1.

Uvod u elektrotehniku

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

1.1. Razvoj elektrotehnike

Slika 1.1.
Atmosfersko pražnjenje

Elektrotehnika predstavlja tehničku znanost koja proučava proizvodnju, prijenos i uporabu električne energije.

Elektrotehnika kao znanost predstavlja integralni dio teorijske fizike. Bavi se izučavanjem statičkih i dinamičkih pojava u prirodi koje su rezultat djelovanja elektrostatskih i magnetskih sila.

Sile u prirodi (npr. atmosferska pražnjenja, slika 1.1) uvijek su ljudima bile intrigantne i izazovne i provocirale potragu za uzrocima i načinima kako ih iskoristiti za globalnu dobrobit čovječanstva.

Tijekom povijesti je razvojem nauke i tehnike pojam elektrotehnike postajao sve složeniji u sinergiji s drugim područjima znanosti, tehnike i tehnologije (fizika, kemija, strojarstvo, medicina…)

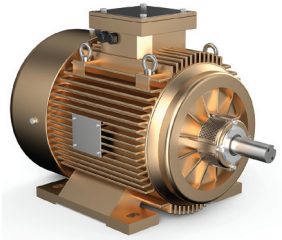
Detaljnu podjelu na znanstveno-tehničke discipline je teško, gotovo nemoguće, egzaktno utvrditi. Temeljne grane elektrotehnike su: elektroenergetika, elektrostrojarstvo, elektronika, radiokomunikacije, telekomunikacije i tehnička informatika.

Elektroenergetika se bavi proizvodnjom, prijenosom, pretvorbom i distribucijom električne energije.

Elektrostrojarstvo obuhvaća proizvodnju i primjenu električnih strojeva i drugih električnih aparata i uređaja (slika 1.2a).

Elektronika se bavi razvojem i proizvodnjom poluvodičkih elektroničkih elemenata, sklopova i uređaja koji čine osnovu telekomunikacija, računalne tehnike, uređaja za upravljanje, automatizaciju itd. (slika 1.2b).

Radiokomunikacije, telekomunikacije i tehnička informatika obuhvaćaju sva područja koja se bave primanjem, predajom, prijenosom, obradbom, pohranjivanjem i pretvorbom informacija uz pomoć elektroničkih uređaja (slika 1.2c).



a)

b)

c)

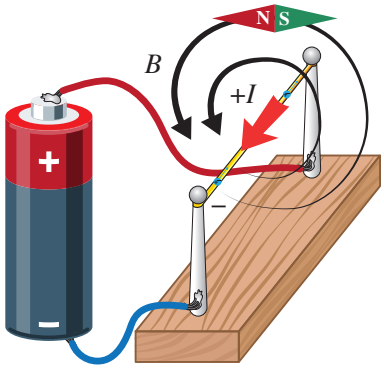
Slika 1.2.
a) elektromotor
b) elektroničke komponente
c) IC tehnika

Povijesni razvoj elektrotehnike

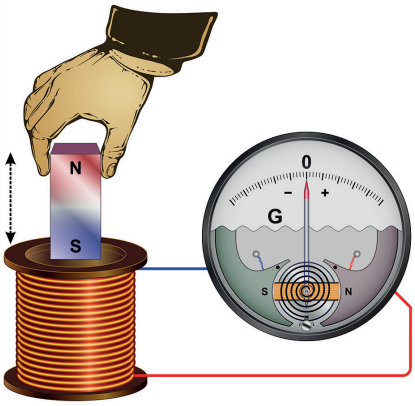
Smatra se da su magnetske pojave prvi put uočene na otoku Kreti. Pastiri u sandalama koje su sadržavale željezne čavle, hodajući po kamenu, osjetili su privlačno djelovanje. Naravno oni nisu znali da se radi o rudi magnetitu.

Bilo je to prije Talesa iz Mileta koji je 600. g. pr. Kr. pokušao rastumačiti djelovanje jantara koji nakon trljanja privlači lake predmete.

Slika 1.3.
Naelektrizirani jantar



Slika 1.4.
Djelovanje magnetskog polja vodiča na magnetnu iglu



Slika 1.5.
Primjer elektromagnetske indukcije

U antičko su vrijeme opažanja o elektricitetu bila oskudna. Grci su jantar nazivali elektron pa od tuda potječe današnji naziv elektricitet (slika 1.3).

U srednjem vijeku znalo se za magnetske osobine kompasa premda je korišten u drevnoj Kini još u doba prije Krista.

Godine 1269. P. Peregrinus objavio je raspravu o magnetu u kojoj je iznio da se istoimeni polovi magneta odbijaju te da su dijelovi magneta opet potpuni magneti.

S razvojem prirodnih znanosti tijekom renesanse dolazi do propitivanja zakona i sila gibanja.

