

I. UVOD U ELEKTROTEHIKU

Izrazi elektrotehnika, elektriika i sl. povezuju se uz pojam **elektricitet**, davno uveden radi opisa tad nepoznatih sila. Pridjevom **električni** (kraće **el.**) označavamo stvari povezane s elektricitetom.

Elektrotehnika je grana znanosti i tehnike koja se bavi proučavanjem i korištenjem električnih i magnetskih pojava. Danas znamo da sve te pojave proizlaze iz električne osnove građe tvari. Spoznaja tih pojava postupno se razvijala s vremenom, a njihova primjena razvija se još i danas. Povijesni **pregled tog razvoja**, važan za dobivanje opće slike elektrotehnike, dan je na početku ovog uvodnog dijela. Potom je opisana **električna osnova građe tvari**, zatim su definirane **osnovne električne veličine**: napon, struja i otpor, te pojam **strujnog kruga**. Na kraju ovog uvodnog dijela opisani su **učinci električne struje** te je posebno ukazano na moguću **opasnost od elektriciteta** i načina njena izbjegavanja.

I.1. Razvoj elektrotehnike

Počeci

Već u starom vijeku Grci su zapazili (**Thales**) kako jantar (vrst fosilne smole) natrt krpom privlači lagana tijela (komadiće slame, perja i sl), dok su Kinezi poznavali i za orijentaciju u moreplovstvu rabili *magnetsku iglu*.

Dulje vrijeme potom nema zapisa o istraživanjima električnih i magnetskih pojava, da bi 1269. godine Francuz **Peregrinus** opisao svoja proučavanja magnetskih djelovanja, a 1551. godine Talijan **Cardano**, uspoređujući djelovanja željezne rude (magneta) i jantara, naznačio razlike između magnetskih i električnih sila.

Grčko ime za jantar *ηλεκτρον* (*elektron*) prešlo je preko latinskog *electrum*, u korijen današnjih naziva vezanih uz elektricitet. Za to je zaslužan Englez **Gilbert**. On je 1600. godine opisao kako se i neke druge tvari (staklo, sumpor, vosak i dr.) natrte ponašaju slično kao jantar te ih je nazvao *električnim* (latinski *corpora electrica*).

1663. Nijemac **von Guericke** izradio je prvu napravu za elektriziranje (trenjem sumporne kugle o svileni rubac), no tu pojavu nije znao objasniti.

1729. Englez **Grey** utvrdio je da neke tvari imaju sposobnost *vođenja* elektriciteta, a druge nemaju. Danas jedne nazivamo *vodiči* a druge *izolatori*.

1734. Francuz **du Fay**, primijetivši da se elektrizirani stakleni predmeti međusobno odbijaju, a privlače elektrizirane predmete od jantara, pretpostavio je postojanje dviju vrsta elektriciteta koje je nazvao *staklasti* i *smolasti* elektricitet.

Teorijske postavke

Može se reći da doba elektrike počinje polovicom 18. stoljeća. U Leidenu u Nizozemskoj, 1745. godine, od staklene boce napravljen je spremnik elektriciteta (prvi električni kondenzator) nazvan *lajdenska boca*. Sposobnošću da pohrani velike količine električnog naboja, ova naprava proširuje mogućnosti eksperimentiranja s elektricitetom, a električni udar nastao njenim izbijanjem zorno pokazuje snagu tog novog oblika energije.

U to doba Amerikanac **Franklin** počinje pokuse s elektricitetom. 1752. godine on letećim zmajem skuplja električni naboj za vrijeme oluje i na temelju toga utvrđuje električnu prirodu munje. Franklin postavlja temelj kasnijeg razvoja teorije o elektricitetu. On uvodi pojmove *pozitivnog* i *negativnog* električnog naboja koji se rabe i danas, te uočava važnu činjenicu da trenjem nastaju *jednake količine* pozitivnog i negativnog naboja.

1785. Francuz **Coulomb** mjereći silu između dviju nabijenih kugli izvodi izraz za električnu silu između dvaju naboja, pokazujući da je iznos sile razmjern iznosima naboja, a obrnuto razmjern kvadratu njihove udaljenosti (*Coulombov zakon*).

1796. Talijan **Volta** uočava da se, osim trenjem, pozitivni i negativni naboji mogu razdvojiti i kemijski, između dvaju raznih metala uronjenih u vodljivu tekućinu. Umetanjem pločica od srebra i cinka u otopinu soli on 1800. predstavlja prvi kemijski izvor elektriciteta (*Voltin članak*).

Električni izvor omogućuje stalno gibanje naboja, tj. električnu struju (elektrodinamiku), koja tad postaje predmetom intenzivnih istraživanja.

1820. godine zbivaju se sljedeći važni događaji:

Danac **Oersted** prvi povezuje elektricitet i magnetizam, pokazujući da se magnetska igla otklanja u blizini vodiča protjecanog strujom.

Francuz **Ampere** formulira izraz za izračun sile između paralelnih vodiča protjecanih strujama (jedan od *Ampereovih zakona*). Ampere pokazuje da se kružni tok el. struje ponaša kao magnet te, skoro stoljeće prije otkrića građe atoma, utvrđuje da su sve magnetske pojave električnog porijekla, izazvane kružnim strujama u materijalu.

Francuzi **Biot** i **Savart** eksperimentalno određuju zakon djelovanja magnetskih sila.

1826. Nijemac **Ohm** formulira zakon o odnosu električnog napona i struje, kojim se definira električni otpor (*Ohmov zakon*).

1831. Englez **Faraday** pokazuje da promjenjivo magnetsko polje izaziva pojavu električnog napona (*elektromagnetska indukcija*). On uvodi pojmove elekt-

ričnog i magnetskog polja te ukazuje na njihovu povezanost. Uz to, Faraday usavršava spremnik elektriciteta i uvodi naziv *kondenzator*.

1834. Nijemac **Lenz** pokazuje da se inducirani napon suprotstavlja uzroku (promjeni magnetskog polja) koji ga je izazvao (*Lenzovo pravilo*).

1841. Englez **Joule** formulira zakon o *toplinskom djelovanju* električne struje.

1845. Nijemac **Kirchhoff** formulira osnovne zakone strujnih krugova (*Kirchhoffovi zakoni*).

1865. Škot **Maxwell** matematički razrađuje ideje Faradaya o sprezi električnog i magnetskog polja (*Maxwellove jednadžbe*), te postavlja jedinstvenu teoriju elektromagnetskog polja, koje se širi prostorom kao *elektromagnetski val*.

