

Elektrodinamika

- 1.1. Gibanje električnog naboja u električnom polju
- 1.2. Električna struja
- 1.3. Električni otpor
- 1.4. Magnetska sila
- 1.5. Magnetsko polje električne struje
- 1.6. Magnetski tok
- 1.7. Elektromagnetska indukcija
- 1.8. Generatori i transformatori



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 protrla krznom – privlači lagane predmete. Osim toga, kad se jantar dovoljno dugo trlja, čak može izbaciti iskru sličnu munji koja katkad sijevne za olujna vremena.

Predma su ove pojave fascinirale ljudi, o njima se gotovo ništa nije znalo sve do 17. stoljeća, doba rađanja moderne 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 *električnim nabojem*. I privlačno svojstvo jantara i bljesak munje mogu se objasniti *gibanjem naboja*.

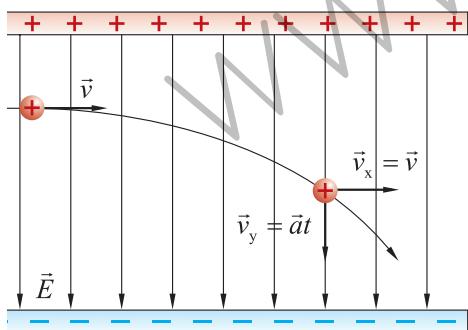
Električni naboji prostoru oko sebe daje posebno svojstvo koje nazivamo *električnim poljem*. Kad drugi naboј dode u to polje, na njega djeluje *električna sila* – biva privučen ili odbijen. Prema grčkoj riječi za silu, *dynamis*, skovan je naziv područja koje istražuje električne sile – elektrodinamika.

Električni naboji 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 magnete 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 magnetizma. 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 nazivamo klasičnom elektrodinamikom. Dvadesetih godina prošlog stoljeća klasična je elektrodinamika udružena s kvantnom teorijom u kvantu elektrodinamiku. Slaganje kvantne elektrodinamike s eksperimentalnim opažanjima toliko je precizno da tu teoriju često nazivamo “draguljem fizike”.

Ključni pojmovi

- atom
- elementarna čestica
- električni naboј
- elementarni električni naboј
- elektron
- električna sila
- električno polje
- ion
- anion
- kation



1.1-1

Električno polje između nabijenih ploča kondenzatora približno je homogeno. U svim je točkama isto, osim uz rubove. Gibanje nabijene čestice u takvom polju analogno je gibanju čestice s masom u homogenom gravitacijskom polju.

1.1. Gibanje električnog naboja u električnom polju

1.1.1. Električno polje i sila na naboј

U prvoj smo se knjizi dotaknuli tema elektriciteta i magnetizma kad smo govorili o silama i energiji. U prvom se dijelu ove knjige vraćamo tim temama, ali s mnogo više detalja. Razmatrat ćemo *elektrodinamiku*. Prvi dio riječi, elektro, odnosi se na elektricitet – skup pojava uzrokovanih električnim nabojem. Drugi dio, dinamika, odnosi se na sile. Bavit ćemo se, dakle, silama na **električne naboje**.

Električni je naboј, rekli smo, jedno od najtemeljnijih svojstava najsitnijih nedjeljivih komadića tvari – **elementarnih čestica**. Elementarna je čestica, primjerice, elektron – sastavni dio svakog **atoma**. Premda riječ atom izvorno znači nedjeljiv, danas znamo da je atom itekako djeljiv. Štoviše, upravo je promjena u sastavu atoma (dodavanje ili oduzimanje elektrona) ono što daje električki nabijene čestice koje su odgovorne za elektricitet i magnetizam.

Atom je najmanja čestica tvari.

Elementarna čestica je najmanja nedjeljiva čestica tvari.

Električni naboј jedno je od temeljnih svojstava elementarne čestice.

Sila na električni naboј zapravo je povezana sa svim temama elektriciteta i magnetizma. Sjetimo se, omjer sile i električnog naboja definirali smo kao *električno polje*.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$$

Sila koja djeluje na električni naboј uzrokuje promjenu gibanja naboja. Usmjereno gibanje naboja pak odgovara električnoj struci. Električna struja izvor je *magnetskog polja*.

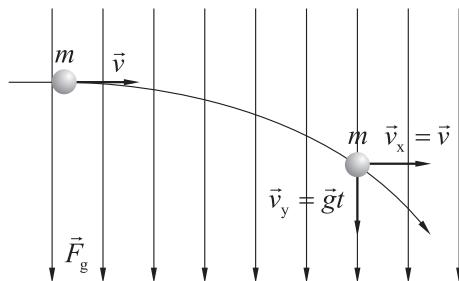
Razmotrimo kao najjednostavniji primjer gibanje električnog naboja u homogenom električnom polju. Takvo polje postoji unutar nabijenog pločastog kondenzatora (osim uz rubove ploča gdje prestaje biti homogeno). Vektor električnog polja okomit je na ploče i orijentiran od pozitivne prema negativnoj ploči, kao na slici 1.1-1. Ako se pozitivno nabijena čestica nađe u tom električnom polju, na nju djeluje električna sila koja ima smjer kao i polje, prema negativnoj ploči (na slici prema dolje). Zato čestica u tom smjeru dobiva ubrzanje a .

Uzmimo da je čestica prije ulaska u homogeno polje kondenzatora imala stalnu brzinu v u vodoravnom smjeru, dakle usporedno s pločama. S obzirom na to da u vodoravnom smjeru ne djeluje sila, ni brzina se u tom smjeru ne mijenja. No sila postoji u okomitom smjeru pa čestica počinje dobivati brzinu u tom smjeru. Sada postoje dvije komponente brzine:

$$v_x = v, \quad v_y = a t.$$

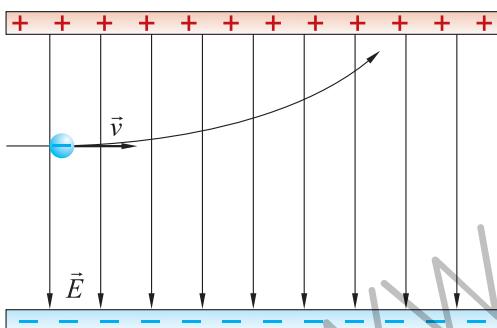
U vodoravnom smjeru imamo jednoliko pravocrtno gibanje pa je put x jednak umnošku brzine i vremena. U okomitom smjeru gibanje je jednoliko ubrzano pravocrtno gibanje pa je put y jednak umnošku polovine akceleracije i kvadrata vremena (početna je brzina u okomitom smjeru nula).

$$x = v_x t, \quad y = \frac{a}{2} t^2$$



1.1-2

Gibanje čestice s masom u homogenom gravitacijskom polju



1.1-3

Gibanje negativno nabijene čestice u homogenom električnom polju kondenzatora

Uočite da je matematički opis toga gibanja potpuno jednak gibanju čestice s masom u homogenom gravitacijskom polju (slika 1.1-2). Tu smo vrstu gibanja u mehanici zvali *horizontalnim hicem*.