Godine 1600. W. Gilbert objavljuje djelo *De Magnete* u kojem otkriva osnovnu razliku između električnih i magnetnih tijela. Veliki napredak u eksperimentiranju s elektricitetom čini 1729. godine S. Gray. On je utvrdio da elektricitet prelazi i na nenaelektrizirana tijela. On uočava da se tijela mogu svrstati u vodiče i one koji to nisu.

B. Franklin uveo je pojmove pozitivnog i negativnog električnog naboja te utvrdio da se oni pojavljuju istodobno i u jednakim količinama. Na osnovi toga uveo je načelo održanja količine naboja. U povijesti otkrića elektriciteta bio je poznat po zaključku da je munja istovjetna elektricitetu te izumu gromobrana.

C. A. Coulomb 1785. praktičnim istraživanjem elektrostatskih sila s pomoću torzione vage postavlja zakon o sili između dvaju naboja.

Prvi izvor električne struje Volta je načinio 1800. godine. Ovaj tzv. Voltin članak sastojao se od dviju elektroda, načinjenih od bakra i cinka, uronjenih u sumpornu kiselinu.

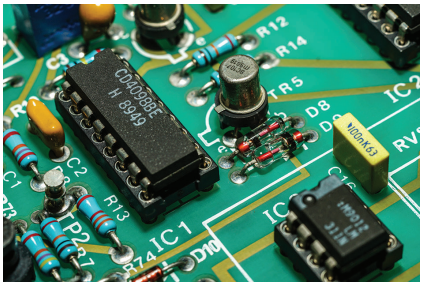
Početkom 19. stoljeća do značajnih otkrića došli su H. C. Oersted i A. M. Ampere. Objasnili su magnetsko djelovanje električne struje i elektromagnet, a Ampere je definirao vezu između jakosti struje i magnetskog polja (slika 1.4).

Jedan od najznačajnijih zakona u elektrotehnici je Ohmov zakon koji je Ohm objavio 1826. godine. Zakon objašnjava međusobnu vezu napona, jakosti struje i električnog otpora.

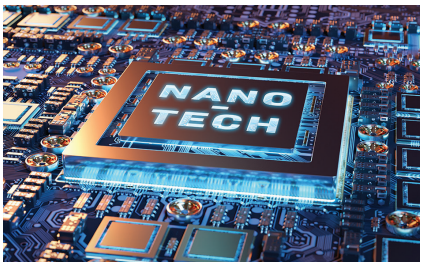
Daljnje bitno unapređenje nauke o elektricitetu učinjeno je kroz elektrodinamiku fundamentalnim otkrićem elektromagnetske indukcije. M. Faraday je 1831. godine uspio eksperimentalno potvrditi svoj zakon o elektromagnetskoj indukciji (slika 1.5).

P. M. Morse je 1837. godine napravio prvi suvremeni telegraf, te se od tada uvode telegrafske linije. Telegraf je osvojio svijet te unaprijedio industriju, trgovinu, promet i novinarstvo.

Slika 1.6.
Izmjenična struja visokog napona omogućuje prijenos energije na velike udaljenosti.



Slika 1.7.
Otkriće tranzistora i integrirani krugovi otvorili su novo poglavlje elektrotehnike.



Slika 1.8.
Mikroelektronika i nanotehnologija otvaraju neslućene mogućnosti IT sektoru i umjetnoj inteligenciji.

Nedugo nakon toga telefon je patentirao G. Bell 1875. godine kao svoj izum.

Nadovezujući se na Faradayeva otkrića, J. C. Maxwell je 1864. godine postavio matematičku teoriju elektromagnetizma.

T. A. Edison je 1880. izumio žarulju s ugljenom niti, nakon čega počinje gradnja malih električnih centrala i sustava javne rasvjete.

Za nagli uspon elektrotehnike veoma je zaslužan i N. Tesla koji je 1888. godine objavio svoje pronalaske na području višefaznog sustava, što je omogućilo primjenu izmjenične struje u industriji. To je ujedno omogućilo prijenos električne energije na daljinu (slika 1.6).

Dvadeseto je stoljeće doba procvata primjene znanstvenih dostignuća u industrijskoj proizvodnji, odnosno općenito u praksi. To se posebno odnosi na proizvodnju električnih strojeva, razvoj energetike, a kasnije elektronike i u najnovije vrijeme računalstva i IT tehnologije.

