

# 1.

# Električni strujni krug

- 1.1 Uvod u elektricitet**
- 1.2 Građa tvari**
- 1.3 Električni naboji**
- 1.4 Napon, struja i otpor**
- 1.5 Međusobna ovisnost napona, struje i otpora u strujnim krugovima – Ohmov zakon**
- 1.6 Djelovanje električne struje**
- 1.7 Propisi i mjere zaštite od strujnog udara**

## 1.1 Uvod u elektricitet

Nekada mukotrpan rad čovjek je danas zamijenio tehničkim alatima, uređajima i računalima za čiji je rad nužna energija.

Nijedan oblik energije se danas u praksi toliko ne primjenjuje koliko električna energija. Iz tog razloga osnovna znanja o elektricitetu ne postaju samo dijelom opće kulture, već i nužnost.

Dotakne li se metalna kvaka na vratima nakon prelaska preko vunenog tepiha, osjeti se lagani udar ili peckanje. Isto tako, ako se za suha vremena preko najljonske košulje odjene sintetička majica, osjeti se sličan udar, a čuje se i pucketanje. Ako se to učini u mraku, primijećuje se i iskrenje.

Većina ovakvih pojava nisu novost. Prve spoznaje o elektricitetu potječu još iz antičkog doba. Grčki filozof Tales iz Mileta izvodeći pokuse sa žutim jantarom (tvrdna fosilna smola), uočio je pojavu da jantar trljan vunom ili krznom poprimi osobinu da privlači sitne komadiće papira, slame, suhog lišća, dlaku, komadiće lanenog platna i sl.

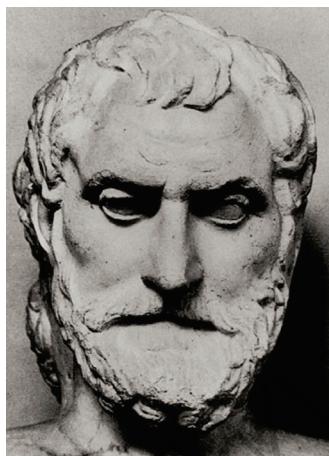
Riječi **elektrika**, **elektrotehnika** i **elektronika** nastale su od grčke riječi ηλεκτρον (elektron) koja znači jantar. Gotovo dva tisućljeća nakon Talesa, ovaj naziv u suvremenu znanost uvodi engleski prirodoslovac William Gilbert (oko 1600. g.). Gilbert je uočio da svojstva slična jantaru imaju i stakleni štap kada ga trljamo svilenom krznom – privlači lagane predmete (sitnih komadića papira, kose, ...).

Gilbertovi pokusi dali su još jednu spoznaju: dva staklena štapa trljana svilom, odnosno dva jantara trljana krznom imala su svojstvo da se međusobno odbijaju dovedemo li ih na blisku udaljenost. Pojavu privlačenja laganih predmeta od jantara ili staklenog štapa prethodno trljanih krznom, odnosno svilom, te međusobnog odbijanja dvaju staklenih štapa ili dvaju jantara pripisuje elektricitetu.

Ovu pojavu je C. F. Cisternay du Fay (1698. – 1739.) pokušao objasniti uvođeci dvije vrste elektriciteta koje je nazvao „staklasto“ i „smolasto“.

Otkrićem lajdenske boce (u Nizozemskoj, u Leidenu, 1745.), došlo se do spoznaje o spremanju elektriciteta te se time otvaraju mogućnosti eksperimentiranja s elektricitetom. Za lajdensku bocu možemo reći da je preteča suvremenim kondenzatorima.

Američki fizičar i publicist Benjamin Franklin je 1752. g. za vrijeme grmljavine obavljao pokuse s „letećim zmajem“. Otkrio je električnu prirodu munje koja je do tada bila misterij. Postavio je hipotezu:



Slika 1.1-1

Thales



Slika 1.1-2

Jantar



Slika 1.1-3

Munja



Alessandro Volta (1745.-1827.), talijanski fizičar.

Izumio je prvi kemijski izvor istosmjerne struje, a objavio ga je prvi put 1800. u pismu britanskom udruženju *Royal Society*. Bio je profesor na talijanskim sveučilištima u Comu i Paviji. Za elektricitet se počeo zanimati 1786.g. kada je vidio Galvanijev rad. Po njemu je ime dobila mjerna jedinica za električni potencijal u SI sustavu - volt (V). Volta je za svoj rad 1805.g. dobio odlikovanje (Francusku legiju časti), a Napoleon ga je 1810. proglašio grofom Kraljevstva Italije.

Postoji samo jedna vrsta elektriciteta. Tijelo je nanelektrizirano ako ima višak ili manjak naboja u odnosu na neutralno, uravnoteženo stanje.

Prema današnjem poznavanju električnih pojava postoje dvije vrste elektriciteta (naboja), dogovorno nazvani pozitivni i negativni, a koji se obilježavaju algebarskim predznakom. Ovaj dogovor zapravo odgovara Franklinovom obilježavanju, pozitivan naboј je onaj koji se pojavljuje na staklu kada se protrla svilenom krpom, a negativan naboј se pojavljuje na ebonitnoj šipci kada se ona protrla krznom.

Već 1785. g. Francuz Charles de Coulomb (čit. Kulon) izvodi pokus s dvije nabijene kugle i postavlja zakon o sili koja djeluje između dva naboja. Osnovni zakon elektrostatike nazvan je upravo po njemu – Coulombov zakon.

Pojam statičkog naboja postaje popularan početkom 19. st., kada Galvani i Volta postavljaju temelje naboja u gibanju. Luigi Galvani opaža kako do elektriciteta dolazi dodirom žablje kraka i metala ("životinjski elektricitet"), što je zaintrigiralo njegova sunarodnjaka, fizičara Alessandra Voltu. Volta je napravio pokus s dvije pločice od različitih metala (bakra i cinka) koje je uronio u vodljivu tekućinu (sumpornu kiselinu) i dobio kemijski izvor električne struje. U čast Galvaniju, ova struja je nazvana galvanska struja, a prvi izvor nazvan je **Voltin članak**. Ovo je prvi trajni izvor struje.

S otkrićem kemijskog izvora električne struje, praktična elektrotehnika naglo napreduje i u kratkom se periodu nižu značajna otkrića.

Nedugo nakon Voltinog otkrića H. C. Oersted (1777. – 1851.) je uočio da se magnetska igla zakreće u blizini vodiča protjecanog strujom.

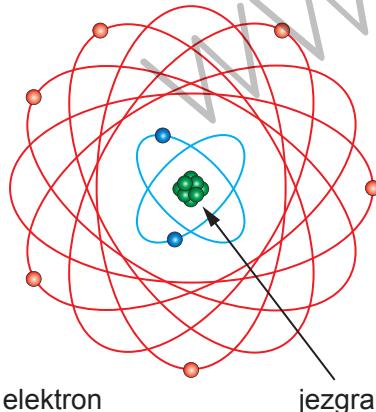
To otkriće je potaklo A. Ampera (1775. – 1836.) pa je nedugo zatim, 1820. godine, otkrio kako vodiči protjecani strujama djeluju jedan na drugog silama (vodiči se privlače ili odbijaju).