1888. Nijemac **Hertz** proizvodi elektromagnetske valove čime potvrđuje Maxwellovu teoriju i postavlja temelje bežičnog prijenosa signala.

1897. Englez **Thomson** pokusima utvrđuje da se električna struja sastoji od *elektrona* koji su sastavni dio svakog atoma.

Saznanjem da se elektron može izbaciti iz atoma i propustiti u obliku struje kroz zrakopraznu (elektronsku) cijev započinje doba *elektronike*.

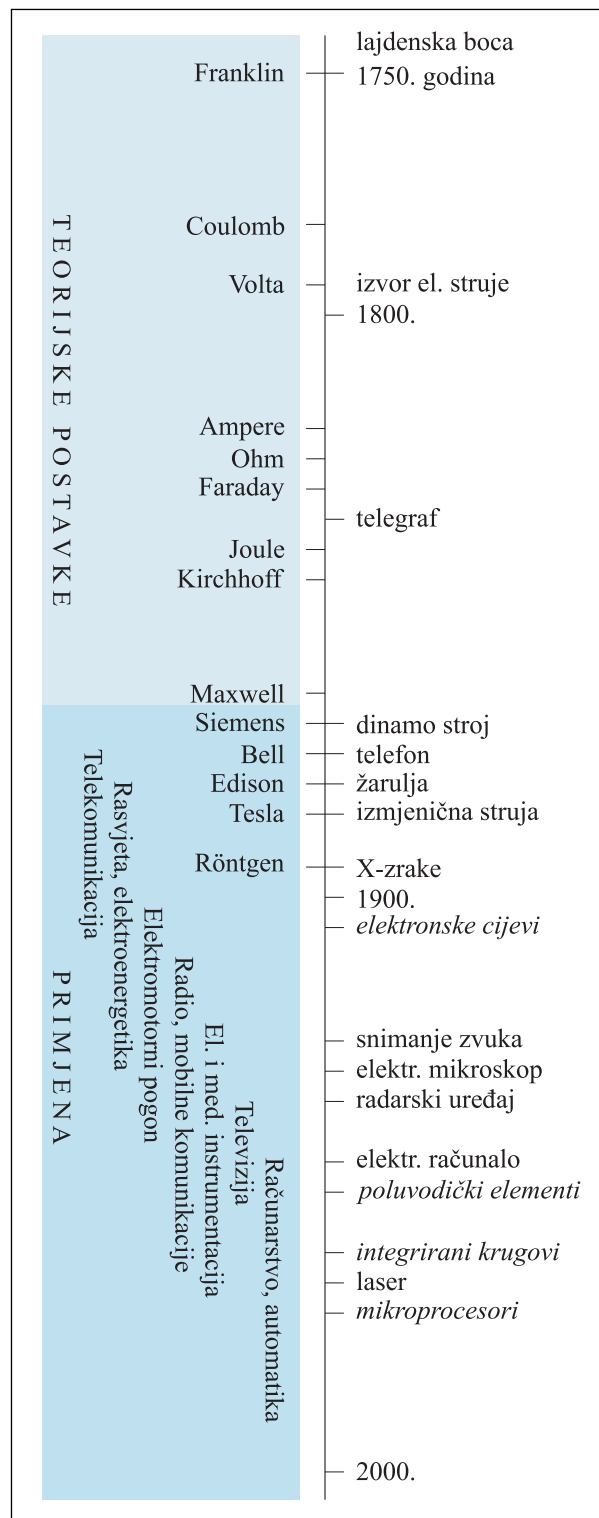
Primjena

Neke primjene elektriciteta i magnetizma (kompas) započele su još u starom vijeku, a neke kao gromobran ili baterija potječu iz 18. stoljeća, no intenzivna primjena počinje krajem 19. stoljeća nakon što je, zaključno s Maxwellom, postavljena teorijska baza elektrotehnike (slika 1).

Današnji život teško je zamisliti bez primjene elektrotehnike. Ona ulazi u sve dijelove naše svakodnevnice, od rasvjete, grijanja, kućanskih aparata, radija i televizije, preko industrijskih i transportnih sustava, do računala i komunikacija.

Ovako široka uporaba električnih i magnetskih pojava postupno se razvijala s vremenom, a u nastavku dajemo samo kraći kronološki prikaz nekih važnijih pronalazaka i događaja u tom razvoju.

1. Razdoblje elektrotehnike



1. Važniji pronalasci u razvoju elektrotehnike

pr.n.e. Kompas	Kinezi
1760. Gromobran	Franklin
1796. Prvi izvor el. struje	Volta
1800. Elektroliza vode	Nicholson
1812. Otkriće električnog luka	Davy
1825. Elektromagnet	Sturgeon
1833. Elektromagnetski telegraf	Gauss
1837. Zapisni el. telegraf	Morse
1860. Punjivi olovni akumulator	Plante
1867. Dinamoelektrični stroj	Siemens
1869. El. generator za industr. svrhe	Gramme
1875. Telefon	Bell
1877. Mikrofon (ugljeni)	Edison
1879. Zamjenjiva žarulja (s grlom)	Edison
1879. Prva javna elektrana	CEL
1881. Prva električna željeznica	Siemens
1882. Transformator	Gaulard
1888. Trofazni asinkroni motor	Tesla
1895. Otkriće X-zraka	Röntgen
1896. Bežični prijenos signala (32 km)	Tesla
1897. Katodna cijev	Brown
1898. Magnetsko snimanje zvuka	Poulsen
1901. Radiotelegr. veza preko Atlantika	Marconi
1902. Bežični prijenos govora	Fessenden
1904. Prva elektronska cijev (dioda)	Fleming
1906. Trioda (el. pojačalo)	DeForest
1911. Otkriće supravodljivosti	Kamerlingh-Onnes
1913. Usavršena rendgenska cijev	Coolidge
1915. Neonska cijev	Claude
1923. Prvi javni tonfilmski uređaj	Engl&Vogt
1925. El. snimanje gramofonske ploče	BELL
1929. Elektronski televizijski sustav	Zworykin
1931. Elektronski mikroskop	Ruska
1935. Radarsko lociranje	Watson-Watt
1939. Prvi redoviti TV-program	NBC
1940. TV-prijemnik u boji	RCA
1946. Elektroničko računalo	Univ. PENN.
1947. Tranzistor (poluvodič)	BELL
1958. Integrirani krug	TEXAS Instr.
1960. Laser	Maimann
1960. Prvi komunikacijski satelit	NASA
1971. Proizvodnja mikroprocesora	INTEL

Dok je lajdenska boca (prvi kondenzator) potaknula prvenstveno razvoj istraživanja vezanih uz el. naboje u mirovanju, **voltin članak** (prvi električni izvor) omogućio je razvoj istraživanja vezanih uz strujanje naboja, te istodobno i **razvoj primjene** raznih (kemijskih, magnetskih, svjetlosnih i toplinskih) **učinaka električne struje**.

