ₁	R ₂	R ₃	R ₂ // R ₃	R ₁ + R ₂ // R ₃ (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

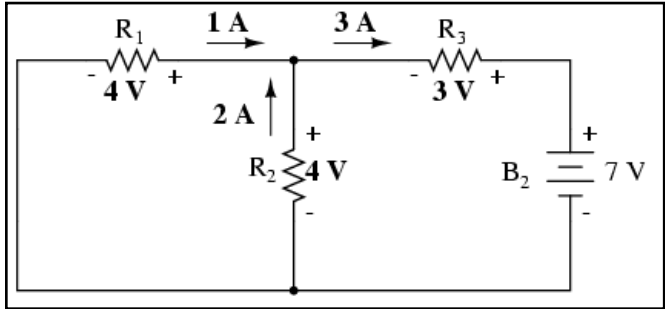
Analizând circuitul în care acționează doar bateria de 28 V, obținem următoarele valori pentru tensiune și curent.



Al doilea (sub)circuit

Mărire	R ₁	R ₂	R ₃	R ₁ // R ₂	R ₃ + R ₁ // R ₂ (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.

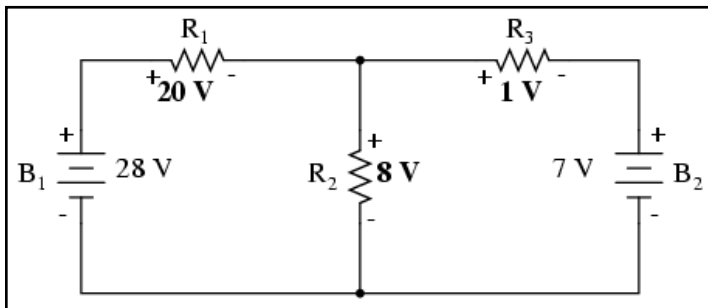


Suprapunerea (sub)circuitelor

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

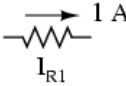
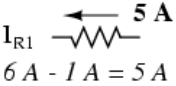
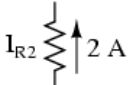
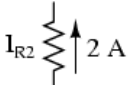
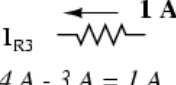
Cu bateria de 28 V	Cu bateria de 7 V	Cu ambele baterii
$ \begin{array}{c} 24\text{ V} \\ + \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} - \\ E_{R1} \end{array} $	$ \begin{array}{c} 4\text{ V} \\ - \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} + \\ E_{R1} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \mathbf{20\text{ V}} \\ + \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} - \\ E_{R1} \end{array} $ $24\text{ V} - 4\text{ V} = 20\text{ V}$
$ \begin{array}{c} + \\ E_{R2} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \\ 4\text{ V} \\ - \end{array} $	$ \begin{array}{c} + \\ E_{R2} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \\ 4\text{ V} \\ - \end{array} $	$ \begin{array}{c} + \\ E_{R2} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \\ \mathbf{8\text{ V}} \\ - \end{array} $ $4\text{ V} + 4\text{ V} = 8\text{ V}$
$ \begin{array}{c} 4\text{ V} \\ + \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} - \\ E_{R3} \end{array} $	$ \begin{array}{c} 3\text{ V} \\ - \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} + \\ E_{R3} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \mathbf{1\text{ V}} \\ + \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} - \\ E_{R3} \end{array} $ $4\text{ V} - 3\text{ V} = 1\text{ V}$

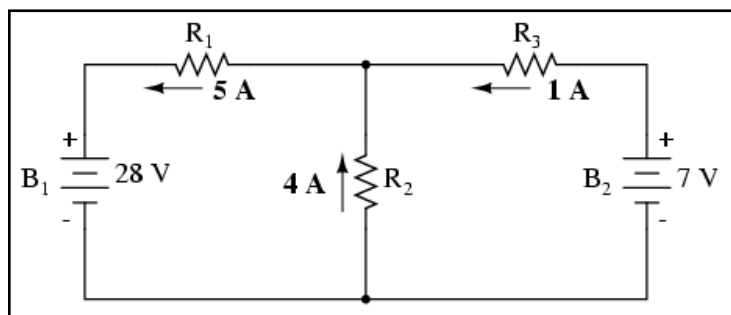


Aplicând aceste valori, rezultatul final arată astfel.

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
 I_{R1}	 I_{R1}	 I_{R1} $6 A - 1 A = 5 A$
 I_{R2}	 I_{R2}	 I_{R2} $2 A + 2 A = 4 A$
 I_{R3}	 I_{R3}	 I_{R3} $4 A - 3 A = 1 A$



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:

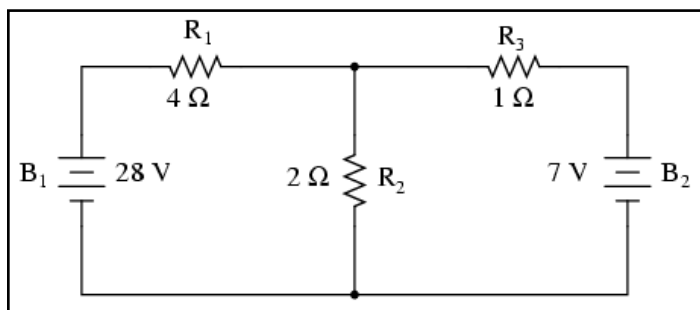
- Găsirea sursei de tensiune Thevenin prin îndepărtarea sarcinii din circuitul original și calcularea căderii de tensiune dintre punctele în care se afla sarcina inițial
- Găsirea rezistenței Thevenin prin îndepărtarea tuturor surselor de putere din circuitul original și calcularea rezistenței totale 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.

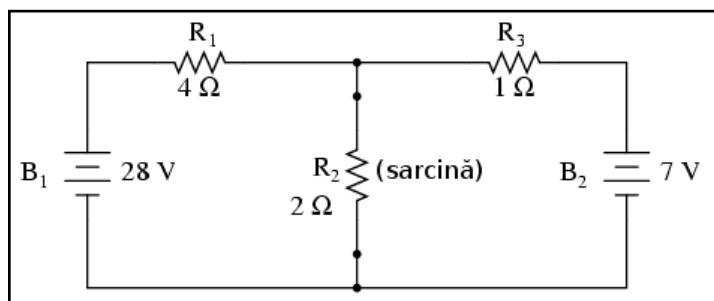
Exemplu



Să reluăm circuitul studiat până acum cu celelalte metode.

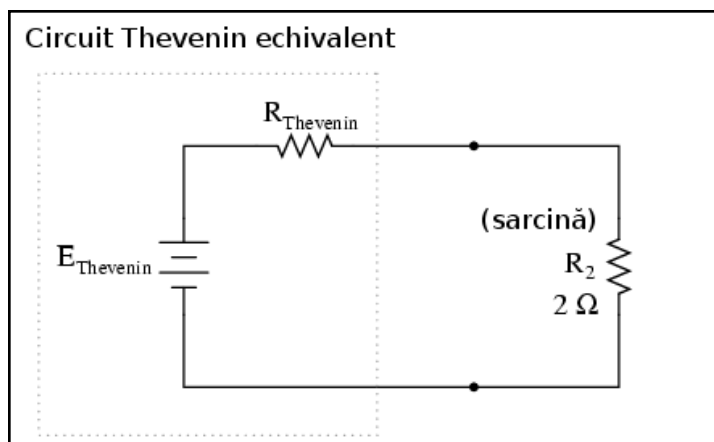
Să presupunem că rezistorul R_2 este sarcina din acest circuit. Avem deja la dispoziție patru metode pentru determinarea tensiunii și curentului prin R_2 , dar niciuna dintre aceste metode nu este eficientă din punct de vedere al timpului de lucru. Imaginați-vă că ați folosi aceste metode de fiecare 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

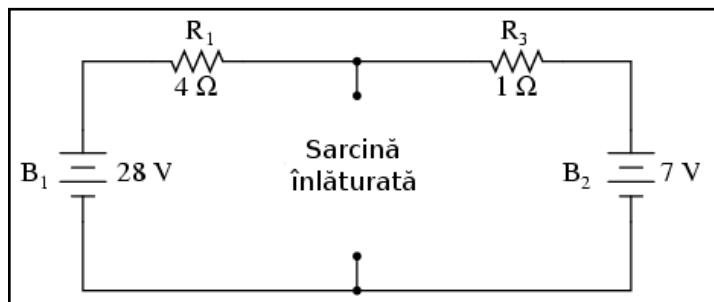


După conversia circuitului vom avea circuitul alăturat.

„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_{Thevenin} și R_{Thevenin} au fost calculate corect.

Înlăturarea temporară a sarcinii din circuit

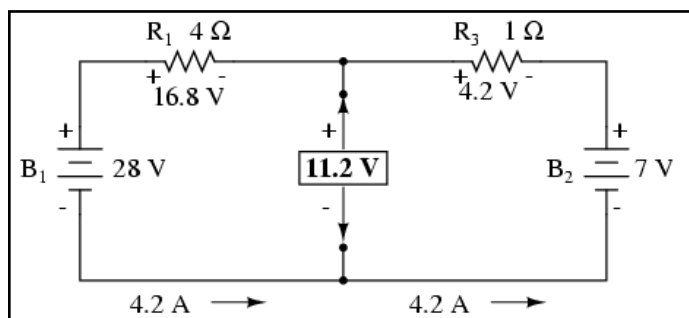


Avantajul transformării constă în ușurința calculului pentru circuitul simplificat, mult mai ușor decât în cazul circuitului original. Primul pas este înlăturarea rezistenței de sarcină din circuitul original și înlocuirea acesteia cu un circuit deschis.

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	Ω

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.

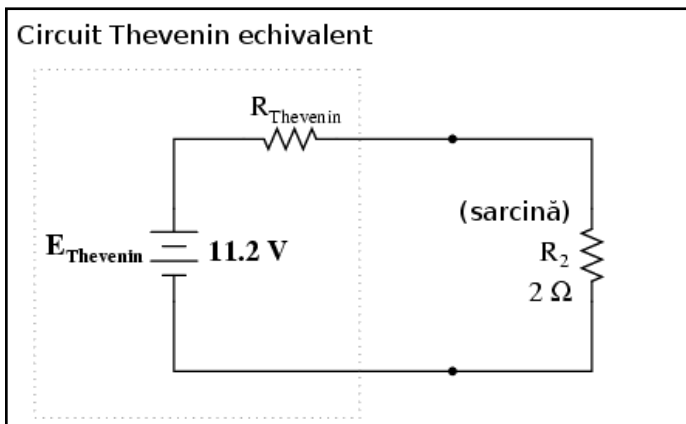


Căderea de tensiune între cele două puncte ale sarcinii poate fi dedusă din tensiunea uneia dintre baterii și căderea de tensiune pe unul dintre rezistori, astfel:

$$E_{\text{Thevenin}} = E_{B1} - U_{R1} = 28 \text{ V} - 16,8 \text{ V} = 11,2 \text{ V}$$

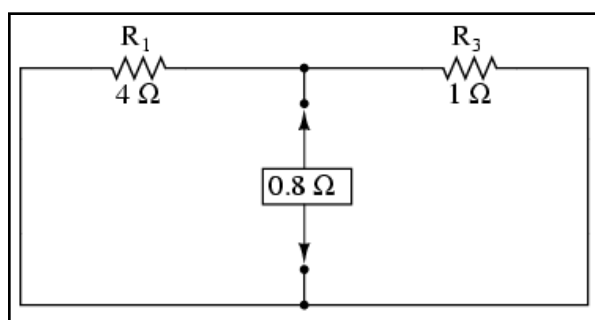
sau

$$E_{\text{Thevenin}} = E_{B2} - U_{R3} = 7 \text{ V} - 4,2 \text{ V} = 11,2 \text{ V}$$



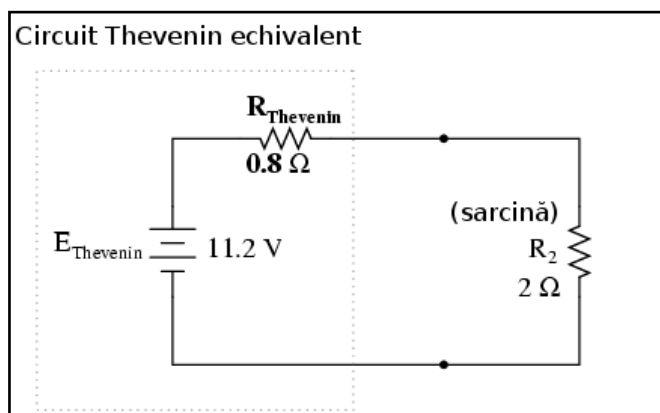
Această tensiune de 11,2 V este tensiunea Thevenin, E_{Thevenin} din circuitul echivalent.

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 Ω . Aceasta reprezintă rezistența Thevenin (R_{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_{Thevenin}	$R_{\text{sarcină}}$	Total	Unitate
E	3,2	8	11,2	V
I	4	4	4	A
R	0,8	2	2,8	Ω

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.

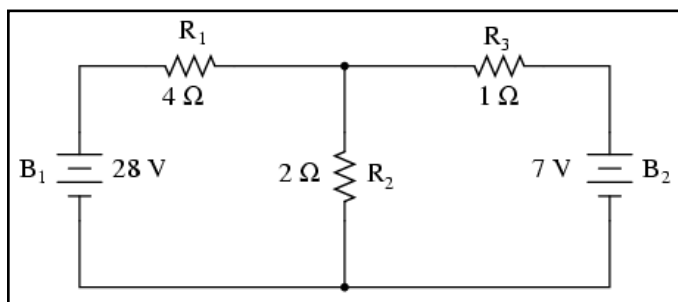
Pașii pentru implementarea teoremei lui Norton:

- 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

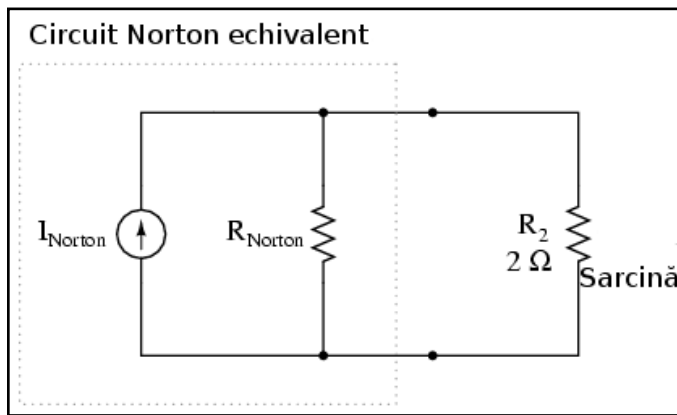
Conform teoremei lui Norton este posibilă simplificarea oricărui circuit liniar, indiferent de complexitate, la un circuit echivalent dotat cu o singură sursă de curent și o rezistență paralelă, ambele conectate la o sarcină. La fel ca în cazul teoremei lui Thevenin, termenul „liniar” are semnificația teoremei superpoziției: ecuațiile implicate trebuie să fie liniare.

Exemplu



Circuitul inițial este cel folosit și în exemplele precedente.

Principiul teoremei lui Norton

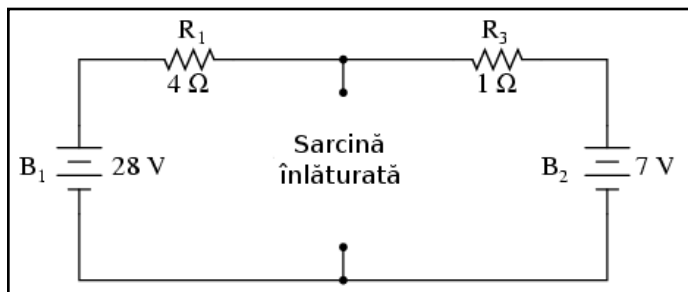


Circuitul echivalent după aplicarea teoremei lui Norton va fi cel alăturat.

Sursa de curent este un component a cărui scop este furnizarea unei valori constante de curent, indiferent de valoarea tensiunii.

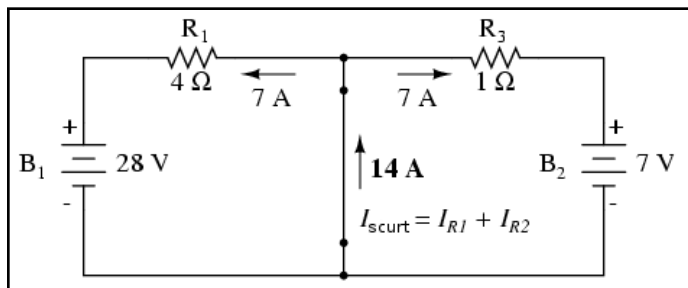
La fel ca în cazul teoremei lui Thevenin, întreg circuitul original, în afară de rezistența de sarcină, a fost redus la un circuit echivalent ce este mult mai ușor de analizat. Pașii folosiți pentru calcularea sursei de curent, I_{Norton} , și a rezistenței Norton, R_{Norton} , sunt de asemenea similari teoremei precedente.

Înlăturarea temporară a sarcinii din circuit

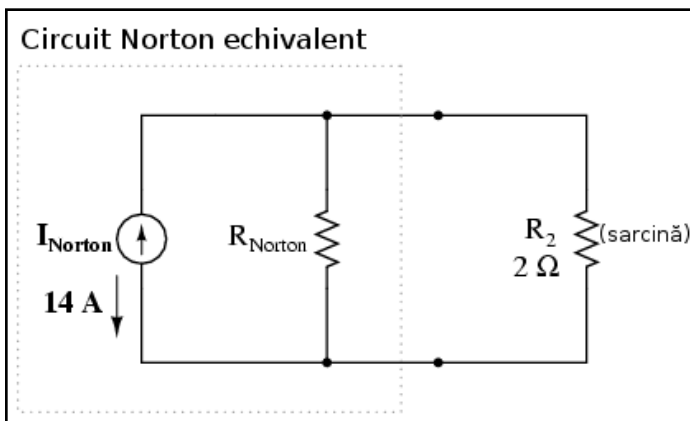


Primul pas este identificarea rezistenței de sarcină și înlăturarea acesteia din circuitul original.

