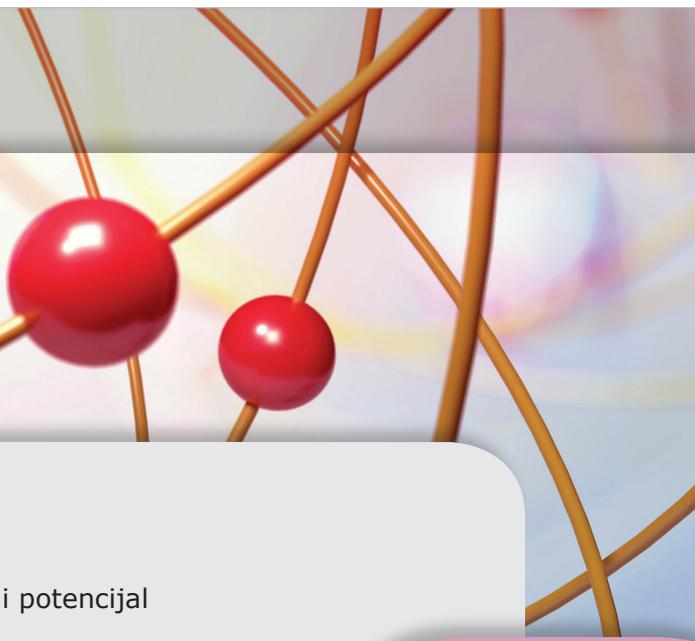
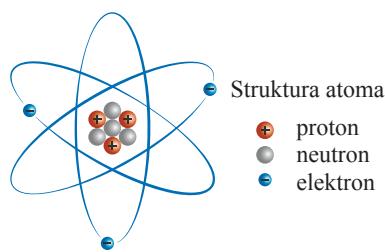


# 1.

## Uvod u elektrotehniku



- 1.1.** Građa tvari i električni naboj
- 1.2.** Vodiči, poluvodiči i izolatori
- 1.3.** Električna potencijalna energija i električni potencijal
- 1.4.** Izvori napona
- 1.5.** Električna struja
- 1.6.** Jakost električne struje
- 1.7.** Djelovanje električne struje
- 1.8.** Električni otpor vodiča
- 1.9.** Utjecaj temperature na električni otpor
- 1.10.** Električni otpornici

**Slika 1.1.**

Model atoma

**Tablica 1.1.**

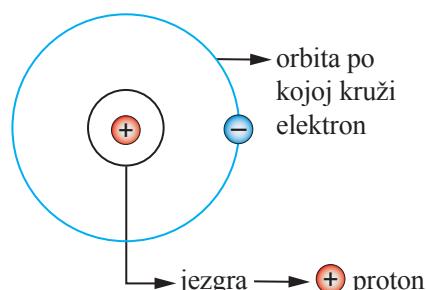
Naboj čestica atoma

čestica	naboj
elektron	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ C
proton	$1,6 \cdot 10^{-19}$ C
neutron	neutralan

**Tablica 1.2.**

Masa čestica atoma

čestica	masa
elektron	$m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg
proton	$m_p \approx 1,672 \cdot 10^{-27}$ kg
neutron	$m_n \approx 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg

**Slika 1.2.**

Model atoma vodika

## 1.1. Građa tvari i električni naboj

Radi razumijevanja načina provođenja električne struje u tvarima ukratko ćemo opisati pojednostavljen model atoma.

**Atom** je najsitnija čestica tvari koja sadrži njena svojstva.

Atom se sastoji od jezgre i elektronskog omotača. Jezgra je sastavljena od protona i neutrona, a elektronski omotač od elektrona koji kruže oko jezgre (slika 1.1).

Da bi bila jasnija električna svojstva atoma i općenito materije, definirat ćemo električni naboj. **Električni naboj ili količina elektriciteta** (oznaka  $q$  ili  $Q$ ) je fizikalna veličina koja opisuje temeljno svojstvo čestica što uzajamno djeluju električnim silama. Osnovna jedinica za mjerjenje električnog naboja je **kulon** (C) ili Amper-sekunda (As). Naboj može biti **pozitivan** ili **negativan**.