Nedugo nakon toga M. Faraday je 1831. postigao najznačajniji uspjeh u povijesti elektrotehnike proizvevši elektricitet iz "magneta", odnosno otkrivši načelo elektromagnetske indukcije i dinamo stroj. Temeljem Faradayevih rezultata istraživanja nastaje novo doba u oblasti znanstvenog istraživanja i u praktičnoj primjeni.

U to doba električne i magnetske pojave promatrane su kao neovisne i jedina veza između njih bila je činjenica da su struje te koje proizvode električno i magnetsko polje. Osnovni zakoni nisu bili ničim međusobno povezani.

J. C. Maxwell je uveo skup jednadžbi koje obuhvaćaju elektromagnetske pojave i predstavljaju znanstvenu osnovu današnje elektrotehnike. H. R. Hertz je 1888. pokusom potvrdio postojanje elektromagnetskih valova.

U vrijeme kad su nastajala ova otkrića i teorije prirodno je da su se razvijala različita područja primjene. Nicala je elektroindustrija, razvijala se elektroenergetika i širile telekomunikacije.



Slika 1.2-1

Složenija struktura atoma

Sva ova područja s njihovim mnogobrojnim primjenama uzrokovala su nagli razvoj elektrotehnike.

Zahvaljujući našem znanstveniku Nikoli Tesli, njegovim višefaznim električnim strujama i okretnom magnetskom polju (1887. g.), ubrzava se proces izgradnje elektrana i proizvodnja izmjenične struje te ekonomičan prijenos električne energije na velike udaljenosti.

## 1.2 Građa tvari

U prostoru u kojem živimo sve što nas okružuje je tvar. Jedno od svojstava tvari je i elektricitet pa stoga svako proučavanje elektriciteta treba započeti proučavanjem građe tvari (materije).

Već su stari Grci smatrali da postoji najmanja čestica tvari koju se ne može raščlaniti na manje dijelove. Tu su česticu nazvali **atom\***.

Danas nam je poznat velik broj različitih atoma od kojih se tvore različiti kemijski elementi.

Kemijski elementi, tj. njihovi atomi razlikuju se u:

- strukturi,
- veličini,
- masi,
- atomskoj težini, itd.

Električne pojave su usko povezane sa strukturom tvari.

Danas znamo da je atom građen od elementarnijih čestica (slika 1.2-1):

- **protona**,
- **neutrona**,
- **elektrona**.

Protoni i neutroni čine jezgru atoma (nukleus). Oko jezgre se nalazi elektronski omotač u kojemu po orbitama (kružnim putanjama) kruže elektroni.

Proton je pozitivno nabijena čestica, elektron je negativno nabijena čestica, a neutron električki neutralna čestica, tj. čestica bez naboja.

Kao elementarni naboј uzima se  $e = 1, 602 \cdot 10^{-19}$  C. Naboј elektrona označava se s  $e_0$ , a iznosi:

$$e_0 = -1, 602 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

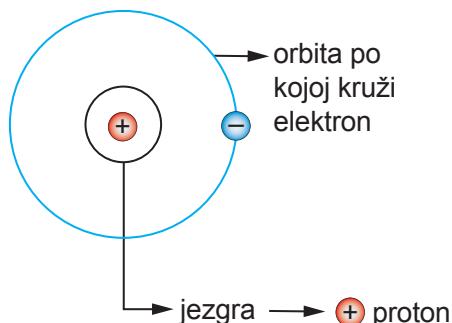
**Kulon** (C) je mjerna jedinica količine naboja.

Naboј elektrona odredio je Millikan, 1910. g.

Naboј protona po vrijednosti je jednak naboјu elektrona, ali je suprotnog predznaka:

$$e_0^+ = +1, 602 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

\* grč. ατωμε - nedjeljivo



Slika 1.2-2

Najmanji atom – atom vodika

Različiti elementi imaju različite atome. Struktura atoma svakog pojedinog elementa se razlikuje po broju protona i neutrona. Broj protona u jezgri atoma određuje redni broj elementa ( $N$ ) u periodnom sustavu elemenata.

Najmanji atom u prirodi jest atom vodika (kemijski simbol H) čija se jezgra sastoji od jednog protona, a oko jezgre kruži jedan elektron (slika 1.2-2). Promjer atoma vodika je reda vrijednosti  $10^{-10}$  m, a promjer najvećeg atoma, atoma urana, gotovo je tri puta veći.

### 1.3 Električni naboji

Na temelju spoznaje o atomskoj strukturi tvari, može se zaključiti:

- Atom se sastoji od jezgre i elektronskog omotača.  
U jezgri su protoni i neutroni.  
Elektronski omotač ima najmanje jednu, a najviše sedam elektronskih ljudsaka po kojima se gibaju elektroni.
- Nositelji elementarnog naboja su elektroni i protoni.  
Elektron ima najmanji negativni elementarni naboј:

$$e_0^- = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Proton ima najmanji pozitivni elementarni naboј:

$$e_0^+ = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

- Naboji elektrona i protona imaju jednak iznos.
- Neutron je električki neutralan, a njegova masa je približno jednaka masi protona.
- Kad je količina pozitivnog i negativnog naboja jednaka, tijelo djeluje neutralno.

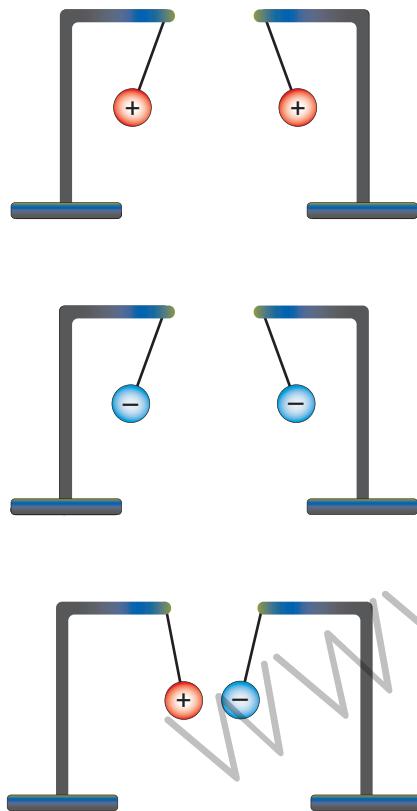
Osnovna jedinica za mjerjenje električnog naboja je kulon, oznaka je C ili ampersekunda:  $C = A \cdot s$ . Količina naboja od jednog kulona odgovara 6,24 trilijuna elementarnih električnih naboja:

$$1 \text{ C} = 6,24 \cdot 10^{18} \cdot e_0.$$

Ukupna količina naboja koja se pojavljuje na tijelima (oznaka  $Q$ ) može se izračunati kao umnožak broja elementarnih čestica ( $n$ ) i njihovog elementarnog naboja  $e_0$ :

$$Q = n \cdot e_0.$$

Protoni i elektroni se kao nositelji elementarnih naboja suprotnog predznaka međusobno privlače. Elektroni se kao istoimeno nabijene čestice, međusobno odbijaju.



Slika 1.3-1

Odbijanje istoimenih i privlačenje raznoimenih naboja

Čestice raznoimenog naboja se privlače, a istoimenog naboja se odbijaju (slika 1.3-1).

S obzirom da atomi tvari u ravnotežnom stanju imaju jednak broj protona i elektrona, tijelo, kao cjelina, je neutralno.