No za razliku od mehanike gdje ne možemo promijeniti orientaciju gravitacijskog polja, u elektrodinamici to lako možemo učiniti s elektičnim poljem. Kad bi gornja ploča na slici 1.1-1 bila negativno nabijena, a donja pozitivno, tada bi pozitivna čestica skretala prema gore. Isto tako, ako polarizaciju ploča ne mijenjamo, nego umjesto pozitivne čestice u kondenzator ubacimo negativnu česticu, kao na slici 1.1-3, tada čestica skreće prema gore.

Za detaljniji opis gibanja nabijene čestice u električnom polju, kao na slici 1.1-3, valja uzeti u obzir drugi Newtonov zakon.

$$F = ma$$

Tada su komponente puta:

$$x = vt, \quad y = \frac{F}{2m} t^2.$$

Uključimo li i definiciju električnog polja koju smo naveli na početku:

$$E = \frac{F}{Q},$$

izrazi za put postaju

$$x = vt, \quad y = \frac{EQ}{2m} t^2.$$

Naposljetku, električno polje u pločastog kondenzatora može se izraziti na još jedan način: kao omjer napona i udaljenosti ploča.

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

Stoga su koordinate x i y jednake

$$x = vt, \quad y = \frac{UQ}{2md} t^2.$$

Eliminiramo li vrijeme (izrazimo ga iz prvog izraza kao x/v i uvrstimo u drugi izraz) tada ćemo dobiti jednadžbu putanje nabijene čestice u homogenom električnom polju.

$$y = \frac{QU}{2mdv^2} x^2$$

Razlomak ispred x^2 je konstanta, nijedna od vrijednosti u njemu ne mijenja se s vremenom. Ponovimo:

Q je električni naboј čestice

U je napon kondenzatora (razlika potencijala između dviju ploča)

m je masa čestice

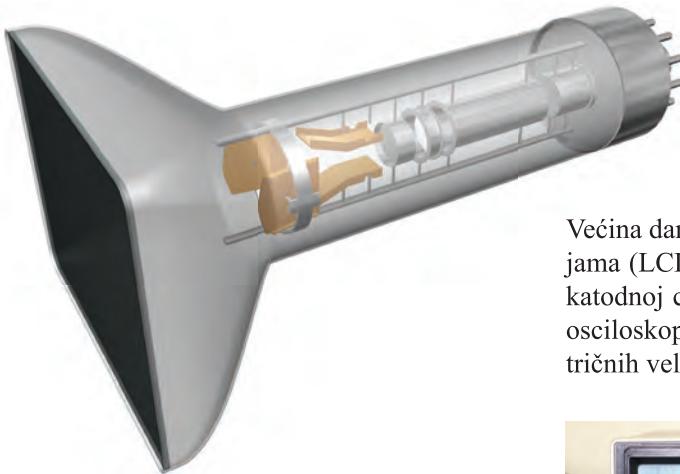
d je udaljenost između dviju ploča kondenzatora

v je brzina kojom je čestica ušla u polje (ujedno i vodoravna komponenta brzine u polju)

Izraz

$$y = \text{konstanta} \cdot x^2$$

u matematičkom smislu predstavlja polinom drugog stupnja čiji je graf *parabola*. Putanja nabijene čestice u homogenom električnom polju je, dakle, parabola.

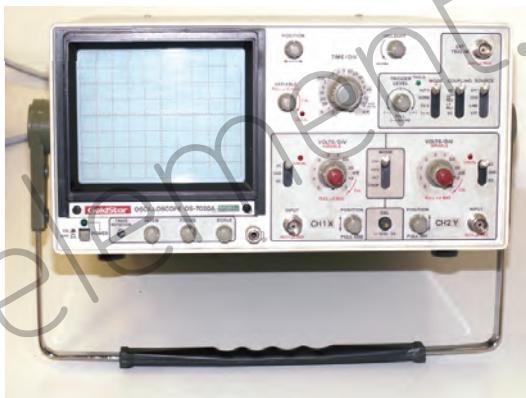


1.1-4

Katodna cijev i elektronski top temelj su klasičnog osciloskopa i klasičnog televizora ili monitora. Danas su gotovo u potpunosti zamjenjeni ravnim ekranima (LCD-Liquid Crystal Display i plazma).

Mijenjanjem napona na pločama kondenzatora mijenjamo konstantu u gornjoj jednadžbi odnosno oblik parabole. Drugim riječima, česticu možemo više ili manje skrenuti, ovisno o razlici potencijala dviju ploča. Na taj način nabijenom česticom možemo upravljati. Upravo to se i radi u svakoj katodnoj cijevi (slika 1.1-4).

Većina današnjih televizora temelji se na drugim, modernijim tehnologijama (LCD i plazma), no stariji su televizori i monitori bili temeljni na katodnoj cijevi. I danas mnogi uređaji koriste katodnu cijev, primjerice osciloskopi – uređaji za grafički prikaz vremenske ovisnosti nekih električnih veličina poput napona (slika 1.1-5).



1.1-5

Osciloskop je uređaj koji prikazuje električni signal u ovisnosti o vremenu

1.1.2. Elementarni naboј

Možda najvažnija činjenica o električnom naboju koju smo prošle godine naučili, a koju vrijedi ponoviti, je *kvantizacija* električnog naboja. Električni naboј je kvantiziran, što znači da postoji najmanji mogući iznos naboja koji nazivamo **elementarnim električnim nabojem**.

Elementarni električni naboј najmanji je električni naboј koji može nositi izdvojena čestica.

Sva istraživanja su, bez iznimke, pokazala da ne postoji izdvojena čestica tvari koja bi imala manji električni naboј od elementarnog električnog naboja. Taj naboј obilježavamo sa e , a njegov iznos je

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

Elementarni električni naboј po iznosu odgovara naboju **elektrona** i naboju protona. Prema dogovoru, naboј elektrona je negativan, a naboј protona pozitivan.