Tako već 1800. Nicholson i Carlisle, otkrićem elektrolize, započinju razvoj **elektrokemije**.

Otkriće električnog luka u početku se rabi za **rasvjetu** a kasnije i za **grijanje** talioničkih peći.

Oerstedovo otkriće da el. struja stvara magnetsko polje ubrzo se izradom elektromagneta primjenjuje kod **žičane daljinske dojave**, prvo u konstrukciji telegrafa a zatim i telefona.

Faradayevo otkriće elektromagnetske indukcije potiče izradu elektrogeneratora i elektromotora. Ubrzo nakon Siemensova otkrića načela el. dinamo-stroja (koje omogućuje jeftinije dobivanje većih količina el. energije), Gramme izrađuje prvi el. generator **za industrijsku uporabu**. U Europi je Siemens jedan od najaktivnijih u razvoju primjene elektrotehnike. Njegov električni vlak predstavlja početak razvoja **električne vuče**.

U Americi prednjači Edison, čija zamjenjiva žarulja s grlom (te sustavom prekidača i osigurača) dovodi **električnu rasvjetu** u svaki dom, započinjući eru široke potrošnje el. energije. Prvom komercijalnom elektranom tvrtke California Electric Light (CEL) počinje razvoj **elektroenergetike**.

Dok su prve električne mreže u Americi i Europi (prema patentima Edisona) rabile istosmjernu struju, za današnju uporabu izmjenične struje zaslužan je u najvećoj mjeri Tesla, rođen i školovan u Hrvatskoj (Austroougarskoj). Tesla odbacuje Edisonovu zamisao istosmjerne struje te patentira sustav za proizvodnju i uporabu višefazne **izmjenične struje**, prema kojemu Westinghouse 1895. gradi hidroelektranu na slapovima Nijagare.

Tesla je radio i na razvoju **bežične dojave** i već 1896. godine opisao i eksperimentalno ostvario bežični prijenos signala na udaljenosti od 32 km. No svjetska slava i naziv oca radija pripali su Marconiju koji je koristeći Tesline izume 1901. uspostavio radiotelegrafsku vezu između Engleske i Amerike.

1902. Fessenden ostvaruje prvi **radijski prijenos govora**, u SAD National Broadcasting Company (NBC) počinje 1939. prvu redovitu **TV-emisiju**, a 1960. lansiran je prvi **komunikacijski satelit**.

Tesla 1900. opisuje načelo **radara**, Watson-Wat 1935. rabi radar za lociranje letjelica. a 1941. DeFrost uvodi radijalno radarsko otipkavanje.

Koristeći Röntgenovo otkriće X-zraka, Coolidge usavršava rendgensku cijev s kojom počinje suvremena **medicinska dijagnostika**, dok se Braunova katodna cijev rabi za ekrane u **instrumentaciji** (osciloskop), **televiziji** i **računarstvu**.

Već 1889. Poulsen konstruira napravu za magnetsko **snimanje zvuka**, 1923. Engl, Vogt i Massole prave prvi **tonfilmski uređaj**, 1925. tvrtka Bell Tel. počinje el. **snimanje gramofonskih ploča**, a 1953. tvrtka RCA rabi prvi **TV-magnetoskop**.

Na sveučilištu University of Pennsylvania 1946. je izrađeno prvo elektroničko računalo opće namjene. Građeno od elektronskih cijevi (obujma jedne dvorane), ono označava početak razvoja **računarstva**, ali i primjene elektroničkih računala u područjima **znanosti, proizvodnje, poslovanja, administracije, komunikacija, zabave** itd.

Primjenu elektrotehnike u 20. stoljeću obilježava intenzivni razvoj *elektroničke tehnologije* pa se to stoljeće s pravom naziva **razdoblje elektronike**. Tu se međusobno smjenjuju sve novije generacije elektroničke tehnologije: od *elektronskih cijevi* preko *poluvodičkih elemenata* do *integriranih krugova* te *mikroprocesora* i *čipova*.

Primjenom novih tehnologija dolazi do revolucija na područjima **komunikacija, računarstva i automatičke**, te do razvoja **zabavne** elektronike.

Razvoj primjene elektrotehnike danas je uvjetovan prvenstveno razvojem tehnologije, koja vodi digitalizaciji i integraciji funkcija, uz povećanje procesne moći, a smanjenje dimenzija i cijena integriranih elektroničkih komponenata.

Obrazovanje za razvoj

Nagli razvoj elektrotehničke tehnologije stalno mijenja stare i nalaze nove primjene. U takvim uvjetima razvoja, važno je pitanje kakva znanja trebaju steći učenici da bi kasnije bili sposobni za rad u primjeni, ili za dalji studij elektrotehnike.

Neka sadašnja znanja i tehnike mogu ubrzo postati zastarjeli. U takvim okolnostima, **od posebnog je značaja stjecanje temeljnih znanja**, koja su uporabljiva u raznim područjima primjene elektrotehnike, i koja nisu ovisna o trenutačnoj tehnologiji.

Osnove elektrotehnike obuhvaćaju baš takva temeljna znanja koja ne zastarijevaju s vremenom. Već preko 150 godina poznat Kirchhoffov zakon za grananje struja vrijedi i sad, bez obzira kojim su tehnologijama ostvareni elementi u granama. Jednom naučen, on se može rabiti u raznim područjima elektrotehnike i neće s promjenom tehnologije biti zamijenjen nekim drukčijim zakonom.

Iz ovog proizlazi osobita važnost Osnova elektrotehnike u izobrazbi budućih tehničara, inženjera i znanstvenika. Ovdje stečena znanja predstavljaju temelj za kasniju dogradnju specijaliziranih znanja, čime olakšavaju dalju izobrazbu, kao i prilagodbu različitim područjima primjene elektrotehnike, potrebnu radi promjena u tehnologiji ili u zahtjevima tržišta.

Provjera znanja I.1.

1. Odakle potječe izraz *električno*?
2. Što je *lajdenska boca* i zašto je bila važna?
3. Što je *Voltin članak* i zašto je bio važan?
4. Što je značilo Oerstedovo otkriće da se magnetska igla otklanja u blizini el. struje?
5. U čemu je bila važnost Siemensova otkrića načela djelovanja dinamo-električnog stroja?
6. U čemu je bila važnost Edisonove žarulje?
7. Gdje, i prema čijoj zamisli, je izgrađena prva elektrana višefazne izmjenične struje?
8. Nabrojite barem četiri primjene bežičnog daljinskog prijenosa signala.
9. Nabrojite vremenskim redom četiri glavne generacije elektroničke tehnologije.
10. Koja je važnost Osnova elektrotehnike u uvjetima brzog razvoja el. tehnologije?

