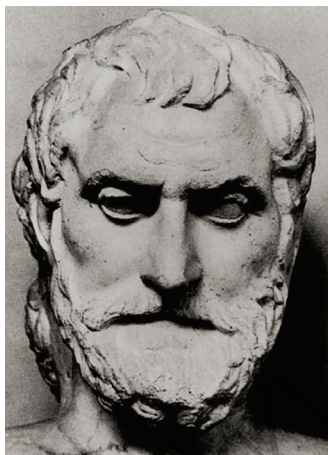


1.

Električna svojstva tvari

- 1.1 Uvod u elektricitet
- 1.2 Građa tvari
- 1.3 Električni naboj
- 1.4 Načini elektriziranja tijela
- 1.5 Raspodjela naboja na metalnim tijelima
- 1.6 Coulombov zakon – međusobno djelovanje električnih naboja
- 1.7 Vodiči, poluvodiči i izolatori
- 1.8 Rad sila u električnom polju
- 1.9 Električni potencijal i ekvipotencijalne plohe



Slika 1.1-1

Tales, iz Mileta (640.-574. god. pr. Krista), starogrčki filozof i osnivač materijalnog poimanja u filozofiji; matematičar, autor poznatog teorema presjeka visina, te jedan od sedam mudraca starog vijeka.



Slika 1.1-2

Jantar

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 primijenjuje 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 najlonske 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 izvedeći pokuse sa žutim jantantom (tvrda 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 $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$ (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 ima i stakleni štapa kada ga trljamo svilenom krpom – 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 štapova ili dvaju jantara pripisuje elektricitetu.

Ovu pojavu je C. F. Cisternay du Fay (1698. – 1739.) pokušao objasniti uvodeći 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:

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



Slika 1.1-3

Munja

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 naboj je onaj koji se pojavljuje na staklu kada se protrlja svilenom krpom, a negativan naboj se pojavljuje na ebonitnoj šipci kada se ona protrlja 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 dodirnom žabljeg 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 komunikacije.

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 električnost pa stoga svako proučavanje električnosti 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 nazivali **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 naboj uzima se $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Naboj elektrona označava se s e_0 , a iznosi:

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

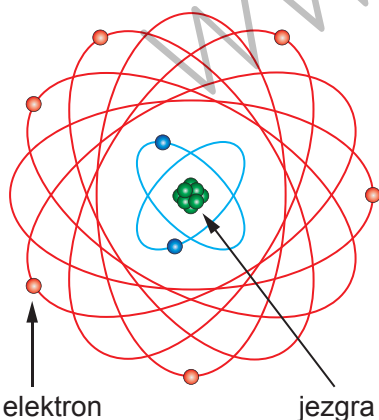
Kulon (C) je mjerna jedinica količine naboja.

Naboj elektrona odredio je Millikan, 1910. g.

Naboj protona po vrijednosti je jednak naboju elektrona, ali je suprotnog predznaka:

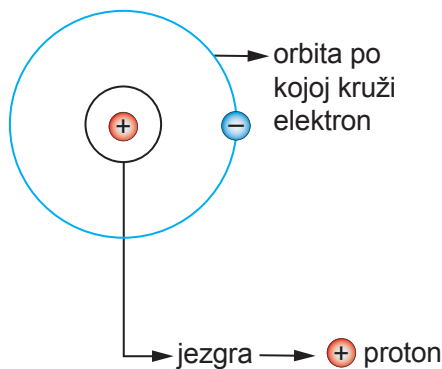
$$e_0^+ = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

* grč. ατομή - nedjeljivo



Slika 1.2-1

Složenija struktura atoma



Slika 1.2-2
Najmanji atom – atom vodika

Tablica 1.2-1
Maksimalan broj elektrona po ljuskama elektronskog omotača

Redni broj ljuske <i>n</i>	Oznaka ljuske
1	K
2	L
3	M
4	M
5	O
6	P
7	Q

Raspored elektrona po ljuskama						
Element: olovo (Pb)						
K	L	M	N	O	P	Q
2	8	18	32	18	4	–

Raspored elektrona po ljuskama						
Element: bakar (Cu)						
K	L	M	N	O	P	Q
2	8	18	1	–	–	–

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.

Da bi se dobio osjećaj veličine atoma vodika, navedimo slijedeće: ako bismo jezgru atoma vodika povećali toliko puta dok ne poprimi veličinu rukometne lopte, elektron bi poprimio veličinu teniske loptice i gibao bi se po kružnoj putanji oko jezgre na udaljenosti približno 4 km.

Svi elektroni imaju:

- 1) jednaku masu, $m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg,
- 2) jednak elementarni negativni naboj, $e_0^- \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Svi protoni imaju:

- 1) jednaku masu, $m_p \approx 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg,
- 2) jednak elementarni pozitivni naboj, $e_0^+ \approx +1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Masa neutrona je približno jednaka masi protona.

Atomi imaju jednak broj protona i elektrona, tj. jednak broj pozitivno i negativno naelektriziranih čestica. Zato je ukupni naboj broj bilo kojeg atoma jednak nuli. Prema tome, atom bilo kojeg kemijskog elementa je električki neutralan.

Godine 1913. fizičar N. Bohr unapređuje Rutherfordov model atoma, uvodi dva postulata, pri čemu zadržava njegovu osnovnu ideju, s tim da je gibanje elektrona oko jezgre kvantizirano. Elektroni mogu biti samo u određenim stacionarnim stanjima koja se međusobno oštro razlikuju – nalaze se na pojedinim energetske ljuskama.

Atom može imati najviše sedam ljuski i svaka od njih ima određenu energetske razinu. Što je elektron udaljeniji od jezgre atoma, to je njegova energija veća. Iz toga proizlazi da najmanju energiju ima elektron koji se nalazi u 1. ljusci (K), a najveću energiju ima elektron u 7. ljusci (Q). Svaka ljuska sadrži točno određen broj elektrona i taj broj elektrona povećava se s udaljenošću ljuske od jezgre do N ljuske (32 elektrona).

Prva ljuska (K) može imati najviše 2 elektrona. Druga ljuska (L) može imati najviše 8 elektrona, treća (M) najviše 18, itd. Popis ljusaka se nalazi u tablici 1.2-1 (primjer popunjenosti ljuski s elektronima za olovo i bakar).

Već smo napomenuli da najmanji atom, atom vodika, ima jednu ljusku i jedan elektron. Ljuska vodika, dakle, nije popunjena. Vanjske ljuske većine složenijih elemenata također nisu popunjene (nemaju maksimalni

broj elektrona). Nepopunjene ljuske atoma nazivaju se **valentne ljuske**, a njihovi elektroni **valentni elektroni** i njihov broj određuje svojstva atoma.

Valentni elektroni nisu neraskidivo vezani uz atom pa se događa da valentni elektron (elektron iz posljednje nepopunjene ljuske) napusti svoj atom i prijeđe u susjedni, pa nastaju ioni. Takvi elektroni nazivaju se **slobodni elektroni**.

1.3 Električni naboji

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

a) Atom se sastoji od jezgre i elektronskog omotača.

U jezgri su protoni i neutroni.

Elektronski omotač ima najmanje jednu, a najviše sedam elektronskih ljusaka po kojima se gibaju elektroni.

b) Nositelji elementarnog naboja su elektroni i protoni.

Elektron ima najmanji negativni elementarni naboj:

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

Proton ima najmanji pozitivni elementarni naboj:

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

c) Naboji elektrona i protona imaju jednaki iznos.

d) Neutron je električki neutralan, a njegova masa je približno jednaka masi protona.

e) Kad je količina pozitivnog i negativnog naboja jednaka, tijelo djeluje neutralno.

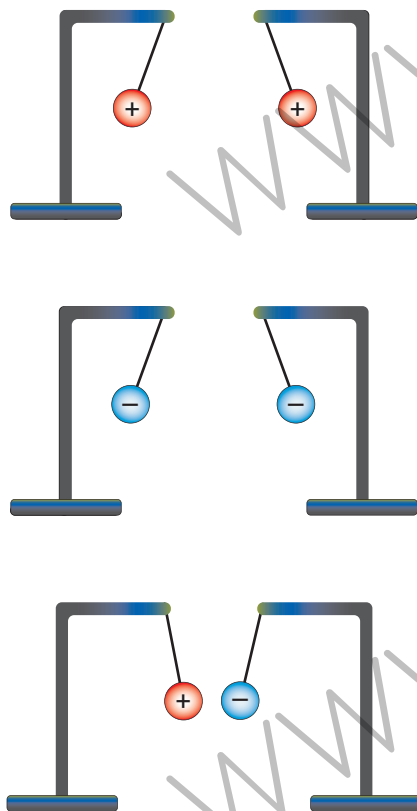
Osnovna jedinica za mjerenje električnog naboja je kulon, oznaka je C ili ampersekunda: $C = A \cdot s$. Količina naboja od jednog kulona odgovara 6,24 trilijuna elementarnih električnih naboja:

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

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 čestica istoimenog i privlačenje čestica raznoimenog 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 ljusci. Energetske ljuske 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 ljuske 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 ljuske 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 jezgu 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 oslobađanja elektrona iz atoma i stvaranja slobodnih naboja.