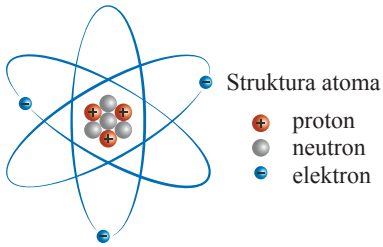
Prvu elektronsku cijev – diodu koja je imala svojstvo propuštanja električne struje u samo jednom smjeru – konstruirao je na samom početku 20. stoljeća J. A. Fleming. L. De Forest konstruirao je prvu elektronsku cijev s mogućnosti pojačanja – triodu. Ta su otkrića omogućila ubrzani razvoj elektronike. Zahvaljujući tehnološkom razvoju, osobito vakuumske tehnike, razvijene su nove složenije elektronske cijevi (tetroda, pentoda, heksoda…). Do pojave i razvoja tranzistora te su cijevi bile dio većine elektronskih uređaja.

Godine 1947. W. B. Shockley, J. Bardeen i W. H. Brattain prikazali su prvi poluvodički tranzistor u tvrtki Bell Telephone Laboratories. Poluvodička tehnologija pružala je mogućnost minijaturizacije, a imala je i niz drugih prednosti, pa je započeo brz razvoj elektronike i elektrotehnike. Već 1958. razvijen je prvi integrirani sklop, a 1961. proizveden je prvi komercijalni integrirani sklop (slika 1.7).

Njemački izumitelj P. Nipkow već 1884. započeo istraživanja televizijskoga prijenosa, a kao početak komercijalne televizijske ere uzima se 1929., kada je ostvaren simultani prijenos slike i zvuka s pomoću elektromagnetskih valova. Kompanija NBC instalirala je 1932. prvu komercijalnu televizijsku antenu na vrhu Empire State Buildinga u New Yorku, a 1960. postala je popularna televizija u boji.

Godine 1946. u Philadelphiji na Sveučilištu Pennsylvania prikazano je prvo elektroničko računalo ENIAC. Sadržavalo je 18 000 elektronskih cijevi, bilo je mase 30 t. Tek s pojavom poluvodičkih integriranih sklopova događaju se ogromne promjene u volumenu, brzini i kapacitetu računala (slika 1.8).

Supravodljivost je 1911. otkrio H. Kamerlingh–Onnes, a primjena supravodiča, supravodljivih magneta i elektromotora razvija se cijelo stoljeće.



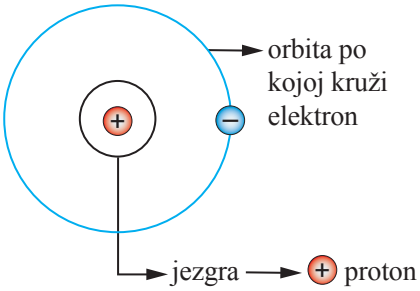
Slika 1.9.
Model atoma

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 1.10.
Model atoma vodika

1.2. 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 1.9).

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 mjerenje električnog naboja je **kulon** (C) ili Amper-sekunda (As): C = 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:

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

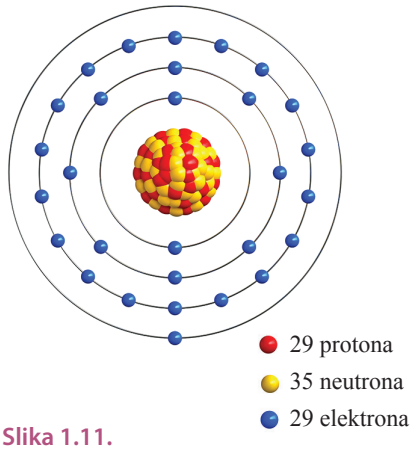
Elektron i proton su čestice koje imaju jednake naboje suprotnog predznaka, a različite mase. Između elektrona i protona postoji privlačna sila.

Neutron je električki neutralan i sudjeluje u atomskoj masi atoma.

Masa neutrona 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 1.10 prikazuje pojednostavljeni prikaz atoma vodika. Vodik zauzima prvo mjesto u periodnom sustavu elemenata



Slika 1.11.
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 1.12.
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 ljusci može biti točno određen broj elektrona. Slika 1.11 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) ljusci, 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 1.12) energija se prima i odašilje isključivo u diskretnim iznosima. Oni se nazivaju kvanti.

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

Vanjske nepopunjene 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 ljusku i nastavljaju se gibati u međuprostoru između atoma te postaju **slobodni elektroni**.

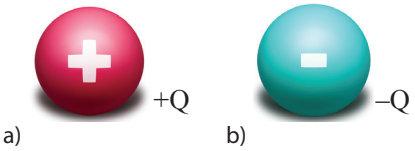
Slobodni elektroni pokretni su nosioci negativnog naboja.

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 privedena energija veća od one potrebne za najvišu stazu, tada se njenim privođenjem 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

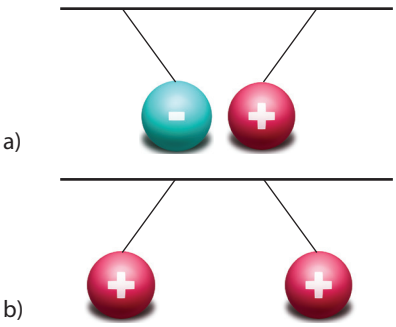
Tijelo se može elektrizirati npr. trenjem, dodirom, zagrijavanjem i djelovanjem svjetlosti (ili EM zračenja).



