

JEDNOSMERNNA STRUJA U METALIMA

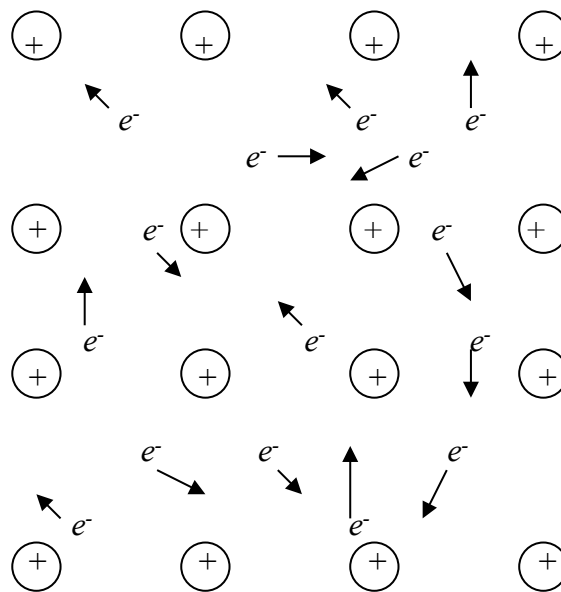
Uvod

Metali su dobri provodnici struje.

Uzrok tome je što atomi metala lako ispuštaju svoje valentne elektrone u međuatomski prostor. Kako su većina metala elementi I, II ili III grupe periodnog sistema, isti toliki je i broj valentnih elektrona u atomu. Dakle, atomi metala ispuštanjem elektrona postaju pozitivni joni, pa slika kristalne rešetke metala (prikazana na sl. 1.) je da se u čvorovima kristalne rešetke nalaze pozitivni joni, a da se u međuatomskom prostoru nalazi jako veliki broj slobodnih elektrona, koji se haotično kreću u svim pravcima, po čemu podsećaju na molekule gasa, pa se zato često nazivaju "elektronski gas".

Ako na jedan kraj metala dovedemo pozitivno, a na drugi negativno naelektrisanje, doći će do usmerenog kretanja slobodnih elektrona od negativnog ka pozitivnom naelektrisanju. Ovakvo kretanje slobodnih elektrona predstavlja jednosmernu struju u metalu.

Dakle, definicija jednosmerne struje u metalnom provodniku glasi: **Jednosmerna struja u metalu je usmereno kretanje slobodnih elektrona kroz međuatomski prostor, koje je obično izazvano spoljašnjim električnim poljem.**



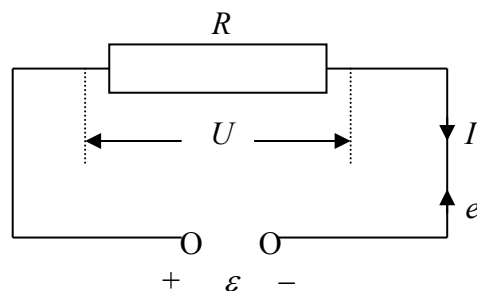
sl. 1.

Osnovne veličine

Za opisivanje jednosmerne struje obično se koristi sledećih osnovnih 5 fizičkih veličina:

- Elektromotorna sila ε (V – Volt),
- Napon U (V)
- Jačina struje I (A – Amper)
- Gustina struje j (A/m²)
- Električni otpor R (Ω - Om)

Na sl. 2. prikazano je najjednostavnije strujno kolo. U kolu pored izvora struje – koji se smatra unutrašnjim delom strujnog kola – mora da postoji bar jedan otpornik (R) koji je žicom spojen za polove izvora struje. Žica i otpornik se smatraju spoljašnjim delom strujnog kola.



sl. 2.

