

Elektrodinamika

- 1.1. Gibanje naboja pod utjecajem električnog polja
- 1.2. Električna struja
- 1.3. Električni otpor. Ohmov zakon
- 1.4. Magnetska sila
- 1.5. Magnetsko polje električne struje
- 1.6. Magnetski tok
- 1.7. Elektromagnetska indukcija



1. Elektrodinamika



Prije više od 2500 godina stari su Grci uočili da *jantar*, milijunima godina stara smola koja se može naći u prirodi, pokazuje neobično svojstvo kad se protrlja krznom – privlači laganе predmete. Osim toga, kad se jantar dovoljno dugo trlja, on čak može izbaciti iskru sličnu munji koja katkad sijevne za olujna vremena.

Premda su ove pojave fascinirale ljude, o njima se gotovo ništa nije znalo sve do 17. stoljeća, doba rađanja znanosti. Tada je i skovan naziv *elektricitet*, prema grčkoj riječi za jantar. S vremenom je postalo jasno da postoji temeljno svojsvo tvari, koje se danas naziva *električni naboј*. I privlačno svojstvo jantara i bljesak munje mogu se objasniti *gibanjem naboja*.

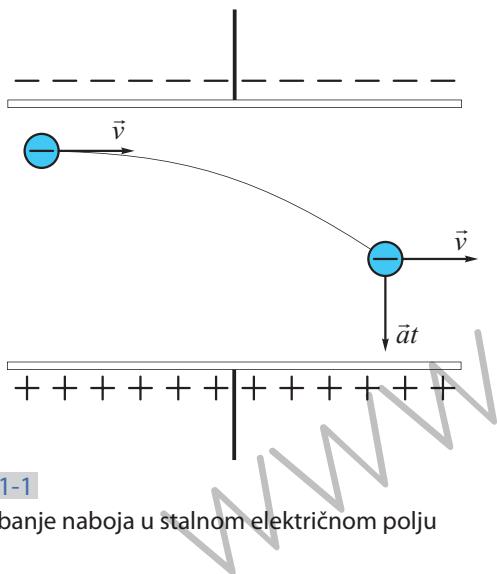
Električni naboј prostoru oko sebe daje posebno svojstvo koje nazivamo *električnim poljem*. Kad drugi naboј dođe u to polje, na njega djeluje *električna sila* – biva privučen ili odbijen. Prema grčkoj riječi za силу, *dynamis*, skovan je naziv područja koje istražuje električne sile – **elektrodinamika**.

Električni naboјi koji se usmjereno gibaju čine *električnu struju*. Kao što naboј oko sebe stvara električno polje, struja stvara *magnetsko polje*. To je ono isto svojstvo koje se opaža oko magneta. I za magneti su znali već stari Grci. Nalazili su ih u prirodi kao posebnu vrstu rude koja privlači željezo. Kinezi su već prije 1000 godina znali od magnetske rude napraviti magnetsku iglu koju su koristili u prvim kompasima.

Tek prije manje od 150 godina ljudi su u potpunosti shvatili vezu elektriciteta i magnetizama. Tada je škotski matematičar i fizičar James Clerk Maxwell opisao cijeli elektricitet i magnetizam sa samo četiri jednadžbe koje danas nazivamo Maxwellovim jednadžbama. Takav matematički opis elektriciteta i magnetizma nazvamo **klasičnom elektrodinamikom**. Dvadesetih godina prošlog stoljeća klasična je elektrodinamika udružena s kvantnom teorijom u **kvantnu elektrodinamiku**. Slaganje kvantne elektrodinamike s eksperimentalnim opažanjima toliko je precizno da tu teoriju često nazivamo “draguljem fizike”.

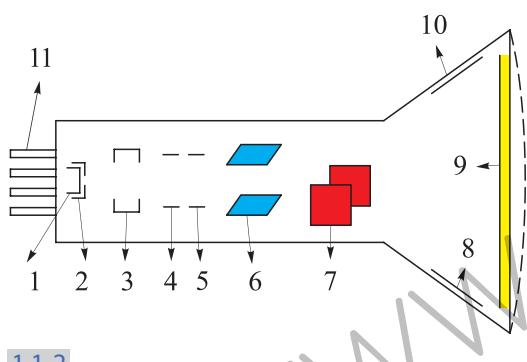
Ključni pojmovi!

- električno polje
- električna sila
- elementarni naboј
- Millikanov pokus



1.1-1

Gibanje naboja u stalnom električnom polju



1.1-2

Katodna cijev. Dijelovi:

- 1 - katoda, 2 - rešetka, 3 - fokusirajuća elektroda,
- 4 - prva ubrzavajuća elektroda, 5 - druga ubrzavajuća elektroda,
- 6 - ploče za okomiti otklon,
- 7 - ploče za vodoravni otklon,
- 8 - anoda za dodatno ubrzanje,
- 9 - fluorescentni zastor,
- 10 - stakleni balon,
- 11 - priključci elektrode.

1.1. Gibanje naboja pod utjecajem električnog polja

Izvor električnog polja je električni naboј. Naboјi u prostoru oko sebe stvaraju električno polje. Ono može biti homogeno i nehomogeno. Homogeno polje ima jednaku jakost i smjer u svim točkama prostora.