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

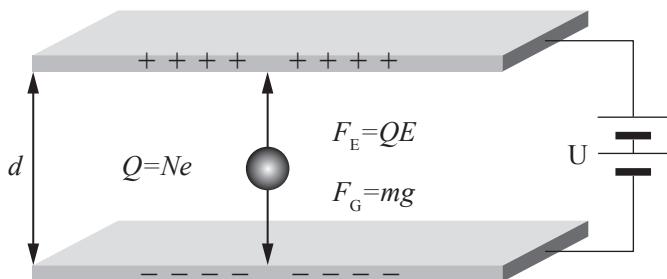
$$Q_p = +e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Elektron je elementarna čestica negativnog električnog naboja.



J. J. Thomson (1856. – 1940.), britanski fizičar. Otkrio je elektron 1897. godine za što je dobio Nobelovu nagradu 1906. godine. Njegovo je puno ime bilo Joseph John, no ostao je poznat kao J. J.

Naboј elektrona prvi je uspio izmjeriti američki fizičar Robert Millikan. Sastavio je uređaj u kojem je mogao elektrizirati sitne kapljice ulja i ubacivati ih u homogeno okomito usmjereni električno polje. Orientacija električnog polja bila je takva da električna sila “gleda” prema gore –



1.1-6

Sitna nabijena kapljica lebdi u homogenom električnom polju jer se električna sila poništava s gravitacijskom

suprotno od gravitacijske sile, kao na slici 1.1-3. Raspršene kapljice bile su različitih veličina, dakle i različitih masa, odnosno različitih težina. One kapljice čija je težina bila upravo jednaka električnoj sili ostale su lebdjeti (nisu padale niti se dizale).

Za lebdeće kapljice vrijedi jednakost težine i **električne sile**, kao na slici 1.1-6.

$$F_G = F_E$$

Težina je jednaka umnošku mase i gravitacijskog ubrzanja, a električna sila umnošku naboja i **električnog polja**.

$$mg = QE$$

Homogeno električno polje (dobiveno pločastim kondenzatorom) možemo izračunati kao omjer napona među pločama i udaljenosti ploča pa gornji izraz postaje

$$mg = Q \frac{U}{d},$$

što možemo napisati i kao

$$Q = \frac{mgd}{U}.$$

Električna sila je privlačna ili odbojna sila između tijela koja imaju električni naboј.

Električno polje je svojstvo u prostoru oko tijela s električnim nabojem zbor kojeg na drugo tijelo s električnim nabojem djeluje električna sila.

Nadalje, masa kapljice odgovara umnošku gustoće i volumena, a volumen je $\frac{4r^3\pi}{3}$ (ako kapljice aproksimiramo kuglicama). Stoga se gornji izraz svodi na

$$Q = \frac{4\rho r^3 \pi g d}{3U}.$$

Na desnoj strani ovog izraza sve su veličine konstantne, osim napona i polumjera. Mijenjanjem napona mijenja se i polumjer kapljica koje mogu lebdjeti u homogenom električnom polju. S pomoću mikroskopa mijereći polumjere (zapravo promjere) kapljica za različite napone Millikan je utvrdio da su naboji uljnih kapljica uvijek jednaki cijelobrojnom umnošku elementarnog naboja.

$$Q = Ne$$

Dakle, N može biti 1, 2 ili 3 i tako dalje. To je značilo da je naboј kvantizirana veličina. Millikanov rezultat izračuna elementarnog naboja nije odstupao od današnje vrijednosti za više od 10 %.

Osim elektrona i protona, električni naboј mogu nositi i veće čestice. Primjerice, atomi se mogu ionizirati – može im se dodati ili oduzeti elektron. Takve atome koji postaju električki nabijeni nazivamo **ionima**. Negativno nabijen ion ima višak elektrona i nazivamo ga **anionom**. Pozitivno nabijen ion ima manjak elektrona i nazivamo ga **kationom**.

Ion je električno nabijen atom ili molekula.

Anion je negativno nabijen ion.

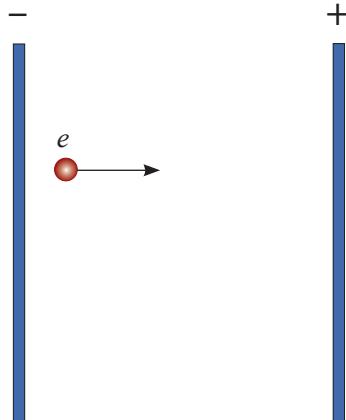
Kation je pozitivno nabijen ion.



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

● Primjer 1

Mirni elektron ubrzan je razlikom potencijala od 1200 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:

$$eU = \frac{mv^2}{2}$$

$$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1200 \text{ V} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot v^2}{2}$$

$$3,84 \cdot 10^{-16} \text{ C} \cdot \text{V} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot v^2$$

$$v^2 = 4,2 \cdot 10^{14} \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$$

$$v = 2 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}.$$

● Primjer 2

U akceleratoru je postignuta razlika potencijala od $5 \cdot 10^6$ V. Kolika je kinetička energija i konačna brzina protona koji je iz mirovanja ubrzan tom razlikom potencijala?

Rješenje:

Proton se giba kroz razliku potencijala U pa njegova potencijalna energija E_p prelazi u kinetičku energiju E_k . Stoga je

$$E_k = E_p$$

Potencijalna energija odgovara umnošku napona U i naboja protona

$$Q_p = +e$$

$$E_p = U Q_p = U e$$

Kinetička energija protona tada je

$$E_k = U e = 5 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot e = 5 \cdot 10^6 \text{ eV}$$

$$E_k = 5 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 8 \cdot 10^{-13} \text{ J}.$$

Iz definicije kinetičke energije

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

slijedi izraz za brzinu

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 8 \cdot 10^{-13}}{1,67 \cdot 10^{-27}}} \text{ m/s} = 3,1 \cdot 10^7 \text{ m/s}.$$



SAŽETAK

Atom je najmanja čestica tvari.

Elementarna čestica je najmanja nedjeljiva čestica tvari.

Električni naboј jedno je od temeljnih svojstava elementarne čestice.