I.2. Električna osnova građe tvari

Građa tvari

Sve materijalno, sve tvari, sastoje se od atoma. Poznato je oko stotinu različitih vrsta atoma. Svaka od njih pripada jednoj od osnovnih vrsta tvari. Te osnovne vrste tvari nazivaju se (kemijski) elementi (lat. *elementum* – počelo). Ima ih toliko koliko je raznih vrsta atoma.

Za razliku od starih Grka (grč. *atomos* – nedjeljiv), danas znamo da se i atom sastoji od dijelova. Dva osnovna dijela atoma su atomska jezgra i omotač. Oni sadrže elementarne čestice *neutrone*, *protone* i *elektrone*.

Neutroni i protoni nalaze se u jezgri atoma, približno su jednakih mase i čine glavninu mase atoma. Elektroni su znatno manje mase i kruže oko jezgre izvanredno velikim brzinama, obilazeći jezgru milijarde puta u svakom milijuntom dijelu sekunde (!). Zbog tako velikih brzina možemo zamisliti kao da su elektroni u svakom času na svakom mjestu svojih putanja, te da oko jezgre tvore svojevrsni omotač.

Broj elektrona, u cjelovitom atomu, jednak je broju protona.

Atomi raznih elemenata razlikuju se po broju protona i neutrona, a broj protona određuje redni broj elemenata u *periodnom sustavu* elemenata.

Od svih atoma najmanji je atom vodika koji se sastoji od jednog protona i jednog elektrona. Promjer tog atoma je reda veličine 0,1 nm.

Da bismo predočili izmjere atoma uočimo: za dosegnuti dužinu od 1 mm trebalo bi jedan do drugog u niz složiti 10 milijuna atoma vodika!

Kad bi pak povećali atom vodika da mu jezgra bude veličine loptice za stolni tenis, elektron bi oko nje kružio po putanji promjera 3,5 km!

Kod atoma s više elektrona nisu svi elektroni na istoj putanji, već se nalaze u putanjama (slojevima) različito udaljenim od jezgre (slika 2).

Stoga **elektronski omotač atoma zamišljamo složenim od koncentričnih ljuski**, kojih može biti od jedne do najviše sedam (slika 3).

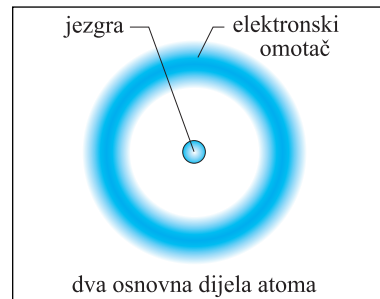
Tako npr., atom vodika ima samo ljusku najbližu jezgri (slika 4), a kod atoma s većim brojem elektrona popunjavaju se i ostale ljuske, idući redom sve dalje od jezgre. Tim se redom ljuske i označavaju, i to brojevima od 1 do 7, ili slovima K, L, M, N, O, P i Q.

Energija koju mogu imati elektroni u pojedinoj ljusci ograničena je (i raste s brojem ljuske). Svaka ljuska stoga može sadržavati ograničeni broj elektrona, a taj broj je to veći što je ljuska udaljenija od jezgre. Ako je m broj ljuske tad ona može imati najviše $n_{\text{maks}} = 2m^2$ elektrona.

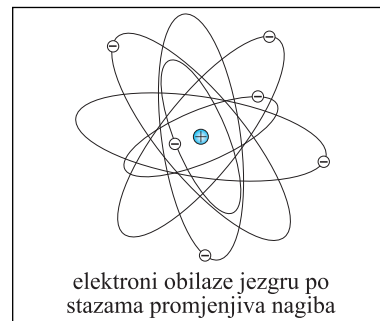
Vanjske (*valentne*) elektronske ljuske obično nisu potpuno popunjene, a preko njihovih (*valentnih*) elektrona atomi se povezuju u *molekule*.

Takvim **spajanjem atoma raznih elemenata nastaju kemijski spojevi**, koji čine većinu poznatih tvari. Kod spojeva *molekule su najmanje čestice koje još imaju sva svojstva te tvari*. Kod elemenata to su atomi.

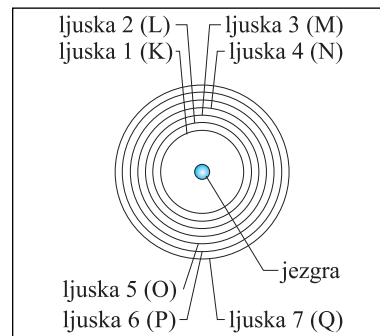
1. Načelni ustroj atoma



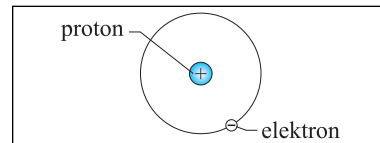
2. Bohrov model atoma



3. Model elektronskih ljuski



4. Vodikov atom



Primjeri elemenata i spojeva

<i>Elementi:</i>	vodik, bakar, silicij živa, klor, željezo...
<i>Spjevi:</i>	voda, staklo, hrđa PVC, sol guma...

Električni naboji

Električna djelovanja objašnjavaju se postojanjem električnih naboja. Razlikujemo dvije vrste naboja kojima dajemo suprotan predznak te ih nazivamo *pozitivni* i *negativni*. To je rezultat pojave da se približenjem različitim naboja njihova djelovanja na okolinu međusobno poništavaju.

Osnovni nosioci naboja su elementarne čestice proton i elektron (neutron nema naboja). Naboji protona i elektrona suprotnog su predznaka a istoga iznosa. Taj se iznos naziva *elementarni* naboj i označava s e .

Proton je nabijen pozitivno $Q_p = +e$, a elektron negativno $Q_e = -e$.

Elementarni električni naboj iznosi $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Naboji tako predstavljaju el. svojstvo fizičkih tijela. Kako atomi imaju jednak broj protona i elektrona, **ukupni naboj atoma jednak je nuli** (kažemo da je prema vani atom električno *neutralan*). Elektroni međutim nisu neraskidivo vezani uz atom, pa se događa da neki elektron napusti svoj atom i prijeđe u susjedni. Atom kojemu nedostaje elektron nije više neutralan, nego ima višak pozitivnog naboja pa kažemo da je *pozitivno nabijen*. Atom koji ima višak elektrona *nabijen je negativno*.