Primjer takvog polja nalazimo između ploča kondenzatora. Jakost električnog polja kondenzatora je:

$$E = \frac{U}{d},$$

gdje je d razmak između ploča kondenzatora, a U napon kondenzatora.

Razmotrimo slučaj kada u homogeno električno polje uleti elektron brzinom \vec{v} okomitom na smjer električnog polja. Električno polje djeluje na elektron električnom silom \vec{F} :

$$\vec{F} = e \cdot \vec{E}.$$

Općenito, za bilo koju nabijenu česticu koja se giba u homogenom električnom polju, gdje je naboј čestice $Q = n \cdot e$, električna sila iznosi:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}.$$

Promotrimo sliku 1.1-1. S obzirom da elektron ima masu m i nalazi se u stalnom električnom polju, prema drugom Newtonovom zakonu elektron će u smjeru električne sile imati stalnu akceleraciju:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

$$\vec{a} = \frac{e \cdot \vec{E}}{m}.$$

Katodna cijev ili CRT (Cathode Ray Tube) na slici 1.1-2 osnova je za rad osciloskopa, radarskih zaslona te monitora i televizora starije generacije. Ona sadrži elektronski top, otklonski sustav, zaslon i stakleni balon. Dijelove katodne cijevi možemo vidjeti na slici 1.1-2. Katoda emitira elektrone te oni dolaze na fokusirajuću elektrodu. Otklonske pločice usmjeravaju elektrone na određenu točku na fluorescentnom zaslonu. Dvije vodoravne pločice zakreću elektronski snop u okomitom smjeru, a dvije okomite u vodoravnom smjeru. Katodna cijev je vakuumbska kako bi se izbjeglo raspršenje elektrona - skretanje u sudarima s molekulama zraka.

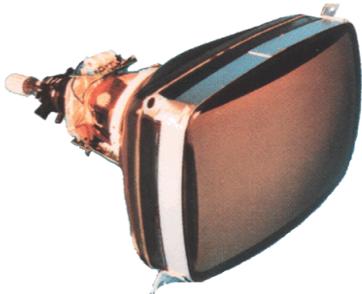
Brzina elektrona u katodnoj cijevi ovisi o naponu anode U . Elekroni kreću iz mirovanja pa potencijalna energija elektrona $e \cdot U$ prelazi u kinetičku energiju:

$$e \cdot U = \frac{m \cdot v^2}{2}.$$

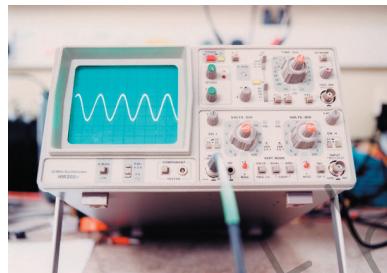
Stoga brzina elektrona iznosi:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

Na slici 1.1-3 vidimo katodnu cijev televizora, a na slici 1.1-4 vidimo osciloskop. Sastavni dio analognog osciloskopa je katodna cijev. Osciloskop se koristi u mjerjenjima u elektrotehnici.



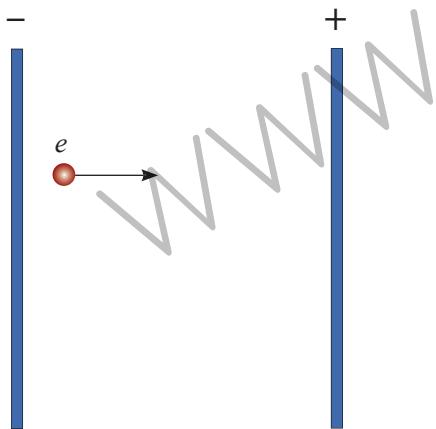
1.1-3
Katodna cijev televizora



1.1-4
Osciloskop

● Primjer 1

Mirni elektron ubrzan je razlikom potencijala od 1 200 V. Koja je konačna brzina elektrona?



Rješenje:

Potencijalna energija elektrona,

$$E_p = e U,$$

prijedje u kinetičku energiju:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Dakle:

$$\begin{aligned} eU &= \frac{mv^2}{2} \\ 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1200 \text{ V} &= \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot v^2}{2} \\ 3,84 \cdot 10^{-16} \text{ CV} &= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot v^2 \\ v^2 &= 4,2 \cdot 10^{14} \text{ m}^2 \text{s}^{-2} \\ v &= 2 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}. \end{aligned}$$

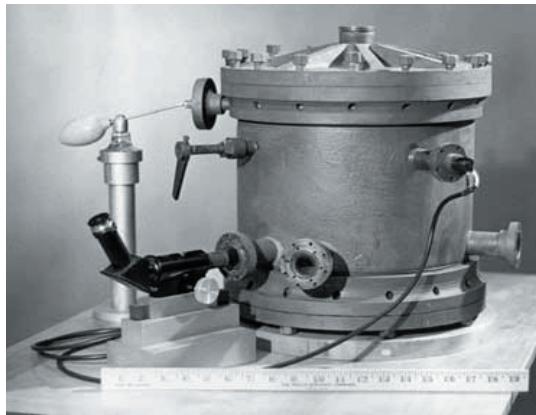


Robert Andrew Millikan (1868. - 1953.), američki eksperimentalni fizičar. 1923. godine dobio je Nobelovu nagradu za mjerjenje naboja elektrona.