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

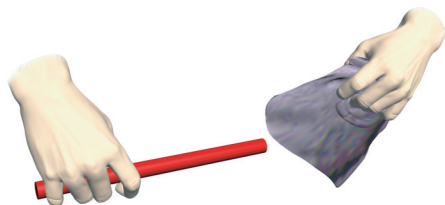
Pozitivno nabijeno tijelo ima manjak elektrona; proces nabijanja se sastoji u oduzimanju elektrona.

1.4 Načini elektriziranja tijela

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

Tijelo se može elektrizirati trljanjem (trenjem), dodirrom 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.



Slika 1.4-1a

Stakleni štap i lanena krpa

Elektriziranje trljanjem

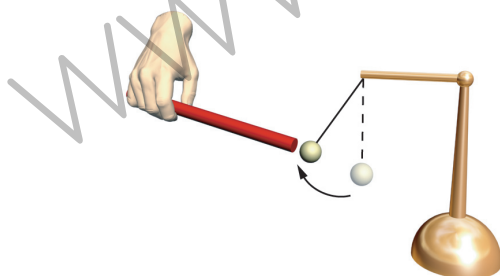
Pokus

- Stakleni štap se trlja komadom lanene krpe (slika 1.4-1a).
- 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 svilenj niti (1.4-1b) i zapaža se da dolazi do pomicanja kuglice prema štapu.

Elektrizirani štap privuče kuglicu.

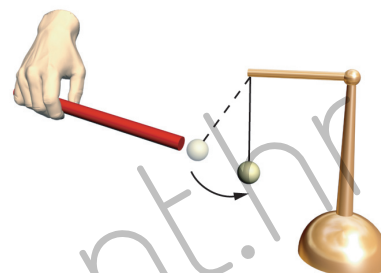
- Kada bazgina kuglica dodirne naelektrizirani štap, dolazi do nagle promjene položaja kuglice i to tako da se ona odmiče od staklenog štapa. U ovom slučaju dolazi do elektriziranja bazgine kuglice dodirom. (1.4-1c)

Uzrok ovakvog ponašanja je odbojna sila.



Slika 1.4-1b

Naelektriziran štap privlači kuglicu



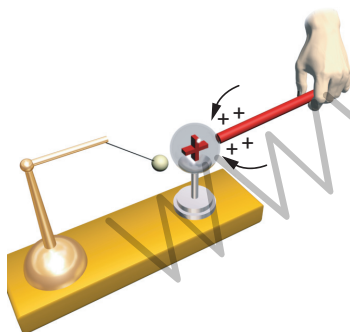
Slika 1.4-1c

Nakon dodira naelektriziranog štapa i neutralne kuglice, oni se odbijaju

Elektriziranje dodirom

Pokus

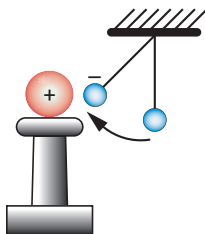
- Imamo nenabijenu metalnu kuglu, kuglicu od bazgine srčike obješenu na svilenj niti i pozitivno elektrizirani štap. 1.4-2
- Pozitivno elektriziranim štapom se nekoliko puta prijeđe po metalnoj kugli.
- Metalna kugla će privući kuglicu od bazgine srčike.



Slika 1.4-2

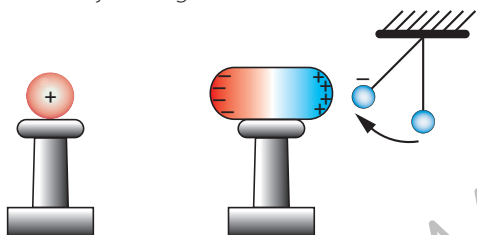
Elektriziranje neutralnog tijela dodirom

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



Slika 1.4-3a

Privlačenje pozitivno nabijene kugle i negativno nabijene kuglice



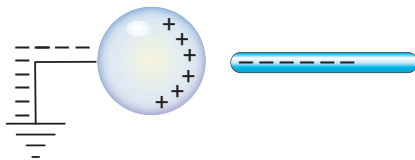
Slika 1.4-3b

Elektriziranje influencijom



Slika 1.4-4a

Razdvajanje naboja na kugli



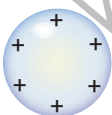
Slika 1.4-4b

Prijelaz negativnog naboja s kugle u zemlju



Slika 1.4-4c

Na kugli ostaje pozitivni naboj



Slika 1.4-4d

Jednoliki raspored pozitivnog naboja po kugli

Elektriziranje influencijom metalnog tijela

Pokus

- Pozitivno nabijenoj kugli približimo negativno nabijenu kuglicu. Dolazi do njihovog privlačenja jer se raznoimeni naboji privlače. (slika 1.4-3a)

Uzme se duguljasto metalno nenabijeno tijelo (puno ili šuplje) i postavi se između pozitivno nabijene kugle i negativno nabijene kuglice (slika 1.4-3b).

Duguljasto tijelo s desne strane privlači negativno nabijenu kuglicu, dakle 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 1.4-3b).

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

Pokus

Dobivanje jedne vrste naboja influencijom prikazat ćemo sljedećim pokusom.

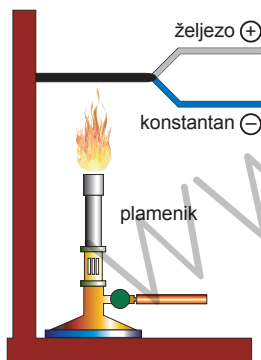
- Neutralnoj metalnoj kugli se približi negativno naelektrizirani polivinilski štap.
- Elektroni se potisnu na udaljeniji dio kugle (slika 1.4-4a).
- Kugla se uzemlji.
- Elektroni prelaze s kugle u zemlju (slika 1.4-4b).
- Prekine se veza sa zemljom.
- Na kugli ostaje manjak elektrona (slika 1.4-4c).
- Ukloni se polivinilski štap.
- Preostali elektroni se jednoliko (ravnomjerno) rasporede po površini kugle (slika 1.4-4d).

Neutralna metalna kugla se naelektrizirala električnom influencijom (u ovom slučaju pozitivno).



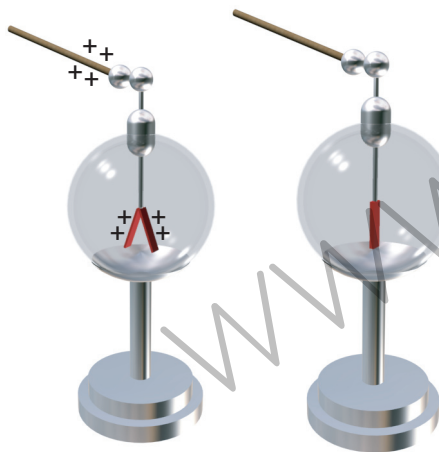
Slika 1.4-5

Češalj i komadići tankog papira



Slika 1.4-6

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



Slika 1.4-7

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

Elektriziranje papirića

Pokus

- Plastični češalj provlačimo kroz kosu i on će se negativno nabiti.
- Elektrizirani češalj se približi komadićima tankog papira (slika 1.4-5).
- 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 objasniti? 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

Vodiči 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.

Elektriziranje zagrijavanjem

Pokus

- Kada se zagrijava spojište šipki različitih kovina, na hladnim se krajevima pojavljuje višak ili manjak naboja (1.4-6).

Instrument koji na najjednostavniji način prikazuje je li neko tijelo naelektrizirano je **elektroskop*** (slika 1.4-7), dok je **elektrometar**** (slika 1.4-8), odnosno **elektrostatski voltmetar** uređaj koji radi na načelu elektroskopa. Njime se mjeri količina elektriciteta – naboja.

Elektroskop (slika 1.4-7) 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 gumenu ili ebonitni čep koji zatvara valjkasto metalno kućište. Kada nabijenim tijelom dodirnemo kuglicu elektroskopa, elektricitet preko vodljive bakrene šipke prelazi na listiće koji se zbog istoimenih naboja razmiču

*grč. σκοπεω (čit. skopeo) = gledam

** grč. μετρον (čit. metron) = mjerilo



Slika 1.4-8
Elektrometar

– odbijaju se. Razmicanje je u većoj ili manjoj mjeri razmjerno količini elektriciteta koju su listići primili. Na taj smo način ustanovili postojanje elektriciteta – naboja.