Elementarni električni naboј najmanji je električni naboј koji može nositi izdvojena čestica.

$$Q = Ne$$

Elektron je elementarna čestica negativnog električnog naboja.

Električna sila je privlačna ili odbojna sila između tijela koja imaju električni naboј.

Električno polje je svojstvo u prostoru oko tijela s električnim naboјem zbog kojeg na drugo tijelo s električnim naboјem djeluje električna sila.

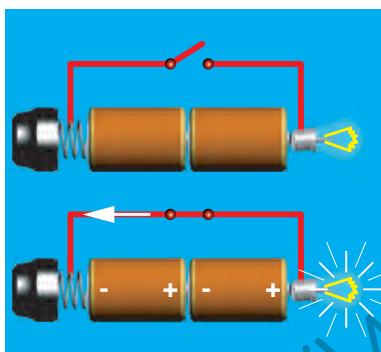
Ion je električno nabijen atom ili molekula.

Anion je negativno nabijen ion.

Kation je pozitivno nabijen ion.

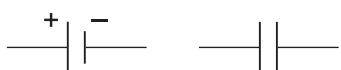
Ključni pojmovi

- strujni krug
- električna struja
- stvarni smjer struje
- tehnički smjer struje
- amper
- gustoća električne struje



1.2-1

Izvor napona (dvije baterije), trošilo (žaruljica), vodiči i sklopka čine strujni krug. Na gornjoj je slici krug otvoren pa struja ne teče. Donja slika prikazuje zatvoreni stujni krug u kojem struja teče.



1.2-2

Simbol izvora (lijevo) i simbol kondenzatora (desno)

Pogled u jezik

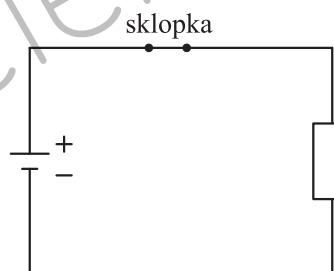
Riječ kristal ima u jeziku dva značenja: (1) tijelo u kojem su čestice pravilno raspoređene i (2) fino brušeno staklo, primjerice češki kristal. Kad govorimo o kristalima u kontekstu fizike, mislimo na prvo značenje, dakle na pravilan raspored čestica, a ne na fino brušeno staklo.

1.2. Električna struja

1.2.1. Električni strujni krug

Utvrđili smo, dakle, da na električne naboje u električnom polju djeluje električna sila. Pod utjecajem te sile naboji se gibaju, a njihovo *usmjereni* gibanje nazivamo električnom strujom. Kako bi struja tekla dulje vrijeme, a ne samo kratkotrajno (kao, recimo, kod munje ili pražnjenja električnog kondenzatora), potrebno je zatvoriti **strujni krug**, kao na slici 1.2-1. Strujni krug mogu činiti razni električni elementi. Osnovni su elementi izvor napona, trošilo i vodiči. Za prikaz shema stujnih krugova postoje ubičajeni simboli. Primjerice, dvije usporedne crtice različitih veličina (od kojih je veća uvijek pozitivni pol ili plus) predstavljaju izvor, kao na slici 1.2-2. Sličan je simbol kondenzatora, dvije usporedne crtice istih veličina, koji smo već ranije upoznali. Pravokutnik je simbol trošila koje ćemo kasnije nazvati omskim otpornikom (slika 1.2-3).

Strujni krug je skup električnih elemenata povezanih u cjelinu.



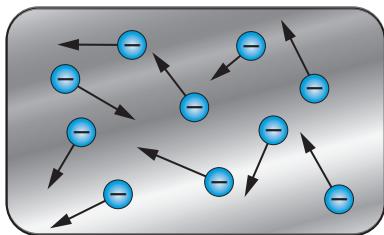
1.2-3

Strujni krug sa slike 1.2-1 možemo shematski prikazati simbolima za izvor, sklopku i trošilo

Izvor napona može biti istosmjeran ili izmjeničan. Na slikama 1.2-1 i 1.2-3 prikazan je istosmjerni izvor napona – baterija. Do izvora izmjeničnog napona doći ćemo kasnije. Primjer je izmjeničnog izvora gradska mreža koju koristimo u kućanstvima. Svaki istosmjerni izvor ima dva pola: pozitivni (+) i negativni (-). Pri umetanju baterija u neki električni uređaj, daljinski upravljač ili mobitel valja paziti na *polaritet* – ispravan položaj polova.

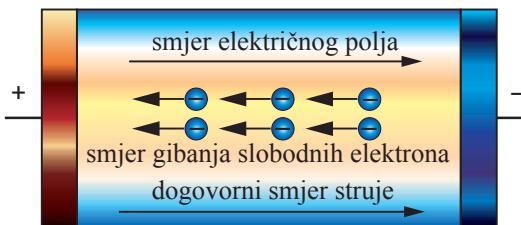
1.2.2. Atomistički opis električne struje

Možemo se pitati što se to zapravo događa u elementu strujnog kruga kad njime teče električna struja. Razmotrimo, primjerice, metalni vodič. Za metale kažemo da imaju *kristalnu strukturu*, a to znači da su njihovi atomi pravilno raspoređeni u rešetku i titraju oko ravnotežnog položaja. Dio elektrona u toj kristalnoj rešetki metala nije čvrsto vezan za pojedine atome, nego može prolaziti između atoma. Te elektrone nazivamo *slobodnim elektronima*. Oni su vezani za metal, ali ne i za svaki pojedinačni atom. Slobodni se elektroni neprekidno gibaju unutar metala. Takvo je gibanje *kaotično*, kao na slici 1.2-4, a uzrok mu je unutarnja energija koju pak iskazujemo temperaturom. Što je tijelo na višoj temperaturi, unutarnje je gibanje čestica intenzivnije.



1.2-4

Kaotični smjerovi gibanja slobodnih elektrona u tvari kad nema električnog polja, odnosno vanjskog napona



1.2-5

Gibanje slobodnih elektrona u vodiču pod djelovanjem vanjskog napona. Dogovorni ili tehnički smjer struje suprotan je smjeru gibanja elektrona. Stvarni je smjer struje u smjeru gibanja elektrona.

Kaotično gibanje slobodnih elektrona ne čini električnu struju kao što ni vjetrom uzburkano jezero ne čini rijeku. No ako spojimo metalnu žicu na krajeve izvora napona, slobodni se elektroni počinju usmjereno gibati od jednog prema drugom polu. To gibanje nazivamo **električnom strujom**. Izvor napona natjera elektrone na usmjereno gibanje, kao na slici 1.2-5, slično kao što visinska razlika izvora i ušća rijeke natjera vodu na usmjereno gibanje.