Energija elektrona je manja ili veća, ovisno o tome nalazi li se elektron bliže ili dalje jezgri, odnosno u kojoj je ljudski. Energetske ljudske su **energetske razine**, a elektron, kao i svako fizičko tijelo, nastoji zauzeti položaj najniže energetske razine u kojem posjeduje minimum energije. Zato elektroni najprije popunjavaju ljudske bliže jezgri. Elektron s niže energetske razine može prijeći na višu samo djelovanjem vanjskog poticaja, a kada to djelovanje prestane, on se opet vraća na prvobitnu razinu. Iz toga možemo zaključiti:

Koliko energije elektron dobije od vanjskih sila kada prelazi na višu razinu, toliko energije će osloboditi pri povratku na prvobitnu, nižu razinu.

Djelovanjem vanjskih sila, trenja, svjetlosti i topline, može se postići da elektroni iz vanjske ljudske atoma napuste atom. Time se narušava ravnoteža naboja, tj. broj elektrona i protona u atomu više nije jednak.

Narušavanjem ravnoteže naboja, tijelo počinje električki djelovati i nalazi se u stanju električne nabijenosti.

Elektroni koji su napustili svoj atom postali su slobodni i gibaju se u međuprostoru između atoma ili se vežu uz jezgru susjednog atoma. Atom s manjkom elektrona naziva se pozitivni ion. Atom s viškom elektrona naziva se negativni ion.

**Ioni** su atomi i molekule s viškom ili manjkom elektrona.

**Ionizacija** je proces oslobođanja elektrona iz atoma i stvaranja slobodnih naboja.

Negativno nabijeno tijelo ima višak elektrona; proces nabijanja se sastoji od dodavanja elektrona.

Pozitivno nabijeno tijelo ima manjak elektrona; proces nabijanja se sastoji u oduzimanju elektrona.

### Primjer 1

Koliko je elementarnih naboja sadržano u jednom kulonu?

Zadano:

$$Q = 1 \text{ C}$$

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

$$\underline{n = ?}$$

Rješenje:

$$Q = n \cdot e_p \quad \rightarrow \quad n = \frac{Q}{e} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ protona.}$$

## NAČIN ELEKTRIZIRANJA TIJELA

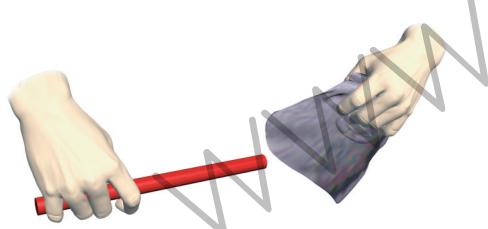
Tijelo će postati električno, elektrizirano, električki nabijeno ako se tijelu poveća ili smanji broj elektrona.

Tijelo se može elektrizirati trljanjem (trenjem), dodirom i influencijom, zagrijavanjem i djelovanjem svjetlosti.

Elektriziranje tijela trenjem i atmosferski elektricitet dugo su bile jedine poznate pojave elektriciteta. Trljanjem dvaju tijela, elektroni, gibajući se, prelaze s jednog tijela na drugo, u oba smjera. Pritom se ulaže neki rad koji je različit za različite tvari.

### Elektriziranje trljanjem

#### Pokus



**Slika 1.3-2a**

Stakleni štap i lanena krpa

- Stakleni štap se trlja komadom lanene krpe (slika 1.3-2a).
- Štap se elektrizira i na njemu se nalazi manjak elektrona, a na krpi višak.
- Elektrizirani štap se približi kuglici od bazgine srčike koja visi o svinjenoj niti (1.3-2b) i zapaža se da dolazi do pomicanja kuglice prema štalu.

Elektrizirani štap privuče kuglicu.

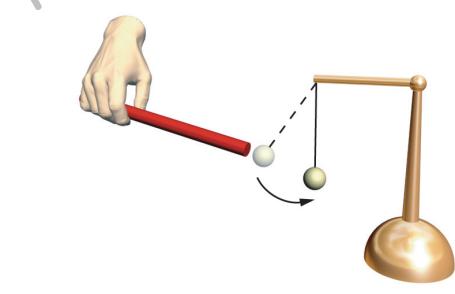
- Kada bazgina kuglica dodirne nanelektrizirani štap, dolazi do nagle promjene položaja kuglice i to tako da se ona odmiče od staklenog štapa. U ovom slučaju dolazi do elektriziranja bazgine kuglice dodirom. (1.3-2c)

Uzrok ovakvog ponašanja je odbojna sila.



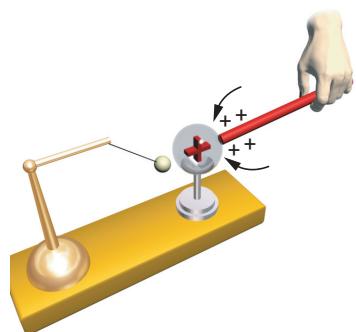
**Slika 1.3-2b**

Nanelektriziran štap privlači kuglicu



**Slika 1.3-2c**

Nakon dodira nanelektriziranog štapa i neutralne kuglice, oni se odbijaju



Slika 1.3-3

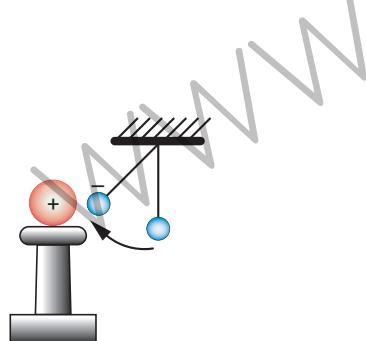
Elektriziranje neutralnog tijela dodirom

### Elektriziranje dodirom

#### Pokus

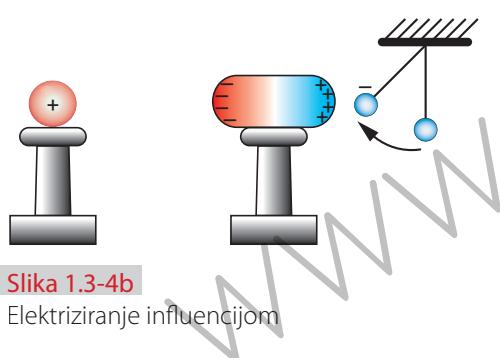
- Imamo nenabijenu metalnu kuglu, kuglicu od bazgine srčike objesenu na svilenoj niti i pozitivno elektrizirani štap. 1.3-3
- Pozitivno elektriziranim štapom se nekoliko puta prijeđe po metalnoj kugli.
- Metalna kugla će privući kuglicu od bazgine srčike.

Prilikom dodirivanja elektriziranog štapa i kugle i ona je postala pozitivno nabijena. Ovako elektrizirana kugla privlači kuglicu od bazgine srčike.



Slika 1.3-4a

Privlačenje pozitivno nabijene kugle i negativno nabijene kuglice



Slika 1.3-4b

Elektriziranje influencijom

### Elektriziranje influencijom metalnog tijela

#### Pokus

- Pozitivno nabijenoj kugli približimo negativno nabijenu kuglicu. Dolaži do njihovog privlačenja jer se raznoimeni naboji privlače. (slika 1.3-4a)

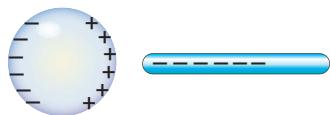
Uzme se duguljasto metalno nenabijeno tijelo (puno ili šuplje) i postavi se između pozitivno nabijene kugle i negativno nabijene kuglice (slika 1.3-4b).