1.5 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 σ :

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

gdje je:

- σ površinska gustoća naboja, $\frac{C}{m^2}$
- Q količina elektriciteta (naboja), C
- S površina, m^2 .

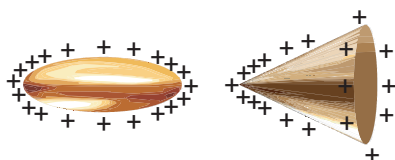
Jednolika gustoća naboja se postiže i na potpuno ravnoj, beskonačno velikoj metalnoj plohi jer upravo takvu površinu predstavlja oplošje beskrajno velike kugle. U praksi se često koriste međusobno paralelne i suprotno nabijene ploče.

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

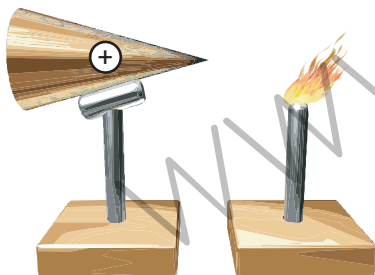
$$\sigma = \frac{Q}{4\pi r^2}.$$

Gustoća naboja kod tijela različitih oblika nije svugdje jednaka. Najveća gustoća je na šiljcima i bridovima, a manja je na manje zakrivljenim (oblim ili ravnim) dijelovima (slika 1.5-1).

Da u blizini elektriziranog šiljka postoje posebni uvjeti, može se pokazati tako da mu se prinese plamen svijeće (slika 1.5-2). Plamen se povija kao da na njega puše struja 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 molekula 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 molekula, tj. poput vjetra.



Slika 1.5-1
Naboj je najgušći na šiljcima

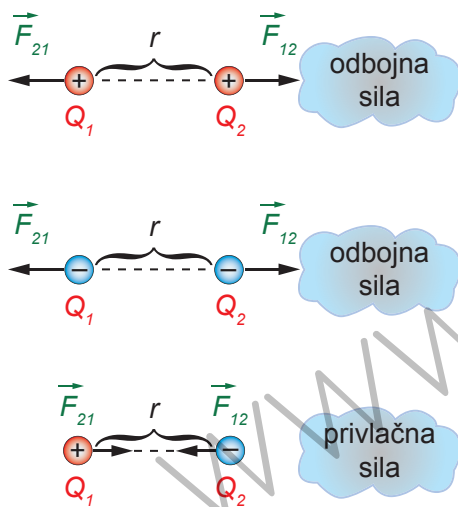


Slika 1.5-2
Električni vjetar



Charles Augustin de Coulomb (1736.–1806.), francuski fizičar.

Coulomb je najpoznatiji po svojim istraživanjima s područja mehanike, elektriciteta i magnetizma. Proučavao je trenje te osmislio i iskoristio torzionu vagu kako bi proučio zakone električnih i magnetskih sila, ali i raspodjelu električnog naboja po površinama. Po njemu je ime dobio i Coulombov zakon koji povezuje električnu silu s količinom električnog naboja. Mjerna jedinica za naboj u SI sustavu je kulon.



Slika 1.6-1

Djelovanje električnih sila među nabojima

1.6 Coulombov zakon – međusobno djelovanje električnih naboja

Pokusi opisani u prethodnim odsječcima pokazuju kako električni naboji međusobno djeluju silama, tj. kako se električki nabijena tijela međusobno privlače ili odbijaju.

Veličinu te sile je 1785. godine definirao francuski fizičar Coulomb (čit. Kulon). Coulomb je ustvrdio da su sile među nabojima obrnuto proporcionalne kvadratu njihove međusobne udaljenosti. Sila je privlačna za raznoimene naboje, a odbojna za istoimene naboje.

Coulombov zakon vrijedi samo za **točkaste naboje**. Točkastim nabojima se smatraju naelektrizirana tijela relativno malih izmjera u odnosu na njihovu međusobnu udaljenost.

Promatraju se dva točkasta naboja Q_1 i Q_2 na međusobnoj udaljenosti r . Među nabojima djeluje električna sila, kako je prikazano na slici 1.6-1. Po iznosu su sile $\vec{F}_{12}$ i $\vec{F}_{21}$ jednake: $|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = |\vec{F}|$, a po smjeru su suprotne.

Električna sila F je vektorska veličina, tj. ima svoj iznos (jakost), pravac i smjer. Sila je na pravcu koji spaja dva točkasta naboja, a smjer ovisi o predznaku naboja. Iznos sile između dvaju točkastih naboja koja su na međusobnoj udaljenosti r , a imaju naboje Q_1 i Q_2 , je:

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

gdje je:

F	Coulombova sila, N
Q_1 i Q_2	količine naboja, C
r	međusobna udaljenost naboja, m
k	koefficient proporcionalnosti, $\frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \equiv \frac{\text{Vm}}{\text{As}}$

Ako je $F > 0$, sila je odbojna. Ako je $F < 0$, sila je privlačna.

Ako su naboji u vakuumu, koefficient se označiva oznakom k_0 i ima vrijednost:

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}.$$

Temeljni zakon elektrostatičke, **Coulombov zakon**, glasi:

Sila između dvaju točkastih naboja je proporcionalna umnošku količina naboja, a obrnuto proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti:

Tablica 1.6-1

Orijentacijske vrijednosti za relativne permitivnosti čvrstih dielektrika

Dielektrik	ϵ_r
vakuum	1
zrak	1,0006
parafin	2
papir	2 ÷ 4
guma	2,5
porculan	4 ÷ 6
tinjac	5 ÷ 8
mramor	6 ÷ 8
staklo	5 ÷ 10
destilirana voda	81
led	3
trafo-ulje	2,2 ÷ 2,5
pleksiglas	3 ÷ 5

$$1 \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} = 1 \frac{\text{As}}{\text{Vm}} = 1 \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

Zanimljivo

Po električnom djelovanju, naboj od 1 C je vrlo velik. Tako velik naboj u prirodi se javlja za nevremena, u olujnim oblacima. Ukupni naboj tijela mnogo je manji od 1 C. Npr. naboj polivinilnog štapa poslije trljanja svilom iznosi $10^{-7} = 100 \text{ nC}$ (stotinu nanokulona).

U elektrotehnici, koeficijent proporcionalnosti k izražava se preko veličine ϵ (čit. epsilon) koja se naziva **dielektričnost** ili **permitivnost**.

Veza između koeficijenta k i dielektričnosti ϵ je:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon}, \quad k = \frac{k_0}{\epsilon_r}$$

Dielektričnost možemo shvatiti kao mjeru utjecaja sredstva na električnu silu između naboja.

Dielektričnost ϵ u nekom sredstvu se može izraziti u obliku:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

ϵ_0 je **dielektričnost vakuuma**:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_0} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}},$$

a ϵ_r je **relativna dielektričnost**.

Relativna dielektričnost ϵ_r karakteristična je za sredstvo u kojem se nalaze nabijena tijela.

U tablici 1.6-1 su ispisane relativne dielektričnosti čestih dielektrika. Relativna dielektričnost vode je 81, što znači da je u vodi električna sila 81 puta slabija nego u vakuumu, te vrijedi:

$$F_{\text{vode}} = \frac{F_0}{\epsilon_r}$$

ili

$$\frac{F_0}{F} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r$$

gdje je:

F_0 Coulombova sila u vakuumu (i zraku)

F Coulombova sila u nekom sredstvu.

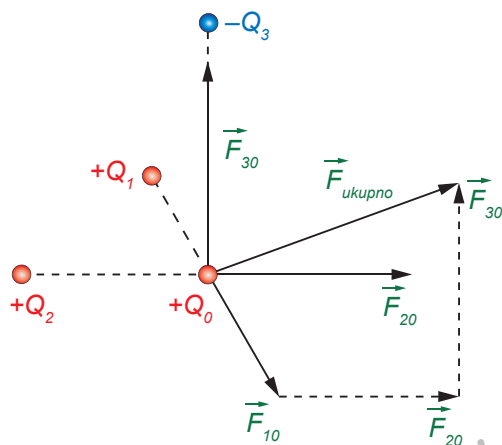
Važno je naglasiti:

Sredstvo u kojem se nalaze naboji je dielektrik, zbog čega se i govori o dielektričnim veličinama.

Relativna dielektričnost ϵ_r jest broj koji nam pokazuje koliko puta je manja Coulombova sila u nekom sredstvu od Coulombove sile u vakuumu.

Relativna dielektričnost zraka približno je jednaka dielektričnosti vakuuma: $\epsilon_r \approx 1$.

