

Curent continuu

Table of Contents

- 1. Concepte de baza
 - 1.1. Electricitate statică
 - 1.2. Conductori, dielectrici și deplasarea electronilor
 - 1.3. Circuite electrice
 - 1.4. Tensiunea și curentul
 - 1.5. Rezistență
 - 1.6. Tensiune și curent într-un circuit practic
 - 1.7. Sensul convențional și sensul real de deplasare al electronilor
- 2. Legea lui ohm
 - 2.1. Relația dintre tensiune, curent și rezistență
 - 2.2. Puterea în circuitele electrice
 - 2.3. Calcularea puterii electrice
 - 2.4. Rezistori
 - 2.5. Conductie neliniară
 - 2.6. Conexiunea unui circuit
 - 2.7. Polaritatea căderilor de tensiune
- 3. Electrocutarea
 - 3.1. Siguranță în domeniul electric
 - 3.2. Drumul curentului în cazul electrocutării
 - 3.3. Legea lui Ohm (din nou!)
 - 3.4. Practici de bază
 - 3.5. Reactia în cazuri de urgență
 - 3.6. Surse potențiale de pericol
 - 3.7. Proiectarea aparatelor electrice
 - 3.8. Utilizarea aparatelor de măsură
- 4. Notatia stiintifica
 - 4.1. Notația științifică
 - 4.2. Aritmetică notației științifice
 - 4.3. Notația metrică
- 5. Serie paralel
 - 5.1. Ce sunt circuitele „serie” și „paralel”
 - 5.2. Circuite serie simple
 - 5.3. Circuite paralel simple
 - 5.4. Conductanță
 - 5.5. Calcularea puterii
 - 5.6. Aplicarea corectă a legii lui Ohm
 - 5.7. Analiza circuitelor defecte
 - 5.8. Construirea circuitelor rezistive simple
- 6. Kirchhoff
 - 6.1. Circuite divizoare de tensiune. Potențiometrul
 - 6.2. Legea lui Kirchhoff pentru tensiune
 - 6.3. Circuite divizoare de curent
 - 6.4. Legea lui Kirchhoff pentru curent
- 7. Combinatii
 - 7.1. Ce este un circuit serie-paralel
 - 7.2. Tehnici de analiză a circuitelor
- 8. Aparate de masura
 - 8.1. Ce este un aparat de măsură
 - 8.2. Voltmetrul
 - 8.3. Impactul voltmetrului asupra circuitului
 - 8.4. Ampermetrul
 - 8.5. Impactul ampermetrului asupra circuitului
 - 8.6. Ohmmetrul
 - 8.7. Ohmmetre pentru tensiuni înalte
 - 8.8. Multimetru
 - 8.9. Terminali tip Kelvin și rezistori de precizie
 - 8.10. Circuite în punte - puntea Wheatstone și Thomson
 - 8.11. Wattmetrul
 - 8.12. Realizarea practică a rezistențelor de calibrare
- 9. Instrumentatie
 - 9.1. Semnale analogice și digitale
 - 9.2. Sisteme cu semnale de tensiune
 - 9.3. Sisteme cu semnale de curent
 - 9.4. Tahogeneratorul
 - 9.5. Termocupla
- 10. Analiza retelei

- 10.1. Ce înseamnă analiza unei rețele
- 10.2. Metoda ramurii de curent
- 10.3. Metoda buclei de curent
- 10.4. Metoda nodului de tensiune
- 10.5. Teorema lui Millman
- 10.6. Teorema superpoziției
- 10.7. Teorema lui Thevenin
- 10.8. Teorema lui Norton
- 10.9. Echivalența teoremelor Thevenin-Norton
- 10.10. Teorema lui Millman revizuită
- 10.11. Teorema transferului maxim de putere
- 10.12. Transformarea triunghi-stea și stea-triunghi
- 11. Baterii
 - 11.1. Activitatea electronilor în reacțiile chimice
 - 11.2. Construcția bateriilor electrice
 - 11.3. Capacitatea bateriilor
 - 11.4. Baterii speciale
 - 11.5. Considerații practice
- 12. Fizica conductorilor
 - 12.1. Introducere fizica conductorilor
 - 12.2. Mărimea și amperajul conductorilor
 - 12.3. Siguranțe fuzibile
 - 12.4. Rezistivitatea și conductibilitatea electrică
 - 12.5. Coeficientul de temperatură al rezistenței
 - 12.6. Supraconductibilitatea
 - 12.7. Străpungerea dielectricului
- 13. Condensatorul
 - 13.1. Câmpuri și capacitatea electrică
 - 13.2. Relația tensiune-curent pentru condensator
 - 13.3. Factori ce afectează capacitatea electrică
 - 13.4. Conectarea condensatorilor în serie și paralel
 - 13.5. Considerații practice (condensatorul)
- 14. Electromagnetism
 - 14.1. Magneți permanenți
 - 14.2. Electromagnetism
 - 14.3. Unități de măsură ale câmpului magnetic
 - 14.4. Permeabilitatea și saturarea
 - 14.5. Inducția electromagnetică
 - 14.6. Inductanța mutuală. Transformatorul
- 15. Bobina
 - 15.1. Câmpul magnetic și inducțanța
 - 15.2. Relația tensiune-curent pentru bobină
 - 15.3. Factori ce influențează inducțanța
 - 15.4. Bobine serie și paralel
 - 15.5. Considerații practice (bobina)
- 16. Constante de timp
 - 16.1. Răspunsul tranzistorului al condensatorului
 - 16.2. Răspunsul tranzistorului al bobinei
 - 16.3. Calcularea tensiunii și a curentului
 - 16.4. De ce L/R și nu LR
 - 16.5. Cazuri speciale de calcul
 - 16.6. Circuite complexe
 - 16.7. Rezolvarea circuitului pentru variabila timp

1 Concepte de baza

1.1 Electricitate statică

Cu secole în urmă, a fost descoperit faptul că anumite tipuri de materiale se atrag misterios după au fost frecate unul de celălalt. 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:

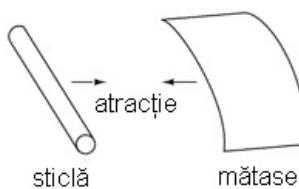


Figure 1: atracție între două corpuri încărcate cu sarcină electrică

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 recunoscute de către experimentatorii ca manifestând forțe de atracție după ce au fost frecate unul de celălalt.

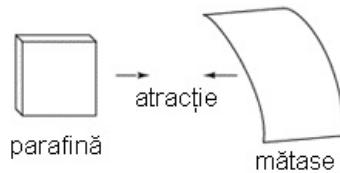


Figure 2: atracție între două corpuri încărcate cu sarcină electrică

Acest fenomen a devenit și mai interesant după ce a fost descoperit faptul că materiale identice, după ce au fost frecate cu un material corespunzător, se resping întotdeauna:

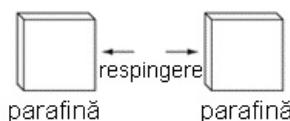
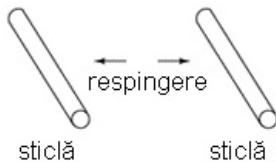


Figure 3: respingere între două corpuri încărcate cu sarcină electrică

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

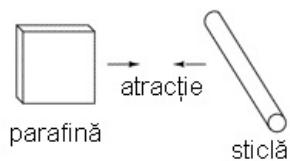


Figure 4: atracție între două corpuri încărcate cu sarcină electrică

Mai mult decât atât, s-a descoperit că orice material care posedă proprietăți de atracție sau respingere după frecare, poate fi clasificat într-o din cele două categorii: atras de sticlă și respins de parafină, sau respins de sticlă și atras de parafină. Fie prima, fie a doua posibilitate: nu s-au găsit materiale care să fie atrasă sau respinsă 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:

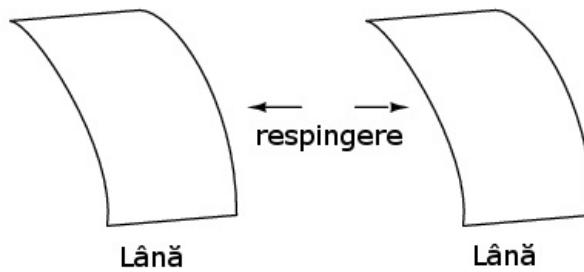
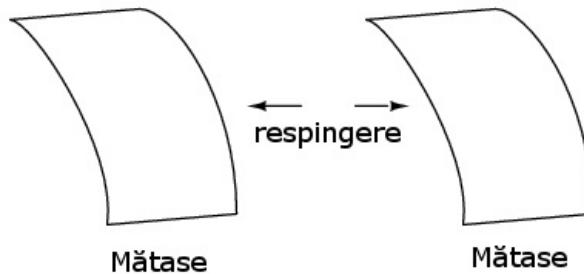


Figure 5: respingere între două corpuri din materiale identice încărcate cu sarcină electrică

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 decât înainte. Oricare ar fi fost schimbarea ce avea loc pentru a determina atracția sau respingerea acestor materiale unul de celălalt, era una invizibilă.

Unii experimenteri 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 Dufay a făcut parte din primii experimenteri 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 ipotecic de fluid a devenit cunoscut sub numele de *sarcină*.

Un cercetător renomiat, 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 împărteau simplu într-o singură categorie atunci când erau frecate, și cel mai important, că cele două materiale active frecate unul de celălalt se încadrau în totdeauna în categoria opuse, fapt evidentiat 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 îndepărarea „fluidului” de pe parafină cu ajutorul lânei, 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!

Măsurători precise ale sarcinii electrice au fost efectuate de către fizicianul francez Charles Coulomb în anii 1780, cu ajutorul unui dispozitiv numit *balanță de torsione*, 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 *coulombul*. Dacă două corpuși „punctiforme” (corpuși ipotetice fără suprafață) sunt încărcate cu o sarcină egală de 1 coulomb și plasate la 1 metru distanță, 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 $6.250.000.000.000.000.000$ (6.25×10^{18}) de electroni. Sau invers, un electron are o sarcină de aproximativ 0.0000000000000000016 coulombi (1.6×10^{-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*.

Mult mai târziu se va descoperi faptul că acest „fluid” este defapt 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 (corpușile) sunt compuse din „blocuri” extrem de mici, denumite *atomii*, iar acești atomi la rândul lor sunt compuși din componente și mai mici, denumite *particule*. Cele trei particule fundamentale regăsite în compoziția majorității atomelor 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 isotopul de protiu (${}_1^H$) 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 cam așa:

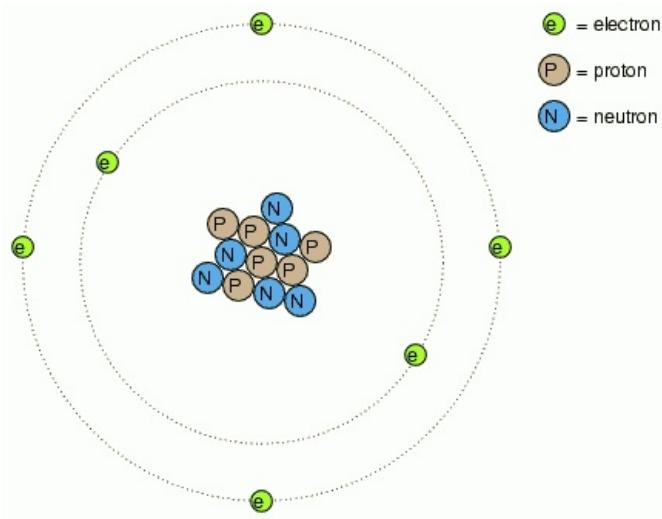


Figure 6: structura unui atom

Chiar dacă fiecare atom dintr-un material tinde să rămână o unitate, în realitate există mult spatiu liber între electroni și „ciocchinele” 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 calitatea importantă. Masa strânsă 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. De fapt, dacă am putea îndepărta trei protoni din nucleul unui atom de plumb, am realiza visul etern al alchimiei, transformarea plumbului în aur. Legătura strânsă a protonilor de nucleu este responsabilă de stabilitatea elementelor chimice, și de neputința alchimiștilor de a-și îndeplini visul.

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.

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 părași atomul cu totul!) de o energie mult mai mică decât cea necesară îndepărterii 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.

Electronii tend 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, spuem 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 balanșa 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 „încârcat” în ansablu, și ducând la interacțiunea acestuia cu particule sau alți atomi încârcați 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.

Procesul de adăugare sau de plecare a electronilor este exact ceea ce se întâmplă atunci când anumite combinații de materiale sunt frecate unele de celelalte: electronii din atomii unu 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.

Rezultatul dezechilibrului acestui „fluid” (electronii) 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 lânei, 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 lânei ca fiind „pozitivă”, spunem că electronii posedă o sarcină „negativă”. Astfel, un obiect a cărui atomi au primit un surplus de electron, se spune că este încârcat „negativ”, pe când un obiect a cărui atomi au pierdut electroni se spune că este încârcat „pozitiv”, cu toate că aceste denumiri sunt ușor de încurcat. În momentul în care a fost descoperită adeverata 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.

Michael Faraday a demonstrat (1832) că electricitatea statică este asemenea celei produse de o baterie sau un generator.

Electricitatea statică este în mare parte o bătaie de cap. La praful de pușcă se adaugă grafit pentru prevenirea aprinderii accidentale datorită electricității statice. Cauzează pagube circuitelor semiconductoare. Deși este posibilă construirea motoarelor alimentate la tensiune înaltă și curent scăzut caracteristic electricității statice, nu este economic. Cele câteva aplicații practice ale acestui tip de electricitate sunt xerografie, filtrul de aer electrostatic, și generatorul Van de Graaf de tensiune înaltă.

1.2 Conductori, dielectri și deplasarea electronilor

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 sticlă, electronii atomilor au o libertate de mișcare foarte restrânsă. Chiar dacă forțe exterioare, precum frecatul fizic al materialului, poate 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 același material.

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 izolație).

Câteva exemple comune de conductori și dielectri:

Conductori:

- argint
- cupru
- aur
- aluminiu
- fier
- oțel
- alamă
- bronz
- mercur
- grafit
- apă murdară
- beton

Dielectri:

- sticlă
- cauciuc
- ulei
- asfalt
- fibră de sticlă
- portelan
- ceramică
- cuarț
- bumbac (uscat)
- hârtie (uscată)
- plastic
- aer
- diamant
- apă pură

Trebuie înțeles faptul că nu toate materialele conductoare au același nivel de conductivitate, și nu toți dielectricii 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 același măsură. Sticla de geam este mai bună decât majoritatea plasticurilor, și cu siguranță mai bună decât fibra de sticlă „curată”. Același lucru este valabil și în cazul conductorilor electrici, unii sunt mai buni decât alții.

De exemplu, argintul este cel mai bun conductor din această listă, oferind o trecere mai usoară 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.

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, 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. (Atenție! deplasarea electronilor într-un conductor nu este analoagă curgerii apei. Electronii nu curg. Aceasta este o simplă analogie folosită pentru o mai bună înțelegere a efectelor ce au loc la trecerea curentului printr-un conductor.)

Trebuie de asemenea înțeleasă faptul că unele materiale își modifică proprietățile electrice în diferite situații. De exemplu, sticla este un foarte bun dielectric la temperatura camerei ¹, 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.

Deși în mod normal deplasarea electronilor „liberi” dintr-un conductor este aleatoare, fără vreo direcție sau viteza particulară, electronii pot fi influențați să se deplaseze într-un mod coordonat printr-un material conductiv. Această deplasare uniformă a electronilor poartă denumirea de *electricitate*, sau *curent electric*. Pentru a fi mai precisi, s-ar putea numi electricitate *dinamică*, în contrast cu electricitatea *statică*, ce reprezintă o acumulare de sarcină electrică nemîscată. Asemenea curgerii apei prin spațiul liber al unei țevi, electronii sunt liberi să se miște prin spațiul liber din interiorul și dintre atomi unui conductor. Conductorul poate părea că este solid atunci când îl privim, dar oricare 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:

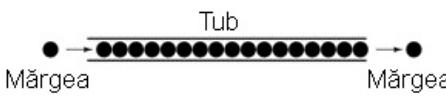


Figure 7: analogia tubului umplut cu mărgele

Tubul este plin de mărgele, precum un conductor este plin de electroni liberi, pregătiți să fie puși în mișcare de o influență externă. Dacă o singură mărgeală este introdusă brusc în acest tub plin prin partea stângă, o altă va ieși instant pe partea cealaltă. Chiar dacă fiecare mărgeală a parcurs doar o distanță scurtă, transferul de mișcare prin tub este practic instant (din partea stângă înspre capătul din dreapta), oricără ar fi tubul de lung. În cazul electricității, efectul de ansamblu dintr-un capăt în celălalt al conductorului are loc la viteza luminii². Fiecare electron în parte însă, se deplasează prin conductor la o viteză mult mai mică.

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 confectionate din metale bune conductoarea de electricitate precum cuprul sau aluminiul, într-o mare varietate de dimensiuni.

Tineți 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 traекторie continuă din material conductiv ce permite deplasarea electronilor. În analogia cu mărgelele, acestea pot fi introduse prin partea stângă a tubului (și ieșă pe partea dreaptă), doar dacă tubul este deschis la celălalt capăt pentru a permite ieșirea mărgelelor. Dacă tubul este închis la capătul din dreapta, mărgelele se vor „aduna” în tub, iar „curgerea” lor nu va avea loc. Același lucru se poate spune despre curentul electric: curgere continua a curentului necesită un drum neîntrerupt pentru a permite deplasarea. Putem ilustra acest lucru prin următorul desen:

Figure 8: drum electric neîntrerupt

O linie subțire, continuă (precum cea de sus) reprezintă simbolul convențional pentru o porțiune continuă de fir³ (electric). Din moment ce firul este compus din material conductiv, 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:



Figure 9: drum electric neîntrerupt plus sursa și destinație

Acum, cu Sursa împingând noi electroni pe fir prin partea stângă, curgereau⁴ 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:



Figure 10: drum electric întrerupt

Întrucât aerul este un dielectric (material izolator), iar spațiul dintre cele două fire este ocupat de aer, calea ce era înainte continuă, acum este întreruptă, iar electronii nu se pot deplasa de la Sursă la 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 iașă din țeavă. 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 luam 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:



Figure 11: drum electric întrerupt, refacut cu un alt fir

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 țeavă, 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. Este interesant de observat că la trecerea acestui curent electric prin fir, nu apare nicio „îmătrânire” a firului, în contrast cu țevile de apă care sunt eventual corodate în timp datorită curgerii apei. Electronii întâmpină într-adevăr un anumit grad de rezistență la mișcare, iar această rezistență generează căldură într-un conductor. Aceasta este însă un topic ce-l vom discuta pe larg mai târziu.

1.3 Circuite electrice

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

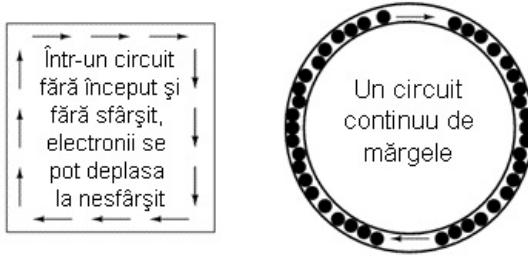


Figure 12: bucla - circuit electric

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

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

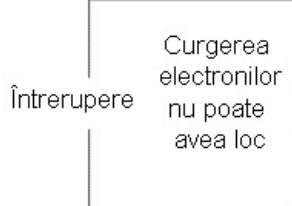


Figure 13: circuit electric întrerupt

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 circuit continuu și neîntrerupt printr-un material conductiv prin care aceștia să se poată deplasa.

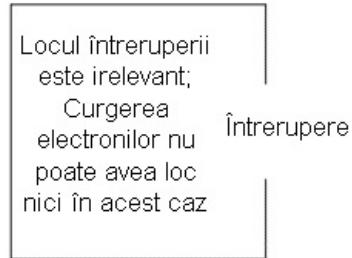


Figure 14: circuit electric întrerupt 2

1.4 Tensiunea și curentul

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: forță produsă de un dezechilibru de sarcină electrică.

Dacă luăm exemplul parafinei și lănei 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 corpură.

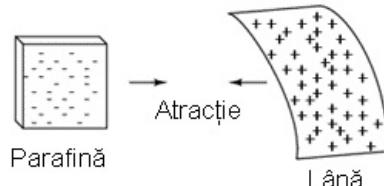


Figure 15: forța de atracție dintre două obiecte frecate între ele

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:

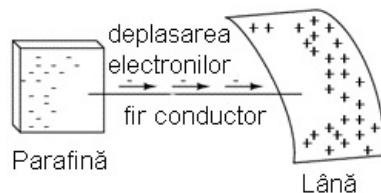


Figure 16: restabilirea echilibrului dintre două corpuri frecate prin introducerea unui conductor electric

Dezechilibrul dintre numărul electronilor din atomii parafinei și cei ai lânei 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 atrage cele două corpuri împreună. Acum că un conductor conectează cele două corpuri totuși, această forță va face ca electronii să se deplaseze într-o direcție uniformă prin fir, chiar dacă numai pentru un scurt moment, până în momentul în care sarcina electrică este neutralizată în această zonă (restabilirea echilibrului), iar forța dintre cele două materiale se reduce.

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:

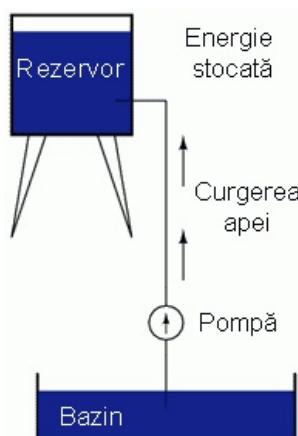


Figure 17: pomparea apei dintr-un bazin într-un rezervor

Influența gravitației asupra apei din rezervor dă naștere unei forțe ce倾de 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:

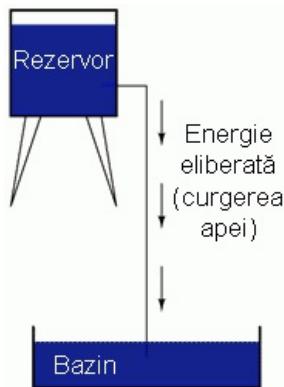


Figure 18: curgerea apei din rezervor prin țeavă spre bazin

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 înmagazinată 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.

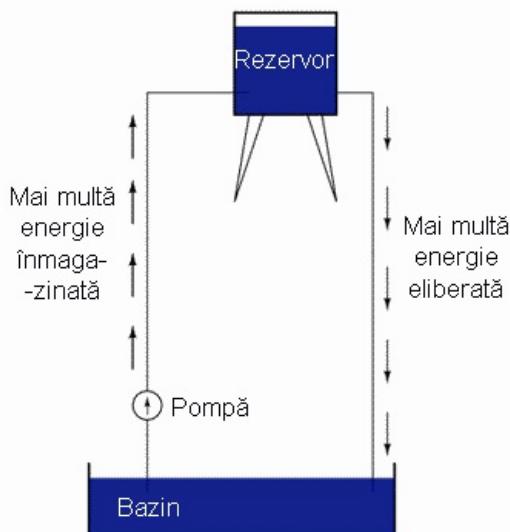
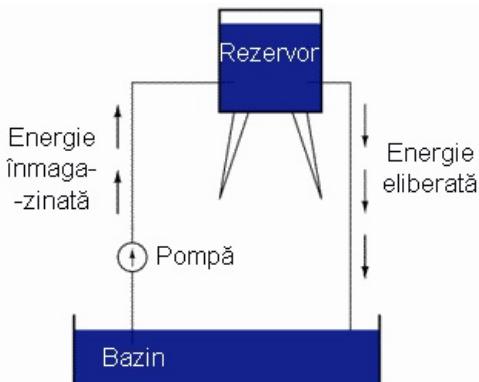


Figure 19: curgerea apei din rezervor prin țeavă spre bazin, nivele diferite de energie

Electronii nu sunt foarte diferenți. Dacă frecăm parafina și lâna împreună, „pompăm” electronii de pe „nivelurile” lor normale, dând naștere unei condiții în care există o forță între parafină și lână, datorită faptului că electronii încearcă să-și recăstige 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 înmaginate, asemenea eliberării energiei în cazul rezervorului, atunci când este pus la dispoziție un drum pe care apa poate să curgă prin intermediul unei țevi.

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 capabil 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. Deoarece tensiune 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, aceasta are sens doar atunci când este exprimată între două puncte diferențiate:

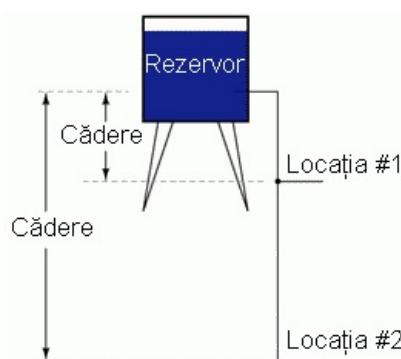


Figure 20: curgerea apei din rezervor prin țeavă spre bazin, nivele diferite de energie

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 cădereea (distanța parcursă) apei. Cantitatea de energie eliberată prin cădereea 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”.

Tensiunea poate fi generată și prin alte mijloace decât frecarea 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.

Să luăm pentru început simbolul bateriei electrice și să construim apoi un circuit pas cu pas:

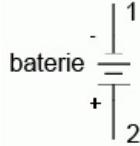


Figure 21: simbolul bateriei electrice

Orice sursă de tensiune, inclusiv 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 îngrijozeze: 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 (Benjamin Franklin), partea negativă a bateriei este acel capăt ce încearcă să împingă electronii prin circuit, iar partea pozitivă este cea care încearcă să atragă electronii.

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.

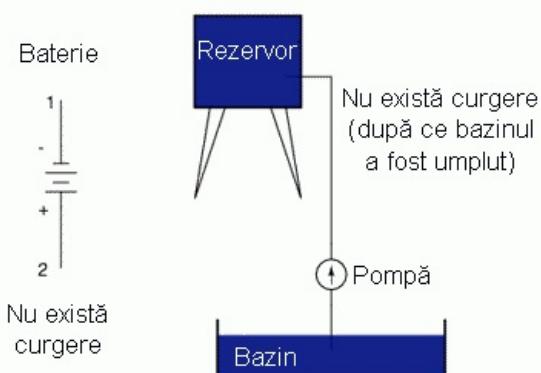


Figure 22: analogie baterie electrică - rezervor plin

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

Puteți asigura un astfel de drum pentru baterie prin conectarea unui for 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):

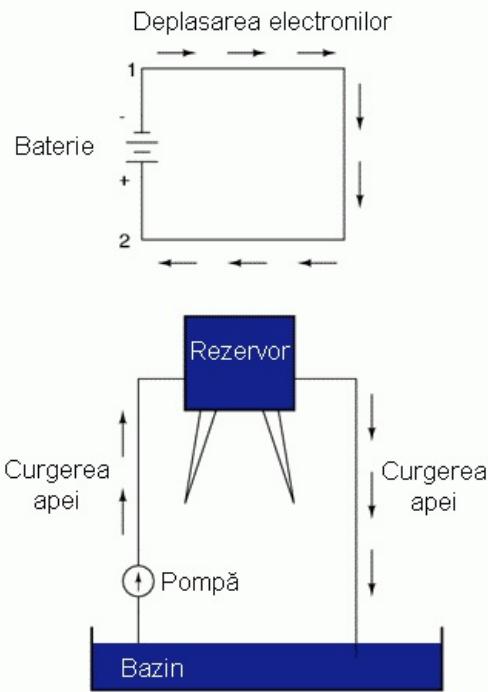


Figure 23: deplasarea electronilor printr-un circuit închis alimentate de o baterie electrică

Atât 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, această curgere continuă și uniformă de electroni prin circuit poartă numele de *curent*. Atât 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 *cc*. În următorul volum din această serie vom analiza circuitele electrice în care deplasarea electronilor are loc alternativ în ambele direcții: *curent alternativ*, prescurtat *ac*. 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. 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 în oricare parte a circuitului, indiferent de lungimea sau diametrul conductorului.

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:



Figure 24: întreruperea circuitului electric

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:

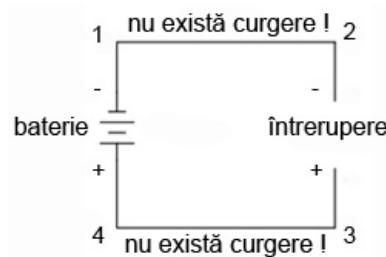


Figure 25: circuit electric - compararea polarității în funcție de locație

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 înrerupere a circuitului între punctele 3 și 4:

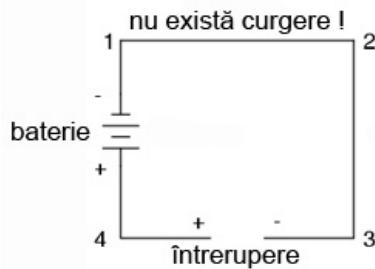


Figure 26: circuit electric - compararea polarității în funcție de locație - locație nouă

Întreruperea fiind acum între punctele 3 și 4, polaritatea căderii de tensiune între acest 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 tensiune, nu reprezintă o caracteristică a unui singur punct, ci depinde tot timpul de două puncte distincte!

1.5 Rezistență

Circuitele prezentate în capitolele precedente nu sunt foarte practice. De fapt, este chiar periculos (conectarea directă a polilor unei surse de tensiune electrică cu un singur fir conductor). Motivul pentru care acest lucru este periculos se datorează amplitudinii (mărimea) 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.

O folosire practică și populară a curentului electric este iluminarea electrică (artificială). 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 suficient curent electric. Ca și bateria, are două puncte de contact electric, unul pentru intrarea electronilor, celălalt pentru ieșirea lor.

Conectată la o sursă de tensiune, o lampă electrică arată astfel într-un circuit:

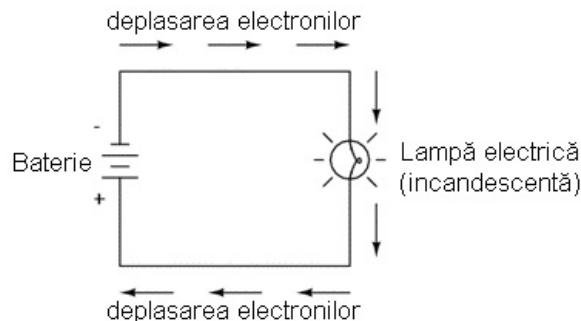


Figure 27: circuit electric simplu - baterie plus lampă electrică (bec)

Atunci când electroni ajung la filamentul din material conductor subțire al lămpii, întâmpină o rezistență mult mai mare la deplasare față de cea întâmpinată în mod normal în fir. Această opozitie a trecerii curentului electric depinde de tipul de material, aria secțiunii transversale și temperatura acestuia. Termenul tehnic ce desemnează această opozitie 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).

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 ca această va înceta să mai lumineze:

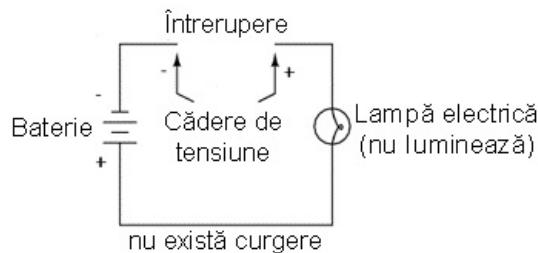


Figure 28: circuit electric simplu - baterie plus lampă electrică - întreruperea circuitului

Ca și înainte, fără existența curentului (curgerea electronilor), întregul potențial (tensiune) al bateriei este disponibil în locul întreruperii, așteptând ca o conexiune să „astupe” întreruperea permitând din nou curgerea electronilor. Această situație este cunoscută sub denumirea de *circuit deschis*, o întrerupere a continuității circuitului ce întrerupe curentul peste tot. 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*.

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:

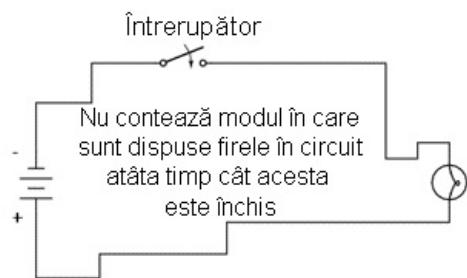


Figure 29: circuit electric simplu plus întrerupător

Acesta este modul în care o întrerupătorul poate controla becul din cameră. Întrerupătorul însăși constă dintr-o pereche de contacte metalice actionate 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; când contactele sunt separate, curgerea electronilor este îintreruptă de către izolația dintre contacte reprezentată în acest caz de aer, iar continuitatea circuitului este îintreruptă.

Probabil că cel mai bun întrerupător pentru ilustrarea principiului de bază este un întrerupător de tip „cuțit”:



Figure 30: întrerupător tip cuțit cu un contact

Un întrerupător de tip „cuțit” nu este altceva decât dintr-un braț mecanic ce poate pivota liber în jurul unei balamale (punct fix), ce vine în contact fizic cu unul sau mai multe contacte fixe ce sunt de asemenea conductive. Întrerupătorul de mai sus este construit pe o bază de porțelan (un material izolator excelent), folosind cupru (un excelent conductor) pentru construcția contactelor și a „lamei”. Mânerul este din plastic pentru a izola mâna operatorului de lama conductoare atunci când se efectuează operațiile de închidere și deschidere.

Un alt tip de întrerupător cuțit este format din două contacte staționare în loc de unul:



Figure 31: întrerupător tip cuțit cu două contacte

Acest întrerupător are o singură lamă dar două contacte staționare, ceea ce înseamnă ca poate închide sau deschide mai mult de un singur circuit. Pentru acum, acest lucru nu este foarte important, doar conceptul de bază a ceea ce este un întrerupător și modul său de funcționare.

Întrerupătoarele cuțit sunt excelente pentru ilustrarea principiilor de bază în funcționarea întrerupătoarelor, dar prezintă probleme distințe de siguranță atunci când sunt folosite în circuitele electrice de putere înaltă. Conductoarele vizibile fac posibilă atingerea accidentală a lor, iar orice scânteie ce poate apărea între contactele staționare și lama aflată în mișcare riscă să aprindă materialele inflamabile aflate în apropiere. Contactele majorității întrerupătoarelor moderne sunt închise într-o carcăsă izolatoare pentru evitarea acestor pericole. Poza de mai jos prezintă câteva modele de înterupătoare moderne:

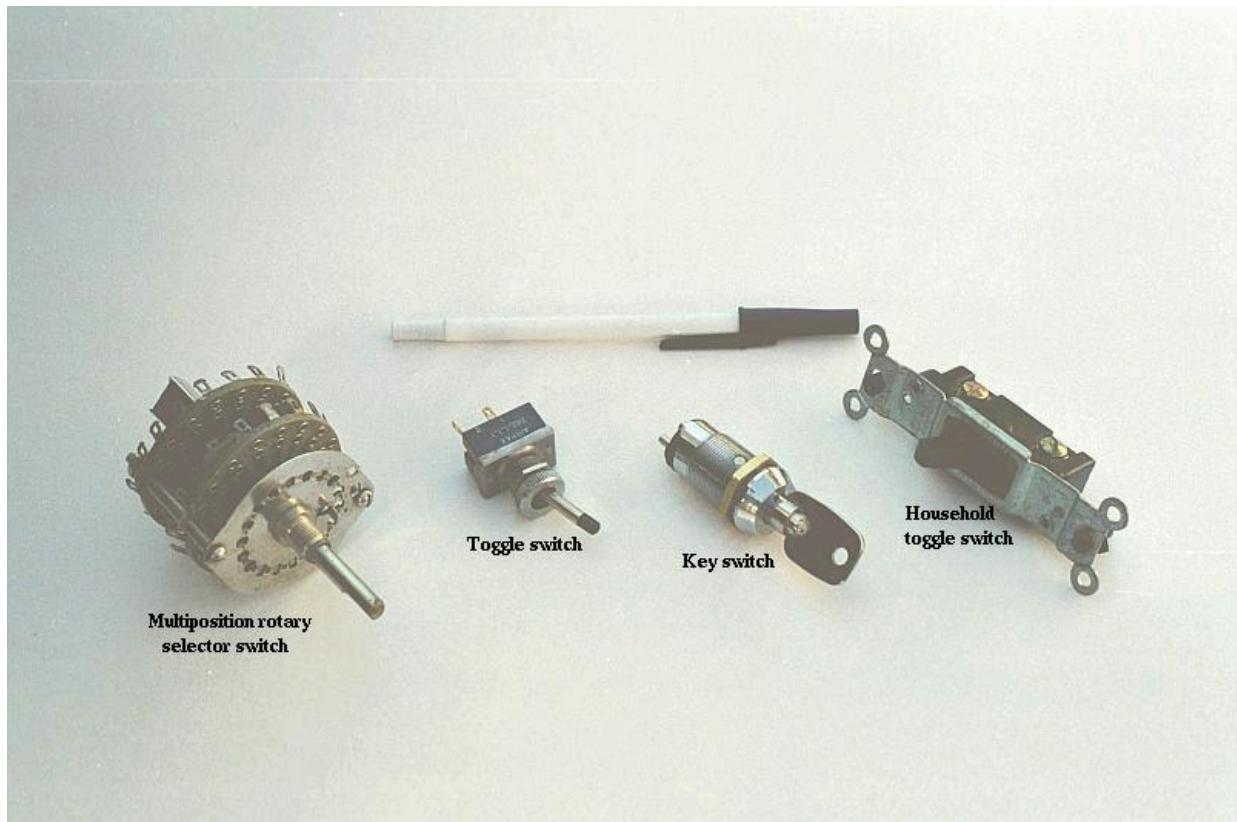


Figure 32: Întrerupătoare moderne

Folisind în continuare terminologia circuitelor electrice, un întrerupător ce realizează contactul între cei doi terminali ai săi (ex.: întrerupătorul cuțin cu lama ce atinge contactul staționar) crează continuitate pentru curgerea electronilor prin acesta, și este denumit un întrerupător *închis*. Analog, un întrerupător ce crează o discontinuitate (ex.: întrerupătorul cuțit cu lama îndepărțată de contactul staționar) nu va permite electronilor să treacă, și se numește un întrerupător *deschis*.

1.6 Tensiune și curent într-un circuit practic

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:

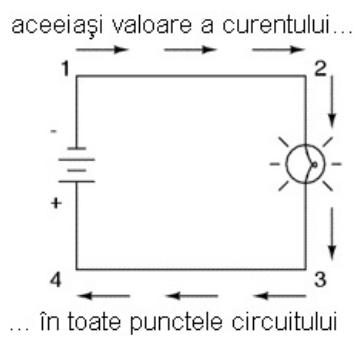


Figure 33: curentul este același în oricare punct al unui circuit electric simplu

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 întreg 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:

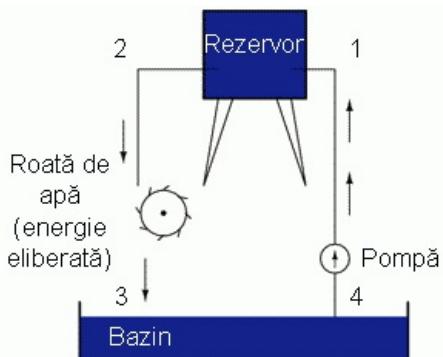


Figure 34: analogia rezervorului de apă - folosirea energiei eliberate pentru punerea în mișcare a unei roți de apă

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.

1.7 Sensul convențional și sensul real de deplasare al electronilor

„Cel mai frumos lucru legat de standarde este că există atât de multe din care putem alege” Andrew S. Tanenbaum, profesor de informatică

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 *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” (reprazentând un deficit de sarcină) au defapt un surplus de electroni.

În momentul în care a fost descoperita 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 însemnatate 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). 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 numele de *sensul convențional de deplasare al electronilor*:

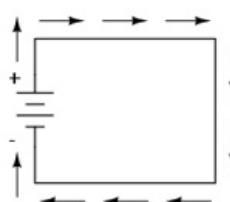


Figure 35: sensul convențional de deplasare al electronilor

Alții aleg să descrie deplasarea sarcinii exact așa cum se realizează ea din punct de vedere fizic într-un circuit. Această notăție a devenit cunoscută sub numele de *sensul real de deplasare al electronilor*:

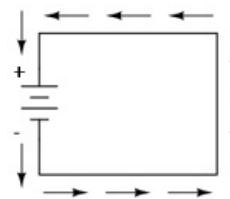


Figure 36: sensul real de deplasare al electronilor

În cazul sensului convențional de deplasare al electronilor, deplasarea sarcinii electrice este indicată prin denumirile (tehnice 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. Conțează chiar așa de mult modul în care punem aceste etichete într-un circuit? Nu, atâta timp cât folosim aceeași notăție 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” (Capitolul 2) sau „Legile lui Kirchhoff” (Capitolul 6) sunt la fel de valide oricare notăție am folosi-o.

Notația convențională este folosită de majoritatea inginerilor și ilustrată în majoritatea cărților de inginerie. Notația reală este cel mai adeasea întâlnita în textele introductive (acestea, 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.

Multe dispozitive electrice suportă curenti electrici în ambele direcții fără nicio diferență de funcționare. Becurile cu incandescentă, de exemplu, produc lumină cu aceeași eficiență indiferent de sensul de parcurs al curentului prin ele. Funcționează chiar foarte bine în curent alternativ (ca), 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 direcție curentului se numesc dispozitive *polarizate*.

Există multe astfel de dispozitive polarizate folosite în circuitele electrice. Multe dintre ele sunt realizate din substanțe denumite *semiconductoare*, și prin urmare nu le vom studia decât în al treilea volum din această carte. Ca și în cazul întrerupătoarelor, becurilor sau bateriilor, fiecare din aceste dispozitive este reprezentată 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 folosit în aceste reprezentări, indică *toate în sensul convențional de deplasare a electronilor, și nu în 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 prevină deplasarea electronilor în direcția opusă (rezistență infinită). Simbolul folosit este acesta:

Diodă



Figure 37: simbolul diodei

Introdusă într-un circuit cu o baterie și un bec, se comportă astfel⁵:

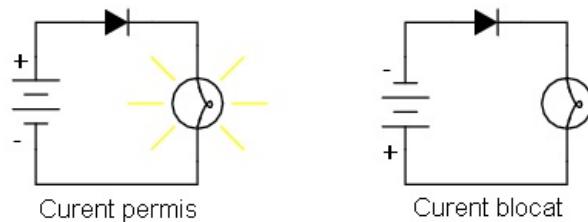


Figure 38: funcționarea diodei

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 lumeni.

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:

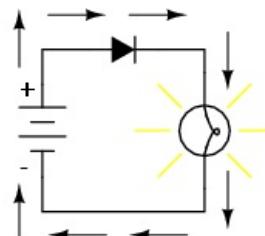


Figure 39: sensul curentului prin diodă folosind notația convențională

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

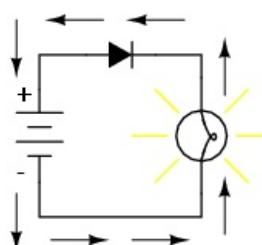


Figure 40: sensul curentului prin diodă folosind notația reală

Din acest motiv simplu, mulți oameni tend 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 data faptul că electronic se deplasează *de fapt* în direcția opusă, atunci când această direcție de deplasare devine importantă dintr-un oarecare motiv.

Pentru restul cărții se va folosi notația reală de deplasare a electronilor.

2 Legea lui ohm

2.1 Relația dintre tensiune, curent și rezistență

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 *current*, și adeseori este denumită „curgere”, la fel precum curgerea lichidului dintr-o țeavă.

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 cantitatea de energie *potențială* existentă pentru deplasarea electronilor dintr-un punct al circuitului într-altul. Fără a face referință la *două* puncte distincte, termenul de „tensiune” nu are sens.

Electronii liberi tind să se deplaseze prin conductoare 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” cand vorbim de tensiunea sau rezistență dintre două puncte ale unui circuit.

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

Mărime	Simbol	Unitate de măsură	Prescurtare
Curent	I	Amper	A
Tensiune	E sau V	Volt	V
Rezistență	R	Ohm	Ω

„Simbolul” pentru fiecare mărime este litera din alfabet folosită pentru reprezentarea mărimii respective într-o ecuație algebraică. Asfel 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.

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 „instantanea”). 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 existantă 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).

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 unitatea 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.

După cum am 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 o energie electrică potențială de 1 joule pe (împărțit la) o sarcină electrică de 1 coulomb. Asfel, o baterie de 9 volți eliberează o energie de 9 jouli pentru fiecare coulomb de electroni ce se deplasează prin circuit.

Aceste simboluri și unități pentru mărimile electrice vor fi foarte importante atunci 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* (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 sa, oricare ar fi temperatura, lucru exprimat printr-o ecuație simplă ce descrie relație dintre tensiune, curent și rezistență:

$$E = I R$$

Figure 41: formulă matematică

În această expresie algebraică, tensiunea(E) este egală cu, curentul(I) înmulțit cu rezistența(R). Această formulă poate fi rescrisă sub următoarele forme, în funcție de I:

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

Figure 42: formulă matematică

Să folosim acum aceste ecuații pentru a analiza circuitele simple:

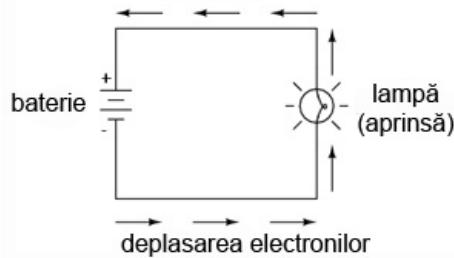


Figure 43: circuit simplu: baterie plus bec

În circuitul de mai sus, 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):

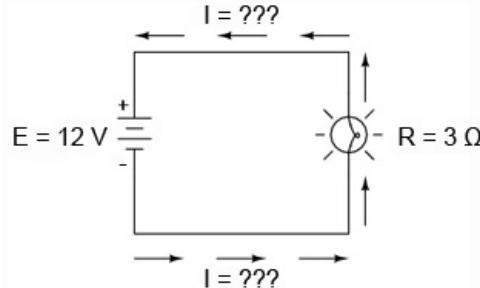


Figure 44: aflarea curentului într-un circuit simplu, atunci când cunoaștem tensiunea și rezistența folosind legea lui Ohm

Care este valoarea curentului (I) din acest circuit?

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

Figure 45: calcule matematice

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

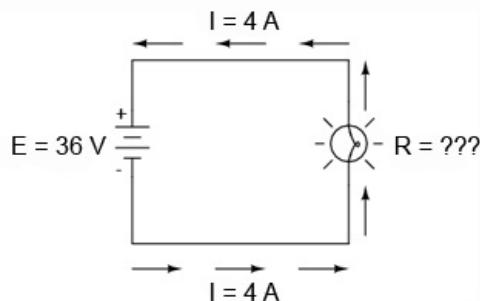


Figure 46: aflarea rezistenței într-un circuit simplu, atunci când cunoaștem tensiunea și curentul folosind legea lui Ohm

Care este valoarea rezistenței becului în acest caz?

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

Figure 47: calcule matematice

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

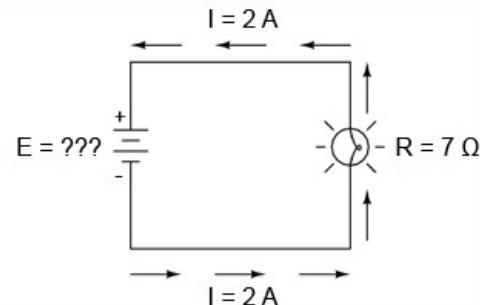


Figure 48: aflarea tensiunii generate de baterie într-un circuit simplu, atunci când cunoaștem rezistența și curentul folosind legea lui Ohm

Care este valoarea tensiunii generate de baterie?

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

Figure 49: calcule matematice

2.2 Puterea în circuitele 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 (grutăți) atunci când asupra acestuia acionează forța gravitației. Cu cât corpul este mai greu și/sau cu cât este ridicat la o înălțime mai mare, cu atât a fost efectuat mai mult *lucru*. *Puterea* măsoară cât de rapid a fost efectuată o cantitate standard de lucru.

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 torsion 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 calcului cailor putere (CP) este simplă:

$$CP = \frac{2 \pi S T}{33,000}$$

Figure 50: formulă matematică

unde,

- S = viteza arborelui în r.p.m.
- T = cuplul arborelui în Nm
- π = 3.14 (constanta pi)

Potem observa că există doar două variabile în partea dreaptă a ecuației, S și T. Toți ceilalți termeni sunt constanți: 2, π și 5252, toate sunt constante (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 scrie ecuația pentru a arăta această relație:

$$CP \propto S T$$

Figure 51: formulă matematică

unde,

- \propto înseamnă direct proporțional (adesea prescurtat d.p.)
- S și T au semnificațile de mai sus

Doarece 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).

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:

$$P = I E$$

Figure 52: formulă matematică

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 însăle. Puterea este combinația celor două într-un circuit. Rețineți că tensiunea este lucru specific (sau energia potențială) pe unitate de sarcină, în timp ce curentul este rata de deplasare a sarcinilor electrice printr-un conductor. Tensiunea (lucru specific) este analog lucrului efectuat în ridicarea unei greutăți atunci când asupra acesteia acionează forța gravitației. Curentul (rata) este analog 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, acolo unde tensiunea este prezentă între bornele sursei iar curentul este zero, puterea disipată este și ea egală cu zero, oricăr de mare ar fi tensiunea. 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 superconductor (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 deosemenea zero, folosind logica de mai sus. (Despre superconductivitate vom vorbi într-un alt capitol).

Fie că măsurăm puterea în „cal putere” sau în „watt”, vorbim despre același lucru: ce cantitate de lucru poate fi efectuată 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.

2.3 Calcularea puterii electrice

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:

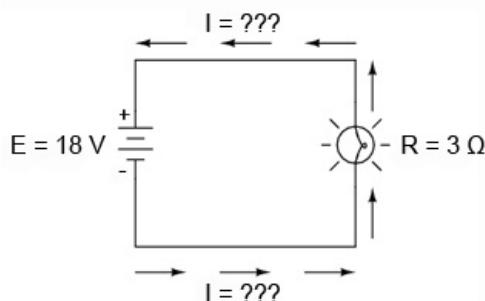


Figure 53: circuit simplu: baterie plus bec, calcularea puterii

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

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

Figure 54: calcule matematice

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

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

Figure 55: calcule matematice

Prin urmare, becul degajează 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 baterie) și să vedem ce se întâmplă. Intuiția ne spune că va crește curentul prin circuit pe măsură ce tensiunea bateriei crește iar rezistența becului rămâne aceeași. Si puterea va crește de asemenea:

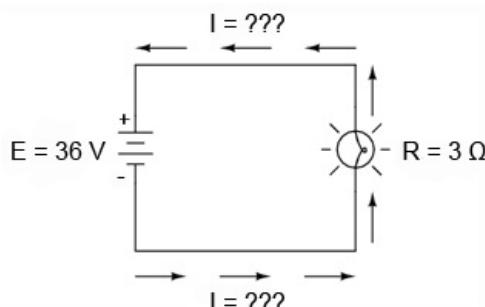


Figure 56: circuit simplu: baterie plus bec, calcularea puterii 2

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

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

Figure 57: calcule matematice

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. Întradevăr, asta s-a și întâmplat; acum avem 12 A în loc de 6 A câtă aveam înainte. Să calculăm acum și puterea:

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

Figure 58: calcule matematice

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, asfel 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 întradevăr 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:

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

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

$$\text{Atunci } P = \frac{E}{R} E \quad \text{sau} \quad P = \frac{E^2}{R}$$

Figure 59: formule matematice

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

$$\text{Dacă } E = I R \quad \text{și} \quad P = I E$$

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

Figure 60: calcule matematice

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

2.4 Rezistori

Datorită relației dintre tensiune, curent și rezistență în oricare circuit, putem controla oricare variabilă dintr-un circuit 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, mărimei, formei componentelor conductive (țineți minte cum filamentul metalic subțire al unui bec crează o rezistență electrică mai mare decât un fir gros?)

Componente speciale numite *rezistori* sunt confecționate cu singurul motiv 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 folositoare, ci pur și simplu asigurarea unei rezistențe electrice precise în circuit.

Simbolul rezistenței pe care îl vom folosi în circuite este cel în formă de zig-zag:



Figure 61: simbolul rezistorului

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 rezistență pot fi prezentate fie orizontal, fie vertical:



Figure 62: simbolul și notația rezistorului

Rezistoarele reale nu seamănă deloc cu un zig-zag, ci sunt asemenea unor tuburi sau cilindrii cu câte un fir la fiecare capăt pentru conectarea lor în circuit. Mai jos sunt câteva exemple de rezistori de diferite tipuri și mărimi:

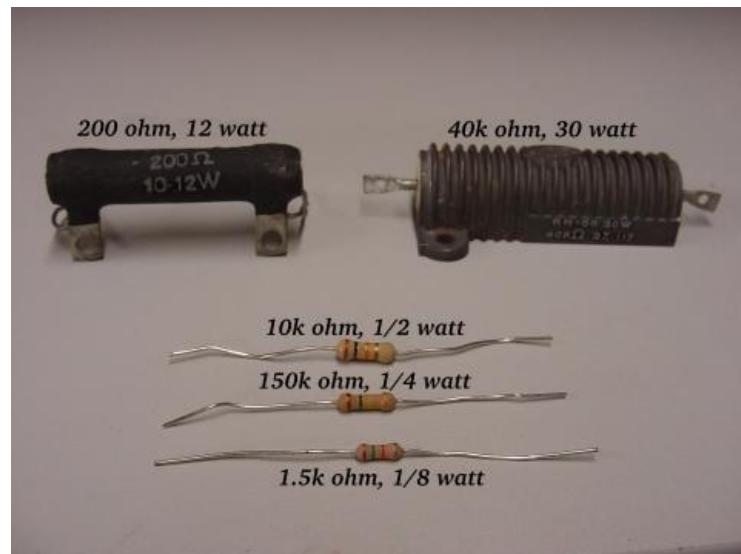


Figure 63: diferite tipuri și mărimi de rezistori

Dacă ne luăm după aparența lor fizică, un simbol alternativ pentru rezistori este cel din figura de mai jos¹:

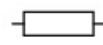


Figure 64: simbolul european al rezistorului

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 componentă a cărui rezistență este instabilă în timp:

Rezistență variabilă

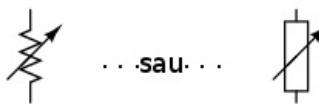


Figure 65: simbolul rezistorului variabil

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

Rezistoarele variabile trebuie să posedă o modalitate de ajustare, fie un arbore rotitor sau un braț ce poate fi mișcat pentru a varia valoarea rezistenței electrice. Mai jos avem poza unor dispozitive numite *potențiometre*, ce pot fi folosite ca și rezistori variabili:



Figure 66: exemplu de potențiometre - rezistori variabili

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-încalzi și distrugă. Această categorie este specificată în „watti”. Majoritatea rezistorilor din aparatelor 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 rezistență (în ohmi) nu are deloc legătură cu mărimea!

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. Pentru că sunt atât de simpli și de des utilizări în domeniul electricității și a electronicii, vom dedica o bună bucată de vreme analizei circuitelor compuse doar din rezistențe și baterii.

În diagramele schematicice, 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”.

Pentru a rezuma ceea ce am spus până acum, vom analiza circuitul de mai jos, încercând să determinăm tot ceea ce putem cu ajutorul informațiilor disponibile:

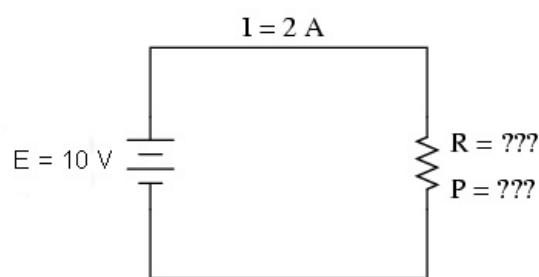


Figure 67: circuit electric simplu

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

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

Figure 68: relații matematice

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

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

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

Figure 69: calcule matematice

Pentru circuitul de față, în care avem 10 volți și 2 amperi, rezistența rezistorului trebuie să fie de 5Ω . 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 distrugă din cauza supra-încălzirii.

2.5 Conducție neliniară

Legea lui Ohm este un instrument simplu și puternic pentru analiza circuitelor electrice, dar are și unele limitații 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 rezistență majorată componentelor dintr-un circuit ca fiind constantă, astfel că tensiunea și curentul sunt în relație directă unul cu celălalt.

De exemplu, în exemplu 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 volți. Toate aceste lucruri sunt evidente, atât timp cât rezistența becului la deplasarea electronilor rămâne constantă la 3Ω .

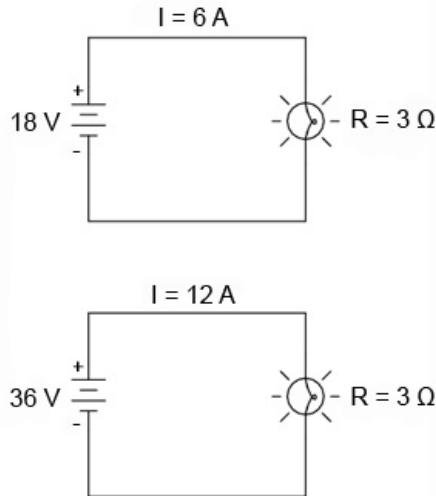


Figure 70: circuit electric simplu, dublarea tensiunii rezultă în dublarea curentului

Totuși, realitatea nu este atât de simplă. Unul din fenomenele prezentate într-un capitol viitor este cel al *modificării* rezistenței odată cu modificarea 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 rezistenței a curentului electric ar cauza creșterea temperaturii filamentului 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 temperatură este caracteristic majorității metalelor din care sunt confectionate firele. Pentru majoritatea aplicațiilor însă, aceste variații ale rezistenței sunt suficient de mici încât sunt neglijabile (nu sunt luate în considerare). În cazul filamentelor becurilor, variația rezistenței este destul de mare.

Acesta este doar un exemplu din domeniul neliniarității 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 3Ω , generează un grafic asemănător celui de jos:

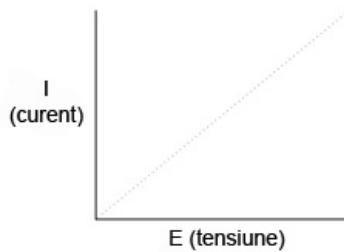


Figure 71: graficul curent-tensiune într-un circuit electric simplu idealizat

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 rezistență lor să fie cât mai stabilă, se coportă aproximativ asemenea graficului de mai sus. Un matematician numește acest comportament „liniar”.

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 de mai jos:

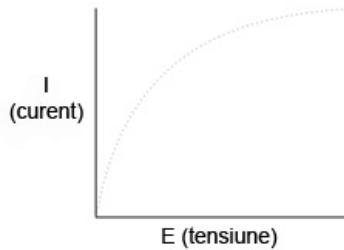


Figure 72: graficul curent-tensiune într-un circuit electric simplu idealizat

Acest grafic nu mai este o linie dreaptă. Aceasta 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*, crescând cu creșterea tensiunii și a curentului. Neliniaritatea este cauzată de efectul temperaturii ridicate a metalului ce compune filamentul becului.

Un alt exemplu de neliniaritate 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, permitând curgerea electronilor. Dacă realizăm graficul curent-tensiune precum în circuitul precedent, putem observa foarte clar efectul neliniar al ionizării:

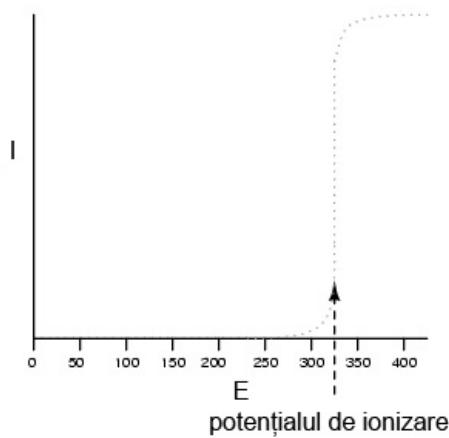


Figure 73: graficul curent-tensiune nelinier în cazul ionizării dielectricului dintre borne

Graficul de mai sus este aproimat pentru o grosime a dielectricului (aer) de 1cm. O eventuală distanță mai mare 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 soc 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 dez-ionizează și devine din nou un foarte bun dielectric (rezistență ridicată).

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 aşa cum o fac majoritatea gazelor. Este posibil să se comporte ca și un 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 izolație prin străpungere. Asemenea defecte pot fi detectate folosind aparate speciale de măsurare a rezistenței folosind tensiuni ridicate (peste 1000 V).

Există componente de circuit special concepute pentru proprietățile lor rezistive nelineare; unul dintre acestea este *varistorul*. Confeționat de obicei din oxid de zic 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 astă natură încât permite străpungerile repetitive fără apariția distrugerii fizice a componentului.

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*.

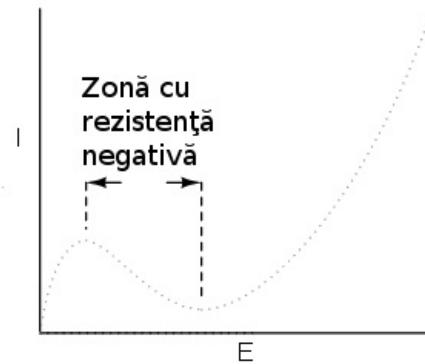


Figure 74: graficul curent-tensiune neliniar cu rezistență negativă

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. Aceasta a fost doar o mică parte din complexitatea lumii reale, pentru a nu lăsa impresia falsă că toate fenomenele electrice pot fi însumate sub câteva ecuații simple.

2.6 Conexiunea unui 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, atâtă timp cât am format un circuit complet. Contează lungimea firelor sau „forma” circuitului pentru calculele noastre? Să ne uităm aşadar la câteva configurații ale circuitelor și să aflăm:

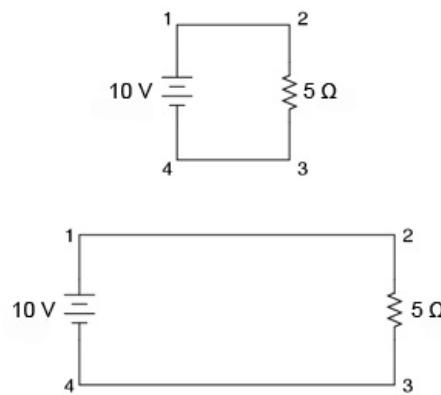


Figure 75: circuite electrice simple, diferite forme

Atunci când conectăm două puncte dintr-un circuit printr-un fir conductor, presupunem de obicei că acele fire prezintă o rezistență neglijabilă. Prin urmare, ele nu contribuie într-o măsură hotărâtoare la rezistență totală a circuitului, iar singura rezistență pe care o luăm în calcul este rezistență componentelor din circuit. În circuitele de mai sus, singura rezistență este rezistență de $5\ \Omega$ a rezistoarelor, și o vom considera doar pe aceasta în calculele noastre. În realitate, firele metalice *au* o anumită rezistență (precum și sursele de tensiune!), dar acele rezistențe sunt în general mult mai mici decât rezistența prezentă în celelalte componente din circuit încât pot fi neglijate. Excepție fac firele din circuitele de putere (curenți mari), unde chiar și o rezistență foarte mică poate genera căderi de tensiune importante.

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 re-trasa 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 același sevență.

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 același cu tensiunea dintre punctele 2 și 3 (la bornele rezistorului). Să analizăm următorul circuit și să vedem care sunt punctele comune:

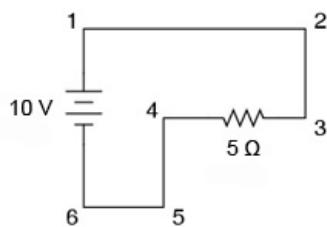


Figure 76: circuite electrice simple, diferite forme

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

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

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

- Între punctele 1 și 2 = 0 voltă Punctele 1, 2, și 3 sunt
- Între punctele 2 și 3 = 0 voltă comune din punct de vedere electric
- Între punctele 1 și 3 = 0 voltă
- Între punctele 4 și 5 = 0 voltă Punctele 4, 5, și 6 sunt
- Între punctele 5 și 6 = 0 voltă comune din punct de vedere electric
- Între punctele 4 și 6 = 0 voltă

Acest lucru are sens și din punct de vedere matematic. Cu o baterie de 10 voltă și un rezistor de 5Ω , 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:

$$E = I R$$

$$E = (2 A)(0 \Omega)$$

$$E = 0 V$$

Figure 77: relații matematice

Pentru că punctele comune din punct de vedere electric dintr-un circuit au aceeași tensiunea 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:

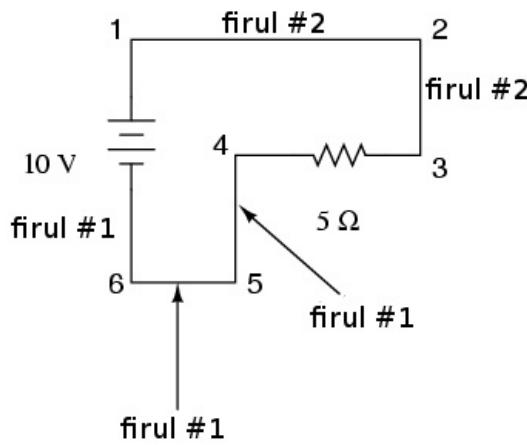


Figure 78: numerotarea firelor într-un circuit

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 se 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.