Elektromotorna sila izvora je brojno jednaka radu koji mora da izvrši neka strana sila da bi premestila jedinicu naelektrisanja sa jednog pola izvora na drugi, ali kroz izvor.

$$\varepsilon = \frac{A_s}{q}$$

Pod stranom silom se podrazumeva neka sila koja je neelektrične prirode i koja razdvaja naelektrisanja u izvoru struje – čineći na taj način da izvor ima dva suprotno naelektrisana pola. Recimo, kod baterija, akumulatora ili galvanskih elemenata kao izvora struje postojanje ove strane sile se zasniva na hemijskom procesu koji se odvija u samom izvoru.

Kako se izvor struje smatra unutrašnjim delom strujnog kola, tada se može reći da je elektromotorna sila karakteristika izvora struje, tj. unutrašnjeg dela strujnog kola.

Rad koji vrši strana sila je pretvaranje nekog neelektričnog oblika energije u električnu. Kod pomenutih hemijskih izvora struje taj neelektrični oblik energije je hemijska energija izvora kao podvrsta njegove unutrašnje energije.

Napon u spoljašnjem delu strujnog kola je brojno jednak radu koji mora da izvrši električna sila da bi premestila jedinicu naelektrisanja sa jednog pola izvora na drugi, ali kroz žicu.

$$U = \frac{A_e}{q}$$

Pod spoljašnjim delom strujnog kola se podrazumeva žica i svi električni uređaji u kolu izuzimajući sam izvor struje.

Rad koji vrši električna sila u kolu je, u ovom slučaju, pretvaranje električne energije u neki drugi neelektrični oblik energije – npr. u toplotnu energiju.

I elektromotorna sila i napon se mere istom jedinicom mere, a toje 1 Volt.

Jačina struje u datom provodniku je brojno jednaka onoj količini elektriciteta koja prođe kroz poprečni presek tog provodnika u jedinici vremena.

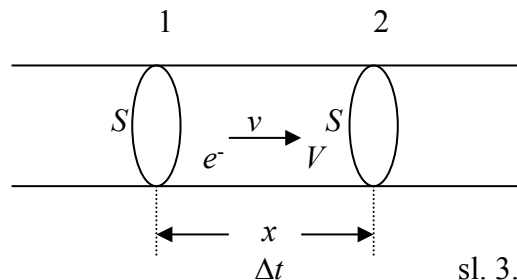
$$I = \frac{q}{\Delta t}$$

Kako naelektrisanje prenose provodni elektroni, sledi da se preneto naelektrisanje može odrediti kada se broj elektrona N koji prođe kroz pomenuti poprečni presek provodnika pomnoži sa naelektrisanjem koje nosi jedan od njih. Ovo naelektrisanje jednog elektrona se u fizici smatra jediničnim naelektrisanjem (isto toliko je i naelektrisanje jednog protona samo što je ono pozitivno) i predstavlja prirodnu konstantu, a iznosi:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} C .$$

Dakle: $q = N \cdot e$, pa je: $I = \frac{N \cdot e}{\Delta t}$.

Na sl. 3. je prikazan provodnik čija je površina poprečnog preseka obeležena sa S , a kroz njega protiče jednosmerna struja. U početnom trenutku vremena posmatramo presek 1 ovog provodnika i u toku vremena Δt slobodni elektroni iz ovog preseka se prosečnom brzinom v premeštaju za rastojanje $x = v \cdot \Delta t$ do preseka 2.



sl. 3.

Na ovaj način smo sigurni da je količina elektriciteta koja je u toku vremena Δt prošla kroz presek 1 jednaka ukupnoj količini elektriciteta koja se, na kraju vremena Δt nalazi između preseka 1 i preseka 2, tj. u zapremini: $V = S \cdot x$. Ako sa n obeležimo koncentraciju elektrona u provodniku, tj.

broj elektrona u jedinici zapremine provodnika, tada je: $n = \frac{N}{V}$, odakle je ukupan broj elektrona u

provodniku između ovih preseka: $N = n \cdot V$.