Najmanji naboj u prirodi je elementarni naboj i iznosi:

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

**Elektron** je nabijen najmanjim negativnim elementarnim nabojem:

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

**Proton** je nabijen najmanjim pozitivnim elementarnim nabojem:

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

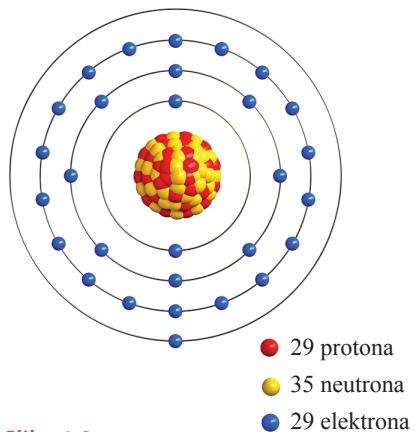
Elektron i proton su čestice koje imaju jednak naboj suprotnog predznaka, a različite mase. Između elektrona i protona postoji privlačna sila.

**Neutron** je električki neutralan i sudjeluje u atomskoj masi atoma.

Masa neutriona približno je jednaka masi protona (tablica 1.1 i 1.2).

U nepobuđenom stanju svaki atom sadrži jednak broj protona i elektrona pa je kao cjelina neutralan.

Atom vodika koji ima jedan elektron i jedan proton je najmanji atom, a ima promjer reda vrijednosti  $10^{-10}$  m. Slika 1.2 prikazuje pojednostavljeni prikaz atoma vodika. Vodik zauzima prvo mjesto u periodnom sustavu elemenata



Slika 1.3.

Model atoma bakra

Tablica 1.3.

Ljuske atoma

redni broj ljuske $n$	oznaka ljuske
1	K
2	L
3	M
4	N
5	O
6	P
7	Q



Slika 1.4.

Niels Henrik David Bohr (1885. – 1962.), danski fizičar, dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1922.

Atomi se razlikuju po broju protona i elektrona. Svi atomi jednakog broja protona pripadaju istom kemijskom elementu. Broj protona nekog elementa određuje mjesto u periodnom sustavu.

Prema Bohrovu pojednostavljenom modelu atoma elektroni mogu biti samo u određenim stazama – ljuskama. Atom može imati najviše sedam ljuski koje označavamo brojevima od 1 do 7 ili slovima: K, L, M, N, O, P, Q (tablica 1.3). U svakoj ljudsci može biti točno određen broj elektrona. Slika 1.3 prikazuje atom bakra. Elektroni koji se gibaju oko jezgre posjeduju određenu energiju. Elektroni u nepobuđenom stanju zauzimaju položaj u kojem imaju najmanju energiju. Elektroni najbliži jezgri imaju najmanju energiju i nalaze se u prvoj (K) ljudsci, a što je elektron udaljeniji od jezgre, to je njegova energija veća. Ako elektron prelazi iz više u nižu stazu, odašilje u okolinu energiju. U suprotnom je prima. Prema Bohru (slika 1.4) energija se prima i odašilje isključivo u diskretnim iznosima. Oni se nazivaju kvanti.

Vanjske ljuske elemenata često nisu popunjene maksimalnim brojem elektrona za tu ljudsku.

Vanjske nepotpunjene ljuske atoma nazivaju se **valentne ljuske**, a njihovi elektroni **valentni elektroni**.

Broj valentnih elektrona određuje svojstva elementa. Atomi se povezuju u molekule preko valentnih elektrona.

Primajući energiju iz okoline, valentni elektroni mogu napustiti svoju ljudsku i nastavljaju se gibati u međuprostoru između atoma te postaju **slobodni elektroni**.

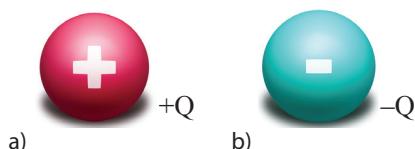
Slobodni elektroni pokretni su nosioci negativnog naboja.

Slobodni elektroni zaslužni su za vođenje električne struje u vodičima.