Atome i molekule s viškom, ili manjkom, elektrona nazivamo ioni.

Uz protone i elektrone, ioni su treća vrsta nosilaca električnog naboja. Za razliku od protona i elektrona, *ion može biti nosioc više elementarnih naboja*, ako izgubi ili dobije više elektrona.

Za tijelo koje ima manjak elektrona kažemo da je pozitivno nabijeno, dok za tijelo s viškom elektrona kažemo da je nabijeno negativno.

Svaki naboj u stvarnosti jest cjelobrojni višekratnik elementarnog naboja ($Q = Ne$), no to se obično zanemaruje jer naboji izdvojeni u praksi obično sadrže izvanredno veliki broj elementarnih naboja (primjer 1).

Električne sile

Između naboja vladaju električne sile. Ono što zapažamo i nazivamo elektricitetom posljedica je njihova djelovanja. Pritom vrijedi sljedeće:

raznoimeni naboji se privlače a istoimeni naboji se odbijaju.

Električne sile određuju samu strukturu tvari. Elektroni bi zbog svoje brzine odletjeli iz atoma (i on bi se raspao), kada ih prema pozitivno nabijenoj jezgri ne bi privlačila električna sila.

Električna sila između dvaju naboja razmjerna je veličinama naboja, a obrnuto razmjerna kvadratu njihove udaljenosti.

Ovo pravilo (znano kao *Coulombov¹ zakon* jedan je od razloga zbog čega su elektroni u vanjskoj ljusci atoma najslabije vezani s jezgrom. Nadjača li neka vanjska sila (na njih) privlačnu silu jezgre, oni napuštaju atom. Takva pokretljivost elektrona osnova je električnih pojava.

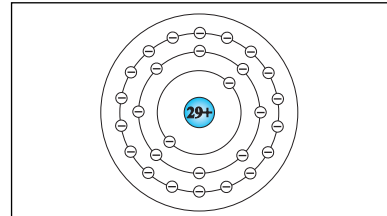
Oznaka veličine naboja je Q .

Jedinica električnog naboja je **kulon¹** s oznakom C, tj.

$$[Q] = C$$

1 C = 1 As (ampersekunda)

1. Ion bakra



atom bakra izgubio je elektron iz vanjske ljuske i pozitivno je nabijen (jezgra ima 29 protona)

PRIMJER 1

Koliko elementarnih naboja N ima u količini naboja Q od 1 C?

$$Q = Ne, N = Q/e, e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}, N = 1 \text{ C} / 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 6,25 \cdot 10^{18}$$

Naboj od 1 C sadrži oko 6,25 trilijuna² elementarnih naboja.

Električna (Coulombova) sila

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{d^2}$$

između naboja Q_1 i Q_2 udaljenih za d

(u zraku $k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$)

PRIMJER 2

Kolika je sila između jezgre i elektrona u vodikovu atomu?

$$F = k(-e)(+e)/(0,05 \cdot 10^{-9})^2 = -9,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

Privlačna sila od $9,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$.

¹ Coulomb, Ch.-A.

² trilijun ili milijarda milijardi je broj s jedinicom i 18 nula (10^{18})

Pri češljanju može se primijetiti kako češalj privlači kosu. Sila trenja dovoljna je da češalj preuzme elektrone s vlasi, postane negativno nabijen i privlači vlasi koje su gubitkom elektrona nabijene pozitivno.

Slobodni elektroni

Postojanje pokretnih nosilaca naboja daje tvarima *sposobnost vođenja* el. naboja, koja ima važnu ulogu u elektrotehnici.

Pokretni nosioci naboja u tekućinama su ioni, u plinovima to su ioni i elektroni, dok se u krutinama kreću samo elektroni.

Kod krutih tvari atomi su prostorno povezani u *kristalnu rešetku*. Tu atomi nisu apsolutno nepomični, nego (zbog temperature) titraju oko svojih ravnotežnih položaja. (Atomi bi potpuno mirovali pri temperaturi apsolutne nule, dok se porastom temperature titranje pojačava.)

Pritom su vanjski elektroni izloženi privlačnim silama jezgri susjednih atoma, pa se događa da neki od elektrona prijeđe u susjedni atom, otuda pak dalje u njemu susjedni itd.

Takav elektron koji nije vezan uz određeni atom, nego kao da slobodno luta kristalnom rešetkom, naziva se slobodni elektron.

Slobodni elektroni su pokretni nosioci naboja koji krutim tvarima daju sposobnost vođenja elektriciteta. Prema njoj tvari dijelimo na *vodiče*, *poluvodiče* i *izolatore* (nevodiče). O sposobnosti tvari da vode elektricitet bit će više riječi u poglavlju I.5. Ovdje treba reći da kod krutih tvari ona ovisi o broju slobodnih elektrona u jedinici obujma.

Vodiči u 1 cm^3 sadrže i do 10^{20} slobodnih elektrona, poluvodiči ih imaju od 10^{11} do 10^{15} , dok su izolatori skoro bez slobodnih elektrona.

Samo idealni izolator ne bi imao slobodne elektrone, a njihov broj ovisi o tome koliko lako atom otpušta elektrone iz vanjske (*valentne*) ljuske.

Uvjete prijelaza elektrona između ljuski omotača atoma posebno opisuje grana fizike zvana *kvantna mehanika*, nama je za razumijevanje električnih pojava važno znati da lakoća otpuštanja elektrona ovisi o popunjenosti vanjske ljuske.

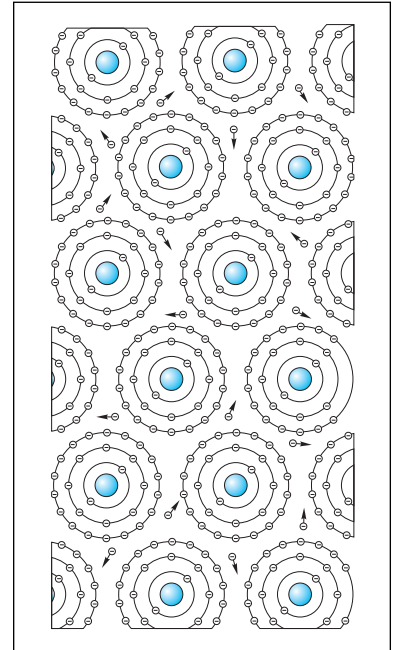
Općenito, **slabi vodiči su svi elementi kod čijih je atoma vanjska ljuska popunjena** (npr. dušik, kisik, fluor, sumpor), *pa su i tvari koje ih sadrže u pravilu izolatori* (smole, plastike, guma, itd.).