Električna struja je usmjereno gibanje električnih naboja.

Kao što rijeka ima dobro određen smjer, od izvora k ušću, tako i električna struja ima određen smjer. Elektroni, kao nositelji električnog naboja u vodičima gibaju se od negativnog pola izvora (-) prema pozitivnom polu izvora (+). To je **stvarni smjer struje**. Dakle, stvarni je smjer struje smjer gibanja negativnih nositelja naboja. No prije razdoblja atomističkog opisa električne struje uveden je dogovor koji u elektrotehnici vrijedi i danas: smjer električne struje dogovorno je određen kao smjer gibanja nositelja pozitivnog naboja, dakle od (+) prema (-). To je **tehnički smjer struje**. Primijetite da smo već na slici 1.2-1 označili struju na taj način: od (+) prema (-). Bijela strelica na toj slici, dakle, označava tehnički smjer struje.

Stvarni smjer struje je smjer gibanja negativnih naboja.

Tehnički smjer struje je smjer gibanja pozitivnih naboja.

1.2.3. Definicije eletrične struje i gustoće elektročne struje

Električnu struju u vodiču dosad smo definirali samo opisno: kao usmjereno gibanje slobodnih elektrona. Razmotrimo sada kvantitativan ili količinski opis električne struje. Elektroni nose električni naboј koji u jedinici vremena prolazi presjekom vodiča. Što više naboja prođe kroz presjek vodiča u što kraćem vremenu, to je električna struja jača. Uobičajeni znak fizikalne veličine za električnu struju je I . Struja I je, dakle, proporcionalna količini električnog naboja ΔQ koji prođe presjekom vodiča

$$I \sim \Delta Q$$

i obrnuto proporcionalna razlici vremena Δt .

$$I \sim \frac{1}{\Delta t}$$

Električna je struja, dakle, jednakom omjeru promjene naboja i promjene vremena. Skraćeno govorimo o "naboju u jedinici vremena".

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

Naziv mjerne jedinice SI za električnu struju je **amper**, a znak jedinice je A. Amper je jedna od sedam osnovnih mjernih jedinica Međunarodnog sustava (SI), a nazvana je prema francuskom fizičaru André-Marie Ampèreu. Više o definiciji ampera možete naći u dodatku *Mjerenje u fizici* na kraju knjige. Iz dimenzijske analize možemo izvesti vezu ampera, kulona i sekunde.



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.


Zanimljivost


Iznos električne struje možemo objasniti kroz analogiju s rijekom, pri čemu tok vode predstavlja električnu struju. Povećanje iznosa struje može se usporediti s povećanjem protoka vode u rijeci. Naboji se u vodiču gibaju od točke višeg prema točki nižeg potencijala, odnosno napon omogućava gibanje naboja. U analogiji s rijekom, geometrija okoliša, zbog koje nastaje vodopad, predstavlja napon.

$$[I] = \frac{[\Delta Q]}{[\Delta t]}$$

$$A = \frac{C}{s} = Cs^{-1}$$

Ako u vremenu od 1 s poprečnim presjekom vodiča prođe električni nابoj od 1 C, električna struja ima iznos 1 A. Iz gornjeg izraza možemo napisati i kulon, kao izvedenu jedinicu, s pomoću osnovnih jedinica SI, ampera i sekunde.

$$C = As$$

Amper je naziv mjerne jedinice SI za električnu struju.

Naposljetku, spominjali smo poprečni presjek vodiča S , koji dosad nismo uzimali u obzir pri opisu struje. Ako električna struja prolazi kroz vodič većeg presjeka, njezina je gustoća manja. I obrnuto, ako električna struja prolazi kroz vodič manjeg presjeka, njezina je gustoća veća. **Gustoća električne struje** proporcionalna je struji I , a obrnuto proporcionalna površini presjeka vodiča S . Uobičajeni znak fizikalne veličine za gustoću električne struje je J .

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

- Mjerna jedinica SI za gustoću električne struje je Am^{-2} . Jedinica nema poseban naziv.

Gustoća električne struje jednaka je omjeru električne struje i površine presjeka vodiča.


Pogled u kemiju

U vodenoj otopini spoja H_2SO_4 (sumporne kiseline) dolazi do disocijacije pa nastaju ioni $2H^+$ i SO_4^{2-} . Negativni se ioni kreću prema pozitivnoj elektrodi koja predstavlja nastavak pozitivnog pola baterije, a pozitivni se ioni kreću prema negativnoj elektrodi. Na taj se način zatvara strujni krug u elektrolitu. Pozitivnu elektrodu obično nazivamo anodom, a negativnu katodom.

Primjer 3

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

Rješenje:

Električna je struja prostrujali naboј u jedinici vremena.

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

Ukupni je naboј umnožak elementarnog naboja i broja elektrona.

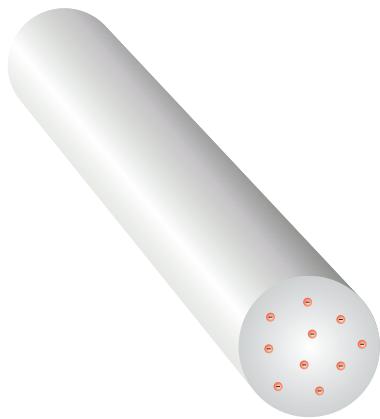
$$Q = Ne$$

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**

Strujni krug je skup električnih elemenata povezanih u cjelinu.

Električna struja je usmjereni gibanje električnih naboja.

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

Stvarni smjer struje je smjer gibanja negativnih naboja.

Tehnički smjer struje je smjer gibanja pozitivnih naboja.

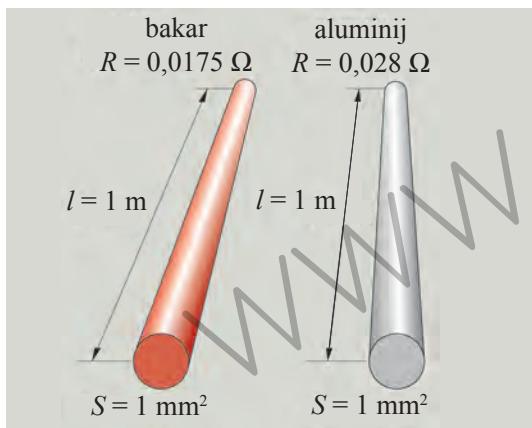
Amper je naziv mjerne jedinice SI za električnu struju.