Jedna od važnijih pojava za elektrotehniku je **ionizacija**. Ako se elektronu privede dovoljna energija, prijeći će na višu energijsku razinu. Kada je elektron prešao u višu stazu, kaže se da je u pobuđenom stanju. Ako je privredna energija veća od one potrebne za najvišu stazu, tada se njenim privodenjem nadvladavaju privlačne sile jezgre. Posljedica je napuštanje atoma i elektron postaje slobodan. Stoga će u jezgri atoma biti više pozitivnih naboja nego negativnih u elektronskom omotaču. Atom s manjkom elektrona naziva se **pozitivni ion**.

**Napomena**

Tijelo se može elektrizirati npr. trenjem, dodirom, zagrijavanjem i djelovanjem svjetlosti (ili EM zračenja).

**Slika 1.5.**

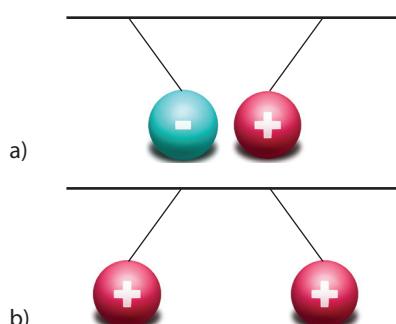
Simbolički prikaz:

- a) pozitivno nabijenog tijela
- b) negativno nabijenog tijela

**Tablica 1.4.**

Predmetci uz mjernu jedinicu kulon

naziv	oznaka	iznos
milikulon	mC	$10^{-3}$ C
mikrokulon	$\mu$ C	$10^{-6}$ C
nanokulon	nC	$10^{-9}$ C
pikokulon	pC	$10^{-12}$ C

**Slika 1.6.**

Sila između naboja:

- a) privlačna sila između raznoimenih naboja
- b) odbojna sila između istoimenih naboja

Ako bi u nekom procesu atom primio dodatni elektron, imao bi višak elektrona. Atom s viškom elektrona naziva se **negativni ion**.

Stvaranje iona naziva se ionizacijom.

Energija koju je trebalo dodati elektronu da bi napustio atom naziva se **ionizacijskom energijom**. Ionizacija se može dogoditi ako se bilo koji elektron pobudi tako da napusti atom. Što je elektron dalje od jezgre, manja mu je energija za to potrebna.

**Negativno nabijeno tijelo** ima višak elektrona; proces nabijanja sastoji se od dodavanja elektrona (slika 1.5b).

**Pozitivno nabijeno tijelo** ima manjak elektrona; proces nabijanja sastoji se u oduzimanju elektrona (slika 1.5a).

Ukupna količina naboja na tijelu, kao višak odnosno manjak elektrona u odnosu na broj protona, uvijek je cjelobrojni višekratnik elementarnog naboja. Ukupna količina naboja  $Q$  računa se kao umnožak broja elementarnih čestica  $n$  i elementarnog naboja  $e_0$ :

$$Q = ne_0$$

gdje je:

$Q$  količina naboja, C

$e_0$  elementarni naboј, C

$n$  broj elementarnih čestica.

Mjerna jedinica za ukupnu količinu naboja je kulon (C). Za praktičnu primjenu kulon je prevelika mjerna jedinica za naboј pa se koriste predmetci uz mjernu jedinicu kako je prikazano u tablici 1.4.

Pokusom se može dokazati kako električni naboji međusobno dje luju silama. Pritom, između istoimenih naboja vlada odbojna sila, a između raznoimenih privlačna (slika 1.6).

Veličinu sile između dvaju točkastih naboja koji se nalaze u zraku 1785. godine definirao je francuski fizičar Coulomb.

**Coulombov zakon** glasi:

Sila između dvaju točkastih naboja razmjerna je umnošku naboja, a obrnuto razmjerna kvadratu njihove međusobne udaljenosti. (Više u poglavljiju 3.)