1.1.1. Elementarni naboј. Millikanov pokus

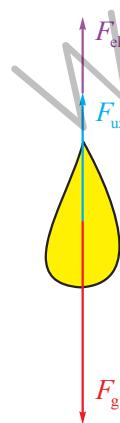
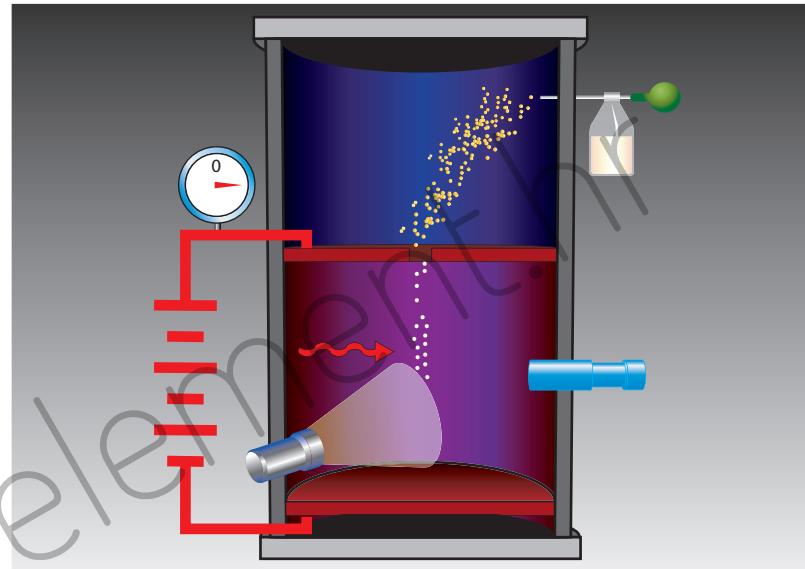
Robert Andrew Millikan (1868. - 1953.), američki fizičar i nobelovac, prvi je eksperimentalnim putem izmjerio naboј elektrona i objavio svoje rezultate u djelu *The Electron*. Pokuse je obavljao četiri godine i izmjerio je vrijednost elementarnog naboјa e .

Originalna aparatura njegovog pokusa prikazana je na slici 1.1-5. Aparatura se sastoji od dvije komore. Dno gornje komore i dno donje komore spojeni su na izvor napona i tvore kondenzator. Raspršivač ulja ubacuje lagunu maglicu uljnih kapljica u gornju komoru. Kapljice su nabijene. Neke od tih kapljica padaju kroz kružni otvor u gornjoj ploči donje komore i ulaze u homogeno električno polje kondenzatora. Koristeći mi-



1.1-5
Originalna aparatura Millikanovog pokusa

kroskop i bateriju kao izvor svjetlosti, Millikan je promatrao pad uljnih kapljica u donjoj komori. Mijenjajući napon U na pločama kondenzatora, zaustavljao je kapljice ulja. Kada je kapljica ulja zaustavljena, sve su sile koje djeluju na kapljicu u ravnoteži.



1.1-6
Sile koje djeluju na kapljicu ulja

Kapljica u ravnoteži prikazana je na slici 1.1-6. Sile u ravnoteži su sila uzgona, električna sila i sila teže:

$$F_{\text{el}} + F_{\text{uz}} = F_{\text{g}}$$

Električna sila iznosi:

$$F_{\text{el}} = Q \cdot E = Q \cdot \frac{U}{d}.$$

Sila uzgona je:

$$F_{\text{uz}} = \rho_{\text{zrak}} \cdot g \cdot V.$$

Sila teže iznosi:

$$F_{\text{g}} = m \cdot g = \rho_{\text{ulja}} \cdot g \cdot V.$$

U gornjim izrazima, d je razmak između ploča kondenzatora, E je električno polje kondenzatora, U je napon izvora, ρ_{ulja} je gustoća ulja, a ρ_{zraka} gustoća zraka. Obujam kapljice ulja, uz pretpostavku kuglastog oblika, je:

$$V = \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi.$$

Sada možemo izračunati električni naboj kapljice ulja:

$$F_{\text{el}} = F_{\text{g}} - F_{\text{uz}}$$

$$Q \cdot E = m \cdot g - \rho_{\text{zraka}} \cdot g \cdot V.$$

Slijedi da je naboј kapljice ulja jednak:

$$Q = \frac{\rho_{ulja} \cdot g \cdot V - \rho_{zraka} \cdot g \cdot V}{E} = V \cdot g \cdot \frac{\rho_{ulja} - \rho_{zraka}}{E}$$

$$Q = \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi \cdot g \cdot \frac{d}{U} (\rho_{ulja} - \rho_{zrak}) .$$

Tako je Millikan određivao naboјe kapljica ulja, mijenjajući napon i mje-reći veličinu kapljica, te ustvrdio da je ukupan naboј svake kapljice ulja uvijek jednak cjelobrojnom umnošku elementarnog naboјa e :

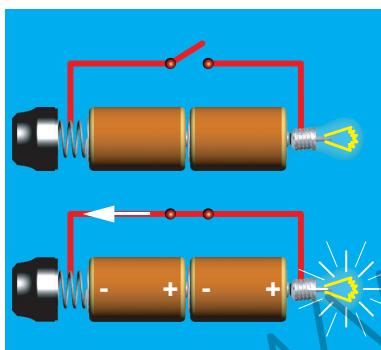
$$Q = N \cdot e,$$

gdje je N prirodni broj. To je značilo da postoji najmanji mogući iznos naboјa. Danas kažemo da je naboј kvantiziran. Najmanji iznos, kvant električnog naboјa e , odgovara naboјu elektrona.