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.

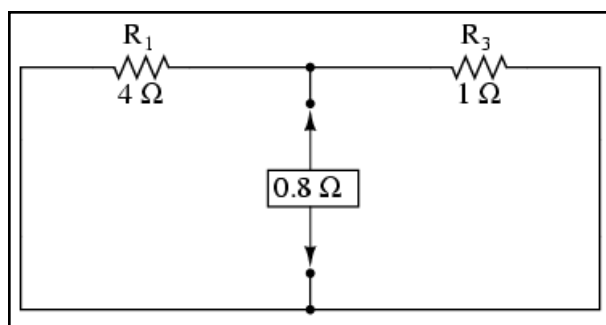


Acum că avem o cădere de 0 V între punctele de conexiune a sarcinii (înlăturate), înseamnă că valoarea curentului prin R_1 , în partea stângă a circuitului, depinde doar de tensiunea bateriei B_1 și de valoarea rezistorului R_1 : 7 A ($I = E / R$).

Același lucru este valabil și în partea dreaptă 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_{Norton}).

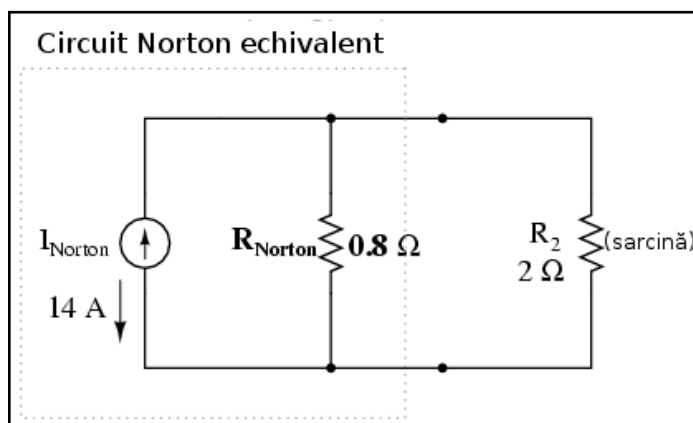
Din nou, direcția săgeții unei surse de curent este contrară deplasării reale a electronilor printr-un circuit, notație ce o folosim în această carte.

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 (2Ω), vom analiza circuitul Norton precum o conexiune paralelă simplă. În acest moment circuitul Norton echivalent arată astfel.

Mărime	R_{Norton}	$R_{sarcină}$	Total	Unitate
E	8	8	8	V
I	10	4	14	A

R	0,8	2	0,5	Ω

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

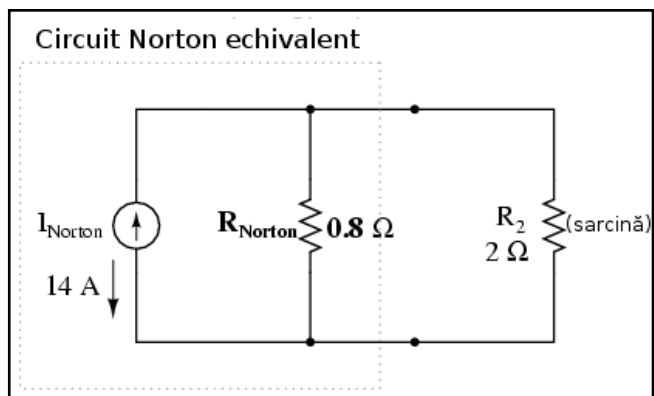
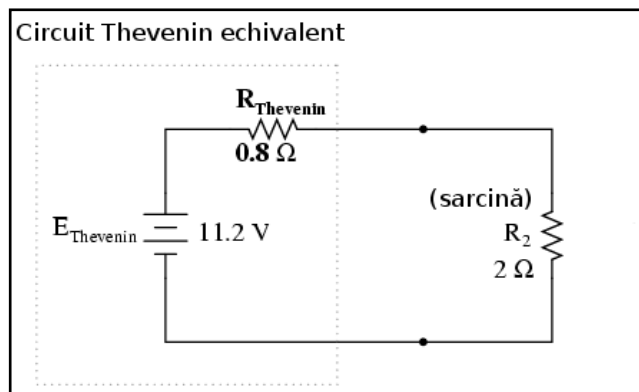
- Rezistențele Thevenin și Norton sunt egale
- Tensiunea Norton este egală produsul dintre curentul și rezistența Norton
- Curentul Norton este egal cu raportul dintre tensiunea și rezistența Thevenin

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 Ω , 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

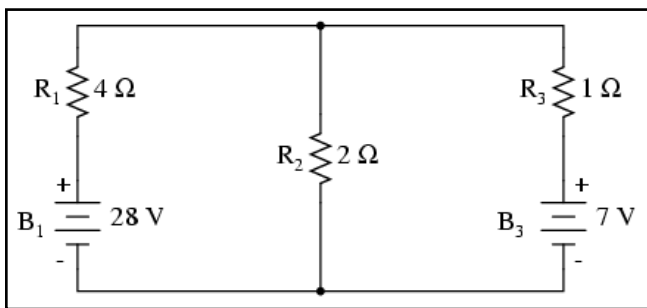
Ecuția teoremei lui Millman

$$\frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = E_{total}$$

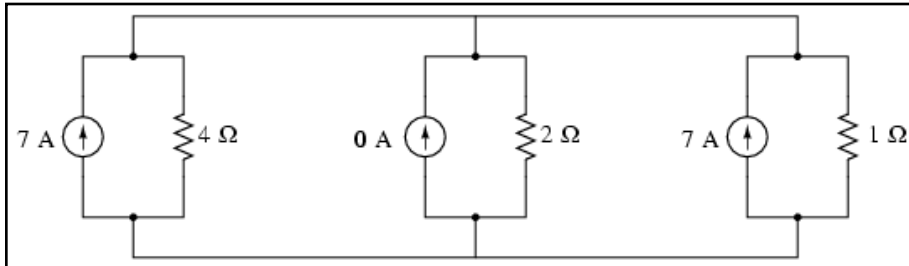
Revenim acum asupra teoremei lui Millman pentru a elucida forma „ciudată” a ecuației și proveniența acesteia.

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 Ω . Ramura din dreapta se transformă într-o sursă de curent de 7 A ($7 \text{ V} / 1 \Omega$) și un rezistor de 1 Ω 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 Ω .

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:

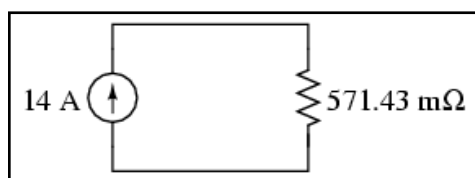
$$I_{total} = \frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3} \rightarrow \frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

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

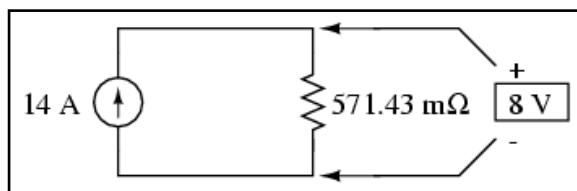


În cazul de față, rezistența totală este de 571.43 mΩ. Circuitul echivalent se poate acum redesena și conține doar o sursă (de curent) Norton și o singură rezistență Norton.

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

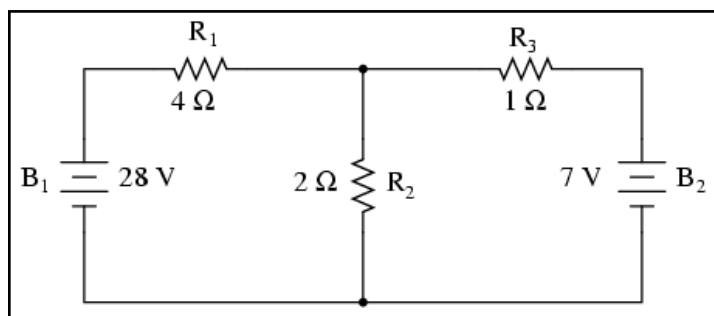
- Conform teoremei transferului maxim de putere, cantitatea de putere disipată pe o sarcină este maximă atunci când valoarea acestei rezistențe este egală cu rezistența Thevenin sau Norton a rețelei de alimentare a sarcinii

Definiție

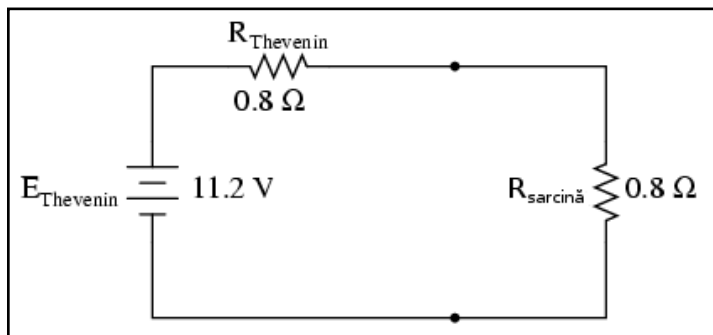
Teorema transferului maxim de putere nu este neapărat o metodă de analiza a rețelelor ci este folosită pentru optimizarea proiectării sistemelor. Pe scurt, puterea disipată pe o rezistență este maximă atunci când valoarea rezistenței este egală cu rezistența Thevenin/Norton a rețelei de alimentare. Dacă 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

Mărime	R_{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	Ω
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

Mărime	R_{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	Ω
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

Mărime	R_{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	Ω
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 0.8Ω .

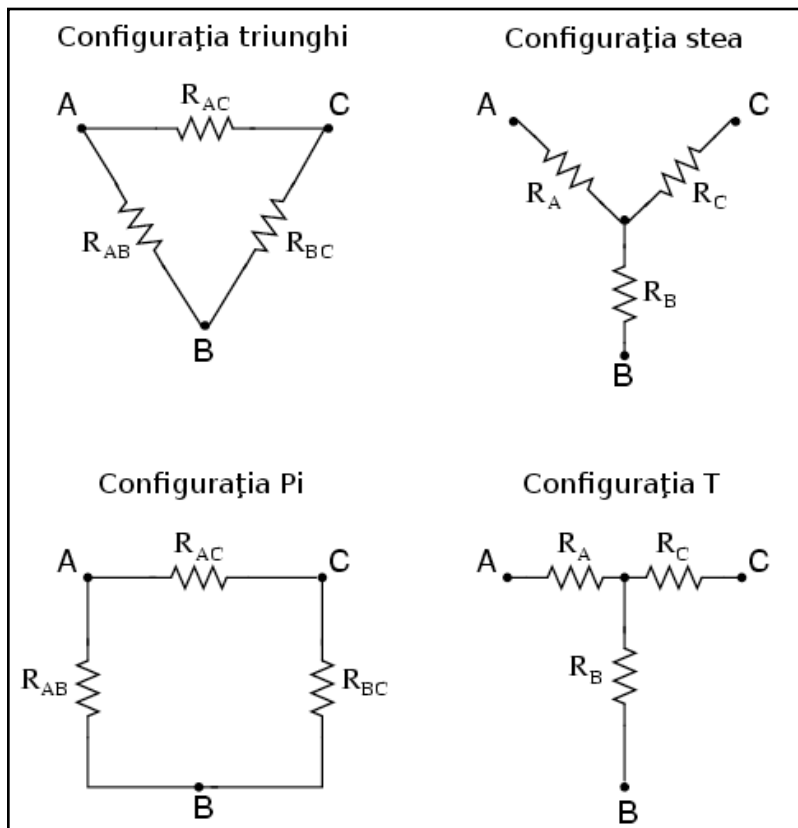
Utilizare

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 Δ (triunghi) mai sunt cunoscute și sub numele de π (Pi)
- Configurațiile Y (stea) mai sunt cunoscute și sub numele de T
- Atât configurațiile Δ 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 Δ în Y. Valorile căderilor de tensiune din circuitul Y sunt aceleași și în circuitul Δ 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 (Δ) cunoscută și sub numele de delta sau Pi (π) 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 (Δ sau Y) bazându-ne pe valorile rezistorilor celeilalte configurații, prin simpla analiză a conexiunilor terminalilor. Pe scurt, dacă avem două rețele de rezistori, una Δ și una Y, în cadrul căroră 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 Δ și Y se comportă identic.

Ecuatiile de transfigurare

Există câteva ecuații pentru transformare unei rețele în celelalte:

Transformarea Δ -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- Δ

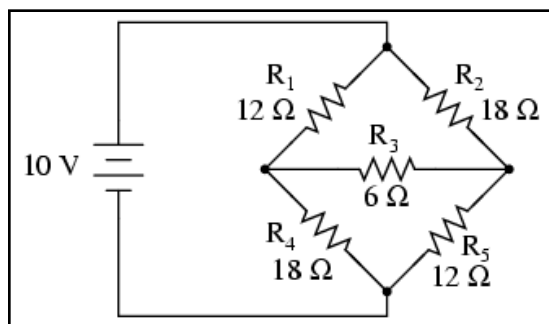
$$R_{AB} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_C}$$

$$R_{BC} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_A}$$

$$R_{AC} = \frac{R_A R_B + R_A R_C + R_B R_C}{R_B}$$

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.

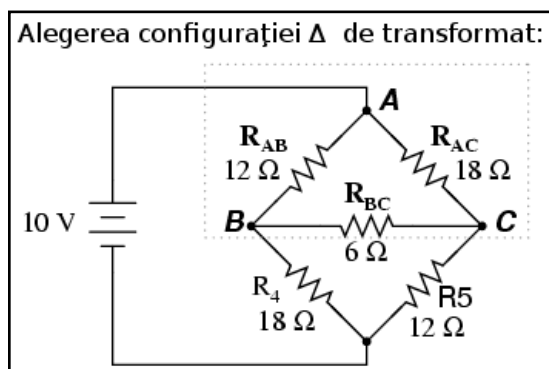
Aplicarea transformării Δ -Y punților dezechilibrate



O aplicație a transformării Δ -Y se găsește în cadrul circuitelor punte dezechilibrate, precum cel alăturat.

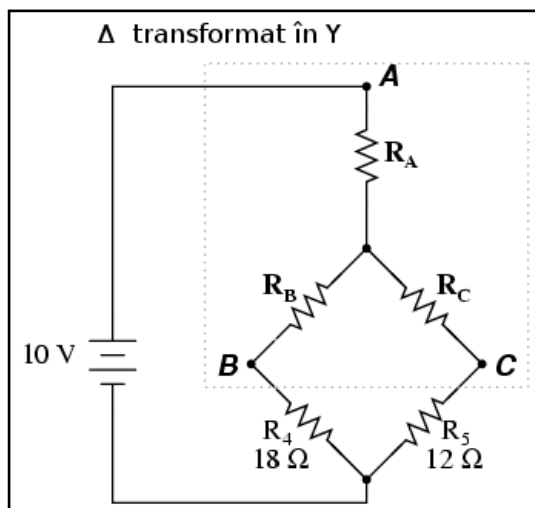
Rezolvarea acestui circuit folosind analiza curentului de ramură sau buclei de curent este destul de laborioasă, iar fiindcă există doar o singură sursă de putere, nici teoremele lui Millman sau superpoziției nu ne sunt de prea mare ajutor în acest caz. Putem folosi teorema lui Thevenin sau Norton considerând 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 Δ (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



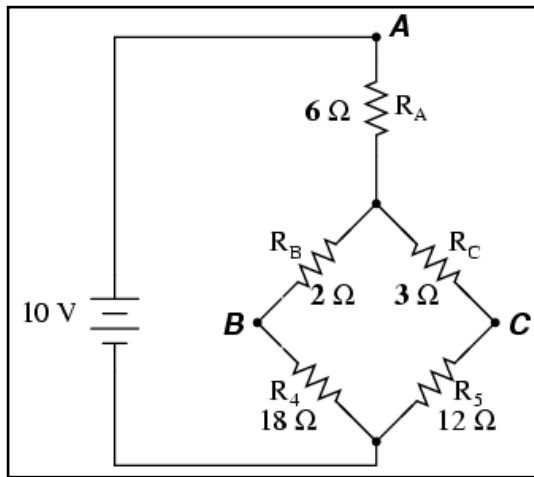
Determinarea valorilor rezistențelor

După efectuarea corectă a calculelor, căderile de tensiune între punctele A, B și C vor fi aceleași în ambele circuite:

$$R_A = \frac{12\ \Omega \cdot 18\ \Omega}{12\ \Omega + 18\ \Omega + 6\ \Omega} = \frac{216\ \Omega^2}{36\ \Omega} = 6\ \Omega$$

$$R_B = \frac{12\ \Omega \cdot 6\ \Omega}{12\ \Omega + 18\ \Omega + 6\ \Omega} = \frac{72\ \Omega^2}{36\ \Omega} = 2\ \Omega$$

$$R_C = \frac{18 \Omega \cdot 6 \Omega}{12 \Omega + 18 \Omega + 6 \Omega} = \frac{108 \Omega^2}{36 \Omega} = 3 \Omega$$



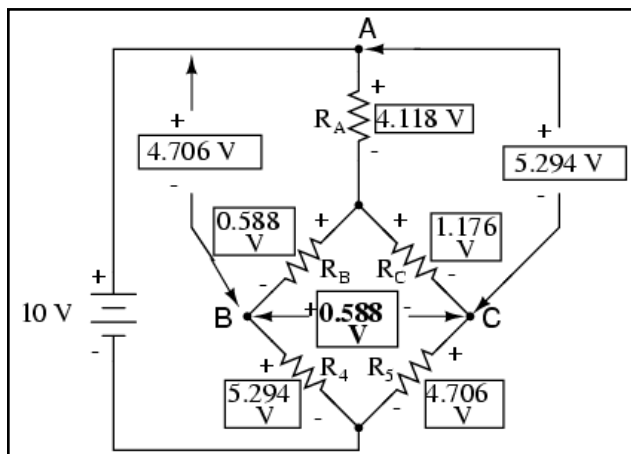
Analiza circuitului echivalent rezultat

Desigur, valorile rezistorilor R_4 și R_5 rămân aceleași, 18Ω respectiv 12Ω . 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	Ω