## 1.2. Vodiči, poluvodiči i izolatori



a)

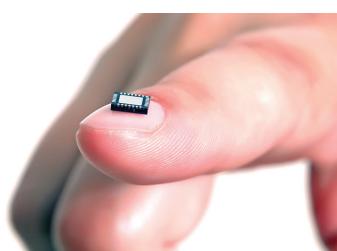


b)

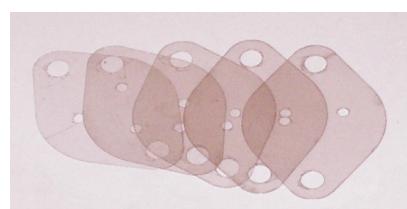
**Slika 1.7.**

Vodiči:

- a) aluminij
- b) bakar

**Slika 1.8.**

Čip

**Slika 1.9.**

Tinjac

Prema vodljivosti materijale dijelimo na **vodiče, poluvodiče i izolatore**.

### Vodiči

**Vodiči** su materijali koji dobro provode električnu struju.

Vodiče čine metali i njihove legure, te su u krutom stanju. Električnu struju čine slobodni elektroni. U metalima slobodni elektroni nastaju zbog toga što i na nižim temperaturama elektroni mogu prelaziti iz valentnog u vodljivi pojas. Naime, za to im je potrebna vrlo mala energija. Ne mijenjaju se kad kroz njih protječe struja.

Materijali velike vodljivosti: bakar, aluminij, srebro i zlato – pa se zato najčešće koriste za izradu vodiča (slika 1.7).

Osim u krutim tvarima električna se struja može stvarati u elektrolitima (otopine soli, kiseline i lužine). Električnu struju čine ioni. Kemijski se mijenjaju pri prolazu električne struje kroz njih.

Vodiči mogu biti i ionizirani plinovi. Plinovi u normalnom stanju nisu vodiči, nego to postaju ionizacijom.

### Poluvodiči

**Poluvodič** je, prema provodnosti električne struje, materijal između izolatora i vodiča. Pri apsolutnoj nuli nema slobodnih elektrona, a s porastom temperature može voditi struju.

U današnjoj se poluvodičkoj tehnologiji od elemenata i spojeva najviše koriste silicij i složeni plovodiči kao što su galijev arsenid (GaAs), galijev nitrid (GaN), itd. Keramički poluvodiči tvore se od karbida silicija ili bora pomiješanih s keramičkom izolacijskom masom.

Poluvodički materijali koriste se za izradu poluvodičkih komponenta: dioda, tranzistora, integriranih sklopova (slika 1.8), memorija, procesora i drugo.

### Izolatori

**Izolatori** su materijali koji pri sobnoj temperaturi nemaju slobodnih elektrona (ili ih je vrlo malo) pa ne vode struju.

Pri povišenoj se temperaturi izolatorima smanjuju izolacijska svojstva jer im se poveća broj slobodnih elektrona.

Izolacijski materijali mogu biti kruti, plinoviti i tekući.



Slika 1.10.

Keramički izolator

Primjeri izolacijskih materijala:

- **kruti:** staklo, tinjac (slika 1.9), keramički materijali (slika 1.10), kremen, voskovi, bitumen, asfalt, silikonske smole (plastične mase), kaučuk, guma, umjetne smole, vlknasti materijali i elektro-izolacijski lakovi
- **tekući:** mineralna ulja, biljna ulja i umjetni ili sintetički tekući dielektrici
- **plinoviti:** zrak, vakuum, dušik, vodik, ugljikov dioksid, helij.

Zadatak izolatora je spriječiti tok električne struje u određenom smjeru te da izoliraju električne proizvode i njihove dijelove.

### 1.3.

## Električna potencijalna energija i električni potencijal

Primjenom Coulombova zakona pokazano je da naboji međusobno djeluju električnom silom. Dva istoimena naboja se privlače, a raznoineni odbijaju.

Ako se djeluje dodatnom silom na naboje, mora se uložiti određeni rad, tj. energija.

### 1.3.1. Električno polje i potencijalna energija

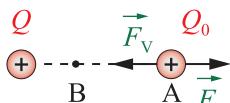
Ako se u blizinu nabijenog tijela dovede naboј u mirovanju (statički naboј), na njega će djelovati sila. Električni naboј stvara u cijelom prostoru oko sebe **električno polje**. (Više o električnom polju u trećem poglavlju.)

**Električno polje** je prostor u okolini nabijenih tijela u kojem se osjeća djelovanje sile na naboј.

Sila kojom električno polje djeluje na naboј naziva se **električna** ili **elektrostatska sila**.