Količinu elektriciteta između preseka 1 i 2 sada možemo odrediti kao:

$$q = N \cdot e = n \cdot V \cdot e = n \cdot S \cdot x \cdot e = n \cdot S \cdot v \cdot \Delta t \cdot e .$$

S obzirom na definiciju jačine struje:

$$I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{n \cdot S \cdot v \cdot \Delta t \cdot e}{\Delta t}$$

pa posle skraćivanja vremenskog intervala dobijamo:

$$I = n \cdot e \cdot v \cdot S .$$

Dobijeni obrazac za jačinu struje pokazuje da je jačina stuje u datom provodniku direktno srazmerna: koncentraciji elektrona u njemu, prosečnoj brzini njihovog usmerenog kretanja, kao i površini poprečnog preseka tog provodnika, tj. njegovoj debljini.

Gustina struje u provodniku je brojno jednaka jačini struje koja protiče kroz jedinični poprečni presek tog provodnika.

$$j = \frac{I}{S}.$$

Kako je: $I = \frac{q}{\Delta t}$, sledi: $j = \frac{\frac{q}{\Delta t}}{S}$, pa je rešavanjem dvojnog razlomka:

$$j = \frac{q}{S \cdot \Delta t}.$$

Završni obrazac bolje prikazuje smisao ove veličine od početnog i čitamo ga na sledeći način:

Gustina struje u provodniku je brojno jednaka količini elektriciteta koja prođe kroz jedinični poprečni presek provodnika u jedinici vremena.

Ako uzmemo da je jačina struje: $I = n \cdot e \cdot v \cdot S$, tada je:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{n \cdot e \cdot v \cdot S}{S} = n \cdot e \cdot v.$$

Električni otpor date metalne žice (provodnika) je direktno srazmeran njenoj dužini, a obrnuto je srazmeran površini njegovog poprečnog preseka. Električni otpor zavisi i od vrste metala od koga je žica napravljena, preko vrednosti specifične otpornosti datog metala (ρ).

Obrazac koji odgovara ovoj definiciji električnog otpora je:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}.$$

U narednoj tabeli sledi nekoliko brojnih podataka o vrednostima specifične otpornosti nekih metala i to na $t = 20^\circ\text{C}$! Izabrana jedinica za ove podatke je: $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$.

<i>metal</i>	<i>specifična otpornost</i>
<i>srebro</i>	0,0165
<i>bakar</i>	0,0178
<i>zlato</i>	0,0230
<i>aluminijum</i>	0,0300
<i>volfram</i>	0,0550
<i>gvožđe</i>	0,0990
<i>olovo</i>	0,2100

Dakle, jedan dobar provodnik bi trebalo da bude napravljen od nekog od prva četiri metala iz tabele. U praksi se najčešće se koristi bakar, a znatno ređe aluminijum. Srebro, a naročito zlato spadaju u retke, a to znači i jako skupe metale – što ograničava mogućnost njihove upotrebe. *Na primer, telefonski vazdušni kablovi koji se vode po stubovima se prave od legure bakra u kojoj je oko 97 % bakra, a bakar je legiran: kalajem, magnezijumom, kadmijumom, cinkom i silicijumom ili fosforom, da bi se pojačala – inače slaba – otpornost čistog bakra na kidanje. Legiranjem bakra je povećana njegova specifična otpornost, pa se to nadoknađuje povećanom debljinom tih kablova – zato što je električni otpor obrnuto srazmeran debljini žice.*

Ako želimo da neki provodnik bude sa velikim otporom, tada je dobro uzeti neki metal koji ima veću specifičnu otpornost, žica treba da bude dugačka i tanka. *Na primer, žarno vlakno u sijalici je napravljeno od volframa, spiralnog je oblika (da bi mu se povećala dužina, ali i zato da bi odavalo što manje toplote) i vrlo tanko. Time se postiže ogroman otpor vlakna, pa se zato (vidi Džul – Lencov zakon) ono pri protoku struje zagreva do temperatura belog usijanja – od 2500 do 3000 °C, što je uslov da emituje svetlost. Ako se pogleda tabela jasno je da volfram nije metal sa najvećim specifičnim otporom, ali njegov izbor je ipak logičan zbog njegove vrlo visoke tačke topljenja – preko 3000 °C, dok se drugi metali sa većim specifičnom otpornostima (dakle, sa još većim otporom od volframa) tope na znatno nižim temperaturama, što ih čini nepogodnim u ovom slučaju.*