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	Ω

Determinarea căderilor de tensiune între punctele A, B și C



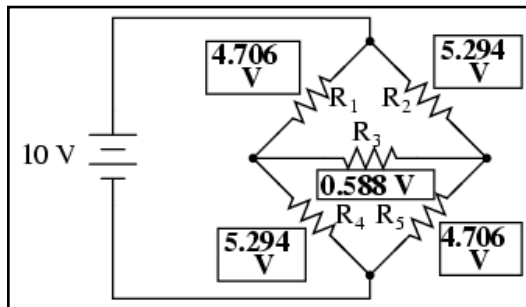
Folosim valorile căderilor de tensiune din tabelul de mai sus pentru determinarea căderilor de tensiune între punctele A, B și C, fiind atenți la adunarea sau scăderea lor (precum este cazul tensiunii între punctele B și C).

$$E_{A-B} = 4,70 \text{ V}$$

$$E_{A-C} = 5,29 \text{ V}$$

$$E_{B-C} = 0,58 \text{ V}$$

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

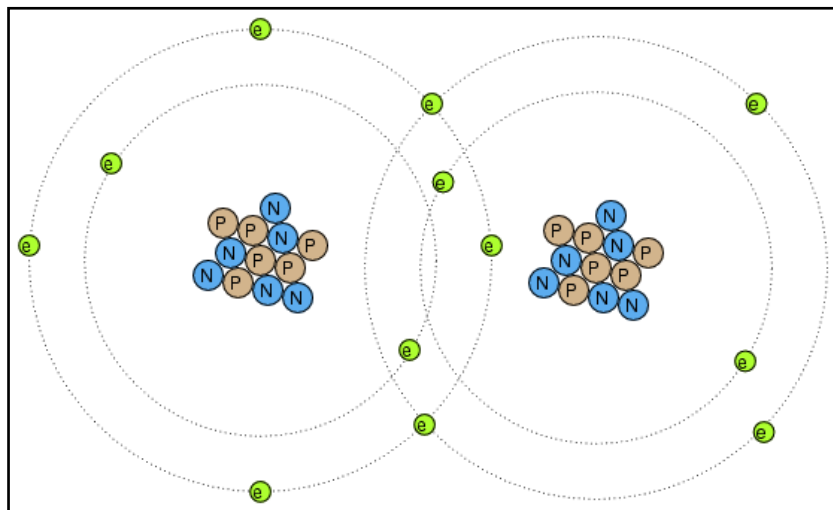
Până în acest moment nu am discutat în detaliu modul de funcționare al bateriilor, ci am presupus pur și simplu că acestea produc o tensiune constantă la bornele lor printr-un proces „misterios”. În cele ce urmează vom explora procesul în mare urmând să facem niște precizări cu privire la utilizarea 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

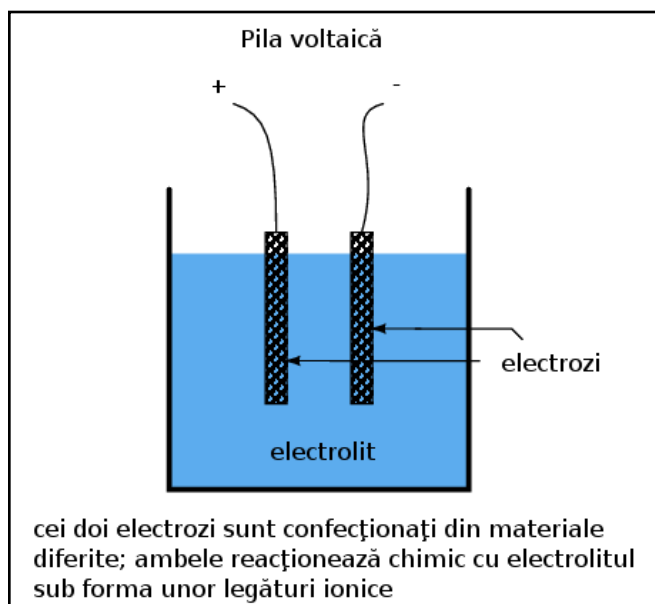
Însă, pentru studierea bateriilor, trebuie să introducem un alt tip de legătură chimică, cea ionică. Aceasta diferă față de legătura covalentă prin faptul că un atom al moleculei posedă un exces de electroni iar celălalt atom posedă un deficit de electroni; în acest caz, legătura dintre atomi este rezultatul 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:



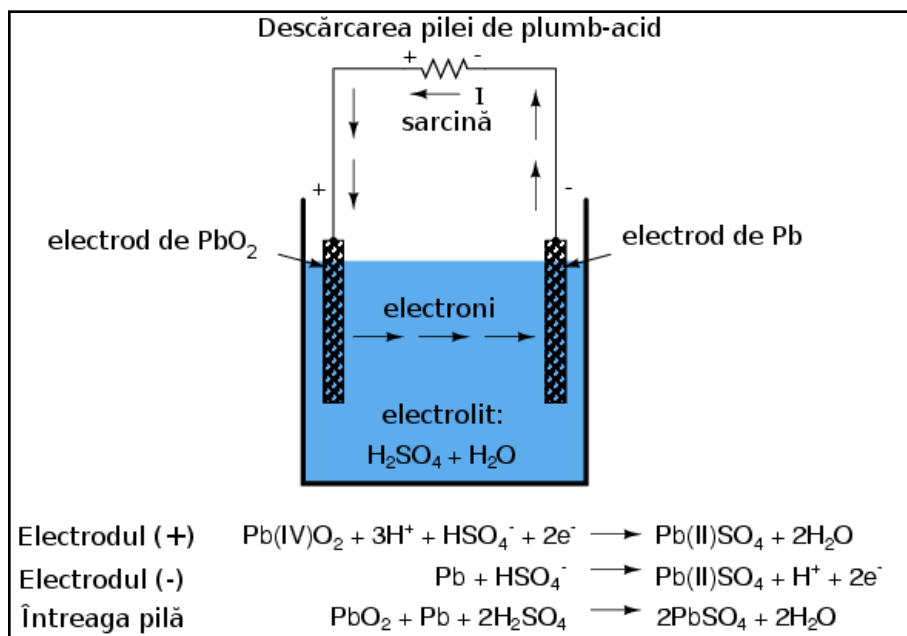
Sodiul pierde doar un electron, sarcina lui fiind +1 în exemplul de mai sus. Dacă un atom pierde mai mult de un electron, sarcina rezultată poate fi desemnată prin +2, +3, +4, etc. sau printr-o cifră romană în paranteze ce desemnează starea sa de oxidare (pierderea electronilor), astfel: (I), (II), (IV), 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) (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 (PbO_2) vor câștiga fiecare câte doi electroni pentru a produce Pb(II)O . Atomii de oxigen rezultați se vor combina cu ionii pozitivi de hidrogen (H^+) pentru formarea apei (H_2O). Această deplasare a electronilor spre electrodul PbO_2 îi conferă o sarcină pozitivă. Atomii de plumb din electrodul negativ cedează fiecare câte doi electroni pentru a produce plumb Pb(II) , care în combinație cu ionii de sulfat (SO_4^{2-}), produși prin disociația ionilor de hidrogen (H^+) din acidul sulfuric (H_2SO_4), formează sulfatul de plumb (PbSO_4). Deplasarea electronilor dinspre electrodul de plumb îi conferă sarcina electrică negativă. Aceste reacții sunt reprezentate alăturat.

Descărcarea pilei voltaice

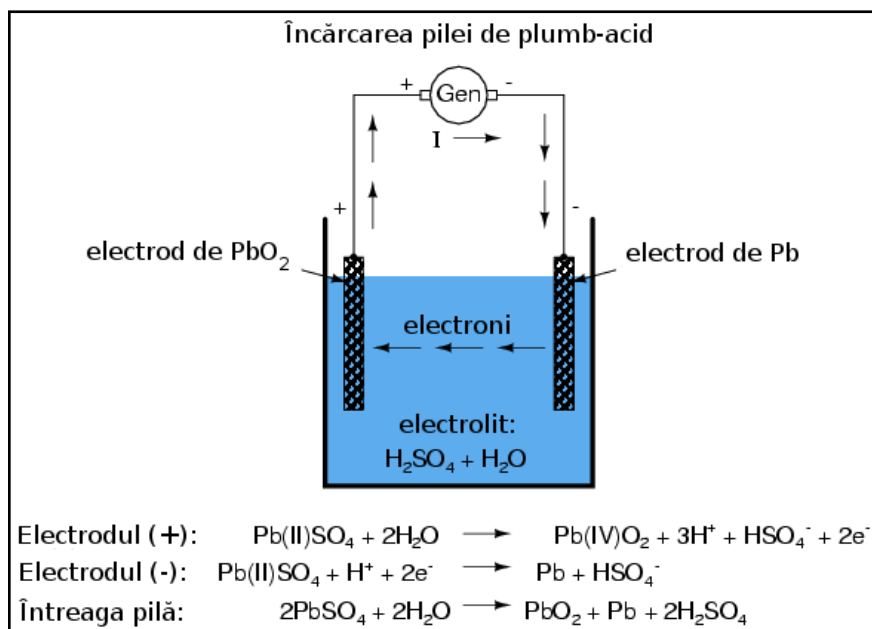
Acest proces prin care pila produce energie pentru alimentarea sarcinii se numește descărcare și provine de la faptul că aceasta își epuizează rezervele chimice interne în urma acestui proces. Teoretic, după ce întreaga cantitate de acid sulfuric se consumă, din pilă mai rămân cei doi electrozi de sulfat de plumb (PbSO_4) și o soluție electrolitică de apă pură (H_2O); 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.

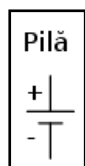
Încărcarea unei pile de plumb-acid printr-o sursă de curent externă duce la inversarea reacțiilor chimice din interiorul acesteia.

3. Bateriile electrice

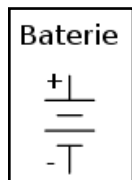
Definiție

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

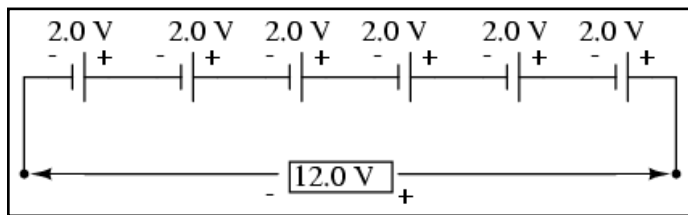


Simbolul unei pile constă din două linii paralele, una mai scurtă și una mai lungă, conectate la capete cu câte un fir.

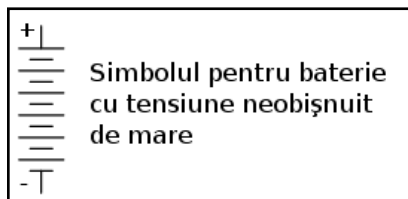


În aceeași ordine de idei, simbolul bateriei constă din mai multe pile conectate în serie.

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).

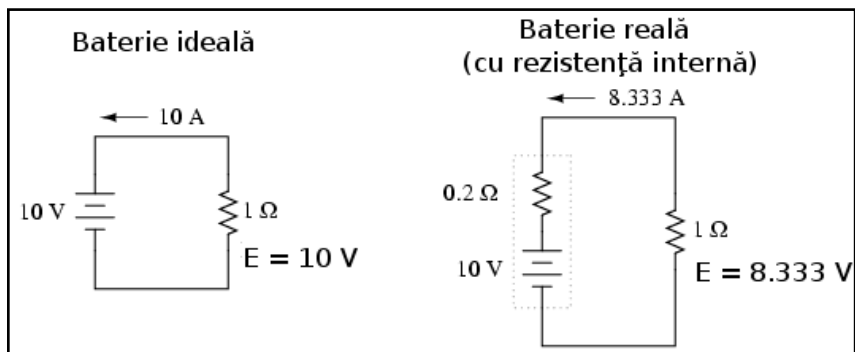


Ca și convenție, simbolul bateriei este desenat de obicei cu doar patru linii lungi/scurte, chiar dacă bateria reală este compusă din mai mult de patru pile. Totuși, se poate ca în unele cazuri să întâlnim un simbol al bateriei cu foarte multe linii lungi/scurte; folosim acest simbol pentru reprezentarea 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.

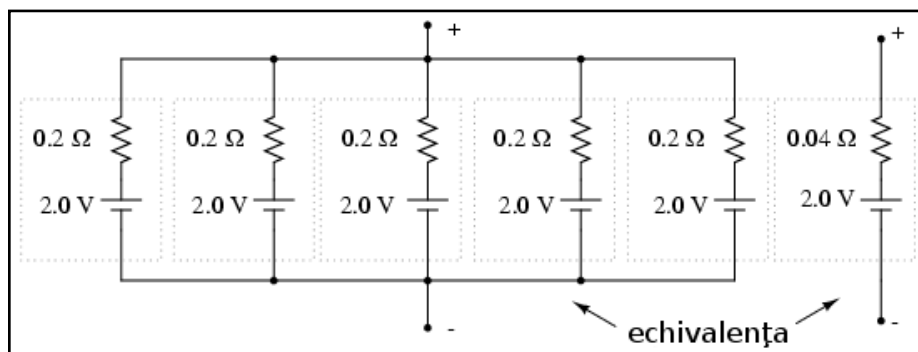
Bateria reală de mai sus posedă o rezistență internă de 0,2 Ω; acest lucru afectează performanța bateriei atunci când alimentează sarcina de 1 Ω. Bateria ideală din stânga nu are rezistență internă, și din această cauză, aplicarea legii lui Ohm ($I = E / R$) rezultă într-o valoare a curentului de 10 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 ($10 \text{ V} / 0,2 \text{ Ω}$) 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.

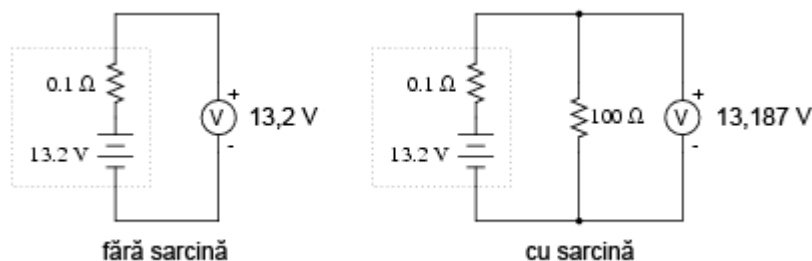
În concluzie, relația amper-oră este doar o aproximare ideală a unei baterii reale. Aceasta trebuie luată în considerare doar pentru valori apropiate de curent sau de timp specificate de producător. Unii producători specifică însă factori de reducere a capacității totale pentru funcționarea la curenți și/sau temperaturi diferite de cele standard.

Verificarea stării de încărcare a unei baterii

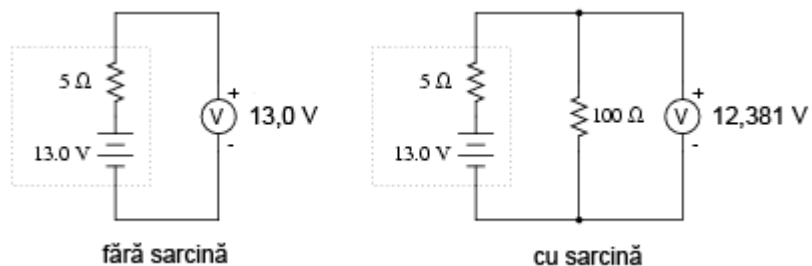
Pe măsură ce o baterie se descarcă, pe lângă diminuarea stocului de energie internă, crește și rezistența internă a acesteia. Electrolitul devine din ce în ce mai puțin conductiv iar tensiunea bateriei scade pe măsură ce substanțele chimice devin din ce în ce mai diluate. Cel mai înșelător efect al unei 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.