Gustoća električne struje jednaka je omjeru električne struje i površine presjeka vodiča.

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

Ključni pojmovi

- električni otpor
- om
- električna vodljivost
- električni napon
- volt
- Ohmov zakon
- prvo Kirchhoffovo pravilo
- drugo Kirchhoffovo pravilo
- ampermetar
- voltmeter



1.3-1

Bakreni i aluminijski vodiči, istih poprečnih presjeka i iste duljine, imaju različite otpore zbog različitih otpornosti

materijal	otpornost $\rho / \cdot 10^{-6} \Omega \text{m}$	provodnost $\kappa / \cdot 10^6 \text{ Sm}^{-1}$
srebro	0,0159	62,9
bakar	0,0175	57,1
zlato	0,023	43,4
aluminij	0,028	35,7
volfram	0,055	18,2
platina	0,11	9,1
željezo	0,13	7,7
nikelin	0,4	2,5
konstantan	0,50	2,0
kromnikal	1,10	0,91

Tablica 1

Otpornosti i provodnosti nekih materijala pri 20 °C

1.3. Električni otpor

1.3.1. Ohmov zakon

Električnu struju u vodiču opisali smo kao usmjereni gibanje slobodnih elektrona. Međutim, različiti materijali imaju različita svojstva, između ostalog i različite količine slobodnih elektrona koji mogu voditi električnu struju. Stoga su neki materijali bolji, a neki lošiji vodiči električne struje. To njihovo svojstvo nazivamo **električnim otporom**. Uobičajeni znak fizikalne veličine električnog otpora je R . Mjerna jedinica SI za električni otpor nosi naziv **om**, a njezin znak je Ω .

Električni otpor je svojstvo tvari da se opire protjecanju električne struje.

Om je naziv mjerne jedinice SI za električni otpor.

Električni otpor vodiča ovisi i o svojstvu materijala i o fizičkim karakteristikama vodiča, njegovoj duljini i poprečnom presjeku, kao što je prikazano na slici 1.3-1. Dakle, dva vodiča istih poprečnih presjeka i iste duljine mogu imati različite otpore zato što su izrađeni od različitih materijala. Svojstvo tvari o kojem ovisi električni otpor nazivamo električnom otpornošću i označavamo simbolom ρ (čita se "ro"). Električnu otpornost tvari iskazujemo otporom vodiča jedinične duljine ($l = 1 \text{ m}$) i jedinične površine presjeka ($S = 1 \text{ m}^2$) pri temperaturi od 20 °C. Mjerna jedinica SI električne otpornosti je $\Omega \text{ m}$, a tipične su vrijednosti milijun puta manje, kao što se vidi u tablici 1.

Mjerenjem otpora vodiča različitih duljina i poprečnih presjeka može se utvrditi da je električni otpor vodiča proporcionalan otpornosti ρ i duljini vodiča l , a obrnuto proporcionalan površini presjeka vodiča S . Stoga izraz za električni otpor žice možemo napisati kao

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

S obzirom na električnu otpornost, struju najbolje vodi srebro jer ima najmanju otpornost. No za izradu vodiča najčešće se koristi bakar jer je jeftiniji. U dalekovodima se pak koristi aluminij jer ima manju gustoću pa su kabeli lakši.

Katkad svojstvo materijala koje se tiče vođenja električne struje ne opisuјemo električnom otpornošću, nego električnom provodnošću. *Električna provodnost* označuje se sa κ , a jednaka je recipročnoj vrijednosti električne otpornosti.

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

Tablica 1 pokazuje usporedne vrijednosti električne otpornosti i električne provodnosti za odabrane tvari od kojih se obično izrađuju vodiči. Tvari su poredane od boljih prema lošijim vodičima. Najbolji vodič ima najmanju otpornost, odnosno najveću provodnost.

Recipročnu vrijednost električnog otpora nazivamo električnom vodljivošću. Uobičajeni znak za **električnu vodljivost** je G , a mjerna jedinica SI za vodljivost ima posebno ime – simens.

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



Iz dimenzijske analize ovog izraza vidi se da je simens jednak recipročnom omu.

$$[G] = \frac{1}{[R]}$$

$$S = \frac{1}{\Omega} = \Omega^{-1}$$

Električna vodljivost je recipročna vrijednost električnog otpora.

Ernst Werner von Siemens (1816. – 1892.), njemački izumitelj i industrijalac, 1847. godine osnovao je telegrafsku tvrtku koja je i danas među najvećim europskim tvrtkama iz područja elektronike i telekomunikacija. Mjerna jedinica SI za električnu vodljivost dobila je naziv po njemu.

● Primjer 4

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:

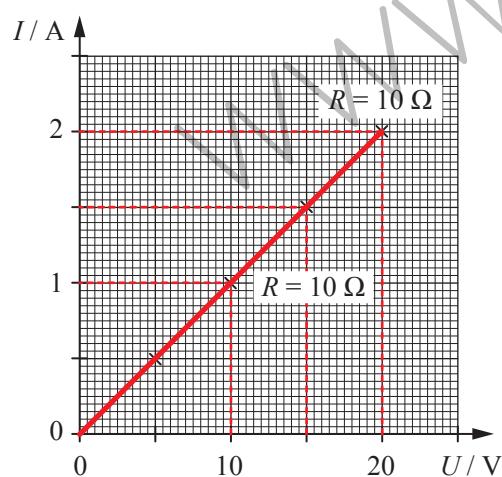
$$0,028 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 0,0159 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m} \cdot l_{\text{srebro}}$$

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

Vratimo se ponovno na pitanje električne struje u vodiču. Struju smo opisali kao usmjereni gibanje slobodnih elektrona. No ti se slobodni elektroni neće sami od sebe početi usmjereni givati. Usmjereni gibanje nastaje tek kad postoji električno polje. Tad na naboje djeluje električna sila. Također smo već rekli da se električno polje može opisati na još jedan način – s pomoću potencijala. Pri razmatranju električnih struja u vodičima mnogo je praktičnije raditi s potencijalima nego s poljima.