Ako na točkasti naboj djeluje više naboja, za izračunavanje ukupne sile primjenjuje se načelo superpozicije. Dakle, ukupna sila jednaka je vektorskom zbroju svih sila koje djeluju na taj naboj.



Slika 1.6-3

Točkasti naboj $+Q_0$ u prostoru drugih naboja

Neka se točkasti naboj $+Q_0$ nalazi u prostoru u kojemu djeluju naboji $+Q_1$, $+Q_2$ i $-Q_3$, kao što je prikazano na slici 1.6-3. Ukupna električna sila iznosi:

$$\vec{F}_{\text{ukupno}} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} + \vec{F}_{30}$$

Ako električni naboj miruje, znači da je ukupna električna sila koja djeluje na njega jednaka nuli.

Coulombov zakon vrijedi za električnu silu između točkastih naboja. No, što ako nabijena tijela nisu točkasta? Ako tijelo ima oblik kugle, ukupni mu je naboj jednoliko raspoređen po površini pa u međudjelovanju s drugim, udaljenijim nabijenim tijelom, kugla djeluje kao da je sav naboj u njezinom središtu. Znači, i u ovom slučaju vrijedi Coulombov zakon.

Električnu silu između nabijenih tijela nepravilnih oblika možemo izračunati tako da svako tijelo raščlanimo na sitne djeliće, gotovo točkaste. Između svakog djelića jednog tijela i svakog djelića drugog tijela vrijedi Coulombov zakon, pa je Coulombova sila između svih tijela jednaka zbroju pojedinačnih sila između djelića jednog i drugog tijela.

Primjer 1

Koliko je elementarnih naboja sadržano u jednom kulonu?

Zadano:

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

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

$$n = ?$$

Rješenje:

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

Primjer 2

Dva tijela su nabijena jednakom količinom naboja $Q_1 = Q_2 = 2 \mu\text{C}$. Nalaze se u ulju relativne dielektričnosti $\epsilon_r = 2$, na udaljenosti $r = 10 \text{ cm}$. Izračunajte silu između tijela.

Zadano:

$$Q = Q_1 = Q_2 = 2 \mu\text{C} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

$$\epsilon_r = 2$$

$$F = ?$$

Rješenje:

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} = \frac{k_0}{\epsilon_r} \cdot \frac{Q^2}{r^2},$$

$$F = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (2 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 0,1^2} = 1,8$$

$$F = 1,8 \text{ N.}$$

Primjer 3

Dva točkasta naboja od $Q_1 = 2,5 \text{ } \mu\text{C}$ i $Q_2 = 1,5 \text{ } \mu\text{C}$ nalaze se u zraku udaljeni jedan od drugoga $r = 53 \text{ cm}$. Kolikom silom naboji djeluju međusobno? Koji je predznak sile?

Zadano:

$$Q_1 = 2,5 \text{ } \mu\text{C} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$Q_2 = 1,5 \text{ } \mu\text{C} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$r = 53 \text{ cm} = 0,53 \text{ m}$$

$$\epsilon_r = 1$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

$$F = ?$$

Rješenje:

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = |F|,$$

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r},$$

$$F = \frac{2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot \pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot (0,53)^2} = 0,12$$

$$F = 0,12 \text{ N.}$$

Naboji djeluju silom od 0,12 N i ta sila je odbojna ($F > 0$) jer su naboji istog predznaka (+).

1.7 Vodiči, poluvodiči i izolatori

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

VODIČI

Vodiči su materijali čiji elektroni pri sobnoj temperaturi (20°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 1.7-1).

Skupini vodiča pripadaju i elektroliti – otopine soli, lužina i kiselina (vodljive tekućine).

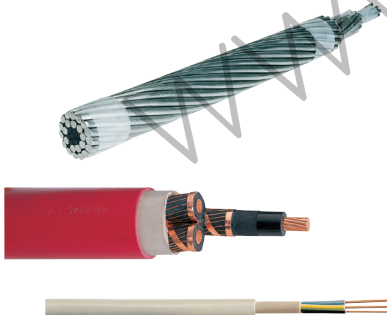
Nadalje, vodiči mogu biti i ionizirani plinovi. Plinovi u normalnom stanju nisu vodiči, nego to postaju ionizacijom. Njihova vodljivost ovisi o gustoći iona nastalih, primjerice djelovanjem električne sile ili katodnih zraka.

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 1.7-2) i germanij (Ge).



Slika 1.7-1

Različiti primjeri kabela



Slika 1.7-2

Silicij za proizvodnju čipova



Slika 1.7-3
Izolatori od stakla

IZOLATORI

Izolatori su materijali koji pri sobnoj temperaturi nemaju slobodnih elektrona (ili ih je vrlo malo). Materijali kao što su staklo (slika 1.7-3), porculan, kristali soli, vakuum i destilirana voda su vrlo loši vodiči. Pri povišenoj temperaturi izolatori gube izolacijska svojstva jer im se povećava broj slobodnih elektrona.

1.8 Rad sile u električnom polju

U dosadašnjim smo analizama spoznali da električki nabijena tijela međusobno djeluju privlačnom ili odbojnom silom. Računali smo Coulombovu silu među nabojima.

Iako ćemo u poglavlju 9 opširnije objasniti pojmove vezane za električno polje, ovdje ćemo samo ukratko spomenuti osnovne pojmove.

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

Pokusno ispitivanje postojanja električnog polja u nekoj točki sastoji se u postavljanju pokusnog električnog naboja u tu točku. Ako na taj naboj djeluje sila (električna sila), tada u toj točki postoji električno polje.

Ako je sila na naboj posljedica električnog polja, tada polje ima svoj smjer i jakost ($\vec{E}$). Zato je jakost električnog polja vektorska veličina. Smjer polja prikazuje se **linijama polja** ili **silnicama**.

Neka na pokusni naboj $+Q_0$ djeluje homogeno električno polje stalnom električnom silom F i neka se naboj giba suprotno smjeru polja, od točke M do točke N. Za taj pomak potrebno je utrošiti rad vanjske sile F_v (slika 1.8-1). Utrošeni rad bit će jednak potencijalnoj energiji.

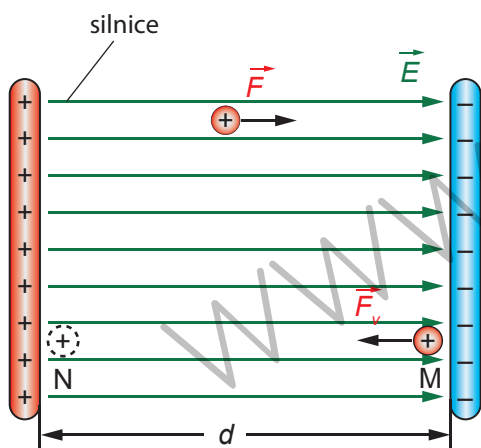
To možemo usporediti s gravitacijskom potencijalnom energijom koja je jednaka radu koji se obavlja podizanjem tijela uvis.

Ako se pozitivni naboj giba u smjeru polja, smanjuje se potencijalna energija naboja; u ovom je slučaju rad obavilo električno polje.

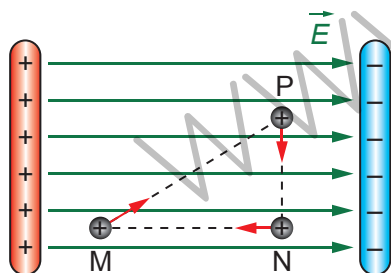
Ako se pozitivni naboj pomiče u smjeru suprotnom smjeru električnog polja, potrebno je upotrijebiti mehaničku silu koja onda obavlja rad pa se na račun tog rada povećava potencijalna energija naboja.

Promatra li se gibanje naboja po nekoj zatvorenoj putanji $M \rightarrow P \rightarrow N \rightarrow M$ (slika 1.8-2), obavljeni rad će biti jednak nuli.

Rad koji obavi naboj gibajući se u električnom polju po zatvorenoj putanji bilo kakvog oblika jednak je nuli.



Slika 1.8-1
Gibanje naboja u homogenom električnom polju.
Homogeno električno polje nastaje između dvije paralelne ploče nabijene jednakim raznoimenim nabojima.
Smjer silnica je od pozitivne prema negativnoj ploči, silnice su paralelne, jakost polja jednaka u svakoj točki polja.