Ne putem folosi de faptul că tensiunea dintre punctele comune este zero ca și o metodă foarte bună de detectare a defectelor din circuit. Dacă măsurăm tensiunea din circuit dintre două puncte ce ar trebui să fie comune, aceasta ar trebui să fie zero. Dar dacă tensiunea citită este diferită de zero între aceste două puncte, atunci pot spune cu siguranță că cele două puncte nu au o conexiune directă între ele (nu sunt comune), caz în care s-ar putea că între cele două puncte, circuitul studiat să fie defapt (accidental) deschis.

2.7 Polaritatea căderilor de tensiune

Putem determina direcția curgerii 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 rezistență 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 ieșe din rezistor este cea pozitivă.

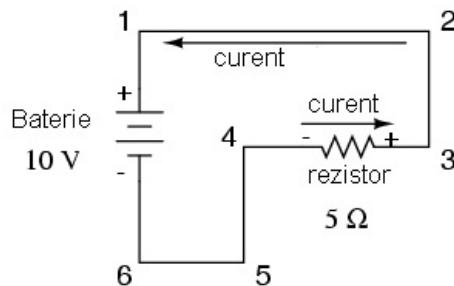


Figure 79: marcarea polarității căderii de tensiune într-un circuit simplu

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.

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.

3 Electrocutarea

3.1 Siguranța în domeniul electric

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. Aceasta 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.

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 multor funcțiilor corpului. Creierul, coloana vertebrală și organele de simț și motoare funcționează împreună pentru a permite corpului să simtă, să se deplaceze, să raspundă 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 elibereză neurotransmițători atunci când sunt stimulați de un curent electric. Dacă printr-un corp viu (uman sau nu) 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 acțiunea mușchilor cu ajutorul 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 victimă nu poate face nimic în această privință.

Această situație este cu atât mai periculoasă dacă victimă strângă conductorul aflat sub tensiune în mâini. Mușchii antebrațelor responsabili pentru mișcare degetelor tind să fie mai bine dezvoltăți 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 strângă mâna într-un pumn. În cazul în care conductorul atinge exact palma mâinii, această strângere va forța mâna să prindă strâns firul în mâna ducând la o agravare a situației datorită contactului excelent dintre corp și fir prin intermediul mâinii. Victimă nu va fi capabilă să lase firul din mâna fără un ajutor extern. Din punct de vedere medical, această condiție de contractie involuntară a mușchilor se numește *tetanos*, și poate fi întrerupt doar prin oprirea curentului prin victimă.

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

Dar efectele curentului electric asupra victimei nu se reduc doar la mușchi. Mușchiul ce controlează plămânii și inima (diafragma toracică) poate fi și el blocat de efectul curentului electric. Chiar și curenții mult prea slabii pentru a induce în mod normal tetanosul sunt suficienți pentru a da peste cap semnele celulelor nervoase în aşa măsură încât inima să nu mai funcționeze corect ducând la o conudență sub numele de *fibrilație*. Inima aflată în fibrilație mai mult trepidează decât bate, și este neficientă la pomparea sângeului 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.

1. Efectele curentului alternativ față de cele ale curentului 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 valoarea a curentului și a tensiunii. Curentul alternativ de frecvență joasă produce o contractie 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 contractie, 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 fibrilatie, în timp de curentul continuu tinde doar să opreasca inima. Odată ce șocul electric înțelegează, este mult mai ușor de „repornit” o inimă blocată decât una aflată în stare de fibrilare. Aceasta este și motivul pentru care echipamentul de „defibrilare” 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 contractia involuntară a mușchilor sunt periculoși și trebuie evitați cu orice preț.

3.2 Drumul curentului în cazul electrocutării

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

Fără existența a două puncte pe corp necesare intrării și ieșirii currentului, 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.

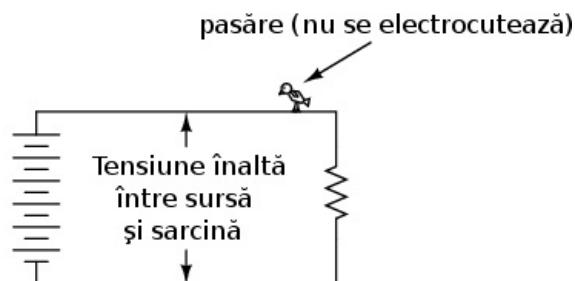


Figure 80: păsările ce se aşeză pe liniile de înaltă tensiune nu se electrocutează

Pentru ca electronii să circule printr-un conductor, este necesară prezența unei tensiuni pentru motivarea lor. Tensiunea 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.

Aceste considerații pot duce la formarea părerii (greșite!) că nu putem fi electrocuzați prin atingerea unui singur fir electric. Spre deosebire de păsări, oamenii stau de obicei pe suprafața pământului atunci ating un fir prin care trece curent electric. Adesea, o parte din sistemul de alimentare este conectată intenționat la pământ, iar persoana ce atinge un singur fir, realizează de fapt contactul între două puncte din circuit (firul și pământarea):

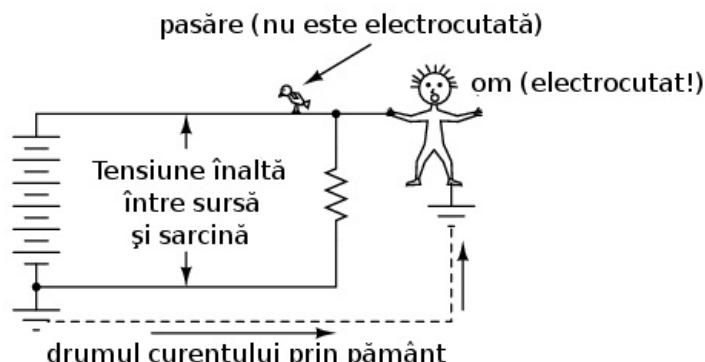


Figure 81: închiderea circuitului prin pământ la atingerea unui singur fir

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 metalic 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 pământul să fie? Dacă putem fi electrocuzați datorită curgerii curentului prin pământ, de ce să nu folosim pământul ca și conductor în circuitele noastre de putere?

1. Motivul legării la pământ a circuitelor (împământarea)

Cât privește prima întrebare, prezența unui punct de împământare „intențional” asigură faptul 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 electrocura, chiar dacă picioarele sale vin în contact cu pământul:

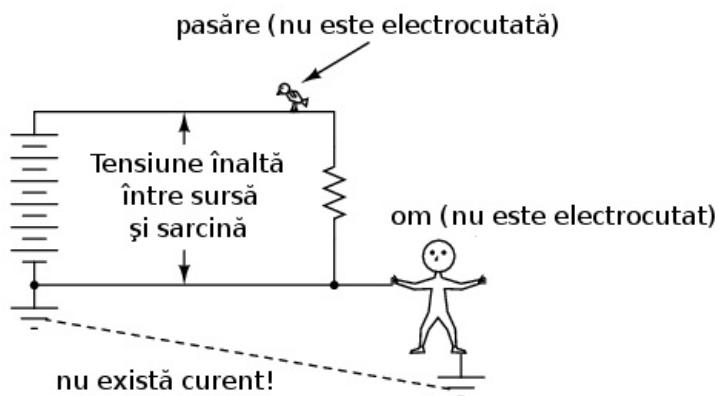


Figure 82: persoana nu este electrocutată în cazul în care firul atins este conectat la împământare

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 electric, asupra persoanei ce vine în contact cu firul nu va fi aplicată nicio tensiune iar aceasta nu va suferi niciun şoc 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. Dar dacă nu am lega circuitul deloc la pământ? Nu ar însemna asta că atingerea oricărui fir ar fi la fel de sigură? Ideal, da. Practic însă, nu. Observați ce se întâmplă fără niciun fel de împământare:

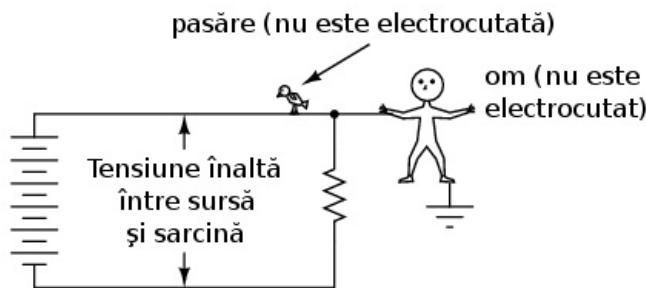


Figure 83: circuit neconectat la împământare - atingerea firelor libere este sigură

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/inchis 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: nu este sigură atunci când există o conectare accidentală a circuitului

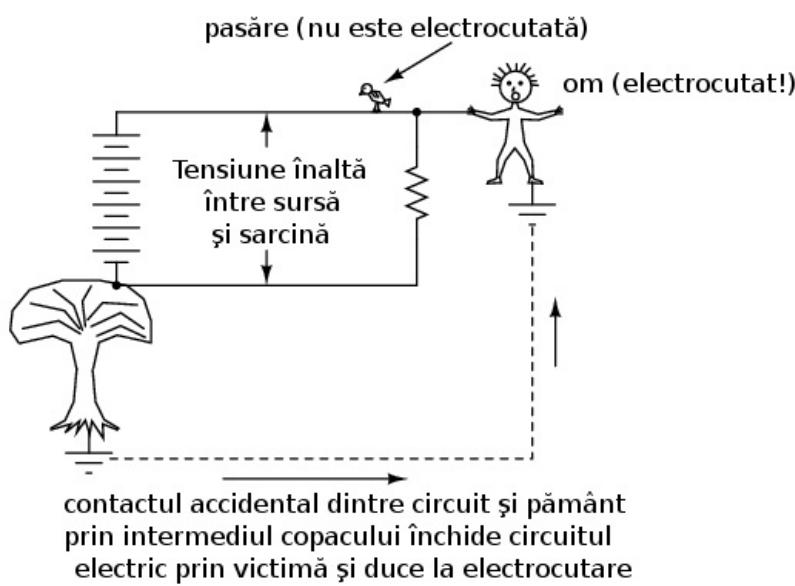


Figure 84: la pământ

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 cu care fir ar putea aceștia să intre în contact. 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.

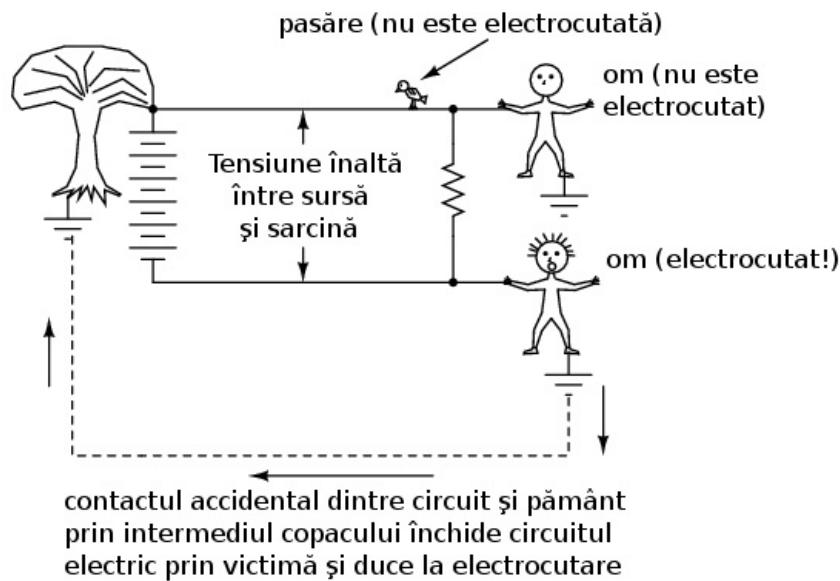


Figure 85: circuit neconectat la împământare - defectul de împământare poate duce la electrocutare

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:

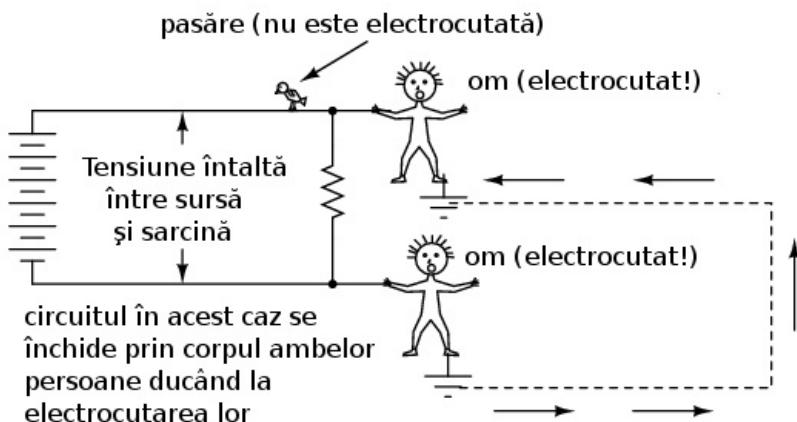


Figure 86: circuit fără împământare - electrocutarea ambelor persoane atunci când fiecare dintre ele atunge un punct din circuit cu potențial electric diferit

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, doarece 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.

2. Protecția la electrocutare prin purtarea încălțămintei adecvate

Pentru a răspunde celei de a doua întrebări, încălțămintea cu talpă de cauciuc *asigură* întradevăr o anumită protecție la electrocutare prin prevenirea închiderii circuitului între victimă și pământ. Cu toate acestea, majoritatea tipurilor de încălțăminți nu sunt proiectate pentru asigurarea siguranței electrice, având în majoritatea cazurilor o talpă prea subțire sau dintr-un material neadecvat. De asemenea, orice umeazeală, mizerie sau săruri conductive provenite de la transpirație aflate pe suprafață sau ce străpung talpa încălțămintei duce la compromiterea valorii izolației inițiale ale acesteia. Există încălțăminți special concepuți pentru lucrul la tensiune înaltă, precum și preșuri din cauciuc pentru stat, dar aceste echipamente speciale de lucru trebuie ascunsă 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 încălțămințe de piele (uscat): între $100\text{ k}\Omega$ și $500\text{ k}\Omega$
- Contact prin intermediul piciorului protejat cu încălțămințe de piele (ud): între $5\text{ k}\Omega$ și $20\text{ k}\Omega$

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

3. 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 a conduce o cantitate suficientă de curent atunci când există o tensiune suficientă la îndemână (care de obicei în sistemele de alimentare există).

Unele suprafete de pământ sunt materiale izolatoare mai bune decât altele. Asfaltul de exemplu, fiind o substanță în mare 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 (substanță chimică conductoare).

3.3 Legea lui Ohm (din nou!)

În cadrul teoriei siguranței electrice 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 „currentul 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:

$$I = E / R$$

Cantitatea de curent printr-un corp este egală cu raportul dintre valoarea tensiunii aplicate între două puncte distințte 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 înaseamnă 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 este dat până la urmă de valoarea rezistenței totale disponibilă în circuit pentru împiedicare transferului de electroni prin corp.

Rezistența corpului nu este nici ea o valoarea 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 grăsimi 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 ($1 \text{ M}\Omega$) (înținând cele două sonde, fiecare într-o mână). Multimetru indică o rezistență mai mică dacă strângem puternic sondele în mână decât atunci când le ținem ușor.

1. Valoarea curentului peste care acesta devine periculos

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 aceluiasi 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 curentilor sunt date în miliamperi ($1 \text{ mA} = 0.001 \text{ A}$):

**

EFFECT ASUPRA CORPULUI	CURENT CONTINUU	CURENT ALTERNATIV (60 Hz)	CURENT ALTERNATIV (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, victimă 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 că o valoarea 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.

2. Scenarii

Să presupunem de exemplu că am prinde în ambele mâini terminalele unei surse de tensiune alternativă la o frecvență de 60 Hz. 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 soc electric dureros, este suficientă o valoare mult mai mică a tensiunii! De asemenea, țineți minte că efectele fiziole ale curentului electric variază în mare măsură de la o persoană la alta, iar aceste valori calculate sunt doar aproximări.

Dacă ne udăm pe mâini pentru a încerca să simulăm transpirația, rezistență electrică dintre cele două mâini scade până la o valoare de aproximativ 17.000 de ohmi (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:

$$E = IR$$

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

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

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). Totuși, este posibilă apariția unui soc 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 coborâră 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:

$$E = IR$$

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

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

În această situație, sunt suficienți 20 V pentru producerea unui curent de 20 mA prin corpul victimei, suficient pentru inducerea tetanosului. Luând în considerare faptul că, teoretic, 17 mA sunt suficienți pentru inducerea fibrilației inimii, o rezistență electrică de 1 kΩ între cele două mâini face ca o cădere de tensiune de doar 17 V să fie extrem de periculoasă: Șaptesprezece volți nu este o valoare foarte mare din punct de vedere al rețelelor electrice. Desigur, aceasta este situația cea mai proastă posibil, cu o tensiune alternativă la 60 Hz și conductivitate excelentă a corpului, dar utilitatea ei constă în exemplificarea faptului că o tensiune foarte mică se poate dovedi periculoasă în anumite condiții și situații.

Nu este necesar ca aceste condiții de realizare a rezistenței electrice de 1 kΩ 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 victimă să strângă și mai bine conductorul în mâină), astfel încât cu o tensiune constantă, severitatea unui soc electric se poate agrava în timp după contactul inițial. Ceea ce începe ca un soc ușor - suficient pentru a „îngheța” victimă pe fir, astfel încât să nu-l poată lăsa din mâină - se poate transforma într-un soc 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	Rezistență electrică (condiții uscate)	Rezistență electrică (condiții umede)
Fir atins de deget	40 kΩ - 1 MΩ	4 kΩ - 15 kΩ
Fir prins în mâină	15 kΩ - 50 kΩ	3 kΩ - 5 kΩ
Clești metalici ținuți în mâină	5 kΩ - 10 Ωk	1 kΩ - 3 kΩ
Contact cu palma mâinii	3 kΩ - 8 kΩ	1 kΩ - 2 kΩ
Bară metalică de 4 cm ținută cu o mâină	1 kΩ - 3 kΩ	0.5 kΩ - 1,5 kΩ
Bară metalică de 4 cm ținuta cu ambele mâini	0.5 kΩ - 1,5 kΩ	0.25 kΩ - 0.75 kΩ
Mână introdusă în lichid conductor	0.2 kΩ - 0.5 kΩ	
Picior introdus în lichid conductor	0.1 kΩ - 0.3 kΩ	

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

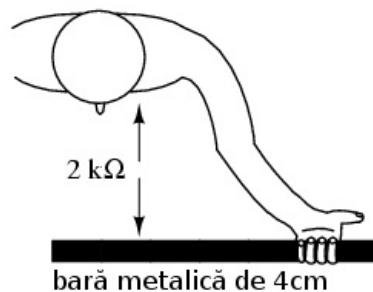


Figure 87: realizarea contactului cu o bară metalică cu o singură mâină

Cu ambele mâini pe bară, suprafața de contact este de două ori mai mare decât cu o singură mâină. 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.

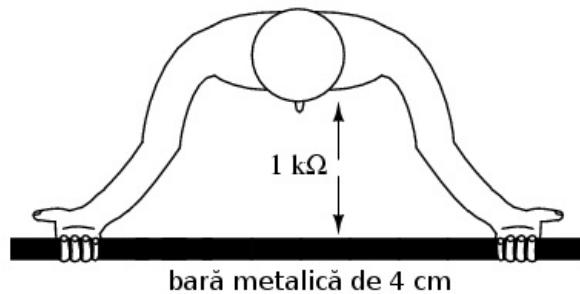


Figure 88: realizarea contactului cu o bară metalică cu două mâini

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.

3. 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 cele mai periculoase. Din această cauză, închiderea circuitului prin mâini (electrocutare) este cea mai probabilă cauză a accidentelor și deceselor. Pentru a veni în întăriminarea 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; cealată 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 soc electric, sansele apariției acestuia sunt mai mici datorită coordonării crescute față de mâna dreaptă a acestora.

4. Folosiți echipamente și instrumente de lucru izolate electric

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 (link!).

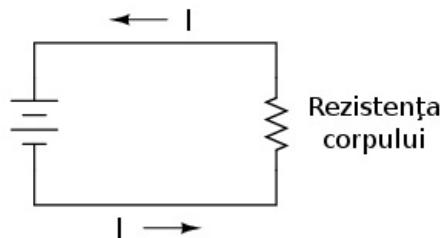


Figure 89: rezistența corpului într-un circuit electric

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

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

Figure 90: persoanele ce intră în contact direct cu sursele de tensiune: curentul este limitat doar de rezistența corpului

Circuitul echivalent pentru aceeași situație, dar cu persoana în cauză purtând mănuși și încălțămintă de protecție (izolate electric):

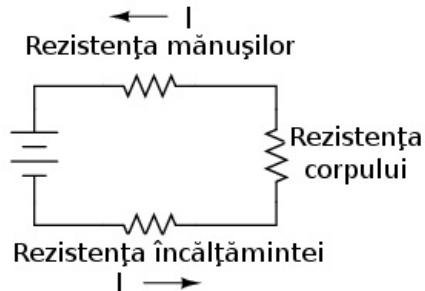


Figure 91: rezistența corpului plus cea a încălțămintei și mănușilor de protecție într-un circuit electric

Persoanele ce poartă mănuși și încălțăminte de protecție: curentul este limitat acum de valoarea totală a rezistenței din circuit:

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

Figure 92: persoanele ce poartă mănuși și încălțăminte de protecție: curentul este limitat acum de valoarea totală a rezistenței din circuit

Deoarece curentul trebuie acum să treacă prin încălțăminte, 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.

5. Siguranța liniilor de înaltă tensiune

Siguranța este unul din motivele pentru care conductorile electrice sunt de obicei acoperite cu izolație de plastic sau cauciuc: pentru a crește substanțial valoarea rezistenței dintre conductori și persoanele ce ar putea veni în contact cu acestea, oricare ar fi motivul. Din păcate, izolarea conductorilor din liniile electrice de înaltă tensiune este mult prea scumpă datorită cantitatii 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.

3.4 Practici de bază

Dacă este posibil, închideți întotdeauna alimentarea rețelei electrice înainte de atingerea oricărora 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.

1. Asigurarea circuitelor cu ajutorul întrerupătoarelor

Toate circuitele ar trebui să aibă 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:

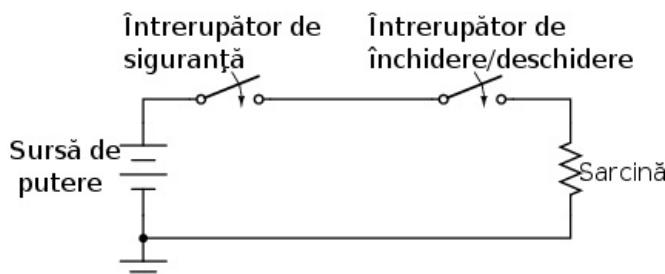


Figure 93: întrerupător de siguranță și întrerupător de închidere/deschidere a circuitului

Cu întrerupător în poziția deschis (precum în figură), continuitatea circuitului este întreruptă și curentul din circuit este zero. Caderea 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 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:

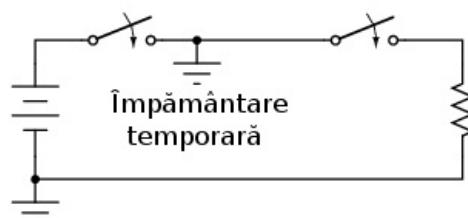


Figure 94: asigurarea suplimentară a unui circuit deconectat de la sursa de putere prin realizarea unei împământări temporare a părții din circuit neconectate inițial la împământare

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

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:

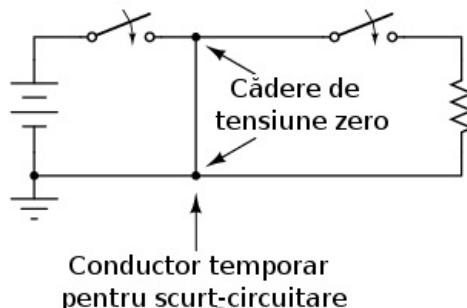


Figure 95: asigurarea suplimentară a unui circuit deconectat de la sursa de putere prin realizarea unui scurt-circuit cu ajutorul unui conductor plasat între cele două părți ale circuitului

Indiferent de măsura luată, ambele părți ale sarcinii se vor afla la aceeași 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.

2. Folosirea aparatului 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 înaintea 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.

3. Atingerea circuitului după luarea tuturor măsurilor 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 (link!) și la îndepărțarea persoanei de locul periculos. Aceasta 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.

3.5 Reacția în cazuri de urgență

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 trebuie 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 sau două persoană vine în contact cu victimă, 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 initiale. Nu faceți pe eroul! Electronii nu respectă eroismul.

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, carne și organele interne ale victimei sunt făcute scrum într-un timp foarte scurt.

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 nonmetallic, izolant, ce poate fi găsit în împrejurime. O metodă bună de îndepărțare a victimei este folosirea unui prelungitor electric plasat în jurul corpului victimei și tragerea acestuia din preajma circuitului. Țineți minte că victimă va strângă conductorul cu toată forță, prin urmare tragerea și dezlipirea acestuia de pe circuit nu va fi deloc ușoară!

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

Dacă victimă este conștientă, aceasta trebuie ținută pe loc până la sosirea unui echipaj medical specializat la locul accidentului.

Există posibilitatea căderii victimei într-un soc fiziologic - o situație în care circulația săngelui 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 soc electric inițial insuficient pentru a cauza întreruperea imediată a bătăii inimii, să cauzeze probleme și să duc la un infarct câteva ore mai târziu; victimă va trebui să fie foarte atentă la condiția ei generală după incident, ideal, sub supraveghere.

3.6 Surse potențiale de pericol

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.

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 baii 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.

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 prezei mascul ce se conectează în mod normal la priză de alimentare; în acest fel, ne putem asigura că nimici 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 folosiți niciodată un dispozitiv sau instrument 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.

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 (scânteii) 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, astfel:

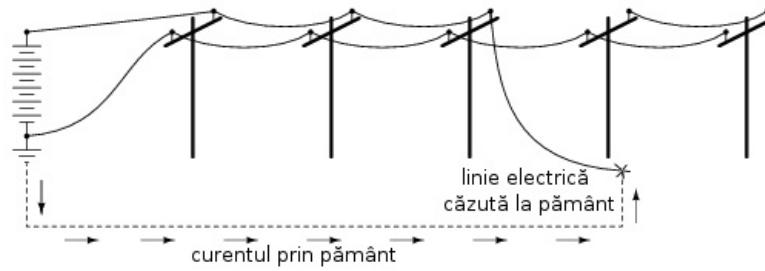


Figure 96: linie electrică căzută la pământ - posibilitatea apariției electrocutării

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; cădere de tensiune în lungul cablului electric va fi mult mai mică (cifrele din figură sunt foarte aproximative):

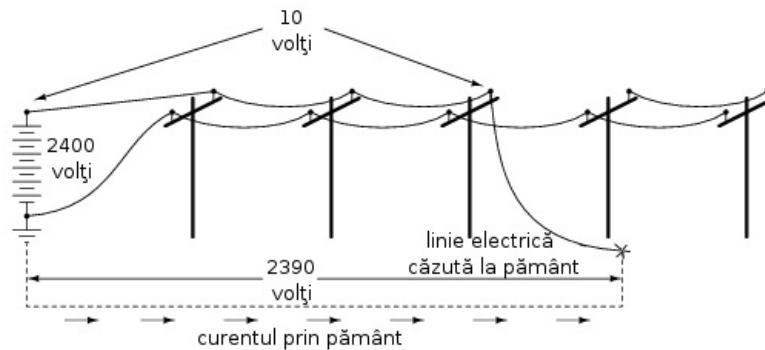


Figure 97: linie electrică căzută la pământ - valorile aproximative ale căderilor de tensiune

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 !!!)

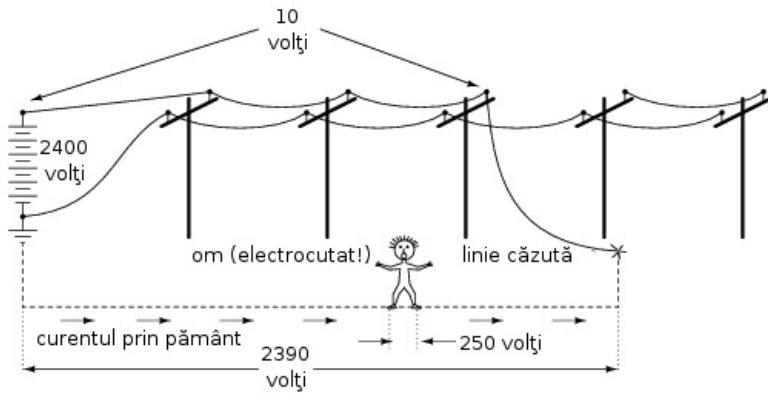


Figure 98: linie electrică căzută la pământ - electrocutarea persoanei ce se află între punctul de contact al liniei electrice și punctul de împământare al rețelei

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

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.

3.7 Proiectarea aparatelor electrice

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 *neutrul*, iar celălalt conductor este conductorul *sub tensiune* sau *fază*:

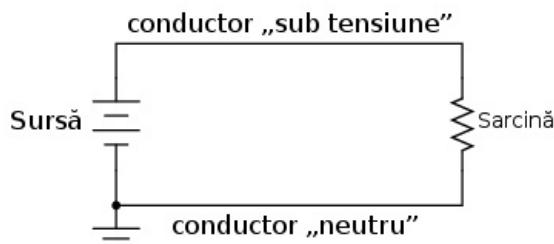


Figure 99: legarea unei părți a circuitului monofazat la împământare

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).

Dacă luăm, de exemplu, un aparat electric, precum un prăjitor de pâine, cu o carcăsă 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 carcăsa metalică, precum și între ele, cu un material plastic sau de cauciuc.

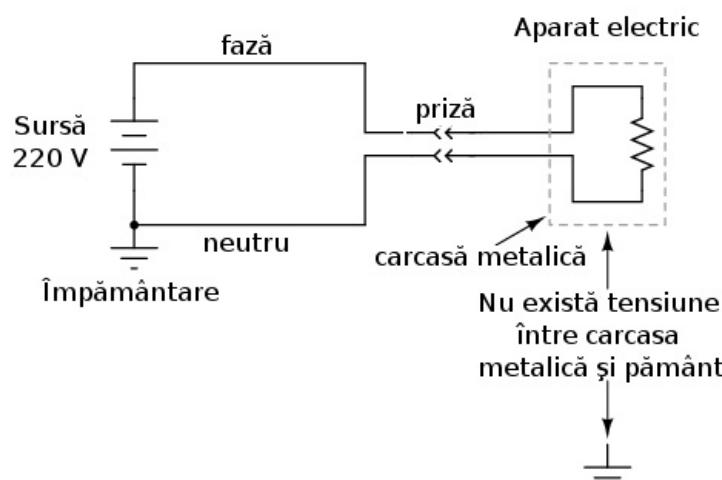


Figure 100: conectarea unui aparat electric cu carcăsă metalică la rețeaua de alimentare - căderea de tensiune între carcăsa metalică și pământ este de 0 volți

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:

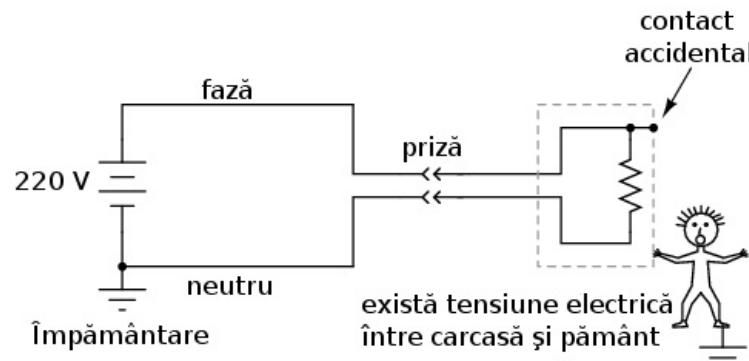


Figure 101: conectarea unui aparat electric cu carcăsa metalică la rețeaua de alimentare; la contactul accidental dintre fază și carcăsa metalică, există o cădere de tensiune potențial periculoasă între carcăsa și pământ

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

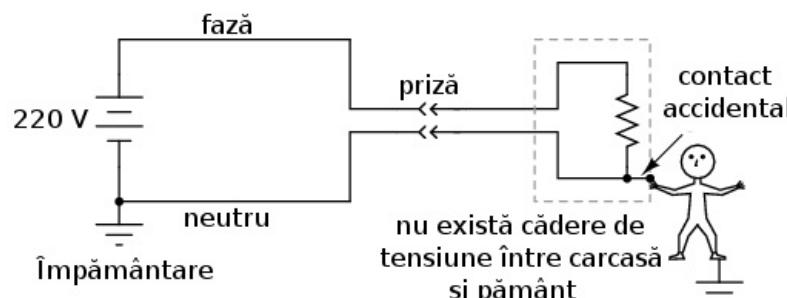


Figure 102: conectarea unui aparat electric cu carcăsa metalică la rețeaua de alimentare; la contactul accidental dintre neutrul și carcăsa metalică, nu există niciun pericol de electrocutare

Pentru a se asigura că primul caz este mai puțin probabil decât celălalt, se încercă în general proiectarea aparatelor electrice astfel încât riscul ca faza să intre în contact direct cu carcăsa 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 carcăsa poate la fel de bine să fie cel aflat sub tensiune:

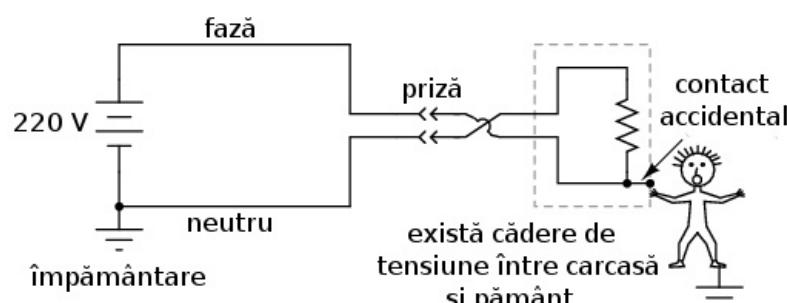


Figure 103: conectarea unui aparat electric cu carcăsa metalică la rețeaua de alimentare; inversarea polarității prizei înseamnă ca orice fir care vine în contact cu carcăsa prezintă un potențial periculos de electrocutare

Aparatele electrice proiectate astfel se folosesc la prizele polarizate, un picior al conectorului fiind mai lat și celălalt mai îngust (prizele sunt și ele construite în acest fel). Prin urmare, conectorul nu poate fi introdus „inver” 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.

O altă metodă este realizarea carcasei exterioare a aparatului dintr-un material non-conductiv. Astfel de aparate se numesc dublu-izolate, doarece carcăsa 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 carcăsa, aceasta nu prezintă niciun pericol de electrocutare pentru utilizator.

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

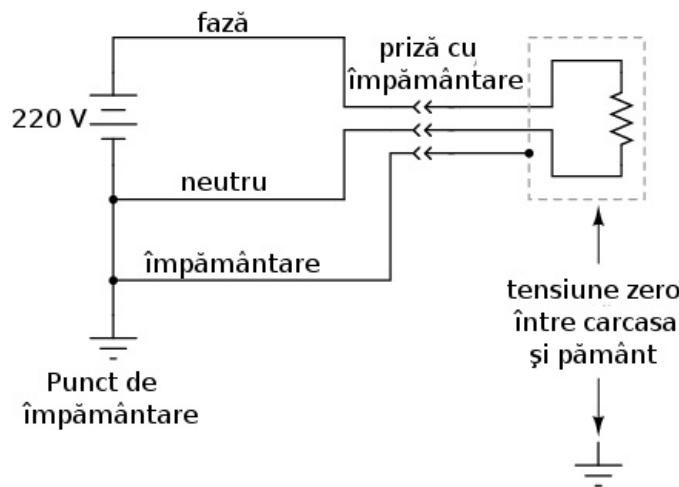


Figure 104: conectarea unui aparat electric cu carcasă metalică la rețeaua de alimentare; folosirea prizei cu împământare pentru înlăturarea pericolului electrocutării

Al treilea contact al conectorului prezent la capătul cablului de alimentare asigură o conexiune directă între carcasă 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 (faza) atinge accidental carcasă 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 dorîți să introduceți un conector fără împământare într-o priză cu împământare! Aparatul va funcționa în continuare fără nicio problemă, dar, prin îndepărțarea acestui contact, nu va mai exista nicio legătură directă între carcasă metalică a aparatului și pământ, existând astfel un real pericol de electrocutare pentru persoanele ce vin în contact direct cu carcasă aparatului în cazul apariției defectelor.

1. Detectarea diferenței de curent între fază și neutrul

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

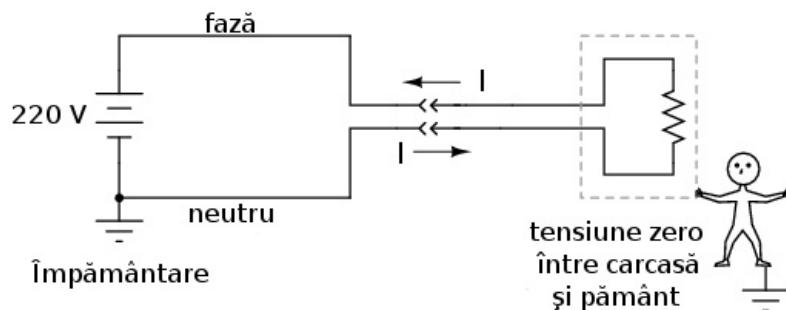


Figure 105: conectarea unui aparat electric cu carcasă metalică la rețeaua de alimentare;

În cazul unui aparat 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 neutrul, 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 carcasă metalică, va exista un curent prin persoana electrocutată și prin pământ, ce reduce curentul prin neutrul și amplifică valoarea sa prin fază, ducând la o diferență de curent între cele două:

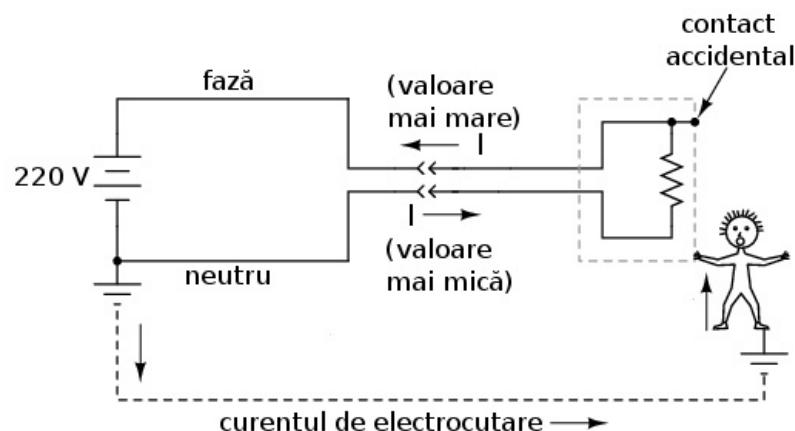


Figure 106: conectarea unui aparat electric cu carcasă metalică la rețeaua de alimentare; diferența de curent între fază și neutrul în cazul electrocutării

Diferența de curent între cei doi conductori, fază și neutrul, 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 pentru a întrerupe astfel alimentarea cu energie electrică de la rețea și prevenirea electrocutării.

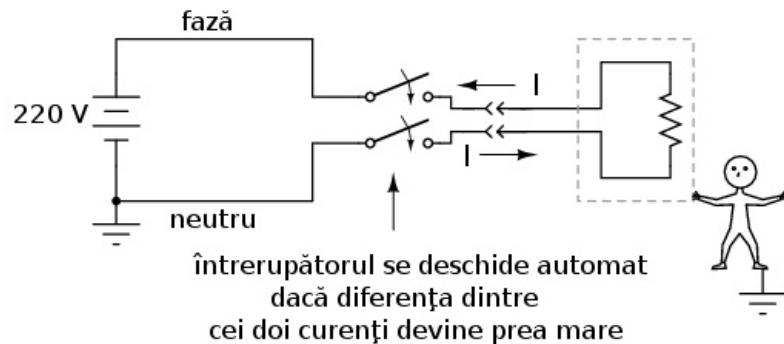


Figure 107: conectarea unui aparat electric cu carcasa metalica la reteaua de alimentare; deschiderea automată a întrerupătorului în cazul existenței unei diferențe prea mari între curentii fazei și al neutrului

3.8 Utilizarea aparatelor de măsură

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 curentilor prezenți în circuitul de măsurat. Din această cauză, trebuie acționat foarte atent atunci când utilizăm aparatelor de măsură. Cel mai utilizat aparat de măsură electric poartă numele de multimetru. Denumirea vine de la faptul că aceste aparete 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 neatente, acesta poate deveni o reală sursă de pericol la conectarea într-un circuit alimentat.

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.

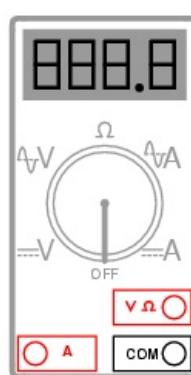


Figure 108: multimetru digital; prezentare generală

Putem observa că afişajul 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 poziție reprezentată cu ajutorul unei forme de undă sinusoidală, 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 utilizati pentru realizarea legăturii dintre circuit și multimetru. Conducatorii sunt acoperiți de o izolație colorată, neagră sau roșie, pentru a preveni contactul direct, iar vârfurile sunt ascuțite și rigide.

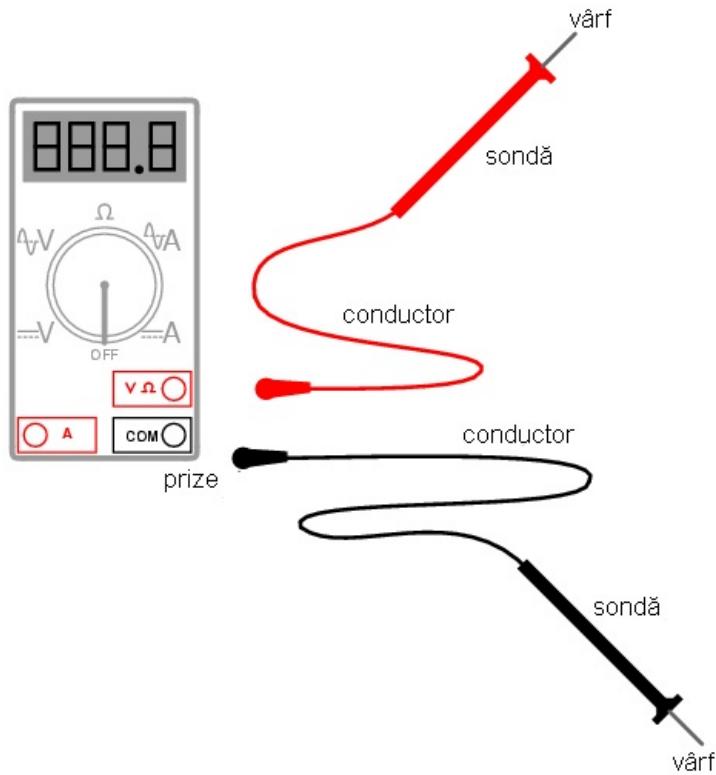


Figure 109: multimetru digital; prezentare generală

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 ($V\Omega$) sau în cea pentru curent (A), în funcție de ce variabilă dorim să măsurăm.

3.8.1 Utilizarea multimetrului - exemple

1. Măsurarea unei tensiuni de curent continuu

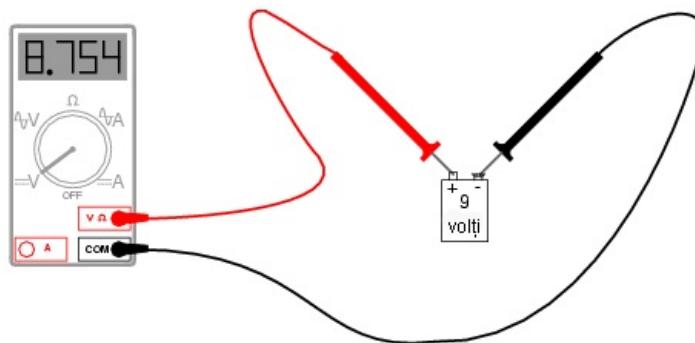


Figure 110: multimetru digital; măsurarea tensiunii de curent continuu a unei baterii

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 ($V\Omega$ și COM) și faptul că selectorul este setat pe „V” în curent continuu.

2. Măsurarea unei tensiuni de curent alternativ

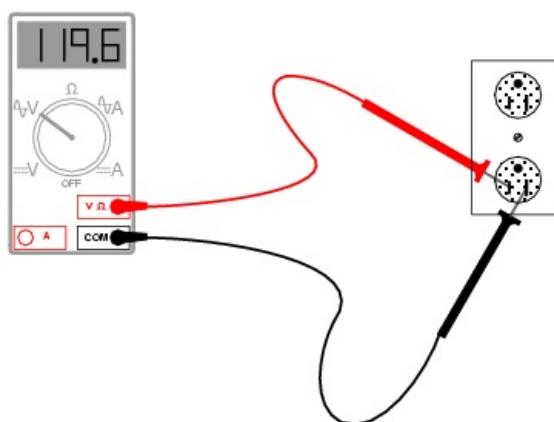


Figure 111: multimetru digital; măsurarea tensiunii de curent alternativ la priză

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

3. 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.

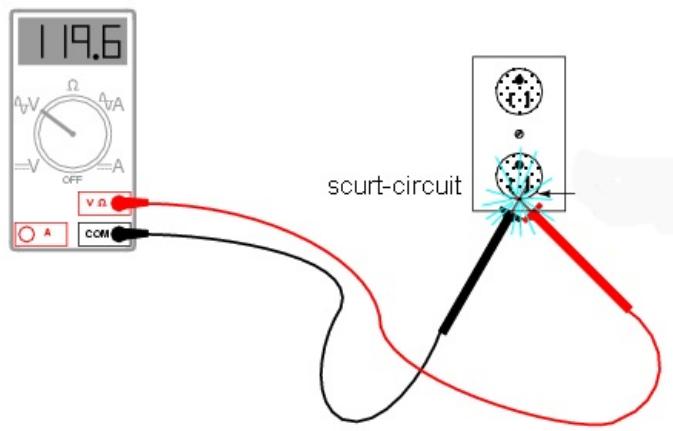


Figure 112: multimetru digital; măsurarea tensiunii de curenț alternativ la priză

Măsurarea tensiunilor este probabil cea mai folosită 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 mâini utilizatorului pentru crearea contactelor. Dar știm deja că cea mai periculoasă cale pentru curenț, în cazul electrocutărilor, este între cele două mâini, deoarece curențul 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 curenț 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 nevoie 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.

Tineți 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 curenț continuu cât și cele de curenț 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 așteptat să le găsiți pe amândouă!

4. Numărul măsurătorilor 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 curenț alternativ. Oprim alimentarea preîn 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 că 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?

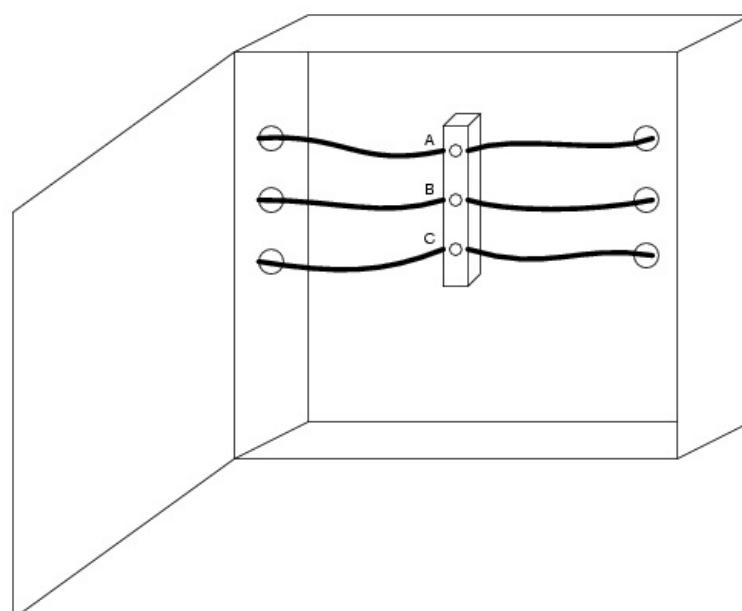


Figure 113: panou electric; schită

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. Tineți minte că tensiunile periculoase pot să apară între oricare dintre conductori și pământ (în cazul de față, carcasa metalică a panoului electric). Prin urmare, trebuie să măsurăm căderile de tensiune și între fiecare din cele trei puncte și pământ, atât în c.c cât și în c.a. Acest lucru duce numărul măsurătorilor la 12, pentru un scenariu aparent simplu. Desigur, după ce toate măsurătorile au fost încheiate, trebuie să retestăm funcționarea corectă a multimetrelui, prin măsurarea unei căderi de tensiune cunoscute (priza, de exemplu).

5. Măsurarea rezistențelor

În cazul măsurării rezistențelor, sondele vor rămâne conectate în aceleași prize ale multimetrelui 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.

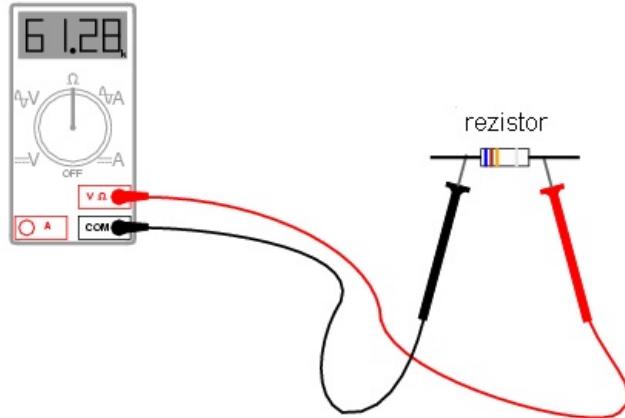


Figure 114: panou electric; schiță

Atenție însă, măsurarea rezistențelor se face doar asupra componentelor nealimentate! Atunci când multimetru 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 defectarea aparatului de măsură.

6. Continuitatea firelor

Modul „rezistență” a unui multimetru este foarte folositor și pentru determinarea continuității conductorilor. Atunci când există o 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 .

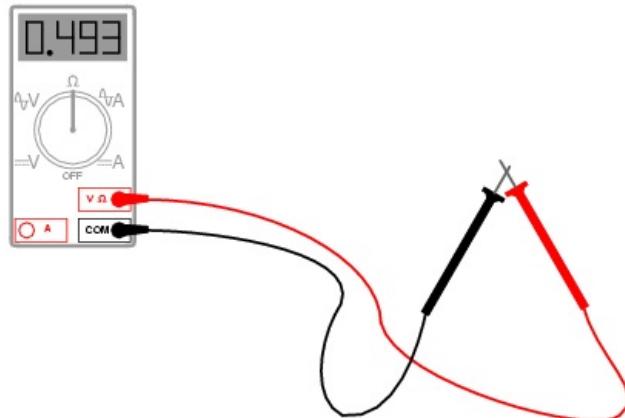


Figure 115: multimetru digital; atingerea sondelor între ele

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

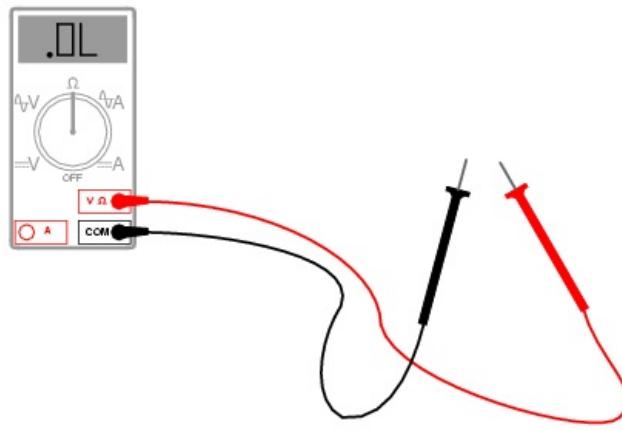


Figure 116: multimetru digital; circuit deschis (O.L.)

7. 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, circuit 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 marcata cu „A” (vezi figura).

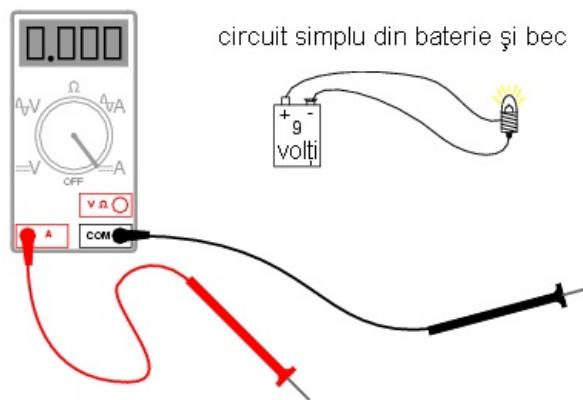


Figure 117: multimetru digital; măsurarea curentului

Următorul pas este deschiderea circuitului pentru a putea conecta multimetrul.

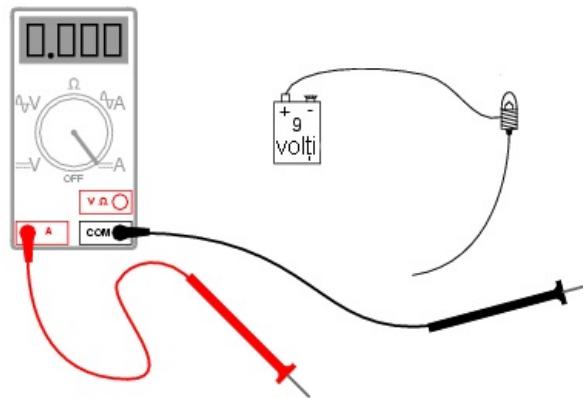


Figure 118: multimetru digital; măsurarea curentului; deschiderea circuitului

Închiderea circuitului se realizează apoi prin multimetru, astfel: conectăm vârfurile sondelor la captele 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.

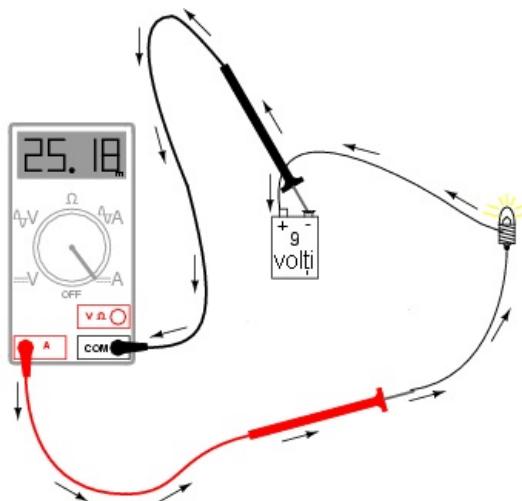


Figure 119: multimetru digital; măsurarea curentului; închiderea circuitului prin intermediul multimetrului

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 adeverată sursă de pericol.

8. 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 mare, rezultatul va fi un scurt-circuit prin aparatul de măsură. Atunci când multimetru se află în poziția „A”, acesta este proiectat pentru o rezistență între vârfurile sondelor ce tinde practic la $0\ \Omega$. În poziția „V”, lucrurile stau exact invers, rezistența dintre vârfurile sondelor este de ordinul mega-ohmilor ($M\Omega$).

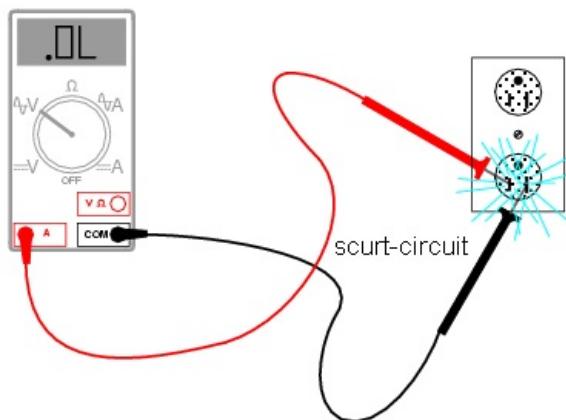


Figure 120: multimetru digital setat pentru măsurarea curentului dar folosit pentru măsurarea tensiunii; apariția scurt-circuitului

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

9. Verificarea siguranței fuzibile interne

Toate multimetrele de calitate sunt echipate cu siguranțe fuzibile în interior, 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.

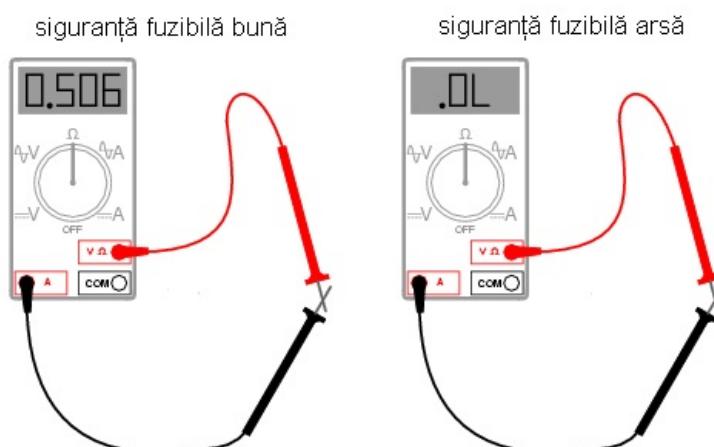


Figure 121: multimetru digital; verificarea siguranței fuzibile interne

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

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

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

$$6,25 \times 3,6 = 22,5 \times 10^{18} \times 10^3 = 10^{21}$$

Ceea ce înseamnă:

$$22,5 \times 10^{21} \text{ electroni sau } 2,25 \times 10^{22} \text{ electroni}$$

4.2.2 Împărțirea numerelor sub formă notației științifice

Pentru ilustrarea operației de împărțire cu numere sub formă notației științifice, putem să luăm exemplul de mai sus invers, și anume, să aflăm cât timp le-ar trebui aceluia număr de electroni ($2,25 \times 10^{22}$) să treacă prin circuit, în cazul unui curent de 1 A: ($2,25 \times 10^{22}$ electroni) / ($6,25 \times 10^{18}$ electroni pe secundă)

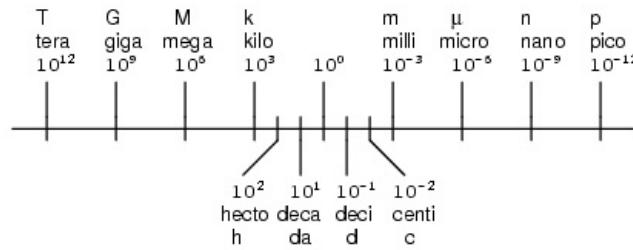
La fel ca și în cazul înmulțirii, putem realiza calculele separat pentru cifrele semnificative și pentru puterile lui zece:

$$(2,25 / 6,25) \times (10^{22} / 10^{18}) = 0,36 \times 10^4 \text{ sau } 3,6 \times 10^3 \text{ secunde deoarece, } 10^a / 10^b = 10^{a-b}$$

Putem vedea că am ajuns la aceeași valoarea, 3600 secunde ($3,6 \times 10^3$).

4.3 Notația metrică

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 sub formă puterilor lui zece



Urmărind această scală, putem vedea că, de exemplu, 2,5 Giga înseamnă de fapt $2,5 \times 10^9$, sau 2,5 miliarde. De asemenea, 3,21 pA (picoampери) 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:

$$2,67 \times 10^{-4} \text{ g (notație științifică)} \quad 267 \mu\text{g (notație metrică)} \quad \text{sau } 0,267 \text{ mg (notație metrică)}$$

4.3.1 Conversia prefixelor metricice

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:

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

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 MΩ (megaohmi) în mΩ (miliohmi). 50,3 MΩ înseamnă $50,3 \times 10^6$. 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:

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

5 Serie paralel

5.1 Ce sunt circuitele „serie” și „paralel”

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

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

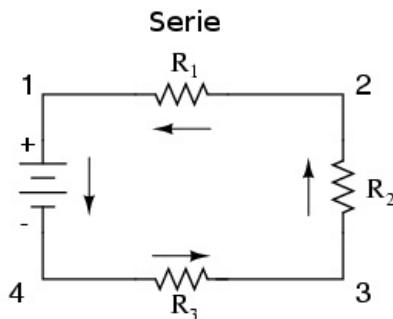


Figure 123: circuit serie

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.

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

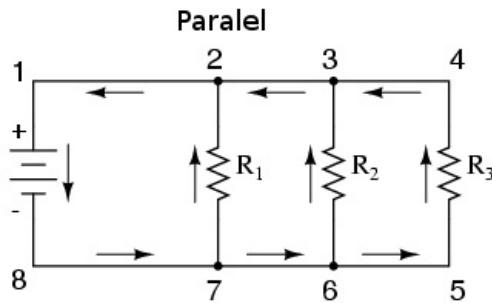


Figure 124: circuit paralel

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.

1. 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.

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

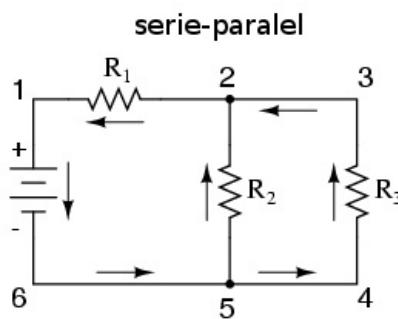


Figure 125: circuit serie-paralel

În acest circuit, avem două ramuri prin care electroni 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_2 și R_3 .

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

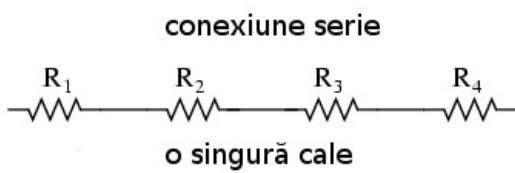


Figure 126: conexiune serie

Idea de bază într-o conexiune paralel, pe de altă parte, este că toate componentele sunt conectate între la aceleași capete. 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"

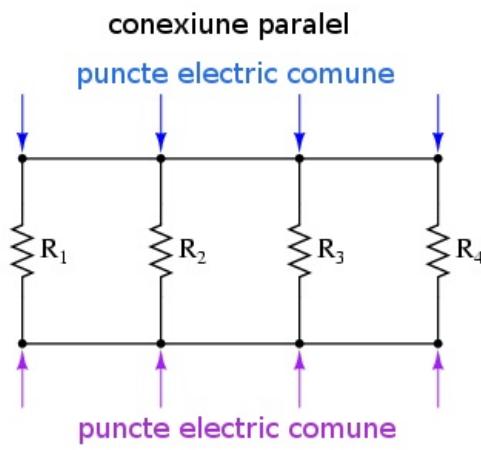


Figure 127: conexiune paralel

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

5.2 Circuite serie simple

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

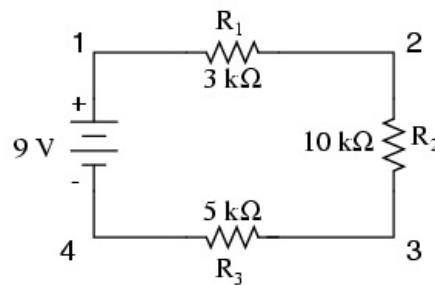


Figure 128: circuit serie

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 singurei căi pentru trecerea electronilor, iar dacă privim circuitul ca un tub cu bile, putem înțelege de ce rata de deplasare a bilelor trebuie să fie aceeași în orice punct al tubului (circuitului).

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 bateri și a unui singur rezistor în circuit, putem calcula foarte ușor valorile circuitului, pentru că acestea se referă la aceleași două puncte din circuit:

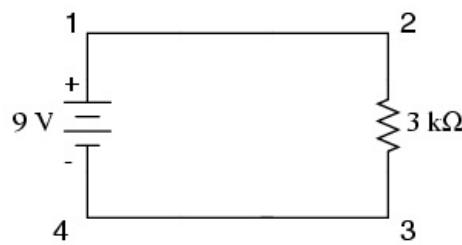


Figure 129: circuit serie

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

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

Figure 130: relații matematice

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 electromotoare 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 același rezistor, prin urmare putem folosi legea lui Ohm fără nicio problemă.

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, valoare reprezentând forță electromotoare disponibilă pentru impingerea electronilor prin conexiunea serie realizată din rezistorii R₁, R₂ și R₃. Nu putem însă împărți cei 9 volți la 3 kΩ, 10 kΩ sau

$5\text{k}\Omega$ pentru a găsi valoarea curentului, pentru că nu cunoaștem defapt valoarea tensiunii pe fiecare din rezistori în parte, cunoaștem valoarea tensiunii pe întreg ansamblul de rezistori doar.