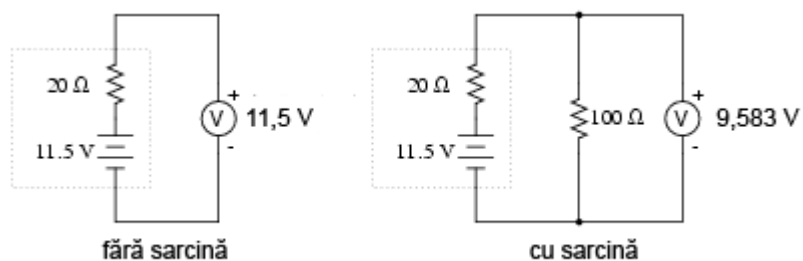
Scenariul pentru o baterie complet încărcată arată aproximativ astfel:



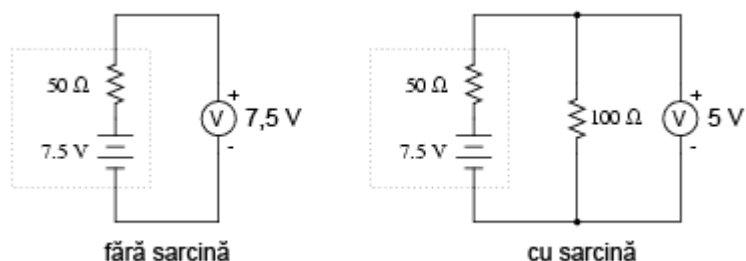
Dacă bateria se descarcă puțin:



Apoi puțin mai mult:



Și încă puțin până când este complet descărcată:

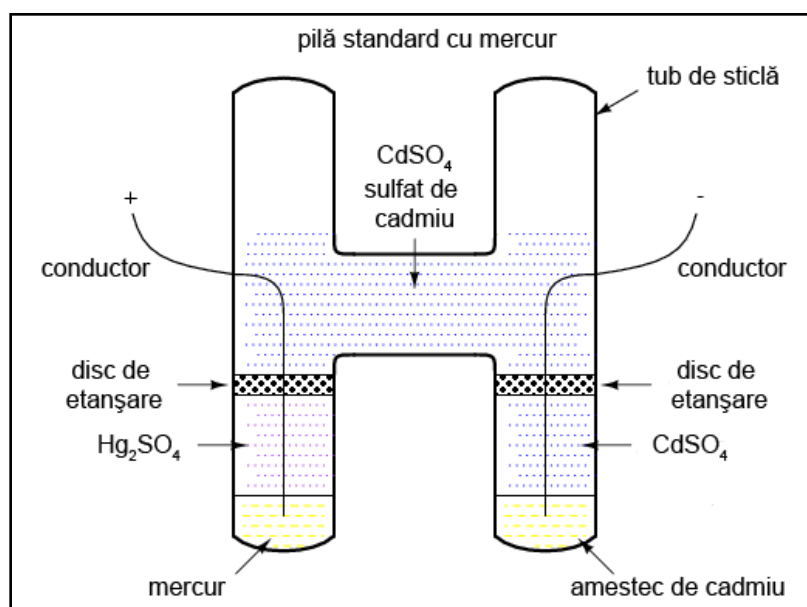


Observați diferența dintre valoarea tensiunii măsurată cu ajutorul voltmetrului în funcție de conectarea sau neconectarea bateriei la o sarcină. Înseamnă oare acest lucru că este inutil să verificăm o baterie doar cu ajutorul unui voltmetru (fără sarcină)? Nu chiar. Dacă un voltmetru simplu indică o 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.

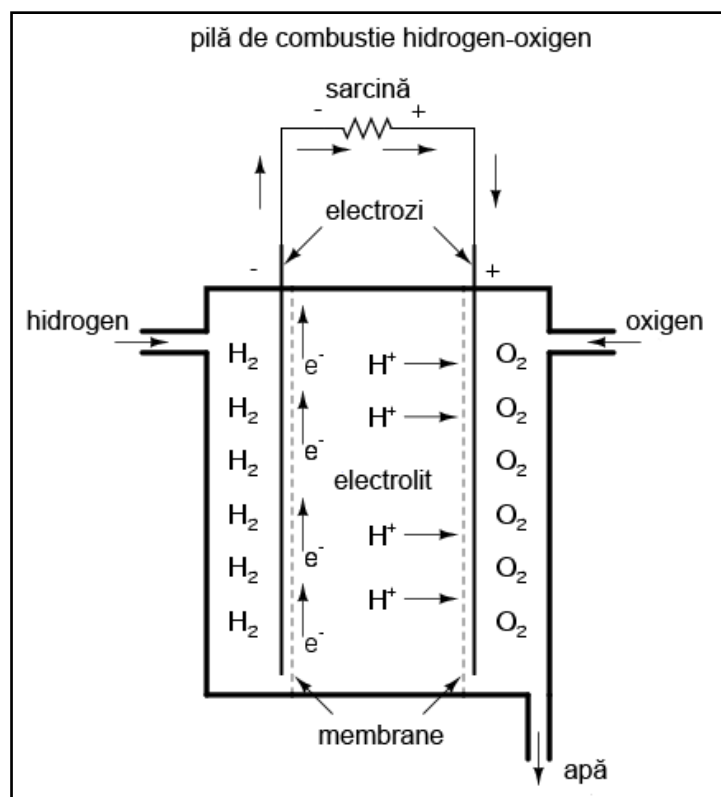
Există două tipuri de pile standard cu mercur, în funcție de nevoile de calibrare: saturate și nesaturate. Pilele standard saturate oferă cea mai bună stabilitate a tensiunii în timp, suferind în schimb de o instabilitate termică. Cu alte cuvinte, variația tensiunii este neglijabilă în timp (o variație 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 μV 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



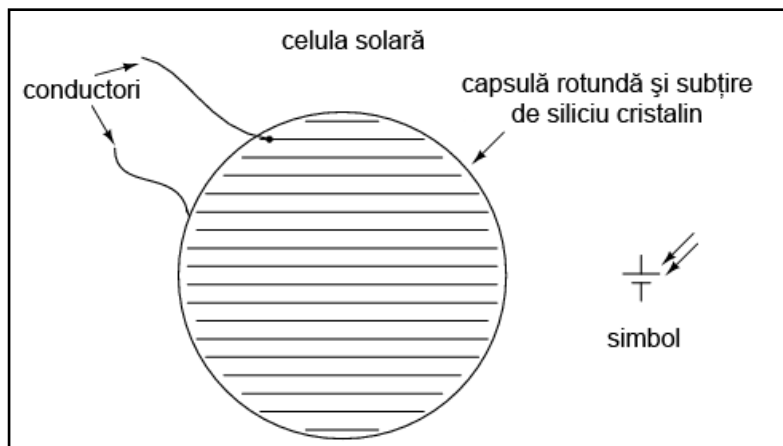
reacția chimică de combustie (ardere) pentru generarea unui curent electric. Procesul de oxidare chimică (formarea legăturilor ionice ale oxigenului cu alte elemente) poate produce o deplasare de electroni între doi electrozi asemănător unei combinații de metale și electroliti. O pilă de combustie este 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

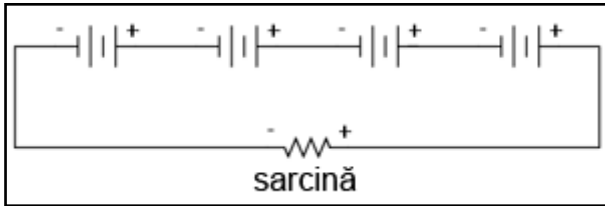
Un alt tip de „baterie” specială este pila chimică de detecție. Pe scurt, aceste pile reacționează chimic cu o substanță specifică din mediul lor ambiant (din aer) pentru a crea o cădere de tensiune proporțională cu concentrația substanței respective. O aplicație practică a unei pile chimice de detecție 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 contaminează 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:

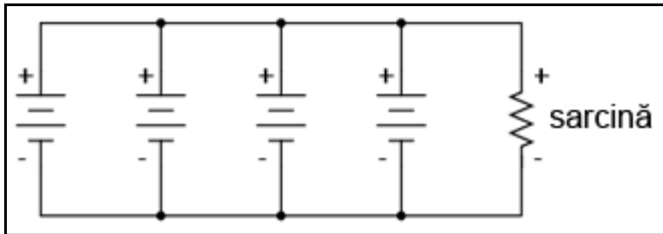


Cunoaștem faptul că valoarea curentului într-un circuit serie este aceeași în toate punctele. Oricare ar fi valoarea curentului în circuit, aceasta trebuie să fie aceeași prin fiecare baterie. Din acest motiv, toate bateriile trebuie să fie egale din punct de vedere al valorii amper-oră (Ah). În caz 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:

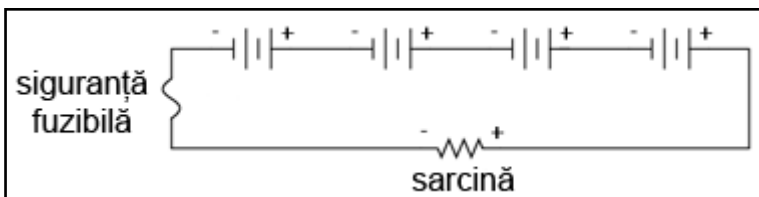


Cunoaștem faptul că într-un circuit paralel, căderea de tensiune este egală pe toate ramurile. Trebuie să ne asigurăm așadar că tensiunea acestor baterii este egală. În caz contrar, vor exista curenți relativ mari de la o baterie spre alta, bateriile cu o tensiune mai mare

dominând bateriile cu tensiune mai mică. Acest lucru nu este de dorit.

Protejarea bateriilor cu siguranțe fuzibile

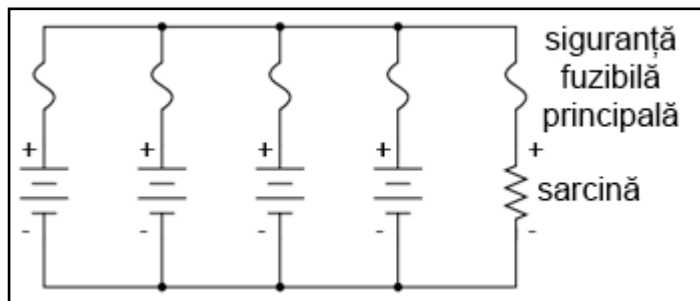
În aceeași ordine de idei, trebuie să ne asigurăm că orice elemente de protecție la supracurent (siguranțe fuzibile sau întrerupătoare automate) sunt instalate astfel încât să fie eficiente. Pentru circuitul serie de mai sus, o singură siguranță fuzibilă este suficientă pentru protecția la supracurent 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.

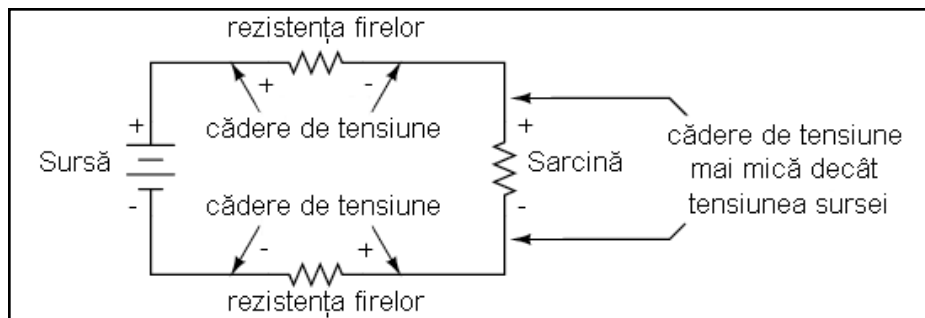
Toate metalele sunt bune conductoare de electricitate

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

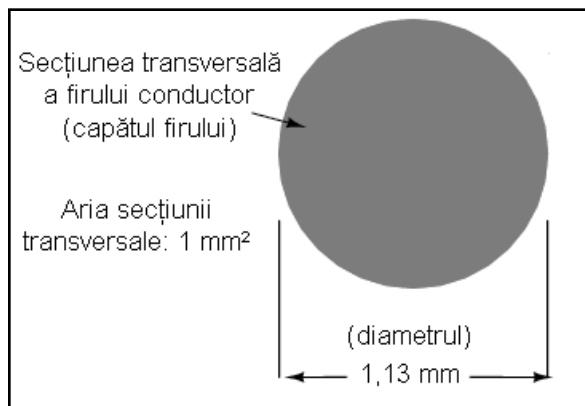
Diametrul conductorilor și deplasarea electronilor

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 mm²:

$$A = \pi r^2 = 3,14 \cdot \left(\frac{1,13}{2}\right)^2 = 1 \text{ mm}^2$$

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

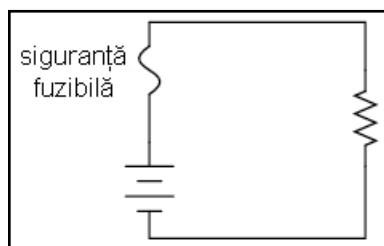
- Siguranța fuzibilă este un conductor electric subțire, proiectat a se topi și separa în două părți, cu scopul de a deschide un circuit în cazul apariției unor supra-curenți
- Întrerupătorul automat este un întrerupător special conceput pentru deschiderea automată a circuitului în cazul apariției unui 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 înterupătoare proiectate special pentru deschiderea automată și oprirea alimentării cu energie electrică în cazul apariției unui supra-curent. Înterupătoarele 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.

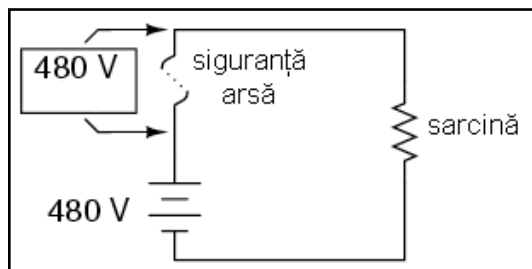
Atunci când forța generată de bandă este suficient de mare (datorită supra-curentului ce o încălzește), mecanismul de înterupere este acționat iar înterupătorul va deschide circuitul. Înterupătoarele automate mai mari, sunt acționate de forța câmpului magnetic produs de conductoarele străbătute de curent 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.

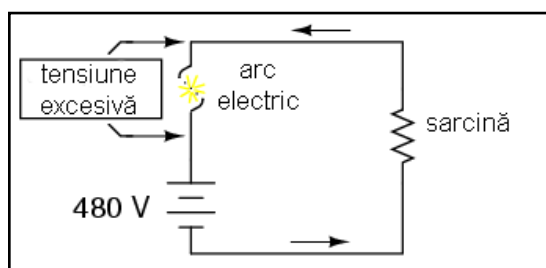
La fel cum amperajul unui conductor nu depinde de lungimea sa, un fir folosit pentru construirea siguranței fuzibile se va topi la un anumit curent indiferent de lungimea acestuia. Din moment ce lungimea nu reprezintă un factor pentru capacitatea maximă în curent a siguranței, cu cât această lungime 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

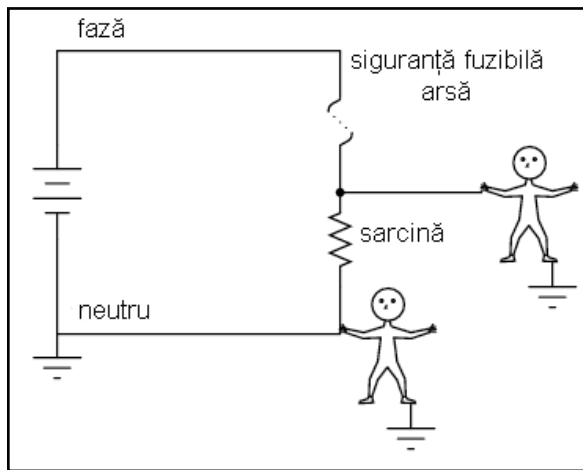
La apariția unui curent de 35 A printr-o siguranță fuzibilă de 30 A, aceasta se poate arde instant sau poate prezenta o anumită durată de timp până la topirea conductorului metalic, în funcție de tipul dispozitivului. Unele siguranțe sunt proiectate să se ardă extrem de repede, pe când altele necesită 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.

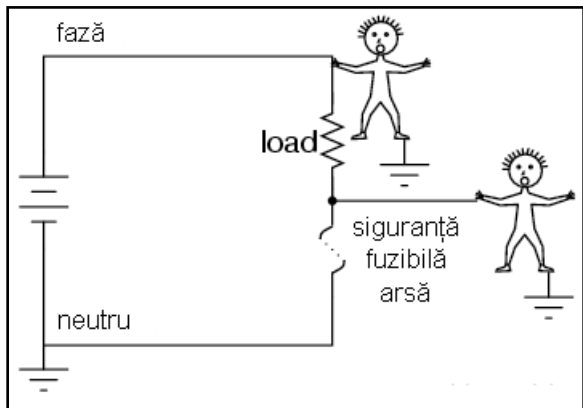
Pe de altă parte, există siguranțe fuzibile semiconductoare, proiectate pentru o deschidere extrem de rapidă în cazul apariției unei situații de supra-curent. Dispozitivele semiconductoare, precum tranzistorii, tind să fie foarte sensibile la supra-curenți, prin urmare, în cazul acestora este nevoie 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 aceleași 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 siguranță 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.

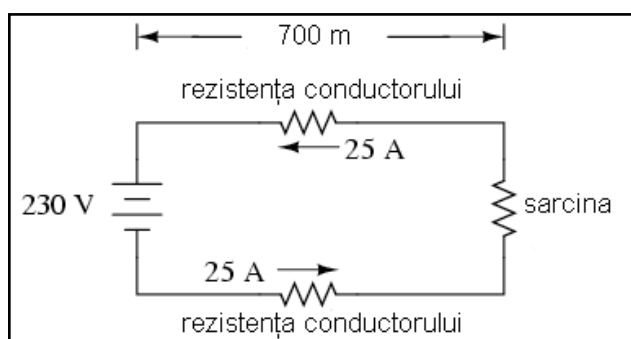
Din moment ce valorile curenților necesari pentru electrocutare sunt mult mai mici decât curenții normali a sarcinilor din circuit, o condiție de supra-curent nu indică neapărat un pericol de electrocutare, ci aceasta poate apărea chiar și atunci când circuitul funcționează la parametrii normali. Desigur, 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 (ρ) este o proprietate a ~~unui~~ ^{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 ρ (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:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$A = \rho \frac{l}{R} = 1,67 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \cdot \frac{700 m}{0,2 \Omega} = 58,4 \text{ mm}^2$$

O secțiune transversală de $58,4 \text{ mm}^2$, 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 $58,4$ 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 σ (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 (α) 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 bănui, 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

α = coeficientul de temperatură al rezistenței specific pentru materialul conductor

T = temperatura conductorului (°C)

T_{ref} = temperatura de referință pentru care α 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: $R = \rho l/A$.