Omov zakon za deo strujnog kola

Delom strujnog kola se smatra otpornik R . Ako se kroz taj otpornik propuštaju struje različitih jačina: $I_1, I_2, I_3 \dots$ a pri svakoj od njih se meri napon na njegovim krajevima: $U_1, U_2, U_3 \dots$ respektivno, tada se može ustanoviti da je količnik izmerenog napona i jačine uvek isti:

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_3}{I_3} = \dots = \text{const.} = R.$$

Merenjem se može pokazati da je ovaj odnos napona na krajevima otpornika i jačine struje kroz njega jednak njegovom električnom otporu, što je u prethodnom obrascu i napisano.

Navedeni obrazac predstavlja Omov zakon za deo strujnog kola. On nam omogućava da uspostavimo i vezu između jedinica za otpor, napon i jačinu struje:

$$1\Omega = \frac{1V}{1A},$$

što znači da otpornik ima vrednost otpora od 1 Oma ako pri naponu na njegovim krajevima od 1 Volta kroz njega protiče struja od 1 Ampera.

Omov zakon za deo strujnog kola se javlja još i u sledeća dva oblika:

$$I = \frac{U}{R},$$

što znači da je jačina struje, koja protiče kroz neki provodnik, direktno srazmerna naponu na njegovim krajevima, a obrnuto je srazmerna njegovom električnom otporu i :

$$U = I \cdot R.$$

Veličina U se najčešće naziva »napon«, ali se još naziva »pad napona«, kao i »elektrootporna sila«.

Omov zakon za celo strujno kolo

Na sl. 5. prikazano je najjednostavnije celo strujno kolo. Ono se sastoji od izvora struje čija je elektromotorna sila ε , a unutrašnji otpor r , jednog spoljašnjeg otpornika otpora R i provodnika koji ih spajaju.

Omov zakon za ovo celo strujno kolo glasi:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

Ovaj obrazac znači da je jačina struje u kolu direktno srazmerna elektromotornoj sili izvora, a obrnuto je srazmerna zbiru svih otpora u kolu.

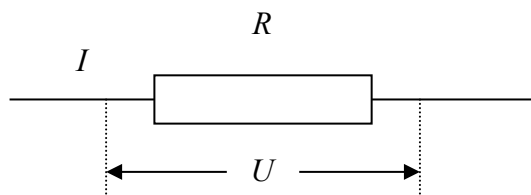
Iz prethodnog obrasca sledi:

$$\varepsilon = I \cdot R + I \cdot r.$$

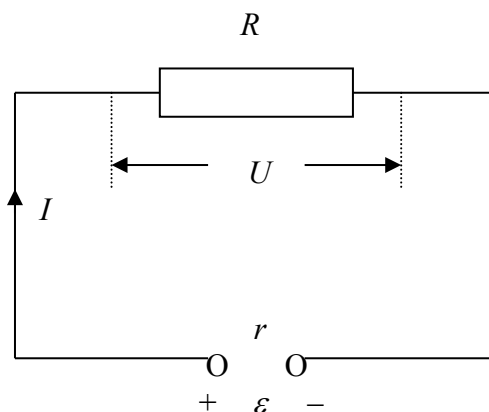
Kako je: $I \cdot R = U$ sledi:

$$\varepsilon = U + I \cdot r.$$

Ovaj obrazac pokazuje da elektromotorna sila izvora i napon na otporniku nisu brojno jednaki. Međutim, razlika je veoma mala zato što je unutrašnji otpor izvora r obično stotinak puta manji od spoljašnjeg otpora u kolu R , tako da je elektromotorna sila zanemarljivo veća od napona, a razlika obično ne premašuje 1 % vrednosti elektromotorne sile.



sl. 4.



sl. 5.