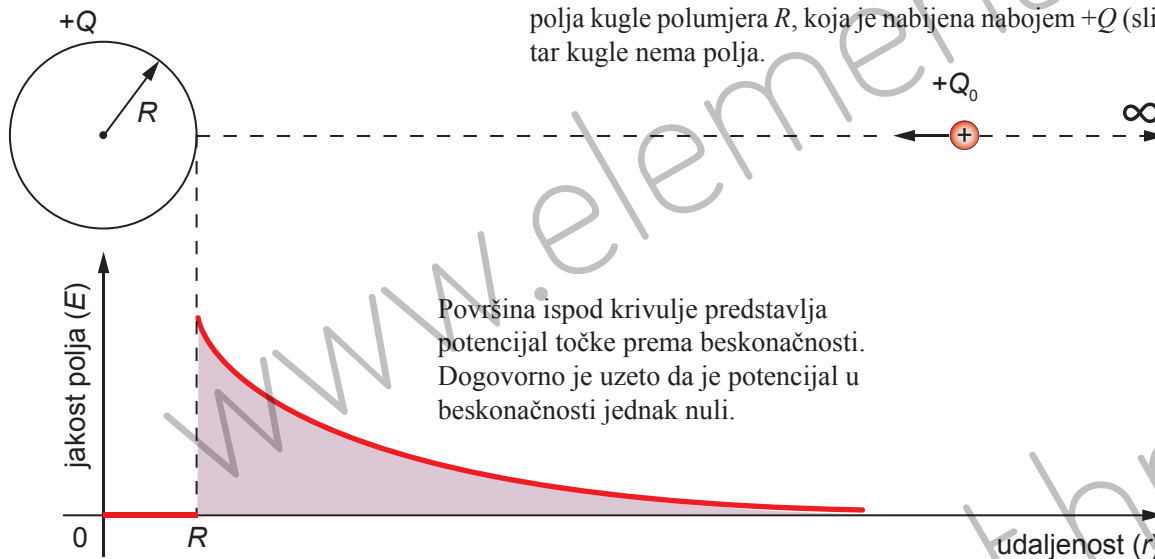


Slika 1.8-2
Gibanje naboja po zatvorenoj putanji

Pri prijenosu pokusnog naboja iz jedne točke polja u drugu, obavlja se ili dobiva rad koji ne ovisi o putu, već samo o položaju krajnjih točaka.

1.9 Električni potencijal i ekvipotencijalne plohe

Neka se pokusni naboj dovodi iz beskonačnosti u neku točku električnog polja kugle polumjera R , koja je nabijena nabojem $+Q$ (slika 1.9-1). Unutar kugle nema polja.



Slika 1.9-1

Električno polje nabijene metalne kugle

Pri prijenosu pokusnog naboja $+Q_0$ potrebno je prevladati odbojnu silu koja se povećava približavanjem naboja kugli (polje je sve jače), dakle, obavlja se rad. Prestane li djelovanje vanjske sile, pokusni naboj će se udaljavati od nabijene kugle zbog djelovanja električne sile. Pokusni naboj $+Q_0$ sposoban je pritom obaviti određeni rad i to na račun smanjenja vlastite potencijalne energije.

Uloženi rad jednak je dobivenom radu.

Pri određivanju potencijalne energije nekog sustava, u točki prostora potrebno je odrediti referentnu točku. Ta se točka bira u beskonačnosti jer je potencijalna energija točkastog naboja u toj točki jednaka nuli (nema bilo kakvog polja na tim udaljenostima).

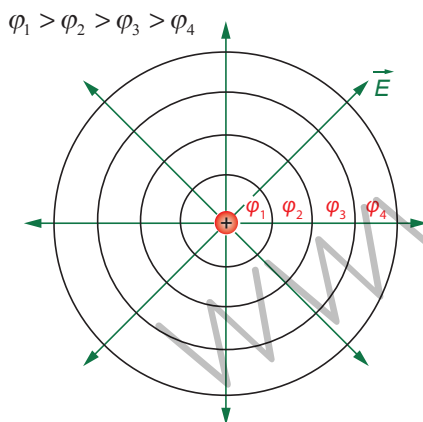
Ovisnost potencijalne energije naboja o položaju u električnom polju izražavamo veličinom koju nazivamo električnim potencijalom.

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



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. kad 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. dobio odlikovanje (Francusku legiju časti), a Napoleon ga je 1810. proglasio grofom Kraljevstva Italije.



Slika 1.9-2

Ekvipotencijalne krivulje pozitivnog točkastog naboja

Potencijal se označava grčkim slovom φ (čit. fi), a računa prema izrazu

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

gdje je:

φ električni potencijal, V

Q jedinični naboj, C

W potencijalna energija, J.

Mjerna jedinica električnog potencijala je volt (V), a dana je u čast Alessandra Volte:

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

Električni potencijal u nekoj točki polja iznosi 1 V ako se iz beskonačnosti do te točke polja (tj. referentne točke) prenese pozitivna količina naboja od 1 C, pri čemu se obavi rad od 1 J.

EKVIPOENCIJALNE PLOHE

Sve točke u električnom polju pozitivnog naboja su na pozitivnom potencijalu, a sve točke u električnom polju negativnog naboja su na negativnom potencijalu. Ako polje potječe od pozitivnog i negativnog naboja, tad imamo točke i na negativnom i na pozitivnom potencijalu.

Spojimo li u električnom polju točke koje imaju jednak potencijal, dobijemo plohe jednakog potencijala ili ekvipotencijalne plohe.

Ekvipotencijalna ploha je ploha čije se sve točke nalaze na jednakom potencijalu, a okomita je na smjer električnog polja.

Između bilo kojih dviju ekvipotencijalnih ploha električnog polja postoji **razlika potencijala**. Razlika potencijala između bilo kojih dviju točaka na istoj ekvipotencijalnoj plohi jednaka je nuli (0 V). Pomicanjem naboja po ekvipotencijalnoj plohi ne obavlja se nikakav rad jer nema razlike potencijala.

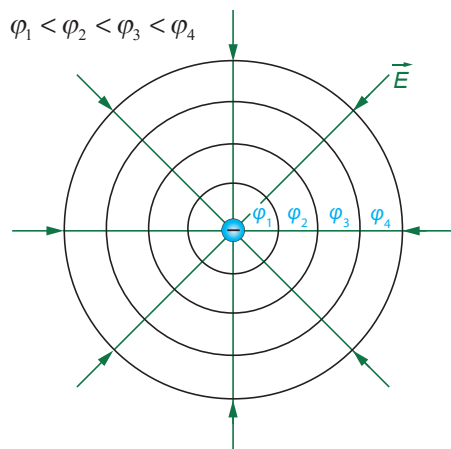
Ekvipotencijalne plohe su gušće na mjestima gdje je polje jače, a rjeđe na mjestima gdje je polje slabije.

Sve točke u nekom vodiču i na njegovoj površini imaju jednak potencijal jer je površina vodiča ekvipotencijalna ploha, a prostor u vodiču ekvipotencijalni prostor.

Pri crtanju u ravnini koristimo se ekvipotencijalnim krivuljama.

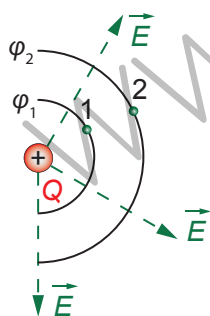
Ekvipotencijalne krivulje su presjeci ekvipotencijalnih ploha i proizvoljne ravnine.

Ako električno polje potječe od pozitivnog naboja, tada sve točke polja, u odnosu na referentnu točku u beskonačnosti, imaju pozitivan potencijal.



Slika 1.9-3

Ekvipotencijalne krivulje negativnog točkastog naboja



Slika 1.9-4

Rad u električnom polju

Zanimljivo

Za dobivanje predodžbe o vrijednosti električnog napona, dovoljno je reći: Napon radiosignala je vrlo nizak, svega 1 μV , a napon munje vrlo je visok i iznosi 10 MV, koliko iznosi i napon akceleratora – uređaja za razbijanje atoma.

Ekvipotencijalne krivulje su koncentrične kružnice (slika 1.9-2).

Ako električno polje potječe od negativnog naboja, tada sve točke polja, u odnosu na referentnu točku, imaju negativan potencijal. Ekvipotencijalne krivulje su koncentrične kružnice (slika 1.9-3).

U oba slučaja potencijal se smanjuje u smjeru polja.

RAD SILA U ELEKTRIČNOM POLJU

Odaberimo u električnom polju dvije točke koje imaju određeni potencijal φ_1 i φ_2 (slika 1.9-4). Pokusni naboj Q_0 u točki 1 ima potencijalnu energiju W_1 , a u točki 2 potencijalnu energiju W_2 . Ako se naboj unese u električno polje i premjesti iz točke potencijala φ_1 u točku potencijala φ_2 , obaviti će se rad koji je jednak razlici potencijalnih energija u danim točkama:

$$A = W_1 - W_2 = Q_0 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2).$$

ELEKTRIČNI NAPON

U izrazu za rad, $(\varphi_1 - \varphi_2)$ predstavlja razliku potencijala koju nazivamo **naponom** (U):

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Kao i za potencijal, mjerna jedinica električnog napona je volt (V).