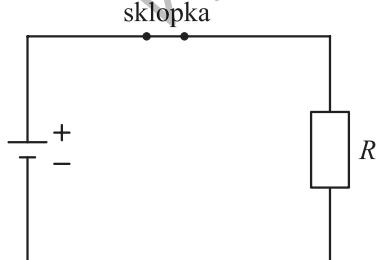
U svojim računima Millikan je dobio vrijednost $e = 1,59 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, što se od današnjih mjerena razlikuje za samo 1 %.

Ključni pojmovi!

- električna struja
- smjer struje
- izvor napona
- jakost struje
- gustoća struje



1.2-1 Zatvoreni i otvoreni strujni krug



1.2-2 Shema strujnog kruga

1.2. Električna struja

1.2.1. Električni strujni krug

Promotrimo električni strujni krug na slici 1.2-1. Kako bismo složili taj strujni krug, potreban je izvor napona, tj. u ovom primjeru dvije baterije, sklopka, trošilo (žaruljica) i vodiči.

Električni strujni krug općenito se sastoji od izvora napona, spojnih vodiča, sklopke i trošila.

Shemu vidimo na slici 1.2-2.

Izvor napona može biti istosmjerni i izmjenični. Primjer istosmjernog napona je baterija. Baterija ima dva pola. Plus-pol (+) je električni pol izvora na kojem se nalazi manjak negativnog naboјa, a minus-pol (-) je pol na kojem je višak negativnog naboјa.

Kada na izvor priključimo spojne vodiče kojima spajamo trošilo s izvorom, dobijemo zatvoreni strujni krug. Žaruljica svijetli. Tada strujom krugom teče električna struja.

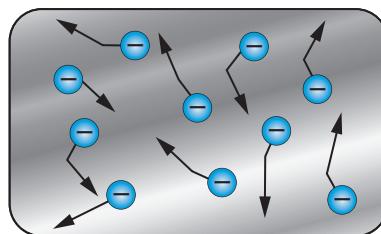
1.2.2. Atomistički opis električne struje

Metali imaju kristalnu strukturu, što znači da su njihovi atomi pravilno raspoređeni u rešetku te titraju oko ravnotežnog položaja. Dio elektrona u kristalnoj rešetki metala nije čvrsto vezan za pojedine atome, već može prolaziti između atoma. Te elektrone nazivamo slobodnim elektronima. Oni su vezani za metal, ali ne i za pojedinačni atom. Slobodni se elektroni gibaju kaotično unutar metala.

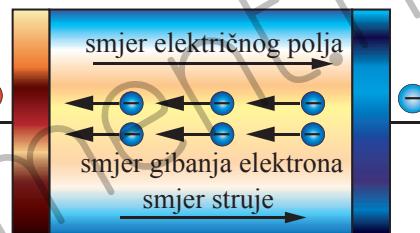
Pokus!

Za ovaj su pokus potrebne dvije jednake žaruljice, izvor napona, sklopka te spojni vodiči. Žaruljice prvo spojimo serijski, jednu za drugom. Svijetle li žaruljice jednakim intenzitetom? Zašto?

Spojimo iste žaruljice u strujni krug paralelno. Što se sada događa s njihovom svijetlošću? Svijetle li žaruljice jače ili slabije nego u prethodnom pokusu? Zašto?



Ako spojimo metalnu žicu na izvor napona, slobodni se elektroni počinju usmjereno givati od negativnog prema pozitivnom polu. To gibanje nazivamo električnom strujom.

**Zanimljivost!**

Jakost struje možemo objasniti analogijom s rijekom, gdje nam voda predstavlja električnu struju. Ako se poveća jakost struje, to je kao da se povećala količina vode u rijeci. Naboji u vodicu se gibaju od točke višeg potencijala prema točki nižeg potencijala, tj. napon omogućava gibanje naboja. U analogiji s rijekom, geometrija okoliša, zbog koje nastaje vodopad, predstavljala bi napon.

Električna struja je **usmjereno** gibanje slobodnih elektrona.

Smjer električne struje je dogovorno određen kao smjer gibanja nositelja pozitivnog naboja od (+) prema (-). Danas znamo da se pozitivni naboji u metalu ne gibaju. Gibaju se negativno nabijeni elektroni. Oni su nositelji struje, zato stvarni smjer struje odgovara smjeru gibanja elektrona: od (-) prema (+).

Ako struja cijelo vrijeme ima stalan smjer, tada se radi o istosmjernoj struci. No ako struja mijenja svoj smjer, tada se radi o izmjeničnoj struci.

1.2.3. Jakost i gustoća električne struje

Električnu struju definirali smo kao usmjereno gibanje slobodnih elektrona. Elektroni nose elementarni naboј e , a N elektrona nosi naboј: $Q = Ne$. Što više naboja prođe kroz presjek vodiča u kraćem vremenu, to je struja jača. Struja je stoga proporcionalna količini naboja Q i obrnuto proporcionalna vremenu t .