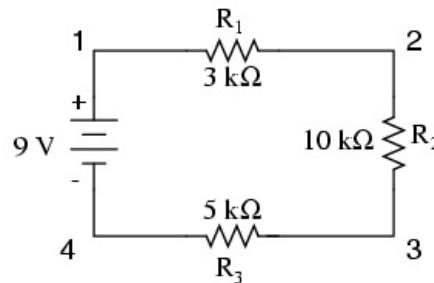


Figure 131: circuit serie

Valoarea de 9 volți reprezintă o cantitate *totală* din circuit, pe când valorile de $3\text{k}\Omega$, $10\text{k}\Omega$ și $5\text{k}\Omega$, reprezintă cantități *individuale* din cadrul circuitului de față. Dacă ar 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, $3\text{k}\Omega$:

$$I_{R1} = \frac{E_{R1}}{3\text{k}\Omega} \quad E_{R1} = I_{R1}(3\text{k}\Omega)$$

Figure 132: formula

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 defapt, 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 ($I=E/R$).

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. În exemplul nostru, aveam trei rezistori în serie, de $3\text{k}\Omega$, $10\text{k}\Omega$, respectiv $5\text{k}\Omega$, ceea ce rezultă într-o rezistență totală de 18Ω :

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{\text{total}} = 3\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega + 5\text{k}\Omega$$

$$R_{\text{total}} = 18\text{k}\Omega$$

Figure 133: formula

Ceea ce am făcut de fapt, a fost să calculăm rezistența echivalentă a rezistențelor de $3\text{k}\Omega$, $10\text{k}\Omega$ și $5\text{k}\Omega$ luate 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 :

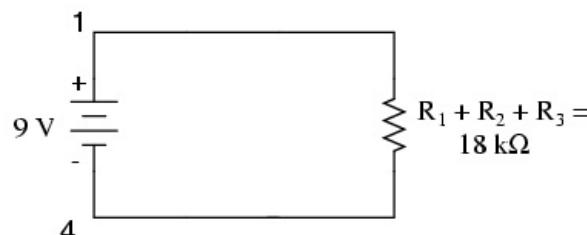


Figure 134: formula

Acum avem toate informațiile necesare pentru a calcula curentul prin circuit, deoarece avem tensiunea între punctele 1 și 4 (9 volți), precum și rezistență între punctele 1 și 4 ($18\text{k}\Omega$):

$$I_{\text{total}} = \frac{E_{\text{total}}}{R_{\text{total}}}$$

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

Figure 135: formula

Cunoscând faptul că prin fiecare componentă în cadrul unui circuit serie, curentul este același, și cunoscând valoarea acelui curent în cazul de față, putem merge înapoi la circuitul inițial și să notăm valoarea curentului prin fiecare componentă în parte:

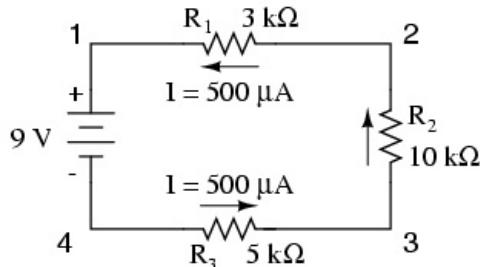


Figure 136: formula

Acum că valoarea curentului prin fiecare rezistor ne este cunoscută, putem folosi legea lui OHM pentru determinarea căderilor de tensiune pe fiecare componentă în parte:

$$E_{R1} = I_{R1} R_1 \quad E_{R2} = I_{R2} R_2 \quad E_{R3} = I_{R3} R_3$$

$$E_{R1} = (500 \mu\text{A})(3 \text{ k}\Omega) = 1.5 \text{ V}$$

$$E_{R2} = (500 \mu\text{A})(10 \text{ k}\Omega) = 5 \text{ V}$$

$$E_{R3} = (500 \mu\text{A})(5 \text{ k}\Omega) = 2.5 \text{ V}$$

Figure 137: formula

Putem observa căderea de tensiune pe fiecare rezistoră în parte și faptul că suma acestor căderi de tensiune ($1.5 \text{ V} + 5 \text{ V} + 2.5 \text{ V}$) este egală cu tensiunea la bornele bateriei, 9 V . Aceasta reprezintă al treilea principiu al circuitelor serie: tensiune electromotoare (a bateriei) este egală cu suma căderilor de tensiune pe fiecare componentă în parte.

5.3 Circuite paralel simple

Să începem cu un circuit paralel format din trei rezistori și o singură baterie:

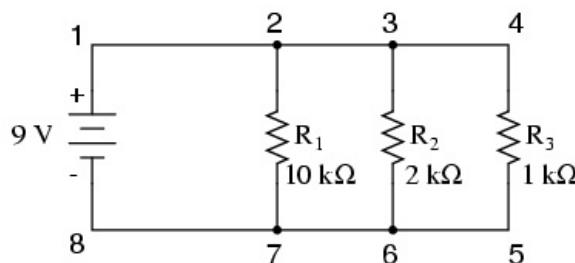


Figure 138: circuit paralel

Primul principiu pe care trebuie să-l înțelegem despre circuitele parallele este legat de faptul că tensiunea este egală la bornele tuturor componentelor din circuit. 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.

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 rezistoră în parte, pentru că se cunoaște tensiunea la bornele fiecărui rezistor (9 volți) precum și rezistența fiecărui rezistor:

$$I_{R1} = \frac{E_{R1}}{R_1} \quad I_{R2} = \frac{E_{R2}}{R_2} \quad I_{R3} = \frac{E_{R3}}{R_3}$$

$$I_{R1} = \frac{9 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 0.9 \text{ mA}$$

$$I_{R2} = \frac{9 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 4.5 \text{ mA}$$

$$I_{R3} = \frac{9 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 9 \text{ mA}$$

Figure 139: circuit paralel

Până în acest moment, nu cunoaștem valoarea totală a curentului, sau rezistență totală a acestui circuit paralel, asfel 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 rezistoră în

parte):

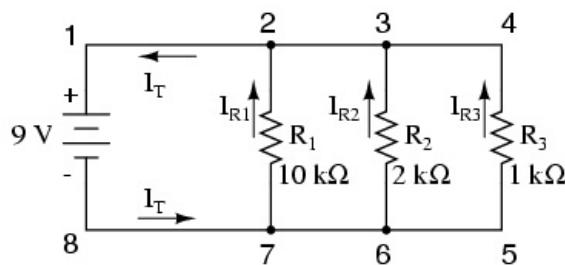


Figure 140: circuit paralel

$$I_T = I_{R1} + I_{R2} + I_{R3}$$

$$I_T = 0.9 \text{ mA} + 4.5 \text{ mA} + 9 \text{ mA}$$

$$I_T = 14.4 \text{ mA}$$

Figure 141: calcule matematice

Pe măsură ce curentul ieșe 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 întrepta 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 . Aceasta este al doilea principiu al circuitelor paralele: valoarea totală a curentului prin circuit este egală cu suma curenților de pe fiecare ramură în parte.

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

$$R_{\text{total}} = \frac{E_{\text{total}}}{I_{\text{total}}} = \frac{9 \text{ V}}{14.4 \text{ mA}} = 625 \Omega$$

Figure 142: rezistența totală din circuit

Trebuie să observăm un lucru foarte important în acest caz! Valoarea rezistenței totale este de numai 625Ω : *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. Aceasta este al doilea principiu al circuitelor electrice paralele, iar matematic, această relație între rezistența totală și rezistențele individuale din circuit poate fi exprimată astfel:

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

Figure 143: rezistența totală într-un circuit paralel

5.4 Conductanță

Prin definiție, rezistența este mărimea ce măsoară *freqarea* întâmpinată de electroni atunci când se deplasează prin componentul respectiv (rezistor). Totuși, putem să ne gândim și la inversa aceasei mărimi electrice: cat de ușor le este electronilor să se deplaseze printr-un component, față de cât de *dificil*, cum este cazul rezistenței. Denumirea pentru această *ușurință* este *conductanță electrică*, în opozitie cu rezistența electrică.

Matematic, conductanța este inversa rezistenței:

$$\text{Conductanță} = \frac{1}{\text{Rezistență}}$$

Figure 144: relația conductanță-rezistență

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”.

Înțorcându-ne la circuitul paralel studiat, putem vedea că existența mai multor ramuri în circuit reduc rezistența totală a circuitului, pentru că electroni sunt capabil să curgă mult mai ușor prin circuit atunci când există mai multe ramuri decât atunci când există doar una. În termeni de *rezistență*, ramurile îm plus rezultă într-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):

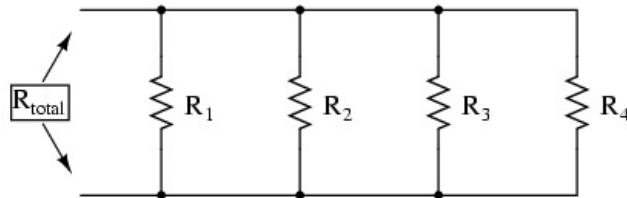


Figure 145: circuit paralel

Conductanța paralelă este mai *mare* decât oricare dintre conductanțele ramurilor luate individual, deoarece rezistorii paraleli conduct mai bine curantul electrică decât o fac fiecare luat în parte (G_{total} mai mare decât G_1, G_2, G_3 sau G_4 luate individual):

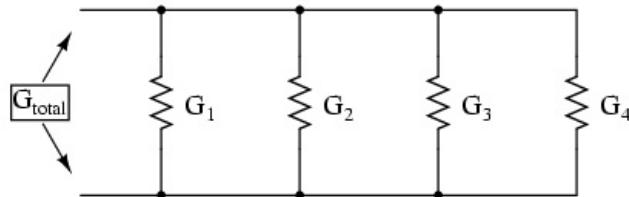


Figure 146: circuit paralel, conductanță

Matematic, această relație se exprimă astfel:

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

Figure 147: formula conductanței

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

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

Figure 148: formula conductanței, încărcată cu rezistențe

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

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

Figure 149: rezistență totală, circuit paralel

Asfel, ajungem la formula rezistenței totale dintr-un circuit paralel.

5.5 Calcularea puterii

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

$$P = IE \quad P = E^2 / R \quad P = I^2 R$$

Acest lucru este mult mai ușor de realizat prin simpla adăugare a unui rând adițional în tabelul tensiunilor, curenților și rezistențelor.

Marime	R_1	R_2	R_3	Total	Unitate
E					V
A					I
R					Ω
P					W

Indiferent de coloană, puterea se va afla folosind ecuația corespunzătoare a legii lui Ohm.

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, puterea 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).

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

5.6 Aplicarea corectă a legii lui Ohm

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 incorrect! Rețineți acest principiu extrem de

important: variabilele utilizate în ecuațiile legii lui Ohm trebuie să corespundă tot timpul acelaiași set de două puncte a circuitului în cauză. 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.

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

Marime	R_1	R_2	R_3	Total	Unitate
E					V
I					A
R					Ω
P					W

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 componentă, curentul total este egal cu valoarea curentului prin oricare componentă, rezistența totală este egală cu suma rezistențelor individuale, iar puterea totală este și ea egală cu suma puterilor individuale.

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

5.7 Analiza circuitelor defecte

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 valoare acestora bazându-se pe probabilități și un simt al creațivității 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.

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

5.7.1 Analiza defectelor într-un circuit serie simplu

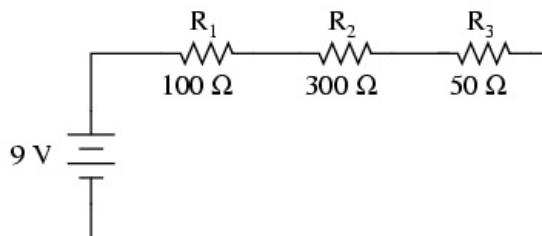


Figure 150: circuit pur rezistiv serie

Să considerăm circuitul alăturat

Marime	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 parametrii normali, putem determina pe cale matematică toți curenenți și căderile de tensiune din circuit.

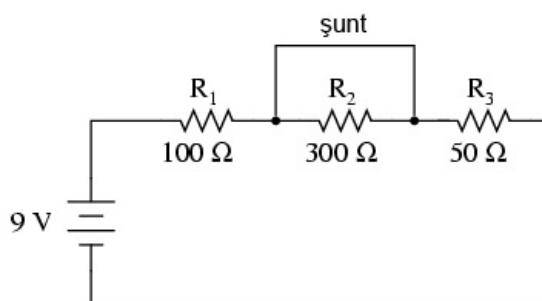


Figure 151: circuit pur rezistiv serie; săntarea rezistorului

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 **suntare** a rezistorului R_2 iar firul

utilizat poartă numele de conductor de şuntare, sau simplu, şunt.

Marime	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

Odată cu scurt-circuitarea rezistorului R₂, fie prin şuntarea intenţionată a acestuia fie printr-un defect intern, valoarea rezistenței totale din circuit va fi mai mică. Din moment ce tensiunea la bornele bateriei rămâne aceeași, o scădere a rezistenții totale din circuit conduce la creșterea curentului total.

Odată cu creșterea curentului de la 20 mA la 60 mA, căderea de tensiune pe rezistorii R₁ și R₃ (a căror rezistență nu s-a modificat) crește și ea, astfel încât căderea de tensiune totală pe cele două componente rămase să fie tot 9 V. Rezistorul R₂, fiind şuntat de rezistență foarte mică a conductorului de şuntare, este practic eliminat din circuit, rezistența dintre cele două capete ale conductorului fiind practic zero. Din această cauză, căderea de tensiune pe rezistorul R₂ este de zero V, chiar dacă valoarea totală a curentului din circuit a crescut.

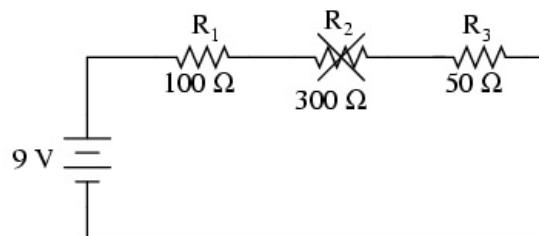


Figure 152: circuit pur rezistiv serie; deschiderea circuitului

Pe de altă parte, dacă defectul suferit de rezistorul R₂ este de așa natură încât circuitul va rămâne deschis în acel punct - rezistența între cele două capete libere ale conductorilor rămași crește practic spre infinit - efectele asupra circuitului inițial vor fi diferite, dar la fel de radicale.

Marime	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 R₂ 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 la zero. În această situație, nu va mai exista nicio deplasare a electronilor prin circuit necesară producерii unor căderi de tensiune pe rezistorii R₁ sau R₃. În schimb, întreaga cădere de tensiune dezvoltată de baterie se va regăsi pe terminalele rezistorului R₂.

5.7.2 Analiza defectelor într-un circuit paralel simplu

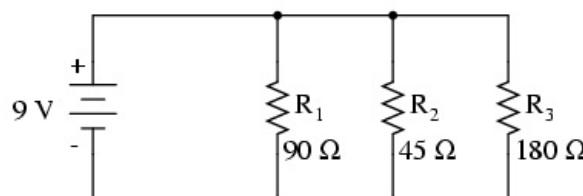


Figure 153: circuit pur rezistiv paralel

Putem aplica aceleași metode și în cazul unui circuit paralel.

Marime	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”.

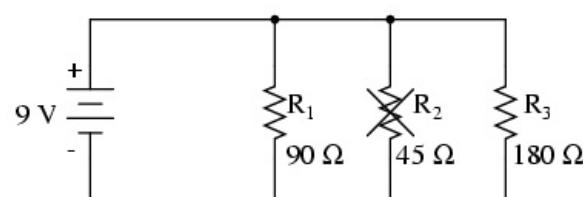


Figure 154: circuit pur rezistiv paralel; deschiderea rezistenței

1. Înlăturarea rezistorului

Să presupunem acum deschiderea rezistenței R_2 în acest circuit paralel.

Marime	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	∞	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 dincircuit. Căderea de tensiune, fiind egală pe toate componentele va rămâne neschimbătă 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 (rezistență constantă, căderea de tensiune constantă) curentul prin ceilalți doi rezistori nu se modifică nici ei.

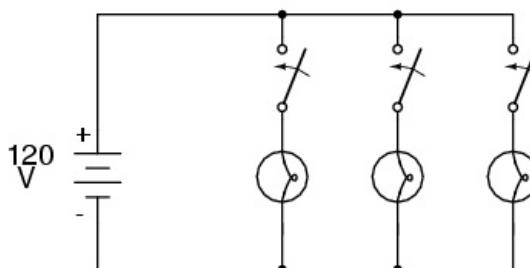


Figure 155: circuit pur rezistiv paralel cu becuri

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.

2. Suntarea rezistorului

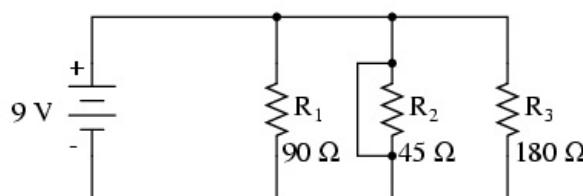


Figure 156: circuit pur rezistiv paralel; suntarea rezistorului

Într-un caz ideal (surse de tensiune perfecte și conductori cu rezistență zero), rezistorii scurt-circuitează dintr-un circuit paralel simplu nu vor avea niciun efect asupra comportamentului celorlalte ramuri din circuit. În realitate însă, efectul nu este același, după cum putem observa din exemplul alăturat.

Marime	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 (rezistență de 0Ω) va permite, teoretic, trecerea unui curent infinit de la oricare 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. Atâtă 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-current extrem de mare în același timp cu menținerea valorii tensiunii la un nivel constant.

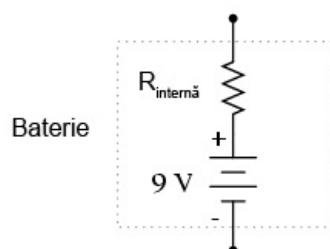


Figure 157: orice sursă de alimentare prezintă o rezistență internă

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

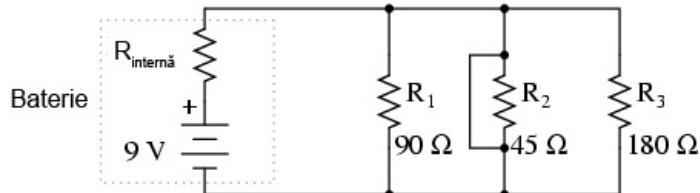


Figure 158: circuit pur rezistiv paralel; şuntarea rezistorului

Aceste rezistențe interne, oricât de mici, transformă circuitul paralel de mai sus într-o combinație serie-paralel. De obicei, rezistențele interne al 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-circuite, 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 zero.

Marime	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

Ca și concluzie, scurt-circuitarea intenționată a terminanților surselor de alimentare, indiferent de tipul acestora, trebuie evitată cu orice preț. Chiar și în cazul în care curenții mari dezvoltăți (căldură, scânteie, 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 (majoritatea surselor de tensiune nu sunt).

5.8 Construirea circuitelor rezistive simple

Pe măsură ce studiați circuitele electrice, veți dori probabil să construiți 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.

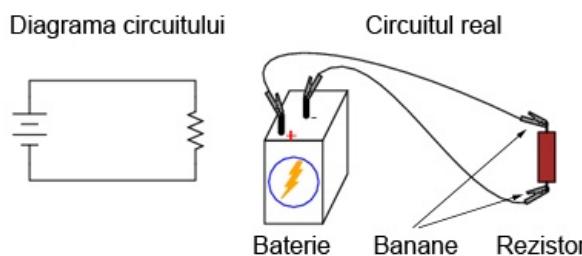


Figure 159: circuit simplu cu o singură baterie și un singur rezistor

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

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

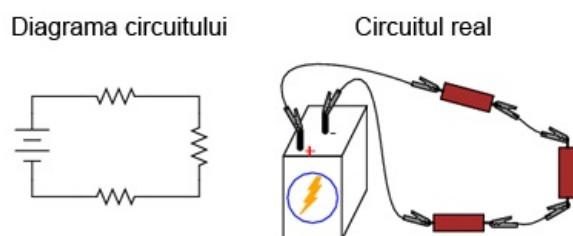


Figure 160: circuit simplu cu o singură baterie și trei rezistori

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



Figure 161: placă 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.

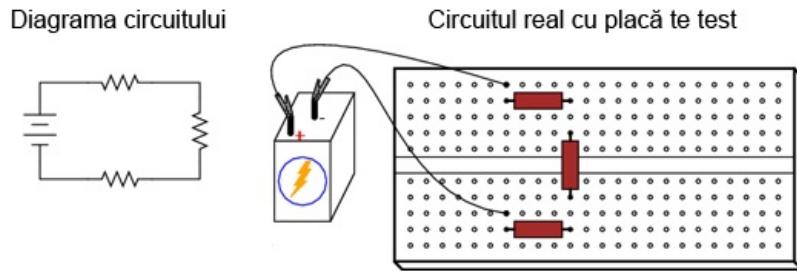


Figure 162: circuit electric cu placă de test

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

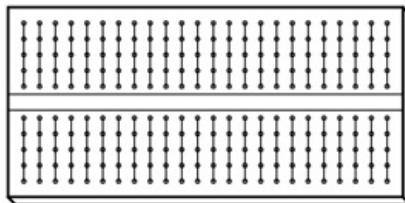


Figure 163: placă electronică de test - partea anterioară

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 cavitate unite vertical între ele, conform figurii alăturate. Astfel că atunci când inserăm un conductor între două dintre cavitate, există încă o serie de patru astfel de cavitate 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 a terminalilor sau conductorilor celor două componente. Rezultatul este o platformă extrem de flexibilă pentru realizarea circuitelor electrice sau electronice temporare.

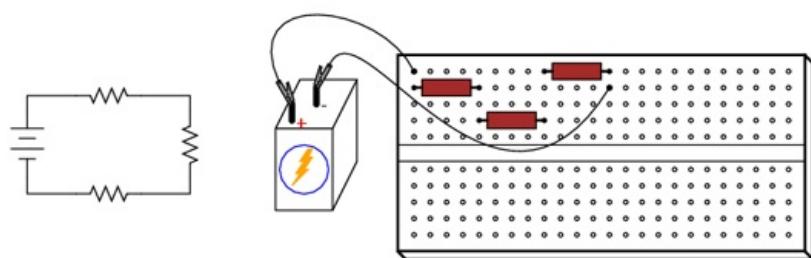


Figure 164: placă electronică de test - circuit serie cu trei rezistori

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

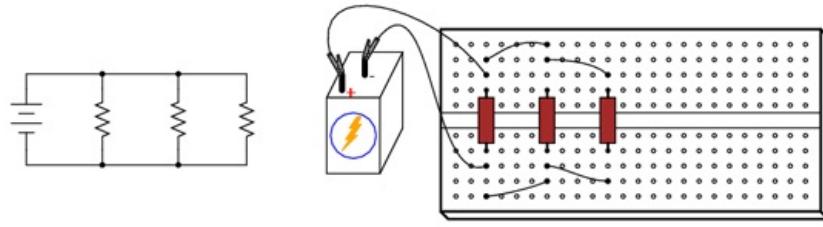


Figure 165: placă electronică de test - circuit paralel cu trei rezistori

Un alt exemplu, de această dată a unui circuit paralel cu trei rezistori, este prezentat în figura alăturată. Aceste plăci de test au totuși unele neajunsuri. În primul rând, scopul lor sunt doar circuite temporare. Dacă întoarcem placă 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.

5.8.1 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.

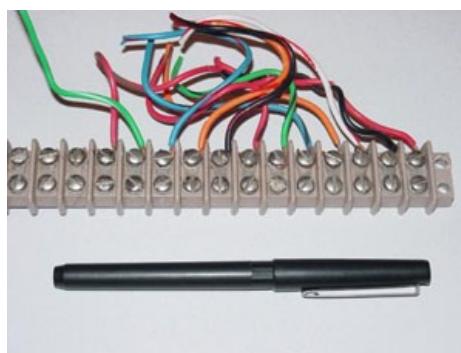


Figure 166: regletă de conexiuni

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



Figure 167: regletă de conexiuni

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 surubelnită sau al unui alt obiect metallic.

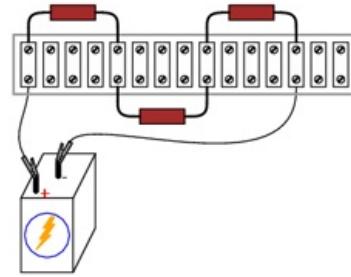


Figure 168: regletă de conexiuni; circuit serie

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.

Una dintre deprinderile esențiale ale celor care vor să pună în practică lecțiile învățate despre circuitele electrice și electronice, este „tradicerea” 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.

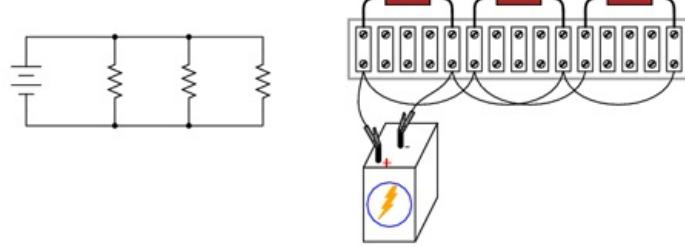


Figure 169: regletă de conexiuni; circuit paralel

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

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

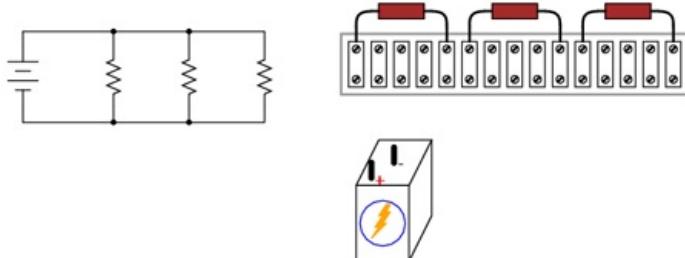


Figure 170: regletă de conexiuni; circuit paralel

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

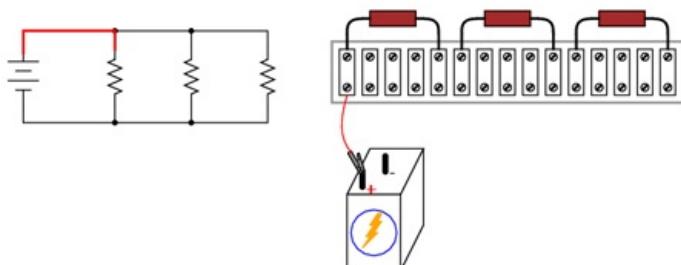


Figure 171: regletă de conexiuni; circuit paralel

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.

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

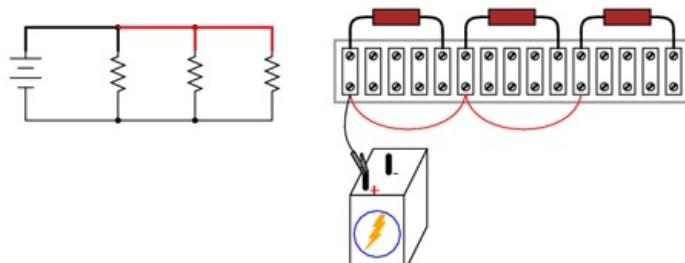


Figure 172: regletă de conexiuni; circuit paralel

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

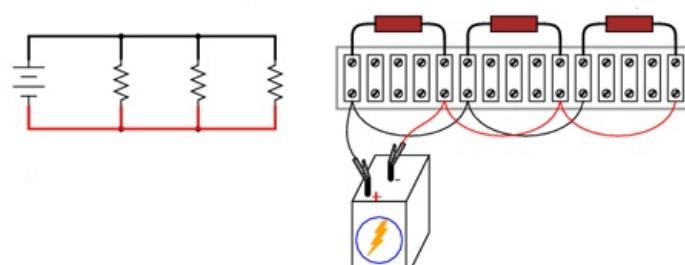


Figure 173: regletă de conexiuni; circuit paralel

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.

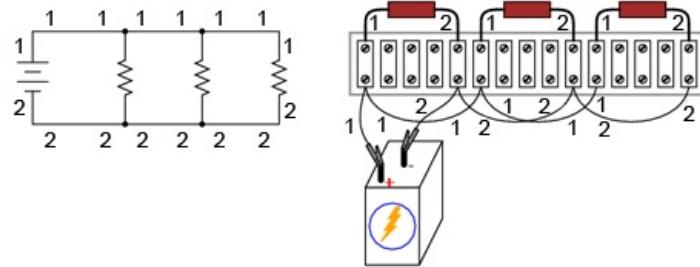


Figure 174: regletă de conexiuni; circuit paralel; marcarea conductorilor

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.

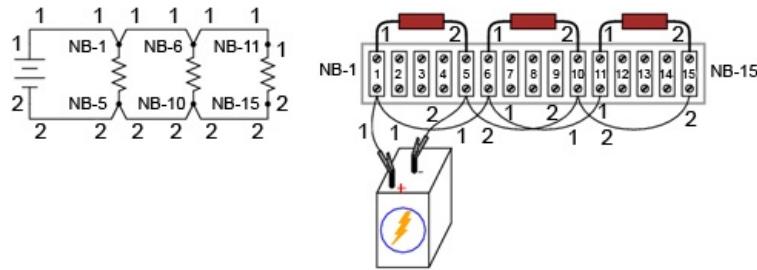


Figure 175: regletă de conexiuni; circuit paralel; marcarea conductorilor

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 marcare: „NB” (numărul blocului), și un număr reprezentând 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 încâlcit și de complex este în realitate. Această metodă poate 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 acelora care se întind pe o distanță considerabilă, folosind mai multe reglete localizate în puncte diferite.

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

6 Kirchhoff

6.1 Circuite divizoare de tensiune. Potențiometrul

Să analizăm un circuit electric serie simplu, determinând căderile de tensiune pe fiecare rezistor:

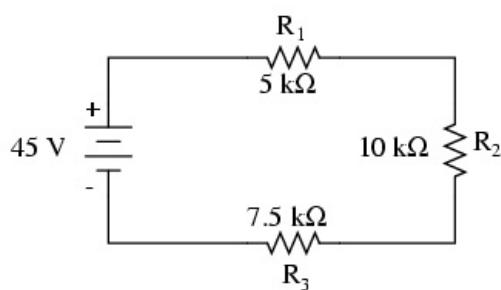


Figure 176: circuit serie

Vom introducele 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).

	R_1	R_2	R_3	Total	
E				45	Volți
I					Amperi
R	5k	10k	7.5k		Ohmi

Figure 177: tabel

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

	R ₁	R ₂	R ₃	Total
E				45
I				
R	5k	10k	7.5k	22.5k

Figure 178: tabel

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:

	R ₁	R ₂	R ₃	Total
E				45
I	2m	2m	2m	2m
R	5k	10k	7.5k	22.5k

Figure 179: tabel

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

	R ₁	R ₂	R ₃	Total
E	10	20	15	45
I	2m	2m	2m	2m
R	5k	10k	7.5k	22.5k

Figure 180: tabel

Putem observa că valoarea căderilor de tensiune pe fiecare rezistor este proporțională cu rezistența, datorită faptului că valoarea curentului este aceeași prin toți rezistorii. De asemenea, căderea de tensiune pe rezistorul R₂ este dublă față de căderea de tensiunea pe rezistorul R₁, la fel precum rezistența R₂ este dublă față de rezistența R₁.

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

	R ₁	R ₂	R ₃	Total
E	40	80	60	180
I	8m	8m	8m	8m
R	5k	10k	7.5k	22.5k

Figure 181: tabel

Căderea de tensiune pe R₂ este în continuare exact dublul căderii de pe R₁, în ciuda modificării tensiunii sursei. Proporționalitatea căderilor de tensiune este strict în funcție de valoarea rezistențelor.

Devin aparent faptul că pe fiecare rezistor, căderea de tensiunea este o fracțiune fixă din valoarea tensiunii sursei. Tensiunea pe R₁ 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 R₁ a crescut de asemenea de 4 ori (de la 10 la 40 de volți). Raportul dintre căderea de tensiune pe R₁ și căderea de tensiune totală a rămas însă aceeași:

$$\frac{E_{R1}}{E_{\text{total}}} = \frac{10 \text{ V}}{45 \text{ V}} = \frac{40 \text{ V}}{180 \text{ V}} = 0.22222$$

Figure 182: formula

De asemenea, niciunul dintre raporturile căderilor de tensiune cu tensiunea sursei nu s-au schimbat:

$$\frac{E_{R2}}{E_{\text{total}}} = \frac{20 \text{ V}}{45 \text{ V}} = \frac{80 \text{ V}}{180 \text{ V}} = 0.44444$$

$$\frac{E_{R3}}{E_{\text{total}}} = \frac{15 \text{ V}}{45 \text{ V}} = \frac{60 \text{ V}}{180 \text{ V}} = 0.33333$$

Figure 183: formula

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:

Cădere de tensiune
pe oricare rezistor

$$E_n = I_n R_n$$

Curentul într-un circuit serie

$$I_{\text{total}} = \frac{E_{\text{total}}}{R_{\text{total}}}$$

... Înlocuind $\frac{E_{\text{total}}}{R_{\text{total}}}$ la I_n în prima ecuație...

Cădere de tensiune pe oricare rezistor $E_n = \frac{E_{\text{total}}}{R_{\text{total}}} R_n$

... sau ...

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

Figure 184: formula

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. Folosind această formulă, putem re-analiza circuitul de mai sus în mai puțini pași:

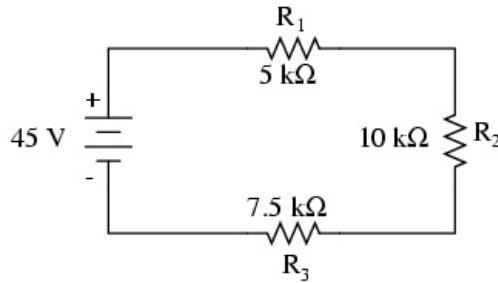


Figure 185: circuit serie

$$E_{R1} = 45 \text{ V} \cdot \frac{5 \text{ k}\Omega}{22.5 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ V}$$

$$E_{R2} = 45 \text{ V} \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega}{22.5 \text{ k}\Omega} = 20 \text{ V}$$

$$E_{R3} = 45 \text{ V} \cdot \frac{7.5 \text{ k}\Omega}{22.5 \text{ k}\Omega} = 15 \text{ V}$$

Figure 186: tabel

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

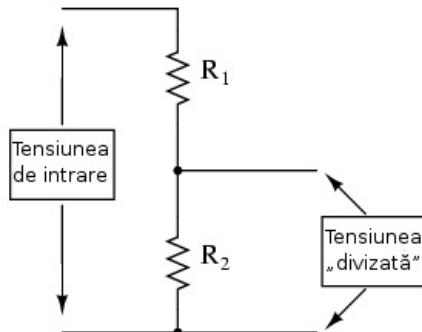


Figure 187: circuit divizor de tensiune

Unul dintre dispozitivele folosite frecvent ca și divizor de tensiune este *potențiometrul*, ce este de fapt un rezistor cu un element mobil poziționat cu ajutorul unei manete. Elementul mobil, denumit și *perie*, face contact cu un material rezistiv dezisolat în oricare punct selectat manual:

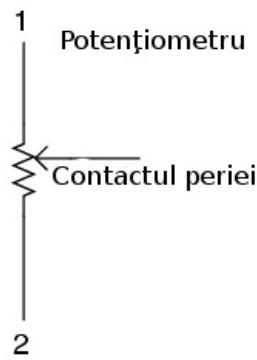


Figure 188: potențiometru

Pe măsură ce contactul periei este 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.

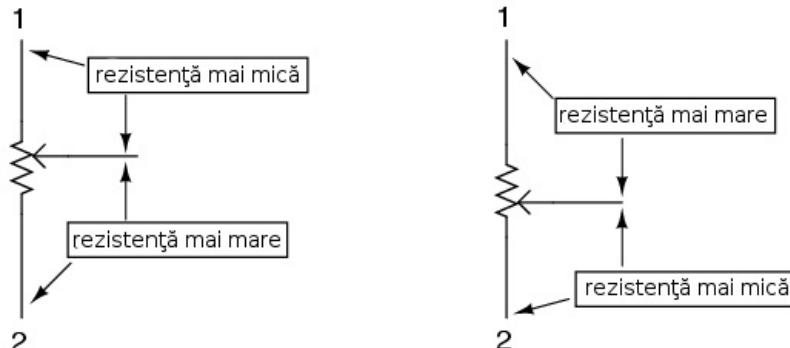


Figure 189: potențiometru

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

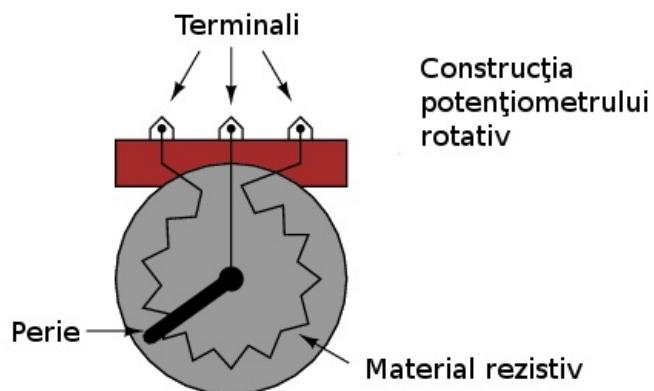


Figure 190: construcția potențiometrului rotativ

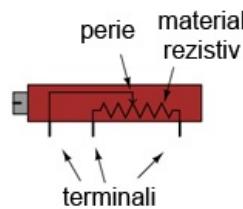


Figure 191: construcția potențiometrului liniar

Pozele de mai jos reprezintă un potențiometru rotativ real cu peria vizibilă pentru o mai bună vizualizare. Axul ce deplasează peria este rotit în acest caz în sensul acelor de ceasornic aproape la maxim, astfel încât aproape atinge terminalul din stânga:

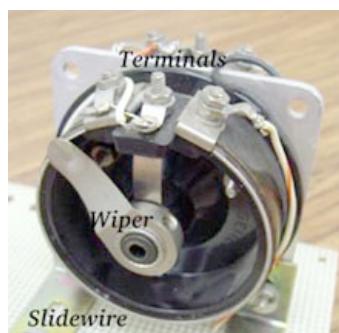


Figure 192: potențiometru rotativ

În acest caz, peria este rotită în sensul împotriva ceasornic, astfel încât aceasta se află în cealaltă extremă:

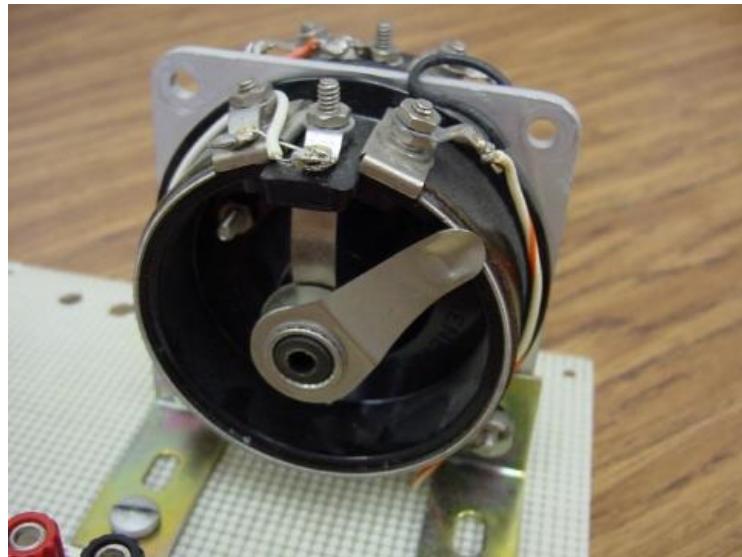


Figure 193: potențiometru rotativ

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:

Utilizarea potențiometrului ca și divizor de tensiune variabilă

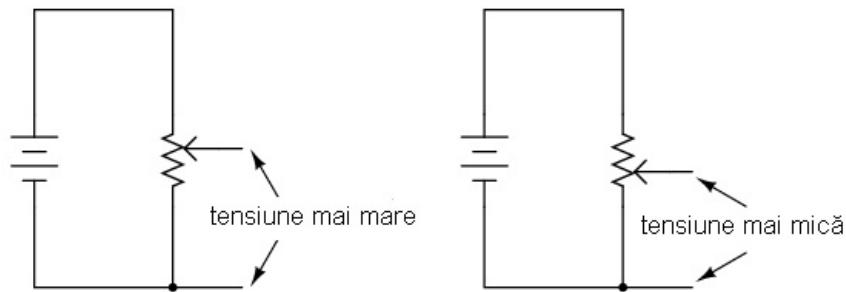


Figure 194: potențiometru ca și divizor de tensiune variabilă

Ca și în cazul unui divizor de tensiune fix, *coeficientul de diviziune* 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 cele două terminali este exact jumătate (1/2) din valoarea tensiunii aplicate, indiferent de valoarea acesteia sau de rezistența totală a potențiometrului. Cu alte cuvinte, un potențiometru acționează precum un divizor variabil de tensiune, unde coeficientul de diviziune este stabilit de poziția periei.

Această aplicație a potențiometrului este una foarte folositoare 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 cele două terminali externi:

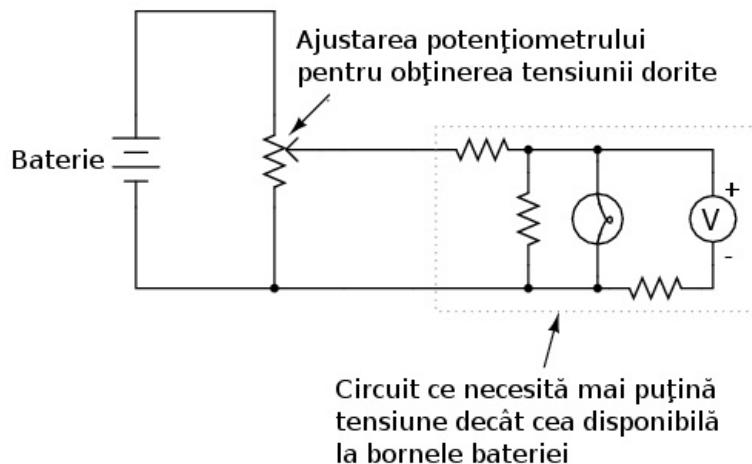


Figure 195: ajustarea tensiunii pentru un circuit ce necesită o tensiune mai mică decât cea existentă la bornele bateriei

6.2 Legea lui Kirchhoff pentru tensiune

Să luam un circuit serie cu trei rezistori și să notăm punctele din circuit:

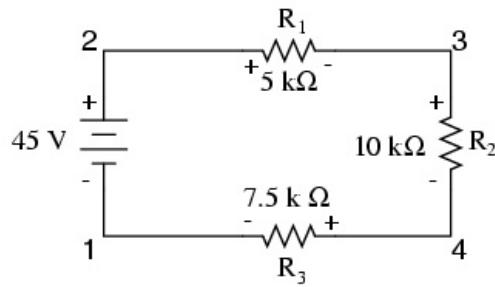


Figure 196: circuit serie

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.

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

Figure 197: formula

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

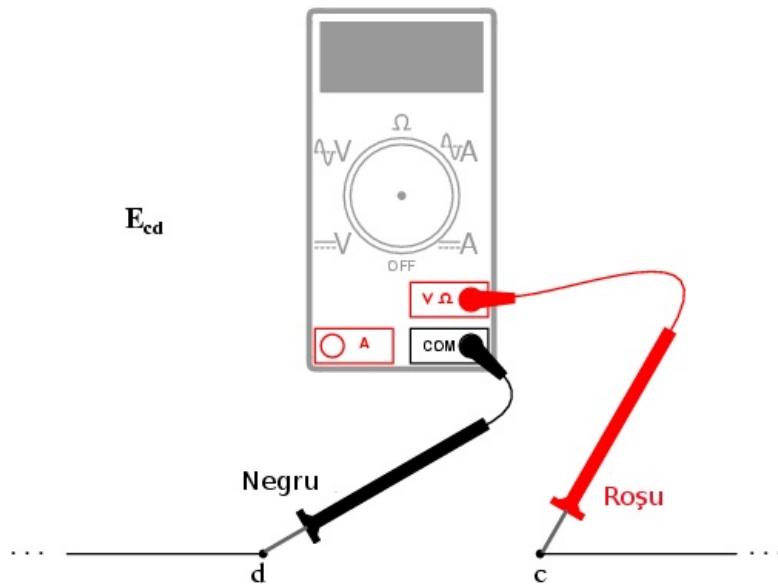


Figure 198: voltmetu

Dacă ar fi să luăm același voltmetru și să măsurăm cădereea 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:

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

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

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

Figure 199: formule

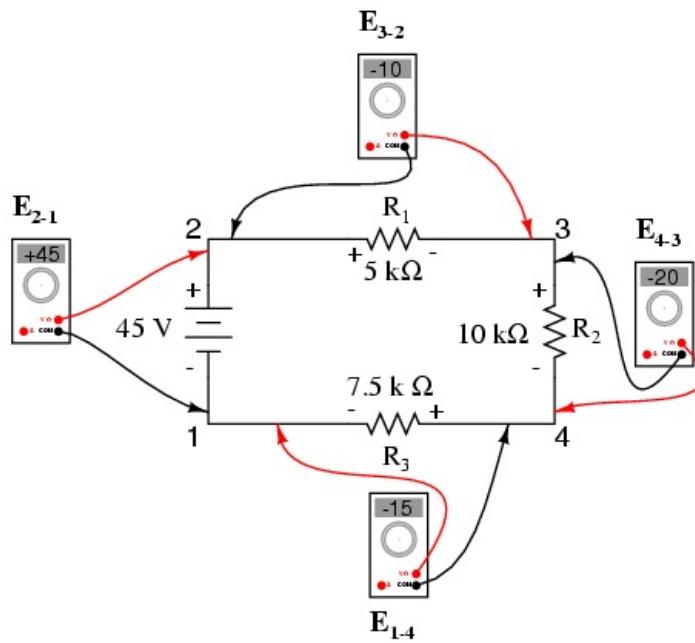


Figure 200: parcurgerea circuitului cu voltmetru

Suntem deja familiarizați cu conceptul general al circuitelor serie, și anume: suma căderilor de tensiune individuale este egală cu tensiunea 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:

$$\begin{aligned}
 E_{2-1} &= +45\text{ V} \text{ tensiunea între punctele 2 și 1} \\
 E_{3-2} &= -10\text{ V} \text{ tensiunea între punctele 3 și 2} \\
 E_{4-3} &= -20\text{ V} \text{ tensiunea între punctele 4 și 3} \\
 + E_{l-4} &= -15\text{ V} \text{ tensiunea între punctele 1 și 4} \\
 &\underline{\hspace{10em}} \\
 &0\text{ V}
 \end{aligned}$$

Figure 201: măsurarea tensiunii între diferite puncte ale circuitului

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

„Suma algebraică a tuturor căderilor de tensiune dintr-o bulcă trebuie să fie egală cu zero”

Termenul de sumă *algebraică* este folosit pentru a desemna faptul că trebuie luate în considerare semnele (polaritățile) tensiunilor din circuit pe lângă valorile acestora. Prin *bulcă* 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 direcție 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):

$$\begin{aligned}
 E_{2-3} &= +10\text{ V} \text{ tensiunea între punctele 2 și 3} \\
 E_{1-2} &= -45\text{ V} \text{ tensiunea între punctele 1 și 2} \\
 E_{4-1} &= +15\text{ V} \text{ tensiunea între punctele 4 și 1} \\
 + E_{3-4} &= +20\text{ V} \text{ tensiunea între punctele 3 și 4} \\
 &\underline{\hspace{10em}} \\
 &0\text{ V}
 \end{aligned}$$

Figure 202: măsurarea tensiunii între diferite puncte ale circuitului

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

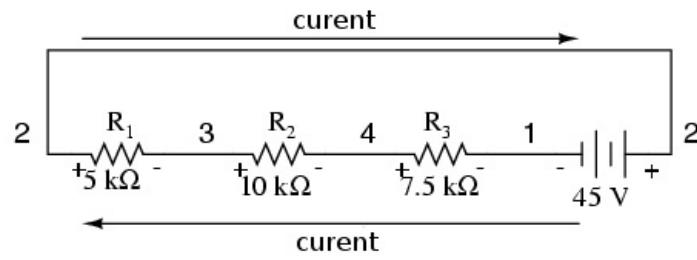


Figure 203: circuit serie

Este exact același circuit, doar că aranjamentul componentelor este diferit. Observați polaritatea căderilor de tensiune de pe rezistori în compoziție 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. Aceasta pentru că rezistorii *rezistă* curgerii electronilor „împinsă” de baterie. Cu alte cuvinte, rezistența *împotriva* curgerii electronilor *trebuie* să fie direcționată în direcție opusă sursei de tensiune electromotoare.

Acestea sunt indicațiile pe care un voltmetru introdus în circuit le-ar afișa (sonda neagră în stânga, cea roșie în dreapta):

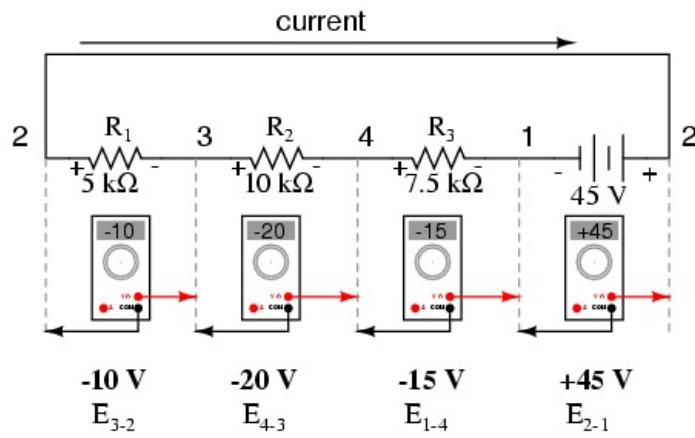


Figure 204: circuit serie, măsurarea cu ajutorul voltmetrului

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

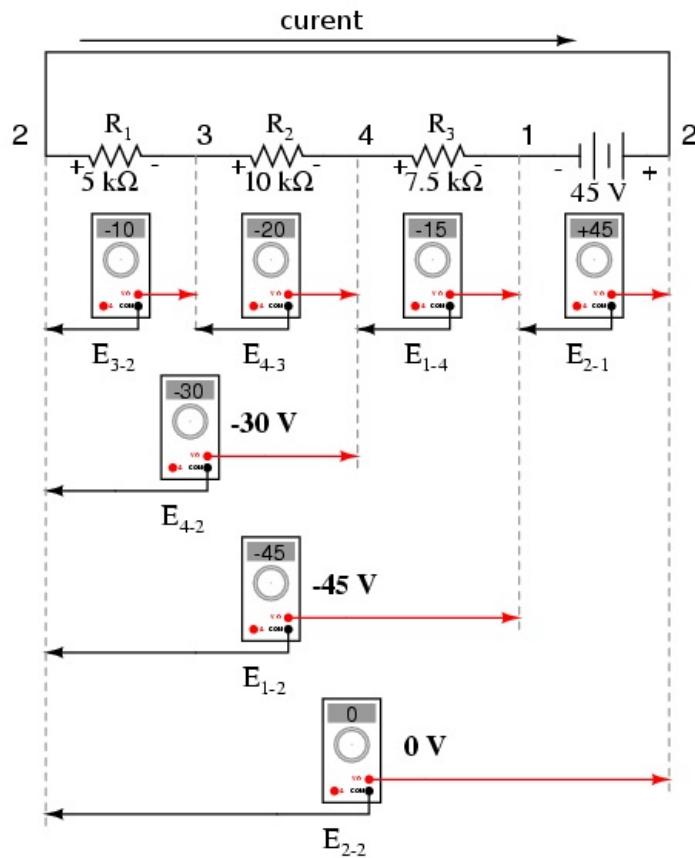


Figure 205: circuit serie, măsurarea cu ajutorul voltmetrului

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_1R_2 și R_3) vedem că suma căderilor de tensiune are valori tot mai mari (deși negative), deoarece polaritatea căderilor de tensiune pe fiecare componentă 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 alt mod de a privi acest circuit este de a observa că partea stângă a circuitului (stânga rezistorului R_1 : punctul 2) este conectată direct la partea dreaptă 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, cădere de tensiune dintre cele două trebuie să fie zero.

Legea lui Kirchhoff pentru tensiunie (prescurtat LKT) funcționează pentru *orice* configurație a circuitului, nu doar pentru cele serie. Să vedem un exemplu pentru circuitul paralel prin urmare:

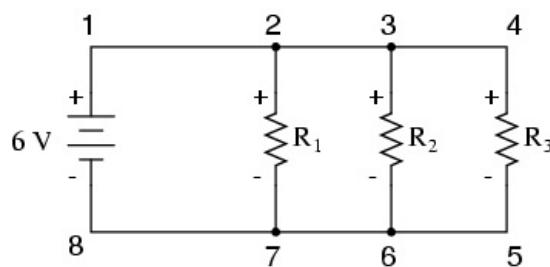


Figure 206: circuit paralel

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

$$\begin{aligned}
 E_{3-2} &= 0 \text{ V} \\
 E_{4-3} &= 0 \text{ V} \\
 E_{5-4} &= -6 \text{ V} \\
 E_{6-5} &= 0 \text{ V} \\
 E_{7-6} &= 0 \text{ V} \\
 + E_{2-7} &= +6 \text{ V} \\
 \hline
 E_{2-2} &= 0 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Figure 207: rezultate măsurători tensiune circuit paralel

Observați notația căderii de tensiune totale (sumei) 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.

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:

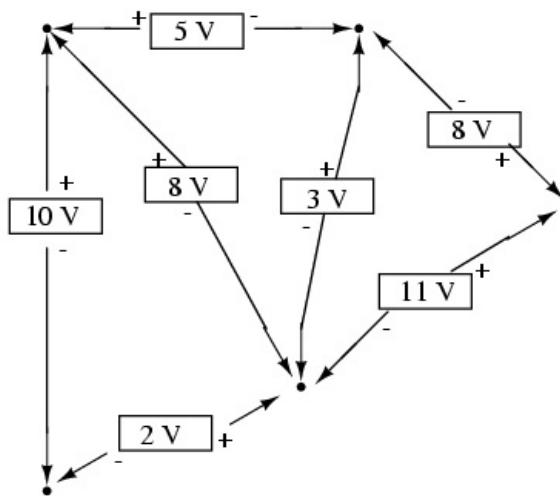


Figure 208: aplicarea legii lui Kirchhof

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

6.3 Circuite divizoare de curent

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

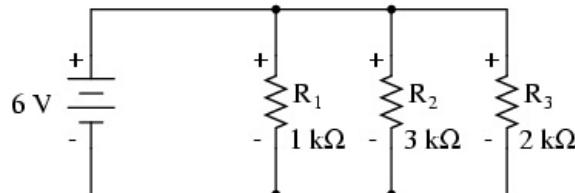


Figure 209: circuit paralel

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

	R_1	R_2	R_3	Total
E	6	6	6	6
I				
R	1k	3k	2k	

Figure 210: tabel valori tensiune/curent/rezistență

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

	R ₁	R ₂	R ₃	Total
E	6	6	6	6
I	6m	2m	3m	
R	1k	3k	2k	

Figure 211: tabel valori tensiune/curent/rezistență

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:

	R ₁	R ₂	R ₃	Total
E	6	6	6	6
I	6m	2m	3m	11m
R	1k	3k	2k	

Figure 212: tabel valori tensiune/curent/rezistență

Ultimul pas este calcularea rezistenței totale, folosind legea lui Ohm ($R=E/I$), sau folosind formula rezistențelor în paralel; răspunsul va fi același:

	R ₁	R ₂	R ₃	Total
E	6	6	6	6
I	6m	2m	3m	11m
R	1k	3k	2k	545.45

Figure 213: tabel valori tensiune/curent/rezistență

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 .

Dacă ar fi să schimbăm sursa de tensiune din acest circuit, am descoperi că (supriză!) acest raport nu se modifică:

	R ₁	R ₂	R ₃	Total
E	24	24	24	24
I	24m	8m	12m	44m
R	1k	3k	2k	545.45

Figure 214: tabel valori tensiune/curent/rezistență

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, precum era și în cazul divizorilor de tensiune, curenții ramurilor reprezintă fracții fixe din curentul total. Cu toate că tensiunea sursei a crescut de patru ori, raportul dintre curentul ramurii și curentul total a rămas același:

$$\frac{I_{R1}}{I_{\text{total}}} = \frac{6 \text{ mA}}{11 \text{ mA}} = \frac{24 \text{ mA}}{44 \text{ mA}} = 0.54545$$

$$\frac{I_{R2}}{I_{\text{total}}} = \frac{2 \text{ mA}}{11 \text{ mA}} = \frac{8 \text{ mA}}{44 \text{ mA}} = 0.18182$$

$$\frac{I_{R3}}{I_{\text{total}}} = \frac{3 \text{ mA}}{11 \text{ mA}} = \frac{12 \text{ mA}}{44 \text{ mA}} = 0.27273$$

Figure 215: formula raport curent ramura, curent total

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

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

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

... înlocuind $I_{total} R_{total}$ la E_n în prima ecuație ...

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

... sau ...

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

Figure 216: formula divizorului de curent

Raportul dintre rezistență totală și rezistență 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 curentilor prin ramură într-un circuit paralel atunci când se cunoaște curentul total.

Folosind circuitul paralel original ca și exemplu, putem re-calcula curentul prin ramuri folosind această formulă, dacă începem prin a cunoaște valoarea totală a curentului și a rezistenței:

$$I_{R1} = 11 \text{ mA} \frac{545.45 \Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 6 \text{ mA}$$

$$I_{R2} = 11 \text{ mA} \frac{545.45 \Omega}{3 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

$$I_{R3} = 11 \text{ mA} \frac{545.45 \Omega}{2 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

Figure 217: formula divizorului de curent, aplicare

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 :

$$I_{R1} = 11 \text{ mA} \frac{545.45 \Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 6 \text{ mA}$$

$$I_{R2} = 11 \text{ mA} \frac{545.45 \Omega}{3 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA}$$

$$I_{R3} = 11 \text{ mA} \frac{545.45 \Omega}{2 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ mA}$$

Figure 218: formulele divizorului de tensiune și curent

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 fie un număr subunitar (între 0 și 1). Până la urmă, acestea sunt ecuații *divizoare nu multiplicatoare*. Dacă raportul este inversat, vom obține o valoare mai mare decât unu, prin urmare greșită. Cunoscând faptul că rezistență totală într-un circuit serie (divizor de tensiune) este tot timpul mai mare decât oricare dintre rezistențe luate separat, putem să deducem că raportul corect este R_n/R_{total} . La fel, cunoscând faptul că rezistență 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} .

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

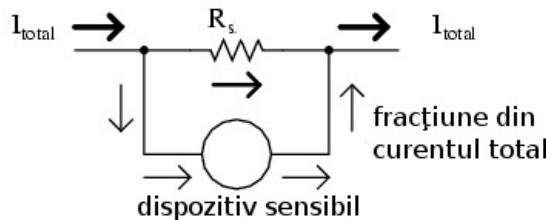


Figure 219: circuit divizor curent pentru aparat de măsură

6.4 Legea lui Kirchhoff pentru curent

Să considerăm următorul circuit paralel:

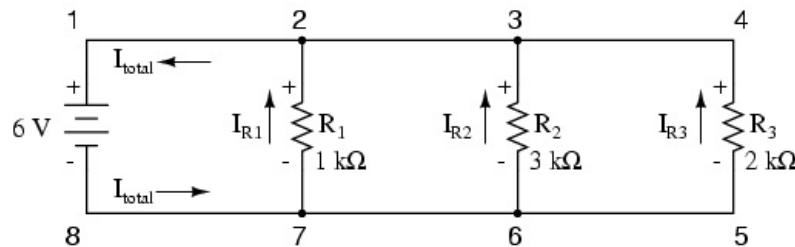


Figure 220: circuit paralel

Calculând toate valorile tensiunilor și curenților din acest circuit, obținem:

	R_1	R_2	R_3	Total
E	6	6	6	6
I	6mA	2mA	3mA	11mA
R	1k	3k	2k	545.45

Figure 221: tabel valori tensiune/curent/rezistență

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 aşadar ce se întâmplă la fiecare nod (locul de întâlnire a cel puțin trei ramuri) din acest circuit:

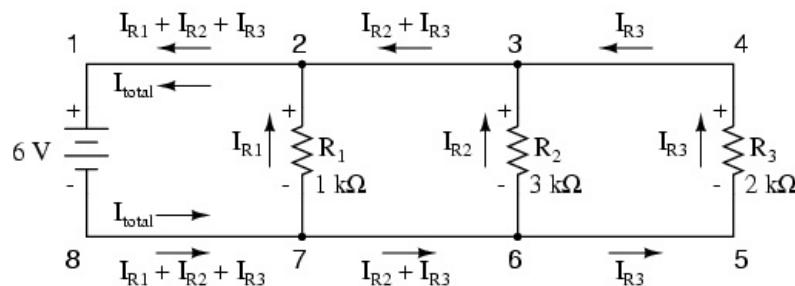


Figure 222: circuit paralel

Pe ramura negativă de jos (8-7-6-5), la fiecare nod principal se divide pe fiecare ramură succesivă spre rezistori. Pe ramura pozitivă de sus (1-2-3-4) curentul de pe fiecare ramură se „alătúră” curentului principal. Dacă ne uităm mai atent la un anumit nod, precum 3, observă că valoarea curentului ce intră într-un nod este egală cu valoarea curentului ce părăsește acel nod:

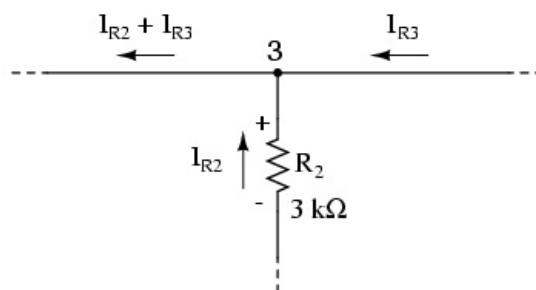


Figure 223: circuit paralel

Avem doi curenți care intră în nodul 3, din partea dreapta și de jos. Din partea stângă avem un singur curent care ieșe 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:

$$I_{\text{intrare}} = I_{\text{ieșire}}$$

O altă formă ușor diferită dar echivalentă din punct de vedere matematic este următoarea:

$$I_{\text{intrare}} + (-I_{\text{ieșire}}) = 0$$

Pe scurt, legea lui Kirchhoff pentru curent sună astfel:

„Suma algebrică a tuturor curenților ce intră și ieș dintr-un nod trebuie să fie egală cu zero”

Adică, dacă notăm polaritatea fiecărui curent, cu „+” dacă intră în nod și cu „-” dacă ieșe, suma lor va da tot timpul zero. În cazul nodului 3 de mai sus, putem determina valoarea curentului ce ieșe din nod prin partea stângă folosind legea lui Kirchhoff pentru curent asfel:

$$I_2 + I_3 + I = 0$$

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

... determinând I ...

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

$$\mathbf{I = -5 \text{ mA}}$$

Figure 224: formulă

Semnul negativ (-) pentru valoarea de 5 mA ne spune faptul că, curentul ieșe 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 arbitrară, atât timp cât reprezintă semne diferite pentru direcții diferite și prin urmare putem aplica legea lui Kirchhoff pentru curenți.