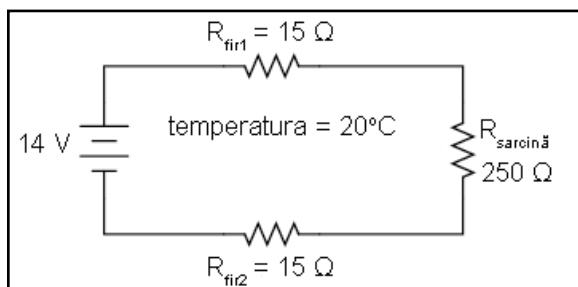
Definirea coeficientului de temperatură

Constanta α , 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	α
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	± 0.000015
Constantan	Aliaj	- 0.000074

În tabelul alăturat sunt prezentate câteva valori ale coeficientului α pentru câteva metale uzuale, pure sau aliaje, pentru temperatura de referință (T_{ref}) de 20°C

Exemplu



Să luăm un circuit practic pentru a vedea efectele temperaturii asupra rezistenței și implicit asupra performanței circuitului.

Mărime	Fir ₁	Fir ₂	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 ₁	Fir ₂	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 Ω , 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 inerentă 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.

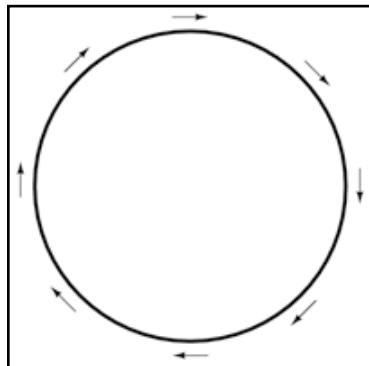
Efectul Meissner

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 străpunerii 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 străpunerii.

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 magneti (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

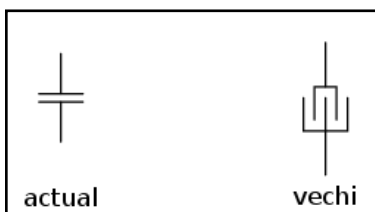
- Condensatorii reacționează împotriva variației tensiunii prin generarea sau utilizarea de curent în/din circuit în direcția necesară opunerii variației
- Când tensiunea la bornele unui condensator crește (alimentat de o baterie, de ex), aceasta se comportă precum o sarcină
- Când tensiunea la bornele 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.

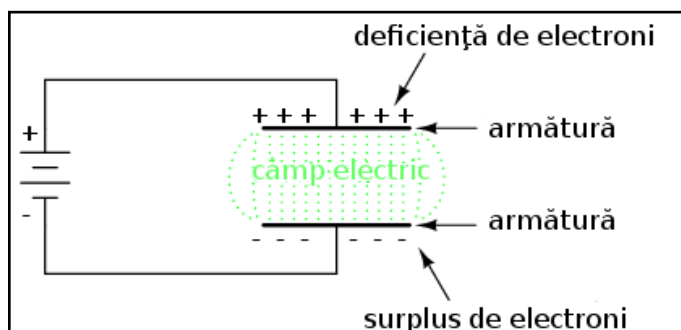
Condensatoarele sunt componente ce utilizează acest fenomen electric în funcționarea lor. Acestea sunt realizate din două armături (plăci) metalice conductoare plasate una în apropierea celeilalte, separate printr-un dielectric. Există totuși o multitudine de tipuri și moduri de construcție a condensatoarelor, 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.

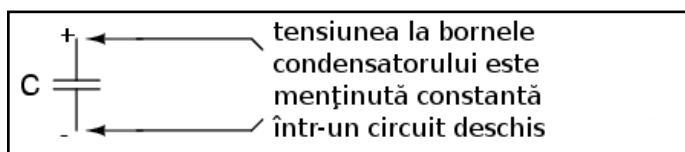
Pe măsura formării câmpului electric datorită aplicării tensiunii, electronii liberi vor fi forțați să se „adune” la terminalul negativ fiind „furați” de pe terminalul pozitiv. Această diferență de sarcină se traduce prin apariția unui stoc de energie electrică în condensator și reprezintă sarcina potențială 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.”

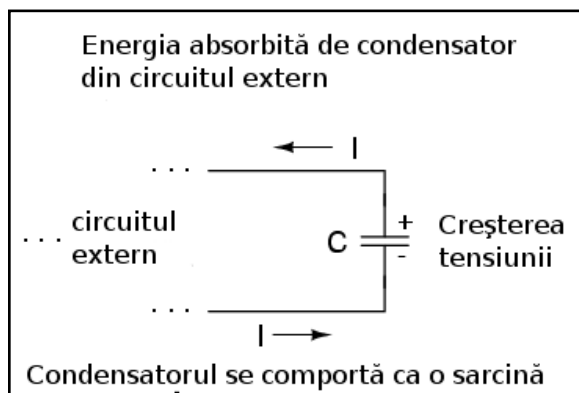


Ipoteză, un condensator (încărcat sau descărcat) lăsat neatins își va menține la infinit starea sa inițială. Doar o sursă (sau un canal) exterior de curent poate modifica

valoarea energiei stocate (implicit și a tensiunii la bornele sale) de către un condensator perfect.

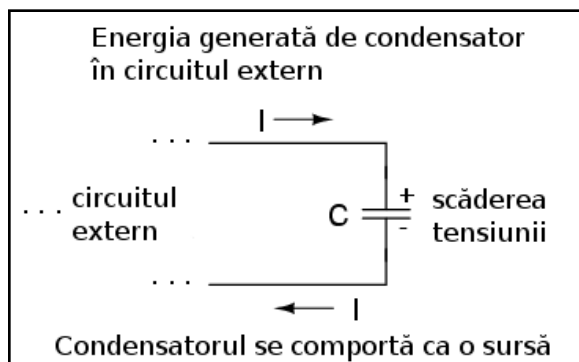
Practic, condensatoarele își vor pierde tensiunea stocată datorită imperfecțiunilor interne ce permit electronilor să se deplaseze de pe o armătură pe cealaltă. În funcție de tipul specific de condensator, timpul de „golire” poate fi foarte lung, de până la câțiva ani, pentru condensatoarele ce nu sunt 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 (μF).

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

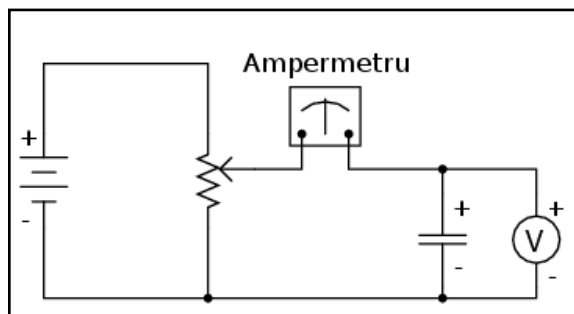
Litera „ i ” semnifică curentul instantaneu, adică valoarea curentului la un anumit moment din timp. Acest lucru este în contrast cu valoarea constantă a curentului, sau curentul mediu („ I ”) pe o perioadă de timp nedefinită. Expresia „ dv/dt ” reprezintă derivata vitezei în raport cu timpul, expresie 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

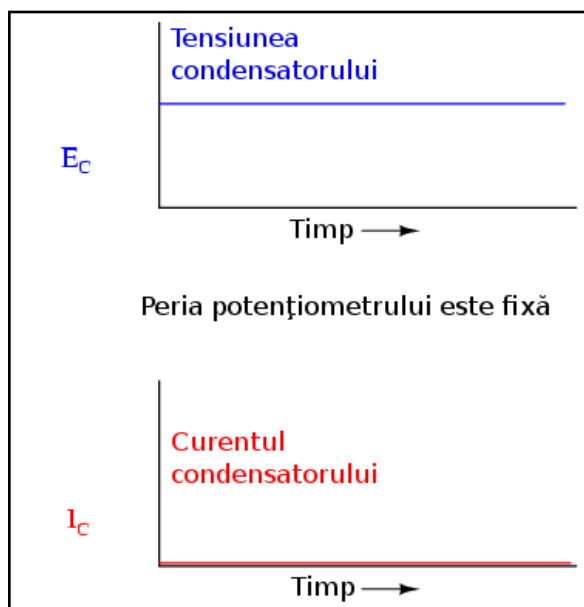
Până în acest moment nu am mai întâlnit variabila timp în studiul circuitelor electrice. Atunci când am vorbit de valori ale tensiunilor, curenților și rezistențelor rezistorilor, ne-a fost indiferent dacă măsurătorile au fost făcute pe o perioadă de timp nespécificată ($E = IR$; $V = IR$) sau la un 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.

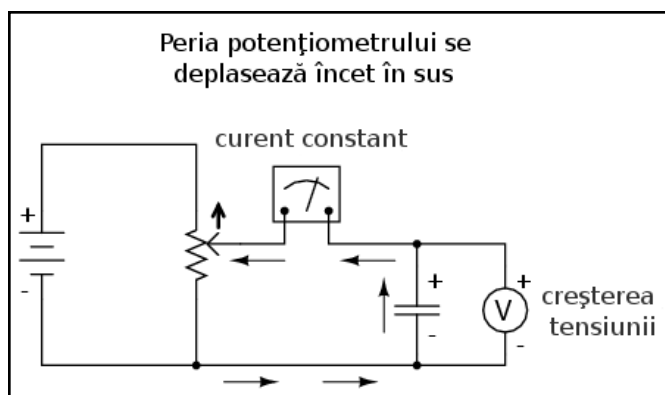
Peria potențiometrului este fixă



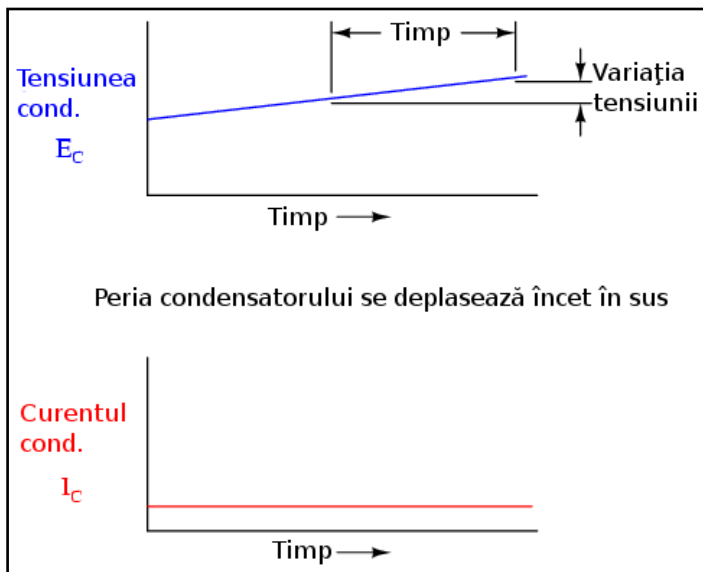
Dacă potențiometrul rămâne în aceeași poziție (peria este fixă), voltmetrul conectat la bornele condensatorului va înregistra o tensiune constantă iar ampermetrul va înregistra 0 A.

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



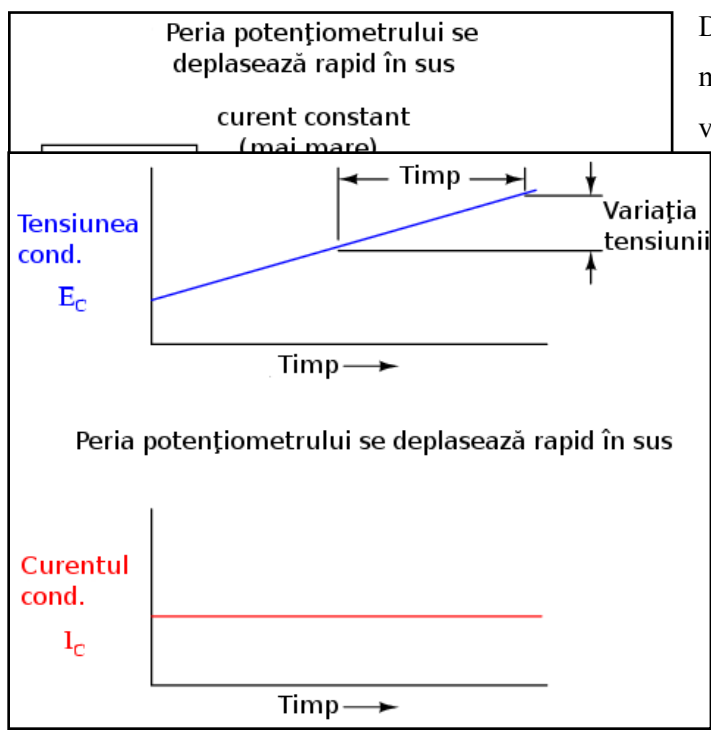
Dacă în schimb, peria potențiometrului se deplasează în mod constant în „sus” (spre borna pozitivă), căderea de tensiune pe condensator va fi din ce în ce mai mare. Voltmetrul înregistrează o creștere constantă a tensiunii indicate.



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.

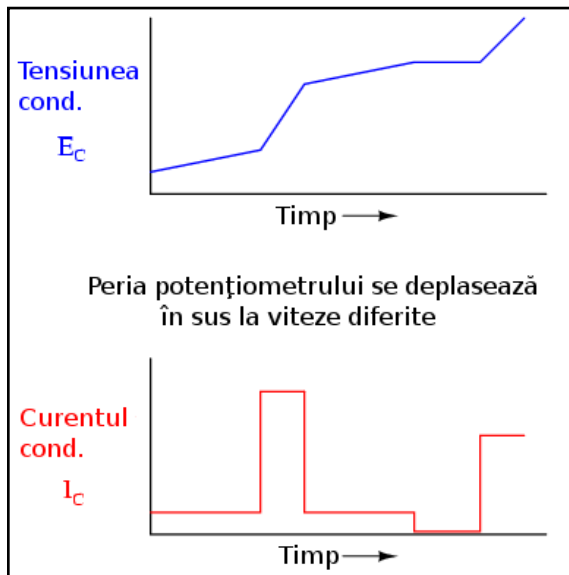
Creșterea ratei de deplasare a periei potențiometrului



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.

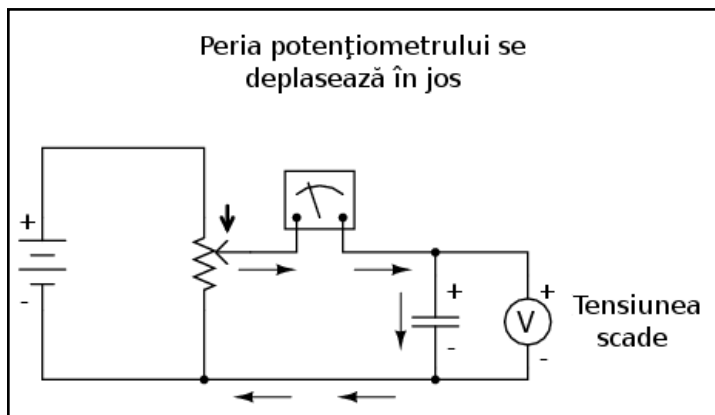
Deplasarea variabilă a periei potențimetrului



Să luăm acum un alt exemplu. Dacă de data aceasta deplasăm peria potențimetrului 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 potențimetrului 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 potențimetrului



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.

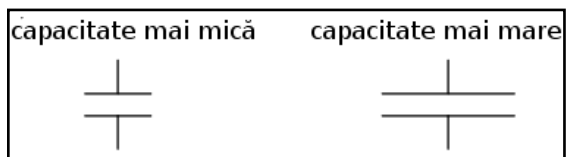
Din nou, cantitatea de curent prin condensator este direct proporțională cu rata de variație a tensiunii la bornele sale. Singura diferență între scăderea și creșterea tensiunii este direcția de deplasare a electronilor (direcția curentului). Pentru o aceeași rată de variație a tensiunii cu timpul, valoarea 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.

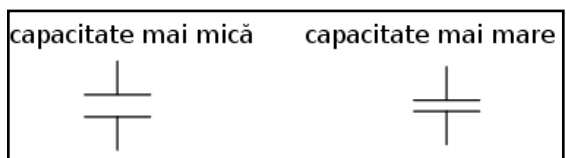
Aria armăturilor



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).

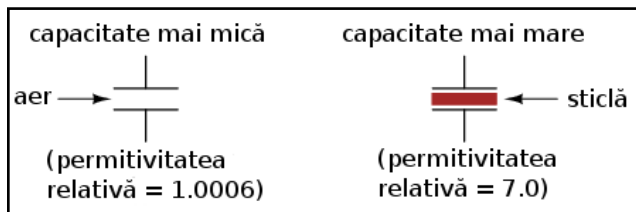
Distanța dintre armături



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)

ε = permitivitatea absolută a dielectricului (F/m)

A = aria de suprapunere a armăturilor (m²)

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

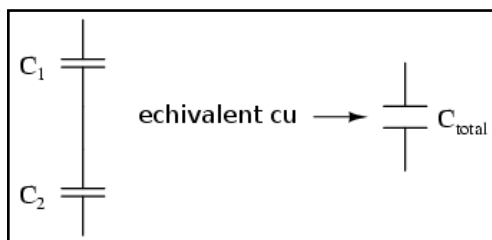
După modul de construire al condensatorului acesta poate fi fix (discutat mai sus), sau poate fi variabil. Cel mai ușor factor de exploatat în cazul celor variabile este aria armăturilor, sau mai bine spus, aria de suprapunere a lor.

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.

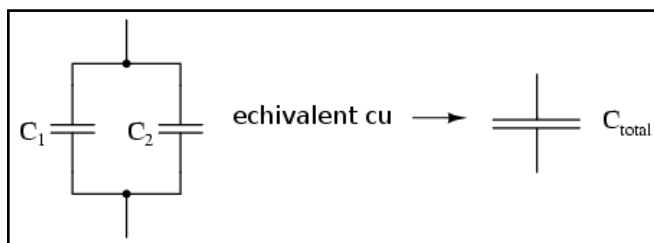
Dacă doi sau mai mulți condensatori sunt conectați în serie, efectul rezultat este cel al unui condensator (echivalent) având distanța dintre armături egală cu suma distanței dintre armăturile tuturor condensatorilor individuali. După cum am văzut în secțiunea precedentă, o creștere a distanței dintre 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:

$$C_{total} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

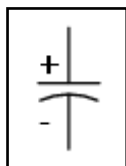
6. Considerații practice (condensatorul)

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.