Ako se u kolu nalazi veći broj izvora, kao i veći broj otpornika, tada se može reći da:

Jačina struje u kolu je jednaka koeficijentu algebarskog zbira svih elektromotornih sila i zbira svih otpora u tom kolu.

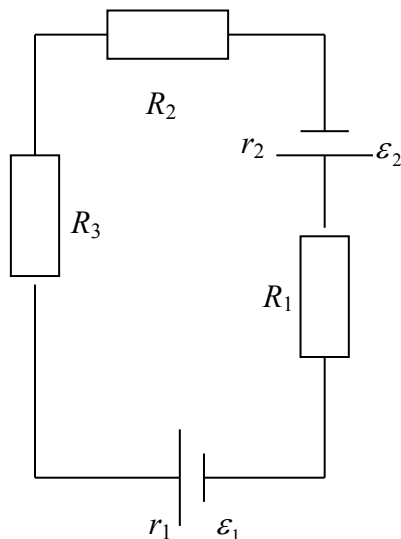
Na sl. 6. i sl. 7. prikazana su dva složenija strujna kola. Obrasci za Omov zakon za celo strujno kolo tada glase:

- za kolo na sl. 6.

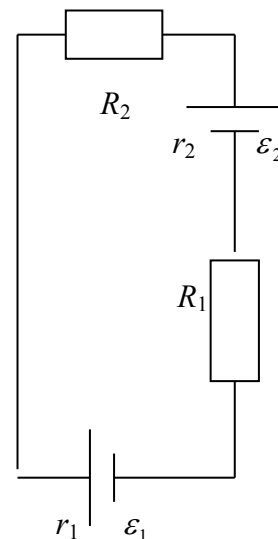
$$I = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{R_1 + R_2 + R_3 + r_1 + r_2},$$

- a za kolo na sl. 7.

$$I = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{R_1 + R_2 + r_1 + r_2}.$$



sl. 6.



sl. 7.

Džul – Lencov zakon

Džul – Lencov zakon se odnosi na količinu toplote (Q) koja se oslobađa u provodniku otpora (R) kada u toku vremena (t) kroz njega protiče struja jačine (I). Tada je:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t.$$

Džul – Lencov zakon glasi: **Količina toplote oslobođena u datom provodniku, za koji važi Omov zakon, direktno je srazmerna: kvadratu jačine struje u njemu, njegovom otporu i vremenu proticanja struje kroz njega.**

Ako želimo da napravimo jak grejač, tj. provodnik u kome će se oslobađati velika količina toplote, tada on treba da ima veliki otpor, a kroz njega treba propuštati jaku struju. Sasvim je normalno da će se količina oslobođene toplote povećavati sa protokom vremena. Kao što je već rečeno u lekciji »električni otpor«, veliki otpor datog provodnika je moguće postići ako izaberemo neki metal velikog specifičnog otpora, ako je taj provodnik što duži (zato su grejači obično savijeni u spiralu) i što tanji.

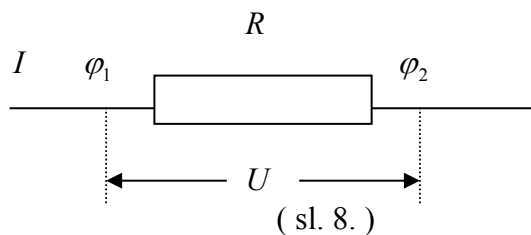
Upravo obrnuto treba uraditi ako je potrebno sprečiti pretvaranje električne energije u toplotnu – to je slučaj u svim prenosnim kablovima, npr. u dalekovodnim kablovima. Tada se oslobođena toplotna energija naziva toplotnim gubicima. U ovom slučaju potrebno je da otpor provodnika bude što manji, da struja bude što slabija, a vreme proticanja struje što manje.