7 Combinatii

7.1 Ce este un circuit serie-paralel

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

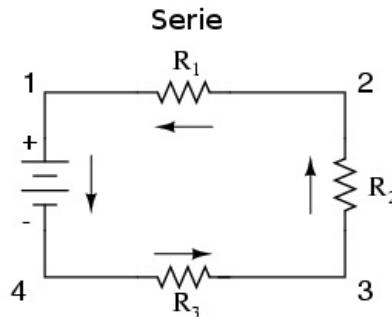


Figure 225: circuit serie

În cazul circuitelor paralele 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:

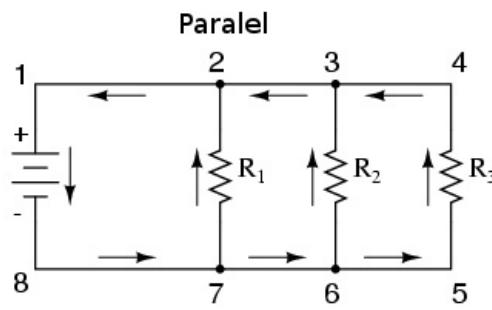


Figure 226: circuit paralel

În ambele cazuri, avem de a face cu anumite seturi specifice de reguli pentru relațiile dintre tensiune, curent și rezistență. (notă: vezi circuitele serie și circuitele 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 constituentă. 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:

Circuit serie-paralel combinat

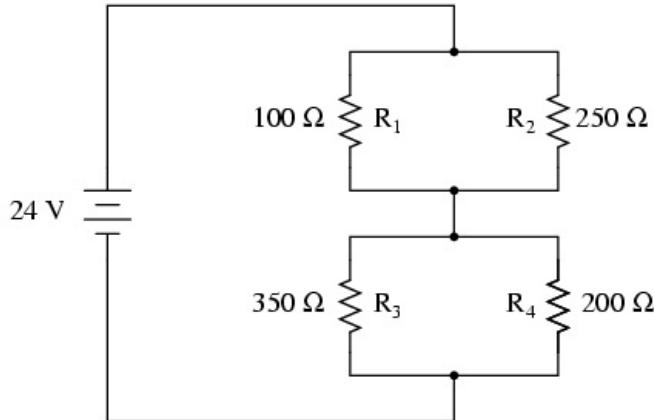


Figure 227: circuit serie-paralel combinat

	R_1	R_2	R_3	R_4	Total
E					24
I					
R	100	250	350	200	

Figure 228: tabel

Acesta nu este nici un circuit serie simplu nici unul paralel simplu, ci conține elementele din ambele tipuri. Curentul ieșe prin partea de jos a bateriei, se împarte (ramifică) pe cele două ramuri spre R_3 și R_4 , se re-intâlnesc, se ramifică încă odată spre R_1 și R_2 , se re-intâlnesc din nou și se re-întoarce la baterie. Există mai mult de un singur drum pentru circulația curentului (nu este serie), dar totuși, există mai mult decât două seturi de puncte electric comune (nu este paralel).

Deoarece circuitul este o combinație între serie și paralel, nu putem aplica relațiile de tensiune, curent sau rezistență direct în tabel precum a fost cazul circuitelor serie și paralel simple. De exemplu, dacă circuitul de mai sus ar fi fost serie simplu, am putea pur și simplu să adunăm cele patru rezistențe și să obținem rezistența finală, să calculăm apoi curentul total, și apoi căderile de tensiune pe fiecare rezistor. Asemănător, dacă circuitul ar fi fost paralel simplu, am fi putut afla curenții prin fiecare ramură, suma lor ne-ar fi dat curentul total iar de acolo puteam calcula rezistența totală. Totuși, soluția acestui circuit este puțin mai complexă de atât. Tabelul este folositor pentru aflarea diferențelor valorii într-un circuit serie-paralel, dar trebuie să fim atenți cum și unde aplicăm regulile pentru fiecare tip de circuit în parte (serie și 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. Restul capitolului va fi dedicat acestor tehnici.

7.2 Tehnici de analiză a circuitelor

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. Redesemnăm 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 folosind 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 tensiunii și ale curentului 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 necesare până când toate valorile tensiunilor și curenților sunt cunoscute
 8. Calculăm puterile disipate în circuit din valorile cunoscute ale tensiunilor, curenților și/sau rezistențelor.
- Deși sună destul de complicat, vom înțelege întreg procesul mult mai ușor dacă luăm un exemplu practic:

Circuit serie-paralel combinat

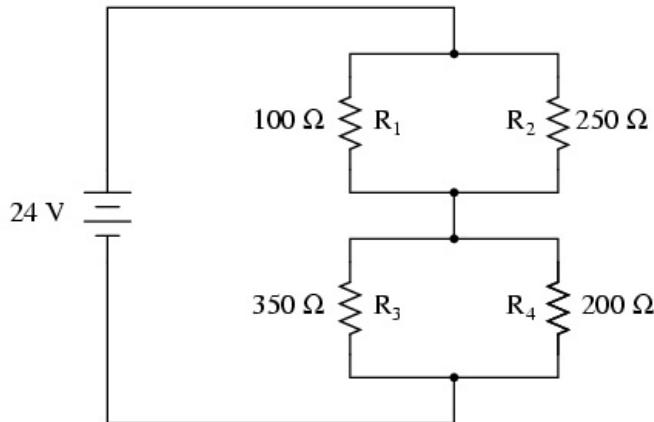


Figure 229: circuit serie-paralel combinat

	R_1	R_2	R_3	R_4	Total
E					24
I					
R	100	250	350	200	

Figure 230: tabel

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 această tip de conexiune ca fiind una paralelă, putem înlocui fiecare din cele două combinații printr-o singură rezistență echivalentă. Circuitul redesenat arată astfel:

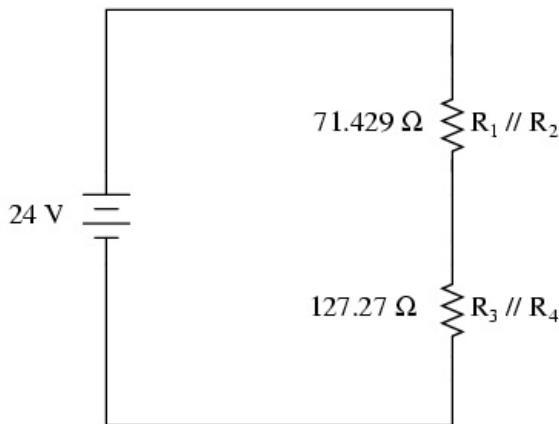


Figure 231: circuit electric

Simbolul $(//)$ este folosit pentru a reprezenta faptul că valoarea celor două rezistoare a fost obținută cu ajutorul formulei $1/(1/R)$. Rezistorul de $71.429\ \Omega$ de sus este echivalentul celor doi rezistori R_1 și R_2 legați în paralel. Rezistorul de $127.27\ \Omega$ de jos este echivalentul celor doi rezistori R_3 și R_4 legați în paralel.

Tabelul valorilor poate fi mărit cu două coloane pentru a include și valorile acestor doi rezistori echivalenți:

	R_1	R_2	R_3	R_4	$R_1 // R_2$	$R_3 // R_4$	Total
E							24
I							
R	100	250	350	200	71.429	127.27	

Figure 232: tabel

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 $198.70\ \Omega$. Acum putem re-desena circuitul cu o singură rezistență echivalentă. Adăugăm, de asemenea, încă o coloană în tabel. 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”.

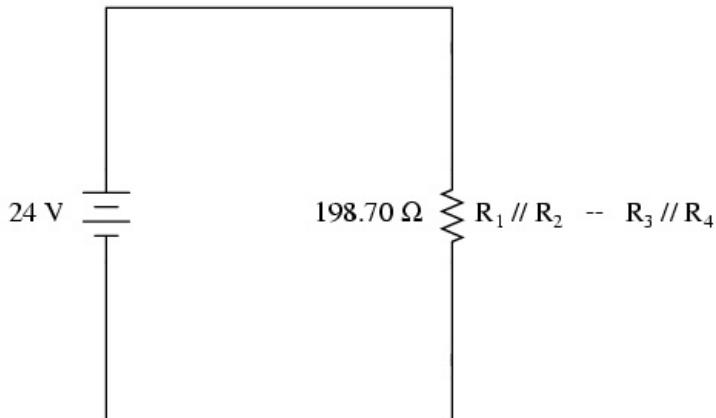


Figure 233: circuit electric

	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
E							24
I							
R	100	250	350	200	71.429	127.27	198.70

Figure 234: tabel

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

	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
E							24
I							120.78mA
R	100	250	350	200	71.429	127.27	198.70

Figure 235: tabel

Reîntorcându-ne la diagrama circuitului, valoarea totală a curentului este momentan singura ce apare pe desen:

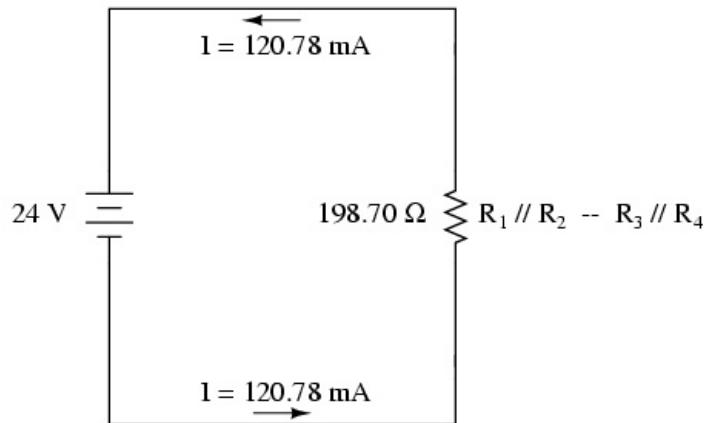


Figure 236: circuit electric

Acum putem începe să ne re-întoarcem la pașii anterioari 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:

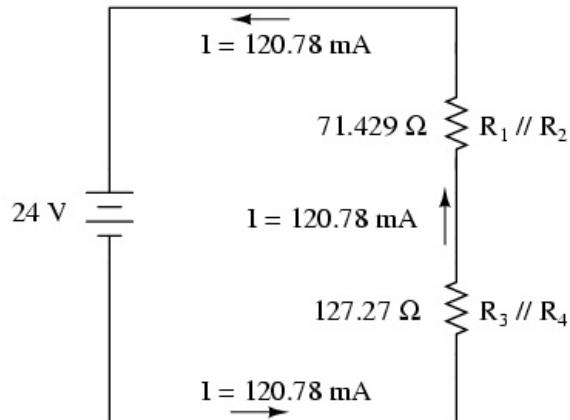


Figure 237: circuit electric

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 valorii curentului total; putem completa coloana curent total din tabel cu valoarea curentului total pentru fiecare din cele două grupuri de rezistențe echivalente:

	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
E							24
I					120.78mA	120.78mA	120.78mA
R	100	250	350	200	71.429	127.27	198.70

Figure 238: tabel

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:

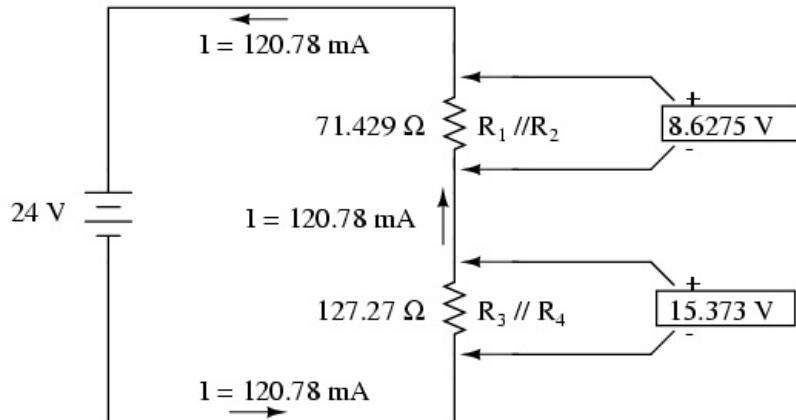


Figure 239: circuit electric

	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
E					8.6275	15.373	24
I					120.78mA	120.78mA	120.78mA
R	100	250	350	200	71.429	127.27	198.70

Figure 240: tabel

Deoarece știm că $R_1//R_2$ și $R_3//R_4$ sunt defapt 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:

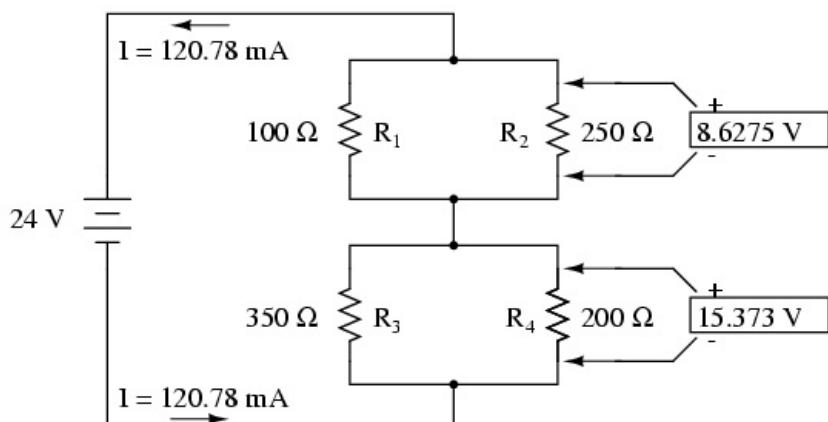


Figure 241: circuit electric

	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
E	8.6275	8.6275	15.373	15.373	8.6275	15.373	24
I					120.78mA	120.78mA	120.78mA
R	100	250	350	200	71.429	127.27	198.70

Figure 242: tabel

Secțiune originală a tabelului pentru rezistori este acum completată (coloana R_1 la R_4). Aplicând legea lui Ohm pentru celelalte

valori rămase necomplete (I=E/R), putem determina valorile prin R_1 , R_2 , R_3 și R_4 :

	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
E	8.6275	8.6275	15.373	15.373	8.6275	15.373	24
I	86.275mA	34.510mA	43.922mA	76.863mA	120.78mA	120.78mA	120.78mA
R	100	250	350	200	71.429	127.27	198.70

Figure 243: tabel

Circuitul inițial cu toate valorile tensiunilor, curenților și a rezistențelor arată astfel:

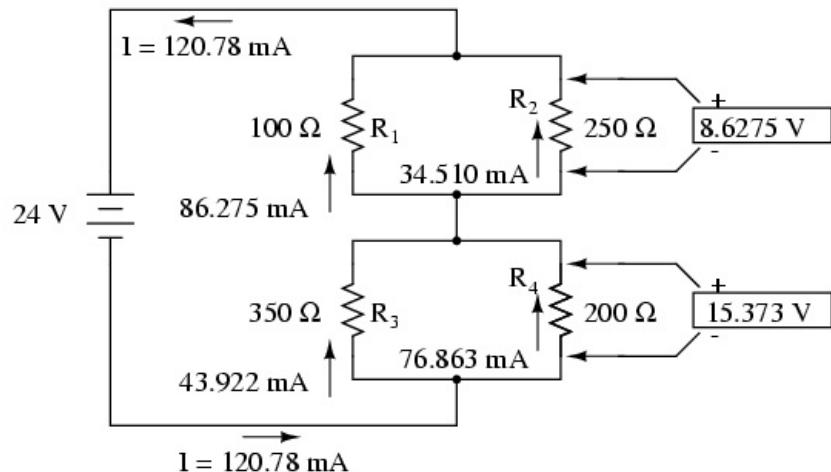


Figure 244: circuit electric

8 Aparate de măsură

8.1 Ce este un aparat 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 aparat de măsură sunt însă mecanice, utilizând un indicator 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).

8.1.1 Principiul aparatelor 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 acest 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 mărimea curentului.

8.1.2 Galvanometru



Figure 245: galvanometru

Primele astfel de aparat 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 acest colac, 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 precie excepțională nereprezentând neapărat un astfel de dispozitiv prezentat mai sus.

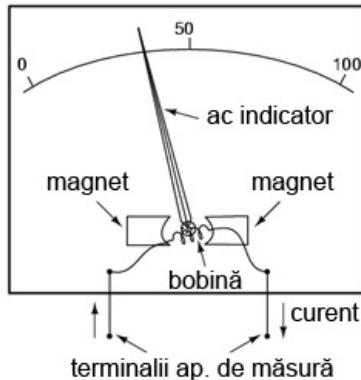


Figure 246: principiul de construcție a unui aparat de măsură electromagnetic (analogic)

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 aparat de măsură cu magnet permanent. În figura de mai sus, acul indicator este poziționat aproximativ la 35% pe scara valorilor, 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 μ A pentru deplasarea maximă a acului indicator (spre capătul din dreapta), scara va avea scrisă o valoare de 0 μ A în partea stângă și o valoare de 50 μ A în partea dreaptă; mijlocul va fi desigur 25 μ A. În exemplul din figură, acul ar indica în acest caz ipotetic o valoare a curentului de 17,5 μ A. De obicei, scara este împărțită în gradații mult mai mici, din 5 în 5 μ A, sau chiar la 1 μ A, pentru a permite o citire mult mai precisă a indicației acului.

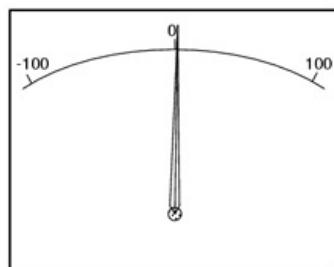


Figure 247: aparat de măsură; scara conține atât valori pozitive cât și valori negative

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 apарат sunt folosite pentru măsurători 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.

8.1.3 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 forță de atracție sau de respingere generată de sarcinile electrice în mediul dintre ele.

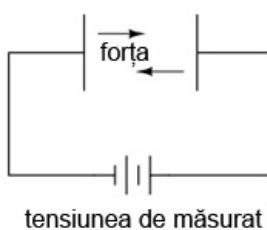


Figure 248: aparat de măsură electrostatic

Dacă aplicăm o tensiune între două suprafețe separate printr-un dielectric format din aer, va exista o forță fizică de atracție dintre cele două suprafețe, forță capabilă să depleteze un mecanism de măsurare. 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 aparat de măsură nu sunt practice pentru instrumentele de test normale. Astfel de aparat electrostatic sunt folosite pentru măsurarea tensiunilor înalte, de ordinul miilor de volți. Unul dintre cele mai mari avantaje al aparatelor electrostatice constă în

rezistență electrică extrem de mare, fătă de aparatelor 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 volmetru profesional.

1. Tubul catodic (CRT)

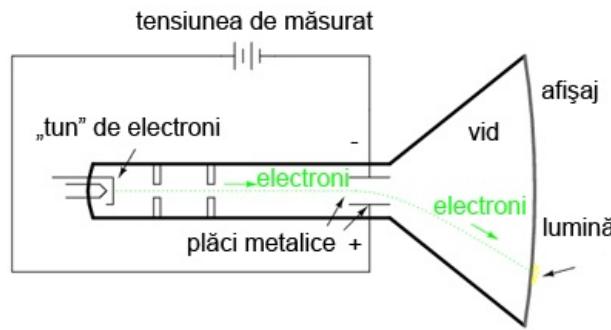


Figure 249: tubul catodic

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 placă negativă și atrași de placă pozitivă. O inversare a polarității ensiunii dintre cele două plăci va duce la modificarea în sens contrar al traseului fascicoului de electroni, acest dispozitiv fiind prin urmare sensibil la polaritate.

Electronii, având o greutate mult mai mică decât plăcile metalice, 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 afişajul din sticlă de la capătul tubului, unde întâlnesc un strat subțire de fosfor; rezultatul este emisarea 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 puterici de la traseul lor inițial, punctul luminos de pe afişaj regăsindu-se la o distanță mai mare față de centrul acestuia.



Figure 250: tub catodic

Un astfel de tub este prezentat în figura alăturată. Într-un tub real, precum cel alăturat, există două perechi de placi metalice pentru deviația electronilor, nu doar una singură, pentru a putea acoperi întreaga aria a afişajului de sticlă din capătul dispozitivului.

Cu toate că acest dispozitiv pot înregistra tensiuni mici cu o precizie ridicată, ele sunt totuși greoai, 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.

8.2 Voltmetru

Majoritatea aparatelor de măsură sunt dispozitive foarte sensibile. Unele modele, precum D'Arsonval, necesită un curent de doar 50 μA pentru a duce acul indicator în poziția maximă a scalei de valori; rezistență internă a acestor tipuri de aparat nu este mai mare de 1000Ω . În consecință, un astfel de voltmetru poate măsura o tensiune maximă de doar 50 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.

8.2.1 Modelul D'Arsonval

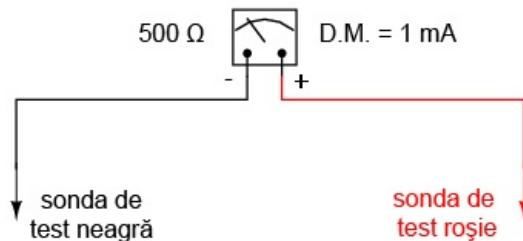


Figure 251: dispozitiv de măsură D'Arsonval

Să luăm ca și prim exemplu un dispozitiv tip D'Arsonval, cu o rezistență internă a bobinei de 500Ω , și a cărei deplasare maximă (D.M.) se realizează pentru un curent de 1 mA .

Aplicând legea lui Ohm, putem determina tensiunea necesară deplasării acului indicator la valoarea maximă:

$$E = IR \quad E = (1 \text{ mA})(500 \Omega) \quad E = 0,5 \text{ V}$$

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 tensiune de măsurat să se regăsească pe bobina internă. Desigur, va trebui să modificăm și scara aparatului de măsură, astfel încât să existe o legătură directă între deplasarea acului indicator și valoarea reală a tensiuni măsurate.

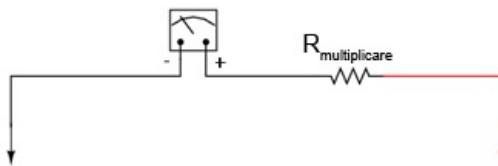


Figure 252: dispozitiv de măsură D'Arsonval

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 (înclusă 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 , 500Ω) să poată măsura tensiuni de până la 10 V .

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

Pot folosi metoda tabelului pentru a ne ușura calculele.

Unitate	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.

Unitate	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 500Ω a deplasării pentru a obține valoarea $R_{\text{multiplicare}}$. O altă 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.

Unitate	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.

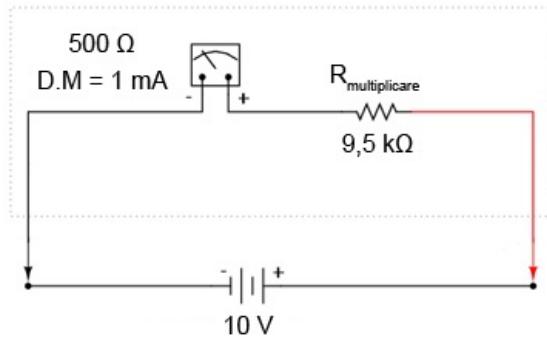


Figure 253: voltmetu

Indiferent de metoda folosită, răspunsul final este același ($9.5\text{ k}\Omega$). 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 modificat și scala astfel încât valorile acesteia 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 cunoscă faptul că aparatul folosește doar o fracție 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 sensibilitate cât mai ridicată. Această configurație este apoi conectată la un circuit divizor realizat cu rezistori de prezizie, pentru a putea indica o tensiune sau un curent mult mai mari.

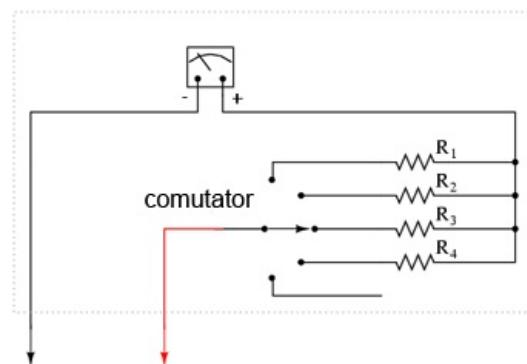


Figure 254: volmetru folosind un comutator multi-polar si o serie de rezistori de multiplicare

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).

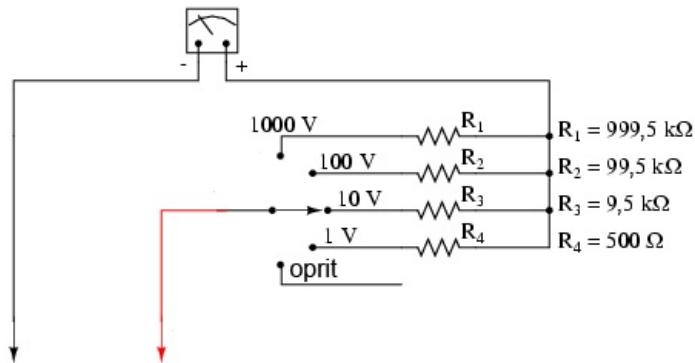


Figure 255: volmetru folosind un comutator multi-polar si o serie de rezistori de multiplicare

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 volmetru cu scara tensiunilor de 1 V, 10 V, 100 V și 1000 V, rezistențele de multiplicare sunt conform figurii alăturate.

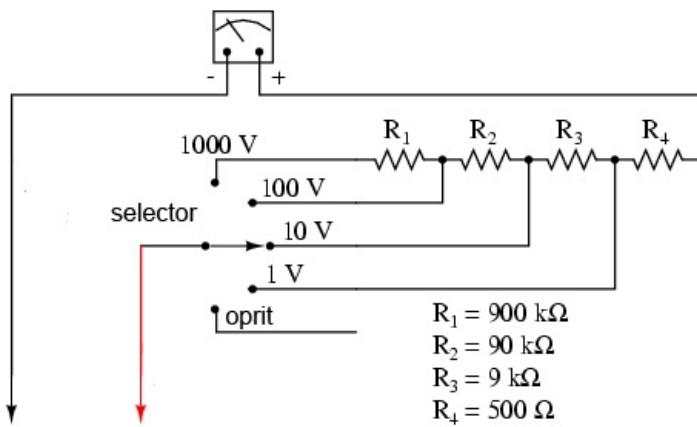


Figure 256: volmetru folosind un comutator multi-polar si o serie de rezistori de multiplicare

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 este 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:

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad R_{\text{total}} = 900 \text{ k}\Omega + 90 \text{ k}\Omega + 9 \text{ k}\Omega + 500 \text{ k}\Omega \quad R_{\text{total}} = 999,5 \text{ k}\Omega$$

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.

8.3 Impactul voltmetrului asupra circuitului

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!

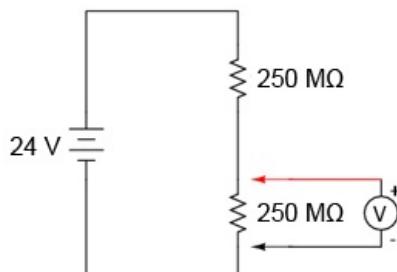


Figure 257: măsurarea căderii de tensiune într-un circuit divizor de tensiune cu ajutorul unui voltmetru

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.

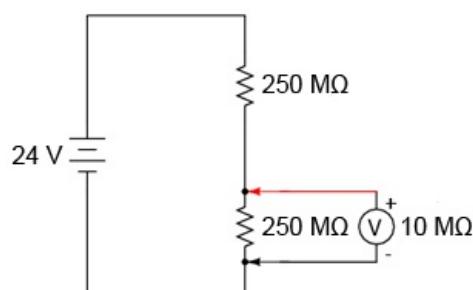


Figure 258: realizarea unui subcircuit între volmetru și componentul asupra cărei se face măsurarea tensiunii

Atunci când voltmetrul nu este conectat în circuit, vom aveam o cădere de tensiune de exact 12 V pe fiecare dintre cei doi rezistori (vezi circuitele divizoare de tensiune). Totuși, dacă voltmetrul considerat în acest exemplu posedă o rezistență internă între cele două sonde de 10 MΩ (o valoare normală pentru un voltmetru digital), aceasta va crea un subcircuit paralel cu rezistorul inferior al divizorului.

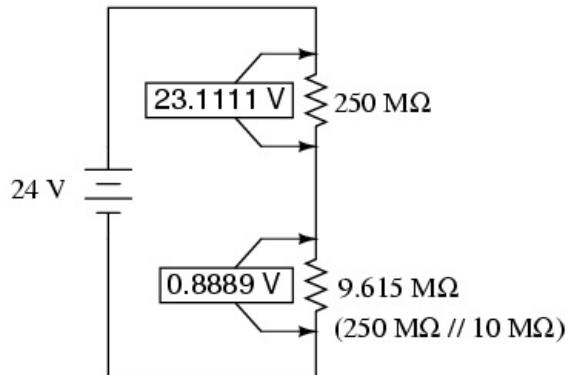


Figure 259: modificarea căderilor de tensiune din circuit ca urmare a conectării voltmetrului

Acest lucru duce la scăderea rezistenței inferioare de la $250 \text{ M}\Omega$ la $9,61 \text{ M}\Omega$ (circuit paralel), modificând fundamental căderile de tensiune din circuit.

Un divizor de tensiune cu rezistențele de $250 \text{ M}\Omega$, respectiv $9,61 \text{ M}\Omega$ va diviza o tensiune de 24 V în $23,11 \text{ V}$, respectiv $0,88 \text{ V}$. Din moment ce voltmetrul face parte din rezistența de $9,61 \text{ M}\Omega$, aceasta este și valoarea pe care o va indica: $0,88 \text{ V}$. Voltmetrul poate indica doar cădere de tensiune dintre punctele în care este conectat. Acesta nu poate „știi” că înainte de introducerea sa în circuit, în acea locație există o cădere de tensiune de 12 V și nu de $0,88 \text{ V}$. Conectarea aparatului de măsură în circuit modifică rezistența circuitului și prin urmare și valoarea căderii de tensiune măsurată, aceasta nefiind prin urmare cea reală. Acest efect este prezent, într-o anumită măsură, ori de câte ori folosim un voltmetriu. 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 voltmetriu ideal posedă o rezistență infinită. Dar, indiferent de valoarea acestei rezistențe, efectul prezentat mai sus va fi tot timpul prezent într-un circuit.

8.3.1 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 sondele aparatului indiferent de domeniul de tensiune ales.

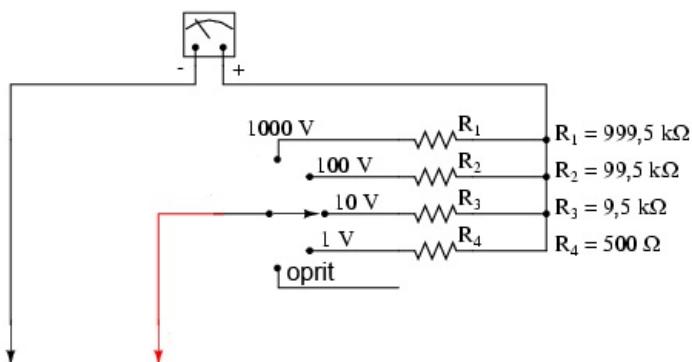


Figure 260: volmetru folosind un comutator multi-polar și o serie de rezistori de multiplicare

Să reluăm exemplu din secțiunea precedentă. Pe domeniul 1000 V , rezistența totală este de $1 \text{ M}\Omega$ ($999,5 \text{ k}\Omega + 500\Omega$), ceea ce înseamnă $1 \text{ M}\Omega / 1000 \text{ V}$, sau $1 \text{ k}\Omega/\text{V}$. 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 $1000 \text{ }\Omega/\text{V}$, 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 trebuie să fie mai fragil.

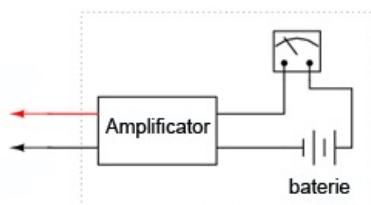


Figure 261: amplificarea curentului voltmetrului pe cale electronică

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 alături de amplificatorul aici, dar putem spune că circuitul permite tensiuni 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. Își în acest caz există un anumit curent absorbit de aparat din circuitul măsurat, dar acesta este de sute sau mii de ori mai mici decât curentul absorbit în mod normal de un astfel de aparat fără amplificare.

8.3.2 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.

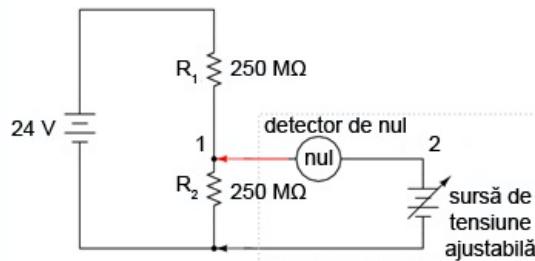


Figure 262: măsurarea căderii de tensiune din circuit cu ajutorul unui detector de nul

Într-un detector de nul, o sursă de tensiune de precizie, ajustabilă, este comparată cu tensiunea de măsură iar aparatul indică diferența de tensiune dintre cele două. În cazul în care indicație 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 de zero amperi. În unele situații, aparatul este prevăzut cu un potențiometru de precizie pentru reglarea fină a tensiunii.

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

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

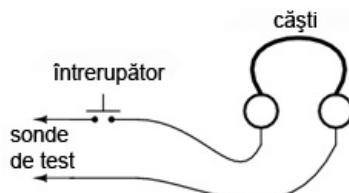


Figure 263: detector de nul realizat cu ajutorul unei perechi de căști și un încruperător

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

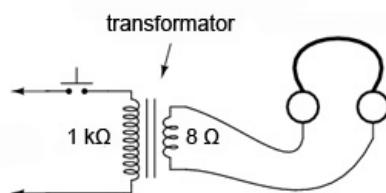


Figure 264: detector de nul realizat cu ajutorul unei perechi de căști și un încruperător; adăugarea în circuit a unui transformator

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

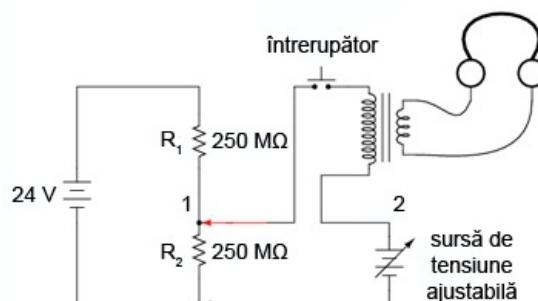


Figure 265: detector de nul realizat cu ajutorul unei perechi de căști și un încruperător; exemplu

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

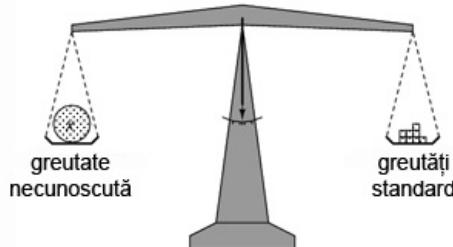


Figure 266: balanță de laborator; măsurarea unei greutăți necunoscute

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 .

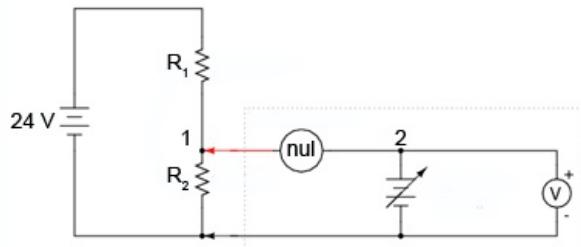


Figure 267: etector de nul realizat cu ajutorul unei perechi de căști și un întrerupător; exemplu

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 voltmètre 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. Atât 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.

Merită să reamintim faptul că această metodă, executată perfect, aproape că nu introduce nicio rezistență suplimentară în circuitul de măsurat. Ideal, această rezistență ar fi zero, dar pentru atingerea acestui scop, căderea de tensiune pe detectorul de nul ar trebui să fie exact zero volți. Acest lucru ar fi posibil doar prin intermediul unei metode de detectare infinit sensibile și o tensiune la fel de precisă din partea surse 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).

8.4 Ampermetrul

Un aparat de măsură conceput special pentru măsurarea valorii curentului electric (în amperi), poartă numele de ampermetru. La proiectarea ampermetrelor, rezistorii de multiplicare (rezistori de sunt în acest caz) se vor conecta în paralel și nu în serie, precum era cazul voltmetrelor. Astă datorită faptului că dorim o divizare a curentului, nu a tensiunii, iar un divizor de curent se realizează prin rezistori conectați în serie.

Considerând aceeași 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.

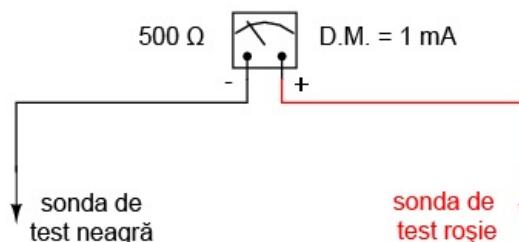


Figure 268: aparat de măsură

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.

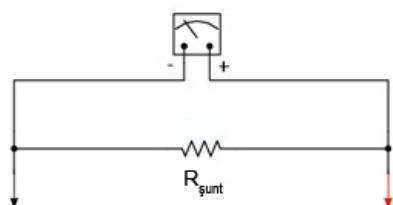


Figure 269: ampermetru; adăugarea unei rezistențe de şunt

După ce ne-am hotărât ca vrem să extindem domeniul maxim la 5 A, vom trece la determinarea rezistenței de şuntare. 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).

Unitate	Deplasare	R _{şunt}	Total	Unitate
E				V
I	1 m		5	A
R	500			Ω

Putem introduce datele cunoscute într-un tabel, pentru ușurarea calculelor.

Unitate	Deplasare	R _{şunt}	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 ($E = IR$).

Unitate	Deplasare	R _{şunt}	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 şunt, pe sistemul de detectare a deplasării, precum și între cele două sonde ale aparatului de măsură, trebuie să fie egale.

Unitate	Deplasare	R _{şunt}	Total	Unitate
E	0,5	0,5	0,5	V
I	1 m	4,99	5	A
R	500			Ω

Stim de asemenea ca prin şunt, curentul trebuie să fie egal cu diferența dintre curentul total (5 A) și curentul deplasării (1 mA), datorită adunării curentilor de ramuri în configurația parelă.

Unitate	Deplasare	R _{şunt}	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 şunt necesară.

Desigur, în realitate, rezistența de şunt se regăseste în interiorul aparatului de măsură.

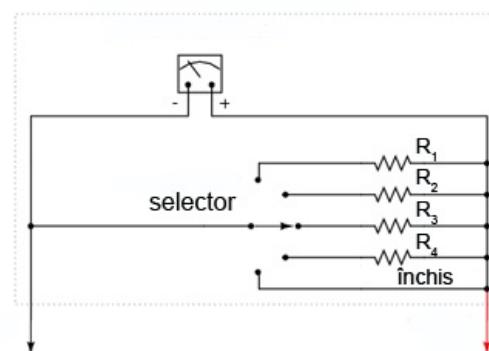


Figure 270: ampermetru; adăugarea rezistențelor de şunt

La fel ca și în cazul voltmetrelor, pot exista mai multe valori ale curentilor de deplasare maximă. Acest lucru se realizează prin introducerea în circuit a unui număr suplimentar de rezistori de şunt. 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. Marimea fiecărui rezistor este diferită și conform cu deplasarea maximă a domeniului respectiv de valori, bazându-se pe caracteristicile sistemului de detectare al deplasării (1 mA, 500 Ω).

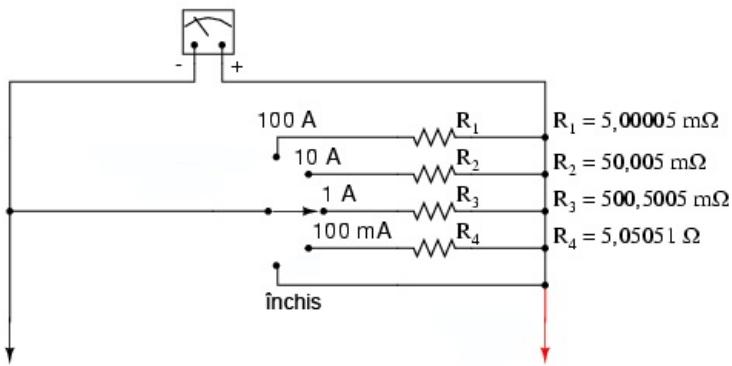


Figure 271: ampermetru; determinarea rezistențelor de șunt conectare în paralel

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 realizati 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 distrugă, 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:

$$P_{R1} = E^2 / R_1 = (0,5 \text{ V})^2 / 5,00005 \text{ m}\Omega = 50 \text{ W} \quad P_{R2} = E^2 / R_2 = (0,5 \text{ V})^2 / 50,005 \text{ m}\Omega = 5 \text{ W} \quad P_{R3} = E^2 / R_3 = (0,5 \text{ V})^2 / 500,5005 \text{ m}\Omega = 0,5 \text{ W} \quad P_{R4} = E^2 / R_4 = (0,5 \text{ V})^2 / 5,0505 \text{ l } \Omega = 49,5 \text{ mW}$$

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.

8.4.1 Măsurarea curentului cu un rezistor de șunt și un voltmetru

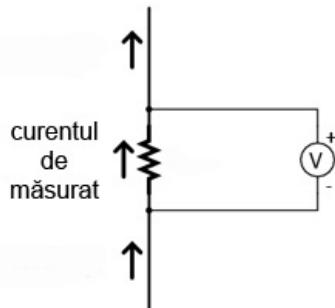


Figure 272: utilizarea rezistențelor de șunt în paralel cu un voltmetru pentru măsurarea curentului

În unele cazuri, rezistorii de șunt sunt utilizați în combinație cu voltmetre cu rezistență de intrare ridicată pentru măsurarea curenților. Curentul prin voltmetru va fi suficient de mic pentru a-l putea neglijă, 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, cădereea de tensiune la bornele acestuia va crește cu un volt. Indicația voltmetrului va putea fi considerată ca fiind direct legată 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, scara voltmetrului poate fi modificată/inlocuită pentru a putea citi direct valorile curentului.

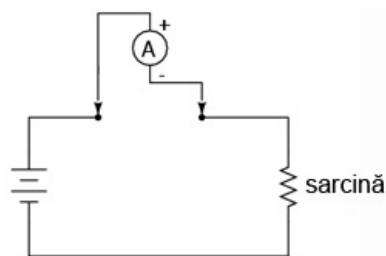


Figure 273: introducerea unui ampermetru în circuit pentru măsurarea curentului

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 ampermetru conectat între cele două capete libere închizând astfel din nou circuitul.

măsurarea curentului cu ajutorul unui voltmetru; util în cazul unui circuit asupra căruia sunt necesare măsurători dese ale valorii

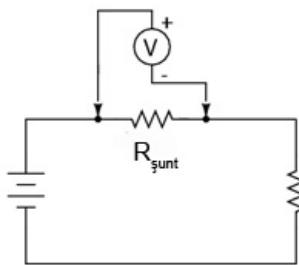


Figure 274: curentului

Dacă avem un circuit în care această operație trebuie realizată des, sau dacă dorim simplificarea procesului de măsură, putem păstra permanent un rezistor de şunt 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 şuntului 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 şuntului, dar aceasta se încadrează în limite acceptabile.

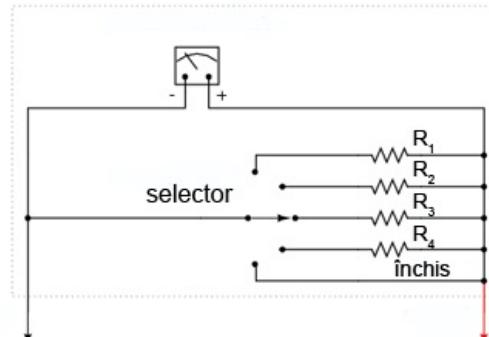


Figure 275: ampermetru; adăugarea rezistențelor de şunt

8.5 Impactul ampermetrului asupra circuitului

8.5.1 Ampermetrul ideal

Asemenea voltmetrelor, și ampermetrele tend 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).

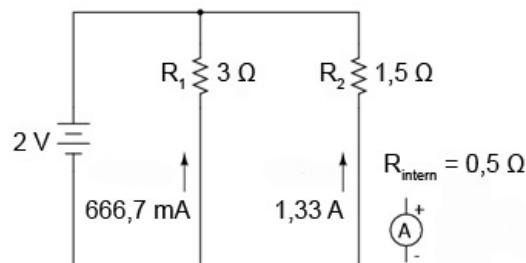


Figure 276: circuit paralel pur rezistiv

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 $666,7\text{ mA}$, iar curentul prin rezistorul de $1,5\Omega$ este de $1,33\text{ A}$.

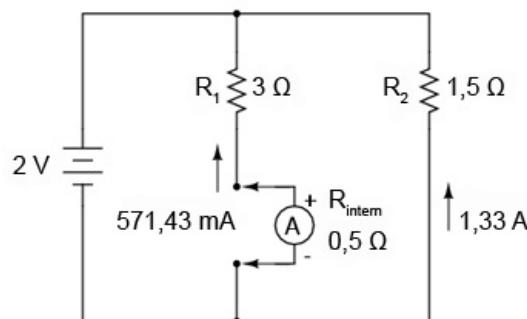


Figure 277: circuit paralel pur rezistiv; introducerea ampermetrului într-o ramură

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

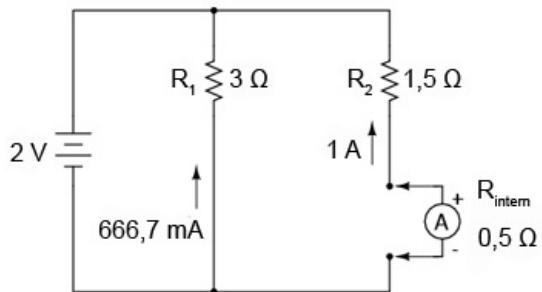


Figure 278: circuit paralel pur rezistiv; introducerea ampermetrului într-o ramură

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 şunt, 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.

8.5.2 Cleștele ampermetric (clampmetrul)

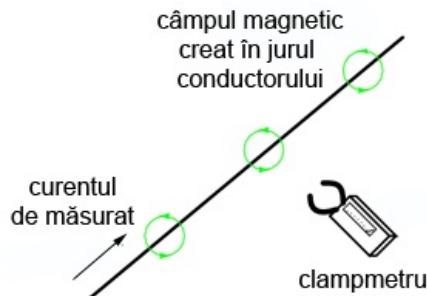


Figure 279: măsurarea curentului dintr-un circuit cu ajutorul clampmetrului

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 aceluia câmp magnetic, se poate evita contactul direct și întreruperea circuitului. Un astfel de ampermetru poartă numele de clampmetru sau clește ampermetric.

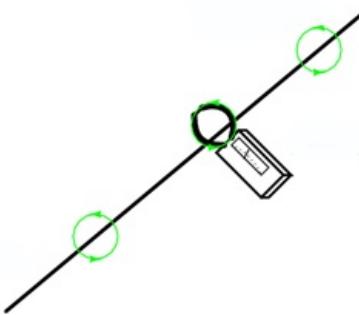


Figure 280: măsurarea curentului dintr-un circuit cu ajutorul clampmetrului

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 clampmetrul nu introduce nicio rezistență suplimentară în circuitul de test, nu va exista practic nicio eroare de măsurătoare în acest caz.

8.6 Ohmmetrul

8.6.1 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 deplasare acționat de un curent electric. Prin urmare, ohmmetru 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.

8.6.2 Realizarea unui ohmmetru simplu

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

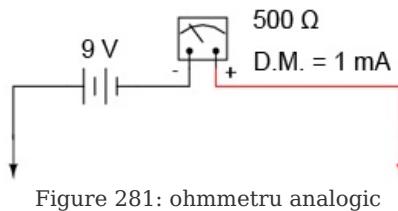


Figure 281: ohmmetru analogic

Când avem o rezistență infinită (nu există continuitate între cele două sonde), curentul prin circuitul intern al ohmmetru lui este zero. În acest caz, nu avem nicio deplasare, iar acul indicator este poziționat în partea stângă a scalei de valori. Din acest punct de vedere, indicația ohmmetru lui este chiar „inversă”, deoarece valoarea maximă (infinit) este la stânga scalei. Indicația voltmetrelor și ampermetrelor este chiar inversă.

Dacă sondele acestui ohmmetru sunt conectate împreună (scurt-circuitare, rezistență 0 Ω), 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:

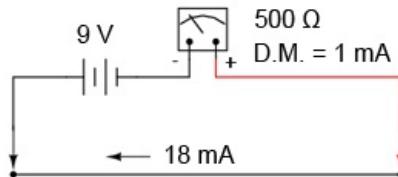


Figure 282: ohmmetru analogic

Cu o tensiune a bateriei de 9 V și o rezistență internă a mecanismului de deplasare de doar 500 Ω, 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 drepta (deplasare maximă) ar trebui să reprezinte 0 Ω. Trebuie să ne asigurăm de faptul că deplasarea acului indicator este maximă spre dreapta doar când sondele sunt conectate împreună (scurt-circuitare). Acest lucru se realizează prin adăugarea unei rezistențe serie în circuitul aparatului de măsură:

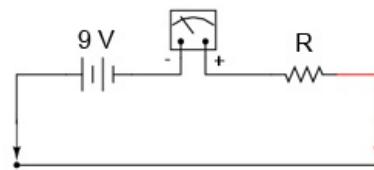


Figure 283: ohmmetru analogic

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:

$$R_{\text{total}} = E / I = 9 \text{ V} / 1 \text{ mA} \quad R_{\text{total}} = 9 \text{ k}\Omega \quad R = R_{\text{total}} - 500 \Omega = 8,5 \text{ k}\Omega$$

8.6.3 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 drepta 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 extremități (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 (rezistență zero), iar valorile rezistențelor se adună din ce în ce mai rapid una lângă cealaltă pe măsură ce trecem în partea stângă a scalei:

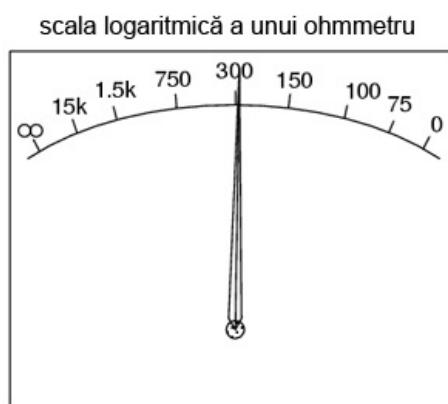


Figure 284: scala logaritmică a unui ohmmetru

Nu ne putem apropia de infinit printr-o manieră liniară, pentru că scala nu ar ajunge niciodată acolo! Cu o scală ne-liniară, cantitatea de rezistență acoperită de o anumită distanță crește pe măsură ce scala se apropiște 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 µA) este valoare curentului necesară pentru această deplasare la mijlocul scalei. Păstrând bateria de 9 V în circuit, obținem următorul rezultat:

$$R_{\text{total}} = E / I = 9 \text{ V} / 500 \mu\text{A} \quad R_{\text{total}} = 18 \text{ k}\Omega$$

Cu o rezistență internă de 500 Ω, și un rezistor serie de 8,5 kΩ, ne mai rămân 9 kΩ pentru o rezistență de test externă (conectată între sonde), pentru o deplasare la jumătatea 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):

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

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

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

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

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

Prin urmare, scara finală a ohmmetru lui arată astfel:

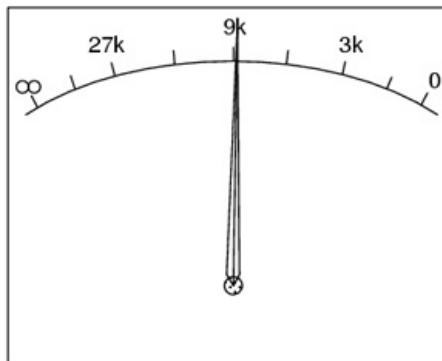


Figure 285: scara logaritmică a unui ohmmetru

8.6.4 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), ohmmetru va pierde din precizie. Cu rezistorul de scală conectat în serie și la o valoare constantă de 8,5 kΩ, o descreștere a tensiunii bateriei va însemna că deplasarea acului indicator nu se va realiza înspre poziția dreapta-maximă la conectarea sondelor împreună (0 Ω). Identic, o rezistență de test de 9 kΩ nu va reuși să depleteze 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 aproximății. Din acest motiv, și datorită scalei neliniare, acest tip de ohmmetru nu poate fi în niciun caz considerat un instrument de precizie.

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 măsură rezistența cu un ohmmetru, atunci când circuitul este alimentat (conectat la o sursă de tensiune). Motivul este simplu: indicația precisă a ohmmetru lui se bazează pe faptul că singură 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 ohmmetru lui. Dacă această cădere de tensiune este suficient de mare, poate duce chiar la distrugerea acestuia.

8.7 Ohmmetre pentru tensiuni înalte

8.7.1 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 (MΩ). Pentru a măsura însă rezistențe extrem de mari, o baterie de 9 V nu este suficientă pentru generarea unui curent necesar acțiunii 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:

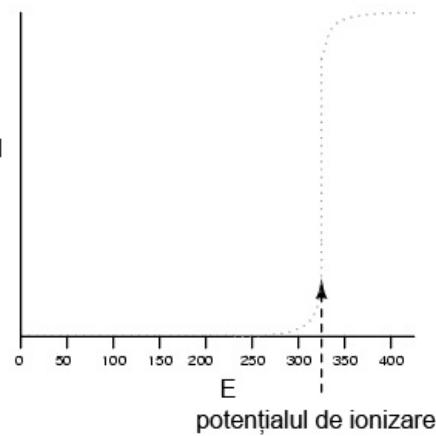


Figure 286: graficul curent-tensiune

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 strâpungere a unui dielectric. Dacă este necesară măsurarea unor astfel de rezistențe, avem nevoie de un ohmmetru echipat cu o sursă de tensiune înaltă.

8.7.2 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:

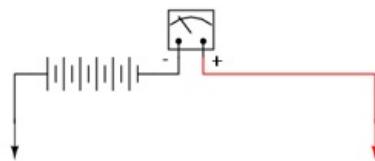


Figure 287: ohmmetru de tensiune înaltă

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:

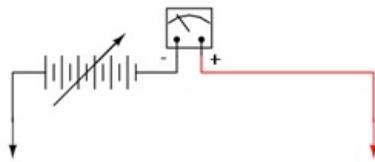


Figure 288: ohmmetru de tensiune înaltă (tensiune variabilă)

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. Imagineați-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.

8.7.3 Megohmmetru

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:

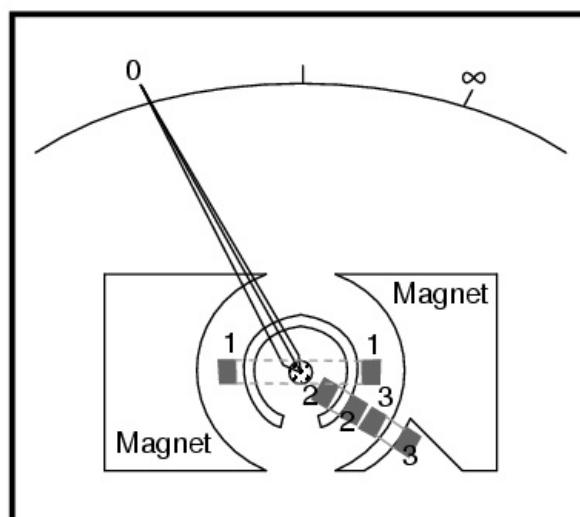


Figure 289: megohmmetru

Blocurile rectangulare numerotate din figura de mai sus reprezintă secțiuni transversale al bobinelor. Toate cele trei bobine se deplasează odată cu acul indicator. Nu există niciun arc care să reducă acul la poziția inițială. Când aparatul nu este alimentat, acul indicator va „pluti” într-o poziție aleatoare. Electric, bobinele sunt conectate astfel:

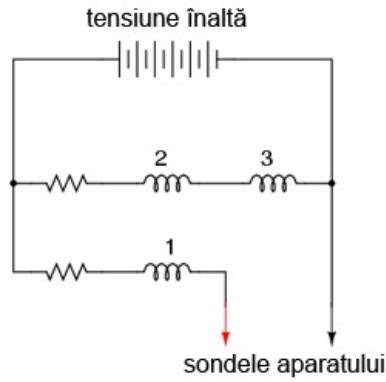


Figure 290: megohmmetru; modul de conectare al bobinelor

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):

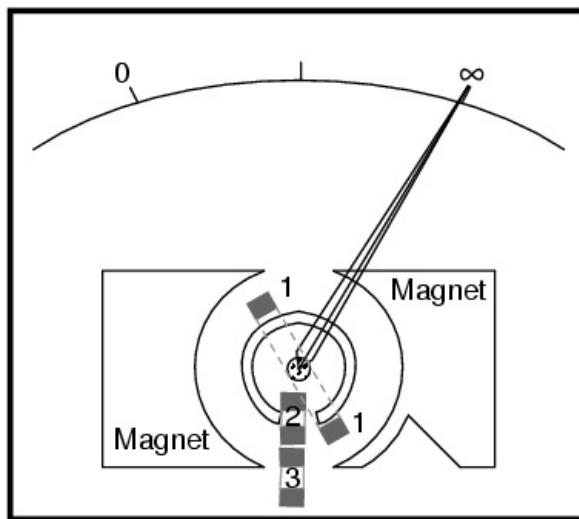


Figure 291: megohmmetru

Existența unui curent prin bobina 1 (prin rezistență de măsurat conectată între cele două sonde de măsură) trebuie să ducă acul indicat spre stânga scalei (zero). Valorile rezistențelor interne ale sistemului de măsură sunt calibrate astfel încât, în cazul în care sondele sunt scurt-circuite, acul indicator indică exact 0Ω .

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 și 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.

8.8 Multimetru

Am văzut modul în care un sistem electromecanic poate funcționa pe post de voltmetru, amperméttru sau ohmmetru prin simplă conectare a unor rețele externe de rezistori. Ne putem gândi că am putea realiza un aparat de măsură universal (multimetru), în care să fie incorporate toate funcțiile de mai sus. Acest lucru se realizează practic prin utilizarea corespunzătoare a contactelor și rezistorilor.

8.8.1 Voltmetru/amperméttru analogic

Schema de principiu a unui voltmetru/amperméttru analogic simplu, arată astfel:

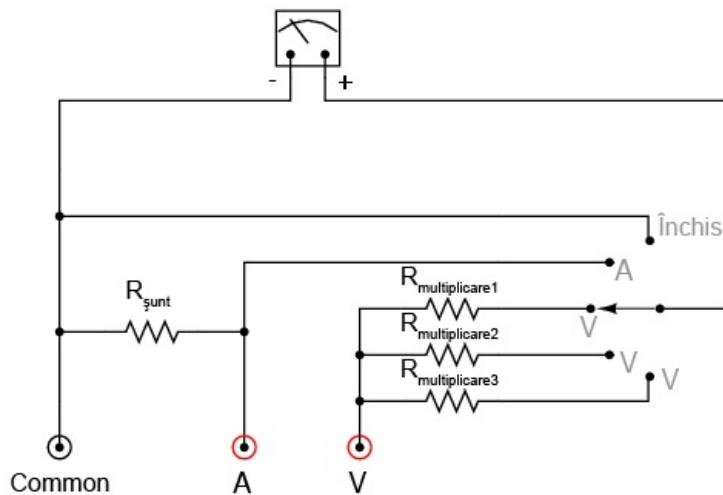


Figure 292: schema de principiu voltmetru/ampermetru

În cele trei poziții de jos ale comutatorului, mecanismul de detectie al aparatului este conectat la prizele „common” și V printr-unul din cei trei rezistori serie ($R_{multiplicare}$). 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 sunt (R_{sunt}). Astfel, aparatul este în acest caz un ampermetru. Currentul intră pe la priza „common” și ieșe pe la priza A. În ultima poziție, mecanismul de deplasare este deconectat de la ambele prize roșii (V și A), dar scurcircuitat prin intermediul comutatorului.

8.8.2 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:

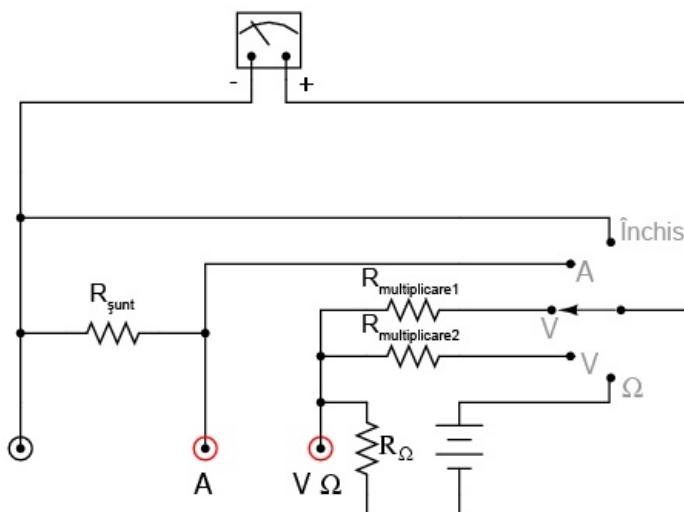


Figure 293: schema de principiu voltmetru/ampermetru/ohmmetru

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

- Utilizarea multimeterului

8.9 Terminali tip Kelvin și rezistori de precizie

8.9.1 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 ohmmetru măsoară rezistența totală din bucla de circuit. Aici este inclusă și rezistența conductorilor (R_{fir}) ce realizează conexiunea ohmmetrului cu rezistența de măsurat ($R_{măsură}$):

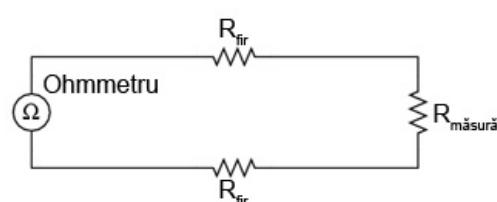


Figure 294: măsurarea rezistențelor aflate la distanță

În mod normal, rezistența firelor conductorice este foarte mică. Dar, dacă firele conductorice 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: indicația ohmmetrului = $R_{fir} + R_{măsură} + R_{fir}$

8.9.2 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:

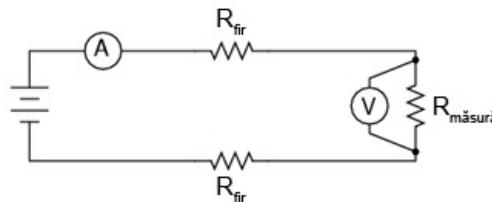


Figure 295: măsurarea rezistenței cu o combinație ampermetru-voltmetru

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:

$R_{măsură}$ = indicația voltmetrului / 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 aparatul noastră de măsură). Prin urmare, dacă ar fi să conectăm voltmetrul la o distanță apreciabilă față de component, vom introduce din nou rezistență „parazită” a firelor conductoare în circuit. Ce este de făcut în acest caz?

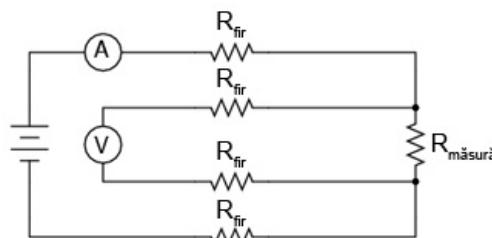


Figure 296: măsurarea rezistenței cu o combinație ampermetru-voltmetru

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:

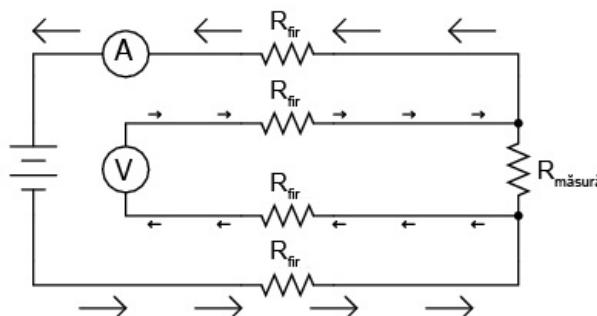


Figure 297: măsurarea rezistenței cu o combinație ampermetru-voltmetru

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

8.9.3 Metoda Kelvin (metoda celor patru conductori)

Această metodă de măsurare ce evita 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 realizati pentru a facilita acest tip de măsurători:

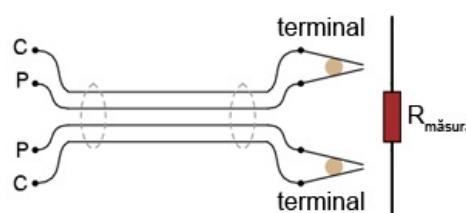


Figure 298: terminali Kelvin

Terminalii/clemene tip crocodil (banane) au ambele jumătăți ale brațului comun din punct de vedere electric (de obicei în zona articulației). În cazul terminalilor Kelvin însă, cele două jumătăți sunt izolate între ele în zona articulație. 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:

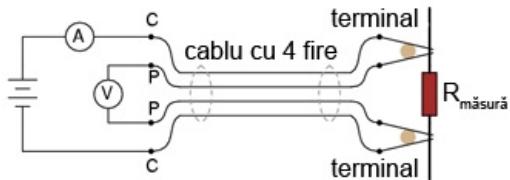


Figure 299: terminali Kelvin

8.9.4 Rezistori de şunt de precizie înaltă

Același principiu de utilizare a diferitelor puncte de conctat pentru măsurarea curentului și a tensiunii poate fi folosit în cazul rezistorilor de şunt de precizie pentru măsurarea valorilor mari de curent. După cum am mai discutat, rezistorii de şunt sunt folosiți pe post de dispozitive de măsură de curent. Căderea de tensiune la bornele acestora depinde strict de valoarea curentului ce-i strâbate, această cădere de tensiune fiind măsurată cu un voltmetru. În acest caz, un şunt de precizie „transformă” valoarea curentului în tensiune. Curentul poate fi măsurat cu o precizie ridicată prin măsurarea căderii de tensiune la bornele şuntului:

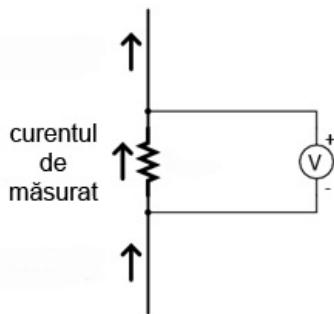


Figure 300: măsurarea curentului cu ajutorul rezistorilor de şunt

Măsurarea curentului cu ajutorul unui rezistor de şunt și un voltmetru este indicată în aplicațiile de curent înalt. În astfel de cazuri, rezistența şuntului are valori de ordinul miliohmilor sau microohmilor. 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 conductorare. Acest lucru înseamnă că tensiunea măsurată la bornele unui astfel de şunt trebuie măsurată astfel încât să se evite introducerea unei erori de măsură datorate căderilor de tensiune din lungul conductorilor dintre voltmetru și şunt. Pentru ca voltmetrul să măsoare doar căderea de tensiune la bornele şuntului, fără nicio altă cădere de tensiune parazită datorată firelor conductorare, şunturile sunt adesea prevăzute cu patru terminali:

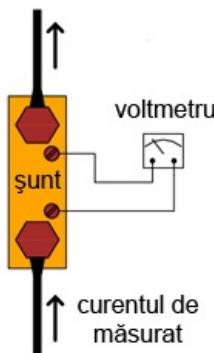


Figure 301: şunt cu patru terminale

8.9.5 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 ajutorului voltmetrului. În acest mod, voltmetru măsoară doar căderea de tensiune pe rezistorul de precizie, fără introducerea altor tensiuni parazite datorită firelor conductorare sau a rezistențelor datorate contactelor dintre fire și terminale.