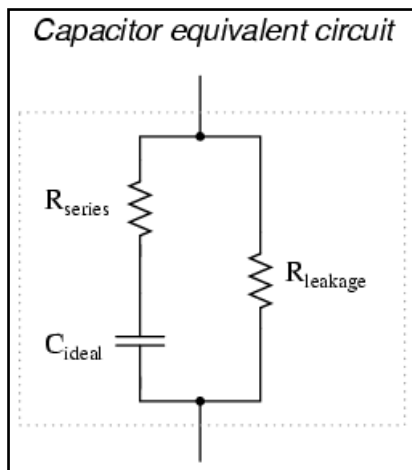
Unele condensatoare sunt construite astfel încât să suporte aplicarea unei tensiuni de o anumită polaritate. Acest lucru se datorează modului lor de realizare: dielectricul reprezintă un strat microscopic de material izolator depus pe una dintre armături prin intermediul unei tensiuni de curent continuu. 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

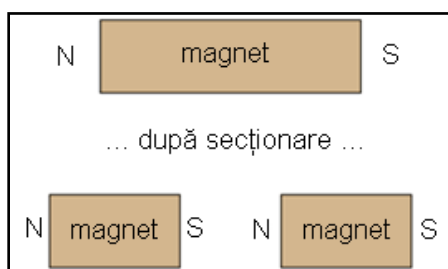
- Magnetul natural sau magnetitul este un magnet permanent natural. Prin permanent se înțelege faptul că materialul poate menține câmpul magnetic fără niciun ajutor extern. Proprietatea oricărui material de a realiza acest lucru se numește *remanență*

- 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.

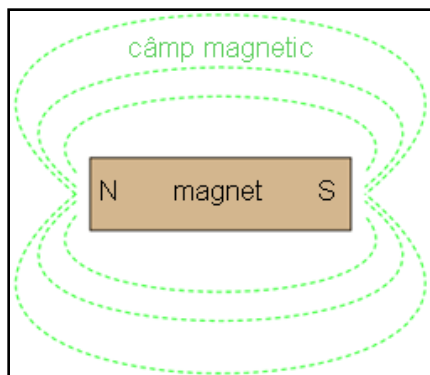
Polul nord și polul sud al materialelor magnetice



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.

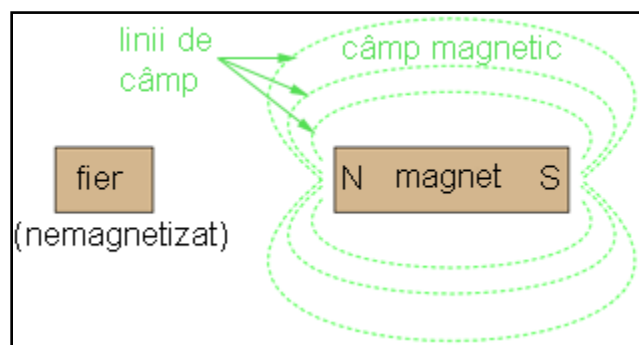
Forța, fluxul și liniile de câmp

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

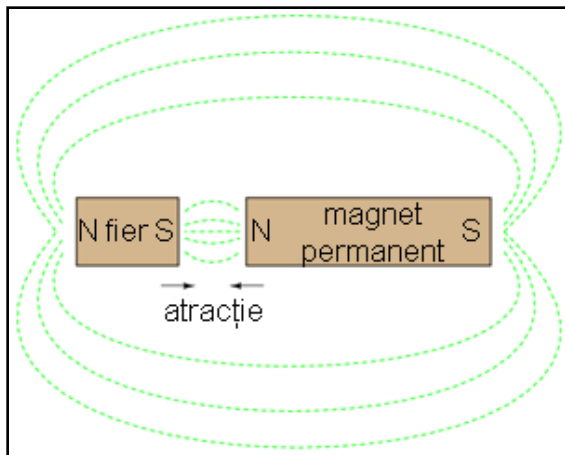
Teoria modernă a magnetismului susține că producerea câmpului magnetic se datorează sarcinii electrice aflate în mișcare; acest lucru ar însemna că acest câmp magnetic „permanent” al magneților este de fapt rezultatul mișcării uniforme în aceeași direcție a electronilor din interiorul atomilor de fier. 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”.

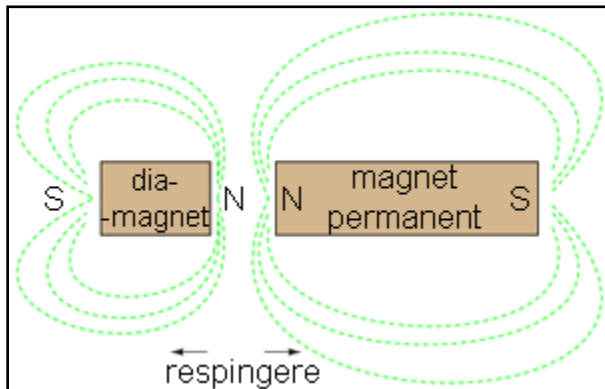
Magnetizarea fierului se realizează astfel încât să încorporeze liniile câmpului magnetic în forma sa, ceea ce se traduce printr-o atracție față de magnetul permanent indiferent de orientarea acestuia față de corpul de fier.



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

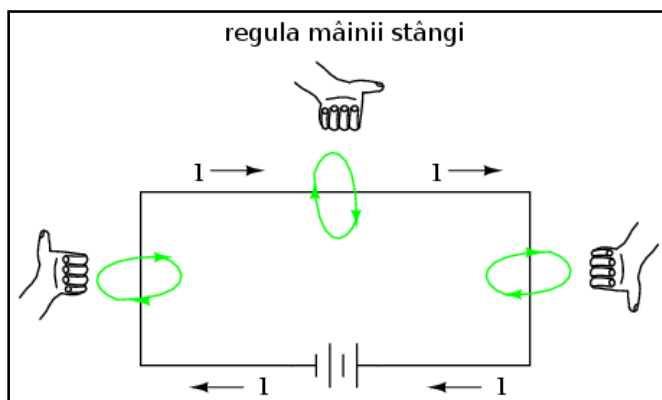
- Regula mâinii stângi spune că liniile câmpului magnetic produse de un conductor traversat de curent electric vor fi orientate în direcția degetelor închise ale mâinii stângi atunci când degetul mare indică direcția deplasării electronilor.
- Forța câmpului magnetic produs de un conductor traversat 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

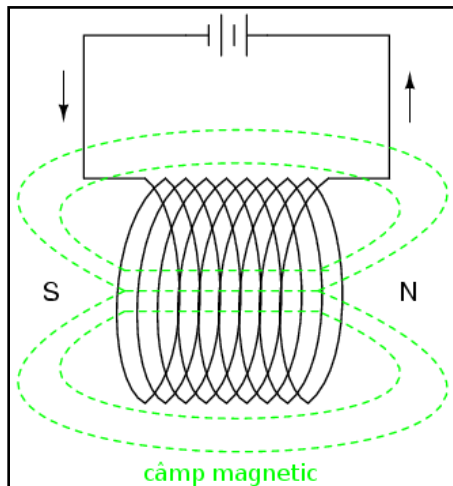


Experimente detaliate au arătat că orientarea câmpului magnetic produs de un curent electric este tot timpul perpendiculară direcției de curgere.

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.

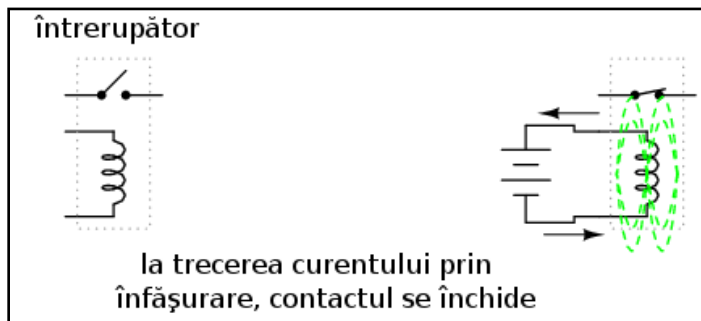
Valoarea forței magnetice generate de o astfel de buclă este proporțională cu produsul dintre valoarea curentului prin fir și numărul efectiv de bucle formate. Această forță este denumită forță magnetomotoare (mmf) și este similară forței electromotoare (E) dintr-un circuit electric.

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.

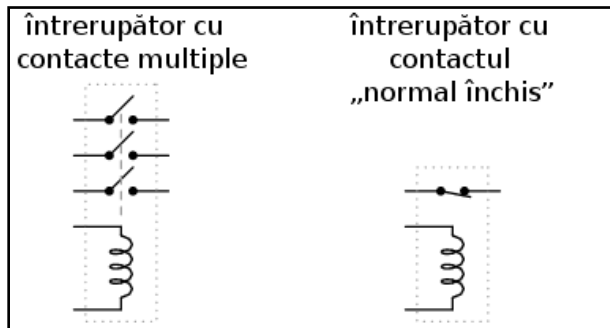
Probabil că cel mai bun exemplu de utilizare al electromagneților este motorul electric.

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	Φ	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	μ	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

$$R = \rho \frac{1}{A}$$

Rezistența magnetică

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu A}$$

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.

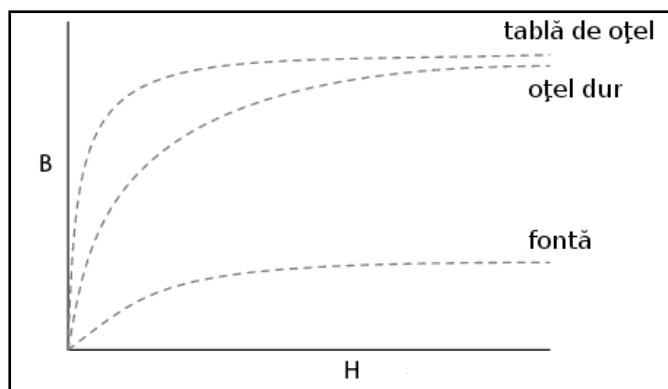
Un lucru important de remarcat este că reluctanța unui material la fluxul magnetic este afectată de concentrația liniilor de câmp ce trec prin el. Acest lucru face ca legea lui Ohm pentru circuitele magnetice să aibă

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 (Φ) (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.

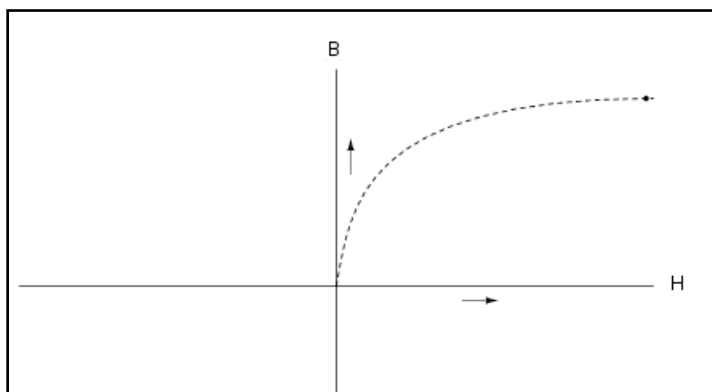
Saturația este un fenomen întâlnit doar în cazul electromagneților cu miez de fier. Electromagneții cu miez de aer nu se saturează, dar, pe de altă parte, nici nu produc valori așa de mari ale fluxului magnetic pentru același număr de spire (bucle) și aceeași valoare a curentului.

Histerezisul

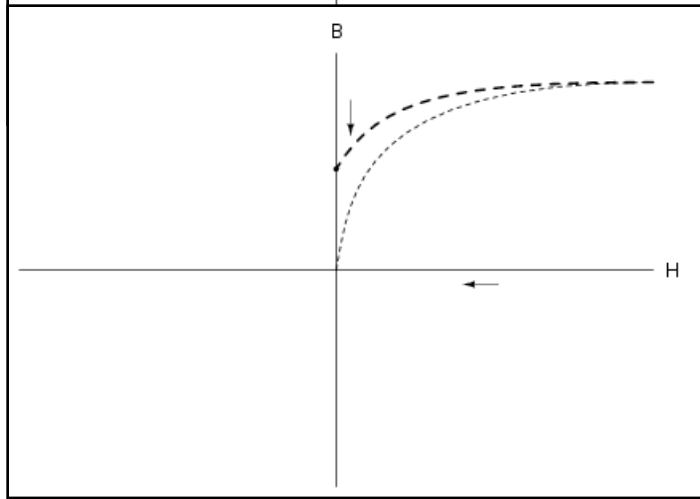
Un alt fenomen al analizei curbelor de magnetizare este cel de histerezis. Ca și termen general, histerezisul înseamnă că ieșirea sistemului nu reflectă instant valorile de intrare; pe scurt, putem spune ca sistemul în cauză posedă memorie. Într-un sistem magnetic, acesta se caracterizează prin faptul 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



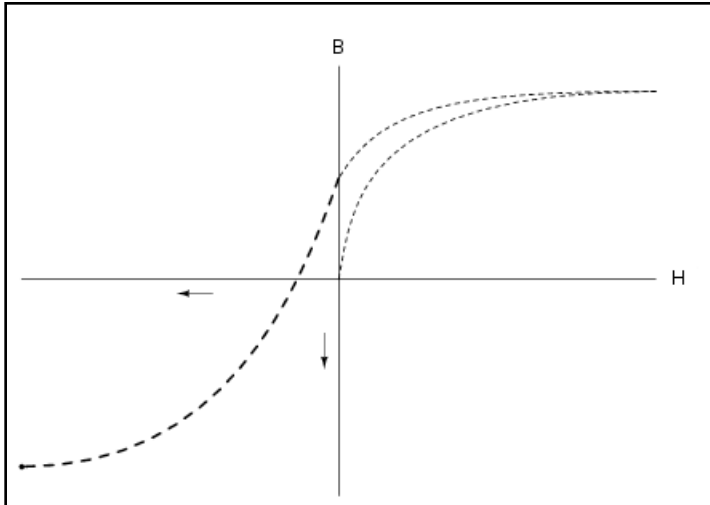
Să folosim același grafic, dar să extindem axele pentru a indica atât valori pozitive cât și negative. Aplicăm întâi o forță magnetică (curent prin spirele electromagnetului) crescătoare. Observăm creșterea densității fluxului după curba normală de magnetizare.



2. Întreruperea curentului prin spire

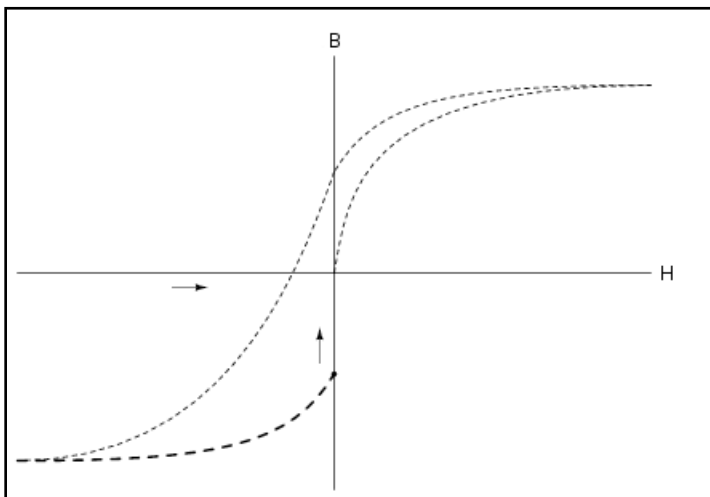
Apoi, oprim curentul prin înfășurarea electromagnetului și observăm ce se întâmplă cu fluxul, lăsând prima curbă pe grafic. Datorită remanenței materialului, vom avea un flux magnetic chiar și fără existența forței aplicate mai înainte (nu există curent prin înfășurare). Electromagnetul se comportă în acest moment precum un magnet permanent.

3. Aplicarea unui curent de sens contrar prin spirele electromagnetului



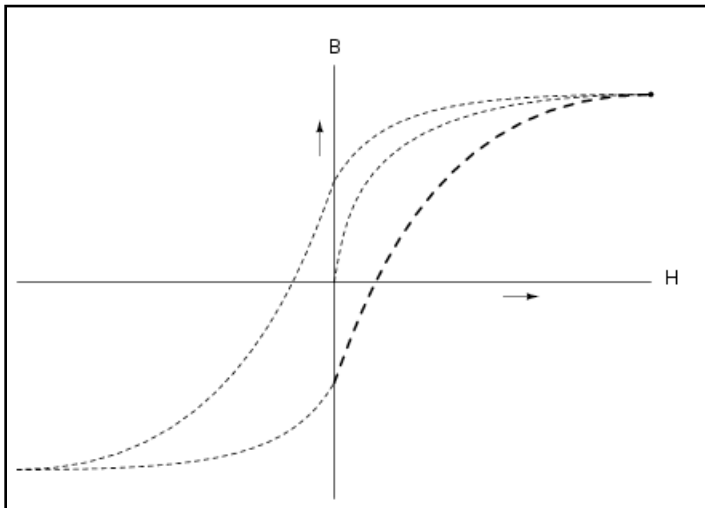
Următorul pas este aplicarea unui câmp magnetic cu aceeași forță dar în direcția opusă. Densitatea fluxului magnetic a atins acum un punct echivalent celui în care se afla în cazul aplicării unei intensități magnetice (H) pozitive, doar că se află în direcția opusă, negativă.

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).