Slika 1.13.
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	μC	10^{-6} C
nanokulon	nC	10^{-9} C
pikokulon	pC	10^{-12} C



Slika 1.14.
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 1.13b).

Pozitivno nabijeno tijelo ima manjak elektrona; proces nabijanja sastoji se u oduzimanju elektrona (slika 1.13a).

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 naboj, C
n broj elementarnih čestica.

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

Pokusom se može dokazati kako električni naboji međusobno djeluju silama. Pritom, između istoimenih naboja vlada odbojna sila, a između raznoimenih privlačna (slika 1.14).

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 poglavlju 3.)

1.3. Vodiči, poluvodiči i izolatori

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

Vodiči

Vodiči su materijali koji dobro provode električnu struju.

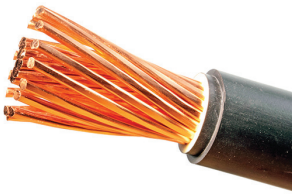
Vodiče čine metali i njihove legure, te su u krutom stanju. Električnu struju čine slobodni elektroni. U metalima slobodni elektroni nastaju zbog toga što i na nižim temperaturama elektroni mogu prelaziti iz valentnog u vodljivi pojas. Naime, za to im je potrebna vrlo mala energija. Ne mijenjaju se kad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

Materijali velike vodljivosti: bakar, aluminij, srebro i zlato – pa se zato najčešće koriste za izradu vodiča (slika 1.15).

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.

a)



b)

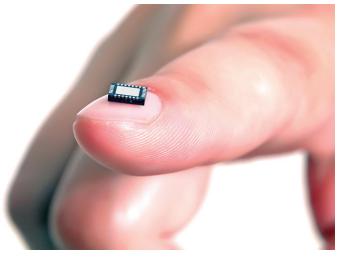
Slika 1.15.
Vodiči:
a) aluminij
b) bakar

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 komponenata: dioda, tranzistora, integriranih sklopova (slika 1.16), memorija, procesora i drugo.



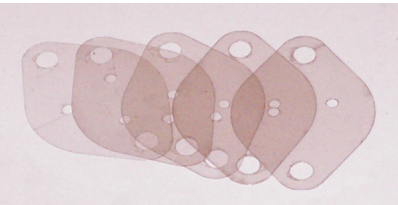
Slika 1.16.
Čip

Izolatori

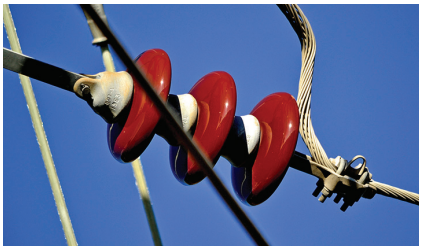
Izolatori su materijali koji pri sobnoj temperaturi nemaju slobodnih elektrona (ili ih je vrlo malo) pa ne vode struju.

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

Izolacijski materijali mogu biti kruti, plinoviti i tekući.



Slika 1.17.
Tinjac



Slika 1.18.
Keramički izolator

Primjeri izolacijskih materijala:

- **kruti**: staklo, tinjac (slika 1.17), keramički materijali (slika 1.18), kremen, voskovi, bitumen, asfalt, silikonske smole (plastične mase), kaučuk, guma, umjetne smole, vlaknasti 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.

1.4. Električna potencijalna energija i električni potencijal

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

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

1.4.1. Električno polje i potencijalna energija

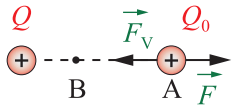
Ako se u blizinu nabijenog tijela dovede naboj u mirovanju (statički naboj), na njega će djelovati sila. Električni naboj stvara u cijelom prostoru oko sebe **električno polje**. (Više o električnom polju u trećem poglavlju.)

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

Sila kojom električno polje djeluje na naboj 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 naboj.



Slika 1.19.
Rad u električnom polju

Dovedimo pozitivni pokusni naboj Q_0 u točku A u blizinu drugog pozitivnog naboja Q (slika 1.19). Naboji međusobno djeluju odbojnom silom. Ako želimo pokusni naboj iz točke A približiti pozitivnom naboju 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 naboja moramo utrošiti rad odnosno energiju.

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

Napomena

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

Električna potencijalna energija je energija električnog naboja u mirovanju.

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

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

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

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

1.4.2. Električni potencijal i napon

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

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

Važno

Električni potencijal skalarna je veličina.

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

Potencijal računamo prema izrazu:

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

gdje je:

φ	električni potenicjal, V
Q_0	jedinični naboj, C
W	potencijalna energija, J.

Napomena

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