Znakovito je usporediti niz elemenata kojima su prve tri ljuske jednako popunjene: krypton s 8 elektrona u vanjskoj (četvrtoj) ljusci je izvrstan izolator, selen sa 6 elektrona i germanij s 4 su poluvodiči, dok je bakar s 1 elektronom izvrstan vodič.

Kovine (metali) su općenito dobri vodiči. Tome pridonosi njihova gusta kristalna rešetka u kojoj vanjski elektroni, izloženi privlačnim silama jezgri susjednih atoma, lako prelaze iz jednog atoma u drugi (slika 1).

Stoga **kovine sadrže veliki broj slobodnih elektrona** (primjer desno), što ih čini tako *dobrim vodičima*.

1. Slobodni elektroni u bakru



Svaki atom bakra otpušta po jedan vanjski elektron. Takvi nepotpuni atomi, međusobno čvrsto povezani čine *kristalnu rešetku*, a među njima se nasumice gibaju *slobodni elektroni*. Oni su pritom (sve dok na njih ne djeluje neka vanjska sila) jednoliko raspoređeni po kristalnoj strukturi bakra.

PRIMJER 1

Uzima se da 1 g bakra sadrži oko $94654 \cdot 10^{17}$ atoma, a gustoća bakra je $8,9 \text{ g/cm}^3$. Ako svaki atom bakra daje po jedan slobodni elektron, treba odrediti broj slobodnih u 1 mm^3 bakra.

◆ 1 cm^3 ima 10^3 mm^3 , pa je masa 1 mm^3 bakra jednaka $8,9/10^3 \text{ g}$, tj. $8,9 \cdot 10^{-3} \text{ g}$. Ako svaki atom daje po 1 slobodni elektron, tada svaki mm^3 bakra sadrži

$$n = 8,9 \cdot 10^{-3} \cdot 94564 \cdot 10^{17}$$

$$= 84,16 \cdot 10^{18},$$

tj. preko 84 trilijuna elektrona!

Provjera znanja I.2.

1. U kojem dijelu atoma je sadržana glavna njegove mase?
2. U kojem dijelu atoma se nalaze elektroni?
3. Kako se odnosi broj elektrona i broj protona u cjelovitom atomu?
4. Što su to *molekule*?
5. Preko čega se atomi povezuju u molekule?
6. Koji *predznak* se daje naboju protona, a koji naboju elektrona?
7. Koliki je ukupni naboj cjelovitog atoma?
8. Što su ti *ioni*?
9. Zašto elektrone njihova velika brzina ne izbacuje iz atoma (što ih to drži uz jezgru)?
10. Kako smjer električne sile između dvaju naboja ovisi o predznacima naboja?
11. Što opisuje i kako glasi *Coulombov zakon*?
12. Koji elementi u spojevima daju dobre izolatore?
13. Što su u krutim tijelima *slobodni elektroni*?
14. Što čini kovine (metale) dobrim vodičima elektriciteta?

Zadaci za vježbu I.2.

1. Koliko elektrona može najviše imati 2. ljuska elektronskog omotača atoma?
2. Koliko elementarnih naboja ima u količini naboja $Q = 1 \mu\text{C}$?
3. Kolikom silom privlači jezgra atoma helija svoje elektrone, ako uzmemo da je promjer atoma helija kao i kod vodika, $0,1 \text{ nm}$ ($0,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}$)? (Atom helija ima 2 elektrona i 2 protona.)
4. Kako se promijeni električna sila između dvaju naboja ako se dvaput poveća udaljenost među njima?
5. Ako 1 g bakra sadrži $94654 \cdot 10^{17}$ atoma, a svaki atom otpušta po 1 slobodni elektron, koliko slobodnih elektrona ima u 1 mm dužine bakrene žice presjeka $0,5 \text{ mm}^2$? (Gustoća bakra je $8,9 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$.) Koliko je to kulona?

I.3. Električni napon

O energiji električnog naboja

Znamo da između negativnog i pozitivnog naboja djeluje privlačna sila. Zamislimo sljedeći pokus:

česticu s pozitivnim nabojem Q iz točke A, koja je u neposrednoj blizini negativnog naboja $-Q$, odmaknemo u neku točku B, (ne djelujući pritom protiv gravitacijske sile).

Kako pri tom odmicanju naboja djelujemo protiv električne sile (kojom se naboji privlače), to znači da moramo izvršiti neki rad tj. uložiti energiju.

Zakon o očuvanju energije uči nas da **energija ne može nestati, nego samo promijeniti svoj oblik**.

To znači da smo vršeći rad pri pomaku naboja povećali energiju nabijene čestice. Kako su pritom njena kinetička i gravitacijska potencijalna energija ostale nepromijenjene, čestica očito zbog svojeg naboja ima još jedan oblik energije, koja se povećava na račun rada uloženog u svladavanje električnih sila.

Razmotrit ćemo поближе ovaj oblik energije.

Kao što prostor djelovanja gravitacijske sile nazivamo gravitacijsko polje, tako i *prostor djelovanja električne sile nazivamo električno polje*. Pokušajmo usporediti ta dva polja.

Podignemo li tijelo mase m u gravitacijskom polju na neku visinu h , djelujemo protiv sile gravitacije koja će ga nastojati spustiti. Tijelo je stoga dobilo sposobnost vršenja rada koju zovemo potencijalna energija (gravitacijskog polja). Ona, osim o masi tijela, ovisi o visini točke u kojoj se tijelo nalazi. Slično se zbiva i u električnom polju.

Naboj koji smo (u zamišljenom pokusu) pomakli u točku B električna sila nastoji vratiti natrag.

To mu daje sposobnost vršenja rada, tj. neku potencijalnu energiju. Budući da je ona nastala radom na svladavanju električne sile, ovaj oblik energije nazivamo *električna potencijalna energija*.

To je energija koju nabijeno tijelo ima zbog svojeg naboja, slično kao što gravitacijsku potencijalnu energiju ima zbog svoje mase. Stoga, *električnu potencijalnu energiju možemo predstavljati kao energiju električnog naboja (u mirovanju)*.

Pojam električnog potencijala

Naboj Q u našem zamišljenom pokusu ima u točki B el. polja neku (potencijalnu) energiju W_B . Pokazuje se da *dvaput veći naboj u istoj točki polja ima dvaput veću energiju*, što znači sljedeće:

omjer energije i veličine naboja u nekoj točki je stalan i predstavlja svojstvo pojedine točke el. polja, koje nazivamo električni potencijal.