Oznaka za **jakost električne struje** je I , a definira se kao ona količina naboja Q koja u određenom vremenu t prođe površinu presjeka vodiča.

$$I = \frac{Q}{t}$$

Mjerna jedinica za mjerjenje električne struje je amper, A, nazvana u čast francuskom fizičaru André-Marie Ampèreu. Jedan amper možemo izraziti na sljedeći način:

Ako u vremenu od 1 s kroz vodič prođe količina naboja od 1 C, kažemo da električna struja ima jakost od 1 A.



Gustoća struje je proporcionalna jakosti struje I , a obrnuto proporcionalna površini presjeka vodiča S :

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

Mjerna jedinica za gustoću struje je Am^{-2} .

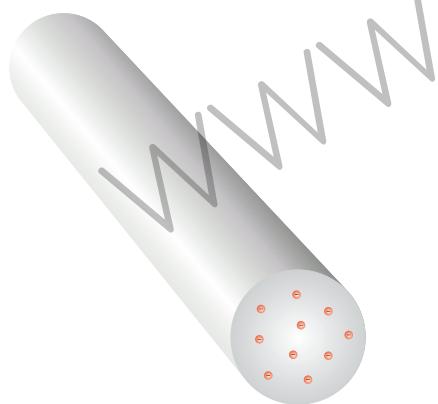
Primjeri približne jakosti električne struje:

hladnjak u računalu	0,55 A
električni grijач u kućanskim aparatima	4,5 A
akumulator automobila pri pokretanju motora	200 A
grom	do 20 000 A

André-Marie Ampère (1775. - 1836.), bio je jedan od glavnih istraživača u području elektriciteta i magnetizma. Mjerna jedinica za električnu struju, amper, nazvana je po njemu.

● Primjer 2

Koliko elektrona u sekundi prođe kroz poprečni presjek vodiča ako je jakost struje 1 A?



Rješenje:

Električna struja je naboј u jedinici vremena:

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Ukupni naboј je umnožak elementarnog naboja i broja elektrona:

$$Q = Ne.$$

Stoga je:

$$I = \frac{Ne}{t}$$

$$It = Ne$$

$$N = \frac{It}{e} = \frac{1\text{A} \cdot 1\text{s}}{1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}} = 6,25 \cdot 10^{18}.$$

SAŽETAK!



Električna struja je usmjereni gibanje slobodnih elektrona.

Ukupna količina naboja cijelobrojni je umnožak elementarnog naboja: $Q = Ne$.

Elementarni naboј iznosi: $e = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}$.

Jakost električne struje je naboј koji prođe kroz presjek vodiča u jedinici vremena:

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Gustoća struje je proporcionalna jakosti struje, a obrnuto proporcionalna površini presjeka vodiča:

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

Ključni pojmovi!

- električni otpor
- Ohmov zakon
- rad i snaga električne struje
- spajanje otpornika
- Kirchhoffovi zakoni

1.3. Električni otpor. Ohmov zakon

Električni otpor

Materijali se opiru prolasku električne struje. To njihovo svojstvo nazivamo **električnim otporom**.

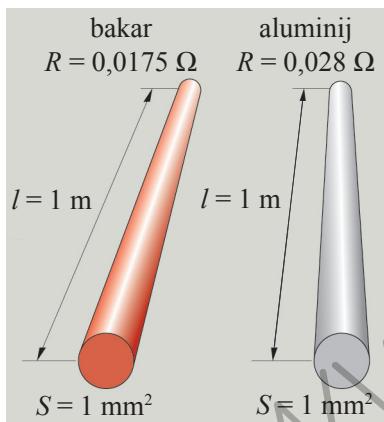
Oznaka za električni otpor je R , a njegova merna jedinica je om, Ω .

Različiti materijali različito se opiru prolasku električne struje. Fizikalnu veličinu koja pokazuje utjecaj materijala na električni otpor nazivamo električnom otpornošću i označavamo simbolom ρ (čitaj ro). Električna otpornost je otpor kojeg ima vodič duljine 1 m, površine presjeka 1 m^2 , na temperaturi od 20 °C. Merna jedinica električne otpornosti je Ωm (ommeter), a često se koristi milijun puta manja jedinica:

$$1 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega \text{m}.$$

Eksperimentalno se može utvrditi da je električni otpor vodiča proporcionalan otpornosti ρ i duljini vodiča l , a obrnuto proporcionalan površini presjeka vodiča S . Prema tome, izraz za električni otpor žice je:

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



1.3-1

Usporedba otpora bakrenog i aluminijskog vodiča

S obzirom na električnu otpornost, najbolji vodič je srebro. U praksi se najčešće koristi bakar jer je jeftiniji, dok se u dalekovodima koristi aluminij. Na slici 1.3-1 usporedeni su otpoti vodiča od bakra i vodiča od aluminija.

Svojstvo otpora u vodenju električne struje možemo opisati i sa suprotnog stajališta.

Električna provodnost materijala recipročna je vrijednosti električne otpornosti:

$$\kappa = \frac{1}{\rho}.$$

Električna se provodnost mjeri u simensima po metru, Sm^{-1} , mernoj jedinici nazvanoj u čast Ernstu Werneru von Siemensu, njemačkom elektrotehničaru i izumitelju.