Duguljasto tijelo s desne strane privlači negativno nabijenu kuglicu, dokle ponaša se kao da je pozitivno nabijeno s te strane.

Prije unošenja metalno tijelo je bilo električki neutralno.

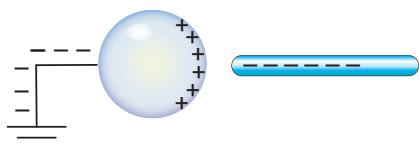
Ako je poslije unošenja desna strana pozitivna, znači da lijeva mora biti negativna. Dio slobodnih elektrona u metalnom tijelu bit će privučen k onoj strani površine koja je bliže pozitivno nabijenom tijelu tako da će ta strana biti negativna, a suprotna strana, zbog manjka elektrona, pozitivna (lijeva strana na slici 1.3-4b).

Takvo razdvajanje naboga na metalima koji su u okolini nabijenih tijela nazivamo električnom influencijom, a opisano djelovanje nabijenog tijela naziva se influencijskim djelovanjem.



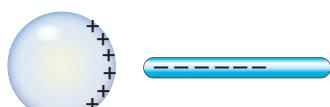
Slika 1.3-5a

Razdvajanje naboja na kugli



Slika 1.3-5b

Prijelaz negativnog naboja s kugle u zemlju



Slika 1.3-5c

Na kugli ostaje pozitivni naboje



Slika 1.3-5d

Jednoliki raspored pozitivnog naboja po kugli



Slika 1.3-6

Češalj i komadići tankog papira

### Pokus .....

Dobivanje jedne vrste naboja influencijom prikazat ćemo sljedećim pokusom.

- Neutralnoj metalnoj kugli se približi negativno nanelektrizirani polivinilski štap.
- Elektroni se potisnu na udaljeniji dio kugle (slika 1.3-5a).
- Kugla se uzemlji.
- Elektroni prelaze s kugle u zemlju (slika 1.3-5b).
- Prekine se veza sa zemljom.
- Na kugli ostaje manjak elektrona (slika 1.3-5c).
- Ukloni se polivinilski štap.
- Preostali elektroni se jednoliko (ravnomjerno) rasporede po površini kugle (slika 1.3-5d).
- Neutralna metalna kugla se nanelektrizirala električnom influencijom (u ovom slučaju pozitivno).

### Elektriziranje papirića

#### Pokus .....

- Plastični češalj provlačimo kroz kosu i on će se negativno nabiti.
- Elektrizirani češalj se približi komadićima tankog papira (slika 1.3-6).
- Elektrizirani češalj privuče papiriće.
- Da bi došlo do privlačenja papirića od negativnog nabijenog češlja, oni moraju biti sa strane s koje su privučeni pozitivno nabijeni.

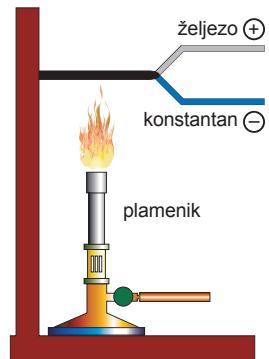
Kako to objasnit? Ako se papirići nađu u blizini elektriziranog tijela, dolazi do stvaranja tzv. **dipola**, čestica koje na jednom kraju imaju višak elektrona, a na drugom manjak.

### Elektriziranje djelovanjem svjetlosti

#### Pokus .....

Vodići mogu biti elektrizirani i djelovanjem svjetlosti.

Pojava se sastoji u tome da pod utjecajem svjetlosti elektroni mogu biti izbačeni iz kovine te je ostave sa viškom pozitivnog naboja. Ova pojava se naziva fotoelektrični učinak ili fotoučinak.



Slika 1.3-7

Zagrijavanjem spojišta različitih kovina na hladnim krajevima se pojavljuje višak ili manjak naboja

## Elektriziranje zagrijavanjem

### Pokus

- Kada se zagrijava spojilo šipki različitih kovina, na hladnim se krajevima pojavljuje višak ili manjak naboja (1.3-7).

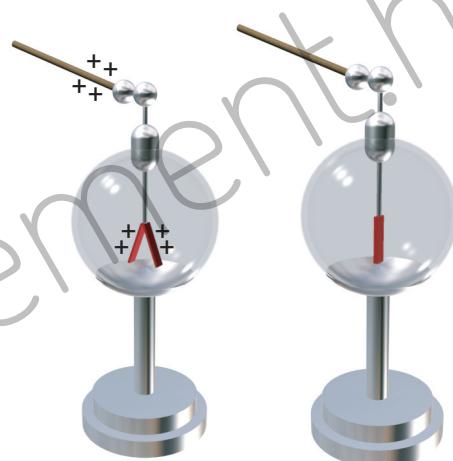
Instrument koji na najjednostavniji način prikazuje je li neko tijelo naelektrizirano je **elektroskop**\* (slika 1.3-9), dok je **elektrometar**\*\* (slika 1.3-8), odnosno **elektrostatski voltmeter** uređaj koji radi na načelu elektroskopa. Njime se mjeri količina elektriciteta – naboja.

Elektroskop (slika 1.3-9) radi na načelu postojanja odbojne sile između istoimenih naboja. U osnovi građe je metalni (bakreni) štap na čijem se jednom kraju nalaze tanki metalni listići. Na drugom, gornjem kraju bakrenog štapa nalazi se metalna kuglica. Štap je provučen kroz gumeni ili ebonitni čep koji zatvara valjkasto metalno kućište. Kada nabijenim tijelom dodirnemo kuglicu elektroskopa, elektricitet preko vodljive bakrene šipke prelazi na listice koji se zbog istoimenih naboja razmiču – odbijaju se. Razmicanje je u većoj ili manjoj mjeri razmjerno količini elektriciteta koju su listići primili. Na taj smo način ustavili postojanje elektriciteta – naboja.



Slika 1.3-8

Elektrometar



Slika 1.3-9

Elektroskop – listići se odbijaju i skupljaju, ovisno o tome ima li naboja

\*grč. σκοπεω (čitati skopeo) = gledam

\*\* grč. μετρητον (čitati metron) = mjerilo

## RASPODJELA NABOJA NA METALNIM TIJELIMA

Odbijanje istoimenih naboja uvjetuje i njihovu raspodjelu po tijelu. Kod metalnog tijela, u unutrašnjosti uopće nema naboja jer se sav naboj raspodijelio po vanjskoj površini tijela. Kod kugle će na svakoj će jedinici njezine površine uvijek biti jednaka količina naboja.

Količina naboja po jedinici površine predstavlja gustoću i označava se slovom  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

gdje je:

- $\sigma$  površinska gustoća naboja,  $\frac{C}{m^2}$

- $Q$  količina elektriciteta (naboja), C
- $S$  površina,  $m^2$

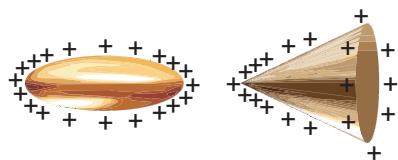
Jednolika gustoća naboja se postiže i na potpuno ravnoj, beskonačno velikoj metalnoj plohi jer upravo takvu površinu predstavlja oplošje beskrajno velike kugle. U praksi se često koriste međusobno paralelne i suprotno nabijene ploče.