Svaka sila određena je svojom jakošću i smjerom djelovanja. Ako je ta sila posljedica električnog polja, tada i polje u svakoj točki prostora ima određenu jakost i smjer djelovanja. Sila  $F$  i električno polje  $E$  vektorske su veličine.

Dogovorom je određeno da će smjer polja biti smjer djelovanja sile na pozitivni naboј.



Slika 1.11.

Rad u električnom polju

**Napomena**

Pri usporedbi električnog i gravitacijskog polja vrijedi: električna potencijalna energija odgovara gravitacijskoj potencijalnoj energiji.

Dovedimo pozitivni pokusni naboј  $Q_0$  u točku A u blizinu drugog pozitivnog naboјa  $Q$  (slika 1.11). Naboјi međusobno djeluju odbojnom silom. Ako želimo pokusni naboј iz točke A približiti pozitivnom naboјu u točku B, djelujemo protiv njihove odbojne sile, pa vanjska sila  $F_V$  mora biti jednakog iznosa i suprotnog smjera od električne sile  $F$ . Za pomicanje naboјa moramo utrošiti rad odnosno energiju.

Prestankom djelovanja vanjske sile električna bi sila naboј vratila natrag. Na račun uložene energije naboј ima sposobnost izvršiti rad, dakle posjeduje energiju koju nazivamo **električna potencijalna energija**.

**Električna potencijalna energija** je energija električnog naboјa u mirovanju.

Možemo iz toga zaključiti da naboј u točki A ima električnu potencijalnu energiju  $W_A$ , a u točki B je  $W_B$ .

**Rad** potreban za pomicanje naboјa iz točke A u točku B jednak je razlici potencijalnih energija u tim točkama:

$$\Delta W = W_A - W_B.$$

Kad se istoimeni naboјi približavaju, potencijalna energija se povećava, a ako se udaljavaju, smanjuje se. Ako su naboјi raznoimeni, obratno je.

**1.3.2. Električni potencijal i napon**

Ako u prethodnom pokusu promijenimo pokusni naboј, promijenit će se njegova potencijalna energija. Pritom je omjer potencijalne energije i naboјa u nekoj točki polja stalan.

Ovisnost potencijalne energije naboјa o položaju u električnom polju izražavamo veličinom koju nazivamo **električni potencijal**.

**Električni potencijal ili potencijal** u nekoj točki polja jednak je radu koji bi trebalo obaviti kako bi se jedinični naboј prenio iz beskonačnosti u tu točku.

Potencijal računamo prema izrazu:

$$\varphi = \frac{W}{Q_0}$$

gdje je:

$\varphi$  električni potencijal, V

$Q_0$  jedinični naboј, C

$W$  potencijalna energija, J.

**Važno**

Električni potencijal skalarna je veličina.

**Napomena**

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}; \quad 1 \text{ volt} = 1 \frac{\text{džul}}{\text{kulon}}$$

**Tablica 1.5.**

Predmetci uz mjernu jedinicu volt

naziv	oznaka	iznos
mikrovolt	$\mu\text{V}$	$10^{-6}\text{ V}$
milivolt	$\text{mV}$	$10^{-3}\text{ V}$
kilovolt	$\text{kV}$	$10^3\text{ V}$
megavolt	$\text{MV}$	$10^6\text{ V}$

**Slika 1.12.**

Alessandro Volta (1745. – 1827.), talijanski fizičar, jedan od osnivača elektrostatike. Konstruirao je prvi galvanski članak (Voltin članak). Po njemu se nazivaju jedinica za mjerjenje napona – volt i mjerni instrument za mjerjenje napona – voltmeter.



Simbol mase



Simbol uzemljenja

**Slika 1.13.**

Simboli kojima se označavaju masa i uzemljenje

Potencijal se označava grčkim slovom  $\varphi$ , a mjerna jedinica je volt (V). Volt je osnovna mjerna jedinica, a uz njih se upotrebljavaju predmetci kao u tablici 1.5.

Možemo zaključiti da u prethodnom pokusu potencijal u točki A je  $\varphi_A$ , a u točki B je  $\varphi_B$ .