Kao što energija tijela u gravitacijskom polju ovisi o visini točke u kojoj se tijelo nalazi, tako energija naboja u el. polju ovisi o potencijalu točke u kojoj se nalazi naboj. Stoga *pojam potencijala točke u električnom polju odgovara pojmu visine točke u gravitacijskom polju*.

Električni potencijal označavamo s φ (grčki *fi*), a jedinica mu je **volt**¹, koja se označava slovom V.

$$\varphi_B = \frac{W_B}{Q} \quad [\varphi] = \frac{VAs}{As} = V$$

Veza električnog napona i potencijala

U zamišljenom pokusu, pomakom naboja Q iz točke A u točku B promijenila mu se energija. Naboj je isti, što znači da su potencijali točaka različiti. Između točaka vlada *razlika potencijala*.

Razlika potencijala naziva se električni napon.

Električni napon označava se slovom U , a (kao i električni potencijal) iskazuje se jedinicom **volt**.

$$U_{AB} = \varphi_B - \varphi_A \quad [U] = V$$

Oznaka U_{AB} znači: *napon točke B prema točki A*. U_{AB} je pozitivan ako je točka B na većem potencijalu od točke A, a negativan kad je obrnuto.

PRIMJER 1

Potencijal točke A je $\varphi_A = 5 \text{ V}$, a potencijal točke B je $\varphi_B = 30 \text{ V}$. Koliki je napon U_{AB} , a koliki napon U_{BA} ?

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = 5 \text{ V} - 30 \text{ V} = -25 \text{ V}$$

$$U_{BA} = -U_{AB} = 25 \text{ V}$$

Napon U_{AB} i napon U_{BA} suprotnih su predznaka.

¹ Volta, A.

Dok je potencijal definiran kao svojstvo jedne točke, pojam napona vezan je uz dvije točke.

Pretpostavimo li pak da je u našem zamišljenom pokusu potencijal točke A jednak nuli, tada je

$$U_{BA} = \varphi_B - \varphi_A = \varphi_B - 0 = \varphi_B$$

tj. napon U_{BA} jednak je potencijalu točke B.

Općenito, *potencijal neke točke jednak je naponu između nje i točke s potencijalom nula.*

Uzima se da je potencijal zemlje jednak nuli.

Točka (nultog potencijala) prema kojoj je potencijal izražen naziva se i *referentna točka*. Kod el. shema pojedinih uređaja često se umjesto napona navode potencijali pojedinih točaka (prema nekoj određenoj referentnoj točki).

Npr., kod shema elektroinstalacije automobila, ili TV-aparata, naznačuju se potencijali pojedinih točaka prema referentnoj točki, koju tu predstavlja *masa* ili kućište automobila, odnosno TV-aparata.

Vratimo se usporedbi električnog i gravitacijskog polja. *Ako potencijal odgovara visini, napon odgovara razlici visina u gravitacijskom polju.*

Kao što je za korištenje energije, npr. vode, u gravitacijskom polju potrebna razlika visina, tako je za korištenje energije naboja potrebna razlika potencijala, tj. el. napon.

Električni napon i energija

Izrazimo li potencijale točke B i A u prethodnoj jednadžbi pomoću energija koje taj naboj ima u tim točkama (definicija potencijala), za napon U_{BA} dobiva se sljedeća jednadžba:

$$U_{BA} = \varphi_B - \varphi_A = \frac{W_B}{Q} - \frac{W_A}{Q} = \frac{W_B - W_A}{Q} = \frac{\Delta W}{Q}.$$

Vidi se da je napon između dviju točaka jednak omjeru razlike energija koje naboj ima u tim točkama (ΔW) i veličine naboja. Kako ta razlika energija predstavlja rad potreban za pomak naboja između tih dviju točaka, možemo reći da

napon između dviju točaka predstavlja omjer rada (potrebnog za pomak nekog naboja između tih točaka) i veličine toga naboja.

Prethodnu jednadžbu možemo protumačiti i ovako: utroškom energije ΔW na razdvajanje pozitivnog i negativnog naboja iznosa Q , između točaka A i B dobiva se napon U_{BA} .

To znači da **za uspostavu el. napona treba razdvojiti raznoimene naboje, za što je potrebno uložiti rad**, tj. utrošiti energiju.

Prema obliku energije koja se troši za razdvajanje naboja, razlikujemo i više raznih načina nastanka električnog napona.

Načini nastanka električnog napona

Trenjem izolatora dolazi do mehaničkog odvajanja elektrona iz rubnih atoma. Naveli smo primjer češlja, a trenje pomaže i razdvajanju naboja u oblaci-ma, što dovodi do visokih napona (munja).

Gibanjem vodiča u magnetskom polju nastaje razdvajanje naboja i el. napon. Na tom načelu radi dinam na biciklu, kao i generator u elektrani.

Kemijskim procesima u vodljivoj tekućini (elektrolit), između dviju različitih kovina, dolazi do el. napona. Primjer su baterije i akumulatori.

Osvjetljenjem nekih poluvodičkih tvari razdvajaju se naboji i javlja se napon (fotoelementi).

Zagrijavanjem na spoju dviju različitih kovina raste napon ovisan o temperaturi (termoelementi).

Tlačenjem (deformacijom) nekih kristala javlja se napon (*piezoelektrični efekt*). Svakodnevni primjer toga jest upaljač za plinsko kuhalo.

Neke od ovih pojava detaljnije se opisuju kasnije, a zajedničko svima je razdvajanje naboja. Pritom se naboju povećava energija za što se ulaže rad. Na tom načelu temelji se djelovanje naprava koje nazivamo *električni izvori*.

Primjeri veličina napona

signal na radio-anteni	1 μ V
srčani stimulator (pejsmajker)	1 mV
baterija ručne ure	1,2 V
automobilski akumulator	12 V
gradska električna mreža	220 V – 400 V
katodna cijev (TV ili PC-monitor)	20 kV
elektroprijenosna mreža	110 kV – 400 kV
munja; nuklearna reakcija	nekoliko MV

Pojam električnog izvora

Električni izvori su naprave koje radom neelektričnih (kemijskih, mehaničkih, i dr.) sila razdvajaju naboje između dviju točaka i (dajući im električnu energiju) stvaraju napon među tim točkama.

Ova pretvorba neke druge energije u električnu odvija se u unutrašnjosti izvora. Točke između kojih se raznoimeni naboji razdvajaju, i među kojima nastaje električni napon, nazivaju se *priključnice* izvora.