Observați că rezistorul de precizie standard de 1Ω din figura de mai jos are patru terminali: cei doi terminali mari pentru curent și cei doi terminali mai mici pentru tensiune:

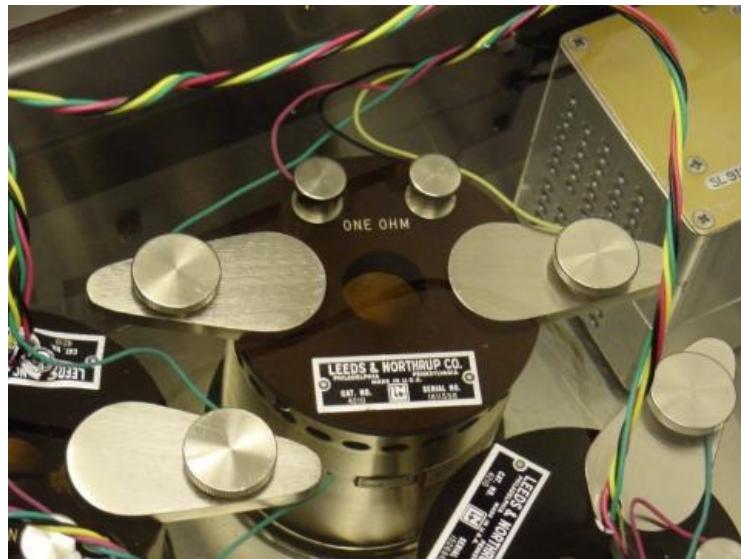


Figure 302: rezistor de precizie cu patru terminali

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. Își 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:

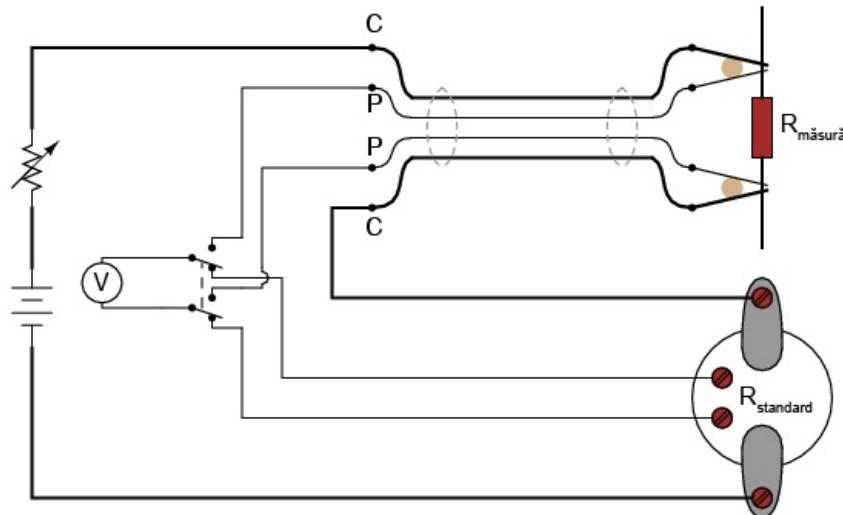


Figure 303: măsurarea rezistenței

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

8.10 Circuite în punte - puntea Wheatstone și Thomson

Circuitele în punte se folosesc de un detector de nul pentru a compara două tensiuni. Prințipiu 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.

8.10.1 Puntea Wheatstone

Circuitul în puncte standard, numit adeasea și punte Wheatstone, arată astfel:

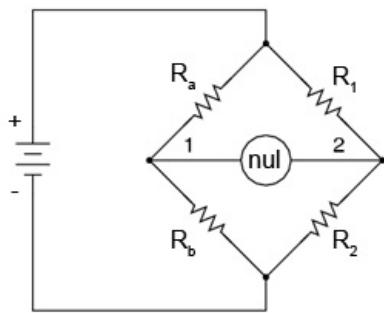


Figure 304: punte Wheatstone

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 da 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, rezistență 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 :

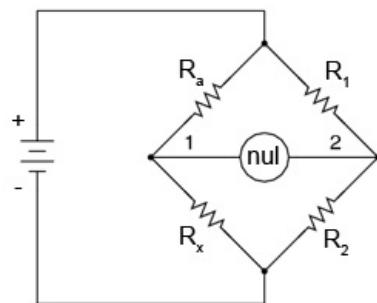


Figure 305: punte Wheatstone

Ecuația de echilibru a punții Wheatstone este următoarea:

$$\frac{R_a}{R_x} = \frac{R_1}{R_2}$$

Figure 306: formula

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 aşa 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.

8.10.2 Puntea Thomson (puntea Kelvin dublă)

O variantă interesantă a punții Wheatstone o reprezintă puntea dublă Kelvin, cunoscută și sub numele de punte Thomson. Această circuit este utilizat pentru măsurarea rezistențelor extrem de mici (sub 1/10 ohmi):

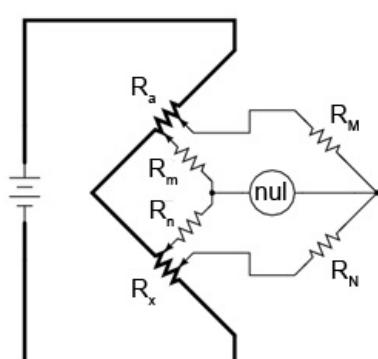


Figure 307: punte Thomson

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 mică, circuitul ar arăta astfel:

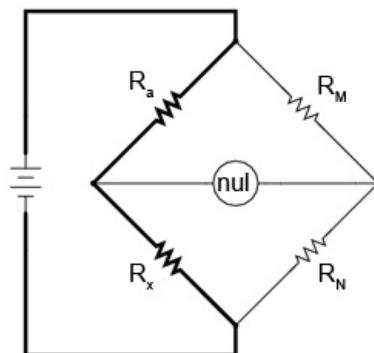


Figure 308: punte Wheatstone pentru măsurarea rezistențelor mici

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.

Aveam 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:

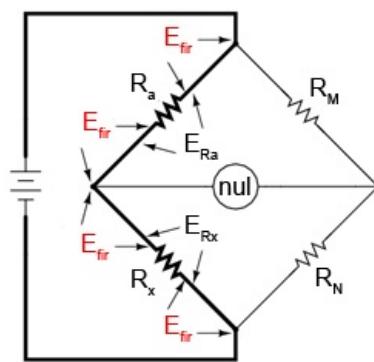


Figure 309: punte Wheatstone pentru măsurarea rezistențelor mici

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 apropiă de o soluție mai practică:

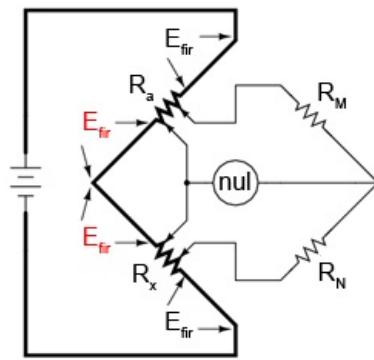


Figure 310: punte Wheatstone pentru măsurarea rezistențelor mici

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 :

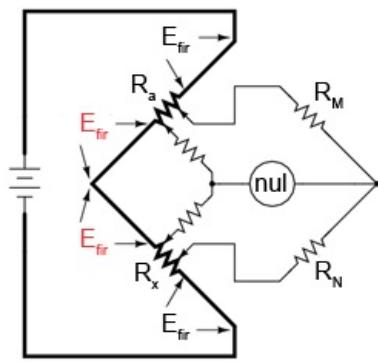


Figure 311: punte Thomson (punte Kelvin dublă)

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 celalată a detectoarelor de nul. Aceasta este și motivul pentru care acești rezistori au fost denumiți R_m și R_n în schema inițială a punctii Thomson: pentru a scoate în evidență proporționalitatea lor cu rezistorii R_M și R_N :

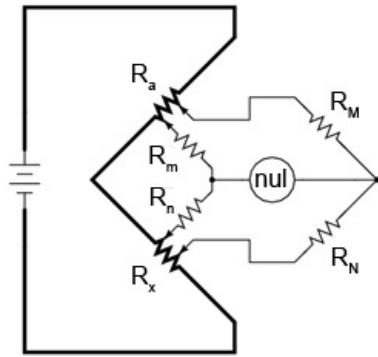


Figure 312: punte Thomson

Raportul R_m / R_n fiind egal cu raportul R_M / R_N , brațul R_a (reostatul) este ajustat până în momentul în care detectoarele de nul indică echilibrul punctii. În acest moment putem spune că R_a / R_x este egal cu R_M / R_N . Putem calcula R_x cu următoarea ecuație:

$$R_x = R_a \frac{R_N}{R_M}$$

Figure 313: formulă

De fapt, ecuația de echilibru a punctii Thomson este următoarea:

$$\frac{R_x}{R_a} = \frac{R_N}{R_M} + \frac{R_{wire}}{R_a} \left(\frac{R_m}{R_m + R_n + R_{wire}} \right) \left(\frac{R_N}{R_M} - \frac{R_n}{R_m} \right)$$

Figure 314: formulă

unde R_{fir} este rezistența firului conductor gros dintre rezistența standard de jos R_a și rezistența de test R_x .

Atât 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 punctii 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 .

8.10.3 Observații asupra punctii 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 detectoarele de nul va fi mai sensibili, deoarece rezistența conectată în serie cu el va fi mai mică. Creșterea sensibilității detectoarelor 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 punctii 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 , cu atât vor conduce un curent mai mare, ceea ce va duce la creșterea efectului oricărora rezistențe prezente la joncțiunea dintre acestea și rezistorii R_a și R_x . După cum se poate vedea, instrumentele de precizie înaltă 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.

8.11 Wattmetrul

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

Un mecanism de deplasare preicat special pentru măsurarea puterii este mecanismul de tip dinamometru. Structura acestuia este similară modelor 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 strucție arată astfel:

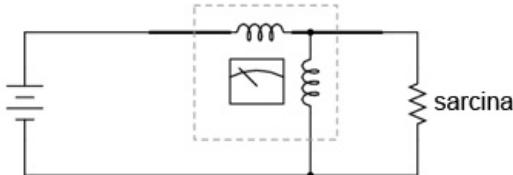


Figure 315: conectarea wattmetrului în circuit

Bobina de sus (orizontală) măsoară curentul, în timp ce bobina de jos (verticală) măsoară cădere 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 oricără 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 înereție minimă.

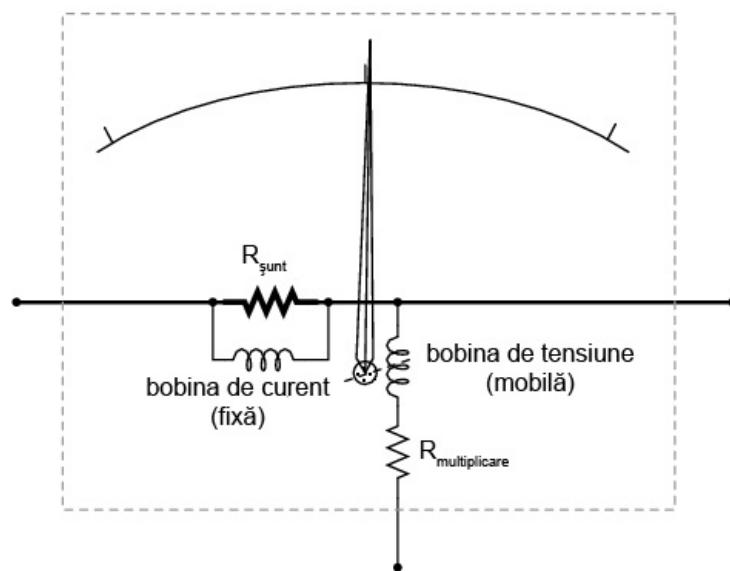


Figure 316: electrodinamometru

8.12 Realizarea practică a rezistențelor 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.

8.12.1 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 eliminate orice efecte electromagnetice: lungimea dorită a firului conductor este împărtășită 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:

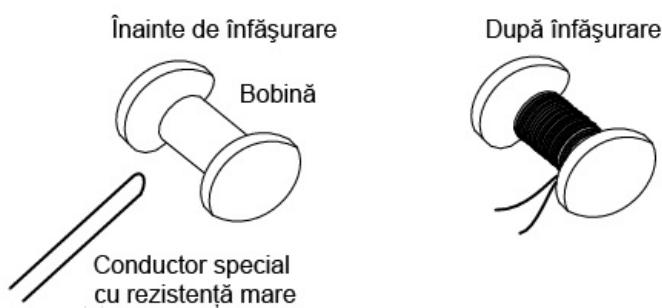


Figure 317: înfășurare bifilară; realizarea rezistorilor

După cum vă puteți imagina, această se poate dovedi extrem de laborioasă, îndeosebi în cazul în care avem nevoie de mai mulți rezistori.

8.12.2 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:

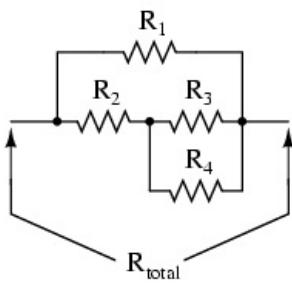


Figure 318: conectarea rezistorilor în combinații serie-paralel

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 magnetilor permanenți din componență, temperatura și timpul nu au niciun efect asupra rezistențelor componentelor, iar firelor conductoare și contactele pastrează 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 avantajoasă.

8.12.3 Utilizarea potențiometrelor

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

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

Soluția problemei constă în utilizarea unui potențiometru ca parte a unei combinații mai mari de rezistori. Acest lucru va crea un domeniu limitat de selecție. Să urmărim următorul exemplu:

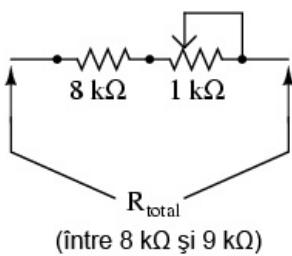


Figure 319: conectarea rezistorilor în combinații serie-paralel

În acest caz, potențiometrul de $1 \text{ k}\Omega$, conectat ca și reostat, introduce în circuit o rezistență variabilă între 0Ω 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 $\pm 1 \Omega$ reprezintă 1 parte din 1.000, sau 0,1 % din deplasarea maximă a potențiometrului. Precizia ajustării este de 10 ori mai bună decât în cazul precedent unde am folosit un potențiometru de $10 \text{ k}\Omega$.

Dacă dorim să mărim și mai mult precizia ajustării - pentru a realiza o rezistență de $8,335 \text{ k}\Omega$ cu o precizie și mai bună - putem reduce impactul potențiometrului asupra valorii totale a rezistenței circuitului prin conectarea unui rezistor de valoare fixă în paralel:

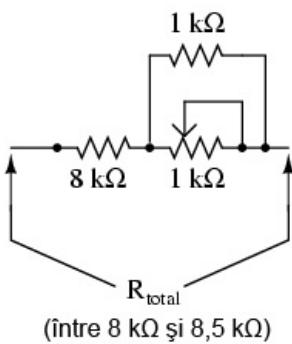


Figure 320: conectarea rezistorilor în combinații serie-paralel

Acum, ajustarea rezistorului se poate face doar în limita a 500Ω , 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.

9 Instrumentatie

9.1 Semnale analogice și digitale

Instrumentația este un domeniu bazat pe măsurarea și controlul proceselor fizice. Aceste procese fizice includ presiunea,

temperatura, rata de curgere și consistență chimică printre altele. Un instrument este un dispozitiv ce măsoară și/sau controlează orice tip de proces fizic. Datorită faptului că valorile și cantitatele 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.

Un *semnal* este orice tip de cantitate fizică ce transmite o informație. Vorbitul 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. 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 în 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 (*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.

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

bar era furnizat de un compresor de aer prin intermediul unor tuburi spre instrumentul de măsura, 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.

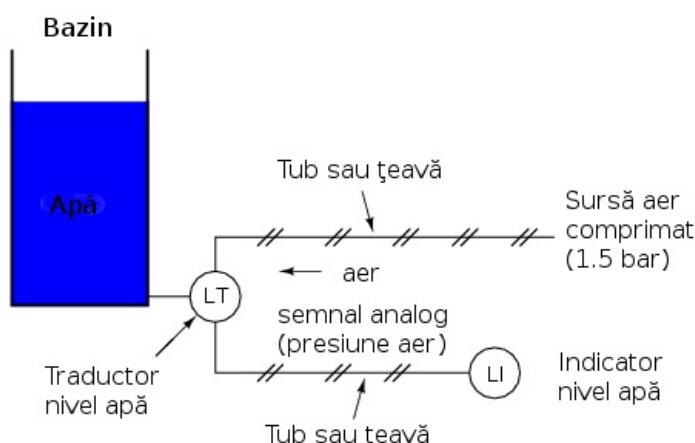


Figure 321: sistem măsurare nivel apă în bazin folosind aer comprimat

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 adevărul sens al cuvântului.

Oncăt de primitiv ar părea, acest tip de sisteme pneumatice a stat la baza multor sisteme industriale de măsură și control peste tot în lume, și mai sunt și acum folosite datorită simplicității, siguranței și fiabilității lor. Semnalele folosind aerul comprimat sunt ușoar de transmis prin tuburi ieftine, ușor de măsurat și ușor de manipulat cu ajutorul dispozitivelor mecanice. Pe lângă asta, 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 suficiente 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 semiconducțorilor, 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, pentru utilizare:

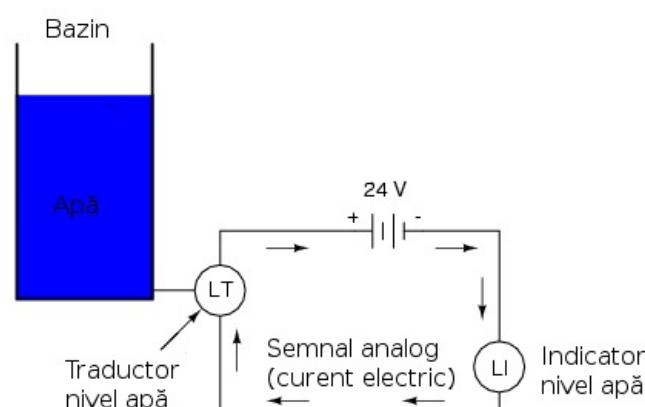


Figure 322: sistem măsurare nivel apă în bazin folosind aer comprimat

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.

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 mărimii 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 (copresorul de aer este opriț, țeava este spartă, traductorul este stricat, etc.).

În schimb, dacă am calibrat (setat) 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 nefuncționare 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.

9.2 Sisteme cu semnale de tensiune

Utilizarea tensiunii variabile pentru semnalele de instrumentație pare o soluție bună în acest caz. Să vedem aşadar cum am putea folosi un semnal de tensiune pentru a măsura cantitatea de apă dintr-un bazin:

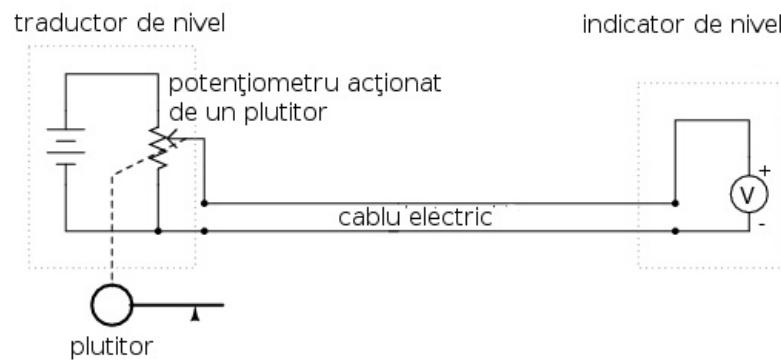


Figure 323: sistem măsurare nivel apă în bazin folosind potențiometru

Traductorul din diagrama de mai sus 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.

Pentru măsurarea nivelului 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 **folosesc** („trag”) valori foarte mici ale curentului datorită rezistenței lor interne, deși, ideal ar fi să nu folosească deloc. În acest caz, va exista o cantitate mică de curent prin cele două cabluri conductoare. Cablul având la rândul lui o valoare a rezistenței diferita 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, oricără de mică, constituie o eroare de măsură:

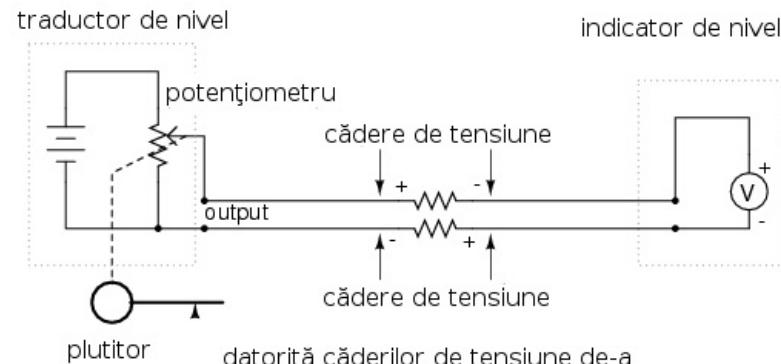


Figure 324: sistem măsurare nivel apă în bazin folosind potențiometru

În figura de mai sus 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.

9.3 Sisteme cu semnale 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 acesta:

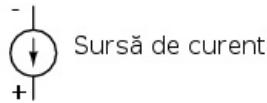
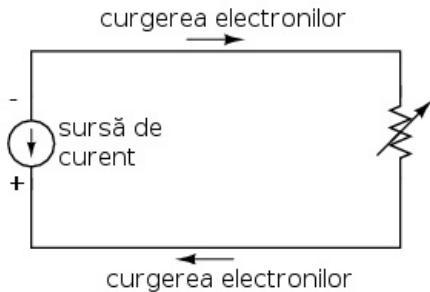


Figure 325: sursă de curent

O sursă de curent generează o valoare a tensiunii suficient de mică sau de mare astfel încât 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.



currentul va rămâne constant
în acest circuit, indiferent de
rezistența acestuia. Doar
tensiunea se va modifica!

Figure 326: circuit electric cu sursă de curent

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:

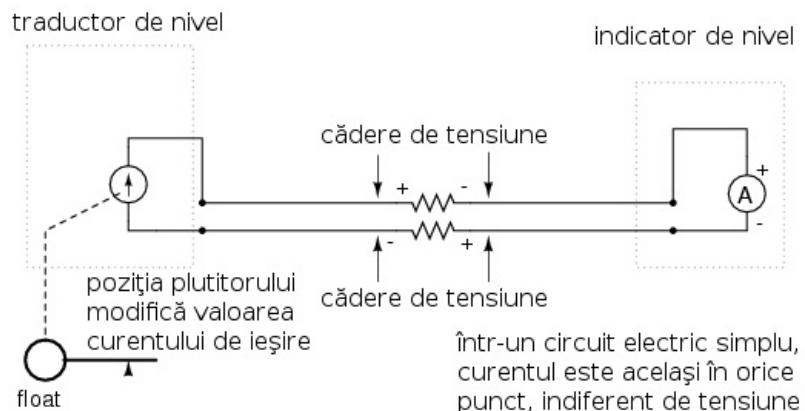


Figure 327: sistem de instrumentație cu sursă de curent

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 potențiometrului 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 centrimetri, 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 componente. Cu sau fără rezistență 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. Aceasta este un mare avantaj față de sistemul precedent. 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:

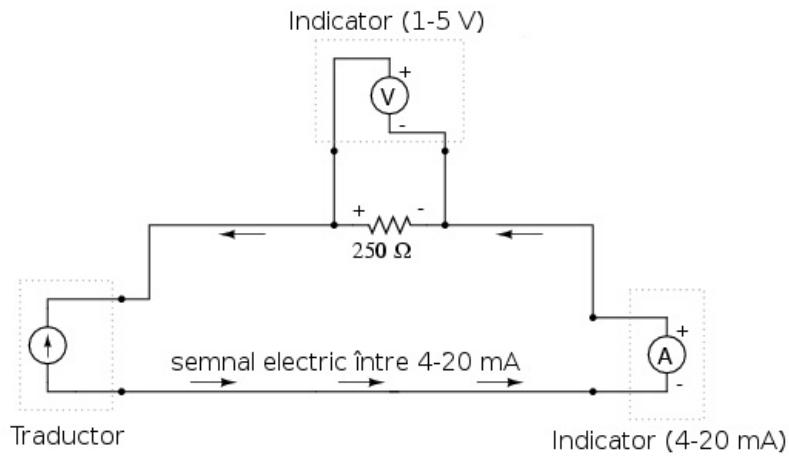


Figure 328: sistem de instrumentație cu sursă de curent

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

9.4 Tahogeneratorul

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 viteză 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*.

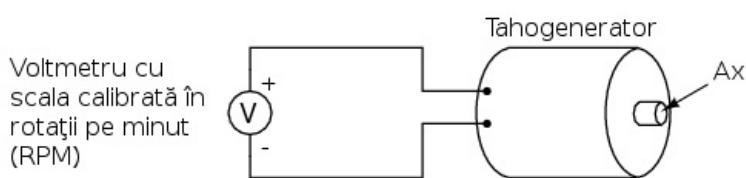


Figure 329: tachogenerator

Măsurând tensiunea produsă de un tachogenerator putem determina viteza de rotația a dispozitivului conectat la bornele acestuia. Tachogeneratoroarele pot fi folosite și pentru a indica direcție de rotație prin intermediul polarității („+” sau „-“) tensiunii de ieșire. În sisteme de măsură și control unde direcție de rotație este importantă, tachogeneratorul este o metodă ușoară de determinare a acestui lucru. Tehogeneratoroarele sunt frecvent utilizate pentru determinarea vitezei motoarelor electrice.

9.5 Termocupla

Un fenomen interesant utilizat în domeniul instrumentației este „efectul Seebeck” (notă: wikipedia), ce constă în producerea unei căderi de tensiune între două fire datorată 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 produc o cantitate de tensiune măsurabilă atunci când contactul lor este încălzit, unele combinații producând o cantitate mai mare decât altele:

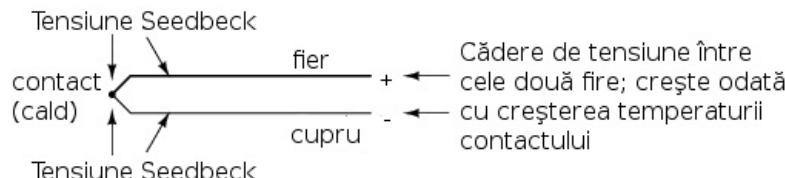


Figure 330: efectul Seebeck (termocupla)

Efectul Seebeck este destul de liniar, însemnând că tensiunea produsă de contactul încălzit dintre două fire este direct proporțională cu temperatura. Acest lucru înseamnă că putem determina temperatura contactului măsurând tensiunea produsă. Prin urmare, efectul Seebeck constituie o metodă electrică de determinare a temperaturii.

Când o combinație de materiale diferite sunt conectate împreună pentru a măsura temperatură, dispozitivul format poartă numele de *termocuplă*. Termocouplele folosite pentru instrumentație folosesc metale de o puritate superioare pentru a păstra relația temperatură/tensiune cât mai liniară și previzibilă cu putință.

Tensiunile Seebeck sunt destul de mici, de ordinul milivoltilor (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:

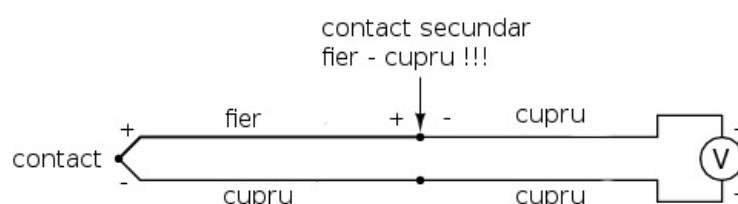


Figure 331: termocupla - contact secundar

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 termocouplelor ce nu folosesc cuprul pentru contact, combinația celor două contacte metalice adiționale (trei cu cea de măsură), combinăția celor două metale cu conductoarele de cupru ale aparatului de măsură formează un contact echivalent contactului de măsură:

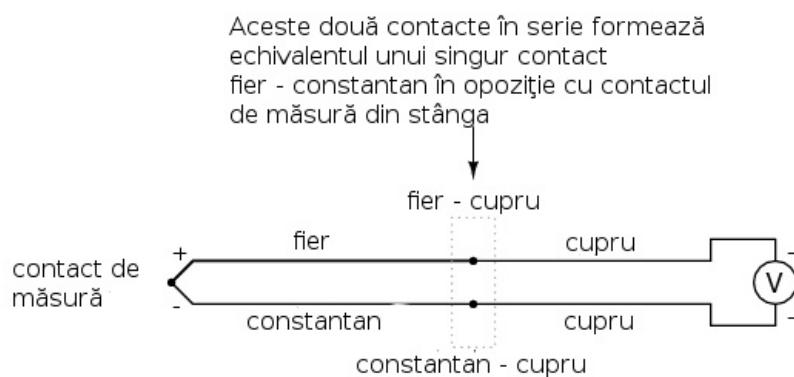


Figure 332: termocupla - contacte secundare

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.

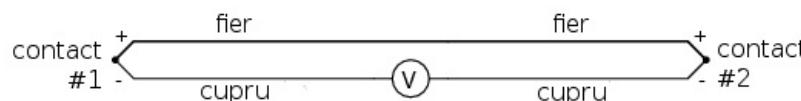


Figure 333: termocupla - măsurarea diferenței de temperatură dintre două puncte

Totuși, în mare 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 termocouplei.

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 contracara efectelor nedorite ale termocouplei, 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 temperatură 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 temperatură camerei, temperatura acestuia fiind măsurată de un dispozitiv ce nu ar putea niciodată supraviețui căldurii excesive sau mediului coroziv

existent într-un furnal.

Tensiunea produsă de contactul termocouplei este stric dependă de temperatură. Orice curent existent în circuitul termocouplei 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 cînd relația dintre temperatură și curent este variabilă, depinzând de rezistență totală din circuit. În cazul în care conductorii termocouplei sunt suficient de groși (rezistență mică), putem genera curenți de sute de amperi dintr-un singur contact! Pentru creșterea preciziei măsurătorilor, voltmetrul folosit într-un circuit cu termocuplă este construit cu o rezistență foarte mare pentru evitarea căderilor de tensiune de-a lungul firelor termocouplei. Problema căderilor de tensiune de-al lungul firelor este și mai gravă în acest caz față de semnalele de curent continuu discutate mai sus, pentru că în acest caz, contactul termocouplei produce o tensiune de doar câțiva milivolti. Nu ne putem permite să avem nici măcar o cădere de tensiune de un singur milivol pe conductori fără a induce erori serioase de măsurare a temperaturii.

În mod ideal, prin urmare, curentul printre-un circuit al termocouplei ar trebui să fie zero. Instrumentele moderne folosesc amplificatoare cu semiconductori pentru a permite semnalul de tensiune al termocouplei să acționeze asupra aparatului de măsură cu foarte puțin curent tras în circuit sau chiar deloc.

1. Termopila

Termocouplele pot fi confectionate 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 multe termocuple în serie, alternând temperaturile cald/rece cu fiecare contact, putem construi un dispozitiv numit *termopilă* cu scopul producerii unor cantități mari de tensiune și curent:

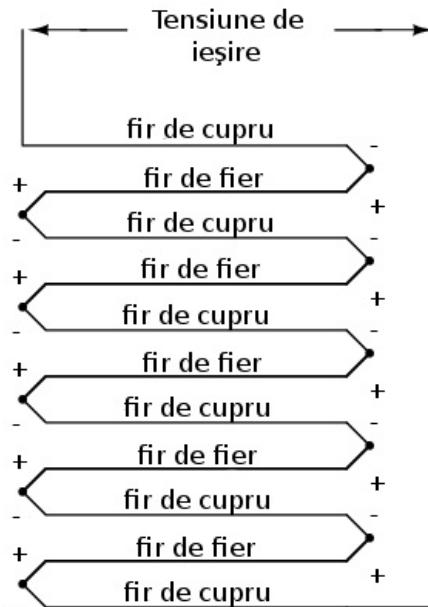


Figure 334: termopilă

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 tensiune 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). și mai interesant este faptul că, în timp ce electronii se deplasează printre-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 termo-electric, *efectul Peltier*, și anume, transfelul căldurii prin intermediul curentului electric.

O altă aplicație a termocouplelor este măsurarea temperaturii *medii* între mai multe locații. Cel mai ușor mod de realizare a acestei măsurători este prin conectarea câtorva termocouple în paralel, astfel încât se va face o medie a tuturor semnalelor de ordinul milivoltilor la punctul de contact dintre termocouple.

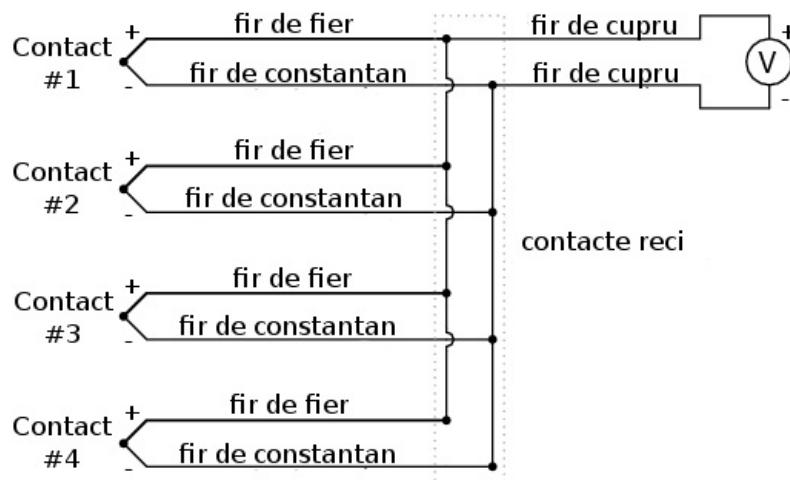


Figure 335: termopilă

Din păcate, media dintre aceste tensiuni Seebeck este precisă doar dacă rezistența firelor fiecărei termocuple este egală. Dacă termocupile sunt amplasate în locații diferite iar firele lor conectate în paralel se întâlnesc într-o singură locație, este puțin probabil ca lungimile acestora să fie egale. Termocupla cu cea mai mare lungime a firelor din punctul de măsură la conexiunea paralel va fi 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 cât mai apropiate ca valoare. Dacă nu este posibilă instalarea unor rezistori diferenți, specifici fiecărei ramuri (pentru ca toate rezistențele termocupelor 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 retelei

10.1 Ce înseamnă analiza unei rețele

General vorbind, *analiza rețelei* este o metodă matematică folosită pentru analiza unui circuit (o „rețea” de componente interconectate). În multe cazuri, tehnicienul sau inginerul, va întâlni circuite ce conține surse de putere multiple sau configurații ale componentelor ce nu se pot simplifica prin metodele serie/paralel. În aceste cazuri este necesară utilizarea altor mijloace. Acest capitol prezintă câteva tehnici folositoare pentru analiza unor astfel de circuite complexe.

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

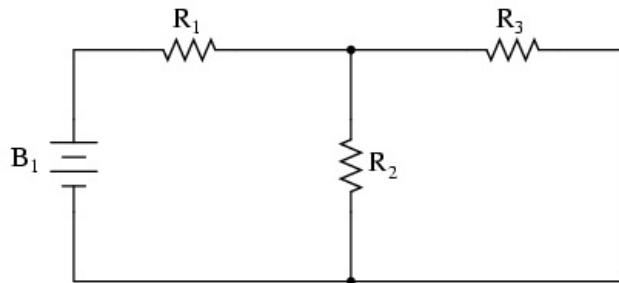


Figure 336: circuit electric serie-paralel

Pentru analiza circuitului de mai sus 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; cunoștând 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:

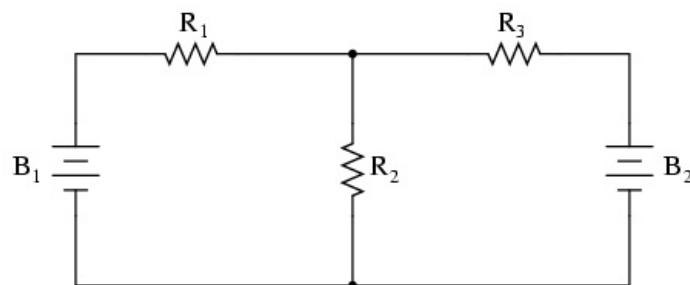


Figure 337: circuit electric

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 și este dificultatea problemei: în analiza circuitelor serie-paralel, primul pas era identificarea rezistorilor în serie sau 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?

Este evident faptul că reducerea acestui circuit relativ simplu, cu doar trei rezistori, este imposibil de realizat prin metoda analizei circuitelor serie-paralel: este ceva cu totul diferit. Totuși, acesta nu este singurul tip de circuit ce sfidează analiza serie-paralel.

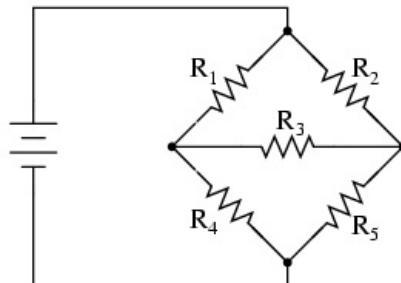


Figure 338: circuit electric - puncte

În acest caz avem un circuit în puncte; pentru simplificarea exemplului presupunem că **nu** este echilibrat (raportul R_1/R_4 nu este egal cu raportul R_2/R_5). Dacă punctea 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, iruzea 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 aceleasi 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 .

Deși s-ar putea să nu fie evident în acest moment, problema o reprezintă existența prea multor cantități necunoscute. Într-o combinație serie-paralel cel puțin, există 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) necunoscut 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 ce împarte în proporții necunoscute în cadrul punții, astfel că nu putem aplica legea lui Ohm pentru aflarea celorlalte valori din circuit.

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. Aceste metode poartă numele de *teoreme de analiză a rețelelor*.

10.2 Metoda ramurii de curent

Folosind aceasta metodă, presupunem și indicăm un sens al curentilor 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 curentilor și prin urmare a tuturor căderilor de tensiune din rețea. Să folosim următorul circuit pentru ilustrarea metodei:

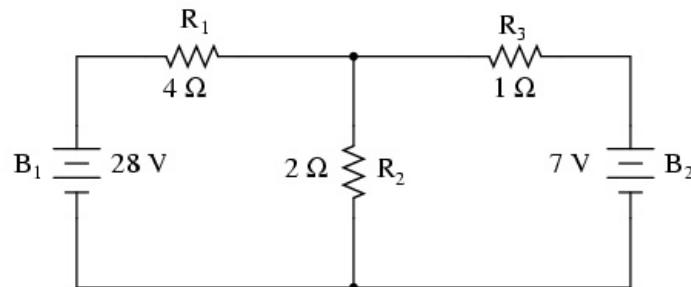


Figure 339: circuit electric

Primul pas este alegerea unui nod din circuit ca și punct de referință pentru curenții necunoscuți:

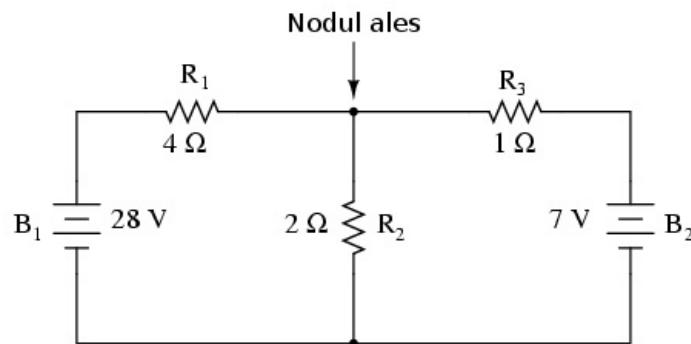


Figure 340: circuit electric

Ghicim apoi direcția curentilor din acest nod, notând curentii 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 curenti; orice direcție greșită va apărea în ecuații cu semnul minus.

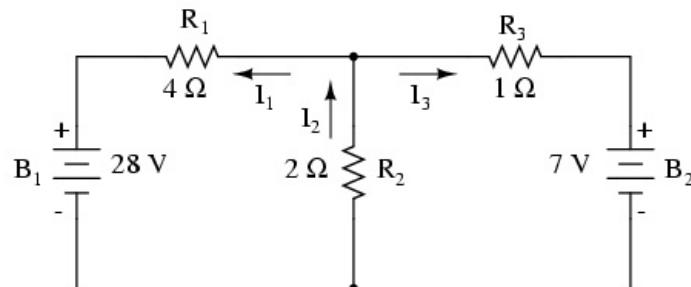


Figure 341: circuit electric

Legea lui Kirchhoff pentru curentii (LKC) spune că suma algebraică a tuturor curentilor ce intră și iers dintr-un nod de rețea trebuie să fie egală cu zero, prin urmare putem introduce curentii I_1 , I_2 și I_3 într-o singură ecuație. Vom nota toți curentii ce intră într-un nod cu semnul pozitiv și toți curentii ce ies dintr-un nod cu semnul negativ (acesta este doar o convenție; inversând semnele rezultatul final va fi exact același):

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

Figure 342: calcul matematic

Pasul următor este notarea tuturor semnelor căderilor de tensiune în funcție de sensul presupus al curentilor. Înțeță minte că partea din „amonte” a rezistorului va fi tot timpul negativă, iar partea din „aval” tot timpul pozitivă încrucișat electronii posedă o sarcină negativă.

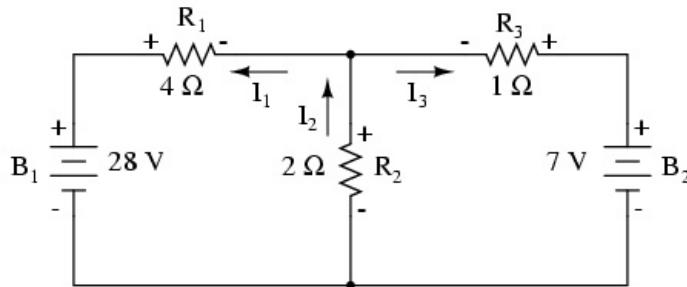


Figure 343: circuit electric

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 curentilor prin nodul ales.

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. Putem începe parcurgerea 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:

indicația voltmetrului: -28 V

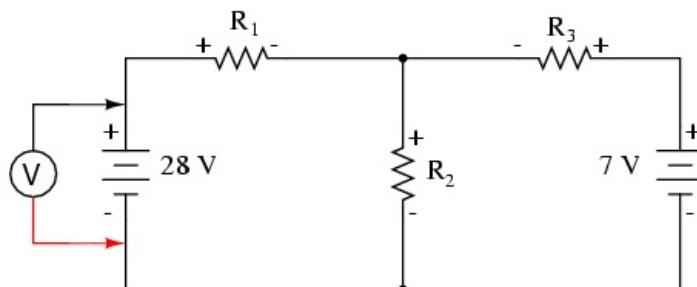


Figure 344: circuit electric

indicația voltmetrului: 0 V

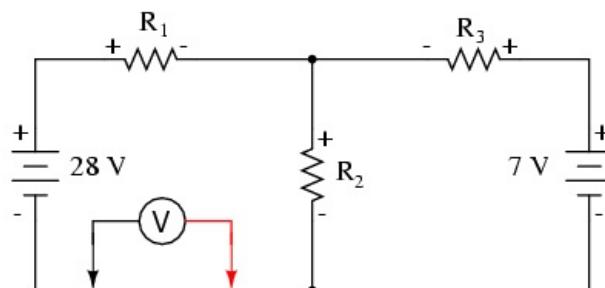


Figure 345: circuit electric

indicația voltmetrului: tensiune pozitivă

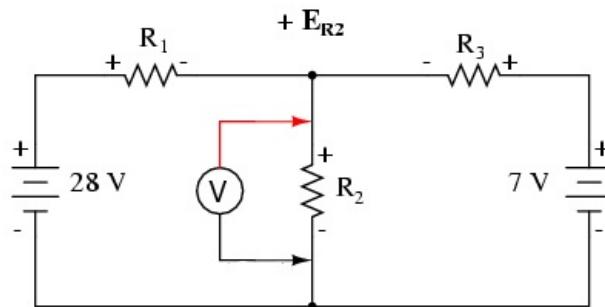


Figure 346: circuit electric

După ce am parcurs întreaga buclă din stânga, adunăm aceste valori ale tensiunii pentru a forma o ecuație:

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

Figure 347: calcul matematic

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:

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

$$E = IR$$

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

Figure 348: calcul matematic

Din moment ce cunoaștem valorile tuturor rezistorilor în ohmi, putem să înlocui acele valori în evuație pentru ușurința calculelor:

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

Figure 349: calcul matematic

Motivul pentru care am redus ecuația în acest fel (până la urmă, avem tot două necunoscute) este folosirea acelorași *variabile necunoscute* ce le-am folosit și în evuația LKC de mai sus (curenții). Aceast pas este necesar pentru aflarea soluției sistemului final de ecuații.

Aplicând aceeași pașă și pentru bucla din dreapta, obținem o altă ecuație.

Indicația voltmetrului: tensiune negativă

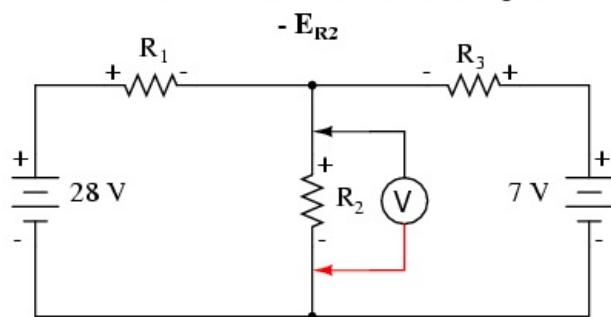


Figure 350: circuit electric

Indicația voltmetrului: 0 V

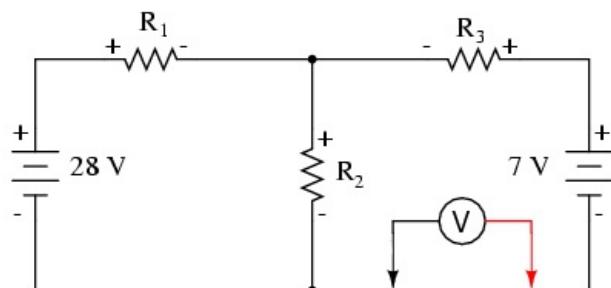


Figure 351: circuit electric

Indicația voltmetrului: +7 V

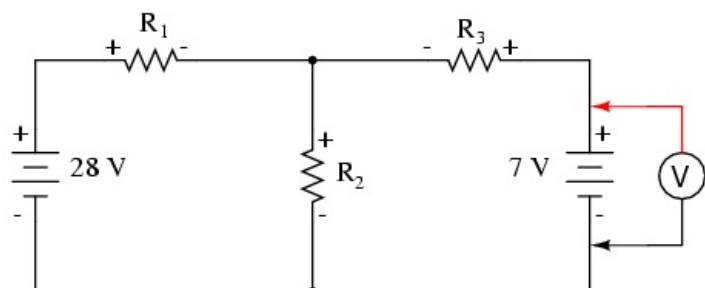
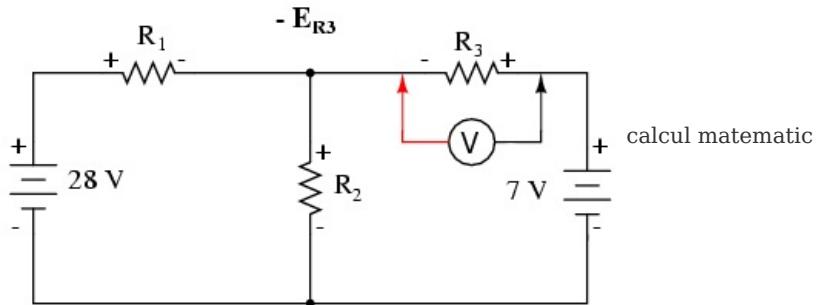


Figure 352: circuit electric

$$-E_{R2} + 0 + 7 - E_{R3} = 0$$

indicatia voltmetrului: tensiune negativă

Figure 353: circuit electric



Cunoscând faptul că tensiunea de pe fiecare rezistor poate și trebuie să fie exprimată ca și produsul dintre curent și rezistență fiecarui rezistor, putem scrie ecuația de mai sus astfel:

$$-2I_2 + 7 - I_3 = 0$$

Figure 354: calcul matematic

În acest moment avem un sistem matematic format din trei ecuații (o ecuație LKC și două ecuații LKT) și trei necunoscute:

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

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

$$-2I_2 + 7 - I_3 = 0$$

Figure 355: calcul matematic

Putem scrie 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:

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

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

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

Figure 356: calcul matematic

Rezolvând ecuațiile de mai sus, ajungem la soluția celor trei valori necunoscute ale curenților:

$$I_1 = 5 \text{ A}$$

$$I_2 = 4 \text{ A}$$

$$I_3 = -1 \text{ A}$$

Figure 357: calcul matematic

Prin urmare, valoarea curentului I_1 este de 5 amperi, I_2 4 amperi iar I_3 minus 1 amper. Dar ce înseamnă curent „negativ”? În acest caz, înseamnă că intuiția noastră cu privire la direcția curentului a fost inversă față de direcția reală. Revenind la circuitul initial, putem refașa schema acestuia schimbând direcția curentului I_3 schimbând în același timp și polaritatea căderii de tensiune de pe rezistorul R_3 .

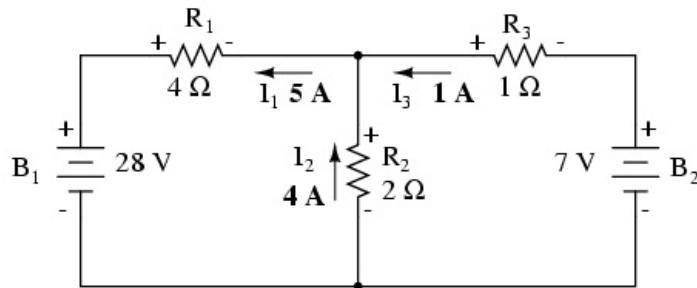


Figure 358: circuit electric

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 defapt forțați să se deplaseze în sens contrar datorită tensiunii superioare a bateriei B_1 . Înseamnă acest lucru faptul că întotdeauna bateria mai puternică va „câștiga” iar curentul prin bateria mai slabă va fi forțat tot timpul în sens contrar? Nu! Acest lucru depinde de fapt atât de diferențe 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.

Cunoscând acum valoarea tuturor curenților din circuit, putem calcula căderile de tensiune la bornele tuturor rezistorilor folosind legea lui Ohm ($E=IR$):

$$E_{R1} = I_1 R_1 = (5 \text{ A})(4 \Omega) = 20 \text{ V}$$

$$E_{R2} = I_2 R_2 = (4 \text{ A})(2 \Omega) = 8 \text{ V}$$

$$E_{R3} = I_3 R_3 = (1 \text{ A})(1 \Omega) = 1 \text{ V}$$

Figure 359: formulă

Pașii pentru aplicarea metodei ramurii de curent:

1. Alegearea unui nod și a direcțiilor curenților (aleator)
2. Scrierea ecuației legii lui Kirchhoff pentru curent în acel nod
3. Notarea polarităților căderilor de tensiune în funcție de direcția aleasă a curenților
4. 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
5. Aflarea curenților necunoscuți de pe fiecare ramură (rezolvarea sistemului de ecuații)
6. Dacă oricare dintre soluții este negativă, atunci direcția pe care am intuit-o la punctul 1 este greșită!
7. Calcularea căderilor de tensiune la bornele tuturor rezistorilor (E=IR)

10.3 Metoda buclei de curent

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.

1. Metoda convențională

Să vedem cum funcționează această metodă folosind același circuit:

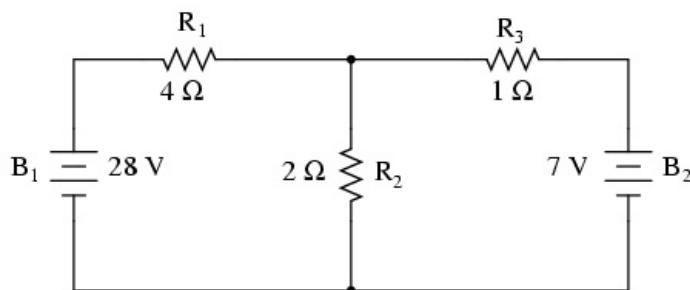


Figure 360: circuit electric

Primul pas în metoda buclei este identificarea „bucelor” din circuit asfel încât să cuprindem toate componente. În circuitul de mai sus, prima buclă va fi cea formată de B₁, R₁, și R₂, iar cea de a doua din B₃, R₂, and R₃. Partea cea mai ciudată a acestei metode este imaginarea circulației curenților prin fiecare dintre aceste bucle.

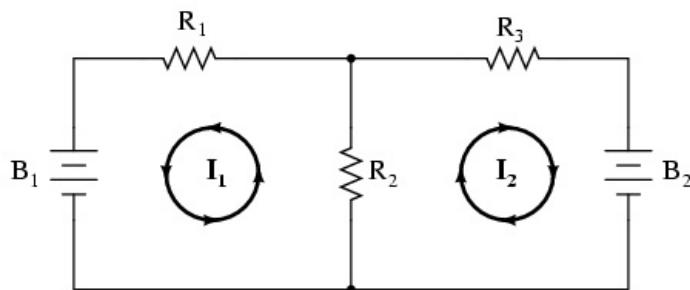


Figure 361: circuit electric

Alegerea direcției fiecărui curent este complet arbitrară precum în cazul metodei ramurii de curent, dar ecuațiile rezultante sunt mai ușor de rezolvat dacă avem aceeași direcție prin componentele aflate la intersecția celor două bucle formate (putem observa faptul că atât curentul I₁ cât și I₂ trec prin rezistorul R₂ de jos în sus în locul în care se intesectează). 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.

Următorul pas este notarea tuturor polarităților căderilor de tensiune la bornele rezistorilor în funcție de direcția curenților indicată de bucle. Tineți 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 cu polaritățile rezistorilor:

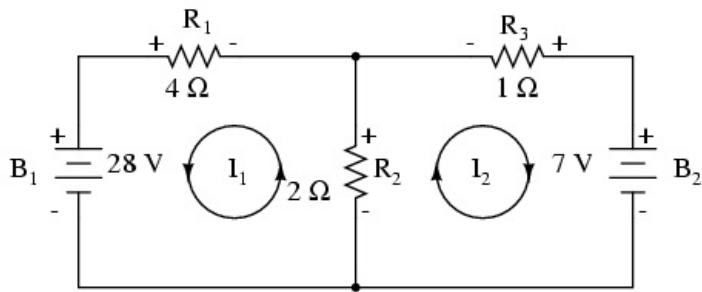


Figure 362: circuit electric

Utilizând legea lui Kirchhoff pentru tensiune, putem parurge fiecare dintre cele două bucle, generând ecuații în funcție de căderile de tensiune ale componentelor și de polaritate. La fel ca în cazul metodei ramurii de curent, vom desemna cădereea 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 (cauză rezistenței R_2), vom scrie acel termen al ecuației ca produsul dintre cădereea de tensiune pe acel component și suma celor doi curenți ai buclelor ($E_{R2}*(I_1 + I_2)$).

Începem cu bucla din stânga din colțul stânga sus și parcurgem întregul ochi de rețea în direcția inversă a celor de ceasornic (direcția este pur arbitrară), obținând următoarea ecuație:

$$-28 + 2(I_1 + I_2) + 4I_1 = 0$$

Figure 363: calcul matematic

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 faptul că ambii curenți trec prin R_2 în aceeași direcție. Simplificând ecuația obținem:

$$-28 + 6I_1 + 2I_2 = 0$$

Figure 364: calcul matematic

În acest moment avem o singură ecuație și/cu două necunoscute. Acest lucru înseamnă ca mai avem nevoie de încă o evație pentru a determina curenții buclelor. Această ecuație o obținem prin parcurgerea buclei din dreapta a circuitului, și obținem:

$$-2(I_1 + I_2) + 7 - 1I_2 = 0$$

Figure 365: calcul matematic

Simplificând ecuația cum am făcut și înainte, obținem:

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

Figure 366: calcul matematic

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

$$I_1 = 5 \text{ A}$$

$$I_2 = -1 \text{ A}$$

Figure 367: calcul matematic

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.

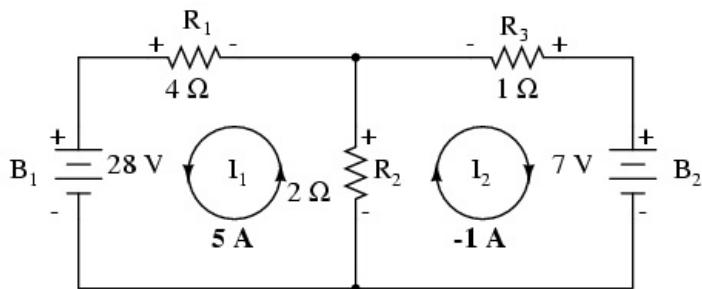


Figure 368: circuit electric

Rezultatul de minus 1 amper pentru curentul buclei I_2 înseamnă că direcția indicată inițial (aleator) este incorectă. În realitate, direcția curentului I_2 este contrară acesteia (observați modificarea sensului buclei pe desen!).

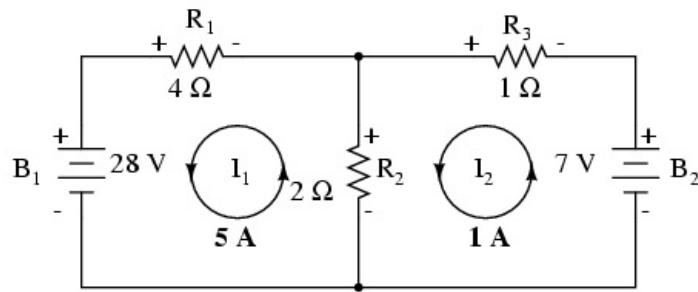


Figure 369: circuit electric

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 amperi, căderea de tensiune ($I \cdot R$) 20 de voltă. De asemenea, curentul prin R_3 este 1 amper, cu o cădere de tensiune de 1 volt. 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 amperi într-o direcție și I_2 1 amper în direcția opusă, curentul *real* prin R_2 este diferența celor doi, adică 4 amperi și trece prin R_2 de jos în sus:

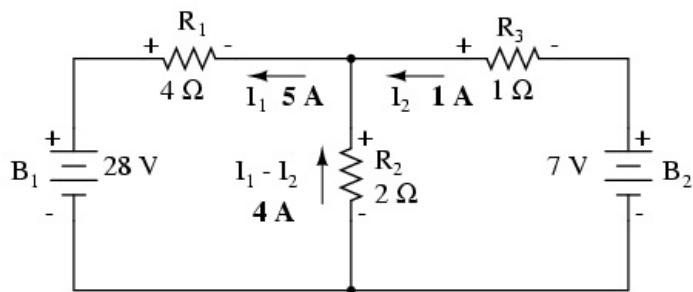


Figure 370: circuit electric

Cu un curent de 4 amperi prin R_2 rezultă o cădere de tensiune de 8 voltă.

2. Un alt exemplu

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:

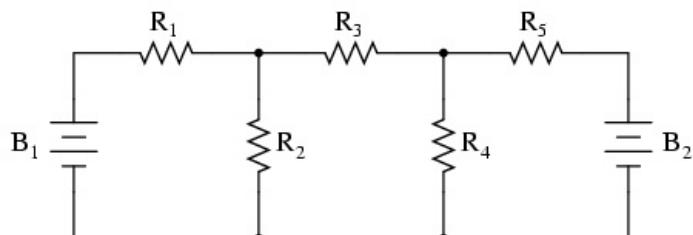


Figure 371: circuit electric

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:

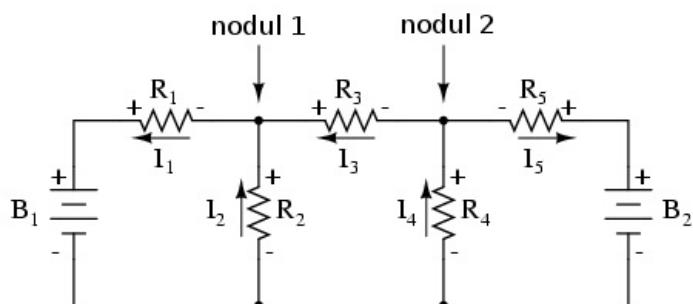


Figure 372: circuit electric

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

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

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

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

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

Figure 373: formule

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:

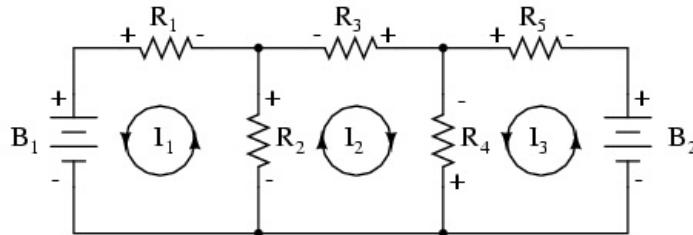


Figure 374: circuit electric

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

*Kirchhoff's Voltage Law
in left loop*

$$-R_2(I_2 + I_1) - R_4(I_2 + I_3) - I_2 R_3 = 0$$

*Kirchhoff's Voltage Law
in middle loop*

$$R_4(I_3 + I_2) + E_{B2} + I_3 R_5 = 0$$

*Kirchhoff's Voltage Law
in right loop*

Figure 375: formule

Pașii pentru aplicarea metodei ramurii de curent:

1. Trasarea buclelor de curent în circuit astfel încât să fie cuprinse toate componente
2. Noatarea polarității căderilor de tensiune de pe rezistori în funcție de direcțiile curenților de bucla aleși
3. 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 buclă se intersectează unul cu celălalt printr-un componență, curentul se exprimă ca și sumă algebraică 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 ($I_1 - I_2$)
4. Rezolvare sistemului de ecuații rezultat și aflarea curenților de buclă
5. Dacă oricare dintre soluții este negativă, înseamnă că direcția inițială presupusă pentru curent este greșită!
6. Adunarea algebraică a curenților de buclă pentru aflarea curenților prin componentele prin care trec mai mulți curenți de buclă
7. Aflarea căderilor de tensiune pe toți rezistorii ($E=IR$)

10.4 Metoda nodului de tensiune

Metoda nodului de tensiune pentru analiza circuitelor determină tensiunea nodurilor în funcție de ecuațiile legii lui Kirchhoff pentru curent. 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 ecivalente în siemens, $G = 1/R$. Unitatea de măsură pentru conductanță este siemens-ul, $S=\Omega^{-1}$

1. Exemplul 1

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.