Kombiniranjem izraza za rad i električni potencijal slijedi:

$$\Delta W = W_A - W_B = \varphi_A Q - \varphi_B Q = (\varphi_A - \varphi_B) Q$$

$$\Delta W = U_{AB} Q.$$

Izraz  $(\varphi_A - \varphi_B)$  predstavlja razliku potencijala koju nazivamo **električni napon ili napon**:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B.$$

Oznaka za napon je  $U$ , a mjerna jedinica volt (V) kao i za potencijal.

**Električni napon** između dviju točaka polja jednak je razlici potencijala u tim točkama.

Oznaka  $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$  znači napon u točki A prema točki B. Oznaka  $U_{BA} = \varphi_B - \varphi_A$  znači napon u točki B prema točki A. Pritom vrijedi:

$$U_{AB} = -U_{BA}.$$

Ako je  $U_{AB} > 0$ , znači da je točka A na višem potencijalu od točke B.

Ako je  $U_{AB} < 0$ , znači da je točka A na nižem potencijalu od točke B.

Odabiremo točku nultog potencijala koju nazivamo **referentna točka**. U odnosu na tu točku određujemo potencijal.

Za točku nultog potencijala uzima se potencijal zemlje.

Točku nultog potencijala u električnim krugovima nazivamo **masa**, a simbol je prikazan slikom 1.13.

Ako neku točku spojimo na zemlju, kažemo da je uzemljena (slika 1.13).

Ako promatramo potencijal neke točke prema referentnoj, tada je potencijal te točke jednak naponu. Na primjer, pozitivni pol akumulatora ima potencijal 12 V što je ujedno i napon akumulatora jer je njegov negativni pol spojen na masu.

**Primjer 1**

Zadani su potencijali u točkama A, B i C, prema slici 1.14:  $\varphi_A = -5 \text{ V}$ ,  $\varphi_B = 0 \text{ V}$  i  $\varphi_C = 20 \text{ V}$ .

Izračunajte napone  $U_{AB}$ ,  $U_{BA}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CB}$ ,  $U_{AC}$ ,  $U_{CA}$ .



Slika 1.14.

Potencijali točaka

**Rješenje**

$$\varphi_A = -5 \text{ V}$$

$$\varphi_B = 0 \text{ V}$$

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

$$U_{AB} = ? \quad U_{CB} = ?$$

$$U_{BA} = ? \quad U_{AC} = ?$$

$$U_{BC} = ? \quad U_{CA} = ?$$

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

$$U_{AB} = -5 \text{ V} - 0 \text{ V} = -5 \text{ V}$$

$$U_{BA} = -U_{AB} = 5 \text{ V}$$

Napon  $U_{AB}$  jednak je potencijalu točke  $\varphi_A$  jer je potencijal točke B nula.

$$U_{BC} = \varphi_B - \varphi_C$$

$$U_{BC} = 0 \text{ V} - 20 \text{ V} = -20 \text{ V}$$

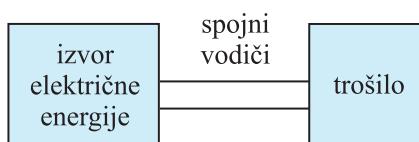
$$U_{CB} = -U_{BC} = 20 \text{ V}$$

Napon  $U_{CB}$  jednak je potencijalu točke  $\varphi_C$  jer je potencijal točke B nula.

$$U_{AC} = \varphi_A - \varphi_C$$

$$U_{AC} = -5 \text{ V} - 20 \text{ V} = -25 \text{ V}$$

$$U_{CA} = -U_{AC} = 25 \text{ V}$$

**1.4. Izvori napona**

Slika 1.15.

Blokovaška shema spoja izvora i trošila

Električna se energija danas koristi gotovo u svim granama ljudske djelatnosti. U uređajima koje nazivamo trošila obavlja se rad na račun električne energije dobivene iz izvora. Izvor električne energije i trošilo povezani su spojnim vodičima (slika 1.15).

**Izvori električne energije** su uređaji ili strojevi kojima se odvija proces pretvorbe nekog drugog oblika energije u električnu energiju.