Električna vodljivost, G , recipročna je vrijednost električnog otpora:

$$G = \frac{1}{R}.$$

Mjerna jedinica vodljivosti G je simens, S. Električna vodljivost vodiča presjeka S i duljine l iznosi:

$$G = \kappa \frac{S}{l}.$$

U tablici su navedene vrijednosti električne otpornosti i provodnosti za različite materijale. Materijali su poredani prema porastu električne otpornosti, od najboljih vodiča, preko poluvodiča, do izolatora.



Ernst Werner von Siemens (1816. - 1892.), njemački izumitelj. 1847. godine osnovao je telegrafsku tvrtku koja je i danas vodeća europska inženjerska tvrtka. SI-jedinica za električnu vodljivost nosi naziv po njemu.

Materijal	Električna otpornost $\rho / \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$	Električna provodnost $\kappa \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$
srebro	0,016	62,5
bakar	0,0175	57,1
aluminij	0,0287	34,84
volfram	0,055	18,2
platina	0,11	9,09
željezo	0,13	7,7
germanij	0,5	2
krv	2	0,5
silicij	2 000	$5 \cdot 10^{-4}$
staklo	10^{11}	10^{-11}

Primjer 3

Koliko metara srebrne žice ima isti otpor kao 1 m aluminijске žice? Obje žice imaju isti poprečni presjek.

Rješenje:

Električni otpor žice je:

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

gdje je ρ otpornost, l duljina, a S poprečni presjek.

Žice imaju iste otpore:

$$R_{\text{aluminij}} = R_{\text{srebro}}$$

$$\rho_{\text{aluminij}} \cdot \frac{l_{\text{aluminij}}}{S} = \rho_{\text{srebro}} \cdot \frac{l_{\text{srebro}}}{S}.$$

Presjeci su isti pa je:

$$\rho_{\text{aluminij}} l_{\text{aluminij}} = \rho_{\text{srebro}} l_{\text{srebro}}.$$

Koristeći zadatu duljinu aluminijске žice i vrijednosti za električne otpornosti iz tablice, slijedi:

$$0,028 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 1 \text{ m} = 0,0159 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot l_{\text{srebro}}$$

$$l_{\text{srebro}} = 176 \text{ cm.}$$



Ohmov zakon

Jedan od prvih istraživača strujnih krugova bio je Georg Simon Ohm. On je pokazao da je jakost struje u zatvorenom strujnom krugu proporcionalna naponu, a obrnuto proporcionalna otporu tog strujnog kruga. Do tog zaključka Ohm je došao 1827. godine, a danas ga po njemu nazivamo Ohmovim zakonom.

U zatvorenom strujnom krugu **jakost struje** proporcionalna je naponu, a obrnuto proporcionalna otporu.

Matematički izraz Ohmovog zakona je:

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

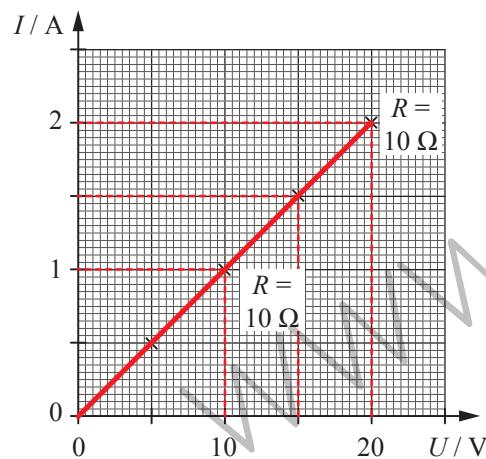
Napon, označen slovom U , mjerimo u voltima, V. Jakost struje I mjerimo u amperima, A, a električni otpor R u omima, Ω. Otpori vodiča u strujnom krugu obično su maleni pa je njihova vrijednost zanemariva. Pad naponu na otporniku jednak je umnošku otpora i jakosti struje:

$$U = I \cdot R.$$

Graf ovisnosti struje i napona pri stalnom otporu nazivamo U - I karakteristikom. Za omske otpornike graf ima oblik pravca, tj. jakost struje i napon su proporcionalni (slika 1.3-2).

Ohmov zakon možemo izraziti i preko vodljivosti G :

$$I = U \cdot G.$$



1.3-2

U - I karakteristika otpornika od *konstantana*. Naziv konstanatan potječe upravo od svojstva materijala otporne žice da se njezin otpor ne mijenja s temperaturom.

Primjer 4

Akumulator automobila ima napon od 12 V i kapacitet od 60 Ah, a ukupni otpor svjetala (prednjih i stražnjih) je 4Ω . Vozač je isključio motor, ali je zaboravio ugasiti svjetla. Nakon koliko će se vremena akumulator potpuno isprazniti?



Rješenje:

Prema Ohmovom zakonu struja je:

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

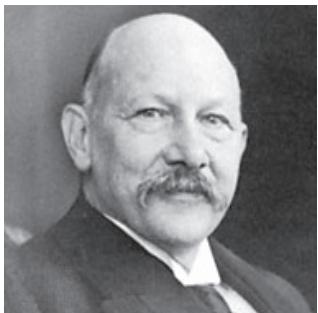
Kapacitet akumulatora je umnožak struje i vremena:

$$60 \text{ Ah} = 3 \text{ A} \cdot t$$

$$t = \frac{60 \text{ Ah}}{3 \text{ A}} = 20 \text{ h}.$$

Akumulator će se potpuno isprazniti nakon 20 h.