Izvođenje Džul – Lencovog zakona:

Jedan od obrazaca za Džul – Lencov zakon, a to je: $Q = U \cdot I \cdot t$, može se dobiti na sledeći način: zamislimo provodnik čiji je jedan kraj na višem potencijalu φ_2 , dok je njegov drugi kraj na nižem potencijalu φ_1 , pri čemu je očigledno da je napon između tih krajeva: $U = \varphi_2 - \varphi_1$.

Ako kroz ovaj provodnik protекne količina elektriciteta q , tada je izvršeni rad:

$$A = q \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = q \cdot U$$



(sl. 8.)

što su obrasci poznati još iz elektrostatičkog polja. Kako je definicija jačine struje:

$$I = \frac{q}{t} \Rightarrow q = I \cdot t.$$

Zamenom u prethodni izraz dobija se:

$$A = q \cdot U = I \cdot t \cdot U,$$

tj.

$$A = U \cdot I \cdot t.$$

Kako rad predstavlja pretvaranje energije iz jednog oblika u drugi, jasno je da je ovde došlo do upravo takvog pretvaranja i to električne energije u unutrašnju tj. u toplotnu energiju (pod uslovom da se ovaj provodnik ne kreće u magnetnom polju i da se u njemu ne dešavaju hemijske reakcije).

Pritom je izvršeni rad brojno jednak i potrošenoj električnoj i dobijenoj toplotnoj energiji, zato što rad meri koliko energije pređe iz jednog oblika u drugi. Dakle:

$$A = \Delta E_e = Q.$$

Sada je očigledno da je:

$$Q = U \cdot I \cdot t,$$

a odavde se pomoću Omovog zakona za deo strujnog kola mogu lako dobiti i dva preostala oblika obrasca za Džul – Lencov zakon:

$$I = \frac{U}{R} \quad \Rightarrow \quad Q = U \cdot \frac{U}{R} \cdot t$$

$$Q = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

$$U = I \cdot R \quad \Rightarrow \quad Q = I \cdot R \cdot I \cdot t$$

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

Ovde je zgodna prilika da se odredi kolika je snaga oslobođena pritom u ovom strujnom provodniku. Kako je snaga brzina vršenja rada, sledi:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} \Rightarrow$$

$$P = U \cdot I.$$

Zamenom obrasca za Omov zakon za deo strujnog kola u prethodni izraz za snagu, može se videti da je takođe:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R.$$

Kirhofova pravila

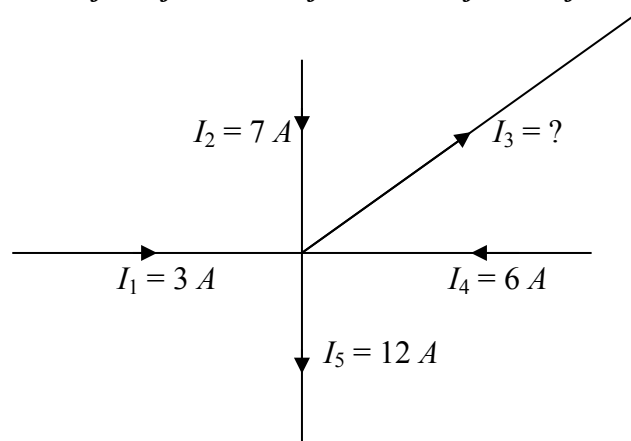
Omov zakon za celo strujno kolo omogućava izračunavanje jačine struje u jednostavnom nerazgranatom strujnom kolu. Međutim, kada je strujno kolo razgranato, tj. složeno tada se za izračunavanje jačine struje u njegovim granama koriste dva Kirhofova pravila.