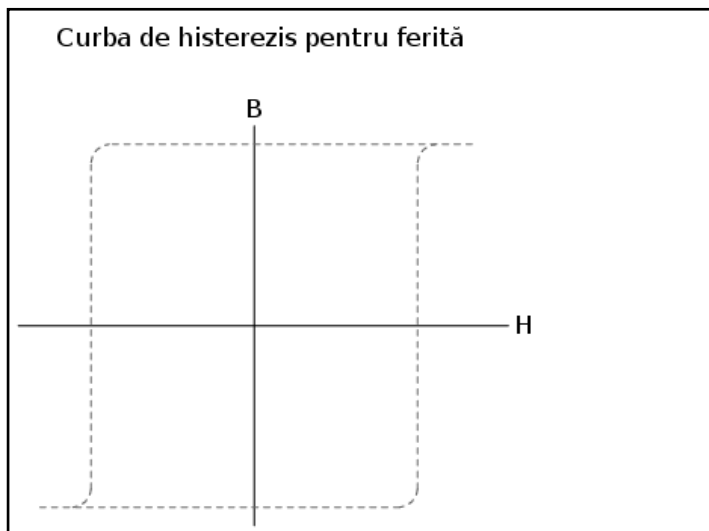
Pierderile prin histerezis

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:



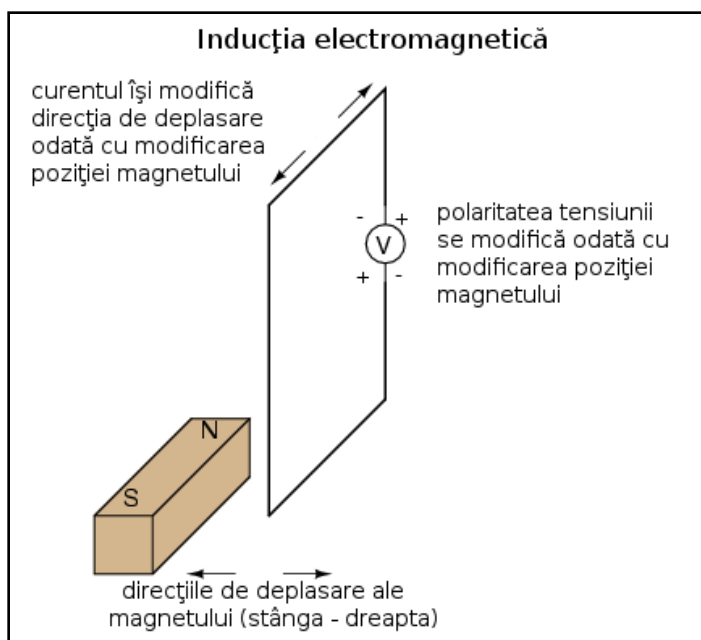
5. Inducția electromagnetică

- 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)

Φ = 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

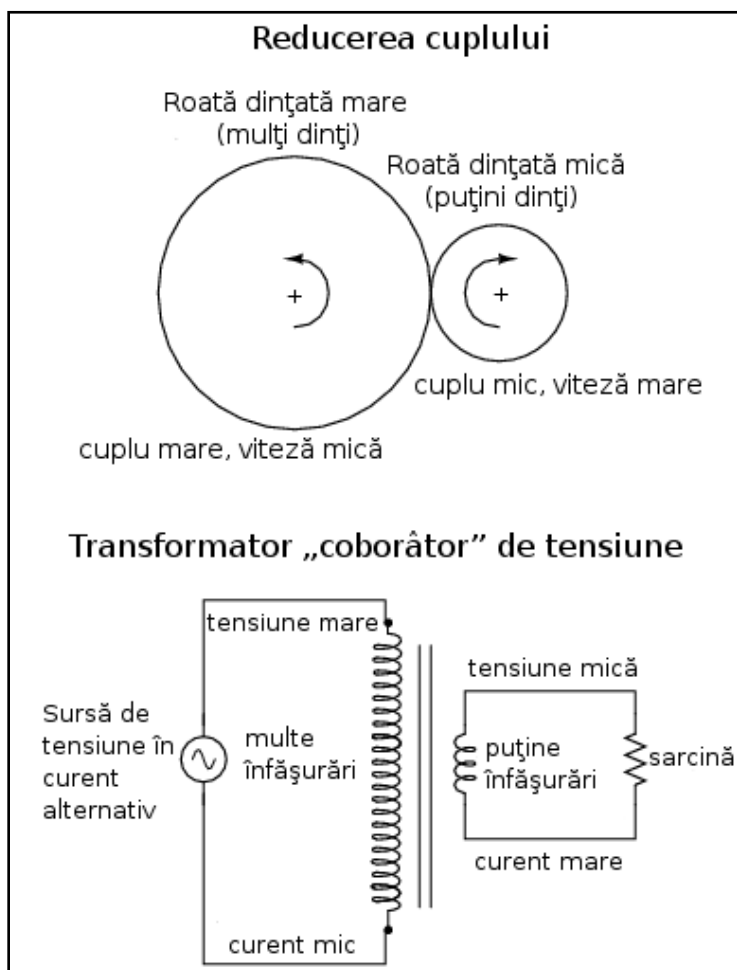
Transformatorul este un dispozitiv special conceput pentru producerea efectului de inductanță mutuală între două sau mai multe înfășurări.

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 sursă: 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.

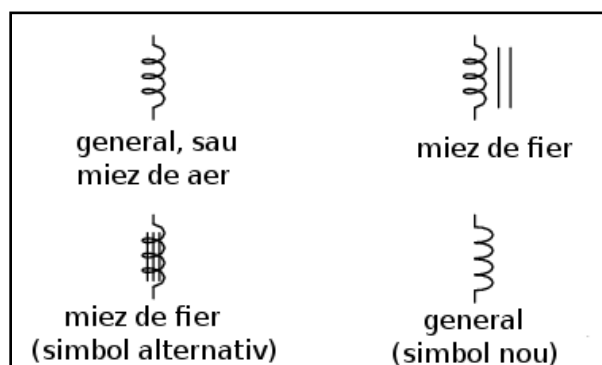
Inerția electronilor

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

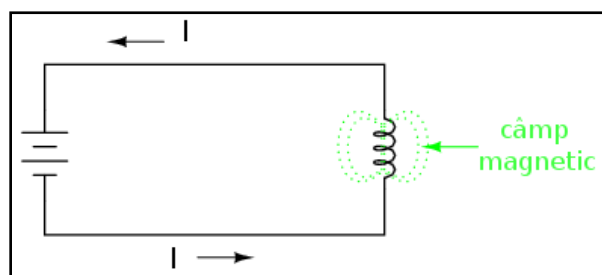
Bobinele sunt componente special concepute, pentru a profita de fenomenul electromagnetismului, sub forma unei înfășurări de material conductor. Această formă suportă un câmp magnetic mai intens decât cel produs de un simplu fir. Unele înfășurări ale bobinelor sunt realizate în jurul unui anumit tip 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



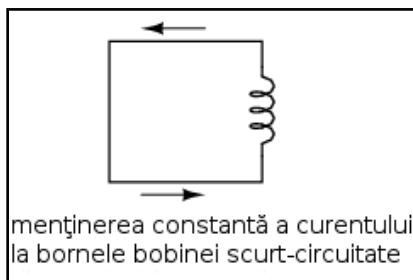
Curentul electric produce un câmp magnetic concentrat în jurul bobinei, iar acest flux magnetic reprezintă o stocare de energie cinetică datorată deplasării electronilor prin înfășurare. Cu cât valoarea curentului prin bobină este mai mare, cu atât va fi mai puternic câmpul magnetic și cu atât mai mare 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

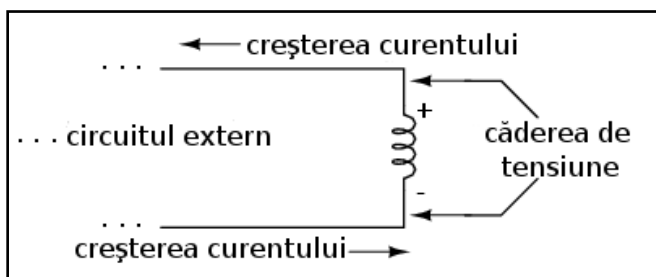


Asemenea legii de mișcare a lui Newton („un obiect în mișcare tinde să rămână în mișcare; un obiect în repaos tinde să rămână în repaos”) ce descrie tendința corpurilor de a se opune variației vitezei, putem defini tendința unei bobine de a se opune variației curentului astfel: „Electronii ce se deplasează 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.

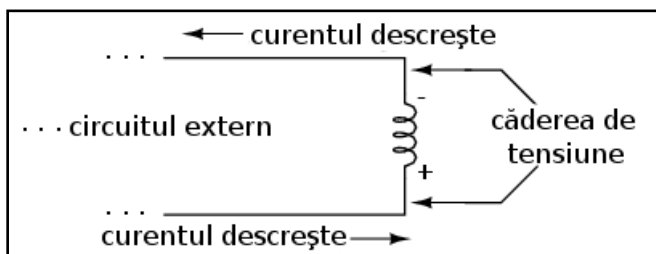
Încărcarea bobinei; bobina ca o sarcină



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)

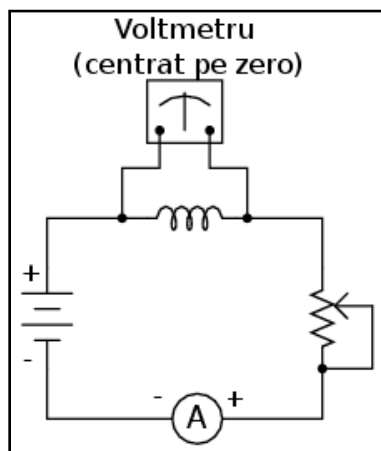
L = inductanța bobinei (H)

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.

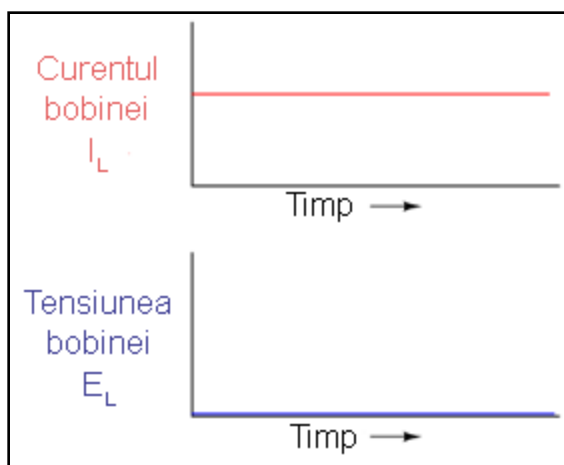
Exemplificare



Să presupunem o bobină perfectă (rezistență de $0\ \Omega$ a firelor) introdușă într-un circuit în care putem varia cantitatea de curent cu ajutorul unui potențiomtru conectat ca și rezistor variabil.

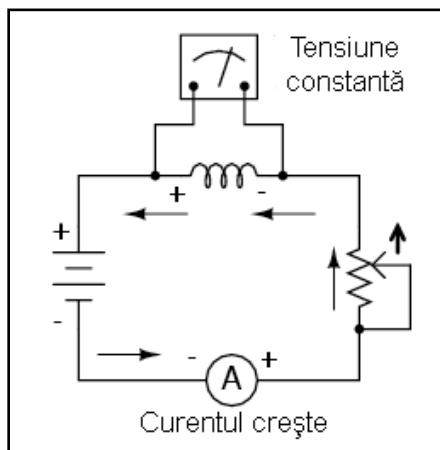
Potențiomtrul fix

Dacă mecanismul potențiomtrului 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.

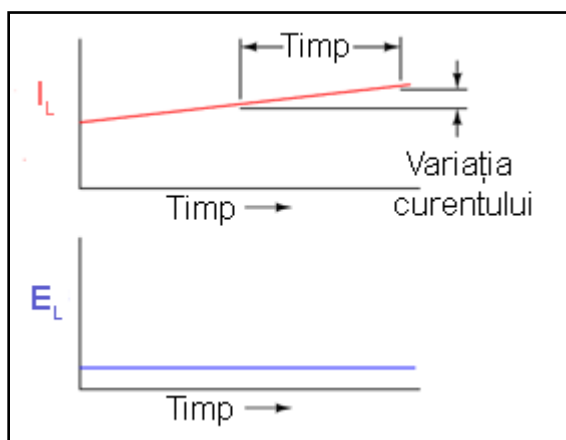
Potențiometrul variabil cu o viteză constantă (în sus)



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.

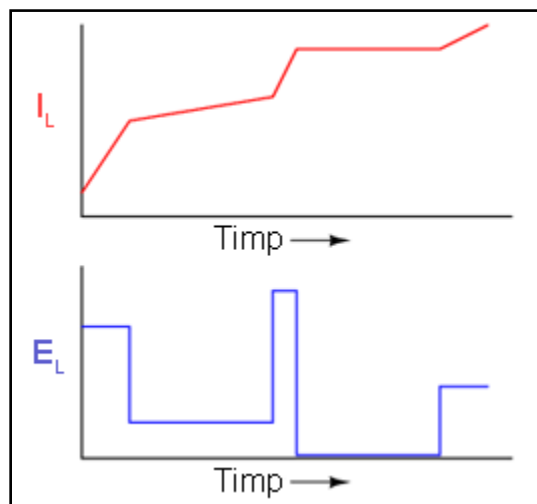
Presupunând că peria potențiometrului se deplasează cu o rată constantă, astfel încât creșterea valorii curentului prin bobină să fie constantă (linie dreaptă pe graficul timp-curent), valoarea termenului di/dt din formulă va fi una constantă. Această valoare fixă, înmulțită cu inductanța bobinei în 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.



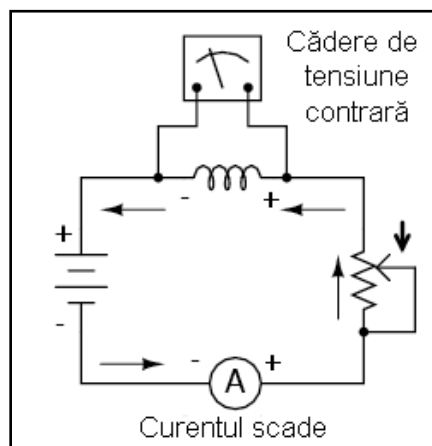
În acest scenariu, bobina se comportă precum o sarcină, cu partea negativă a tensiunii induse ca loc de intrare al electronilor, iar partea pozitivă a tensiunii induse ca loc de ieșire al lor.

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.

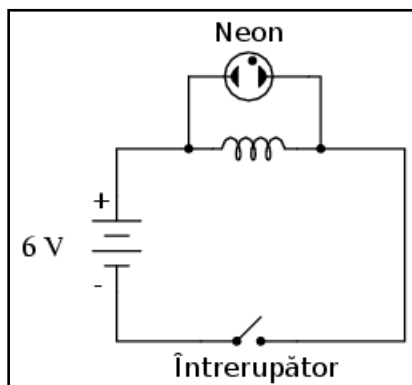
Valoarea tensiunii produse de bobină va depinde de rata (viteza) de descreștere a curentului prin aceasta. Conform legii lui Lenz, tensiunea indusă se va opune variației curentului. Cu un curent ce descrește, polaritatea tensiunii este orientată astfel încât să mențină curentul la valoarea sa precedentă. 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

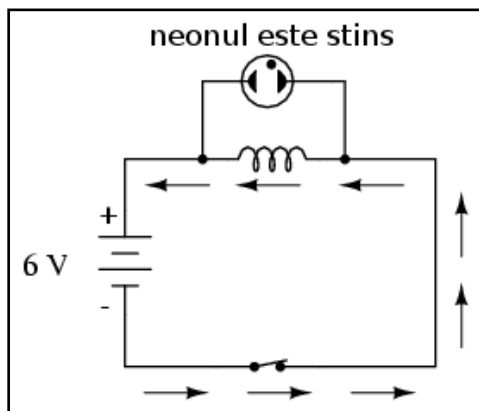
Din nou, cantitatea de tensiune la bornele unei bobine perfecte este direct proporțională cu rata variației curentului prin aceasta. Singura diferență între cazurile de creștere și descreștere ale curentului este polaritatea tensiunii induse. Pentru aceeași rată de creștere sau descreștere (variație) a curentului cu timpul, mărimea (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

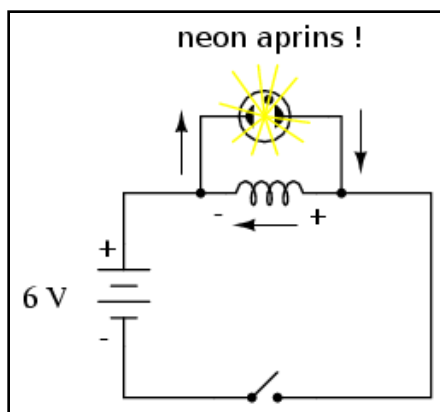
Dacă variația curentului prin circuit este foarte rapidă, se vor produce căderi de tensiuni foarte mari. Să considerăm următorul circuit:



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.

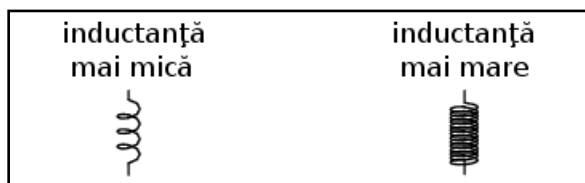
Pentru efect maxim, mărimea bobinei ar trebuie să fie cât mai mare posibil (o inductanță de cel puțin 1 Henry).

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:

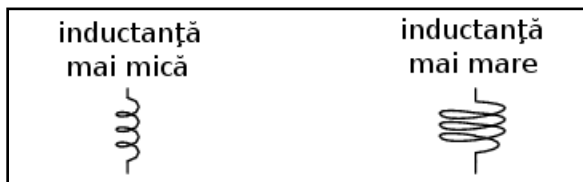
Numărul spirelor din înfășurare



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.