Za slučaj velike kugle polujmera  $r$ , površina se može izraziti kao  $S = 4 \cdot \pi \cdot r^2$ , pa je gustoća naboja na kugli:

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi r^2}.$$

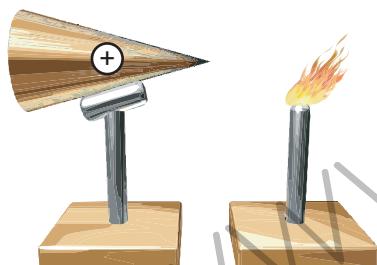
Gustoća naboja kod tijela različitih oblika nije svugdje jednak. Najveća gustoća je na šiljcima i bridovima, a manja je na manje zakrivljenim (oblim ili ravnim) dijelovima (slika 1.3-10).

Da u blizini elektriziranog šiljka postoje posebni uvjeti, može se pokazati tako da mu se prinese plamen svijeće (slika 1.3-11). Plamen se povija kao da na njega puše struјa zraka. Pojava nastaje tako što molekule zraka dospijevaju u veoma jako polje oko šiljka i kreću se ka njemu uslijed djelovanja polja na njihove vlastite ili inducirane električne dipole. Pri udaru o površinu dolazi do procesa prijenosa naboja. On ovisi o naboju šiljka. Ako je on pozitivan, elektron prelazi s molekulama na šiljak, molekula postaje pozitivan ion i u jakom električnom polju ubrzano se giba od šiljka. Veliki broj pozitivnih iona u pokretu od šiljka djeluju kao usmjereni tok molekulama, tj. poput vjetra.



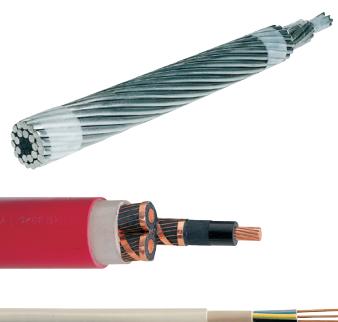
Slika 1.3-10

Naboj je najgušći na šiljcima



Slika 1.3-11

Električni vjetar



**Slika 1.3-12**  
Različiti primjeri kabela



**Slika 1.3-13**  
Silicij za proizvodnju čipova



**Slika 1.3-14**  
Izolatori od stakla

## VODIČI, POLUVODIČI I IZOLATORI

S obzirom na električna svojstva, sve tvari dijelimo u tri skupine: **vodiče, poluvodiče i izolatore**.

### Vodiči

Vodiči su materijali čiji elektroni pri sobnoj temperaturi ( $20^{\circ}\text{C}$ ) lako napuštaju atom i postaju slobodni. Stoga vodiče karakterizira vrlo velik broj slobodnih elektrona koji su nositelji struje.

Metali i njihove slitine su tipični predstavnici vodiča (slika 1.3-12). Skupini vodiča pripadaju i elektroliti – otopine soli, lužina i kiselina (vodljive tekućine).

Nadalje, vodiči mogu biti i ionizirani plinovi. Plinovi u normalnom stanju nisu vodiči, nego to postaju ionizacijom. Njihova vodljivost ovisi o gustoći iona nastalih, primjerice djelovanjem električne sile ili katodnih zraka.

### Poluvodiči

Kao što samo ime govori, poluvodiči su materijali koji su po električnoj vodljivosti između vodiča i izolatora. U njima je broj nositelja naboja koji se mogu slobodno gibati pod djelovanjem električne sile mnogo manji nego u vodičima, ali i mnogo veći nego u izolatorima.

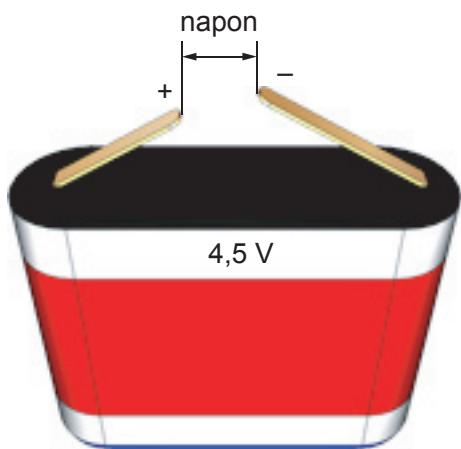
Poluvodiči imaju veliko značenje u izradi elektroničkih komponenata: dioda, tranzistora, poluvodičkih ventila, integriranih krugova i sl.

Najznačajniji predstavnici skupine poluvodiča su selen (Se), silicij (Si) (slika 1.3-13) i germanij (Ge).

### Izolatori

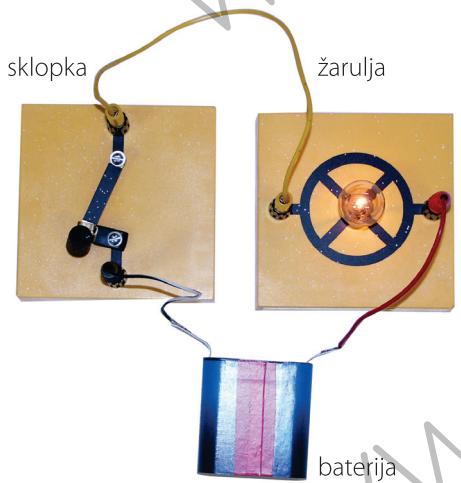
Izolatori su materijali koji pri sobnoj temperaturi nemaju slobodnih elektrona (ili ih je vrlo malo). Materijali kao što su staklo (slika 1.3-14), porculan, kristali soli, vakuum i destilirana voda su vrlo loši vodiči. Pri povišenoj temperaturi izolatori gube izolacijska svojstva jer im se poveća broj slobodnih elektrona.

## 1.4 Napon, struja i otpor



Slika 1.4-1

Baterija kao izvor napona



Slika 1.4-2

Strujni krug s izvorom (baterija), trošilom (žarulja), sklopkom za prekidanje strujnog kruga i vodičima

Da bismo između dvije točke ostvarili razliku potencijala – električni napon, potrebno je obaviti razdvajanje raznoimenih naboja. Za to razdvajanje troši se određena energija.

Pretvorba nekog oblika energije u električnu energiju obavlja se pomoću raznih strojeva i uređaja u kojima neelektrične sile (kemijske, toplinske, mehaničke, magnetske i dr.) razdvajaju raznoimene naboje. Posljedica razdvajanja naboja jest potencijalna razlika – napon.

Uređaji kojima se postiže razdvajanje naboja između dvije točke nazivaju se **izvori napona ili naponski izvori**. Primjer takvog naponskog izvora je baterija (slika 1.4-1), u kojoj se kemijska energija pretvara u električnu. Procesi unutar izvora održavaju napon na njezinim krajevima.

Među raznoimenim naboјima vlada privlačna električna sila, pa su za razdvajanje naboja potrebne neelektrične sile. Neelektrične sile za svoj rad troše energiju. Ta se energija u procesu razdvajanja pozitivnog od negativnog naboja pretvara u potencijalnu električnu energiju. Proses razdvajanja naboja traje dok se električne i neelektrične sile ne izjednače, a napon između točaka ne postigne najveću vrijednost. Vrijednost napona ovisi o radnim karakteristikama izvora.