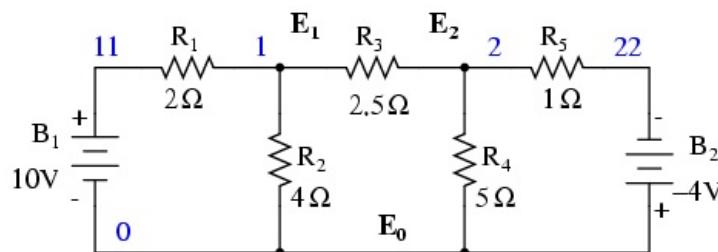


Figure 376: circuit electric

O sursă de tensiune în serie cu o rezistență trebuie să fie înlocuită de o sursă de curent echivalentă în paralel cu o rezistență. Vom scrie apoi ecuațiile LKC pentru fiecare nod. Partea dreaptă a ecuației reprezintă valoarea sursei de curent ce alimentează nodul respectiv. Circuitul modificat arată astfel:

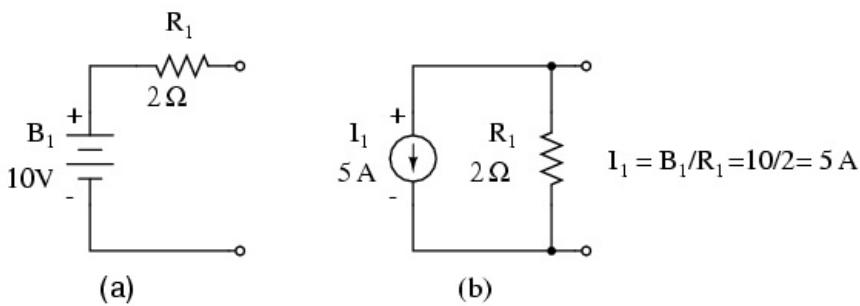


Figure 377: circuit electric

Înlocuim rezistența rezistorilor în ohmi cu conductanța acestora în siemens:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= E_1/R_1 = 10/2 = 5 \text{ A} \\
 I_2 &= E_2/R_5 = 4/1 = 4 \text{ A} \\
 \\
 G_1 &= 1/R_1 = 1/2 \Omega = 0.5 \text{ S} \\
 G_2 &= 1/R_2 = 1/4 \Omega = 0.25 \text{ S} \\
 G_3 &= 1/R_3 = 1/2.5 \Omega = 0.4 \text{ S} \\
 \\
 G_4 &= 1/R_4 = 1/5 \Omega = 0.2 \text{ S} \\
 G_5 &= 1/R_5 = 1/1 \Omega = 1.0 \text{ S}
 \end{aligned}$$

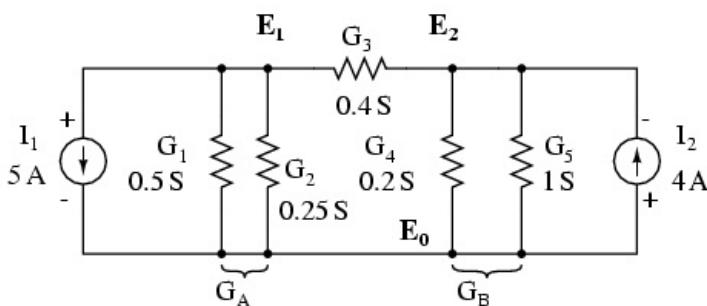


Figure 378: circuit electric

Conductanțele paralele (rezistorii) pot fi combinate prin adunarea conductanțelor. Deși nu vom redesena circuitul, putem deja aplica metoda nodului de tensiune:

$$\begin{aligned}GA &= G1 + G2 = 0.5 \text{ S} + 0.25 \text{ S} = 0.75 \text{ S} \\GB &= G4 + G5 = 0.2 \text{ S} + 1 \text{ S} = 1.2 \text{ S}\end{aligned}$$

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.

$$GAE1 + G3(E1 - E2) = I1 \quad (1)$$

$$G_{BE2} - G_3(E_1 - E_2) = T_2 \quad (2)$$

$$(GA + G3)E1 - G3E2 = I1 \quad (1)$$

$$-G_3 E_1 + (G_B + G_3) E_2 = I_2 \quad (2)$$

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

1. Înnlcuirea surselor de tensiune în serie cu un rezistor cu o sursă echivalentă de curent și un rezistor în paralel
 2. Schimbarea valorilor rezistorilor în conductanțe
 3. Selectarea unui nod de referință (E_0)
 4. Desemnarea unor tensiuni necunoscute pentru nodurile rămase, $(E_1)(E_2) \dots (E_N)$
 5. 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.
 6. Toți ceilalți coeficienți ai ecuației sunt negativi, reprezentând conductantele dintre noduri. În prima ecuație, coeficientul

al doile reprezintă conductanța dintre nodul 1 și nodul 2, al treilea coeficient reprezintă conductanța dintre nodul 1 și nodul 3. Același lucru este valabil și pentru celelalte ecuații

7. Partea din dreapta a ecuațiilor reprezintă sursa de curent conectată la nodurile respective
8. Rezolvarea sistemului de ecuații și aflarea tensiunilor nodurilor necunoscute

Pentru figura de mai sus, ecuațiile arată astfel:

$$(0.5+0.25+0.4)E_1 - (0.4)E_2 = 5$$

$$-(0.4)E_1 + (0.4+0.2+1.0)E_2 = -4$$

$$(1.15)E_1 - (0.4)E_2 = 5$$

$$-(0.4)E_1 + (1.6)E_2 = -4$$

$$E_1 = 3.8095$$

$$E_2 = -1.5476$$

2. Exemplul 2

Circuitul de mai jos are trei noduri. Conductanțele nu apar pe desen, dar $G_1=1/R_1$, etc.

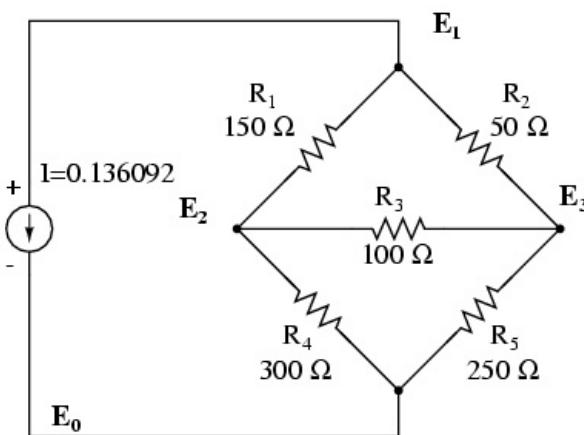


Figure 379: circuit electric

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.

$(G_1 + G_2)E_1$	$-G_1E_2$	$-G_2E_3$	$= 0.136092$
$-G_1E_1$	$+(G_1 + G_3 + G_4)E_2$	$-G_3E_3$	$= 0$
$-G_2E_1$	$-G_3E_2$	$+(G_2 + G_3 + G_5)E_3$	$= 0$

Se poate observa că diagonala matricii formate are coeficienți pozitivi. Toți ceilalți coeficienți sunt negativi.
Soluția este $E_1 = 24.000$ V, $E_2 = 17.655$ V, $E_3 = 19.310$ V.

10.5 Teorema lui Millman

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.

1. Exemplu

Avem (din nou) circuitul de mai jos:

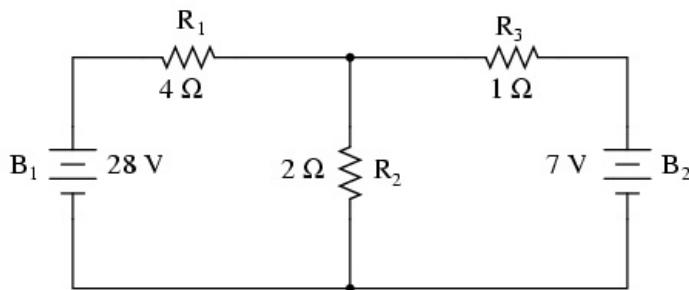


Figure 380: circuit electric

Același circuit redesenat pentru aplicarea teoremei lui Millman:

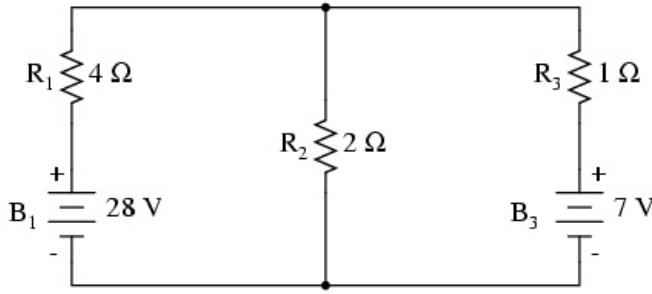


Figure 381: circuit electric

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 baterie B_2 , notația B_3 pentru baterie din dreapta este pentru a scoate în evidență faptul că aceasta aparține ramurii 3 din circuit!

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:

$$\frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \begin{array}{l} \text{Căderea de tensiune} \\ \text{pe toate ramurile} \end{array}$$

Figure 382: teorema lui Millman

Înlocuind valorile din exemplul de mai sus ajungem la următorul rezultat:

$$\frac{\frac{28\text{ V}}{4\Omega} + \frac{0\text{ V}}{2\Omega} + \frac{7\text{ V}}{1\Omega}}{\frac{1}{4\Omega} + \frac{1}{2\Omega} + \frac{1}{1\Omega}} = 8\text{ V}$$

Figure 383: formulă

Valoarea rezultatului, 8 V, reprezintă căderea de tensiune pe toate ramurile:

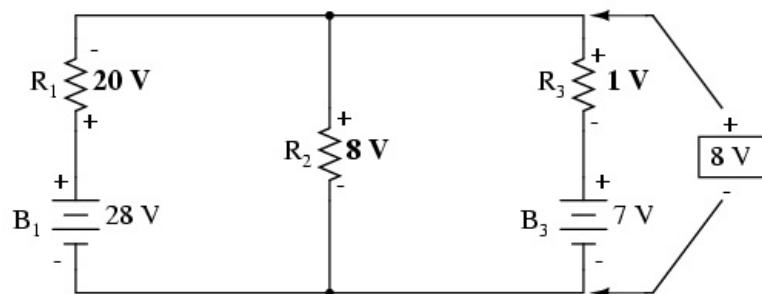


Figure 384: circuit electric

Polaritățile tuturor tensiunilor au ca și referință 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).

Pentru aflarea căderilor de tensiune pe fiecare rezistor, tensiunea Millman (8 V în acest caz) trebuie compoarătă cu tensiunea fiecărei surse din fiecare ramură, folosind principiul aditivității tensiunilor în serie:

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

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

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

Figure 385: formulă

Pentru aflarea curenților prin fiecare ramură, aplicăm legea lui Ohm ($I = E/R$):

$$I_{R1} = \frac{20 \text{ V}}{4 \Omega} = 5 \text{ A}$$

$$I_{R2} = \frac{8 \text{ V}}{2 \Omega} = 4 \text{ A}$$

$$I_{R3} = \frac{1 \text{ V}}{1 \Omega} = 1 \text{ A}$$

Figure 386: formulă

Direcția curentului prin fiecare rezistor este determinată de polaritatea fiecărui rezistor și **nu** de polaritatea bateriei, curentul putând fi forțat să deplaseze invers printr-o baterie, precum în cazul bateriei B_3 . 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, determinind de acolo direcție de curgere a curentului.

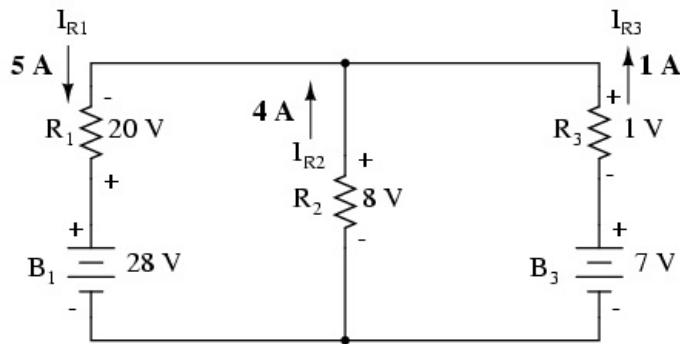


Figure 387: circuit electric

10.6 Teorema superpoziției

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 rețea 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.

1. Exemplu

Să luăm același circuit ca și exemplu:

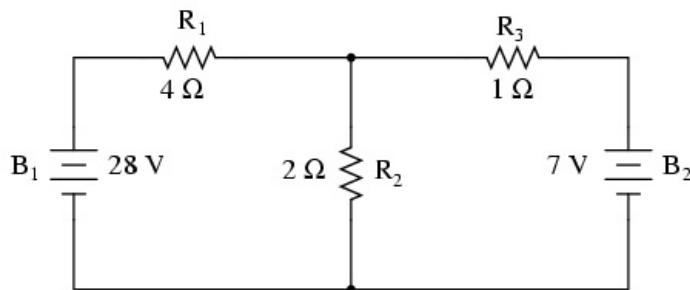


Figure 388: circuit electric

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 volți...

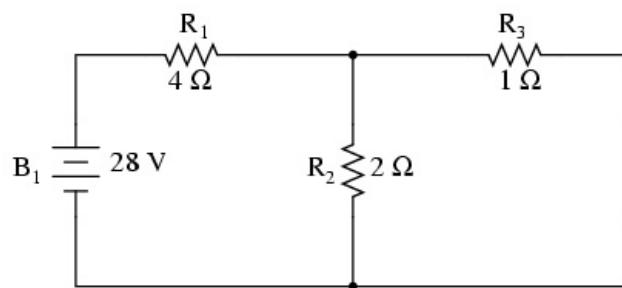


Figure 389: circuit electric

...celălalt pentru circuitul funcționând doar cu bateria de 7 volți:

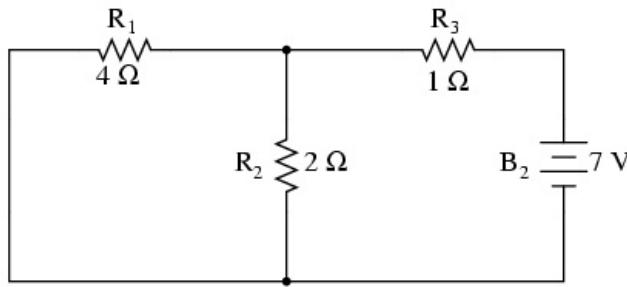


Figure 390: circuit electric

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 înlocuită 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.

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

	R_1	R_2	R_3	$R_2//R_3$	$R_1 + R_2//R_3$	Total
E	24	4	4	4	28	Volți
I	6	2	4	6	6	Amperi
R	4	2	1	0.667	4.667	Ohmi

Figure 391: tabel

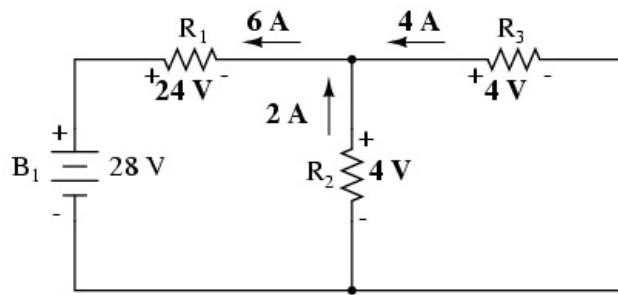


Figure 392: circuit electric

Analizând circuitul în care acționează doar bateria de 7 de volți, obținem următoarele valori pentru tensiune și curent:

	R_1	R_2	R_3	$R_1//R_2$	$R_3 + R_1//R_2$	Total
E	4	4	3	4	7	Volți
I	1	2	3	3	3	Amperi
R	4	2	1	1.333	2.333	Ohmi

Figure 393: tabel

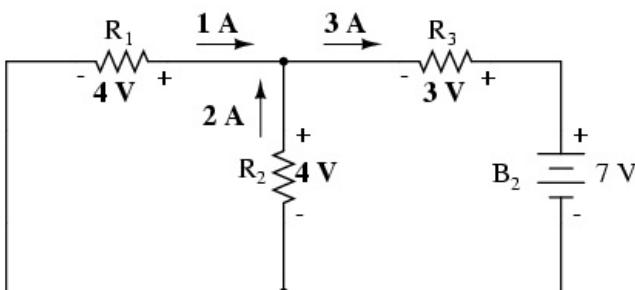


Figure 394: circuit electric

Atunci când realizăm suprapunerea, trebuie să fim foarte atenți la polaritatea căderilor și la direcția curenților, pentru că aceste valori se adună *algebric*:

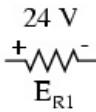
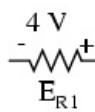
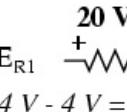
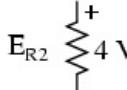
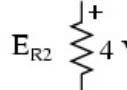
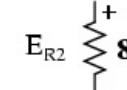
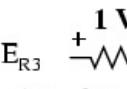
Cu bateria de 28 V	Cu bateria de 7 V	Cu ambele baterii
		 $24\text{ V} - 4\text{ V} = 20\text{ V}$
		 $4\text{ V} + 4\text{ V} = 8\text{ V}$
		 $4\text{ V} - 3\text{ V} = 1\text{ V}$

Figure 395: tabel

Aplicând aceste valori, rezultatul final arată astfel:

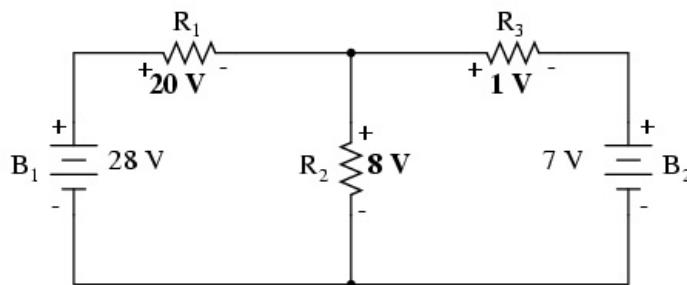


Figure 396: circuit electric

Același lucru este valabil și în cazul curenților.

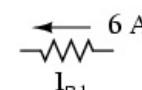
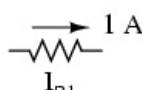
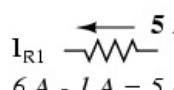
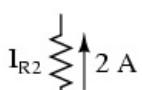
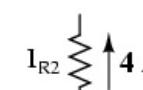
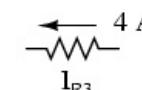
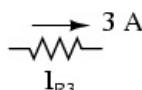
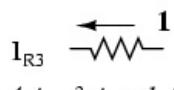
Cu bateria de 28 V	Cu bateria de 7 V	Cu ambele baterii
		 $6\text{ A} - 1\text{ A} = 5\text{ A}$
		 $2\text{ A} + 2\text{ A} = 4\text{ A}$
		 $4\text{ A} - 3\text{ A} = 1\text{ A}$

Figure 397: tabel

Folosind valorile aflate după aplicarea superpoziției, circuitul arată astfel:

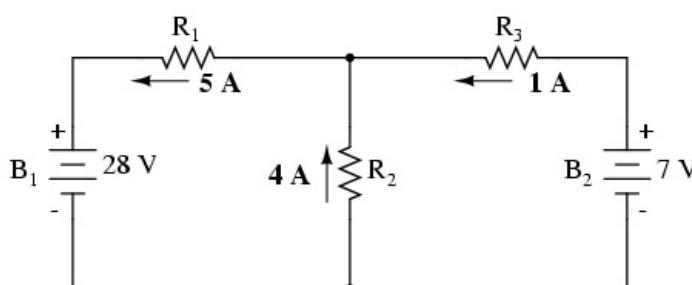


Figure 398: circuit electric

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 (tensiune sau curent) în parte, și doar atunci când ecuațiile folosite sunt liniare. Acest lucru înseamnă ca teorema nu poate fi folosită decât pentru determinare tensiunii 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 varistore.

O altă condiție este ca toate componentele să fie „bilaterale”, însemnând faptul că trebuie să se comporte exact le fel indiferent care este direcția de deplasare a electronilor prin ele. Rezistențele îndeplinește această cerință, precum și toate circuitele studiate până acum.

Teorema superpoziției se folosește și în studiul circuitelor de curent alternativ (CA) și circuitelor cu amplificatoare semiconductoare, acolo unde de multe ori curentul alternativ este mixat (suprapus) pe 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 superpoziție nu mai suntem nevoiți să folosim sistemele de ecuații pentru analiza circuitelor.

10.7 Teorema lui Thevenin

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 teoriei 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 *NELINIARE*

Teorema lui Thevenin este folosită în special pentru analiza sistemelor de putere și alte circuite în care un rezistor din circuit (rezistorul de „sarcină”) este supus modificărilor; recalcularea circuitului este necesară cu fiecare valoare a rezistenței de sarcină pentru determinarea tensiuni și curentului prin el.

1. Exemplu

Să reluăm circuitul studiat până acum cu celelalte metode:

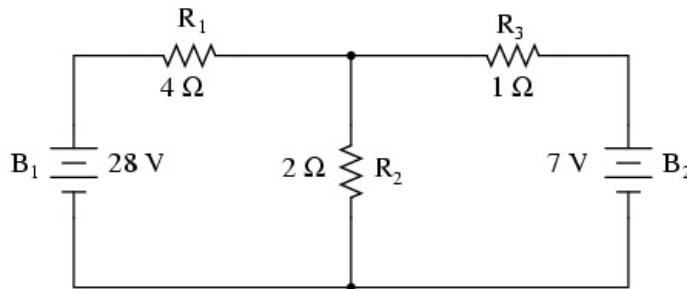


Figure 399: circuit electric

Să presupunem că rezistorul R₂ este sarcina din acest circuit. Avem deja la dispoziție patru metode pentru determinarea tensiunii și curentului prin R₂, dar niciuna dintre aceste metode nu este eficientă din punct de vedere al timpului de lucru. Imagineați-vă că ati folosi aceste metode de fiecare dată când valoarea sarcinii (rezistenței de sarcină) se schimbă (modificarea rezistenței sarcinii este un lucru foarte des întâlnit în sistemele de putere). Această situație ar presupune multă muncă!

Teorema lui Thevenin înălătură 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 re-conectată în acest „circuit Thevenin echivalent” și se pot continua calculele pentru întreaga rețea ca și cum nu ar fi decât un simplu circuit serie:

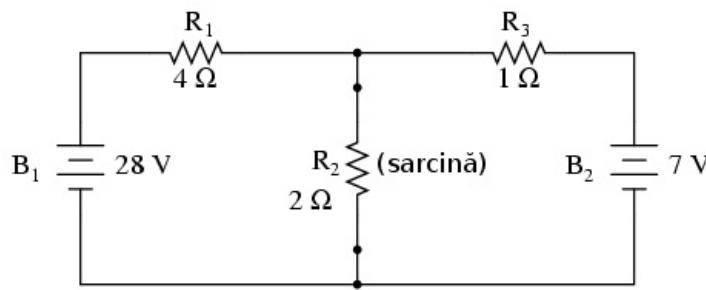


Figure 400: circuit electric

După conversia circuitului vom avea:

Circuit Thevenin echivalent

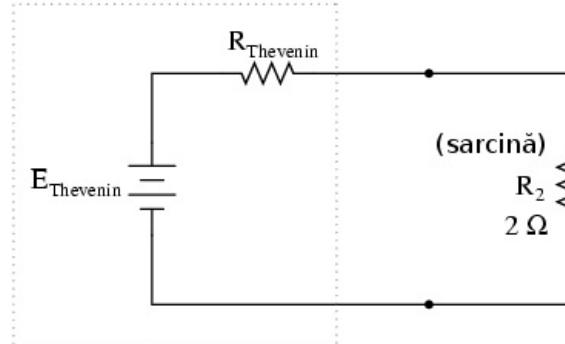


Figure 401: circuit electric

„Circuitul Thevenin echivalent” este echivalentul electric ale 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 diferență dintre rețeaua originală și circuitul echivalent, atât timp cât E_{Thevenin} și R_{Thevenin} au fost calculate corect.

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

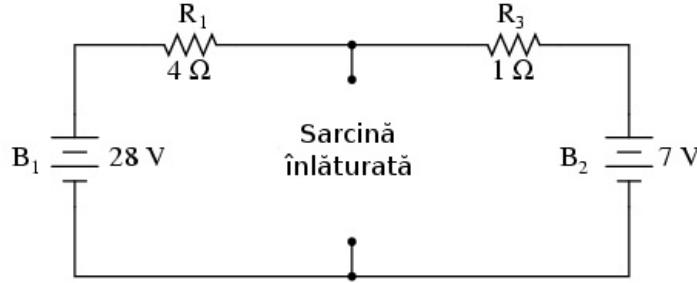


Figure 402: circuit electric

Apoi determinăm căderea de tensiune între punctele „foste” sarcini, folind 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:

	R_1	R_3	Total	
E	16.8	4.2	21	Volți
I	4.2	4.2	4.2	Amperi
R	4	1	5	Ohmi

Figure 403: tabel

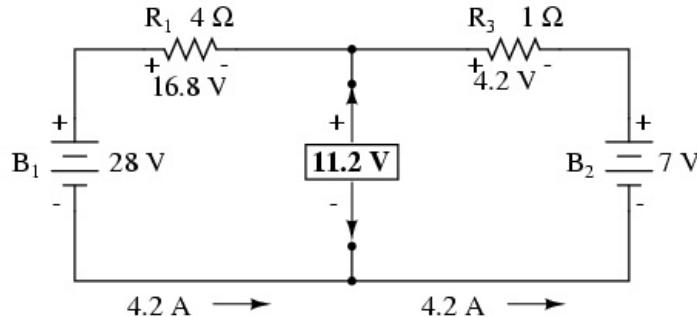


Figure 404: circuit electric

Căderea de tensiune între cele două puncte ale sarcinii poate fi dedusă din tensiunea bateriei și căderea de tensiune pe una dintre baterii, fiind de 11.2 volți. Aceasta este tensiunea Thevenin, E_{Thevenin} din circuitul echivalent:

Circuit Thevenin echivalent

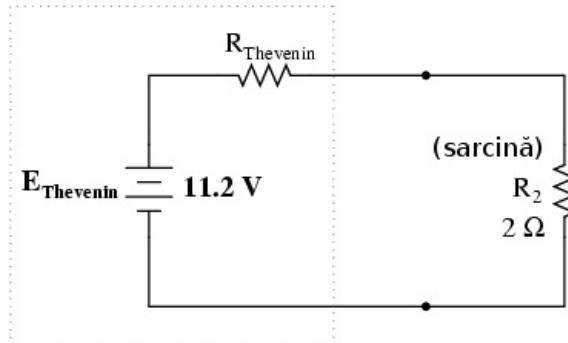


Figure 405: circuit electric

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:

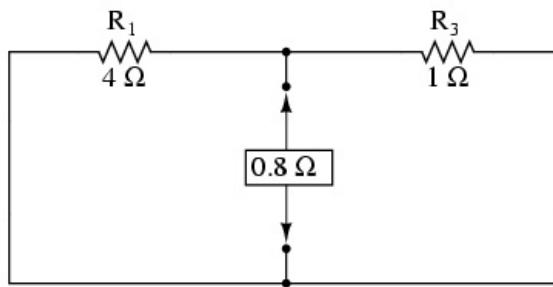


Figure 406: circuit electric

După înlăturarea celor două baterii, rezistența totală măsurată în această locație este egală cu rezistențele R_1 și R_3 în paralel: 0.8Ω . Aceasta reprezintă rezistența Thevenin (R_{Thevenin}) pentru circuitul echivalent:

Circuit Thevenin echivalent

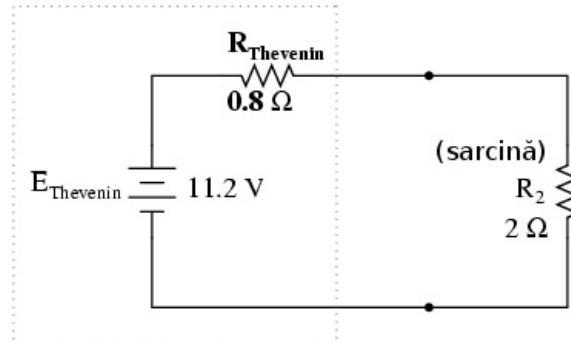


Figure 407: circuit electric

Cunoscând valoarea rezistorului (2Ω) 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:

	R_{Thevenin}	R_{Load}	Total	
E	3.2	8	11.2	Volți
I	4	4	4	Amperi
R	0.8	2	2.8	Ohmi

Figure 408: tabel

Putem observa că valorile pentru curent și tensiune (4 amperi, 8 volți) sunt identice cu valorile găsite aplicând celelalte metode de analiză. De asemenea, valorile tensiunilor și curenților pentru rezistență serie și sursa Thevenin echivalente nu se aplică componentelor din circuitul original. Teorem lui Thevenin este folosită doar pentru determinarea comportamentului unui singur rezistor din rețea: sarcina.

Pașii pentru aplicarea teoremei lui Thevenin:

- Găsirea sursei de tensiune Thevenin prin îndepărțarea sarcinii din circuitul original și calcularea căderii de tensiune dintre punctele în care se află sarcina inițială
- Găsirea rezistenței Thevenin prin îndepărțarea 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 re-introduce între cele două puncte (deschise) din circuit
- Aflarea căderii de tensiune și a curentului prin rezistorul de sarcină folosind regulile circuitelor serie

10.8 Teorema lui Norton

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, și arată astfel:

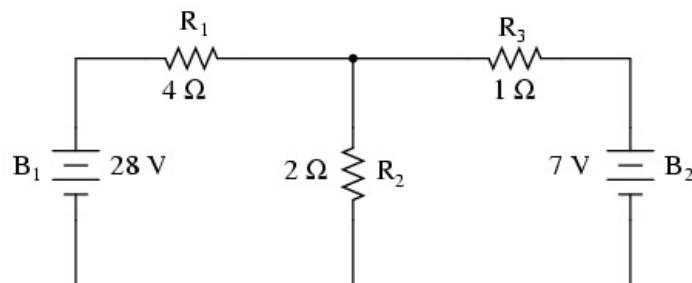


Figure 409: circuit electric

Circuitul echivalent după aplicarea teoremei lui Norton va fi următorul:

Circuit Norton echivalent

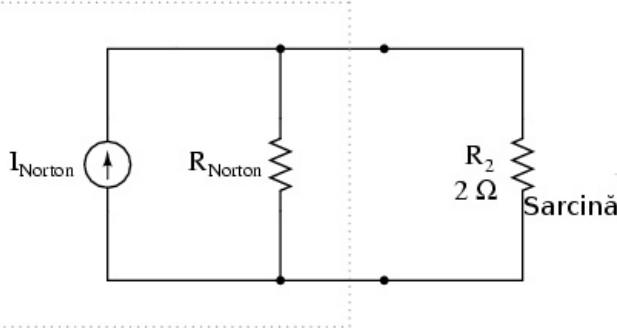


Figure 410: circuit Norton echivalent

Sursa de curent este un componentă 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. Pași folosiți pentru calcularea sursei de curent, I_{Norton} , și a rezistenței Norton, R_{Norton} , sunt de asemenea similari teoremei precedente.

Primul pas este identificarea rezistenței de sarcină și înălțurarea acesteia din circuitul original:



Figure 411: circuit electric

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 sarcină cu un circuit deschis:

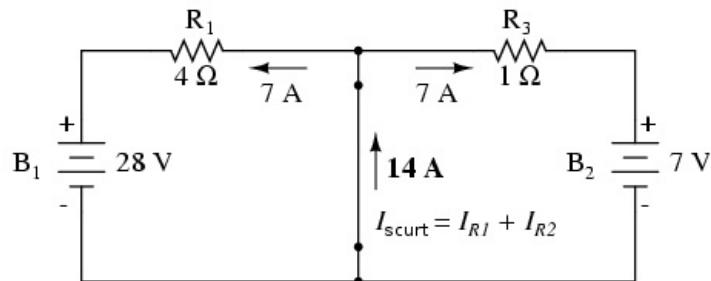


Figure 412: circuit electric

Acum avem o cădere de 0 volți între punctele de conexiune a sarcinii (înălțurate), ceea ce înseamă că valoarea curentului prin R_1 depinde doar de tensiunea bateriei B_1 și de valoarea rezistorului R_1 : 7 amperi ($I = E/R$). Același lucru este valabil și în partea dreapta a circuitului, unde curentul este tot 7 amperi. Prin urmare, curentul total prin scurt circuitul sarcinii este de 14 amperi și reprezintă curentul sursei Norton (I_{Norton}).

Circuit Norton echivalent

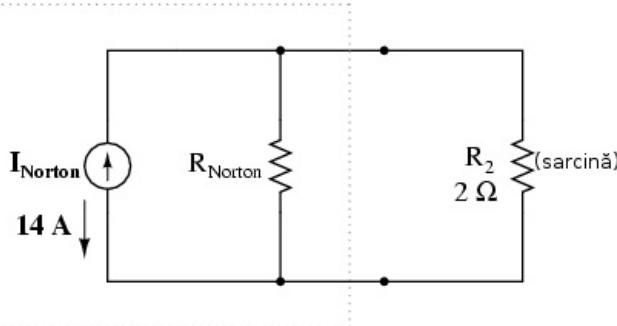


Figure 413: circuit electric

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

Pentru calcularea rezistenței Norton, procedăm precum în cazul teoremei lui Thevenin: luăm circuitul original, fără rezistență de sarcină, îndepărțăm 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):

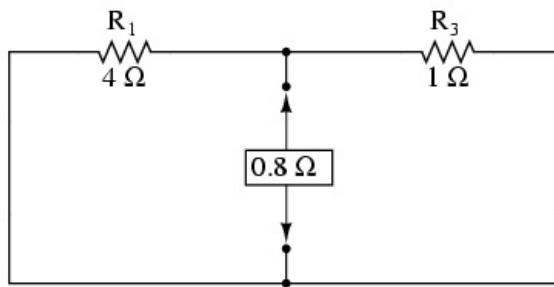


Figure 414: circuit electric

În acest moment circuitul Norton echivalent arată astfel:

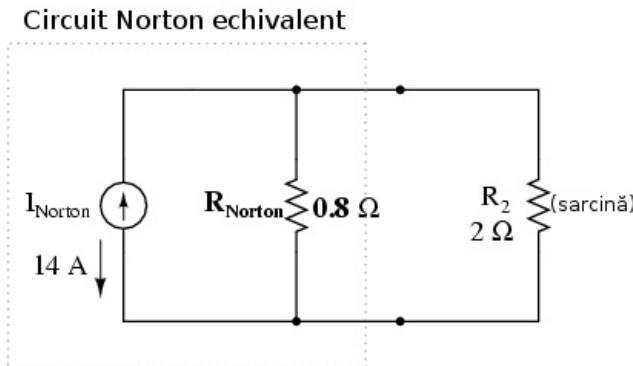


Figure 415: circuit electric

Reconectând rezistența de sarcină inițială (2Ω), vom analiza circuitul Norton precum o conexiune paralelă simplă:

	R_{Norton}	R_{Load}	Total	
E	8	8	8	Volti
I	10	4	14	Amperi
R	0.8	2	571.43m	Ohmi

Figure 416: tabel

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 ; celealte informații cu privire la circuit sunt irelevant. Avantajul constă în simplitatea analizei circuitului atunci când avem mai multe valori ale rezistenței de sarcină pentru care vrem să aflăm tensiunea și curentul.

Pașii pentru implementarea teoremei lui Norton:

1. Găsirea sursei Norton de curent prin îndepărțarea tuturor rezistorilor din circuitul inițial și calcularea curentului prin scurt circuitul creat între punctele de contact ale fostei sarcini a circuitului (scurt circuit)
2. Aflarea rezistenței Norton prin îndepărțarea tuturor surselor de putere din circuit și calcularea rezistenței totale dintre punctele de contact ale fostei sarcini a circuitului (circuit deschis)
3. 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
4. Aflarea tensiunii și curentului prin sarcină aplicând regulile circuitelor paralele

10.9 Echivalența teoremelor Thevenin-Norton

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-un Norton echivalent.

Metoda de calculare a rezistenței este aceeași în ambele cazuri: îndepărțarea tuturor surselor de putere și determinarea rezistenței între punctele de conexiune rămase libere. Cele două rezistențe sunt prin urmare egale:

Circuit Thevenin echivalent

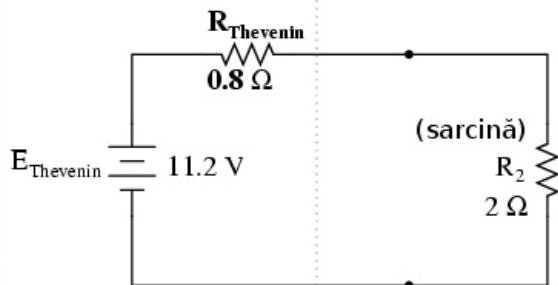


Figure 417: circuit electric

Circuit Norton echivalent

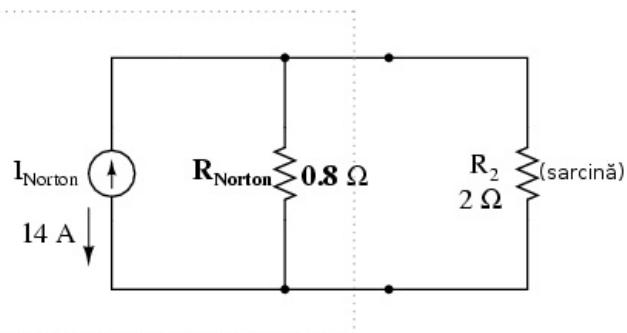


Figure 418: circuit electric

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 volți în acest caz. În cazul circuitului Norton, toți cei 14 amperi generați de sursa de curent trebuie să treacă prin rezistența de 0.8 ohmi, producând prin urmare o cădere de tensiune de 11.2 volți ($E=IR$). Putem susține astfel că tensiunea Thevenin este egală cu, curentul Norton îmulsit cu rezistența Norton:

$$E_{\text{Thevenin}} = I_{\text{Norton}} R_{\text{Norton}}$$

Figure 419: formulă

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 amperi în acest caz. În circuitul Thevenin, întreaga cădere de tensiune de 11.2 volți se regăsește la bornele rezistorului de 0.8 ohmi, ceea ce produce exact același curent prin scurt (circuit), 14 amperi ($I=E/R$). Putem susține astfel că, curentul Norton este egal cu tensiune Thevenin împărțită la rezistența Thevenin:

$$I_{\text{Norton}} = \frac{E_{\text{Thevenin}}}{R_{\text{Thevenin}}}$$

Figure 420: formulă

Vom utiliza relația de echivalență dintre cele două teoreme în următoarea secțiune.

10.10 Teorema lui Millman revizuită

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

$$\frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \begin{array}{l} \text{Căderea de tensiune} \\ \text{pe toate ramurile} \end{array}$$

Figure 421: formulă

Numitorul ecuației seamănă cu numitorul ecuației pentru calculul rezistenței paralele, iar termenii E/R ai numărătorului reprezintă valori ale curentului ($I=E/R$).

Pentru înțelegerea acestei ecuații folosim echivalența Thevenin-Norton discutată în secțiunea precedentă. Ecuația Millman consideră că fiecare ramură reprezintă defapt un circuit Thevenin echivalent; fiecare ramură este apoi transformată într-un circuit Norton echivalent.

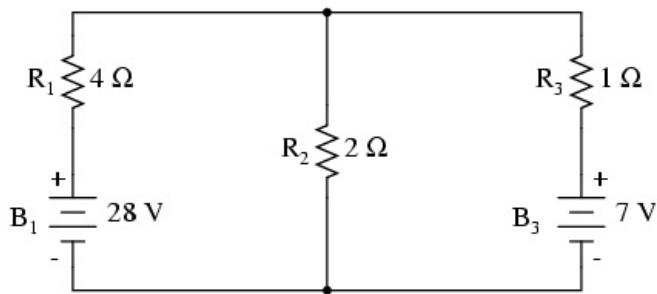


Figure 422: circuit electric

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 4Ω . Ramura din dreapta se transformă într-o sursă de curent de 7 A ($7 \text{ V} / 1 \Omega$) și un rezistor de 1Ω conectat în paralel. Ramura din centru, neconținând nicio sursă de tensiune, se transformă într-o sursă de curent Norton de 0 A în paralel cu un rezistor de 2Ω :

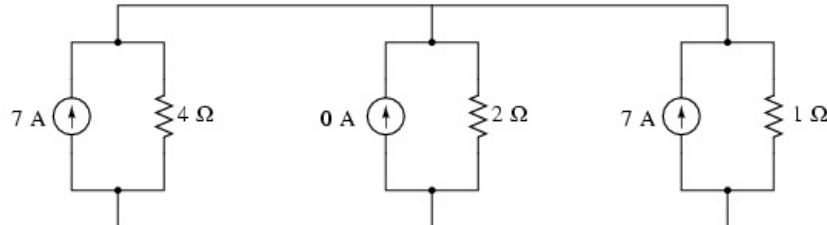


Figure 423: circuit electric

Din moment ce valorile sursele de curent sunt aditive algebric, curentul total prin circuit este de $7 + 0 + 7$, adică 14 A . Această adunare a curentelor surselor Norton este reprezentată la numărătorul ecuației Millman:

Ecuația teoremei lui Millman

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

Figure 424: ecuația teoremei lui Millman

Toate rezistențele Norton sunt conectate în paralel. Aceast lucru este reprezentat în numitorul ecuației lui Millman:

Ecuația teoremei lui Millman

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

Figure 425: ecuația teoremei lui Millman

În cazul de față, rezistența totală este de 517.43 miliohmi ($517.43 \text{ m}\Omega$). Circuitul echivalent se poate acum redesa și conține doar o sursă (de curent) Norton și o singură rezistență Norton:

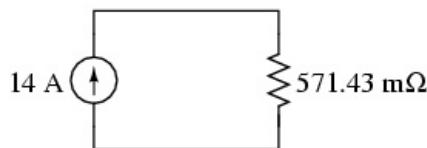


Figure 426: circuit electric

Folosim legea lui Ohm pentru aflarea căderii de tensiune pe aceste două componente ($E=IR$):

$$E_{\text{total}} = (14 \text{ A})(517.43 \text{ m}\Omega)$$

$$E_{\text{total}} = 8 \text{ V}$$

Figure 427: formulă

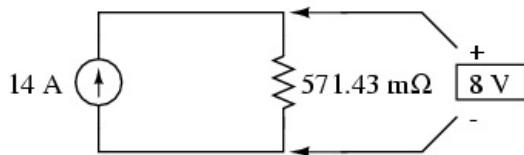


Figure 428: circuit electric

Pe scurt, știm despre acest circuit că valoarea totală a curentului este dată de suma tuturor tensiunilor pe ramuri împărțite la curenți lor respectivi. Știm de asemenea că rezistență 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:

$$\text{Legea lui Ohm } I \times R = E$$

$$(\text{curentul total}) \times (\text{rezistența totală}) = (\text{tensiunea totală})$$

$$\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3} \times \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = (\text{tensiunea totală})$$

... sau ...

$$\frac{\frac{E_{B1}}{R_1} + \frac{E_{B2}}{R_2} + \frac{E_{B3}}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = (\text{tensiunea totală})$$

Figure 429: formula

În acest moment putem realiza faptul că ecuația lui Millman nu este nimic altceva decât o transformare Thevenin-Norton împreună cu formula rezistenței paralele pentru determinarea căderii de tensiune pe toate ramurile circuitului.

10.11 Teorema transferului maxim de putere

Teorema transferului maxim de putere nu este neapărat o metodă de analiza a rețelelor ci este folosită pentru optimizarea design-ului 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, unei dorim ca „impedanță” difuzorului să fie aceeași cu „impedanță” 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 impedanței 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.

Revenind la circuitul studiat până acum...

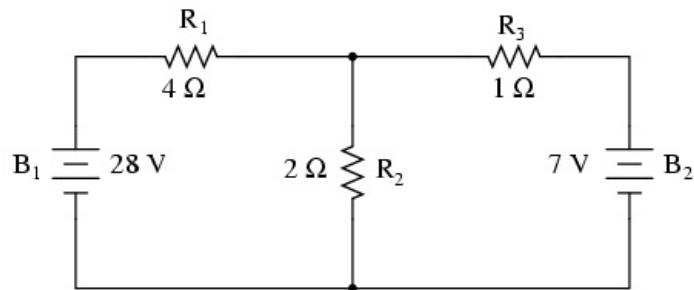


Figure 430: circuit electric

...conform teoremei transferului maxim de putere, valoarea rezistenței de sarcină pentru disiparea puterii maxime din circuit, trebuie să fie egală cu rezistența Thevenin (0.8Ω , în acest caz):

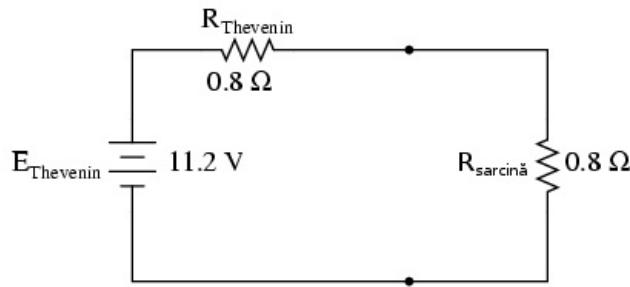


Figure 431: circuit electric

Cu această valoare a rezistenței, puterea disipată va fi de 39.2 watt:

	R_{Thevenin}	R_{Load}	Total	
E	5.6	5.6	11.2	Volți
I	7	7	7	Amperi
R	0.8	0.8	1.6	Ohmi
P	39.2	39.2	78.4	Watt

Figure 432: tabel

Dacă micșorăm valoarea rezistenței de sarcină (la 0.5Ω în loc de 0.8Ω , de exemplu), puterea disipată pe sarcină descrește:

	R_{Thevenin}	R_{Load}	Total	
E	6.892	4.308	11.2	Volți
I	8.615	8.615	8.615	Amperi
R	0.8	0.5	1.3	Ohmi
P	59.38	37.11	96.49	Watt

Figure 433: tabel

Dacă valoarea rezistenței sarcinii crește (la 1.1Ω în loc de 0.8Ω , de exemplu), puterea disipată va fi de asemenea mai mică decât valoarea acesteia pentru 0.8Ω :

	R_{Thevenin}	R_{Load}	Total	
E	4.716	6.484	11.2	Volți
I	5.895	5.895	5.895	Amperi
R	0.8	1.1	1.9	Ohmi
P	27.80	38.22	66.02	Watt

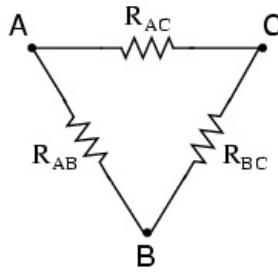
Figure 434: tabel

Această teoremă este foarte folositoare atunci când dezvoltăm un circuit electric pentru folosirea (disiparea) puterii maxime pe sarcină .

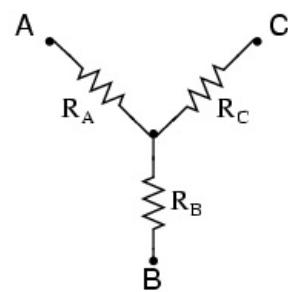
10.12 Transformarea triunghi-ștea și stea-triunghi

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 de mai jos:

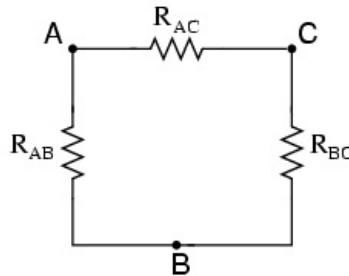
Configurația triunghi



Configurația stea



Configurația Pi



Configurația T

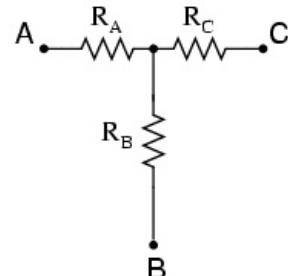


Figure 435: configurații stea, triunghi, Pi și T

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 cărora 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 diferență dintre cele două rețele din punct de vedere electric. Cu alte cuvinte, configurațiile echivalente Δ și Y se comportă identic.

Există câteva ecuații pentru transformare unei rețele în celelalte:

Transformarea Δ în 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 în Δ

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

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

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

Figure 436: transformarea triunghi-stea și stea-triunghi, formule

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.

1. Exemplu

O altă aplicație a transformării Δ - Y se găsește în cadrul circuitelor punte dezechilibrate, precum cel de jos:

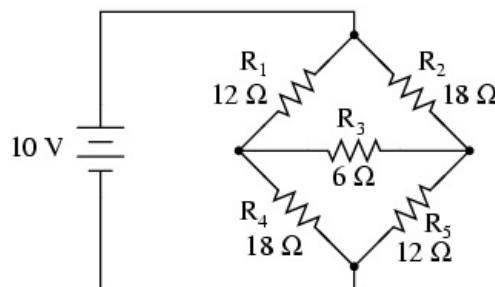


Figure 437: punte electrică dezechilibrată

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 R₃ rezistorul de sarcină, dar le ce ne-ar ajuta?

În schimb, putem considera că rezistorii R₁, R₂ și R₃ 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.

Alegerea configurației Δ de transformat:

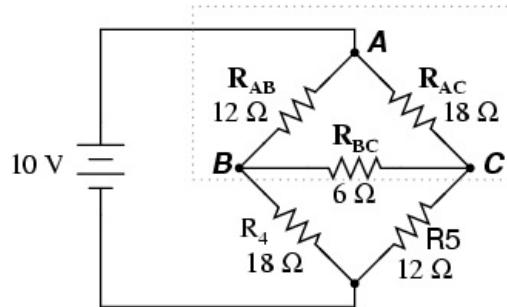


Figure 438: punte electrică dezechilibrată alegerea configurației Δ de transformat în Y

După aplicarea transformării:

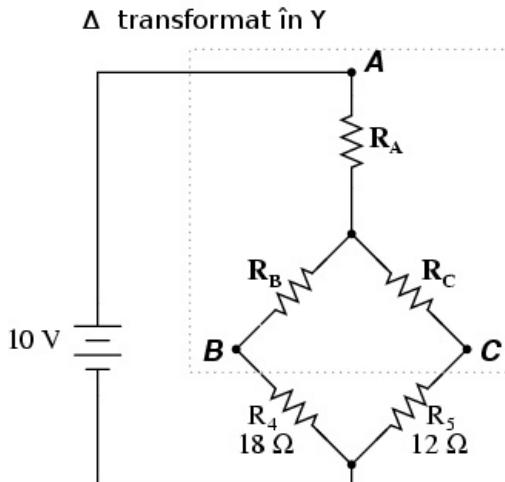


Figure 439: punte electrică dezechilibrată Δ transformat în Y

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

$$R_A = \frac{(12 \Omega)(18 \Omega)}{(12 \Omega) + (18 \Omega) + (6 \Omega)} = \frac{216}{36} = 6 \Omega$$

$$R_B = \frac{(12 \Omega)(6 \Omega)}{(12 \Omega) + (18 \Omega) + (6 \Omega)} = \frac{72}{36} = 2 \Omega$$

$$R_C = \frac{(18 \Omega)(6 \Omega)}{(12 \Omega) + (18 \Omega) + (6 \Omega)} = \frac{108}{36} = 3 \Omega$$

Figure 440: formule

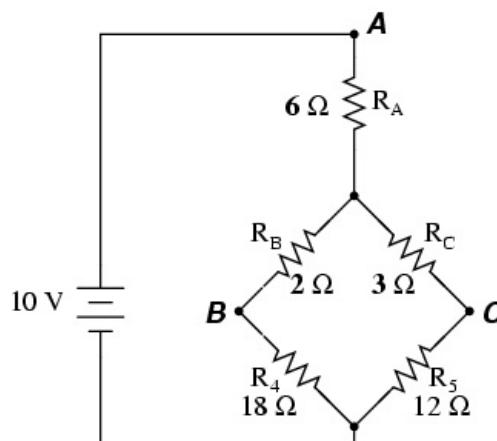


Figure 441: circuit electric

Desigur, valorile rezistorilor R_4 și R_5 rămân aceleși, 18 Ω respectiv 12 Ω . Acum putem analiza circuitul precum o combinație serie/paralel, obținând următoarele rezultate:

	R_A	R_B	R_C	R_4	R_5	
E	4.118	588.24m	1.176	5.294	4.706	Volți
I	686.27m	294.12m	392.16m	294.12m	392.16m	Amperi
R	6	2	3	18	12	Ohmi

	$R_B + R_4$	$R_B + R_4 // R_C + R_5$	$R_C + R_5$	Total	
E	5.882	5.882	5.882	10	Volți
I	294.12m	392.16m	686.27m	686.27m	Amperi
R	20	15	8.571	14.571	Ohmi

Figure 442: tabel

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

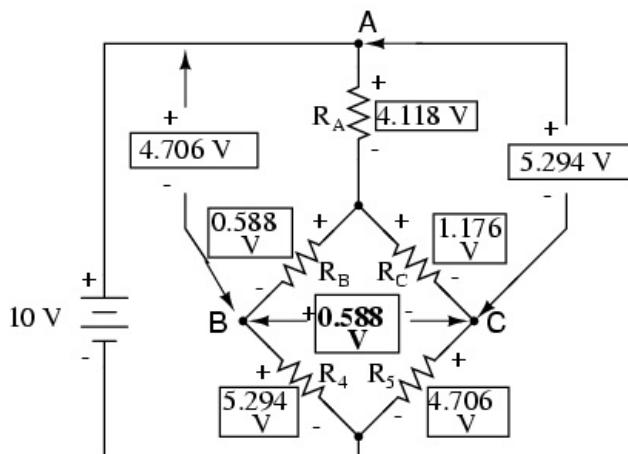


Figure 443: circuit electric

$$E_{A-B} = 4.706 \text{ V}$$

$$E_{A-C} = 5.294 \text{ V}$$

$$E_{B-C} = 588.24 \text{ mV}$$

Figure 444: formule

Cu valorile acestor căderi de tensiune aflate, putem trece la circuitul original unde aceste căderi de tensiune sunt aceleiași (între aceleași puncte).

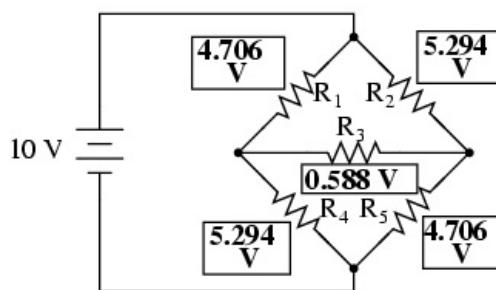


Figure 445: circuit electric

Desigur, căderile de tensiune pe rezistorii R_4 și R_5 sunt aceleiași ca în cazul circuitului transformat (Y).

Acum putem determina curentii prin rezistori folosind valorile acestor tensiuni și aplicând repetat legea lui Ohm ($I=E/R$):

$$I_{R1} = \frac{4.706 \text{ V}}{12 \Omega} = 392.16 \text{ mA}$$

$$I_{R2} = \frac{5.294 \text{ V}}{18 \Omega} = 294.12 \text{ mA}$$

$$I_{R3} = \frac{588.24 \text{ mV}}{6 \Omega} = 98.04 \text{ mA}$$

$$I_{R4} = \frac{5.294 \text{ V}}{18 \Omega} = 294.12 \text{ mA}$$

$$I_{R5} = \frac{4.706 \text{ V}}{12 \Omega} = 392.16 \text{ mA}$$

Figure 446: formule

11 Baterii

11.1 Activitatea electronilor în reacțiile chimice

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.

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: conductiv/izolator) este determinată de numărul protonilor din nucleu.

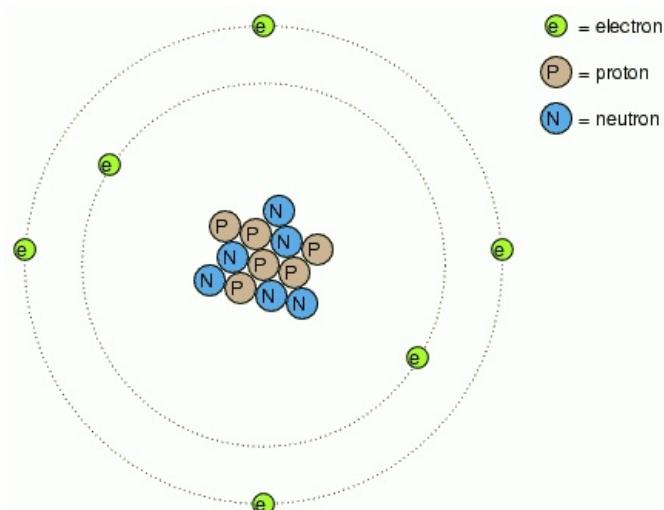


Figure 447: structura atomului

Disloarea protonilor din nucleul atomului este foarte greu de realizat, de aici și stabilitatea identității chimice a atomilor în general. Îndepărarea 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 termocouplei.

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 arată astfel:

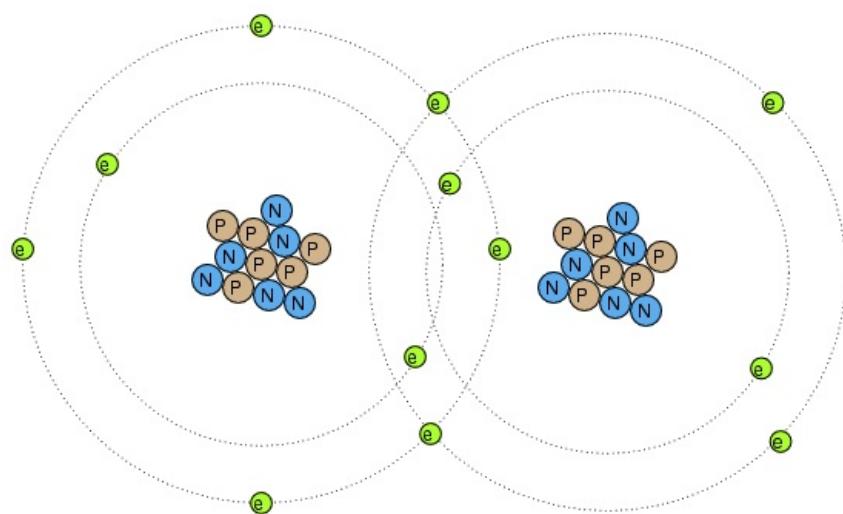
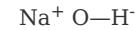


Figure 448: legătură chimică între doi atomi

Există mai multe tipuri de legături chimice, cea de sus fiind una **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 aceleasi forțe ce induc deplasarea electronilor: căldura, lumina, frecarea, etc.

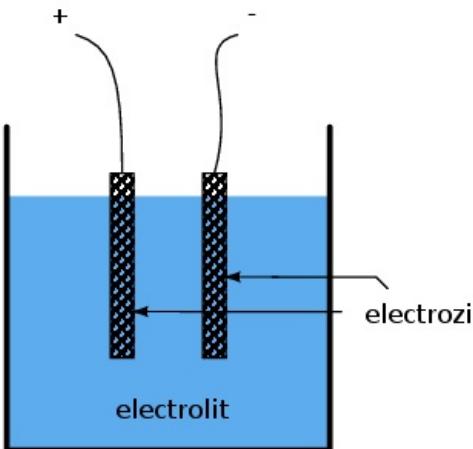
Atunci când atomii sunt legați între ei prin legături chimice, aceștia formează materiale cu proprietăți unice numite *molecule*. Desenul de mai sus, cu doi atomi de același tip legați, este un exemplu de moleculă simplă. Majoritatea moleculelor sunt formate însă din tipuri diferite de atomi. Chiar și moleculele formate din atomi de același tip pot prezenta proprietăți fizice radical diferite. 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 are electroni în minus; în acest caz, legătura dintre atomi este rezultatul atracției electrostatice dintre cele două sarcini diferite („+” și „-“). Atunci când legăturile ionice iau naștere din atomi neutri, există de fapt un transfer de electroni dintre 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 electroc, 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 română 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.

Formarea ionilor și a legăturilor ionice din atomi neutri sau molecule (sau *inversi*) 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* special concepută pentru facilitarea unei astfel de reacții electrochimice (oxidare/reducere):

Pila voltaică

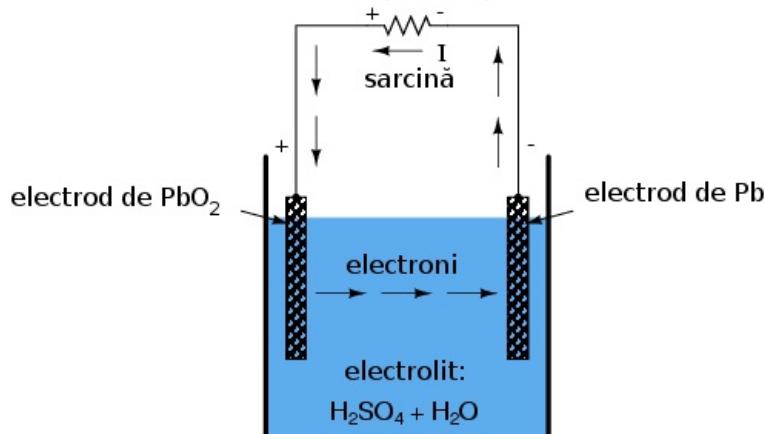


cei doi electrozi sunt confeționați din materiale diferite; ambele reacționează chimic cu electrolitul sub forma unor legături ionice

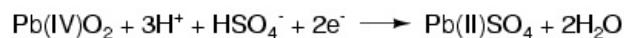
Figure 449: pilă voltaică

Pila folosită pentru automobile este de obicei cea de „plumb-acid”. Electrodul negativ este confectionat 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 $\text{Pb}(\text{II})\text{O}$. Atomii de oxigen rezultați se vor combina cu ionii pozitivi de hidrogen (H^+) și formează apă (H_2O). Această deplasare a electrolinor spre electrodul PbO_2 îi conferă o sarcină pozitivă. Atomii de plumb din electrodul negativ cedează fiecare câte doi electroni pentru a produce plumb $\text{Pb}(\text{II})$, 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 sarcină electrică negativă. Aceste reacții sunt reprezentate mai jos:

Descărcarea pilei de plumb-acid



Electrodul (+)



Electrodul (-)



Întreaga pilă

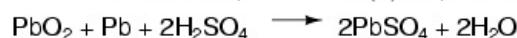


Figure 450: descărcarea pilei de plumb-acid

Acest proces prin care pila produce energie pentru alimentarea sarcinii se numește *descărcare* și provine de la faptul ca aceasta își epuizează rezervele chimice interne în urma acestui proces. Teoretic, după ce întreaga cantitate de acid sulfuric se consumă, din pilămai 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.

Nu toate pilele volتاice 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.

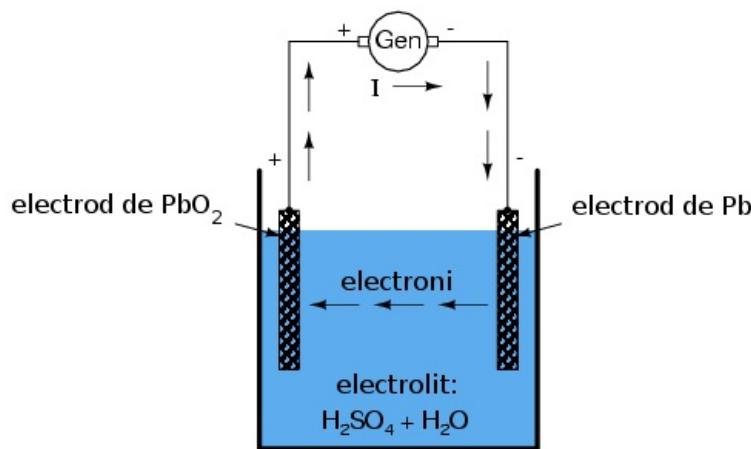
Valoarea tensiunii generate de o celulă depinde de tipul reacțiilor chimice ce au loc în interiorul acesteia, mai bine spus, de configurația chimică a celulei. În exemplul de mai sus, pila de plumb-acid prezintă la bornele sale o tensiune nominală de 2.04 V, atunci când este încârcată la maxim (concentrația 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.

1. Încărcarea pilei voltaice

În cazul anumitor tipuri de pile, reacțiile chimice pot fi inverse forțând curgerea curentului în sens invers prin pilă. Acest proces poartă denumirea de *încărcare*. O astfel de pila reîncărcabilă 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:

Încărcarea pilei de plumb-acid



Electrodul (+): $\text{Pb(II)}\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Pb(IV)}\text{O}_2 + 3\text{H}^+ + \text{HSO}_4^- + 2\text{e}^-$

Electrodul (-): $\text{Pb(II)}\text{SO}_4 + \text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Pb} + \text{HSO}_4^-$

Întreaga pilă: $2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{PbO}_2 + \text{Pb} + 2\text{H}_2\text{SO}_4$

Figure 451: încărcarea pilei de plumb-acid

11.2 Construcția bateriilor electrice

Cuvântul *baterie* înseamnă pur și simplu un grup de componente similare aduse împreună. O *baterie electrică* este un set de pile volتاice realizate cu scopul generării unei valori a tensiunii și curentului mai mari decât este posibil cu doar o singură pilă. Simbolul unei pile constă din două linii paralele, una mai scurtă și una mai lungă, conectate la capete cu câte un fir:

Pilă



Figure 452: simbolul electric al pilei

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

Baterie

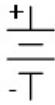


Figure 453: simbolul electric al bateriei

După cum am mai spus, tensiunea produsă de un anumita 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):

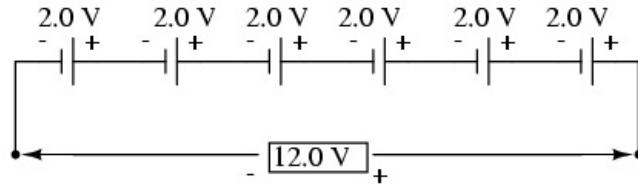


Figure 454: conectarea pilelor în serie pentru generarea unei tensiuni mai mari

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 neobișnuită de mare:



Simbolul pentru baterie
cu tensiune neobișnuită
de mare

Figure 455: simbolul bateriei cu o tensiune neobișnuită de mare

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 volcaică 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:

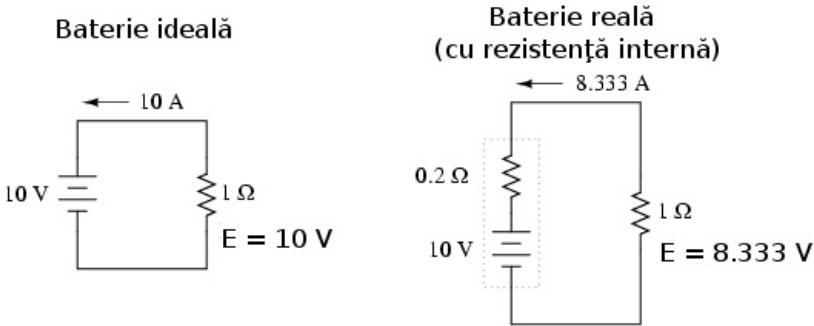


Figure 456: simbolul bateriei cu o tensiune neobișnuită de mare

Bateria reală de mai sus posedă o rezistență internă de 0.2Ω ; acest lucru afectează performanța bateriei atunci când alimentează sarcina de 1Ω . 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 1Ω 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 8.333 A pentru aceeași valoare a sarcinii.