Električni napon između dviju točaka električnog polja jednak je razlici potencijala tih dviju točaka.

Napon između točaka 1 i 2 je razlika potencijala: $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$. Napon između točaka 2 i 1 je razlika potencijala: $U_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$. Dakle, vrijedi:

$$U_{12} = - U_{21}.$$

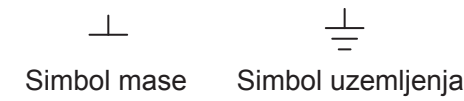
Napon $U_{12} > 0$ ako je točka 1 na višem potencijalu u odnosu na točku 2. Napon $U_{12} < 0$ ako je točka 1 na nižem potencijalu u odnosu na točku 2.

Napon je razlika u potencijalu između dviju točaka, što se može mjeriti. Da bismo izmjerili potencijal u nekoj točki, potrebno je odrediti referentnu točku – referentni potencijal, obično jednak nuli. U odnosu na tu točku određuje se potencijal ostalih točaka.

U elektrotehničkoj praksi se upotrebljava pojam masa. Masa je naziv za točku referentnog potencijala nekog strujnog kruga.

U praktičnoj se primjeni kao referentna točka, odnosno točka nultog potencijala uzima točka na površini Zemlje.

Ako neku točku strujnog kruga spojimo sa zemljom, ta se točka dovodi na potencijal zemlje i kažemo da je uzemljena.



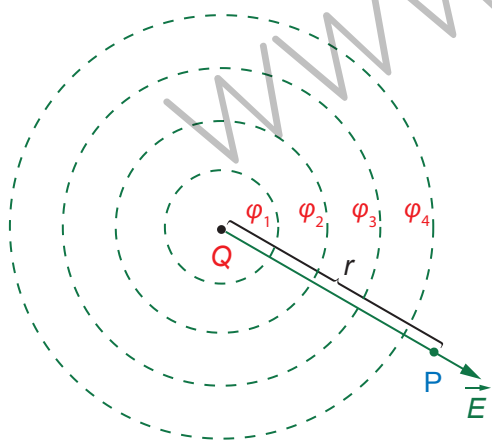
Slika 1.9-5

Simboli kojima se označavaju masa i uzemljenje

Tablica 1.9-1

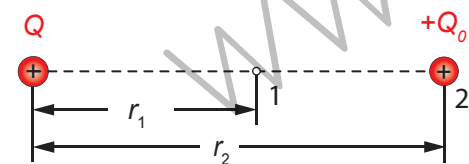
Mjerne jedinice električnog napona

Naziv	Oznaka	Iznos
mikrovolt	μV	10^{-6} V
milivolt	mV	10^{-3} V
kilovolt	kV	10^3 V
megavolt	MV	10^6 V



Slika 1.9-6

Potencijal točkastog naboja



Slika 1.9-7

Rad električnog polja

Uzemljenje i masa se označavaju simbolima prikazanim na slici 1.9-5. Kao što je već rečeno, mjerna jedinica za električni napon je volt (V). U elektrotehnici i različitim područjima njezine primjene upotrebljavaju se i manje (u mikroelektronici, odnosno komunikacijama) i veće (u elektroenergetici) vrijednosti napona od 1 V. Najčešće mjerne jedinice za napon su ispisane u tablici 1.9-1.

ELEKTRIČNI POTENCIJAL U OKOLINI TOČKASTOG NABOJA

Odredimo električni potencijal što ga u točki P na udaljenosti r stvara točkasti naboj Q (slika 1-9-6).

Koristeći složeni matematički postupak, dobije se:

$$\varphi = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r}$$

gdje je:

- φ električni potencijal, V
- Q količina naboja, C
- $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, dielektričnost
- r udaljenost, m.

Iz izraza za potencijal točkastog naboja se vidi:

- Električni potencijal u polju pozitivnog točkastog naboja smanjuje se s povećanjem udaljenosti od naboja.
- Električni potencijal u okolini oko pozitivnog točkastog naboja pozitivan je, a oko negativnog naboja negativan.

Ako je električno polje uzrokovano sustavom naboja $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$, tada je potencijal u bilo kojoj točki polja jednak zbroju potencijala što ga svaki od tih naboja stvara u toj točki:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n.$$

Potencijal je skalarna veličina.

POTENCIJALNA ENERGIJA SUSTAVA DVAJU TOČKASTIH NABOJA

Ako se naboj Q_0 pomakne u polju točkastog naboja Q iz točke 2 u točku 1 (slika 1.9-7), promjena potencijalne energije iznosi:

$$A = \Delta W = W_1 - W_2.$$

Rad je jednak razlici potencijalnih energija u točkama 1 i 2:

$$A = \Delta W = W_1 - W_2 = \frac{Q \cdot Q_0}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Pomicanjem pozitivnog naboja u smjeru polja, potencijalna energija sustava dvaju naboja se smanjuje.

Dogovorom da je potencijalna energija jednaka nuli kad su naboji vrlo daleko jedan od drugog i zamjenom u prethodni izraz $W_2(r_2 = \text{beskonačno}) = 0$ dobijemo potencijalnu energiju sustava dvaju točkastih naboja udaljenih za r :

$$W = \frac{Q \cdot Q_0}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r}.$$

ELEKTRIČNI POTENCIJAL VODLJIVE (NABIJENE) KUGLE

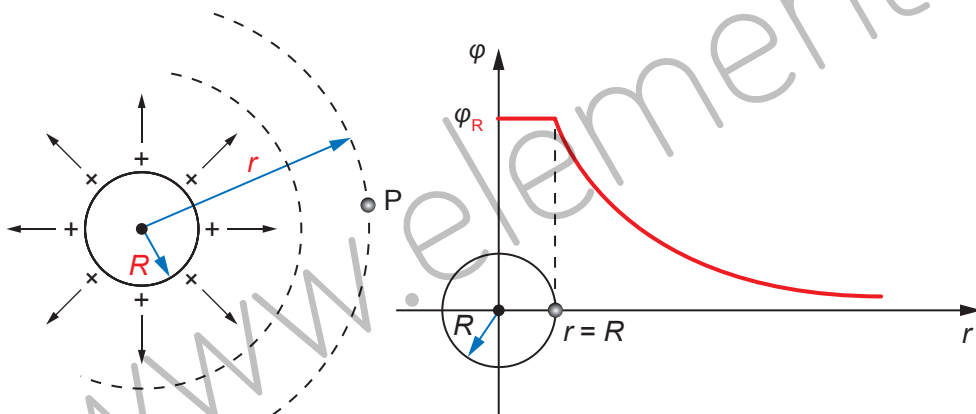
Promatra se metalna kugla polumjera R , nabijena nabojem Q . Potencijal nabijene vodljive kugle u točki P na udaljenosti r od njezina središta iznosi:

$$\varphi = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r}$$

gdje je $r \geq R$.

Električno polje i potencijal nabijene metalne kugle jednako se računaju kao polje i potencijal točkastog naboja za sve točke za koje je udaljenost točke prostora r jednaka ili veća od polumjera kugle R .

Električni potencijal unutar kugle je konstantan, a izvan kugle se smanjuje s udaljenošću r (slika 1.9-8).



Slika 1.9-8

Potencijal vodljive kugle i funkcija ovisnosti potencijala o udaljenosti r od središta kugle

Primjer 1

Izračunajte potencijalnu razliku φ_{AB} ako je potencijal točke A $\varphi_A = 100 \text{ V}$, a potencijal točke B $\varphi_B = -200 \text{ V}$. Koliki je napon U_{AB} ?

Zadano:

$$\varphi_A = 100 \text{ V}$$

$$\varphi_B = -200 \text{ V}$$

$$U_{AB} = ?$$

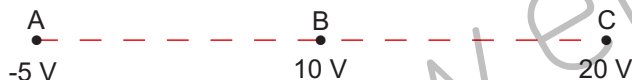
Rješenje:

$$\varphi_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = 100 - (-200) = 300$$

$$U_{AB} = \varphi_{AB} = 300 \text{ V}.$$

Primjer 2

Zadani su potencijali u točkama A, B i C, prema slici. Izračunajte napone U_{AB} , U_{BC} , U_{CB} , U_{AC} , U_{CA} i U_{BA} . Poznati su potencijali točaka $\varphi_A = -5 \text{ V}$, odnosno $\varphi_B = 10 \text{ V}$ i $\varphi_C = 20 \text{ V}$.