Georg Simon Ohm (1789. – 1854.), njemački fizičar, jedan je od prvih istraživača elektriciteta. Otkrio je razmjernost napona na krajevima vodiča i struje kroz taj vodič, što danas nazivamo Ohmovim zakonom. Jedinica SI za električni otpor nosi njegovo ime.



1.3-2

Linearna ovisnost struje o naponu U za konstantan pokazuje da je to omski materijal. Takva se ovisnost u tehničkoj literaturi zove strujno-naponska karakteristika materijala. Naziv materijala "konstantan" znači stalан или константан отпор.

Ono što će uzrokovati usmjereno gibanje elektrona, odnosno pokrenuti električnu struju u vodiču, razlika je potencijala na krajevima vodiča. Tu razliku potencijala nazivamo **električnim naponom**. Kao što smo već više puta rekli, uobičajeni znak fizikalne veličine električnog napona je U , mjerena jedinica SI za električni napon je **volt**, a njezin je znak V .

Električni napon je razlika električnih potencijala.

Volt je naziv mjerne jedinice SI za električni napon.

Jednostavnim mjerjenjima može se pokazati da veći napon na krajevima vodiča uzrokuje i veću električnu struju. Danas je to iznimno lako napraviti u školskom laboratoriju koji ima ampermetar, voltmeter i različite izvore napona. No prije nepunih 200 godina ti instrumenti nisu postojali. Prvu bateriju konstruirao je talijanski fizičar Alessandro Volta 1800. godine. Nedugo nakon toga istraživanjem strujnih krugova počeo se baviti Georg Simon Ohm. U to je doba bio njemački učitelj, a kasnije je doktorirao i postao sveučilišni profesor eksperimentalne fizike. Ohm je složio vlastitu aparaturu kojom je mjerio ovisnost struje o naponu u strujnim krugovima. Pokazao je da je jakost struje u zatvorenom strujnom krugu proporcionalna naponu, a obrnuto proporcionalna otporu tog strujnog kruga. Matematički to zapisujemo kao

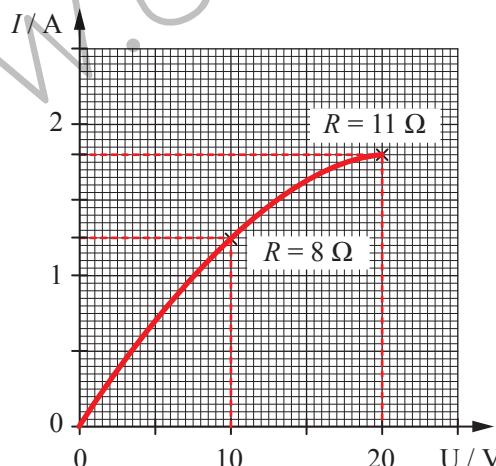
$$I = \frac{U}{R}$$

i nazivamo **Ohmovim zakonom**. Ohm je svoje rezultate objavio u knjizi *Matematičko istraživanje galvanskih krugova* 1827. godine. Ohmov zakon možemo izraziti i preko vodljivosti.

$$I = U \cdot G$$

Grafički prikaz ovisnosti električne struje o električnom naponu nazivamo strujno-naponskom karakteristikom materijala. Za vodiče koje je proučavao Ohm taj graf ima oblik pravca, kao na slici 1.3-2. Tada govorimo o linearnoj ovisnosti struje o naponu, a materijale za koje vrijedi takva ovisnost nazivamo **omskim otpornicima**.

Ohmov zakon je linearna ovisnost struje i napona u vodiču kojim teče struja.



Postoje materijali, primjerice željezo, za koje strujno-naponska karakteristika nije linearna, kao na slici 1.3-3. To nisu omski otpornici i za njih ne vrijedi Ohmov zakon.

1.3-3

Ovisnost struje o naponu za željezo. Struja nije linearno ovisna o naponu pa željezo nije omski materijal.

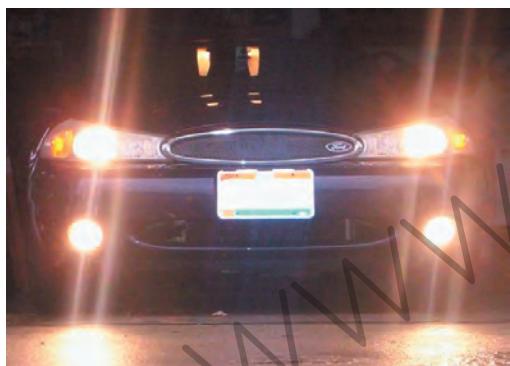
Jedna trivijalna napomena za kraj priče o Ohmovu zakonu: premda se Ohmov zakon može potpuno ispravno napisati na način

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

i premda se taj izraz matematički može interpretirati kao "otpor je funkcija struje i napona", valja znati da otpor ne ovisi o struji i naponu. Otpor je karakteristika vodiča i postoji bez obzira na struju i napon. Ovisi o svojsvu materijala (što izražavamo otpornošću) i o geometriji vodiča (što obično izražavamo duljinom i poprečnim presjekom).

● Primjer 5

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



Rješenje:

Prema Ohmovu 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.

Izborni sadržaj

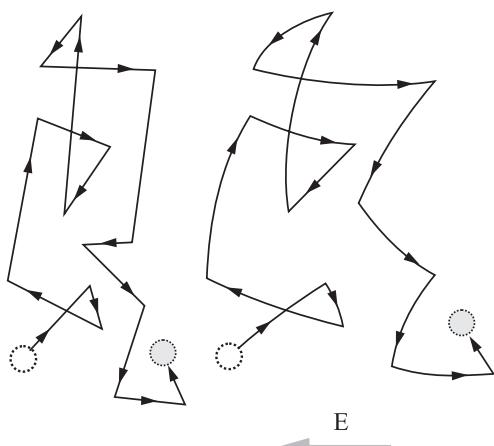


1.3.2. Ovisnost otpora o temperaturi

Pri atomističkom opisu električne struje rekli smo da se slobodni elektroni neprekidno gibaju unutar metala. No to gibanje nije usmjereni, nego kaotično – različiti elektroni gibaju se u različitim smještvima. Razlog tom gibanju unutrašnja je energija koja je jednaka zbroju svih kinetičkih energija čestica. Unutrašnja energija proporcionalna je apsolutnoj temperaturi. Što je tijelo na višoj temperaturi, to je unutrašnje gibanje intenzivnije.