Bateria ideală în scurt circuit (rezistență de 0Ω a sarcinii) generează un curent infinit. Pe de altă parte, bateria reală, poate genera doar 50 A (10 V / 0.2Ω) într-un scurt circuit de 0Ω 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 te 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 (currentul de scurt circuit este mult mai mare decât currentul normal prin sarcină), comportamentul lor în acest caz este foarte apropiat de cel al bateriilor reale.

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:

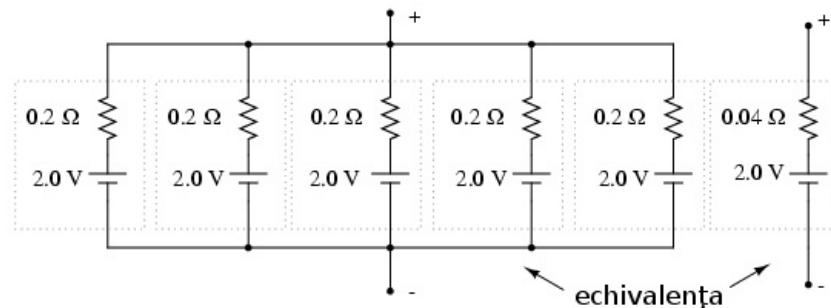


Figure 457: conectarea pilelor în paralel pentru o rezistență internă mai mică

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 (0.2Ω).

11.3 Capacitatea bateriilor

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 „împinsă” 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 coulombul (egal cu $6,25 \times 10^{18}$ electroni), astfel încât cantitățile cu care lucrăm să fie mult mai practice.

11.3.1 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 amper-oră: $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$.

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 baterie 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 dă 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 dată 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 amperi-oră, complet descărcată, va necesita o perioadă de încărcare de 10 ore la un curent de încărcare constant de 7 A ($70 / 7$).

11.3.2 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 rezistență sa internă. Efectul constă în modificarea reacțiilor chimice ce au loc în interiorul acesteia. Realitatea este că, bateria se va descărca într-o perioadă mai mică de timp decât o oră.

Invers, dacă ar fi să conectăm o sarcină ușoară (1 mA) la bornele bateriei, ecuația ne-ar spune că baterie ar trebui să genereze putere pentru o perioadă de 70.000 de ore, puțin sub 8 ani. Totuși, sunt foarte mari şanse ca energia chimică a unei baterii reale să se consume datorită altor factori, precum evaporarea electrolitului, deteriorarea electrozilor, 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. Această trebuie luată în considerare doar pentru valori apropiate de curent sau de timp specificate de producător. Unii producători specifică însă factori de reducere a capacitatei totale pentru funcționarea la curenți și/sau temperaturi diferite de cele standard.

11.3.3 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. Currentul 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:

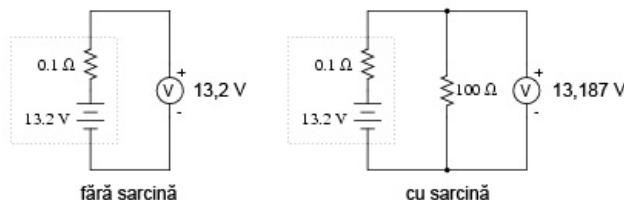


Figure 458: verificarea stării de încărcare a unei baterii

Dacă bateria se descarcă puțin:

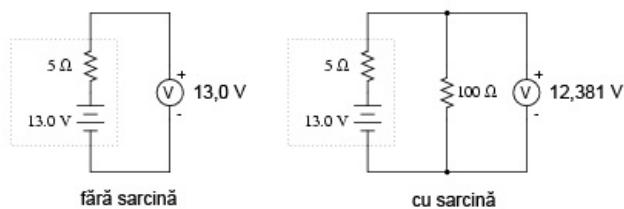


Figure 459: verificarea stării de încărcare a unei baterii

Apoi puțin mai mult:

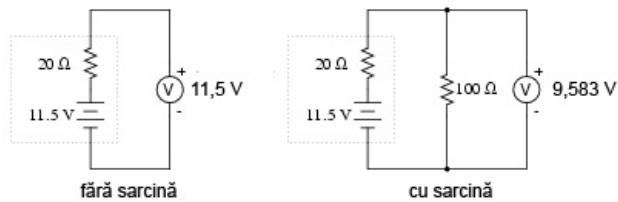


Figure 460: verificarea stării de încărcare a unei baterii

Și încă puțin până când este complet descărcată:

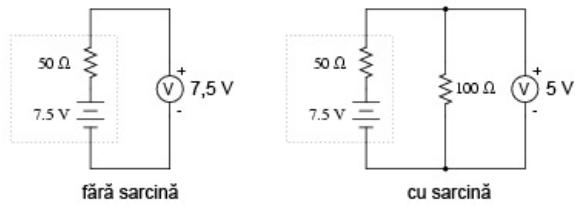


Figure 461: verificarea stării de încărcare a unei baterii

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 rezistorul 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).

11.4 Baterii speciale

11.4.1 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 era între 1,0184 și 1,0194 V c.c. (în funcție de tipul pilei), fiind extrem de stabilă în timp. Variația tensiunii era în jurul valorii de 0,004% pe an. Alternativ, pilele cu mercur erau cunoscute și sub numele de pile cu cadmium sau pile Weston. Structura unei astfel de pile este prezentată în figura de mai jos:

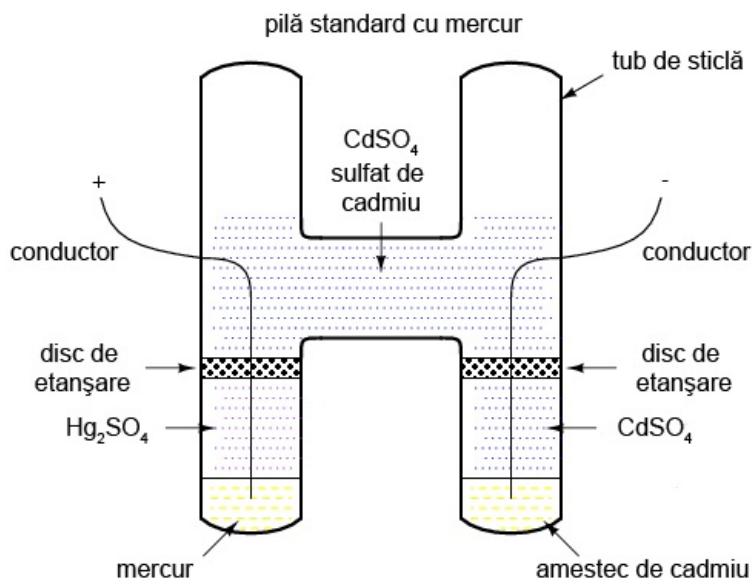


Figure 462: pilă standard cu mercur

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 instantaneu 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, pilă nu mai poate fi folosită ca și dispozitiv standard. Pilele cu mercur sunt de asemenea susceptibile la variații mici de tensiune în cazul „brusării” 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 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 în timp. Tensiunea rămâne practic constantă odată cu variația temperaturii, dar scade constant cu aproximativ 100 μ V pe an. Aceste celule erau utilizate cel mai adesea ca și dispozitive de calibrare „de teren”. Temperatura ambientă 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.

11.4.2 Pilă de combustie

Un dispozitiv fascinant, foarte asemănător pilei voltaice, este pilă 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 electrolizi. O pilă de combustie este practic o baterie alimentată de la o sursă externă de energie chimică:

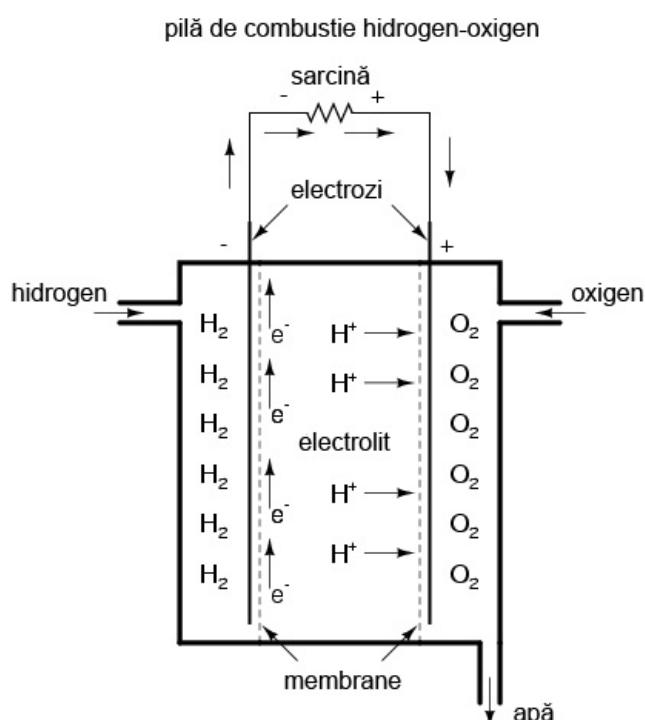


Figure 463: pilă de combustie hidrogen-oxigen

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.

11.4.3 Celula solară

Un alt tip de „baterie” este celula (pila) solară, un produs al electronicii (semiconductor). 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 acesteia ca și sursă de energie sunt nenumărate: nu există părți mobile, zgromot, poluare sau emisii și o viață practic infinită:

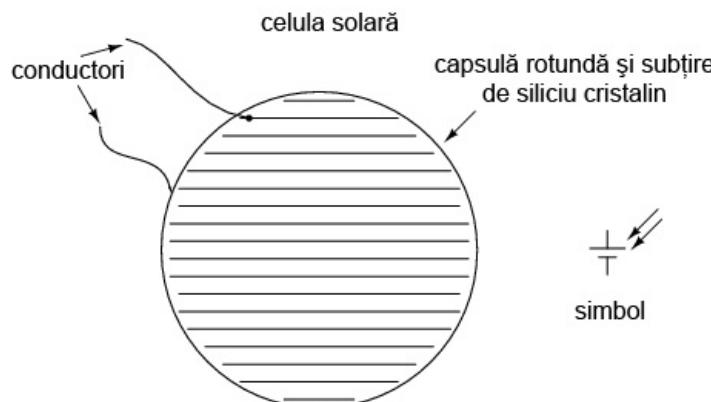


Figure 464: celulă solară

11.4.4 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 analizoarelor 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 de materialele chimice se epuizează sau se contaminează în decursul utilizării.

11.5 Considerații practice

La conectarea bateriilor în serie (sau paralel), trebuie să fim atenți la caracteristicile fiecărei baterii, pentru a nu cauza probleme.

11.5.1 Conectarea în serie a bateriilor

Să luăm pentru început cazul conectării bateriilor în serie pentru obținerea unei tensiuni mai mari:



Figure 465: conectarea bateriilor în serie

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. În caz contrar, unele din 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.

11.5.2 Conectarea în paralel a bateriilor

Să luăm cazul conectării bateriilor în paralel pentru creșterea curentului în circuit (rezistență internă mai mică), sau creșterea capacitații amper-oră:

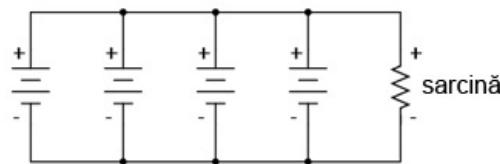


Figure 466: conectarea bateriilor în paralel

Cunoaștem faptul că într-un circuit paralel, căderea de tensiune este egală pe toate ramurile. Trebuie să ne asigurăm aşadar 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.

11.5.3 Protejarea circuitelor 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:

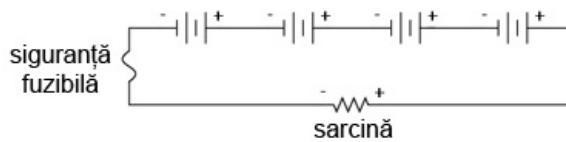


Figure 467: conectarea bateriilor în serie; protecția la supracurent

În cazul unor baterii conectate în paralel însă, o singură siguranță fuzibilă este suficientă pentru protejarea conductorilor la supracurent (conectată între sarcină și bateriile conectate în paralel). În acest caz însă, 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 „defecției” 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:

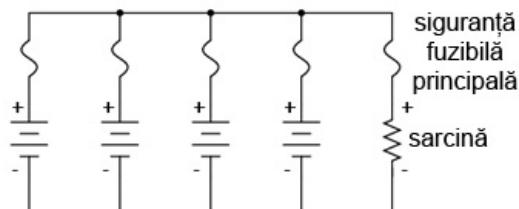


Figure 468: conectarea bateriilor în paralel; protecția la supracurent

11.5.4 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 unei baterii. Toate bateriile au un anumit număr de iterații permise. Supraîncărcarea reprezintă condiția în care curentul continuu 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 îndepărțarea 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 Fizica conductorilor

12.1 Introducere fizica conductorilor

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.

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. Contra 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.

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 substanță din care face parte atomul respectiv. Acest scenariu este tipic materialelor conductoare. Dacă limitările cuantice impuse unui electric nu-i permit această liberate, 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).

12.1.1 Conductivitatea electrică

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 elementelor și comparăm conductivitatea materialelor cu

numărul electronilor de valență (numărul electronilor de pe ultimul strat). Adevărată complexitate a problemei este scoasă la lumină atunci când luăm în considerare conductivitatea moleculelor (mai mulți atomi legați între ei prin intermediul activității electronilor). Un exemplu pertinent în acest sens este carbonul, ce cuprinde două materiale de conductivitate 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 aceleasi tipuri de atomi, și anume, din atomi de carbon ce contin 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 dielectrii foarte buni.

După cum putem vedea, simpla numărare a electronilor de valență a unui atom nu este un indicator foarte bun pentru conductivitatea electrice a materialului în cauză.

Toate elementele metalice sunt buni conductori 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 diferențele nucleare din compoziția 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.

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.

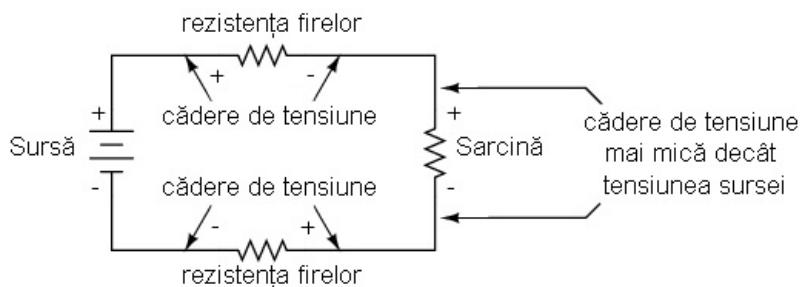


Figure 469: Într-un circuit electric, există tot timpul cădere de tensiune în lungul conductorilor

Pentru a putea calcula aceste căderi de tensiuni în oricare circuit, trebuie să putem determina rezistența oricărui conductor, cunoscând materialul din care este confecționat, diametrul precum și lungimea acestuia, lucru ce-l vom explora în următoarele capitole.

12.2 Mărimea și amperajul conductorilor

12.2.1 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 (grosimea) a conductorului este mai mare, cu atât există mai mult loc pentru deplasarea electronilor; acest lucru se traduce printr-o rezistență mai mică.

12.2.2 Tipuri de conductoare

Conductoarele electrice sunt de obicei rotunde, deși există câteva excepții de la această regulă, și confeționează 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 format 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 repetitive mult mai bine decât un singur fir de cupru; acesta din urmă tinde să „îmbătrânească” și să se deterioreze (rupă) cu timpul.

12.2.3 Mărimea conductorilor - aria secțiunii transversale

Mărimea firelor poate fi măsurată în mai multe moduri. Am putea vorbi despre diametru 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.

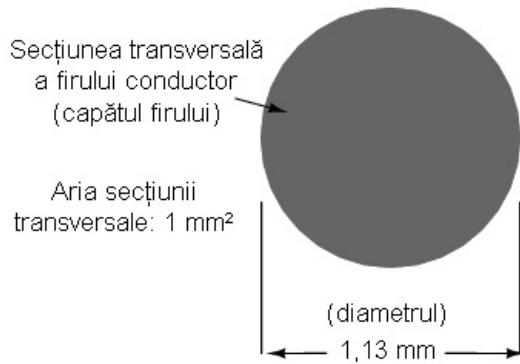


Figure 470: secțiunea transversală printr-un conductor și aria acesteia

Desigur, secțiunea transversală a firului de sus nu este reprezentată la scară. Diametrul firului este de 1,13 mm. Calculând aria secțiunii transversale cu formula de mai jos, obținem rezultatul de 1 mm^2 :

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

12.2.4 Bare metalice conductoare

Pentru anumite aplicații ce utilizează curenti 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.

12.2.5 Amperajul conductorilor

Cu cât aria secțiunii transversale a conductorului este mai mică, cu atât este mai mică rezistența conductorului pentru a ceeași lungime a sa, toți ceilalți factori ramânând 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 $P = I^2R$.

Puterea disipată într-o rezistență se manifestă sub formă de căldură, iar căldura excesivă poate distruga conductorul, cât și obiectele din jurul acestuia, și în special materialul izolant din jurul acestuia 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 izolareaza acestora posedă puncte de topire mult sub această temperatură; prin urmare, limitele 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 metode specifice.

1. Cabluri electrice - caracteristici ([link extern, cabluri.net](#))

12.3 Siguranțe fuzibile

12.3.1 Definiția și scopul siguranțelor fuzibile

În mod normal, amperajul unui conductor reprezintă o limită a circuitului electric ce nu trebuie depășită în mod intenționat.

Siguranțele fuzibile sunt proiectate tocmai pentru a acționa în cazul unor astfel de „supra-curenți”.

O siguranță fuzibilă nu este altceva decât o un fir conductor scurt, proiectat astfel încât, în situația unui curent excesiv, acesta să se separe prin topire. *Siguranțele fuzibile se conectează tot timpul în serie cu componentul sau componentele ce necesită o protecție 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.

În mod normal, firul conductor este acoperit de un înveliș protector pentru minimizarea pericolului arcului electric în cazul deschiderii bruse a circuitului. În cazul siguranțelor din locuință clasice, „littele” sunt protejate de un patron din ceramică (poză).

Siguranțele fuzibile folosite în cazul autoturismelor sunt transparente, astfel încât elementul fuzibil poate fi observat direct (poză). Simbolul siguranței fuzibile pe care îl vom folosi, este cel în formă de „S”, precum în figura alăturată.

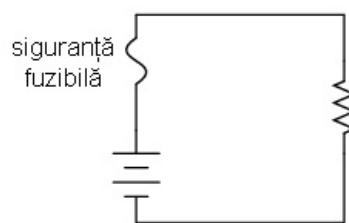


Figure 471: simbolul siguranței fuzibile într-un circuit electric

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 îndepărtați și înlocuiți cu ușurință din circuit. Acest lucru înseamnă că ele vor fi introduse într-o cutie de siguranță și nu vor fi lipite sau prinse direct în circuit (poză).

12.3.2 Întrerupătoare automate

Întrerupătoarele automate sunt cele mai utilizate dispozitive pentru protecția la supracurent. Aceste dispozitive sunt niște întrerupătoare proiectate special pentru deschiderea automată și oprirea alimentării cu energie electrică în cazul apariției unui supra-curent. Întrerupătoarele automate mici, precum cele din locuințe, comerciale și pentru iluminat, funcționează pe bază termică. Acestea conțin o bandă bimetalică (o bandă subțirea 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 suficientă de mare (datorită supra-currentului ce o încâlzește), mecanismul de întrerupere este acționat iar întrerupătorul va deschide circuitul. Întrerupătoarele automate mai mari, sunt acționate de forța câmpului magnetic produs de conductoarele străbătute de curent din interiorul acestuia, sau pot fi acționate de dispozitive exterioare (relee de protecție) ce monitorizează curentul din circuit. În ambele cazuri, dispozitivul nu se distrugă, ci doar se deschide; acesta poate fi reînchis prin acționarea unei manete și nu necesită nicio înlocuire precum este cazul siguranțelor fuzibile (poza).

12.3.3 Considerații practice

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 relizează 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.

Totuși, trebuie luată în considerare și situație 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 reînchiderea 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.

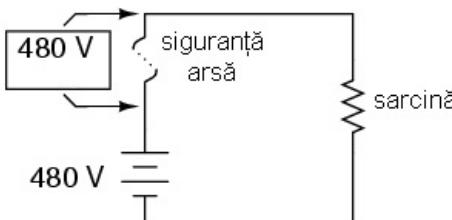


Figure 472: siguranță fuzibilă arsă într-un circuit electric

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.

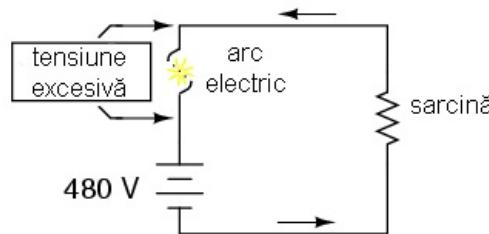


Figure 473: apariția arcului electric în cazul unei siguranțe fuzibile topite

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 acesteia.

12.3.4 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 indelungat 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 indelungat, ajungând până 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-current. Dispozitivele semiconductoare, precum tranzistorii, tind să fie foarte sensibile la supra-curenți, prin urmare, în cazul acestora este nevoie de dispozitive de protecție rapide în circuitele de putere mare.

12.3.5 Introducerea corectă în circuit a siguranțelor fuzibile

Siguranțele fuzibile trebuie poziționate pe fază 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 alăturate, pentru a vedea diferența între utilizarea unei siguranțe pe fază și utilizarea aceleiasi siguranțe pe neutru.

În acest caz, când siguranța este introdusă în fază 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.

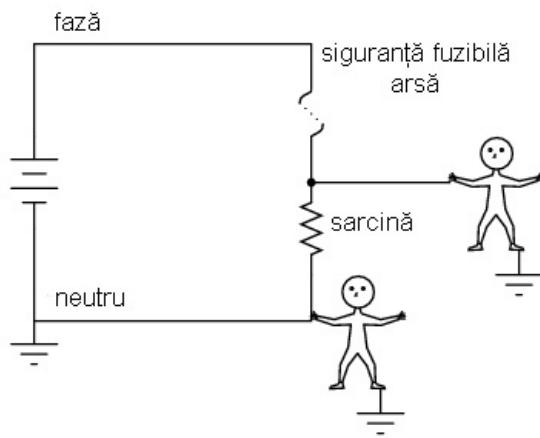


Figure 474: poziționarea corectă a siguranței fuzibile în circuit pe faza acestuia

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.

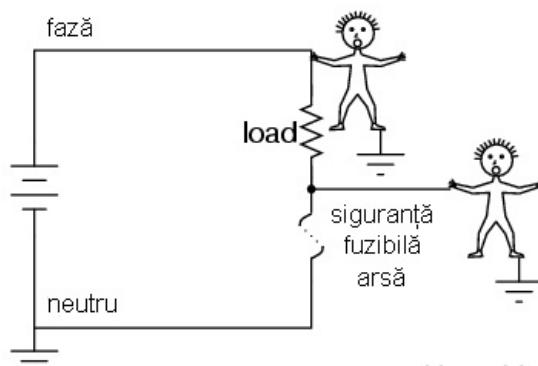


Figure 475: poziționarea greșită a siguranței fuzibile în circuit pe neutrul acestuia

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.

12.3.6 Observații

Cu toate că protecția la supra-current 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-current, protejează în principal conductorii de la distrugere 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 curentilor necesari pentru electrocutare sunt mult mai mici decât curentii normali ale sarcinilor din circuit, o condiție de supra-current 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 curenti de defect), dar aceste dispozitive sunt utilizate stric pentru acel scop și nu au nicio legătură cu protecția conductorilor la supra-încălzire.

12.4 Rezistivitatea și conductibilitatea electrică

Amperajul unui conductor, bazat pe potențialul curentului de a distruga conductorul, nu este cea mai bună metodă de reprezentare a rezistenței acestuia. Există situații în care cădereea de tensiune creată de rezistență unui conductor în lungul acestuia duce la apariția altor probleme decât evitarea incendiilor. De exemplu, să presupunem că proiectăm un circuit unde cădereea 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, cădereea de tensiune datorată rezistenței conductorului poate duce la apariția unei probleme tehnice la aplicație în cauză.

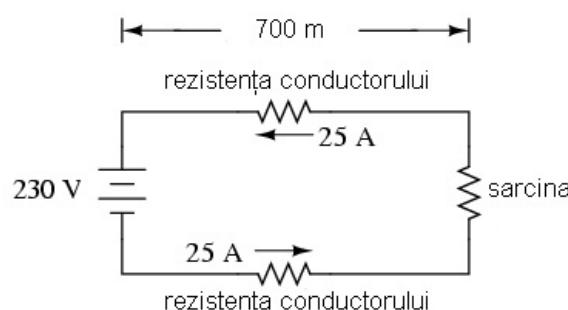


Figure 476: circuit electric; conductori cu rezistență electrică

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:

$$R = E / I R = 5 V / 25 A R 0,2 \Omega$$

Stim 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:

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

Figure 477: formula de calcul a rezistenței electrice

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 ($\Omega \cdot m$).

Rezistivitatea câtorva tipuri de materiale conductoare, la temperatură de 20° 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.

Material	Element / Aliaj	$10^{-8} \Omega \cdot m$
Nicrom	Aliaj	112,2
Nicrom V	Aliaj	108,2
Manganină	Aliaj	48,21
Constantan	Aliaj	45,38
Otel	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

Revenind la circuitul din exemplul de mai sus, am calculat o rezistență de 0,2 Ω 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:

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

O secțiune transversală de 54,4 mm², se traduce printr-un diametru al conductorului circular de 8,6 mm. Dacă luăm un tabel al conductorilor, putem observa că cea mai apropiată valoare mai mare decât 54,4 este 70 mm², iar rezistența conductorului la o lungime de 1.000 m este de 0,268. Pentru exemplu nostru, la o lungime de 700 m, aceasta înseamnă o rezistență a conductorului de 0,182 Ω, sub valoarea maximă impusă de 0,2 Ω; conductorul ales este prin urmare potrivit pentru aplicația în cauză.

12.4.1 Conductibilitatea electrică

Conductibilitatea electrică, denumită și conductivitate electrică, caracterizează capacitatea unui material de a permite deplasarea electronilor prin acesta. Simbolul matematic este σ (sigma), iar unitatea de măsură este Siemens pe metru ($S \cdot m^{-1}$). Practic, conductibilitatea electrică este inversă rezistivității electrice:

$$\sigma = 1 / \rho$$

12.5 Coeficientul de temperatură al rezistenței

Tabelul rezistivităților diferitelor materiale, prezentat în secțiunea precedentă, s-a referit doar la temperatura de 20°. Prin urmare, după cum ati putut bănui, rezistivitatea materialelor depinde de temperatură.

Valorile rezistențelor conductorilor aflați la temperaturi diferite față de temperatura standard (20° tipic), din tabelul rezistivităților, se calculează printr-o altă formulă, 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 ușual, 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: $R = \rho l / A$.

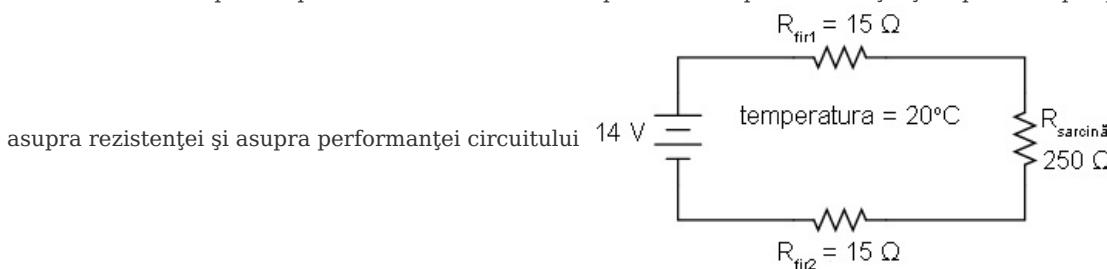
Constanta α , poartă numele de coeficientul de temperatură al rezistenței, și simbolizează variația rezistenței cu temperatura; acest coeficient este specific fiecărui tip de material. Pentru metale pure, α este un număr pozitiv, ceea ce înseamnă că rezistența crește odată cu creșterea temperaturii. Pentru carbon, siliciu și germaniu, acest coeficient este negativ, ceea ce înseamnă că rezistența

scade odată cu creșterea temperaturii. Pentru anumite aliaje, coeficient de temperatură al rezistenței este foarte apropiat de valoarea zero, ceea ce înseamnă că rezistența aproape că nu se modifică odată cu variația temperaturii. 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)

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
Otel	Aliaj	0.003000
Nicrom	Aliaj	0.000170
Nicrom V	Aliaj	0.000130
Manganină	Aliaj	± 0.000015
Constantan	Aliaj	- 0.000074

12.5.1 Exemplu

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



asupra rezistenței și asupra performanței circuitului

Rezistența totală a conductorilor din acest circuit este de 30Ω ($R_{fir1} + R_{fir2}$) la temperatura standard de 20°C. Folosind metoda tabelului pentru analiza circuitului, obținem următoarele valori:

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

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 ($0,75 \text{ V} + 0,75 \text{ V}$) în lungul conductorilor datorită rezistenței acestora. Dacă temperatura ar crește la 35°C, putem vedea ce se întâmplă cu rezistențele fiecărui conductor. Presupunând că materialul conductor este cuprul ($\alpha = 0,004041$), obținem următorul rezultat:

$$R = R_{ref}[1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad R = (15 \Omega)[1 + 0,004041 (35^\circ - 20^\circ)] \quad R = 15,9 \Omega$$

Reanalizând circuitul de mai sus cu noile valori, putem vedea efectele creșterii temperaturii asupra circuitului.

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

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 centralale electrice și stațiile de transformare și între stațiile de transformare și consumatori.

12.6 Supraconductibilitatea

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 0Ω , nu doar o valoare foarte mică.**

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 heliuului, 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 sub aproape de punctul de fierbere al heliuului.

Nu este încă înțeles exact motivul pentru care materialele supraconductoare se comportă în acest fel. Una dintre teorii suține că electronii se deplasează în grupuri (grupuri Cooper) prin conductor și nu individual cum este cazul deplasării normale ale electronilor; acest lucru ar fi o legătură directă cu deplasarea lor fără frecare. Este interesant de menționat faptul că și în cazul fluidelor există un fenomen similar, denumit superfluiditate, rezultând într-o curgere fără frecare a moleculelor, în special în cazul heliuului lichid.

Supraconductibilitatea promite un comportament ieșit din comun al circuitelor electrice. Dacă rezistența conductorilor ar putea fi eliminată complet, nu ar mai exista pierderi de putere sau ineficiențe în sistemele de putere datorate rezistențelor parazite.

Eficiența motoarelor electrice ar putea crește spre o eficiență apropiată de 100%. Componente precum conedsatorul sau bobina, ale căror caracteristici sunt „stricate” de rezistența inerentă a conductorilor din care sunt construite, ar putea fi 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.

12.6.1 Temperatura de tranziție

Pragul de temperatură la care materialul trece din fază 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 „ridicată” încât să poată fi menținută cu echipamente de răcire relativ ieftine. Temperaturile critice pentru câteva substanțe uzuale sunt prezentate în tabelul alăturat.

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

12.6.2 Efectul Meissner (vezi video, net)

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, prezeță 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.

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.

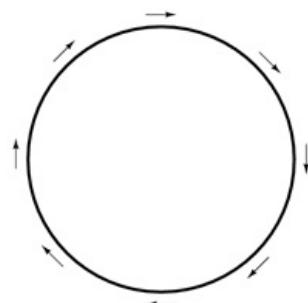


Figure 478: Într-un circuit închis, format din fire supraconductoare, curentul electric poate fi susținut pentru o perioadă de timp practic infinită, fără aplicarea unei tensiuni externe

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.

12.7 Străpungerea dielectricului

12.7.1 Definiția străpunerii dielectrice

Electronii din interiorul atomilor materialelor dielectrice nu se pot deplasa la fel de ușor precum în cazul materialelor dielectrice. Totuși, nici materialele dielectrice nu pot rezista unor tensiuni infinit 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 nici 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.

12.7.2 Rigiditatea dielectrică

Grosimea materialului joacă un rol important în determinarea tensiunii sale de străpungere, tensiune cunoscută și sub numele de rigiditate dielectrică. Alăturat 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 V / m).

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
Şelac	3,6
Hârtie	5
Teflon	6
Sticlă	8 - 12
Mică	20

13 Condensatorul

13.1 Câmpuri și capacitatea electrică

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.

În ciuda aspectului abstract, putem da un exemplu destul de practic cu care majoritatea dintre noi suntem familiarizați, și anume magnetii. 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 observat interacțiunile dintre ei, nici nu am stii că există. În cadrul fizicii, interacțiunile ce au loc în spațiul dintre magneti 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. Mai mult ca sigur că sunteți familiarizați și cu câmpurile electrice. Un exemplu a fost dat îm 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 celalaltă. Din nou, fizicienii includ aceste interacții 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) dintre două puncte duce la apariția unui câmp electric în spațiul rămas liber dintre acestea.

Câmpurile au două caracteristici principale: *forță* și *fluxul*. *Forța* reprezintă cantitatea de „împingere” pe care un câmp îl exercită la o anumită distanță. *Fluxul* este cantitatea totală, sau efectul, câmpului prin spațiu. Forța și fluxul câmpului sunt aproximativ similar 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 dezvoltată în spațiu este proporțională cu valoarea forței aplicate împărțită la valoarea opozitiei 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.

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 „îngrămaditi” 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 construcția a condensatoarelor, în funcție de aplicația necesară.

Simbolul electric al condensatorului este prezentat în următoarea figură:



Figure 479: simbolul 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:

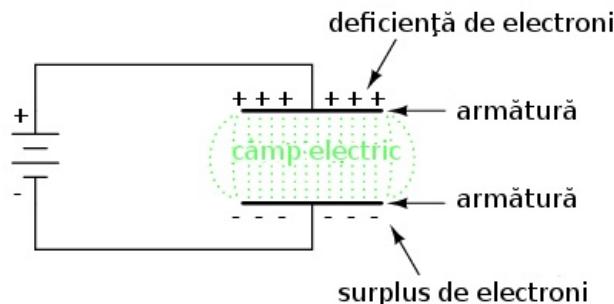


Figure 480: câmp electric în interiorul condensatorului

Pe măsură ce câmpul electric este format prin aplicarea tensiunii, electronii liberi vor fi forțați să se „adune” la terminalul negativ fiind „furăți” de pe terminalul negativ. 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 stocare a energiei în funcție de tensiune rezultă într-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 mărime, fie o scădere, acesta tinde să se opună schimbării trăgând curent de la sau generând curent spre sursa de variație a tensiunii, în opozitie cu variația.

Pentru a stoca mai multă energie într-un condensator, trebuie să mărităm valoarea tensiunii la bornele sale. Acest lucru presupune o înmulțire a electronilor pe armătura negativă și o diminuare a lor pe cea negativă, lucru ce necesită existența unui curent în acea direcție. Dimpotrivă, pentru a elibera energie dintr-un condensator, trebuie să scădem 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 tendință unui condensator de a se opune variației tensiunii astfel: „Un condensator încărcat tinde să rămână încărcat; un condensator descărcat tinde să rămână descărcat.” Ipotetic, un condensator (încărcat sau descărcat) lasat 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 un condensator perfect:

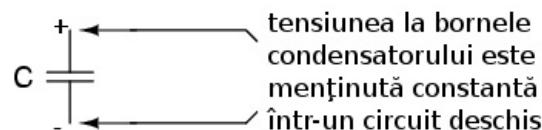
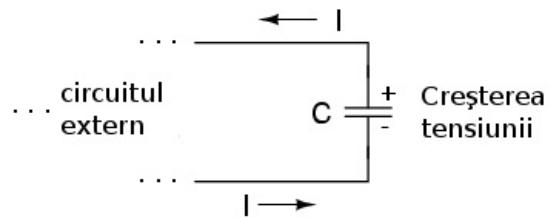


Figure 481: tensiune electrică la bornele condensatorului este menținută constantă într-un circuit deschis

Practic, condensatoarele își vor pierde tensiune 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.

Când tensiune la bornele condensatorului crește, acesta trage curent din circuit; în acest caz condensatorul se comportă ca o sarcină și spune că se încarcă. Observați direcția de deplasare a electronilor (curentul) față de polaritatea tensiunii:

Energia absorbită de condensator din circuitul extern

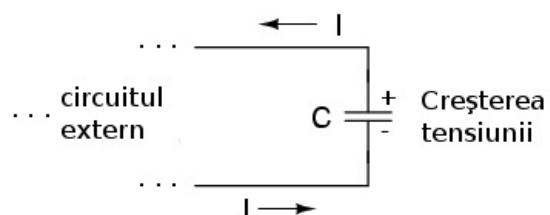


Condensatorul se comportă ca o sarcină

Figure 482: condensatorul ca o sarcină

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:

Energia absorbită de condensator din circuitul extern



Condensatorul se comportă ca o sarcină

Figure 483: condensatorul ca o sursă

Dacă introducem brusc o sursă de tensiune la bornele unui condensator descărcat (o creștere bruscă de tensiune), acesta va trage 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 să va scădea spre zero. După atingerea acestui punct de descărcare, curentul scade spre zero. Putem să ne gândim la condensatoare ca la un fel de baterii secundare prin modul de încărcare și descărcare al lor.

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 egale, ci sunt diferențiate printr-o valoare fizică numită *permittivitatea dielectricului*.

Mărimea pentru volumul de energie stocat de un condensator, atunci când se aplică o anumită tensiune la bornele sale, poartă denumirea de *capacitate*. 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 microFarad (μF).

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.

13.2 Relația tensiune-curent pentru condensator

Condensatorii nu au o „rezistență” stabilă precum am rezistorii. Totuși, există o relație matematică precisă între tensiunea și curentului unui condensator:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

Figure 484: relația dintre curent și tensiune pentru condensatoare

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 ” aparține analizei matematice și semnifică 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 instantanu. Observați că notația tensiunii în acest caz este v și nu e !

Până în acest moment nu am mai întâlnit variabila *timp* în studiul circuitelor electrice. Atunci când am vorbit de valori ale tensiunilor, curentilor și rezistențelor rezistorilor, ne-a fost indiferent dacă măsurătorile au fost făcute pe o perioadă de timp nespecificată ($E=IR$; $V=IR$) sau la un anumit moment din timp ($e=ir$; $v=ir$). Formulele folosite sunt exact aceleași, și astă 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, doarece 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 potențiometru:

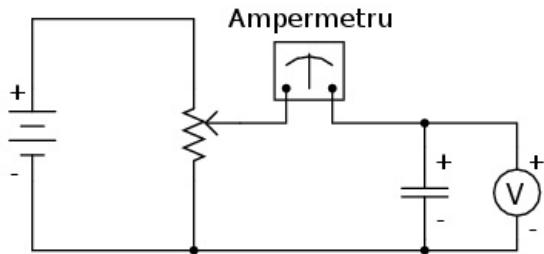


Figure 485: circuit electric

Dacă potențiometrul rămâne în aceeași poziție (perie 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 a tensiunii, nu este nevoie de nicio deplasare a electronilor de pe o armătură a condensatorului pe alta, și prin urmare nu există nici curent.

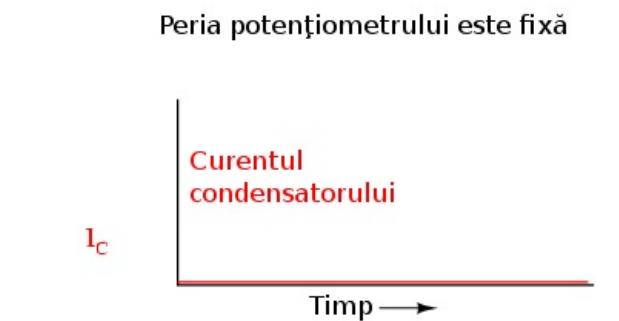
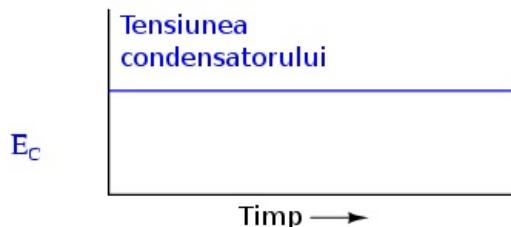


Figure 486: tensiunea și curentul printr-un condensator

Dacă în schimb peria motențiometrului 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:

Peria potențiometrului se deplasează încet în sus

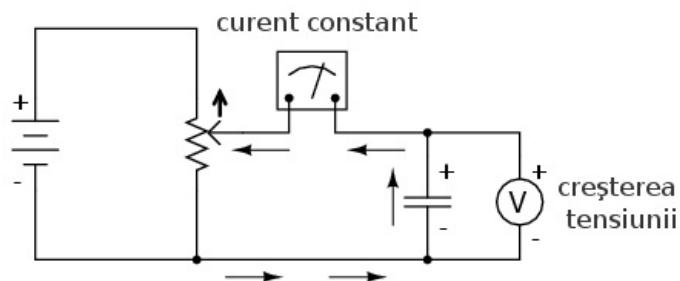
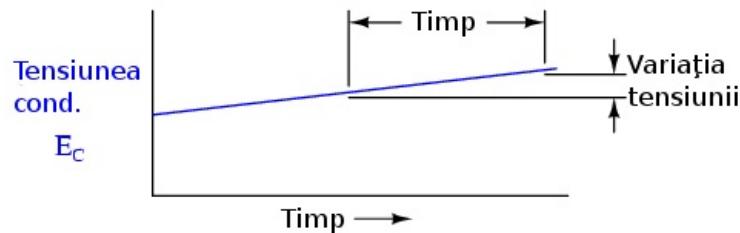


Figure 487: circuit electric

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. Ecuația ne spune în acest caz că, valoarea fixă a lui dv/dt (2 V/s) îmulseată 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 reduce de fapt printr-o deplasare constantă a electronilor între armături, adică existența curentului. În această situație, condensatorul se comportă precum o *sarcină*; electronii intră pe armătură negativă și ieș din armătură pozitivă, acumulând energie sub formă de câmp electric.



Peria condensatorului se deplasează încet în sus

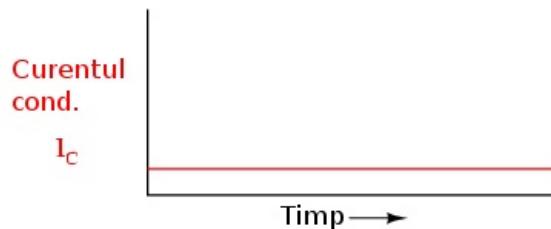


Figure 488: tensiunea și curentul printr-un condensator

Dacă repetăm scenariul de mai sus, doar că în acest caz, mărим rata de deplasare a periei condensatorului, variația tensiuni (dv/dt) va avea o valoare mai mare; curentul prin condensator va fi și el mai mare în acest caz:

Peria potențiometrului se deplasează rapid în sus

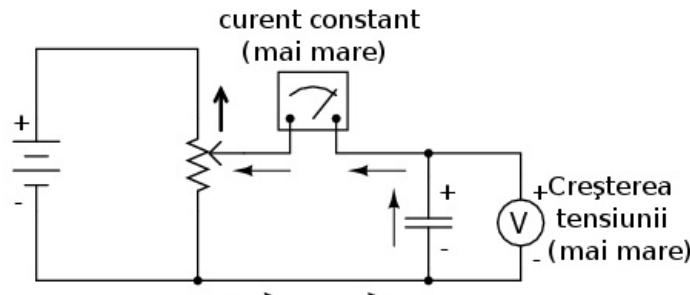
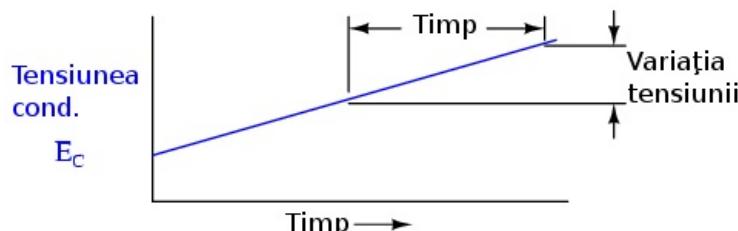


Figure 489: circuit electric



Peria potențiometrului se deplasează rapid în sus

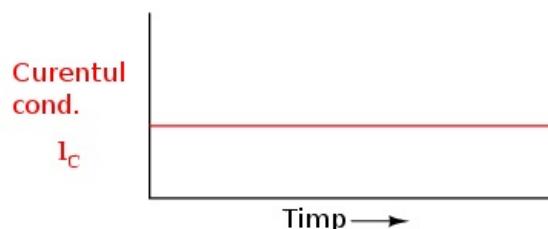
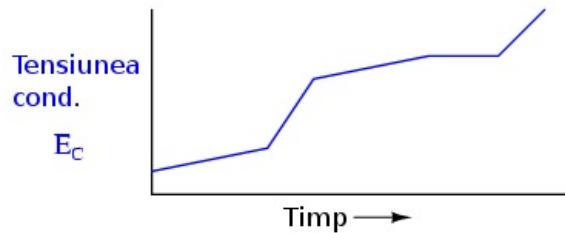


Figure 490: tensiunea și curentul printr-un condensator

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 prin condensator este direct proporțional cu viteza de variație a tensiunii la bornele acestuia.

Să luăm acum un alt exemplu. Dacă de data aceasta deplasăm peria potențiometrului în aceeași direcție ca și înainte („sus”) dar nu constant ci la viteze (rate de variație) diferite. În acest caz obținem un grafic al variației tensiunii și curentului ce arată aproximativ asfel:



Peria potențiometrului se deplasează în sus la viteze diferite

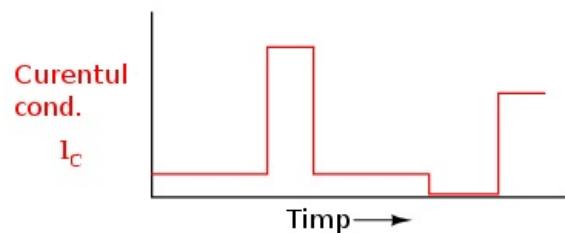


Figure 491: circuit electric

Putem observă 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 pantă tensiunii este mai mică, și curentul este mai mic. La un moment dat pantă tensiunii este zero (linie orizontală), datorită faptului că peria potențiometrului nu s-a deplasat deloc în acest interval de timp; în acest caz, curentul prin condensator este zero (vezi graficul). 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 sensul 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 ieș de pe armătura negativă și intră pe cea pozitivă, condensatorul se comportă precum o *sursă* (ex, o baterie), eliberând în circuitul extern energia stoacată sub formă de câmp electric.

Peria potențiometrului se deplasează în jos

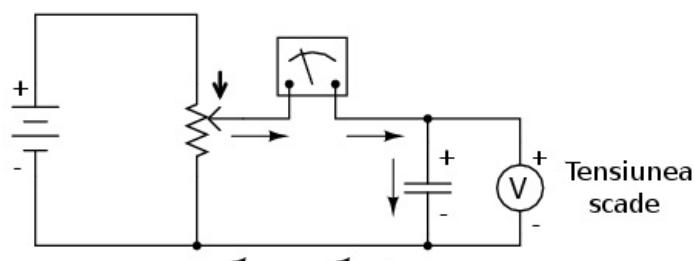


Figure 492: circuit electric

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 tipul, valoarea absolută (sau amplitudinea) curentului este exact aceeași. Matematic, o descreștere a tensiunii se traduce printr-o valoarea *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.

13.3 Factori ce afectează capacitatea electrică

Există trei factori de bază în construcția condensatoarelor ce afectează valoarea capacității 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.

1. Aria armăturilor

Toți ceilalți factori fiind egali, o aria mai mare a armăturilor se traduce printr-o capacitate mai mare a condensatorului; o aria mai mică înseamnă o valoare mai mică a capacității. Explicația constă în faptul că o aria mai mare poate suporta un flux mai mare al câmpului (sarcină colectată pe armături) pentru o anumită valoare a forței câmpului (tensiunea dintre armături).

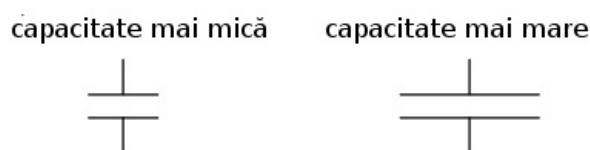


Figure 493: capacitatea condensatorului în funcție de aria armăturilor

2. 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.

capacitate mai mică capacitate mai mare



Figure 494: capacitatea condensatorului în funcție de distanța dintre armături

3. Materialul dielectric

Toți ceilalți factori fiind egali, o permittivitate mai mare a materialului dielectric se traduce printr-o capacitate mai mare a condensatorului; o valoare mai mică a permittivității înseamnă o capacitate mai mică. Deși explicația este puțin mai complicată, unele materiale oferă o opozitie mai mică fluxului pentru o anumită valoare a forței câmpului electric. Materialele cu o permittivitate mai ridicată permit existența unui flux mai mare (oferează mai puțină opozitie), și prin urmare sarcina colectată pe armături poate fi mai mare, oricare ar fi valoarea forței câmpului (tensiunea aplicată la bornele condensatorului).

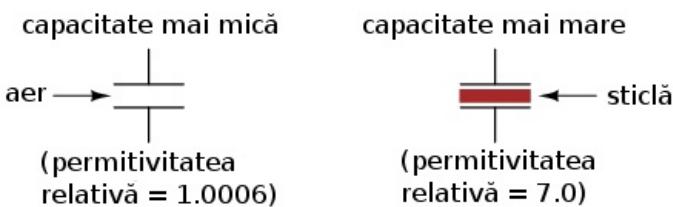


Figure 495: capacitatea condensatorului în funcție de permittivitatea dielectricului

În acest context, „relativ” se referă la permittivitatea materialului relativ la permittivitatea vidului. Cu cât numărul este mai mare, cu atât este mai mare permittivitatea materialului. Sticla, de exemplu, cu permittivitatea relativă 7, are de șapte ori permittivitatea 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.

În următorul tabel sunt prezentate permittivitățile 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 to 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
Sticla	4.9 - 7.5
Ulei de castor	5.0
Lemn (Mesteacăn)	5.2
Mică, Muscovit	5.0 - 8.7
Mică, Sticla	6.3 - 9.3
Porțelan, Steatit	6.5
Alumina	8.0 - 10.0
Apă distilată	80.0
Titanat-Bariu-Stronțiu	7500

O valoare aproximativă pentru capacitatea unui condensator poate fi calculată cu următoarea formulă:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

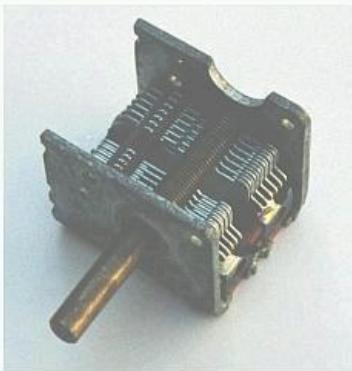
Figure 496: formula de calcul a capacității condensatorului

4. Condensatorul variabil

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

A VARIABLE CAPACITOR (AIR DIELECTRIC)

Maximum plate overlap:
maximum capacitance



Minimum plate overlap:
minimum capacitance

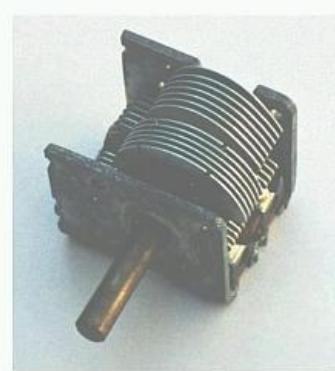
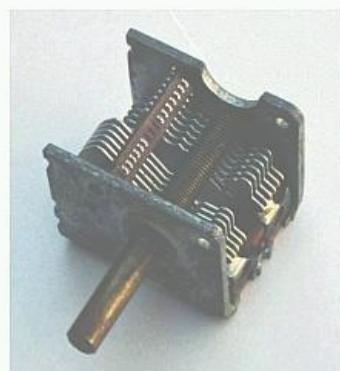


Figure 497: condensator variabil

Pe măsură ce rotim axul, gradul de suprapunere al armăturilor variază, afectând aria efectivă în care poate exista campul electric între cele două armături.

13.4 Conectarea condensatorilor în serie și paralel

1. 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 armături ale tuturor condensatorilor individuali. După cum am văzut în secțiunea precedentă, creșterea distanței dintre armături, toți ceilalți factorii fiind egali, rezultă în scăderea capacitații.

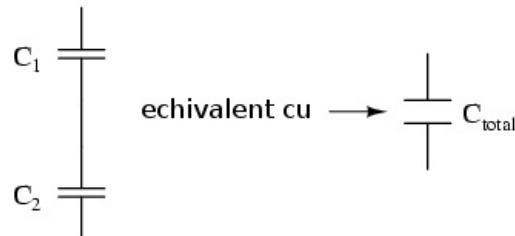


Figure 498: conectarea condensatorilor în serie

Formula pentru calculul capacitații serie totale este asemănătoare celei pentru calcularea rezistenței echivalente la conectarea rezistorilor în paralel.

$$C_{\text{total}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$

Figure 499: formula capacitații serie

2. Conectarea în paralel

Atunci când conectarea condensatorilor se realizează în paralel, capacitatea echivalentă totală este suma capacitaților 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 capacitații.



Figure 500: conectarea condensatorilor în paralel

Formula pentru calculul capacității parallele totale este asemănătoare celei pentru calcularea rezistenței echivalente la conectarea rezistorilor în serie:

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

Figure 501: formula capacității parallele

13.5 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.

13.5.1 Tensiunea maximă, polaritate 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:

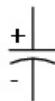


Figure 502: simbolul condensatorului electrolitic

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.

13.5.2 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 „perfect”. În realitate, un condensator are atât o rezistență serie cât și o rezistență paralel (de scurgere) suprapuse peste caracteristicile sale pur capacitive:

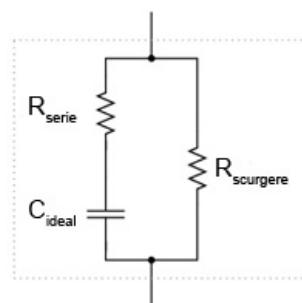


Figure 503: circuitul echivalent al unui condensator

Din fericirea, realizarea condensatoarelor cu o rezistență serie foarte mică și rezistență de scurgere foarte mare, este relativ ușoară.

13.5.3 Mărimea fizică a condensatoarelor

În majoritatea aplicațiilor, mărimea (cât mai mică) joacă un rol ingineresc important. Cu cât componente sunt mai mici, cu atât mai multe elemente pot fi introduse 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 tend să fie în opozиție 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 reduce 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 Farad) prin simpla observare a mărimii acestuia. Un condensator de o anumită marime, 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

14.1 Magneți permanenți

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 Orientalul Îndepărtat ca și subiect de curiozitate. Mai târziu este folosit în navegație, utilizând descoperirea că o bucată din acest material neobișnuit tinde să se orienteze pe direcția nord-sud dacă este lăsat să se rotească liber (suspectat la capătul unui fir sau plutind pe apă). În 1269, Peter Peregrinus 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. 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 Peregrinus, 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:

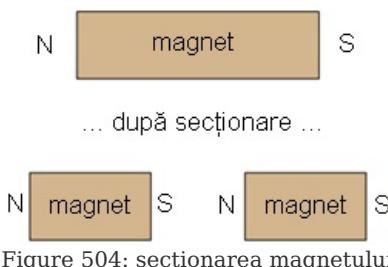


Figure 504: secționarea magnetului

Asemenea sarcinilor electrice, există doar două tipuri de poli: nord și sud, prin analogie cu sarcinile pozitive și negative. Asemenea sarcinilor electrice, polii asemănători se resping, iar ce opuși se atrag. Această forță, asemenea forței cauzate de electricitatea statică, se extinde invizibil prin spațiu și poate chiar să treacă prin obiecte precum hârtia sau lemnul fără ca intensitatea sa să scadă semnificativ.

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. Bucătile 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:

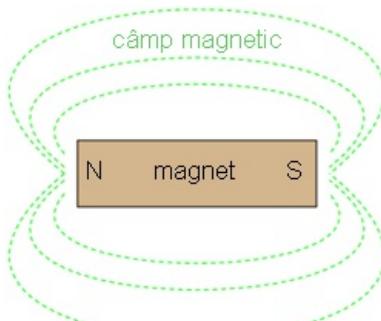


Figure 505: liniile câmpului magnetic pentru un magnet permanent

Precum este cazul oricărui tip de câmp (electric, magnetic, gravitațional), cantitatea totală, sau efectul căpului este desemnată prin noțiunea de *flux*, iar „împingerea” ce dă naștere fluxului în spațiu poartă denumirea de *forță*. Termenul de „tub” a fost inițial desemnat de Michael Faraday pentru desemnarea a ceea ce acum sunt denumite liniile 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 liniilor discrete și constante există cu adevărat în realitate.

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 magnetilor 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.

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 reorienteză în direcția câmpului produs de magnetul și 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:

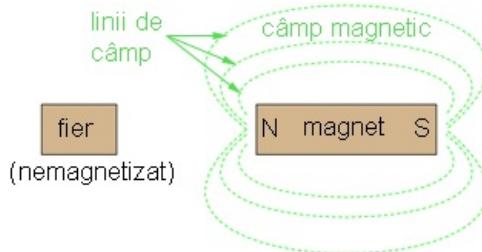


Figure 506: magnetizarea unui corp de fier

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 aşa fel încât să fie atras de magnet:

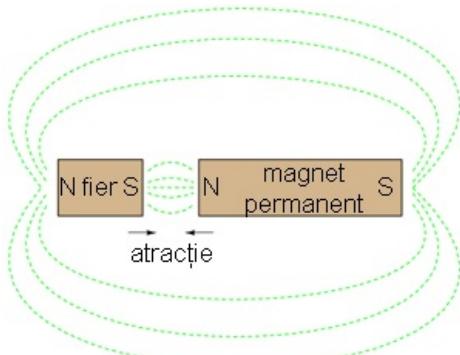


Figure 507: magnetizarea unui corp de fier

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 (magnetizate ușor) sunt clasificate fie ca și materiale *paramagnetic* (ușor magnetice) sau *diamagnetic*. Dintre cele două, materialele diamagnetice sunt cele mai ciudate. În prezență unui câmp magnetic extern, devin ușor magnetizate în direcție opusă, astfel că resping câmpul magnetic extern!

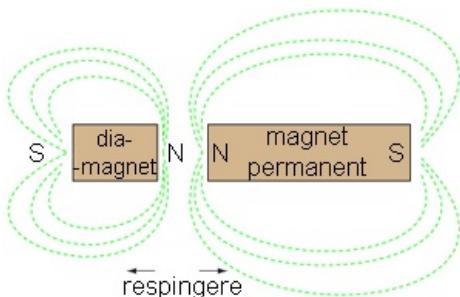


Figure 508: magnetizarea unui material diamagnetic

În cazul în care un material feromagnetic își menține starea de polarizare și după închiderea câmpului magnetic extern, spunem că acest material are *remanență* (magnetică) bună. Această proprietate este o calitate necesară pentru un magnet permanent.

14.2 Electromagnetism

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* relației dintre electricitate și magnetism, fizicianul danez Hans Christian Oersted a demonstrat până la urmă experimental acest lucru în față 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 a accidentală a deschis drumul spre o nouă ramură a științei: electromagnetism.

Experiente 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 aceastea sunt închise iar degetul mare este orientat în direcția curentului:

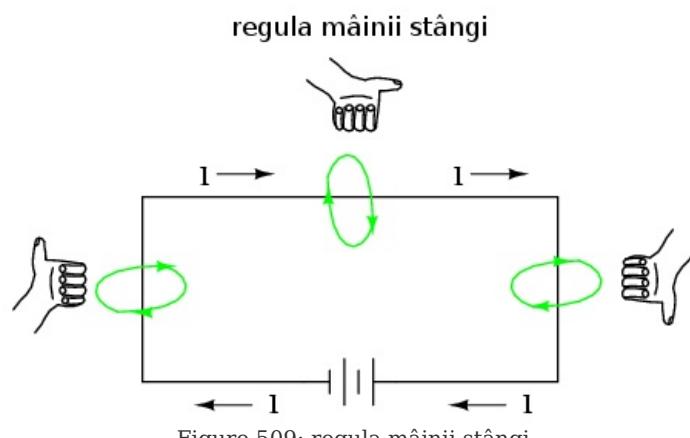


Figure 509: regula mâinii stângi

Liniile câmpului magnetic încercuiesc conductorul de curent și nu au un pol „nord” sau „sud” bine definit. În acest caz însă, forța câpului este foarte slabă, pentru valori normale ale curentului, fiind capabilă să deplaseze acul unui compas de exemplu, dar nu mai mult de atât. Pentru a crea un câmp magnetic mai puternic (forță și flux mai mari) cu aceeași valoare a curentului electric, putem forma o serie de bucle cu ajutorul firului; în jurul acesteia, câmpurile magnetice se vor uni pentru a forma un câmp magnetic mai puternic cu o polaritate nord-sud bine definită.

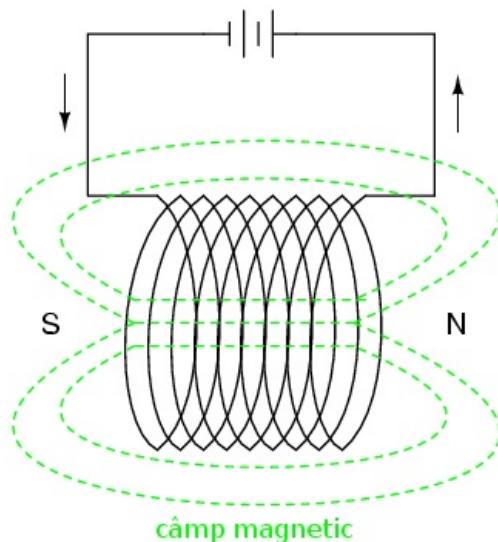


Figure 510: formarea buclei de curent pentru creșterea câmpului magnetic

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

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 a maximiza acest efect și utilizarea lui pentru un anumit scop. Electromagnetii sunt folosiți în industrie, cercetare, aparatură medicală și bunuri de larg consum.

Probabil că cel mai bun exemplu de utilizare al electromagnetelor este *motorul electric*. 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 plin aplicarea unui curent prin acesta. În principiu, acesta este un dispozitiv ce controlează electricitatea cu ajutorul electricității.



Figure 511: închiderea contactului la trecerea curentului prin electromagnet

Întrerupătoarele pot fi construite pentru a acționa multiple contacte, sau pentru a funcționa „invers” (deschiderea contactelor la trecerea curentului prin electromagnet și *inchiderea* lor la închiderea câmpului magnetic).

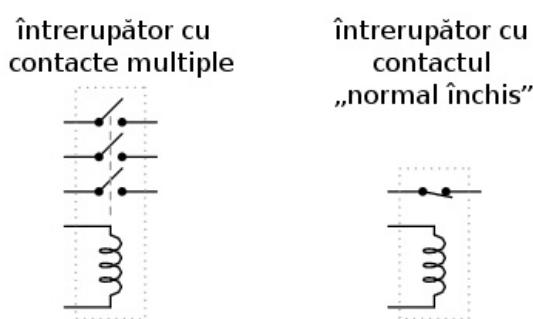


Figure 512: întrerupător cu contacte multiple și contact normal închis

14.3 Unități de măsură ale câmpului magnetic

În cadrul discuției despre magnetism, vom întâlni următoarele mărimi:

Forță 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.