Zadano:

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

$$\varphi_B = 10 \text{ V}$$

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

$$U_{AB} = ?$$

$$U_{BC} = ?$$

$$U_{CB} = ?$$

$$U_{AC} = ?$$

$$U_{CA} = ?$$

$$U_{BA} = ?$$

Rješenje:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = -5 - 10 = -15$$

$$U_{AB} = -15 \text{ V}.$$

$$U_{BA} = \varphi_B - \varphi_A = 10 - (-5) = 15$$

$$U_{BA} = 15 \text{ V}.$$

$$U_{AC} = \varphi_A - \varphi_C = -5 - 20 = -25$$

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

$$U_{CA} = \varphi_C - \varphi_A = 20 - (-5) = 25$$

$$U_{CA} = 25 \text{ V}.$$

$$U_{BC} = \varphi_B - \varphi_C = 10 - 20 = -10$$

$$U_{BC} = -10 \text{ V}.$$

$$U_{CB} = \varphi_C - \varphi_B = 20 - 10 = 10$$

$$U_{CB} = 10 \text{ V}.$$

Primjer 3

Koliki rad obavi naboj $Q = 5 \text{ nC}$ ako se premjesti iz točke potencijala $\varphi_2 = 15 \text{ V}$ u točku potencijala $\varphi_1 = 10 \text{ V}$?

Zadano:

$$\varphi_1 = 10 \text{ V}$$

$$\varphi_2 = 15 \text{ V}$$

$$A = ?$$

Rješenje:

$$A = Q \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = 5 \cdot 10^{-9} \cdot (15 - 10) = 5 \cdot 10^{-9}$$

$$A = 5 \cdot 10^{-9} \text{ J}.$$

Primjer 4

Za premještanje naboja $Q = 2 \mu\text{C}$ iz točke A u točku B potrebno je obaviti rad $W = 40 \mu\text{J}$. Izračunajte napon između točaka A i B ($U_{BA} = ?$).

Zadano:

$$Q = 2 \mu\text{C}$$

$$W = 40 \mu\text{J}$$

$$U_{BA} = ?$$

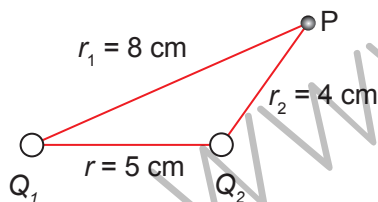
Rješenje:

$$U_{BA} = \frac{A}{Q} = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}} = 10$$

$$U_{BA} = 10 \text{ V.}$$

Primjer 5

Odredite potencijal u točki P sa slike. Naboji $Q_1 = 8 \text{ nC}$ i $Q_2 = 8 \text{ nC}$ se nalaze u dielektriku relativne dielektričnosti $\epsilon_r = 9$ na međusobnoj udaljenosti od $r = 5 \text{ cm}$.



Zadano:

$$Q_1 = 8 \text{ nC} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

$$Q_2 = 8 \text{ nC} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

$$r_1 = 8 \text{ cm} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$r_2 = 4 \text{ cm} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$r = 5 \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$\varphi = ?$$

Rješenje:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left(\frac{Q_1}{r_1} + \frac{Q_2}{r_2} \right)$$

$$\varphi = \frac{9 \cdot 10^9}{9} \left(\frac{8 \cdot 10^{-9}}{8 \cdot 10^{-2}} + \frac{8 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-2}} \right) = 10^9 (10^{-7} + 2 \cdot 10^{-7})$$

$$\varphi = 300 \text{ V.}$$

PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

- 1) Što je atom? Što znači riječ *atom* u prijevodu s grčkog?
- 2) Po čemu se razlikuju atomi?
- 3) Koje čestice tvore atom?
- 4) Što je elementarna količina elektriciteta?
- 5) Što se uzima kao jedinica količine elektriciteta – naboja?
- 6) Kakve su električne osobine čestica koje čine atom?
- 7) Kakve električne osobine pokazuje atom u prirodnom stanju i zašto?
- 8) Kada kažemo da je tijelo elektrizirano?
- 9) Kako sve možemo elektrizirati neko tijelo?
- 10) Što je električna influencija?
- 11) Kako se očituje djelovanje istoimeno, a kako raznoimeno naelektriziranih tijela?
- 12) Koji je osnovni zakon elektrostatičke?
- 13) Kako glasi Coulombov zakon i što on definira?
- 14) Što su slobodni elektroni?
- 15) Što su ioni?
- 16) Što je točkasti naboj?
- 17) Što su vodiči, što su izolatori, a što poluvodiči?
- 18) Što je električni potencijal?
- 19) Što su ekvipotencijalne plohe?
- 20) Što je električni napon?

ZADACI

- 1) Ako je sila između dva jednaka točkasta naboja koji se nalaze u zraku $F = 0,3 \text{ N}$ na udaljenosti od $l = 1,5 \text{ mm}$, odredite iznos naboja Q .
[Rj: $Q = 8,66 \cdot 10^{-9} \text{ C}$.]
- 2) Kolikom će silom djelovati dva jednaka točkasta naboja $Q = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ ako se nalaze u zraku na udaljenosti $l = 5 \text{ cm}$?
[Rj: $F = 9,2 \cdot 10^{-6} \text{ N}$.]
- 3) Kolikom će silom djelovati dva točkasta naboja $Q_1 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ i $Q_2 = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ ako se nalaze u zraku na udaljenosti $l = 5 \text{ cm}$?
[Rj: $F = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ N}$.]
- 4) Kolikom će silom djelovati dva jednaka točkasta naboja $Q = 6 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ ako se nalaze u zraku na udaljenosti $l = 2, 4, 6, 8$ ili 10 cm ? Prikažite grafički prikaz ovisnosti sile o udaljenosti.
[Rj: $F_1 = 8,1 \cdot 10^{-4} \text{ N}$, $F_2 = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ N}$, $F_3 = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ N}$,
 $F_4 = 0,5125 \cdot 10^{-4} \text{ N}$, $F_5 = 0,32 \cdot 10^{-4} \text{ N}$.]
- 5) Između dva protona koji se nalaze u zraku djeluje sila $F = 2,1 \text{ N}$. Naboj protona iznosi $Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Na kojoj se udaljenosti nalaze protoni?
[Rj: $r = 10,47 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.]
- 6) Dva se točkasta naboja u zraku odbijaju silom $F = 0,5 \text{ N}$. Ako ih stavimo u dielektrik, sila će se smanjiti dva puta. Izračunajte relativnu dielektričnu konstantu dielektrika.
[Rj: $\epsilon_r = 2$.]
- 7) Dva naboja od $Q_1 = 400 \text{ nC}$ i $Q_2 = 250 \text{ nC}$ nalaze se u zraku na udaljenosti $l = 1 \text{ m}$. Izračunajte mjesto na spojnici gdje bi na treći naboj sila bila nula.
[Rj: $x = 0,44 \text{ m}$ od drugog naboja.]
- 8) Tri jednaka naboja od $Q = 0,6 \text{ }\mu\text{C}$ nalaze se u vrhovi-
ma jednakokraknog pravokutnog trokuta dužine krakova $l = 5 \text{ cm}$. Odredite silu na naboj smješten u vrhu pravog kuta. Naboji se nalaze u zraku.
[Rj: $F = 1,83 \text{ N}$.]

9) Četiri točkasta naboja $Q = 0,2 \mu\text{C}$ nalaze se u vrhovima kvadrata stranice $a = 15 \text{ cm}$. Odredite iznos i smjer sile na naboj u vrhu B. Naboji se nalaze u zraku.

[Rj: $F = 30,6 \cdot 10^{-3} \text{ N}$.]

10) Dvije nabije kuglice $Q_1 = Q_2 = 2 \mu\text{C}$ nalaze se na udaljenosti $l = 2 \text{ m}$. Izračunajte silu između njih ako se nalaze u zraku. Kolika će biti sila ako im se udaljenost poveća dva puta? Izračunajte silu ako se nalaze u materijalu dielektričnosti $\epsilon_r = 2$.

[Rj: $F_1 = 9 \cdot 10^{-3} \text{ N}$, $F_2 = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ N}$, $F_3 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$.]

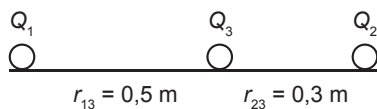
11) Dvije nabijene kuglice $Q_1 = 2 \mu\text{C}$ i $Q_2 = 4 \mu\text{C}$ nalaze se u zraku na udaljenosti $l = 0,5 \text{ m}$. Izračunajte silu među kuglicama. Izračunajte silu ako se svakoj kuglici naboj poveća dva puta.

[Rj: $F_1 = 0,288 \text{ N}$, $F_2 = 1,152 \text{ N}$.]