1.3.1. Ovisnost otpora o temperaturi



Heike Kamerlingh Onnes (1853. - 1926.), nizozemski fizičar. Istraživao je svojstva tvari pri vrlo niskim temperaturama. Za otkriće supravodljivosti 1913. godine dobio je Nobelovu nagradu.



Luigi Galvani (1737. - 1798.), talijanski liječnik i fizičar. Jedan od prvih istraživača elektriciteta.



Alessandro Volta (1745. - 1827.), talijanski fizičar, posebice je poznat po otkriću električne baterije.

Ako se temperatura vodiča mijenja, mijenja se i njegov otpor. Time se mijenjaju i njegova otpornost i provodnost.

Ovisnost električnog otpora o temperaturi opisujemo temperturnim koeficijentom α . Njegova mjerna jedinica je K^{-1} .

Temperturni koeficijent materijala je konstanta koja opisuje promjenu otpora s temperaturom.

Ovisnost otpora o promjeni temperature možemo izraziti:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T),$$

gdje je R električni otpor u ovisnosti o temperaturi, a R_0 otpor pri temperaturi od 0°C . Promjena temperature ΔT je razlika konačne i početne temperature:

$$\Delta T = T_2 - T_1,$$

Čisti metali ovise linearno o temperaturi pri temperaturama od 0°C do 100°C . Otpori poluvodiča se smanjuju s povećanjem temperature.

Nizozemski fizičar Heike Kamerlingh Onnes istraživao je otpor pri niskim temperaturama i 1911. godine došao je do zapanjujućeg otkrića. Opazio je da pri temperaturi od $4,2\text{ K}$ ili $-268,95^\circ\text{C}$ otpor žive naglo pada na nulu. To novo stanje tvari Kamerlingh je nazvao supravodljivošću. Supravodljivost je pojava svojstvena nekim materijalima pri vrlo niskim temperaturama. Tada otpor vodiča pada na nulu.

1.3.2. Izvori napona. Unutarnji napon izvora

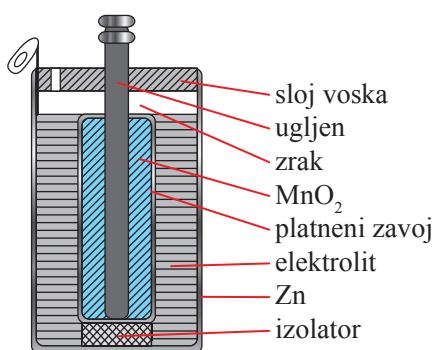
Talijanski liječnik Luigi Galvani uočio je prilikom seciranja žaba, 1776. godine, zanimljivu pojavu. Žabljí krak, obješen na bakrenu kuku, trznuo se pri dodiru sa željeznom podlogom. Ovo otkriće bilo je poticaj za daljnja istraživanja elektriciteta u kojima je otkriveno da između dva metala uronjena u vodljivu tekućinu (elektrolit) protječe struja.

Ta pojava nazvana je "galvanizam", na prijedlog Galvanijevog suradnika, talijanskog fizičara Alessandra Volte.

Galvanijeva otkrića prethodila su izumu prve baterije, izvora istosmjernog napona. Volta je prvu bateriju konstruirao 1800. godine. Sastojala se od dvije elektrode: cinkove i bakrene, a elektrolit je bio sumporna kiselina.

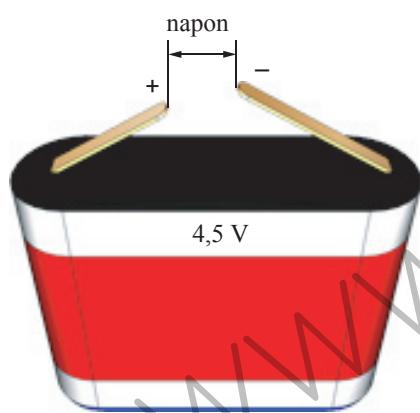
Galvanski članci su izvori napona koji kemijsku energiju pretvaraju u električnu. Dijele se na:

1. primarne galvanske članke (npr. Leclancheov članak), koji se ne mogu ponovno puniti
2. sekundarne galvanske članke (npr. akumulator), koji se mogu ponovno puniti.



1.3-3

Leclancheov članak



1.3-4

Izvor napona od 4,5 V

Pokus!

Za ovaj su nam pokus potrebne dvije pločice, aluminijска i bakrena, veličine dlana ruke. Također nam treba osjetljivi ampermeter i dva spojna vodiča s krokodilskim nastavcima. Jedan kraj žice spojimo na ampermeter, a drugi na svaku od pločica uz pomoć krokodilskih nastavaka. Postavite jednu ruku na aluminijsku pločicu, a drugu na bakrenu. Što se događa s kazaljkom ampermетra? Ponovite pokus s vlažnim rukama.



1.3-5

Slojni otpornici

Leclancheov članak je suhi članak. Poznati primjer je baterija "AA" od 1,5 V. Negativni pol je cinčana čašica, a pozitivni pol ugljeni štapić u smjesi manganovog dioksida i ugljene prašine. Elektrolit je vodena otopina amonijevog klorida i cinkovog klorida, kojoj je dodan škrob radi skrućivanja. Leclancheov članak je prikazan na slici 1.3-3.

Galvanski članci se mogu spajati u električne baterije.