Reluctanță - 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, analoag rezistenței specifice pentru un material conductiv (ρ), doar că relația este inversă, o permeabilitate mai mare înseamnă o trecere mai ușoară a liniilor câmpului magnetic.

Mai jos este tabelul cu unităile 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)
reluctanță	-	Amper / Weber ($A\ Wb^{-1}$)
permeabilitatea	μ	Henry / metru ($H\ m^{-1}$)

Relațiile dintre tensiunea magnetomotoare, fluxul magnet 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:

O comparație a legii lui Ohm pentru
circuitele electrice și magnetice

$$\begin{array}{ll} \mathbf{E = IR} & \mathbf{\text{mmf} = \Phi R} \\ \mathbf{\text{electric}} & \mathbf{\text{magnetic}} \end{array}$$

Figure 513: comparație pentru legea lui Ohm între circuitele electrice și magnetice

Stiind faptul că permeabilitatea este asemănătoare rezistenței specifice (inversă), ecuația pentru aflarea reluctanței materialului magnetic este similară celei pentru aflarea rezistenței conductorului:

**comparație între rezistență
magnetică și electrică**

$$\begin{array}{ll} \mathbf{R = \rho \frac{1}{A}} & \mathbf{\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu A}} \\ \mathbf{\text{electric}} & \mathbf{\text{magnetic}} \end{array}$$

Figure 514: comparație între rezistență electrică și cea magnetică

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 trece 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 electric. Acest efect este analog existenței unui rezistor ce și-ar modifica rezistența pe măsură ce curentul ce-l strâbate variază.

14.4 Permeabilitatea și saturarea

Nonliniaritatea permeabilității materialelor poate fi trasată pe un grafic pentru o mai bună înțelegere a ei. Plasăm intensitatea câmpului (H), egală cu tensiunea magnetomotoare (tmm) împărțită la lungimea materialului, pe axa orizontală. Pe axa verticală, plasăm densitatea fluxului (B) egală cu fluxul total împărțit la 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 de măsură.

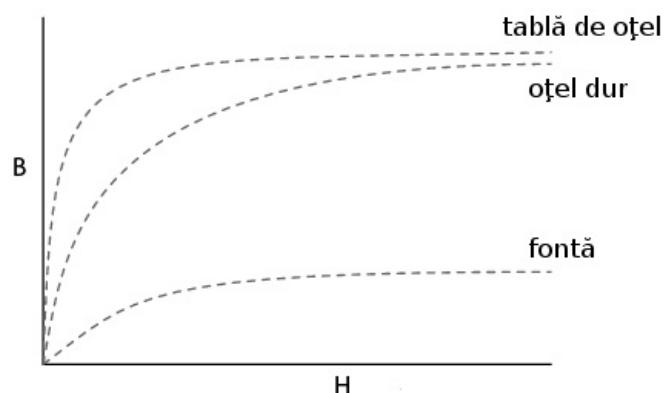


Figure 515: curbe de magnetizare pentru diferite materiale

Acseste curbe poartă denumirea de *curbe normale de magnetizare* sau *curbe B-H* pentru orice material. Putem observa de pe grafic că densitatea fluxului pentru oricare din cele trei materiale are o creștere neliniară (puternic la început, apoi din ce în ce mai scăzută) odată cu creșterea valorii intensității câmpului. Acest efect este cunoscut sub numele de *saturare*. 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 aliniere de-al 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 crearea unei densități a fluxului din ce în ce mai mică (B). Saturația este un fenomen întâlnit doar în cazul electromagnetelor cu miez de fier. Electromagneții cu miez de aer nu se saturează, dar, pe de altă parte, nici nu produc valori aşa de mari ale fluxului magnetic pentru același număr de spire (bucle) și aceeași valoare a curentului. Un alt fenomen al analizei curbelor de magnetizare este cel de *histerezis*. Ca și termen general, histerezisul înseamnă o întârziere intrarea și ieșirea unui sistem după o modificare de direcție. 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. Să folosim același grafic, dar să extindem axele pentru a indica atât valori pozitive cât și negative. Aicăm întâi o forță magnetică (curent prin spirele electromagnetului) crescătoare. Observăm creșterea densității fluxului după curba normală de magnetizare:

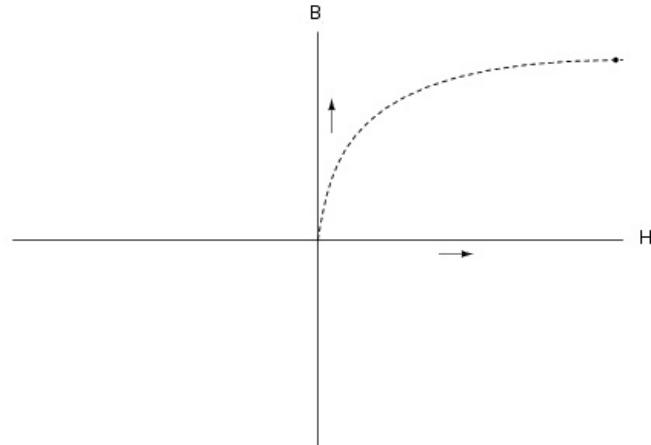


Figure 516: curba de histerezis

Apoi, oprim curentul prin infășurarea electromagnetului și observăm ce se întâmplă cu fluxul; lăsăm prima curbă pe grafic.

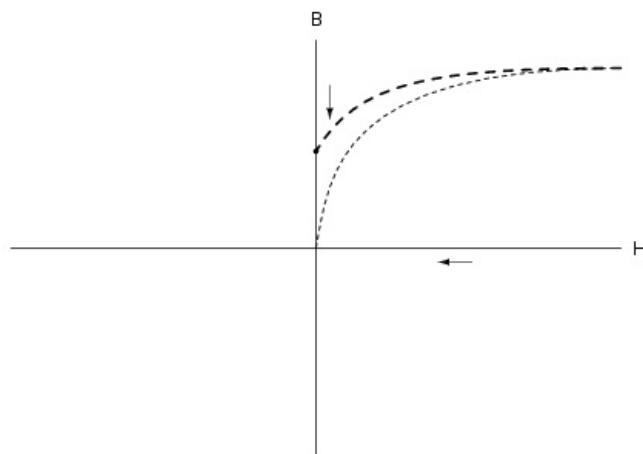


Figure 517: curba de histerezis

Datorită remanenței materialului, vom avea un flux magnetic chiar și fără existența forței aplicate mai înainte (nu există curent prin infășurare). Electromagnetul se comportă în acest moment precum un magnet permanent. Următorul pas este să aplicăm un câmp magnetic cu aceeași forță dar în direcția opusă.

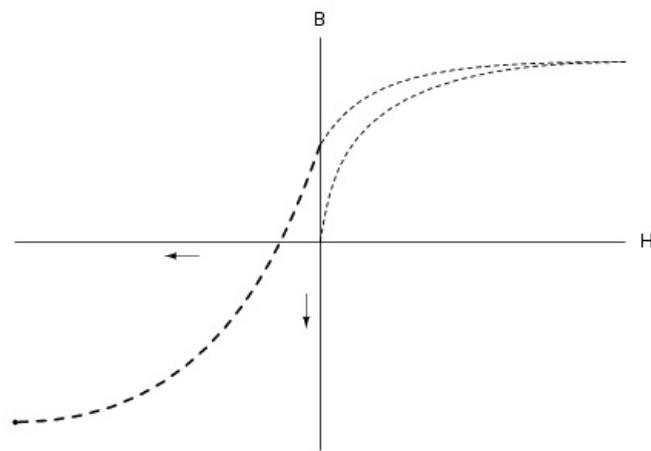


Figure 518: curba de histerezis

Densitatea fluxului magnet a atins acum un punct echivalent celui în care se află în cazul aplicării unei intensități magnetice (H) pozitive, doar că se află în direcție opusă, negativă. Să observăm comportamentul electromagnetului dacă întrerupem din nou curentul prin infășurare:

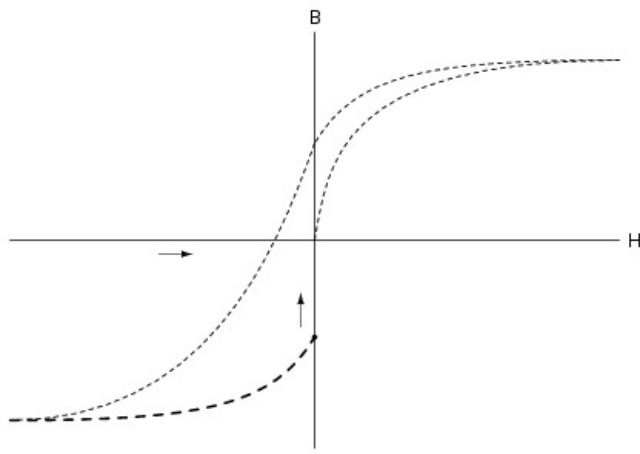


Figure 519: curba de histerezis

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. Dacă re-introducem curentul prin electromagnet, vom vedea că densitatea fluxului magnetic atinge din nou punctul maxim inițial (dreapta sus pe grafic):

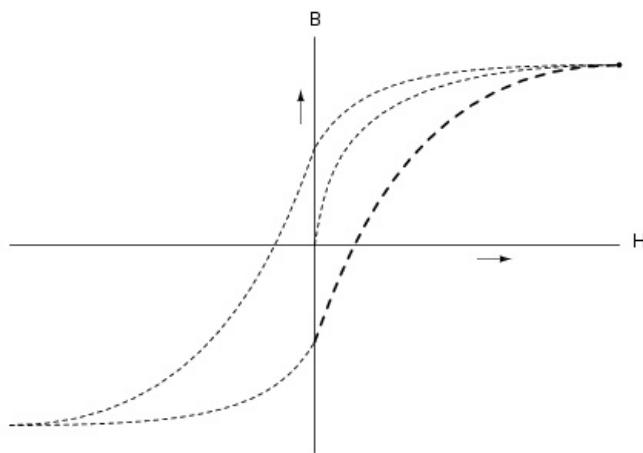


Figure 520: curba completă de histerezis

Această curbă în formă de „S” se numește *curba de histerezis* al 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 densități 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.

În alte cazuri, precum stocarea informațiilor cu ajutorul materialelor magnetice (hard-disk-uri de calculator 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 întăriminarea histerezisului feritei atenuază forță semnalului de zgomot. Curba de histerezis pentru ferită este destul de extremă:

Curba de histerezis pentru ferită

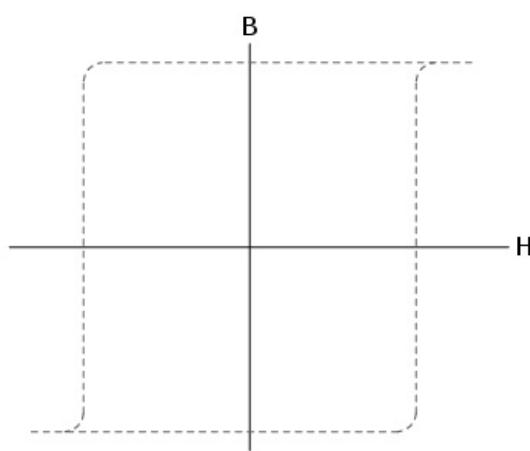


Figure 521: curba de histerezis pentru ferită

Deși Oersted a fost cel care a descoperit existența electromagnetismului, totuși, [Michael Faraday](#) a fost cel care a deschis drumul *generării* electricității prin *inducție electromagnetică*. 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. 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. Important: intensitatea câmpului trebuie să crească sau să scadă în intensitatea *perpendicular* pe fir (asfel că liniile de câmp să „taie” conductorul); în caz contrar, nu va exista tensiune inducătă în fir:

Inducția electromagnetică

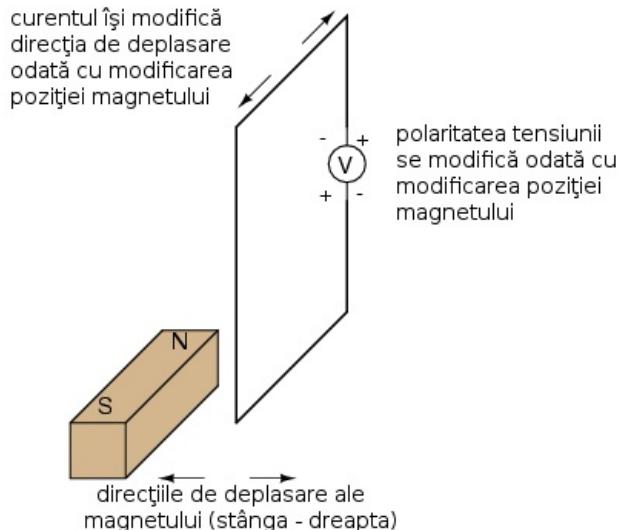


Figure 522: inducția electromagnetică

Expresia matematică pentru valoarea tensiunii generate în funcție de fluxul câmpului magnetic, expresie dedusă tot de Faraday, este următoarea (observați utilizarea litere „e” pentru tensiune. Aceasta se referă la tensiuni *instantanee*, sau tensiune la un anumit moment din timp, și nu o tensiune constantă, fixă):

$$e = N \frac{d\Phi}{dt}$$

Figure 523: ecuația lui Faraday pentru inducția electromagnetică

Termenii „d” sunt specifici analizei matematice și reprezintă rata de variație (creștere, deșcrestere) a fluxului magnetic cu timpul. „N” este numărul de spire din înfășurare (atunci când aceasta este folosită, pentru o eficiență electromagnetică maximă). Fenomenul este utilizat practic pentru construcția generatoarelor electrice, folosind putere mecanică pentru deplasarea unui câmp magnetic prin preajma înfășurărilor (firilor) pentru generarea tensiunii. Aceasta nu este însă singura aplicație practică. 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 aceluiajudecăt câmp magnetic variază cu variația curentului prin fir, putem vedea că un fir este capabil de a genera unei tensiuni electrice *de-a lungul propriei lungimi* prin simpla variația 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 aceluiasi fir. Dacă fluxul magnetic este mărit prin îndoarea 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*, dispozitiv studiat pe larg în următorul capitol.

14.6 Inductanța mutuală. Transformatorul

Dacă două înfășurări străbătute de curent electric sunt aduse una în vecinătatea celeilalte, asfel încât câmpul magnetic al uneia să se cupleze cu cealaltă, în ce-a de a două înfășurare se va genera o tensiune electrică. Acest efect se numește *inductanță mutuală*: când aplicarea unei tensiuni asupra unei înfășurări induce o tensiune în cealaltă.

Un dispozitiv special conceput pentru producerea efectului de inductanță mutuală între două sau mai multe înfășurări este *transformatorul*.

Deoarece tensiunea inducătă pe cale magnetică poate fi realizată doar atunci când valoarea fluxului câmpului magnetic este *variabilă* față de fir, cuplajul magnetic (prin urmare și inductanță mutuală) dintre două înfășurări poate lua naștere doar în cazul curentului alternativ. Singura aplicație în curent continuu pentru inductanță mutuală este atunci când există o cale de a pori și opri puterea prin înfășurare cu ajutorul unui întretrerupător; se crează în acest caz o tensiune de curent continuu *pulsatoare*, iar tensiunea inducătă va atinge valori maxime la fiecare puls.

O proprietate extremă 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 inducătă în cealaltă înfășurare, nealimentată, va fi egală cu valoarea tensiunii de alimentare înmulțită cu valoarea raportului dintre numărul spirelor înfășurărilor (primară și secundară). De asemenea, curentul prin înfășurarea secundară se va comporta exact invers: dacă tensiunea de alimentare (din înfășurarea primară) crește, curentul va deșcrease cu aceeași rată. Acest comportament al transformatorului este analog unui angrenaj mecanic:

Reducerea cuplului



Transformator „cotorâtor” de tensiune

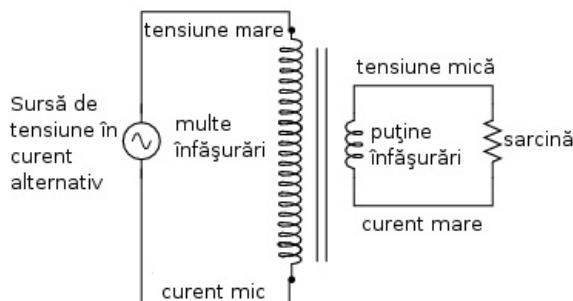


Figure 524: analogie între reducerea cuplului folosind roți dințate și transformatorul cotorâtor de tensiune

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 cotorâtor de tensiune. Valoarea curentului prin fiecare înfășurare este exact inversă față de situația precedentă, cea a tensiunii.

15 Bobina

15.1 Câmpul magnetic și inductanță

Atunci când un conductor este parcurs de curent electric (deplasarea electronilor), se va forma tot timpul un câmp magnetic în jurul acestuia. Acest efect se numește *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 corpuși și pot afecta materia la distanță. Câmpurile magnetice se pot măsura prin două mărimi: *forță* și *fluxul*. *Forța* (câmpului) magnetic(ă) este valoarea „forței de împingere” ce acționează la distanță. *Fluxul* (câmpului) magnetic este cantitatea totală, sau efectul câmpului prin spațiu. Aceste două mărimi sunt aproximativ similare tensiunii („împingere”) și curentului (curgere) printr-un conductor, cu toate că fluxul poate exista și în vid (fără mișcarea particulelor precum electronii), pe când curentul poate exista doar acolo unde există electroni liberi pentru a se deplasa. Fluxul (magnetic) poate întâmpina o anumită opozitie în spațiu, analog rezistenței întâmpinate de electroni în conductori. Valoarea fluxului magnetic dezvoltat în spațiu este proporțională cu cantitatea forței magnetice aplicate împărțită la cantitatea opozitiei față de flux. Precum tipul conductorului determină rezistența sa specifică față de curentul electric, și tipul materialului ce ocupă spațiul în care este aplicat câmpul magnetic determină opozitia specifică față de fluxul magnetic.

Pe când un flux electric dintre doi conductori permite acumularea electronilor liberi în cadrul acelor conductori, un flux magnetic permite acumularea unei anumite „inertii” de deplasare a electronilor prin conductorul ce produce câmpul.

Bobinele sunt componente special concepute, pentru a profita de acest fenomen, sub formă 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, numit *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 design au efect final asupra performanțelor și caracteristicilor bobinelor.

Simbolul unei bobine, precum cel al condensatorului, este simplu, reprezentând înfășurarea firului. Deși o înfășurare generală este simbolul oricărei bobine, cele cu miez sunt căteodată 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:

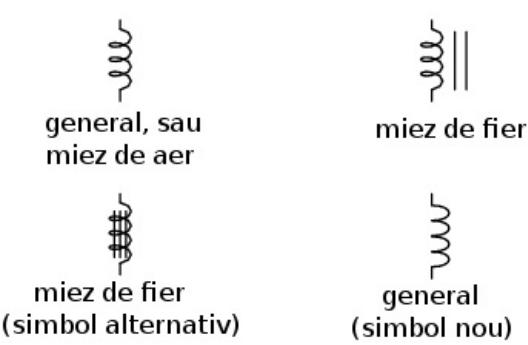


Figure 525: simbolul bobinei

Curentul electric produce în cazul de mai sus un câmp magnetic concentrat în jurul bobinei, iar acest flux magnetic reprezintă o stocare de energie cinetică datorată deplasării electronilor prin înfăşurare. 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.

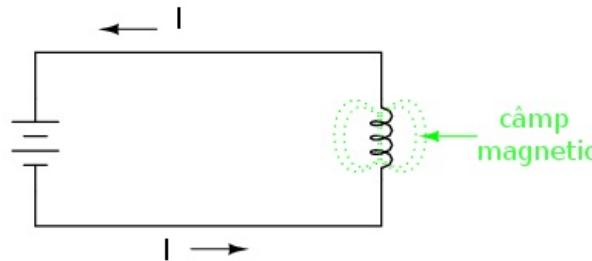


Figure 526: câmpul magnetic în jurul unei bobine conectate în circuit

Datorită faptului că bobinele stochează energie cinetică a electronilor ce se deplasează prin înfăşurare sub forma câmpului magnetic, comportamentul acestor dispozitive este foarte diferit de cel al rezistorilor (care pur și simplu disipa energie 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 decrește, aceasta „rezistă” variației producând o tensiune la bornele sale de polaritate inversă (opusă) variației.

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 deacrească în forță, iar această variație a câmpului magnetic auto-induce o cădere de tensiune de polaritate opusă.

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 corporilor de a se opune variației (schimbărilor) 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:

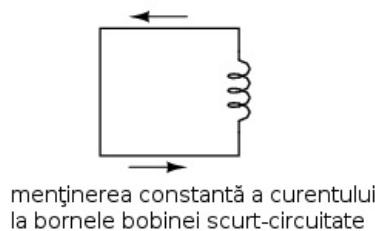


Figure 527: menținerea constantă a curentului la bornele bobinei scurt-circuitate

Practic însă, abilitatea unei bobine de susținere individuală a unui curent la bornele sale se poate realiza doar cu ajutorul firelor supraconductoare, deoarece rezistența inherentă oricărui conductor normal este suficientă pentru disiparea rapidă a puterii din circuit și descreșterea a curentului fără vreo sursă externă de putere.

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 energia stocată sub formă de câmp magnetic crește. Observați polaritatea căderii de tensiune față de direcția curentului:

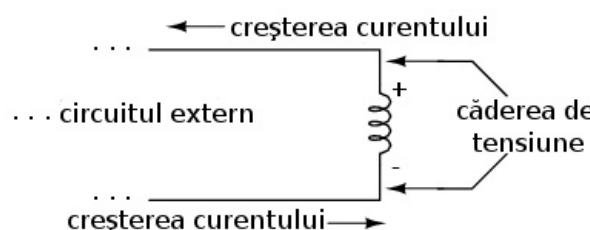


Figure 528: bobina se comportă ca o sarcină atunci când absoarbe curent din circuitul exterior

Atunci când curentul prin bobină decrește, căderea de tensiune generată de aceasta este îndreptată spre direcția de deplasare a electronilor, comportamentul fiind asemenea unei surse. În această situație, spunem că bobina se descarcă, deoarece stocul de energie decrește, fiind eliberată în circuitul exterior. Observați polaritatea căderii de tensiune față de direcția curentului:

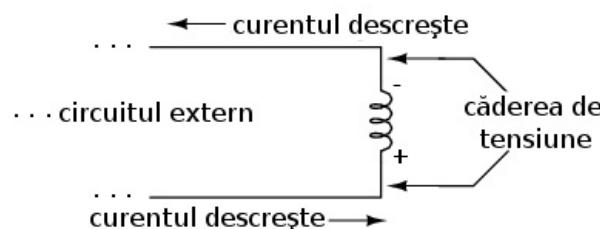


Figure 529: bobina se comportă precum o sursă atunci când eliberează curent în circuitul exterior

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 energie 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 înfășurarea sa.

Măsura capacitatei unei bobine de stocare a energiei pentru o anumită valoare a curentului se numește *inductanță*. Inductanță măsoară și intensitatea opozitiei variației de curent (valoarea tensiunii auto-induse pentru o anumită rată de variație a curentului). Simbolul acesta este „L”, iar unitatea de măsură este Henry, prescurtat „H”.

15.2 Relația tensiune-curent pentru bobină

Bobinele nu au o „rezistență” stabilă precum rezistențele sau conductoarele. Totuși, există o relație matematică dintre tensiunea și curentul unei bobine, astfel:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

Figure 530: Legea lui Ohm pentru bobine

Forma acestei ecuații este asemănătoare celei pentru condensatoare.

Precum este și cazul condensatoarelor, comportamentul bobinelor depinde de variabila timp. Pe lângă rezistență 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.

Să presupunem o bobină perfectă (rezistență de 0 ohmi a firelor) introdusă într-un circuit în care putem varia cantitatea de curent cu ajutorul unui potențiometru conectat ca și rezistor variabil:

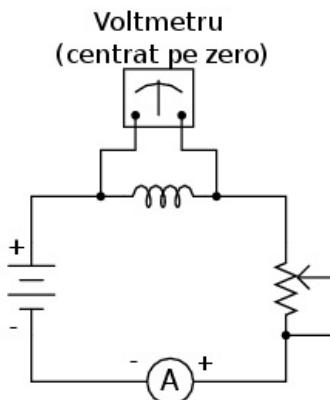


Figure 531: curent constant printr-o bobină

Dacă mecanismul potențiometrului rămâne într-o poziție fixă (perie nu se mișcă), ampermetrul conectat în serie va citi o valoare constantă a curentului, iar voltmetrul conectat în paralel cu bobina va înregistra 0 volți. În acest scenariu, rata instantanea de variație a curentului (di/dt) este egală cu zero, deoarece curentul este stabil (constant). Ecuație ne spune că având o variație de 0 amper pe secundă (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 ($d\Phi/dt = \text{Weber pe secundă}$), nu va există nicio cădere de tensiune în lungul bobinei datorată inducției.

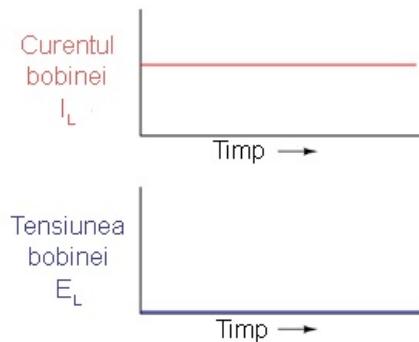


Figure 532: relația curent-tensiune în cazul bobinei - curent constant

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:

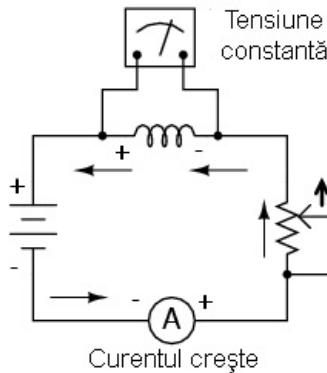


Figure 533: curent variabil printr-o bobină

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 inductanță bobinei în Henry (de asemenea fixă), rezultă într-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 aşa cum rezultă din ecuația inducției lui Faraday: $e = N(d\Phi/dt)$. Polaritatea aceastei tensiuni auto-induse 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.

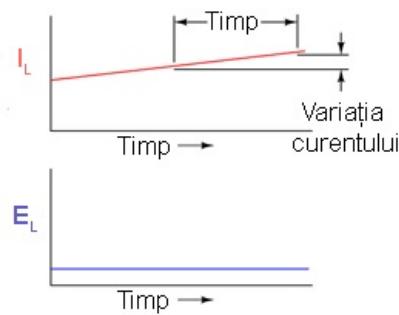


Figure 534: relația curent-tensiune în cazul bobinei - rata de variație constantă a curentului

Modificând rata de creștere a curentului prin bobine prin deplasarea în sus a periei potențiometrului la diferite viteze rezultă în valori diferite ale căderilor de tensiune la bornele bobine, cu aceeași polaritate ca și mai înainte (opusă creșterii curentului).

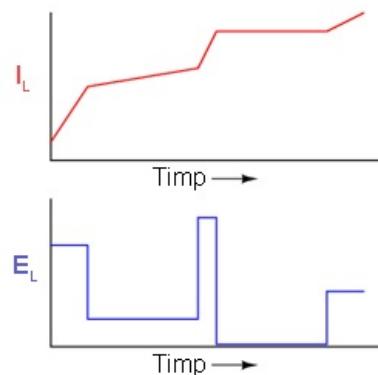


Figure 535: relația curent-tensiune în cazul bobinei - rata de variație a curentului nu este constantă

Vedem că și în acest caz avem de a face cu funcția *derivată* în cazul bobinei. În termenii analizei matematice, spunem că tensiunea indusă de-a lungul bobinei este *derivata curentului prin bobină*, adică, tensiunea este proporțională cu rata de variație a curentului în funcție de timp.

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:

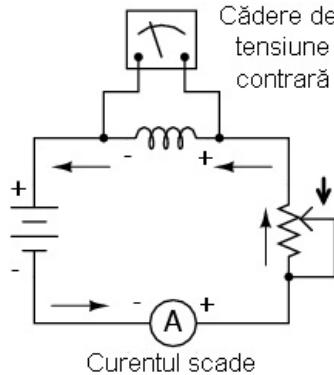


Figure 536: curent variabil printr-o bobină

Valoarea tensiunii produse de bobina va depinde de rata (viteza) de descreștere a curentului prin aceasta. Conform legii lui Lenz, tensiunea indușă 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.

Din nou, cantitatea de tensiune la bornele unei bobine perfect este direct proporțională cu rata variației curentului prin aceasta. Singura diferență între cazurile de creștere și descreștere ale curentului este polaritatea tensiunii induse. Pentru aceeași rată de creștere sau descreștere (variație) a curentului cu timpul, magnitudinea (valoarea absolută) a tensiunii va fi aceeași. De exemplu, o variație de $di/dt = 2 \text{ A/s}$ va produce aceeași cantitate de tensiune indușă la bornele unei bobine precum o variație de $di/dt = -2 \text{ A/s}$, însă de polaritate diferită.

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

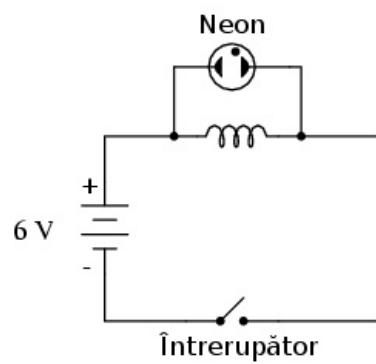


Figure 537: circuit electric

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 volți. Când întrerupătorul este închis, bobina se va opune pentru scurt timp variației curentului de la 0 (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 volți produși de baterie, sau de căderea mică de tensiune datorată variației curentului prin bobină la închiderea întrerupătorului:

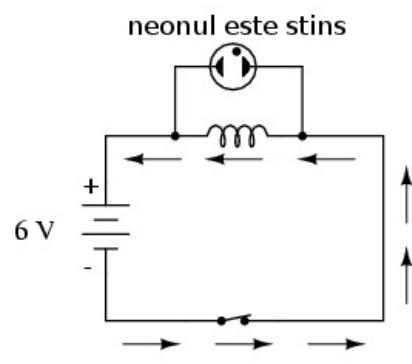


Figure 538: circuit electric

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:

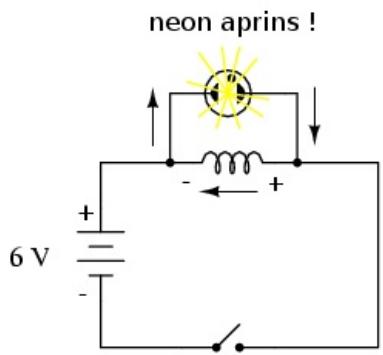


Figure 539: circuit electric

Pentru efect maxim, marimea bobine ar trebui să fie cât mai mare posibil (o inductanță de cel puțin 1 Henry).

15.3 Factori ce influențează inductanță

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:

1. Numărul spirelor din înfășurare

Toți ceilalți factori fiind egali, un număr mai mare de spire în înfășurarea bobine 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.



Figure 540: valoarea inductanței create de o bobină în funcție de numărul de spire din înfășurare

2. Aria înfășurării

Toți ceialți factorii fiind egali, o aria mai mare a înfășurării (privind în lungul înfășurării la secțiunea transversală a acesteia) rezultă într-o inductanță mai mare, și invers.

Explicație: O aria mai mare a înfășurării prezintă o opozitie mai mică față de formarea fluxului magnetic, pentru o anumită valoare a forței câmpului magnetic.

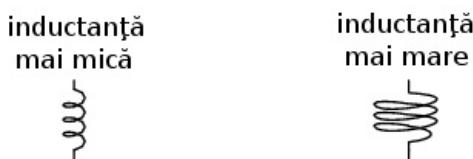


Figure 541: valoarea inductanței create de o bobină în funcție de aria înfășurării

3. Lungimea înfășurării

Toți ceialți factorii fiind egali, cu cât lungimea înfășurării este mai mare, cu atât inductanță este mai mică, și invers.

Explicație: O cale mai lungă pentru fluxul magnetic rezultă într-o opozitie crescută față de formarea aceluiaflux, pentru o anumită valoare a forței magnetice.

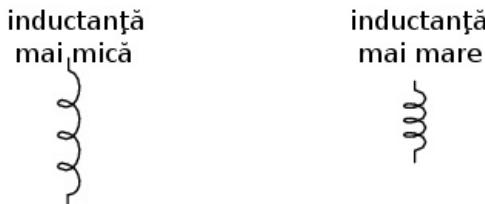


Figure 542: valoarea inductanței create de o bobină în funcție de lungimea înfășurării

4. Materialul miezului

Toți ceialți factorii fiind egali, cu cât permeabilitatea magnetică 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.

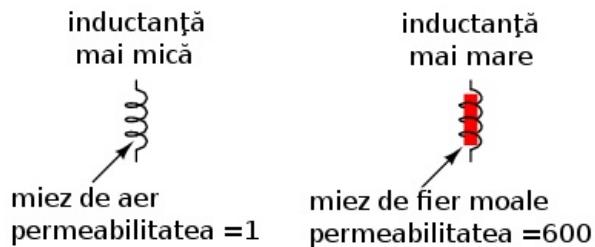


Figure 543: valoarea inductanței create de o bobină în funcție de materialul miezului - aer vs. fier

5. Formula de calcul a inductanței

O aproximare pentru calcularea inductanței oricărei înfășurări se poate obține cu următoarea formulă:

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l}$$

Figure 544: formula de calcul a inductanței

Această formulă este doar aproximativă, deoarece permeabilitatea magnetică variază odată cu variația intensității câmpului magnetic (vezi neliniaritatea 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 răsfrângă asupra inductanței bobinei. La construcția bobinelor se încercă minimizarea acestor efecte prin realizarea bobinei în aşa fel încât densitatea fluxului magnetic nu atinge niciodată nivelul de saturare, 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.

15.4 Bobine serie și paralel

1. Inductanța bobinelor în 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.

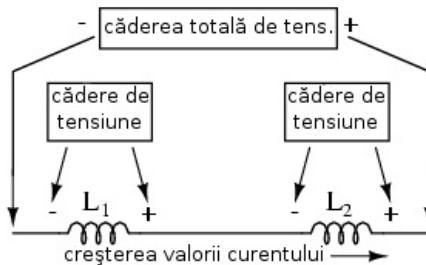


Figure 545: bobine legate în serie

Asfel, inductanța totală pentru bobinele serie este mai mare decât inductanțele individuale ale bobinelor. Formula pentru calcularea inductanței serie este asemănătoare celei pentru calculu rezistențelor în serie:

Inductanța bobinelor serie

$$L_{\text{total}} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

Figure 546: inductanța totală a bobinelor serie

2. Inductanța bobinelor în 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 fracțiune 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.

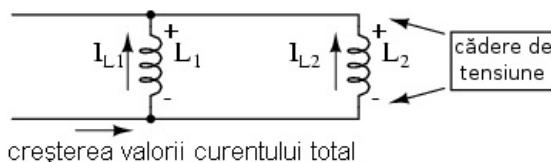


Figure 547: bobine legate în paralel

Prin urmare, inductanța totală este mai mică decât valoarea inductanței ce ar fi fost posibilă pe fiecare bobină luată în parte. Formula de calcul al inductanței paralele are aceeași formă ca și a rezistențelor conectate în paralel:

Inductanța bobinelor paralel

$$L_{\text{total}} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}}$$

Figure 548: inductanța totală a bobinelor paralel

15.5 Considerații practice (bobina)

Bobinele, la fel ca toate celelalte componente, au anumite limite ce trebuie luate în considerare dacă se dorește operarea eficientă și siguranță a circuitelor din care fac parte.

15.5.1 Curentul maxim printr-o bobină

Bobinele sunt realizate din conductori înfășurați. Orică conductor are o limită maximă a capacitații 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.

15.5.2 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 înfăsurării 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 pro pune serioase probleme inginerești.

15.5.3 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 este că aplicării care necesită capacități sau inductanțe extrem de mari pentru stocarea energiei electrice: bobinele realizate din fier supraconduscoare (rezistență electrică zero) sunt mai practice din punct de vedere al realizării lor decât condensatoarele de aceeași valoare, și probabil sunt și mai mici.

15.5.4 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 acesteia. 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 Constante de timp

16.1 Răspunsul tranzitoriu al condensatorului

Condensatorii 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 voltă la bornele sale, iar un condensator încărcat menține o valoare constantă a tensiunii la bornele sale, asemenea unei baterii. Atunci când aceștia sunt introdusi 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 cădere de tensiune zero la bornele sale, conectată la o sursă de tensiune, se va comporta inițial precum un scurt circuit, „trăgând” 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, începează să mai tragă curent de la această, și se comportă practic precum un circuit deschis.

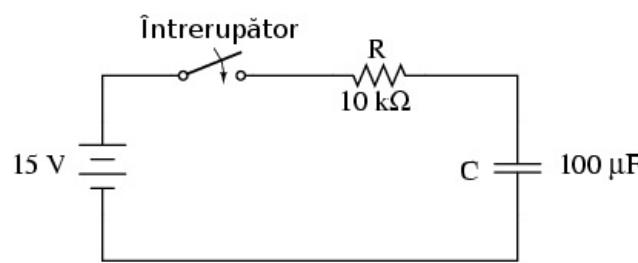
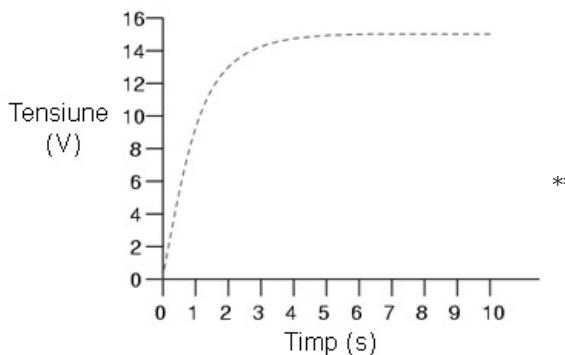


Figure 549: circuit RC

Atunci când întrerupător este închis prima dată, tensiunea la bornele condensatorului (considerat complet descărcat) este de zero voltă; 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 diferența de tensiune dintre baterie și condensator, împărțită la valoarea rezistenței, $10\text{ k}\Omega$. 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.



Timp (secunde)	Tensiune baterie	Tensiune condensator	Curent uA
0	15 V	0 V	1500 uA
0.5	15 V	5.902 V	909.8 uA
1	15 V	9.482 V	551.8 uA
2	15 V	12.970 V	203.0 uA
3	15 V	14.253 V	74.68 uA
4	15 V	14.725 V	27.47 uA
5	15 V	14.899 V	10.11 uA
6	15 V	14.963 V	3.718 uA
10	15 V	14.999 V	0.068 uA

În timp, tensiunea condensatorului se apropi de 15 voltă și curentul se apropi de zero; acest grafic se numește *asimptotic*, adică, ambele variabile se apropi din ce în ce mai tare 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 voltă, iar curentul zero amperi.

16.2 Răspunsul tranzistoriu al bobinei

O bobină complet descărcată (nu există câno 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 voltă (pentru o bobină ideală), curentul rămâne la nivelul maxim, iar bobina se va comporta asemenea unui scurt circuit.

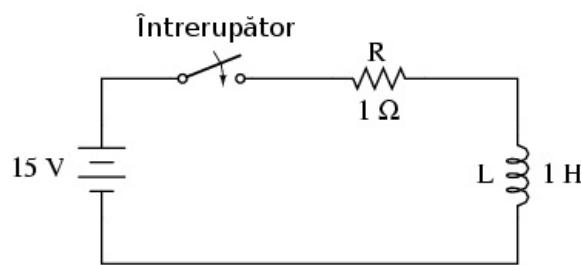
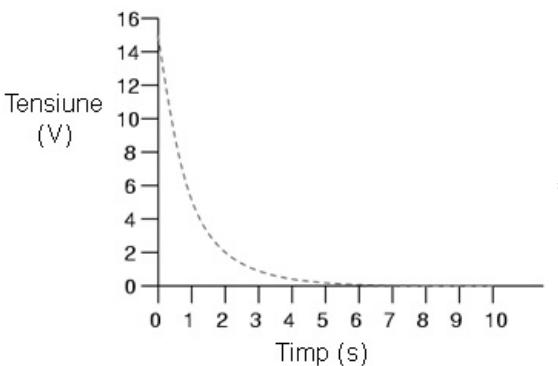


Figure 550: circuit RL

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 egală cu raportul dintre tensiunea furnizată de baterie și rezistența rezistorului conectat în serie (1Ω în acest caz). Comportamentul acest este exact invers față de circuitul RC (rezistor-condensator), unde curentul inițial a fost maxim iar tensiunea pe condensator zero.



Timp (secunde)	Tensiune baterie (V)	Tensiune bobină (V)	Curent (A)
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*.

16.3 Calcularea tensiunii și a curentului

1. Valorile initiale și cele finale

Există o metodă sigură de calcul a tuturor variabilelor dintr-un circuit reactiv (cu bobine și/sau condensatori) de curent continuu. Primul pas este identificarea valorilor inițiale și a celor finale pentru *tensiune* în cazul condensatoarelor și pentru *curent* în cazul bobinelor. La închiderea întreupătorului (sau deschiderea) dintr-un circuit, componentul reactiv încearcă să mențină această cantitate (tensiune pentru condensator, curent pentru bobină) la valoarea existentă înainte de acționarea întreupătorului; această valoarea este prin urmare folosită ca valoare „inițială”. Valoarea finală a acestei mărimi este cantitatea la care ajunge după o durată de timp infinită de la acționarea întreupătorului. Aceasta poate fi determinată în analiza circuitului capacativ 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).

2. Constanta de timp

Următorul pas este calcularea *constantei de timp* a circuitului: timpul necesar pentru ca valorile tensiunii și ale curentului să variază cu aproximativ 63% de la valorile lor de pornire până la valorile finale, într-o situație tranzitorie. Într-un circuit RC serie, constanta de timp este egală cu produsul dintre rezistența totală în ohmi și capacitatea în farazi. Pentru un circuit serie L/R, constanta de timp este egală cu raportul dintre inductanța totală în Henry și rezistența totală în ohmi. În ambele cazuri, constanta de timp se exprimă în secunde și este simbolizată prin litera grecească „tau”, τ :

Pentru circuite RC:

$$\tau = RC$$

Pentru circuite L/R:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Figure 551: constanta de timp pentru circuitele serie RC și L/R

Creșterea și descreșterea valorilor circuitului reactiv tranzistoriu, 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:

$$\text{Procentul variației} = \left(1 - \frac{1}{e^{t/\tau}}\right) \times 100\%$$

Figure 552: formulă

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:

$$\left(1 - \frac{1}{e^1}\right) \times 100\% = 63.212\%$$

Figure 553: formulă

După o perioadă de două constante de timp, procentul variației față de valoarea inițială este:

$$\left(1 - \frac{1}{e^2}\right) \times 100\% = 86.466\%$$

Figure 554: formulă

După zece constante de timp:

$$\left(1 - \frac{1}{e^{10}}\right) \times 100\% = 99.995\%$$

Figure 555: formulă

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, întraga fracție fiind astfel mai mică, iar totalul scăzut din valoarea 1 se apropie eventual spre 1, sau, 100%.

Putem deduce o formulă universală pentru determinarea valorile curentului și ale tensiunii în circuitele tranzistorii, prin înmulțirea acestei valori cu diferența dintre valorile inițiale și cele finale ale tensiunii/curentului:

Formula universală a constantei de timp

$$\text{Variație} = (\text{Final} - \text{Inițial}) \left(1 - \frac{1}{e^{t/\tau}}\right)$$

Unde,

Final = valoarea variabilei după un timp infinit
(valoarea ei finală)

Inițial = valoare inițială a variabilei

e = constanta lui Euler, 2.7182818...

t = timpul, în secunde

τ = constanta de timp a circuitului, în secunde

Figure 556: formula universală de calcul a variației valorilor dintr-un circuit ractiv de curent continuu tranzistoriu

3. Analiza circuitului RC

Să analizăm circuitul RC serie de la începutul capitolului:

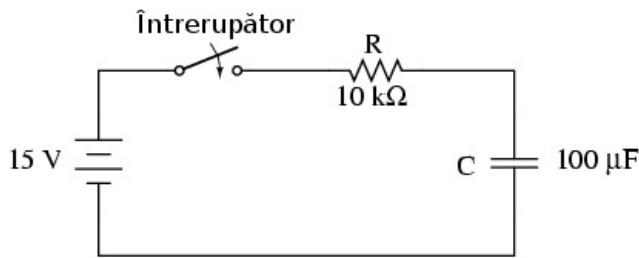


Figure 557: circuit serie RC

Din moment ce constanta de timp (τ) a unui circuit RC serie este produsul dintre rezistență și capacitate, valoarea obținută este de 1 secundă:

$$\tau = RC$$

$$\tau = (10 \text{ k}\Omega)(100 \mu\text{F})$$

$$\tau = 1 \text{ s}$$

Figure 558: formulă

1. Analiza 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 $10\text{ k}\Omega$ iar capacitatea de $100\text{ }\mu\text{F}$ (microfarad).

Dacă inițial condensatorul este complet descărcat (0 V), putem folosi această valoare pentru tensiunea inițială. Valoarea finală va fi tensiunea bateriei, 15 V . Formula universală pentru tensiunea condensatorului în acest circuit arată astfel:

$$\Delta V = (V_f - V_i) \left(1 - \frac{1}{e^{t/\tau}}\right)$$

$$\Delta V = (15\text{ V} - 0\text{ V}) \left(1 - \frac{1}{e^{t/1}}\right)$$

Figure 559: formulă

După 7.25 de secunde de la aplicarea tensiunii la bornele condensatorului (prin închiderea intrerupătorului), tensiunea va crește astfel:

$$\Delta V = (15\text{ V} - 0\text{ V}) \left(1 - \frac{1}{e^{7.25/1}}\right)$$

$$\Delta V = (15\text{ V} - 0\text{ V})(0.99929)$$

$$\Delta V = 14.989\text{ V}$$

Figure 560: formulă

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 la bornele condensatorului după 7.25 s de la închiderea circuitului.

2. Analiza curentului

Aceeași formulă poate fi folosită și pentru determinarea curentului din circuit. Stim că un condensator descărcat se comportă precum un scurt circuit, prin urmare, curentul inițial va fi maximul posibil în circuit:

$$I_{initial} = \frac{15\text{ V}}{10\text{ k}\Omega}$$

$$I_{initial} = 1.5\text{ mA}$$

Figure 561: formulă

Stim de asemenea că valoarea finală a curentului va fi zero, din moment ce condensatorul se va comporta eventual precum un circuit deschis, prin uramre, 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 aceluiasi circuit RC de mai sus:

$$\Delta I = (I_f - I_i) \left(1 - \frac{1}{e^{t/\tau}}\right)$$

$$\Delta I = (0\text{ mA} - 1.5\text{ mA})(0.99929)$$

$$\Delta I = -1.4989\text{ mA}$$

Figure 562: formulă

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 ($1.065\text{ }\mu\text{A}$) 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; afiam apoi curentul prin rezistor (și prin întreg circuitul) folosind legea lui Ohm ($I = E/R$). În ambele cazuri, ar trebui să obținem același răspuns:

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

$$I = \frac{15\text{ V} - 14.989\text{ V}}{10\text{ k}\Omega}$$

$$I = 1.065\text{ }\mu\text{A}$$

Figure 563: formulă

Să analizăm acum circuitul L/R serie de la începutul capitolului:

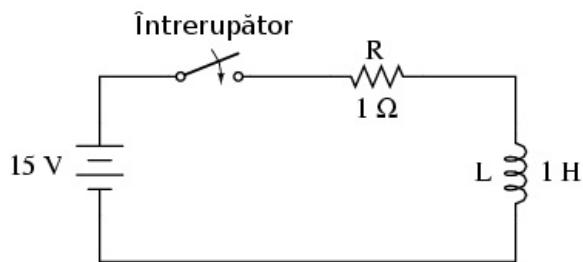


Figure 564: circuitul L/R serie

Cu o inductanță de 1 Henry și o rezistență serie de 1 ohm, constanta de timp a circuitului de față este de 1 secundă:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$\tau = \frac{1 \text{ H}}{1 \Omega}$$

$$\tau = 1 \text{ s}$$

Figure 565: formulă

1. Analiza 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 întretrerupătorul 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 întreterupătorului, aplicăm formula universală astfel:

$$\text{Variația} = (15 \text{ A} - 0 \text{ A}) \left(1 - \frac{1}{e^{3.5/1}}\right)$$

$$\text{Variația} = (15 \text{ A} - 0 \text{ A})(0.9698)$$

$$\text{Variația} = 14.547 \text{ A}$$

Figure 566: formulă

Din moment ce valoarea inițială a curentului a fost zero, valoare acestuia după 3.5 secunde este de 14.547 amperi.

2. Analiza tensiunii

Având doar un singur rezistor în circuit, calculăm mai întâi căderea de tensiune pe acesta pentru timpul de 3.5 s:

$$E_R = (14.547 \text{ A})(1 \Omega)$$

$$E_R = 14.547 \text{ V}$$

Figure 567: formulă

Făcând diferența între tensiunea bateriei și cea a rezistorului, căderea de tensiune pe bobină este de 0.453 pentru timpul de 3.5 s

$$E_L = E_{\text{baterie}} - E_R$$

$$E_L = 15 \text{ V} - 14.547 \text{ V}$$

$$E_L = 0.453 \text{ V}$$

Figure 568: formulă

16.4 De ce L/R și nu LR

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 capacativ. Pentru un circuit rezistor-condensator (RC), constanta de timp (în secunde) se calculează ca produs dintre rezistență în ohmi și capacitatea în Farad: $\tau = RC$. Totuși, pentru un circuit rezistor-bobină (L/R), constanta de timp se calculează ca raport dintre inductanță în Henry și rezistență în ohmi: $\tau = L/R$. Această diferență a modului de calcul are implicații profunde asupra analizei *qualitative* a răspunsului tranzistorului 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 sunt exact opusul, răspund mai rapid cu o rezistență mai mare și mai lent pentru una mai mică. Circuitele RC în general sunt destul de intuitive, dar cele inductive sunt mai greu de înțeles.

Cheia care stă la baza înțelegerei circuitelor tranzistorii este o înșuire 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. Energie 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.

1. Descărcarea condensatorului și a bobinei pe un rezistor

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:

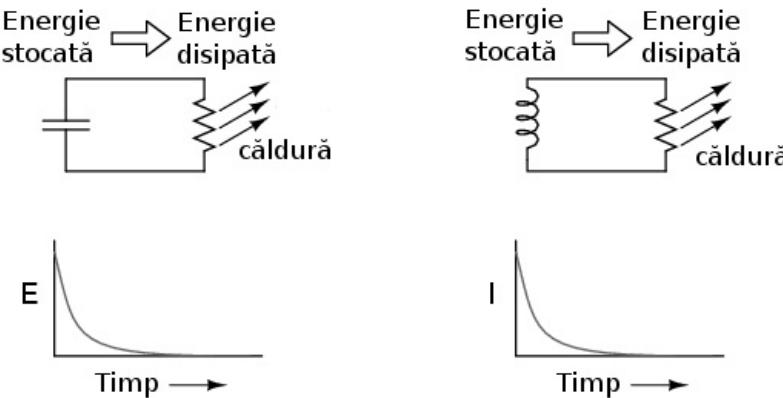


Figure 569: descărcarea condensatorului și a bobinei

În ambele cazuri, căldura disipată pe/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 disipa 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 tranzistoriu 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 aşa fel încât maximizează disiparea puterii (rata transformării energiei în căldură) din circuit. Pentru un circuit capacativ, unde energia stocată este sub formă de tensiune, acest lucru înseamnă că rezistorul trebuie să aibă o valoare mică a rezistenței pentru maximizarea curentului, oricare ar fi tensiunea existență. Pentru un circuit inductiv, unde energia stocată este sub formă de curent, acest lucru înseamnă că rezistorul trebuie să aibă 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).

2. Analogie mecanică pentru modul de stocare al energiei din componentele reactive

Ca și o analogie, putem recurge la o exemplificare mecanică a stocării energiei sub formă capacativă și inductivă. Condensatoarele, stocând energie electrostatică, sunt rezervoare de *energie potențială*. Bobinele, stocând energie electromagnetică (electro/dinamică), 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.

1. Analogia mecanică a energiei potențiale pentru condensator

Să considerăm următoarea ilustrație pentru condensator, considerând energia stocată în acest ca fiind energie potențială:

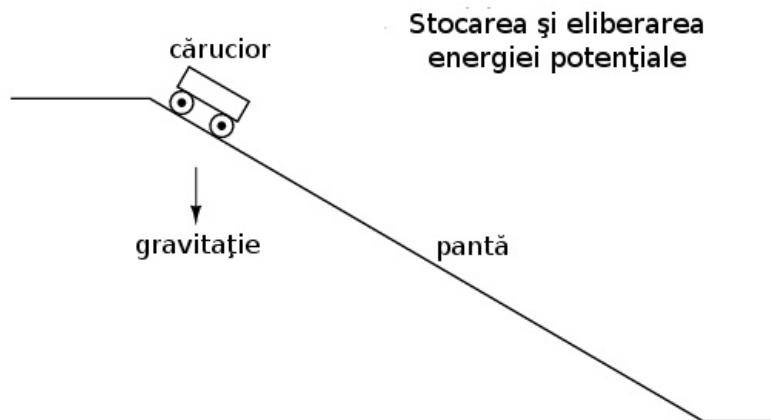


Figure 570: stocarea și eliberarea energiei potențiale - analogie pentru modul de stocare al energiei pentru condensator

Căruciorul, atunci când se află 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 (parcurgerea mai rapidă a pantei) a energiei potențiale? Desigur, o rezistență minimă (lipsa frânelor) ar duce la parcurgerea cea mai rapidă a pantei de către cărucior! Fară ca sistemul de frânare să acioneze, 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 capacativ, ce se descarcă rapid dacă rezistența sa este mică, și se descarcă lent dacă rezistența este mare.

2. Analogia mecanică a energiei cinetice pentru bobină

Să considerăm acum o analogie mecanică pentru bobină, reprezentând energie stocată de acesta sub formă cinetică:

Stocarea și eliberarea energiei cinetice



Figure 571: stocarea și eliberarea energiei cinetice - analogie pentru modul de stocare al energiei pentru bobină

De această dată, căruciorul se află la nivelul solului și este deja în mișcare. Energia să în acest caz este energia 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, de dragul exemplificării), 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.

16.5 Cazuri speciale de calcul

Există cazuri de analiză a circuitelor de curent continuu tranzistorii în care componente reactive (condensatori 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 străbătuta de un anumit curent la momentul inițial. Să luăm următorul circuit ca și exemplu; inițial întrerupătorul este deschis, iar la momentul final acesta este închis:

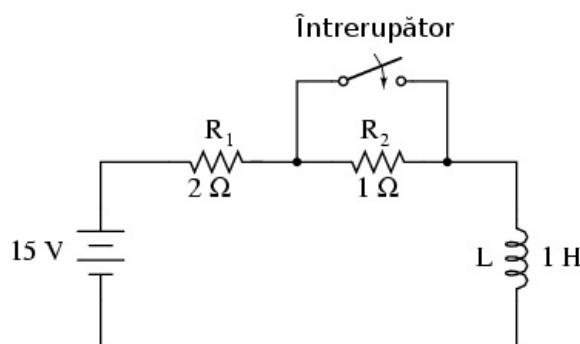


Figure 572: circuit L/R

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:

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

$$I = \frac{15 \text{ V}}{3 \Omega}$$

$$I = 5 \text{ A}$$

Figure 573: formulă

Asfel, chiar înainte de a închide întrerupătorul, avem un curent de 5 A prin bobină, față de 0 A în exemplul din secțiunea precedentă (link!). Când întrerupătorul este închis (condiția finală), rezistorul de 1Ω este scurt-circuitat, iar valoarea totală a rezistenței din circuit se reduce la 2Ω (R_1); valoarea finală a curentului prin circuit cu întrerupătorul închis este:

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

$$I = \frac{15 \text{ V}}{2 \Omega}$$

$$I = 7.5 \text{ A}$$

Figure 574: formulă

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 calculează pentru L_1 și R_1 : $1 \text{ Henry} / 2 \Omega$, sau $\tau = 1/2$ secunde. Cu aceste valori, putem acum calcula valorile curentului în timp. Tensiune 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 volți după un timp infinit de la închiderea întrerupătorului, putem folosi aceste valori în formula universală a constantei (link!) de timp pentru a ajunge la aceleași rezultate:

$$\text{Variația} = (7.5 \text{ A} - 5 \text{ A}) \left(1 - \frac{1}{e^{t/0.5}}\right) \text{ pentru curent}$$

... sau ...

**

$$\text{Variația} = (0 \text{ V} - 5 \text{ V}) \left(1 - \frac{1}{e^{t/0.5}}\right) \text{ pentru tensiune}$$

Timp (secunde)	Tensiune baterie	Tensiune bobină	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

16.6 Circuite complexe

Ce facem în cazul în care avem un circuit mai complicat decât configurațiile serie considerate până acum? Să luăm acest circuit, de exemplu:

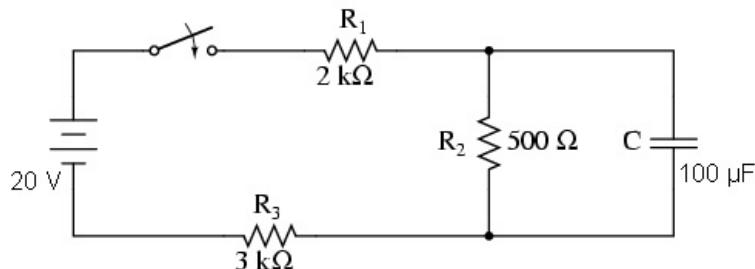


Figure 575: circuit RC complex

Formula constantei de timp ($\tau=RC$) se bazează pe un circuit capacitive serie simplu, format dintr-un condensator și un rezistor conectate în serie. Același lucru este valabil și pentru constanta de timp în circuitul inductiv serie simplu ($\tau=L/R$). Ce putem face prin urmare într-o situație asemănătoare celei de față, unde rezistorii sunt conectați într-o configurație serie-paralel cu condensatorul/bobina?

Răspunsul este că putem folosi metodele învățate la analiza rețelelor (link!). Teorema lui Thevenin ne spune că putem reduce *oricare* circuit liniar la un circuit echivalent compus dintr-o sursă de tensiune, un rezistor conenctat în serie cu aceasta și o sarcină, urmând câțiva pași simpli. Pentru aplicarea teoremei lui Thevenin la circuitul 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.

După ce am identificat condensatorul ca fiind „sarcina” circuitului, îl îndepărtem și determinam tensiunea la bornele sarcinii (întrerupătorul este închis)

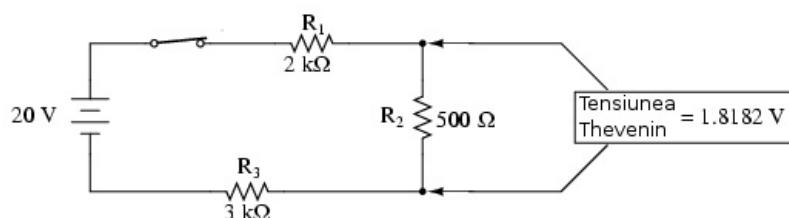


Figure 576: analiza circuitului RC complex folosind teorema lui Thevenin - tensiunea Thevenin

	R_1	R_2	R_3	Total	
E	7.273	1.818	10.909	20	Volți
I	3.636m	3.636m	3.636m	3.636m	Amperi
R	2k	500	3k	5.5k	Ohmi

Figure 577: tabel

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 tensiune este chiar tensiunea finală la bornele condensatorului, deoarece un condensator complet încărcat se comportă precum un circuit deschis (current zero). Folosim această valoare a tensiunii pentru circuitul echivalent Thevenin.

Pentru determinarea rezistenței Thevenin, trebuie să eliminăm toate sursele de putere din circuitul original și să recalcuăm rezistența săa cum este ea văzută de la terminalele sarcinii:

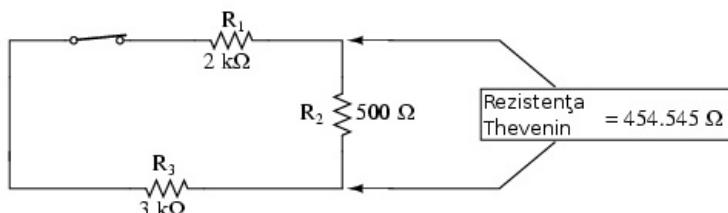


Figure 578: analiza circuitului RC complex folosind teorema lui Thevenin - rezistența Thevenin

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

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

$$R_{\text{Thevenin}} = 454.545 \Omega$$

Figure 579: formule

Următorul pas este redesenarea circuitului original sub forma circuitului echivalent Thevenin:

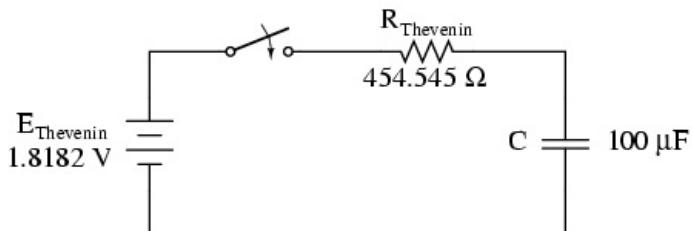


Figure 580: analiza circuitului RC complex folosind teorema lui Thevenin - circuitul echivalent

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:

$$\tau = RC$$

$$\tau = (454.545 \Omega)(100 \mu\text{F})$$

$$\tau = 45.4545 \text{ milisecunde}$$

Figure 581: formule

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 capacitive, vom face calculele în funcție de tensiune:

$$\text{Variația} = (\text{Final} - \text{Initial}) \left(1 - \frac{1}{e^{t/\tau}} \right)$$

$$\text{Variația} = (1.8182 \text{ V} - 0 \text{ V}) \left(1 - \frac{1}{e^{60\text{m}/45.4545\text{m}}} \right)$$

$$\text{Variația} = (1.8182 \text{ V})(0.73286)$$

$$\text{Variația} = 1.3325 \text{ V}$$

Figure 582: formule

Din nou, deoarece valoarea inițială a tensiunii condensatorului am presupus-o ca fiind zero volți, 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.

16.7 Rezolvarea circuitului pentru variabila 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:

$$\text{Variația} = (\text{Final} - \text{Inițial}) \left(1 - \frac{1}{e^{t/\tau}} \right) = (\text{Final} - \text{Inițial}) \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

Figure 583: formulă

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”:

$$\begin{aligned} \text{Variația} &= (\text{Final} - \text{Inițial}) \left(1 - e^{-t/\tau} \right) \\ \left(1 - \frac{\text{Variația}}{\text{Final} - \text{Inițial}} \right) &= e^{-t/\tau} \\ \ln \left(1 - \frac{\text{Variația}}{\text{Final} - \text{Inițial}} \right) &= \ln(e^{-t/\tau}) \end{aligned}$$

Figure 584: formulă

Unde \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

1. Exemplu

Folosim același circuit rezistor-condensator de la începutul capitolului și ne folosim de datele deja determinate pentru a afla durata de timp pentru a ajunge la ele:

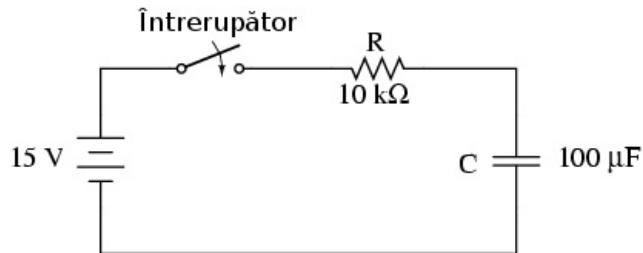


Figure 585: circuit RC

Constanta de timp este aceeași, 1 secundă ($10 \text{ k}\Omega$ înmulțit cu $100 \mu\text{F}$); iar valorile inițiale și finale rămân și ele neschimbate (tensiunea inițială a condensatorului este inițial 0 V, iar finală 15 V). După cum reiese din tabelul de la începutul capitolului (link!), după 2 secunde condensatorul va fi încărcat la 12.970 V. Să introducem aşadar valoarea de 12.970 V în formula determinată mai sus pentru a vedea dacă timpul rezultat este de 2 secunde:

$$t = -(1 \text{ secundă}) \left(\ln \left(1 - \frac{12.970 \text{ V}}{15 \text{ V} - 0 \text{ V}} \right) \right)$$

$$t = -(1 \text{ secundă})(\ln 0.13534))$$

$$t = (1 \text{ secundă})(2)$$

$$t = 2 \text{ secunde}$$

Figure 586: formulă

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?