12) Dva se točkasta naboja u zraku privlače silom F . Kako će se promijeniti sila ako se naboji stave u dielektrik relativne dielektričnosti $\epsilon_r = 8$?

[Rj: Sila će se smanjiti 8 puta.]

13) Naboji $Q_1 = 2 \mu\text{C}$, $Q_2 = -0,5 \mu\text{C}$ i $Q_3 = -1 \mu\text{C}$ se nalaze učvršćeni na pravcu, kao na slici: $r = 0,8 \text{ m}$, $r_{13} = 0,5 \text{ m}$ i $r_{23} = 0,3 \text{ m}$. Izračunajte silu na naboj Q_3 . Naboji se nalaze u zraku.



[Rj: $F = 0,122 \text{ N}$.]

14) Dva se naboja u zraku privlače silom $F = 0,5 \text{ N}$. Ako ih stavimo u dielektrik, sila će se smanjiti dva puta. Izračunajte ϵ_r .

[Rj: $\epsilon_r = 2$.]

15) Naboj $Q_1 = 0,75 \mu\text{C}$ se nalazi u zraku i na naboj Q_2 djeluje silom $F = 0,045 \text{ N}$ na udaljenosti $l = 40 \text{ cm}$. Odredite iznos naboja Q_2 .

[Rj: $Q_2 = 1,07 \mu\text{C}$.]

16) Tri jednaka naboja $Q = 5 \mu\text{C}$ se nalaze u vrhovima jednakostraničnog trokuta stranice $a = 21 \text{ cm}$. Odredite silu na naboj u ortocentru. Naboji se nalaze u zraku.

[Rj: $F = 11,23 \text{ N}$.]

17) Četiri jednaka točkasta naboja $Q = 5 \text{ mC}$ se nalaze u vrhovima kvadrata stranice $a = 25 \text{ cm}$. Odredite silu na naboj u sjecištu dijagonala. Naboji se nalaze u zraku.

[Rj: $F = 0 \text{ N}$.]

18) Četiri točkasta naboja $Q_1 = Q_2 = 5 \mu\text{C}$ se nalaze u vrhovima A i B kvadrata, a $Q_3 = Q_4 = -5 \mu\text{C}$ u vrhovima C i D kvadrata stranice $a = 25 \text{ cm}$. Izračunajte silu na naboj $Q = 5 \mu\text{C}$ u sjecištu dijagonala. Naboji se nalaze u zraku.

[Rj: $F = 20,3 \text{ N}$.]

19) Tri jednaka naboja se nalaze u vrhovima jednakostraničnog trokuta stranice $a = 9 \text{ cm}$. $Q = 0,5 \mu\text{C}$. Odredite veličinu na naboj $Q_2 = 2 \mu\text{C}$ koji se nalazi na sredini osnovice. Naboji se nalaze u zraku.

[Rj: $F = 1,48 \text{ N}$.]

20) Dva naboja, $Q_1 = 8,5 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ i $Q_2 = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ se nalaze u zraku i međusobno su udaljena $l = 45 \text{ cm}$. Izračunajte potencijal na sredini između njih.

[Rj: $\varphi = 36\,000 \text{ V}$.]

21) Dva naboja $Q_1 = -8,5 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ i $Q_2 = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ C}$ se nalaze u zraku i međusobno su udaljena $l = 36 \text{ cm}$. Izračunajte potencijal na sredini između njih.

[Rj: $\varphi = -40\,000 \text{ V}$.]

22) Dva naboja od $Q_1 = 400 \text{ nC}$ i $Q_2 = -240 \text{ nC}$ se nalaze u zraku na udaljenosti $l = 1,6 \text{ m}$. Odredite mjesto na spojnici gdje bi potencijal bio nula.

[Rj: $r = 1 \text{ m}$.]

23) U vrhovima A i B kvadrata stranice $a = 30 \text{ cm}$ se nalaze naboji $Q_1 = Q_2 = -3 \text{ nC}$, a u vrhovima C i D naboji $Q_3 = Q_4 = 30 \text{ nC}$. Odredite potencijal u sjecištu dijagonala kvadrata. Naboji se nalaze u zraku.

[Rj: $\varphi = 2\,297,8 \text{ V}$.]

24) Na kojoj udaljenosti od naboja $Q = 7,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ potencijal iznosi $\varphi = 450 \text{ V}$? Naboj se nalazi u zraku.

[Rj: $r = 15 \text{ cm}$.]

25) Na udaljenosti $l = 9 \text{ cm}$ od nabijene kuglice izmjeren je potencijal $\varphi = 250 \text{ V}$. Izračunajte naboj kuglice.

[Rj: $Q = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$.]

26) Ako naboj $Q = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ premještamo u električnom polju i pritom savladamo razliku potencijala $\varphi = 380 \text{ V}$, izračunajte koliki se pri tom rad utroši. Naboji se nalaze u zraku.

[Rj: $W = 1,33 \text{ mJ}$.]

27) Koliki se rad utroši ako se kuglica s nabojem $Q = 6 \mu\text{C}$ premjesti s potencijala $\varphi_1 = 25000 \text{ V}$ na mjesto s potencijalom $\varphi_2 = 2500 \text{ V}$?

[Rj: $W = 0,135 \text{ J}$.]

28) Metalna kugla polumjera $r = 5 \text{ cm}$ nabijena je nabojem $Q = 45 \text{ nC}$. Izračunajte jakost polja i potencijal: a) u središtu kugle, b) na površini kugle, c) na udaljenosti $l = 20 \text{ cm}$. Za sva tri slučaja nacrtajte dijagram jakosti polja i potencijala, ovisno o udaljenosti.

[Rj: $\varphi_1 = 8\,100 \text{ V}$, $E_1 = 0$, $\varphi_2 = 8\,100 \text{ V}$, $E_2 = 162 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$,

$\varphi_3 = 2\,025 \text{ V}$, $E_3 = 10,125 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$.]

29) Naboj $Q_1 = 400 \text{ nC}$ stvara oko sebe električno polje. Izračunajte rad koji treba uložiti da se naboj $Q_2 = 4 \text{ nC}$ pomakne iz točke koja se nalazi na udaljenosti $r_1 = 250 \text{ cm}$ od naboja Q_1 , do točke koja se nalazi na udaljenosti $r_2 = 120 \text{ cm}$. Ovisi li rad o putu kojim se pomiče naboj iz točke 1 u točku 2?

[Rj: $W = -6,24 \cdot 10^{-6} \text{ J}$.]

30) Naboj $Q = 400 \text{ nC}$ oko sebe stvara električno polje. Izračunajte potencijal u točkama koje se nalaze na udaljenostima $r_1 = 250 \text{ cm}$ i $r_2 = 120 \text{ cm}$ od naboja Q . Izračunajte napon između točke 1 i 2.

[Rj: $\varphi_1 = 1\,440 \text{ V}$, $\varphi_2 = 3\,000 \text{ V}$, $U_{12} = -1\,560 \text{ V}$.]

31) Dva naboja $Q_1 = 85 \text{ nC}$ i $Q_2 = 50 \text{ nC}$ se nalaze u zraku i međusobno su udaljeni $r = 50 \text{ cm}$. Izračunajte potencijal između njih u točki gdje je jakost električnog polja nula.

[Rj: $\varphi = 4\,146 \text{ V}$.]

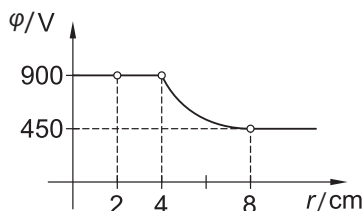
32) Izračunajte naboj ako je potencijal na udaljenosti 80 cm od tog naboja jednak 55 V .

[Rj: $Q = 4,9 \text{ nC}$.]

33) Dva točkasta naboja $Q_1 = 400 \text{ nC}$ i $Q_2 = 240 \text{ nC}$ nalaze se u zraku na udaljenosti $r_1 = 3 \text{ m}$. Koliki rad treba uložiti da se približe na udaljenost $r_2 = 1,5 \text{ m}$?

[Rj: $W = 0,288 \text{ mJ}$.]

34) Metalna kugla polumjera $r = 4 \text{ cm}$ se nalazi u zraku i nabijena je nabojem $Q = 4 \text{ nC}$. Izračunajte potencijal: a) u sredini kugle, b) na udaljenosti 2 cm , c) na površini kugle i d) na udaljenosti 8 cm . Nacrtajte dijagram ovisnosti potencijala o udaljenosti.



[Rj: $\varphi_1 = 900 \text{ V}$, $\varphi_2 = 900 \text{ V}$, $\varphi_3 = 900 \text{ V}$, $\varphi_4 = 450 \text{ V}$.]