Izvor ima dva pola:

- 1) **plus-pol** (oznaka +) je električni pol izvora na kojem je višak pozitivnog naboja,
- 2) **minus-pol** (oznaka -) je električni pol izvora na kojem višak negativnog naboja (elektrona).

Kao posljedica različitih koncentracija naboja na polovima izvora nastaje razlika potencijala. Kaže se da između polova izvora vlada napon.

Ako na polove izvora pomoću vodiča priključimo žarulju (trošilo), tada nastaje zatvoren strujni krug (slika 1.4-2). Spajanjem žarulje na izvor napona ona trenutno zasvjetli. Zatvaranjem strujnog kruga električne sile izazovu usmjereno gibanje elektrona.

## IZVORI ELEKTRIČNOG NAPONA

Prema obliku energije koja se troši na razdvajanje naboja, razlikuju se sljedeći izvori napona:

- izvori koji pretvaraju mehaničku energiju u električnu – generatori\*,
- izvori koji pretvaraju kemijsku energiju u električnu – galvanski članci i akumulatori,
- izvori koji pretvaraju energiju trenja u električnu – van de Graffov generator,
- izvori koji pretvaraju toplinsku energiju u električnu – termočlanci,
- izvori koji pretvaraju svjetlosnu energiju u električnu – fotonaponski članci.

Izvor električne energije je aktivna komponenta strujnog kruga na čijem se mjestu odvija proces pretvorbe nekog drugog oblika energije u električnu energiju.

Trošenjem određene energije, ovisno o vrsti izvora, razdvajaju se elektroni od atoma i gibaju se od plus-pola prema minus-polu izvora. Razdvajanjem raznoimenih naboja u izvoru, između polova nastaje unutarnji napon koji se može izraziti kao omjer utrošene energije  $W$  (J) i izdvojenog naboga  $Q$  (C):

$$E = \frac{W}{Q}.$$

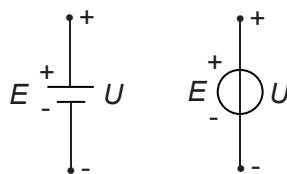
Mjerna jedinica za napon izvora je volt (V).

Unutarnji napon izvora se u literaturi naziva elektromotorna sila izvora (EMS) i obilježava slovom  $E$ . Dimenzija elektromotorne sile odgovara dimenziji napona. Naziv elektromotorna sila je tradicionalni naziv koji se udomaćio u elektrotehničkoj praksi. Zapravo,  $E$  nije nikakva sila.

Kad u izvoru ne bi bilo gubitaka energije, tad bi EMS  $E$  bila jednaka vanjskom naponu na priključnicama  $U$ . Takav izvor se naziva idealan izvor. Međutim, zbog gubitaka unutar izvora, napon na priključnicama  $U$  uvijek je manji od EMS  $E$ . Takav izvor se naziva stvarni izvor. Idealni i stvarni izvori su detaljnije obrađeni u poglavljju 2.

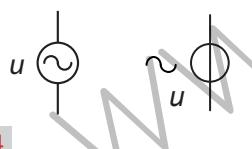
Opisani izvor napona je izvor **istosmjernog napona**, što znači da uvijek ima isti polaritet na priključnicama, a ekvivalentni simboli istosmjernog izvora su prikazani na slici 1.4-3.

Izvori napona mogu biti **izmjenični**, što znači da tijekom vremena mijenjaju polaritet napona na priključnicama, a simbol je prikazan na sl. 1.4-4.



Slika 1.4-3

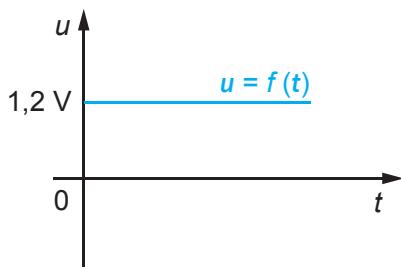
Ekvivalentni simboli istosmjernog izvora na električnim shemama



Slika 1.4-4

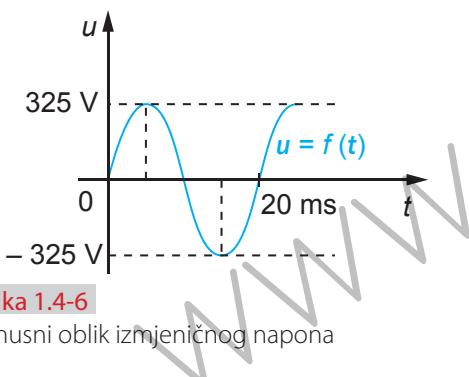
Ekvivalentni simboli izmjeničnog izvora na električnim shemama

\* lat. *generare* = stvarati



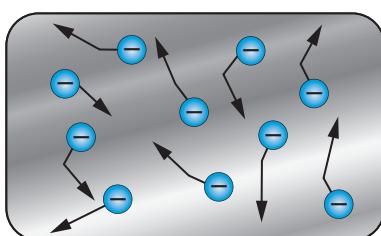
Slika 1.4-5

Valni oblik istosmjernog napona



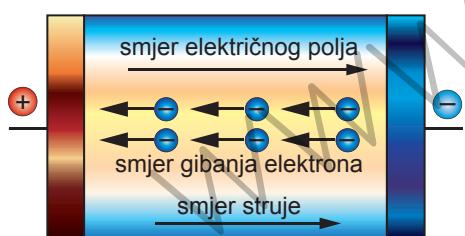
Slika 1.4-6

Sinusni oblik izmjeničnog napona



Slika 1.4-7

Kaotične putanje elektrona



Slika 1.4-8

Gibanje slobodnih elektrona u vodiču pod djelovanjem vanjskog napona

### Vremenski oblici napona

Valni oblik električnog napona definira tok vrijednosti napona u ovisnosti o vremenu.

**Istosmjerni napon** ne mijenja tijekom vremena svoj polaritet, već može mijenjati samo trenutačnu vrijednost. Na dijagramu funkcija ima oblik pravca, kao što je prikazano na slici 1.4-5.

**Izmjenični napon** tijekom vremena mijenja i svoj polaritet i vrijednost.

Valni oblik izmjeničnog napona može biti pravokutan, pilasti ili, što je najčešći slučaj, sinusni (slika 1.4-6).

## ELEKTRIČNA STRUJA

### Električna struja u krutim tvarima

Svuda oko nas su električni uređaji kojima, ako se priključe na izvor napona, teče električna struja. Postavljaju se pitanja: Kako struja nastaje? Što se giba?

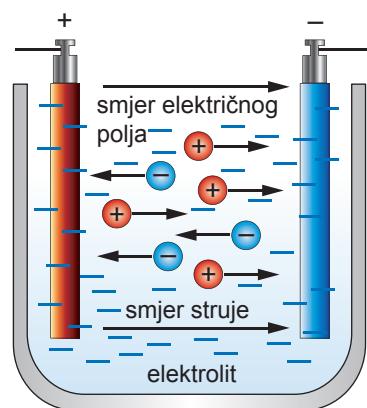
U poglavlju o strukturi tvari vodiči su definirani kao tvari koje imaju puno slobodnih elektrona. U nastavku će se promatrati gibanje slobodnih elektrona u vodičima od kovine.