Svaki izvor, poput baterije na slici 1.3-4, možemo opisati:

$$1. \text{ unutarnjim otporom } R_u \text{ i}$$

$$2. \text{ unutarnjim naponom } \varepsilon \text{ (elektromotornom silom). To je napon na polovima izvora pri otvorenom strujnom krugu.}$$

Napon je razlika potencijala:

$$U = \varphi_A - \varphi_B .$$

Svaki izvor ima svoj unutarnji otpor R_u i unutarnji napon ε . Ukupni otpor strujnog kruga jednak je zbroju unutarnjeg otpora i otpora trošila R_1 :

$$R = R_1 + R_u ,$$

pa je, prema Ohmovom zakonu:

$$\varepsilon = IR_1 + IR_u .$$

Napon na trošilu je jednak:

$$IR_1 = U = \varepsilon - IR_u .$$

Kada izvorom ne teče struja, napon na priključnicama izvora jednak je unutarnjem naponu:

$$U = \varepsilon .$$

No ako spojimo trošilo na izvor napona, tada je napon izvora manji za iznos umnoška struje i unutarnjeg napona:

$$U = \varepsilon - IR_u .$$

1.3.3. Otpornici

Otpornici su komponente strujnih krugova koji se opiru prolasku struje i pritom stvaraju pad napona između svojih priključaka. Postoje različite vrste otpornika. Osnovna je podjela na *promjenjive* i *nepromjenjive* otpornike.

Nepromjenjivi otpornici imaju stalan iznos otpora i dijele se na:

- **slojne otpornike** (sl. 1.3-5) - imaju keramičko tijelo na koje je nanesen tanak sloj ugljika zaštićen izolacijom;
- **žičane otpornike** - napravljeni su od namotaja žice na keramičkome tijelu;



1.3-6
Promjenjivi otpornici

Promjenjivi otpornici (sl. 1.3-6) - vrijednost otpora im se može mijenjati. Ponekad mogu biti nepouzdani jer žica ili metal s vremenom oksidiraju, pa se danas uglavnom proizvode od plastičnih materijala.

Postoje i otpornici za posebne namjene, a to su: varistori, termistori, fotoootpornici, itd.

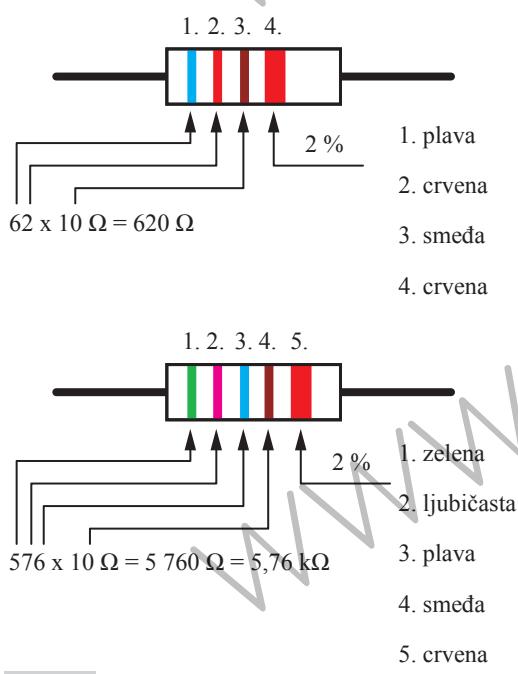
Varistori mijenjaju svoj otpor ovisno o naponu, a prikazani su slikom 1.3-7. **Termistori** su otpornici ovisni o temperaturi, prikazani na slici 1.3-8. **Fotoootpornici** su otpornici ovisni o jakosti svjetla.



1.3-7
Varistori

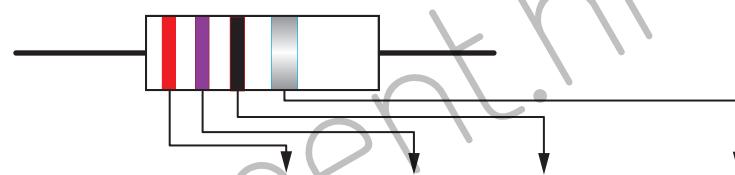


1.3-8
Termistori



1.3-9
Određivanje vrijednosti otpornika

Nazivna vrijednost otpora na otpornicima označena je alfanumeričkim oznakama ili obojenim prstenuma. Najčešće je označena pomoću četiri prstena u boji. Određivanje otpora otpornika s četiri i pet prstena prikazuje slika 1.3-9 i tablica koja slijedi.



Boja	Vrijednost otpora			Odstupanje
	1. prsten	2. prsten	3. prsten	
bez boje	-	-	-	$\pm 20\%$
srebrna	-	-	10^{-2}	$\pm 10\%$
zlatna	-	-	10^{-1}	$\pm 5\%$
crna	-	0	10^0	-
smeđa	1	1	10^1	$\pm 1\%$
crvena	2	2	10^2	$\pm 2\%$
narančasta	3	3	10^3	-
žuta	4	4	10^4	-
zelena	5	5	10^5	$\pm 0,5\%$
plava	6	6	10^6	$\pm 0,25\%$
ljubičasta	7	7	10^7	$\pm 0,1\%$
siva	8	8	10^8	$\pm 0,05\%$
bijela	9	9	10^9	-