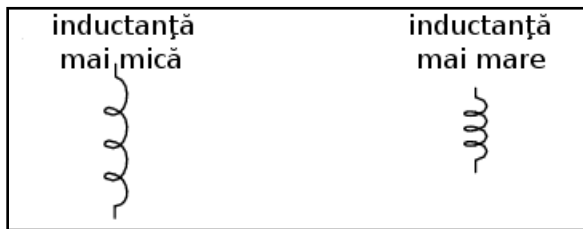
Aria înfășurării



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.

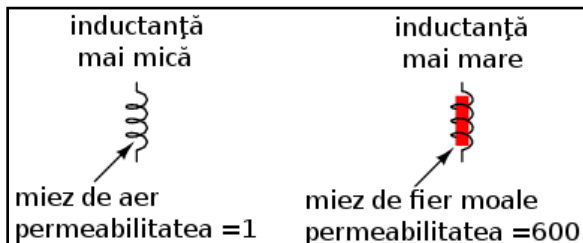
Lungimea înfășurării



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)

$\mu = \mu_r \mu_0$

μ - permeabilitatea absolută a materialului miezului

μ_r - permeabilitatea relativă (1, pentru aer)

μ_0 - permeabilitatea vidului ($1,26 \times 10^{-6}$)

A - aria înfășurării (m^2)

l - lungimea medie a înfășurării (m)

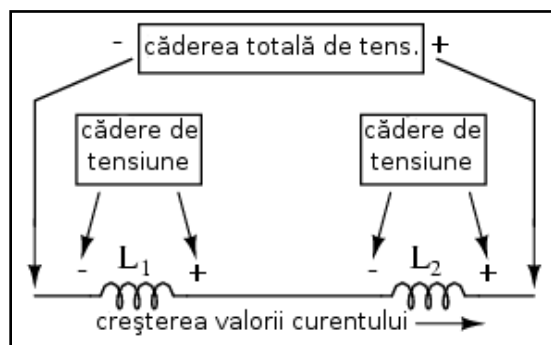
Această formulă este doar aproximativă, deoarece permeabilitatea magnetică variază odată cu variația intensității câmpului magnetic (vezi ne-liniaritatea curbelor „B-H” pentru diferite materiale). Dacă termenul μ (permeabilitatea) din ecuația de mai sus nu este stabil, nici inductanța (L) nu va fi perfect 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



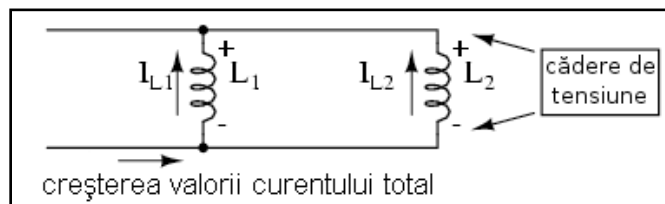
La conectarea bobinelor în serie, inductanța totală este suma inductanțelor individuale ale bobinelor. Acest lucru se datorează faptului că inductanța este valoarea căderii de tensiune pe o bobină în funcție de rata de variație a curentului prin ea.

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 trebuiesc 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.

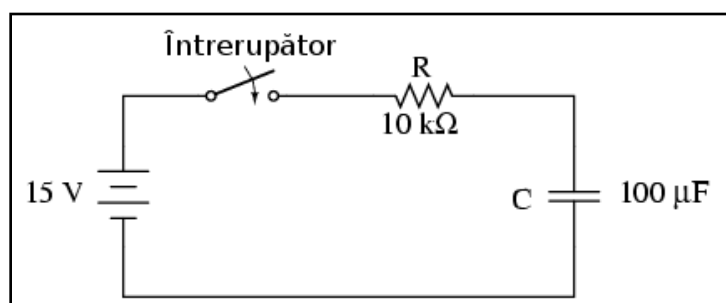
Acesta este un alt motiv pentru care, la proiectarea circuitelor, se aleg de obicei condensatoare în dauna bobinelor, acolo unde acest lucru este posibil: câmpul electric al condensatoarelor nu se „împrăștie” pe o suprafață mare precum cel al bobinelor, și nu generează efecte mutuale cu celelalte componente 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

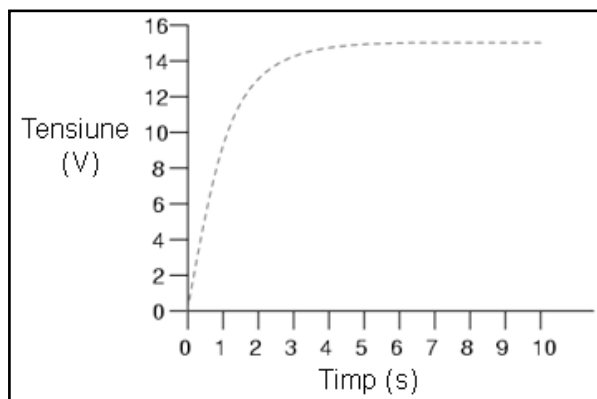


Condensatoarele tind să se comporte asemenea bateriilor secundare datorită posibilității de stocare și eliberare ulterioară a energiei sub formă de câmp electric.

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:

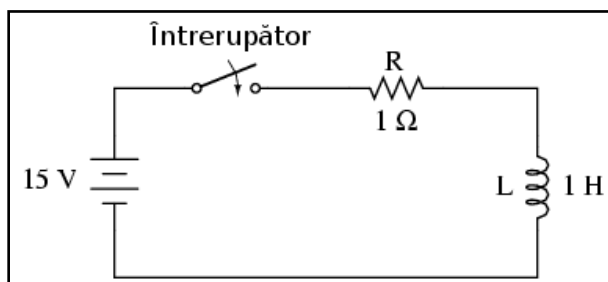
Timp (secunde)	Tensiune baterie	Tensiune condensator	Curent
0	15 V	0 V	1500 μ A
0.5	15 V	5,902 V	909,8 μ A
1	15 V	9,482 V	551,8 μ A
2	15 V	12,970 V	203,0 μ A
3	15 V	14,253 V	74,68 μ A
4	15 V	14,725 V	27,47 μ A
5	15 V	14,899 V	10,11 μ A
6	15 V	14,963 V	3,718 μ A
10	15 V	14,999 V	0,068 μ A

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.

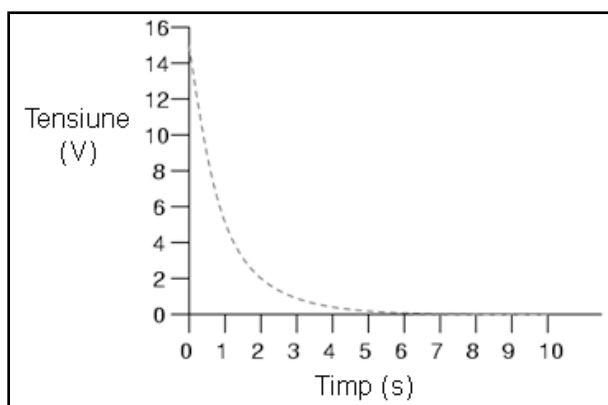
Circuit L/R simplu



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 (1Ω 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”, τ .

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

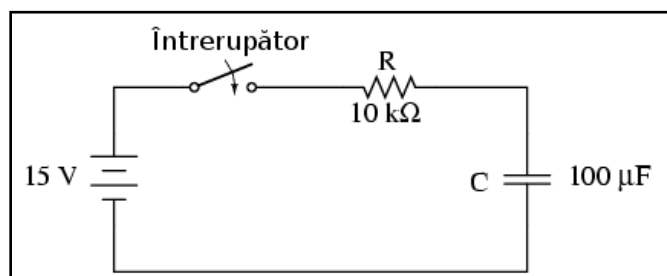
e = constanta lui Euler (2,7182)

t = timpul (s)

τ = constanta de timp a circuitului (τ)

Analiza circuitului RC serie

Să analizăm circuitul RC serie de la începutul capitolului:



Constanta de timp

Din moment ce constanta de timp (τ) 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 Ω iar capacitatea de 100 μF (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:

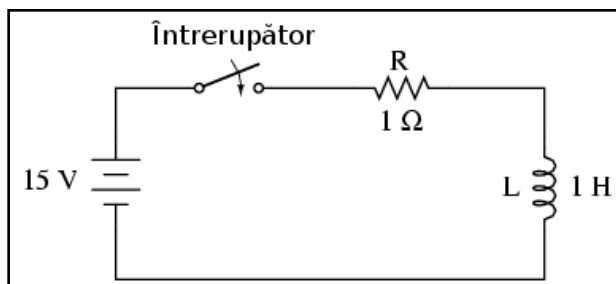
$$\text{variația} = (0 \text{ mA} - 1,5 \text{ mA}) \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{7,25}{1}}} \right) = (0 \text{ mA} - 1,5 \text{ mA}) \cdot 0,99929 = -1,4989 \text{ mA}$$

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 μ 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:

$$E_L = E_{\text{baterie}} - E_R = 15 \text{ V} - 14,547 \text{ V} = 0,453 \text{ V}$$

4. De ce L/R și nu LR

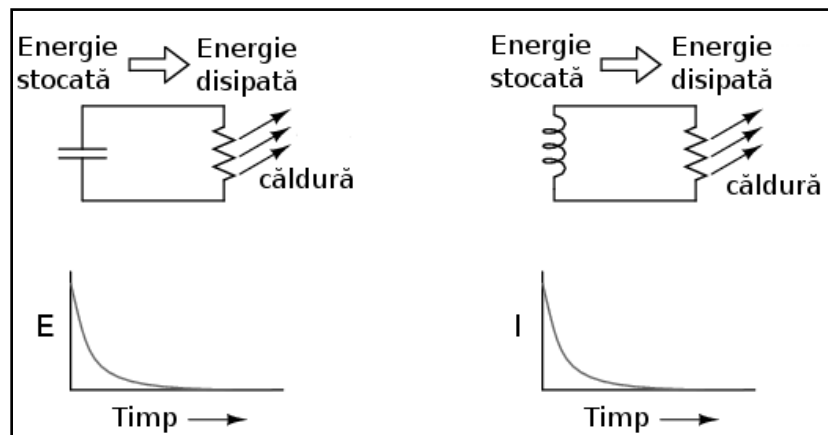
Circuitele tranzitorii și transferul de energie

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

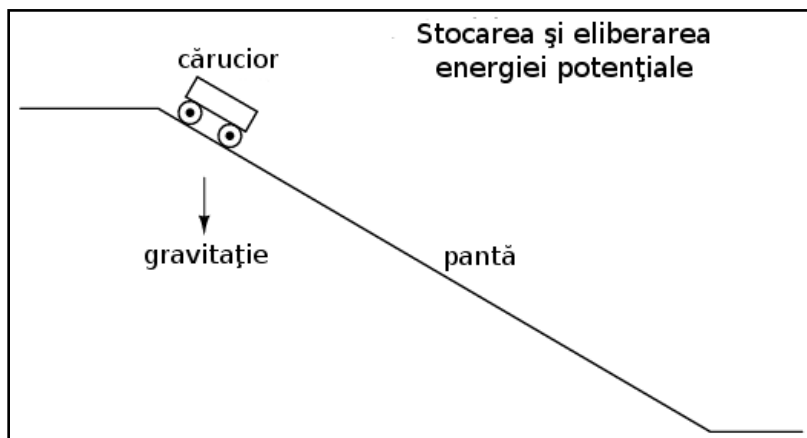
valoarea rezistorului este în așa fel încât maximizează disiparea puterii (rata transformării energiei în căldură) din circuit.

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

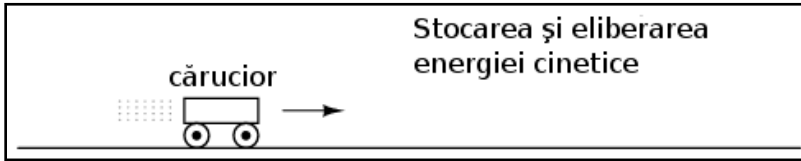


Să considerăm ilustrația alăturată pentru condensator, considerând energia stocată în acesta ca fiind energie potențială.

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 (parcursarea mai rapidă a pantei) a energiei potențiale? Desigur, o rezistență minimă (lipsa frânelor) ar duce la parcursarea 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).

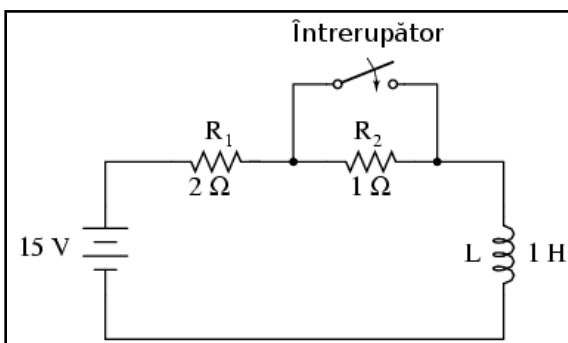
Cu sistemul de frânare acționat la maxim, căruciorul se va opri foarte repede, folosind („consumând”) energia cinetică pe măsură ce încetinește. Fără acțiunea frânelor, căruciorul se deplasează liber, pentru o perioadă de timp infinită (neglijând frecarea și rezistența aerodinamică în acest caz), iar 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 3Ω , 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 1Ω este scurt-circuitat, iar valoarea totală a rezistenței din circuit se reduce la 2Ω ; 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 (2Ω). 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

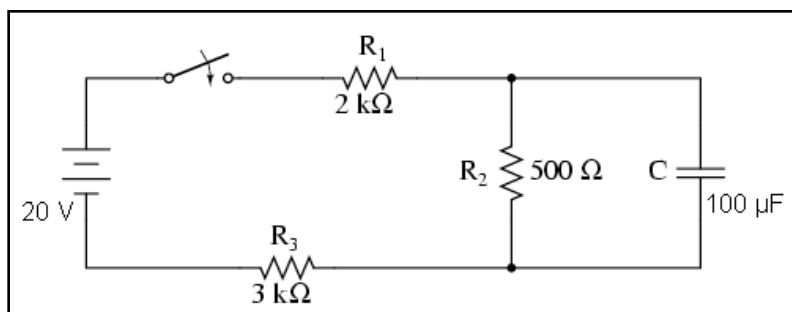
Mai jos este prezentat tabelul variației tensiunii cu timpul, în primele 3 secunde de la închiderea întrerupătorului:

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

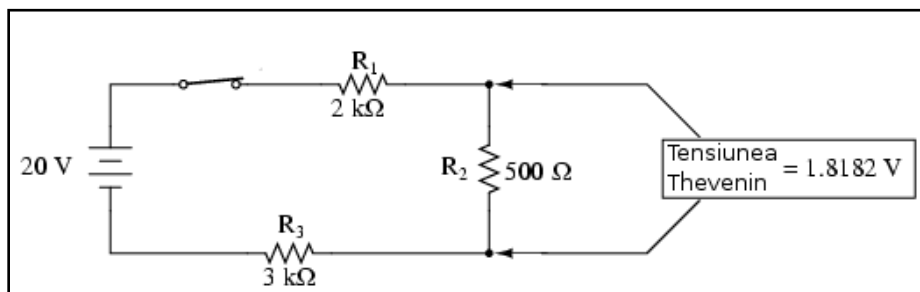
Circuit RC paralel



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 - 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 rețelelor. 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.

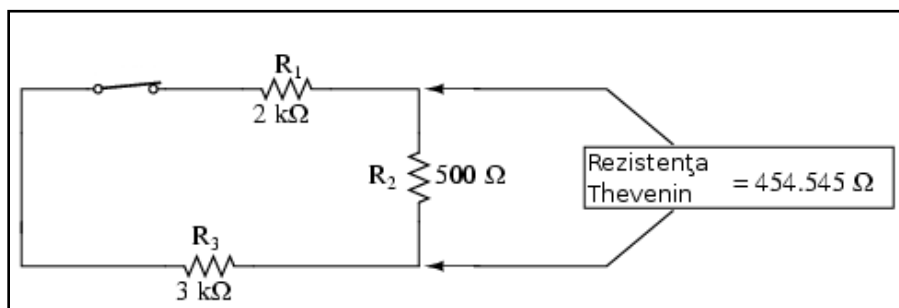
Determinarea tensiunii la bornele sarcinii

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	Ω

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:

$$R_{Thevenin} = R_2 // (R_1 + R_3)$$

$$R_{Thevenin} = 500 \Omega // (2 k\Omega + 3 k\Omega)$$

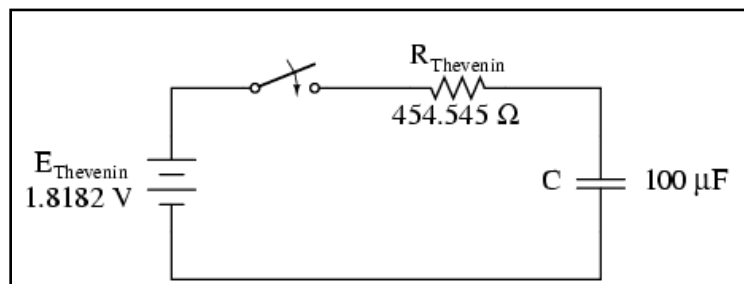
$$R_{Thevenin} = 454,545 \Omega$$

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

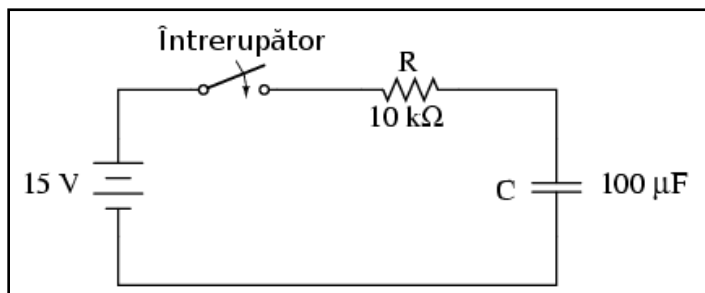
i = valoarea inițială (a nu se confunda cu, curentul instantaneu

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 V , iar cea finală 15 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 V ?