Kad postoji napon, odnosno kad su krajevi vodiča na različitim potencijalima, počinje usmjereno gibanje. No to nikako ne znači da kaotično gibanje potpuno iščezava. Elektroni se i dalje gibaju uglavnom amo-tamo, ali prosjek tog gibanja nije približno nula (kao u slučaju bez napona), nego postoji veći pomak u jednom smjeru, kao na slici 1.3-4. Engleska je riječ za taj pomak elektrona *drift*, stoga se prosječna brzina elektrona u vodiču naziva driftnom brzinom.

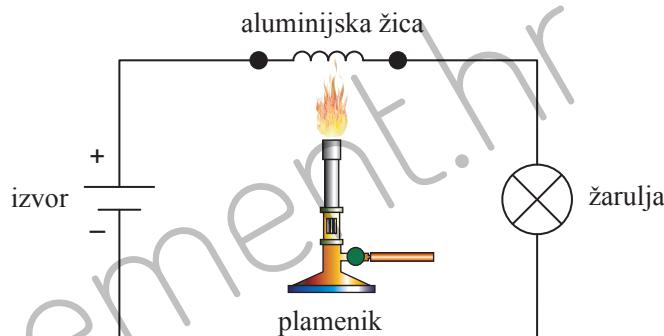
Izborni sadržaj



1.3-4

- a) Isprekidano gibanje elektrona u materijalu kada nema vanjskog električnog polja. Nakon brojnih sudara, elektron se nađe blizu početnog položaja.
- b) Gibanje elektrona uz prisutnost polja: isprekidano gibanje rezultira konačnim pomakom u smjeru suprotnom polju E .

Dakle, na višoj temperaturi slobodni se elektroni u vodiču gibaju intenzivnije. Zato je sve teže ostvariti njihovo usmjereno gibanje. Za isti napon pri većoj temperaturi driftna je brzina elektrona manja, što znači da je struja manja (slika 1.3-5). Drugim riječima, porast temperature rezultira povećanjem otpora. Otpor vodiča, dakle, raste s temperaturom.



1.3-5

Ovisnost otpora vodiča o temperaturi može se pokazati ovakvim jednostavnim uređajem: grijanjem žice otpor raste pa se iznos struje u strujnom krugu smanjuje. Zato žarulja sve slabije svjetli.

Eksperimentom se može pokazati da je relativna promjena otpora $\Delta R/R$ proporcionalna promjeni temperature Δt .

$$\frac{\Delta R}{R} \sim \Delta t.$$

Koeficijent proporcionalnosti, koji ovisi o materijalu, nazivamo temperaturnim koeficijentom i označavamo sa α . Nadalje, uobičajeno je da se za referentni otpor uzima otpor pri 20°C . Stoga gornji izraz možemo napisati kao

$$\frac{R - R_{20}}{R_{20}} = \alpha \Delta t,$$

što se može zapisati u obliku

$$R(t) = R_{20} (1 + \alpha \Delta t),$$

gdje je

$$\Delta t = t - 20^\circ\text{C},$$

a $R(t)$ znači fukcijsku ovisnost otpora o temperaturi. Neke vrijednosti temperaturnih koeficijenata navedene su u tablici 2.

materijal	temperaturni koeficijent α / K^{-1}
srebro	0,0041
bakar	0,0039
aluminij	0,0038
volfram	0,005
platina	0,0039
željezo	0,0045
nikelin	0,00023
konstantan	0,00005
kromnikal	0,00015
tantal	0,00005
ugljen	-0,0008

Tablica 2

Temperaturni koeficijenti otpora nekih materijala pri 20°C

$$\Delta t (\text{ }^\circ\text{C}) = \Delta T (\text{K})$$

Promjena temperature u Celzijevim stupnjevima jednaka je promjeni temperature u stupnjevima Kelvina.



● Primjer 6

Izračunajte otpor žice od platine duljine 2 m i promjera 0,5 mm na temperaturi 20 °C. Izračunajte za koliko se postotaka poveća otpor ako se žica ugrije na 1000 °C.

Rješenje:

Otpor tog komada žice na 20 °C je

$$R_{20^\circ\text{C}} = \rho \frac{l}{S} = 1,06 \cdot 10^{-7} \Omega \text{m} \cdot \frac{2 \text{m}}{(0,25 \cdot 10^{-3} \text{m})^2 \pi} = 1,08 \Omega.$$

Dalje računamo otpor prema formuli: $R_t = R_{20}(1 + \alpha(t - t_0))$, gdje R_{20} već imamo iz gornjeg računa.

Dakle: $R_{1000^\circ\text{C}} = 5,21 \Omega$.

Povećanje otpora je

$$\frac{\Delta R}{R} \cdot 100\% = \frac{R_{\text{konačno}} - R_{\text{početno}}}{R_{\text{početno}}} \cdot 100\% = \frac{5,21 \Omega - 1,08 \Omega}{1,08 \Omega} \cdot 100\% = 380\%$$



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

Za mnoge vodiče otpor linearno raste s temperaturom u području od 0 °C do 100 °C. No ne ponašaju se sve tvari tako. Otpori poluvodiča se, primjerice, smanjuju s povećanjem temperature zato što broj nositelja naboja u poluvodičima raste s temperaturom.

Naposljetku, na vrlo niskim temperaturama događa se fascinantna pojava – potpuno isčezavanje električnog otpora. Tu pojavu, koju nazivamo *supravodljivošću*, nije moguće objasniti u okviru klasične fizike. To je potpuno kvantni fenomen. Supravodljivost je otkrio nizozemski fizičar Heike Kamerlingh Onnes 1911. godine. Opazio je da pri temperaturi od 4,2 K ili -268,95 °C otpor žive naglo pada na nulu. Kasnije je nadena supravodljivost i kod drugih tvari. Posebno je zanimljiva takozvana *visokotemperaturna supravodljivost* – pojava isčeznuća električnog otpora pri temperaturama koje nisu tako ekstremno niske. Proizvedeni su mnogi materijali koji su supravodljivi na temperaturama višim od 100 K. Primjerice, stotine supravodljivih magneta velikog hadronskog sudarača (LHC) u svakodnevnoj su upotrebi u CERN-u, europskom laboratoriju za visokoenergijsku fiziku čestica smještenom pokraj Ženeve (slika 1.3-6). Također, supravodljivi magneti koriste se za stvaranje jakog magnetskog polja za potrebe medicinske dijagnostike.



1.3-6

Jedan od detektora (CMS) velikog hadronskog sudarača