Prvo Kirhofovo pravilo glasi: **Zbir jačina svih struja koje utiču u jedan čvor jednak je zbiru jačina svih struja koje iz tog čvora ističu.**

Primer iz koga se može videti upotreba ovog pravila je prikazan na sl. 9. Na slici imamo pet grana nekog razgranatog strujnog kola koje su spojene u jedan čvor. Prikazane su jačine struja u svakoj grani, kao i smerovi tih struja. Struje u prvoj, drugoj i četvrtoj grani utiču u čvor, dok struje u trećoj i petoj grani ističu iz čvora. Sada je primena I Kirhofovog pravila jednostavna:

$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3 + I_5.$$

Ako je jedna od ovih jačina struje nepoznata, može se izračunati pod uslovom da



sl. 9.

su nam ostale četiri jačine struja poznate. U primeru na slici:

$$3A + 7A + 6A = I_3 + 12A$$

odakle je:

$$I_3 = 4A.$$

Drugo Kirhoferovo pravilo glasi: *Algebarski zbir svih elektromotornih i elektrootpornih sila u datoj konturi mora biti jednak nuli.*

Drugo Kirhoferovo pravilo se koristi kod složenih strujnih kola. Jedno takvo kolo je prikazano na sl. 9. Najbolje je da primenu ovog pravila razmotrimo sa zadatim brojnim vrednostima veličina, tj u formi zadatka.

Neka su elektromotorne sile izvora:

$\varepsilon_1 = 12 V$ i $\varepsilon_2 = 24 V$, dok su njihovi unutrašnji otpori: $r_1 = 2\Omega$ i $r_2 = 1\Omega$. Neka je

vrednost spoljašnjeg otpora: $R = 60\Omega$.

Izračunati jačine struja u svim granama ovog složenog strujnog kola.

Da bi se ovaj zadatak rešio potrebno je da se pored I i II Kirhoferovog pravila uvedu neka dodatna potpravila.

1. Potrebno je odrediti pojedinačne konture koje čine ovo složeno strujno kolo, a zatim odrediti smer njihovog obilaska, što na slici prikazuju polukružne strelice. Njihov smer je izabran proizvoljno (što znači da je mogao biti i suprotan), ali mora biti isti u svim konturama. Na sl. 10. je to smer kretanja suprotan smeru kretanja kazaljki na satu i isti je u obe konture.

2. Potrebno je usmeriti elektromotorne sile izvora. Smer nije proizvoljan i mora biti isti za sve izvore. Na slici to je smer od pozitivnog ka negativnom polu izvora (unutar izvora).

3. Potrebno je odrediti smerove traženih struja u svim granama ovog kola. Njihov smer je proizvoljan, ali se pritom mora paziti da ne mogu sve struje istovremeno ulaziti u čvor, a takođe da nije moguće da sve one izlaze iz čvora – jer bi time bilo narušeno I Kirhoferovo pravilo.

Kako su u datom kolu nepoznate tri jačine struje, potrebno je postaviti tri jednačine kao sistem sa tri nepoznate. Prva jednačina sledi iz I Kirhoferovog pravila za čvor A:

$$I = I_1 + I_2 \quad (*)$$

Druga i treća jednačina slede iz II Kirhoferovog pravila, a odnose se na konturu I i konturu II:

$$-\varepsilon_1 - I \cdot R - I_1 \cdot r_1 = 0$$

i

$$-\varepsilon_2 + I_2 \cdot r_2 + I \cdot R = 0.$$

Prilikom pisanja ovih jednačina primenjeno je još jedno potpravilo:

4. Data elektromotorna sila ε , ili elektrootporna sila $I \cdot R$ nosi predznak (+ ili -) u zavisnosti od toga da li joj se smer poklapa sa smerom obilaska konture ili mu je suprotan. Ako se poklapa onda je znak +, a ako je suprotan onda je znak -.