Slobodni se elektroni nalaze u veoma živom i kaotičnom gibanju, pri čemu se neprekidno sudaraju s nepokretnim česticama, formirajući složene putanje (slika 1.4-7). Oblik putanje ovisi o trenutačnim silama unutar tvari.

Ako se vodič spoji između dvije suprotno nabijene ploče pod djelovanjem električnog polja, slobodni će se elektroni gibati prema pozitivnoj ploči i nastat će usmjereno gibanje slobodnih elektrona (slika 1.4-8).

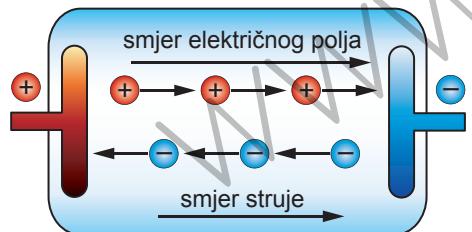
**Električna struja u vodičima je usmjereno gibanje slobodnih elektrona.**

Za održavanje stalnog električnog polja potrebno je održavati stalnu potencijalnu razliku između ploča. Za to služe naponski izvori.



Slika 1.4-9

Električna struja u tekućinama pod djelovanjem vanjskog napona



Slika 1.4-10

Struja iona u plinom punjenoj cijevi pod djelovanjem vanjskog napona

## Električna struja u plinovima i tekućinama

Osim u krutim tvarima, električna struja se može stvarati u tekućinama (slika 1.5-3) i plinovima (slika 1.5-4). U njima su nosioci naboja električki nabijene čestice koje se nazivaju ioni.

Ako se nekom atomu oduzme elektron, u njemu prevladava pozitivni naboј i ponaša se kao pozitivno nabijena čestica – **pozitivni ion**.

Ako se nekom atomu doda novi elektron, u njemu prevladava negativni naboј i ponaša se kao negativno nabijena čestica – **negativni ion**.

Djelovanjem električnog polja ti se ioni mogu usmjereno gibati.

Električnu struju u plinovima i tekućinama čini usmjereno gibanje iona i elektrona.

Električna struja može teći i u vakuumu ako postoji uzrok koji će izazvati gibanje električnog naboja. Primjerice, u katodnoj cijevi iz katode izlijeću slobodni elektroni.

### Smjer struje

Ako električno polje koje djeluje zadržava isti smjer cijelo vrijeme, riječ je o **istosmjernoj** struci. Ako se jakost polja mijenja, a smjer ostaje isti, i smjer struje ostat će isti, a mijenjat će se samo količina naboja koji se giba.

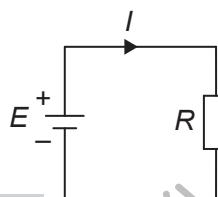
Ako električno polje koje djeluje mijenja svoj smjer u određenim razmacima, mijenjat će se i smjer protjecanja naboja te je riječ o **izmjeničnoj** struci.

Važno je primjetiti: iako stvarni smjer struje odgovara smjeru gibanja negativnog naboja, kao dogovoreni (tehnički) smjer struje uzima se smjer kojim bi se gibali pozitivni naboji.



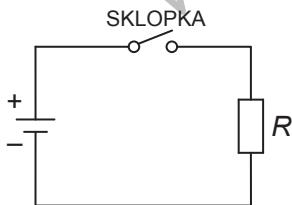
Slika 1.4-11

Jednostavan električni strujni krug



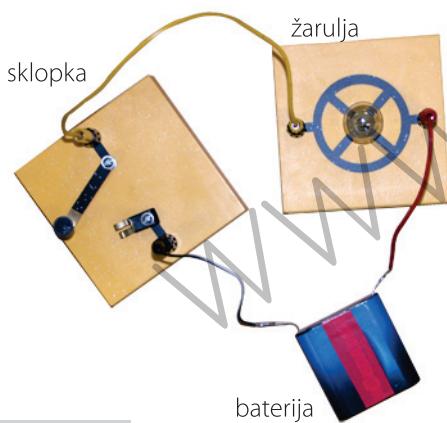
Slika 1.4-12

Shematski prikaz jednostavnog električnog strujnog kruga



Slika 1.4-13

Shematski prikaz otvorenog strujnog kruga



Slika 1.4-14

Otvoreni strujni krug

## ELEKTRIČNI STRUJNI KRUG

Svuda oko nas nalaze se električni uređaji koji za svoj rad trebaju električnu energiju: svjetiljke, radio, televizor, računalo, itd. Da bi električni uređaji radili, moraju biti ispunjeni određeni uvjeti.

### Jednostavni električni strujni krug

Kada se neko trošilo vodičima spoji na izvor napona, poteći će električna struja. Da bi ta struja potekla u trošilu, svi spojni vodovi kojima prolazi struja moraju biti vodljivi. Ovo je već jednostavan **zatvoren strujni krug** (slika 1.4-11).

Dijelovi zatvorenog strujnog kruga su **izvor napona, trošilo i spojni vodiči**, tako da čine zatvorenu petlju.

U shematskom prikazu na slici 1.4-12 spojni vodovi su prikazani ravnim linijama, tako da je jedan kraj trošila spojen na "+" pol izvora, a drugi na "-" pol izvora. Trošilo je prikazano simbolom otpornika.

Zbog što manjih gubitaka, spojni vodovi moraju imati što manji otpor tako da se on može zanemariti. Ako se bilo koji dio takvog strujnog kruga prekine, struja prestane teći. Time nastaje **otvoren strujni krug**. Za prekidanje strujnog kruga služi sklopka. Sklopka je napravljena tako da u jednom položaju ima zanemariv otpor (zatvorena sklopka), a u drugom beskonačan otpor (otvorena sklopka).

Ako je sklopka zatvorena (ima zanemariv otpor), tada je strujni krug zatvoren i teče struja.

Ako je sklopka otvorena (ima beskonačan otpor), tada se strujni krug ponaša kao otvoren i struja ne teče.

Strujni krug, kao što je prikazano na slici 1.4-15, ima dva dijela:

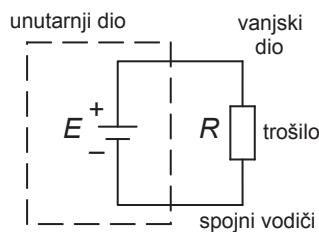
1. **unutarnji dio,**
2. **vanjski dio.**

Unutarnji dio strujnog kruga čini izvor napona, a vanjski dio čine spojni vodovi i trošilo. U idealnom strujnom krugu se smatra da spojni vodovi imaju zanemariv otpor. U stvarnom strujnom krugu vodovi imaju malen otpor, koji se u preciznim proračunima mora uzeti u obzir.

Komponente strujnog kruga mogu biti:

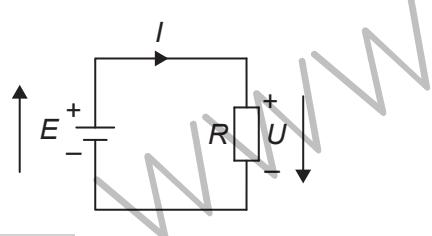
- **aktivne,**
- **pasivne.**

Aktivne komponente strujnog kruga su, npr. **izvori**, a pasivne komponente strujnog kruga su, npr. **trošila**.