Proces pretvorbe nekog drugog oblika energije u električnu energiju odvija se u unutrašnjosti izvora. Izvor ima dvije priključnice (dva pola) tako da se na jednoj stvara višak negativnog naboja, a na drugoj isto toliko pozitivnog naboja.

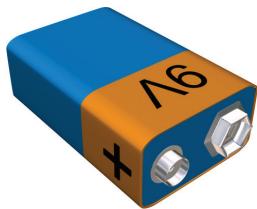
Razdvajanjem raznoimenih naboja u izvoru između polova nastaje unutarnji napon (razlika potencijala) koji se može izraziti kao omjer utrošene energije  $W$  (J) i izdvojenog naboja  $Q$  (C):

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

**Napomena**

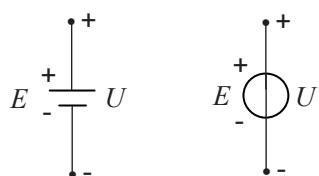
Spojni vodiči koji spajaju izvor i trošilo čine električni vod.

Električni vodovi imaju najmanje dva ili više vodiča.



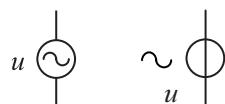
Slika 1.16.

Izvor napona – baterija s oznakom polariteta napona



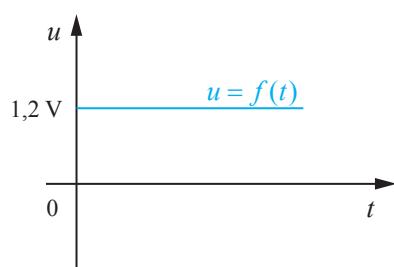
Slika 1.17.

Simboli istosmjernog izvora napona



Slika 1.18.

Simboli izmjeničnog sinusnog izvora napona



Slika 1.19.

Valni oblik istosmjernog napona

Za unutarnji napon izvora koristi se i naziv **elektromotorni napon (EMN)** i obilježava se slovom  $E$ , a mjerna jedinica je volt (V) kao i za napon. Izvori održavaju potencijalnu razliku, odnosno napon u strujnom krugu.

### Napomena

**EMS – elektromotorna sila** izvora tradicionalni je naziv koji se udomaćio u elektrotehničkoj praksi. Naziv je simboličan i u fizikalnom smislu ne predstavlja silu.

U stručnoj literaturi se koristi i izraz **EMN – elektromotorni napon**, no na području elektrotehnike često se koristi pojам EMS-elektromotorna sila.

Jedna priključnica izvora naziva se plus (+) pol, a druga minus (-) pol.

Oznake + i - označavaju polaritet napona na priključnicama izvora (slika 1.16).

Kada ne bi bilo gubitaka energije u izvoru, tada bi EMN  $E$  bila jednaka vanjskom naponu između priključnica izvora  $U$ . Takav se izvor naziva **idealni izvor**. Kod idealnog izvora napon između priključnica izvora ne ovisi o opterećenju.

Ako postoji gubitak energije unutar izvora, između priključnica izvora  $U$  opterećenog izvora uvijek je manji od EMN  $E$ . Takav se izvor naziva **realni ili stvarni izvor** (više u točki 2.9).

Ako drukčije nije naznačeno, smatramo da je izvor idealan.

Izvor napona može biti istosmjerni i izmjenični.

Izvori napona kod kojih EMN ne mijenja smjer (polaritet) nazivaju se **istosmjerni izvori**.

Izvori napona kod kojih EMN mijenja i smjer (polaritet) i vrijednost tijekom vremena nazivaju se **izmjenični izvori**.

Slika 1.17 prikazuje simbole izvora istosmjernog napona, a slika 1.18 simbole izvora izmjeničnog sinusnog napona koji se koriste u električnim shemama.

Napon možemo promatrati u ovisnosti o vremenu i prikazati grafički.

**Istosmjerni napon** uvijek ima isti polaritet, ali može imati stalnu vrijednost ili mijenjati trenutačnu vrijednost. Slika 1.19 prikazuje oblik istosmjernog napona stalne vrijednosti u ovisnosti o vremenu.