Napisane tri jednačine predstavljaju sistem od tri jednačine sa tri nepoznate i rešiću ga metodom zamene. Zamena će biti prva jednačina: $I = I_1 + I_2$, a nju ću zameniti u drugoj i trećoj jednačini:

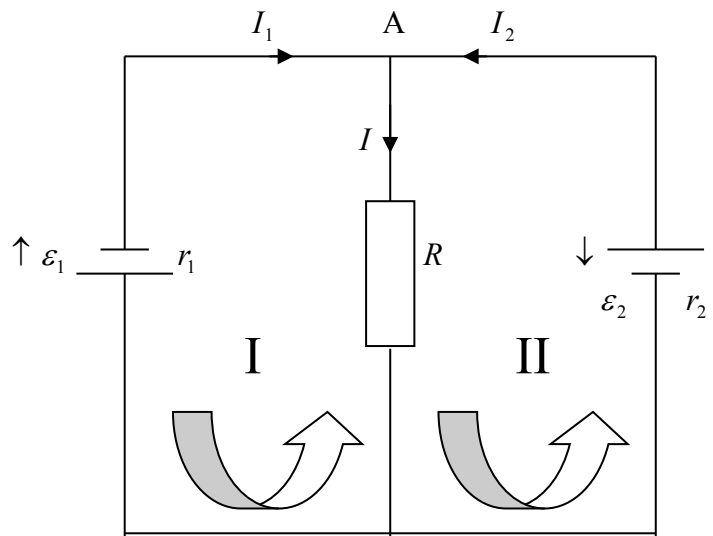
$$-\varepsilon_1 - (I_1 + I_2) \cdot R - I_1 \cdot r_1 = 0$$

$$-\varepsilon_2 + I_2 \cdot r_2 + (I_1 + I_2) \cdot R = 0$$

$$-12 - (I_1 + I_2) \cdot 60 - I_1 \cdot 2 = 0$$

$$-24 + I_2 \cdot 1 + (I_1 + I_2) \cdot 60 = 0$$

$$-12 - 60I_1 - 60I_2 - 2I_1 = 0$$



sl. 10.

$$-24 + I_2 + 60I_1 + 60I_2 = 0$$

$$62I_1 + 60I_2 = -12 \quad / \div 2$$

$$60I_1 + 61I_2 = 24$$

Iz prve jednačine, posle skraćivanja sa 2, zamena je:

$$I_2 = \frac{-6 - 31I_1}{30} \quad (**)$$

Zamenom u drugu jednačinu dobija se:

$$60I_1 + 61 \cdot \frac{-6 - 31I_1}{30} = 24 \quad / \cdot 30$$

$$1800I_1 - 366 - 1891I_1 = 720$$

$$-91I_1 = 1086$$

$$I_1 = -\frac{1086}{91}$$

$$I_1 = -11.934 \text{ A}$$

Zamenom u (**) dobija se:

$$I_2 = \frac{-6 - 31 \cdot (-11.934)}{30}$$

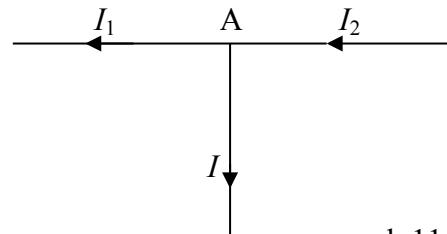
$$I_2 = 12.132 \text{ A}$$

Zamenom u (*) dobija se:

$$I = -11.934 + 12.132$$

$$I = 0.198 \text{ A}$$

5. Ovo poslednje potpravilo se primenjuje ako je dobijen negativan rezultat za neku od izračunatih jačina struje. U prethodnom primeru to se desilo sa jačinom struje I_1 , dok su jačine struja I_2 i I imale pozitivnu vrednost. To znači da je pri slučajnom određivanju njihovih smerova iz potpravila 3 tačno određen smer one struje koja je pozitivna, dok je smer one koja je negativna pogrešno pretpostavljen. Zato, da bi zadatak bio kompletiran, potrebno je prepraviti smer struje I_1 u tački A, što je prikazano na sl. 11. Smer struja I_2 i I ostaje nepromenjen.



sl. 11.