Slika 1.4-15

Unutarnji i vanjski dio strujnog kruga



Slika 1.4-16

Smjer struje u strujnom krugu

### Smjer struje u strujnom krugu

Struju u zatvorenom strujnom krugu čine slobodni elektroni, a potrebnu energiju za svoje gibanje dobivaju iz izvora. U trenutku uključenja strujnog kruga pokrenut će se elektroni i gotovo trenutno će struja poteci kroz strujni krug. Brzina kretanja elektrona u strujnom krugu iznosi nekoliko milimetara u sekundi.

Pri analizi strujnih krugova važno je označavanje smjera struje. Kroz izvor električne energije mora teći ista struja kao i kroz vanjski dio strujnog kruga, kako je prikazano na slici 1.4-16.

U unutarnjem dijelu strujnog kruga struja teče od “-” pola izvora prema “+” polu izvora, a u vanjskom dijelu strujnog kruga struja teče od “+” pola prema “-” polu izvora.

Navedeni smjer struje odgovara **tehničkom smjeru struje** i tako se označava na električnim shemama.

### Složeni električni strujni krug

U jednostavnom električnom strujnom krugu se na izvor napona priključuje samo jedno trošilo. Međutim, obično se na jedan izvor napona spaja više trošila. Primjerice, u kućanstvima su na isti napon istovremeno priključeni televizijski prijemnik, hladnjak, rasvjetna tijela, računalo, itd. Oni čine **složeni strujni krug**. Shema jednog složenog strujnog kruga je prikazana na slici 1.4-17.

Složeni električni strujni krug je sastavljen od više trošila spojenih na jedan ili više izvora.

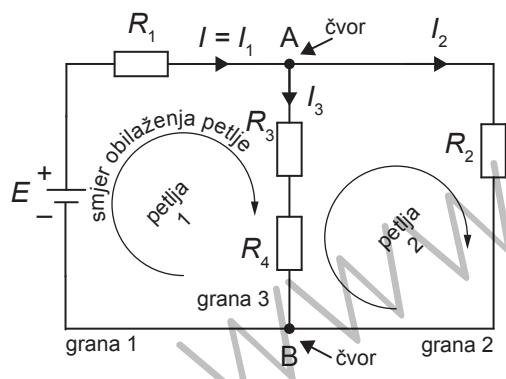
Svaki složeni strujni krug ima grane, čvorove i petlje.

- **Grana** je dio strujnog kruga, sastavljena od serijski spojenih elemenata, kroz koji teće ista struja.
- **Čvor** je mjesto u strujnom krugu gdje se spajaju tri ili više grana.
- **Petlja** ili kontura u strujnom krugu je zatvoren put sastavljen od više grana.

### JAKOST ELEKTRIČNE STRUJE

Struja u vodičima je usmjereni gibanje slobodnih elektrona. Naboj jednog elektrona iznosi:  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . Količina naboja  $Q$  je umnožak elementarnog naboja  $e$  i njihovog broja  $n$ :

$$Q = n \cdot e.$$



Slika 1.4-17

Primjer složenog strujnog kruga

## Zanimljivo

lako se u zakonu o mjernim jedinicama propisuje naziv **jakost električne struje**, u elektrotehničkoj praksi se udomaćio izraz **jakost struje** ili samo **struja**.

Jakost električne struje izražava se količinom naboja koja prostruji u jedinici vremena:

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

gdje je:

$I$  jakost električne struje, A

$Q$  ukupni naboј, C

$t$  vrijeme, s.

Oznaka za jakost struje je  $I$ , a mjerna jedinica amper (A), u čast francuskog fizičaru Ampèreu.

Električna struja ima jakost od 1 A ako u vremenu od 1 s kroz vodič prostruji količina naboja od 1 C.

Tablica 1.4-1

Mjerne jedinice električne struje

Naziv	Oznaka	Iznos
kiloamper	kA	$10^3$ A
miliamper	mA	$10^{-3}$ A
mikroamper	$\mu$ A	$10^{-6}$ A
nanoamper	nA	$10^{-9}$ A

Često se koriste manje ili veće jedinice, što je prikazano u tablici 1.4-1.

## Gustoća struje

Zbog protjecanja struje vodići se zagrijavaju, pa se u elektrotehničkoj praksi vodići odabiru prema gustoći struje.

Gustoća struje je omjer jakosti električne struje i ploštine presjeka vodiča:

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

gdje je:

$J$  gustoća električne struje,  $\frac{A}{m^2}$

$S$  ploština presjeka vodiča,  $m^2$

$I$  jakost električne struje, A.

S obzirom da je merna jedinica  $\frac{A}{m^2}$  prevelika, u praksi se presjeci vodiča izražavaju u kvadratnim milimetrima, pa se i gustoća struje izražava u  $\frac{A}{mm^2}$ .

## Zanimljivo

Primjeri jakosti struje (približno):

digitalni sat	1 $\mu$ A
žarulja od 100 W	0,5 A
glačalo	6 A
tramvaj	500 A
peć za taljenje metala	10 kA

**Primjer 1**

Pretvorite 2 A u mikroampere, miliampere i kiloampere.

Zadano:

$$\begin{array}{l} I = 2 \text{ A} \\ \hline I (\mu\text{A}), I (\text{mA}), I (\text{kA}) = ? \end{array}$$

Rješenje:

$$\begin{aligned} 2 \text{ A} &= 2 \cdot 10^3 \text{ mA} = 2 000 \text{ mA} \\ 2 \text{ A} &= 2 \cdot 10^6 \mu\text{A} = 2 000 000 \mu\text{A} \\ 2 \text{ A} &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ kA} = 0,002 \text{ kA.} \end{aligned}$$

**Primjer 2**

Izračunajte količinu elektriciteta  $Q$  koja prođe kroz vodič za vrijeme od  $t = 1 \text{ min}$ , ako je jakost struje  $I = 0,5 \text{ A}$ .

Zadano:

$$\begin{array}{l} I = 0,5 \text{ A} \\ t = 1 \text{ min} = 60 \text{ s} \\ \hline Q = ? \end{array}$$

Rješenje:

$$Q = I \cdot t = 0,5 \text{ A} \cdot 60 \text{ s} = 30 \text{ As.}$$

**Primjer 3**

Kolika je gustoća struje koja prolazi kroz bakreni vod presjeka  $S = 1,5 \text{ mm}^2$  ako je njezina jakost  $I = 15 \text{ A}$ ?

Zadano:

$$\begin{array}{l} I = 15 \text{ A} \\ S = 1,5 \text{ mm}^2 \\ \hline J = ? \end{array}$$

Rješenje:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{15 \text{ A}}{1,5 \text{ mm}^2} = 10 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}.$$

**Primjer 4**

Izračunajte presjek vodiča kroz koji teče struja jakosti  $I = 24 \text{ A}$  ako je gustoća struje  $J = 15 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ .

Zadano:

$$\begin{array}{l} I = 24 \text{ A} \\ J = 15 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \\ \hline S = ? \end{array}$$

Rješenje:

$$S = \frac{I}{J} = \frac{24 \text{ A}}{15 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 1,6 \text{ mm}^2$$