Izvor (*generator*) napona djeluje poput elektronske crpke, koja crpi elektrone s jedne priključnice i prenosi ih na drugu, stvarajući napon između priključnica (slika 1).

Priključnica na kojoj se elektroni gomilaju postaje negativno nabijena dok druga, s koje se ti elektroni odvođe, postaje (isto toliko) pozitivno nabijena.

Priključnice se stoga označavaju s “+” i “-”, i nazivaju *polovi izvora*. Ove oznake pokazuju *polaritet* napona, a na shematskom prikazu (shemi) nalaze se uz simbol el. izvora (slika 2).

Između elektrona na jednom polu izvora i (od njih ostavljenih) pozitivno nabijenih atoma na drugom polu vlada privlačna el. sila, koja bi (u slučaju vanjskog vodljivog spajanja polova) dovela do pokretanja elektrona.

Imajući to u vidu, lakše je razumjeti zašto se napon između otvorenih priključnica izvora ponegdje još naziva i *elektromotorna sila*.

Oblici električnog napona

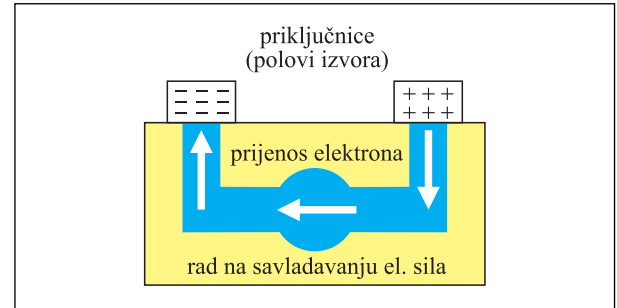
Prema obliku vremenske promjene napona razlikujemo više vrsta napona, kao npr. stalni (ili konstantni), pravokutni, pilasti, sinusoidni i sl.

Dijelimo ih u osnovi na *istosmjerne* i *izmjenične*.

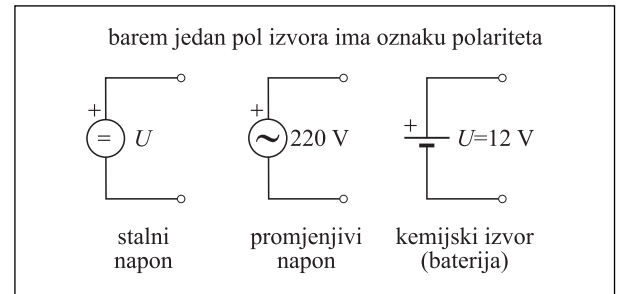
Istosmjerni napon stalnog je polariteta, a kod izmjeničnog polaritet se naizmjenično mijenja.

Od posebne važnosti u praksi su: istosmjerni napon stalnog iznosa (prikazan na slici 3) te izmjenični napon čija vremenska promjena ima oblik sinusne funkcije (sinusoide) prikazan na slici 4.

1. Načelo djelovanja električnog izvora

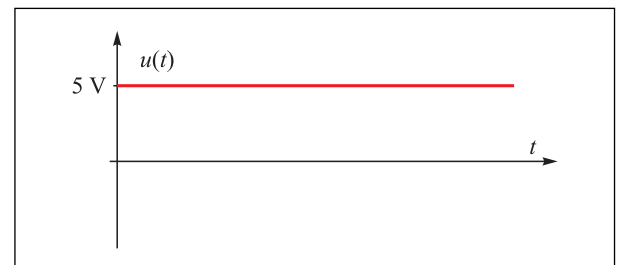


2. Označavanje izvora napona

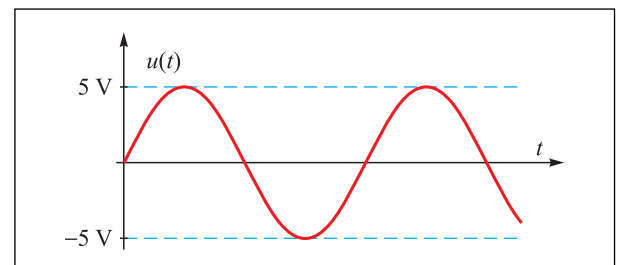


Plus na izvoru izmjeničnog napona označava polaritet napona u trenutku promatranja električnog kruga.

3. Istosmjerni napon (stalnog iznosa)



4. Izmjenični napon (sinusoidni)



Provjera znanja I.3.

1. Što je električna (potencijalna) energija naboja, i kako je naboji dobivaju?
2. U kakvoj je svezi električni *potencijal* φ neke točke s (potencijalnom) energijom W i veličinom Q naboja postavljenog u tu točku?
3. Što je električni *napon*?
4. Može li se iskazati napon samo jedne točke?
5. Ako je napon $U_{CD} < 0$ (negativan), koja točka ima viši potencijal?
6. Nabroji barem 5 načina dobivanja električnog napona. Koja je pojava prisutna kod svih njih?
7. Što je to *električni izvor*?
8. Što je *polaritet izvora*?
9. Kako se vremenski mijanja polaritet kod istosmjernog, a kako kod izmjeničnog napona?
10. U kojim se jedinicama iskazuje *elektromotorna sila*?

Zadaci za vježbu I.3.

1. Električni naboj $Q = 100\mu\text{As}$, dok miruje u točki A, ima energiju $W = 5\text{mWs}$. Koliki je potencijal točke A?
2. Kolika je električna (potencijalna) energija naboja $Q = 100\text{mAs}$: a) kad je u točki potencijala 100 V; b) kad dospije u zemlju?
3. Potencijal točke A je $\varphi_A = 5\text{V}$, a potencijal točke B je $\varphi_B = -5\text{V}$. Koliki je napon U_{AB} ?
4. Ako je napon između točaka C i D $U_{CD} > 0$, tj. pozitivan, koja od točaka je na višem potencijalu?
5. Napon između točaka R i S je $U_{RS} = 380\text{V}$. Ako je točka R na potencijalu 0 V, koliki je potencijal točke S?
6. Za pomaknuti pozitivni naboj $Q = 1\text{mAs}$ iz točke A u točku B treba, djelujući protiv električne sile, utrošiti rad $\Delta W = 0,2\text{Ws}$. Koliki je napon U_{AB} ?
7. Električna sila pomakne naboj Q iz točke 1, s potencijalom $\varphi_1 = -40\text{V}$, u točku 2, s potencijalom $\varphi_2 = 0\text{V}$. Ako pritom električno polje izvrši rad $\Delta W = 0,1\text{mWs}$, odredite: a) koliki je napon U_{12} ; b) veličinu i predznak naboja Q .