

1.

Osnovni pojmovi o elektricitetu

1.0. Uvod

U ljetnim olujnim danima nastaju žestoke munje, koje imaju razornu moć. Svatko se zapita odakle munji ta energija. To su pitanje ljudi postavljali stoljećima. Danas znamo da munja nastaje kao posljedica nagomilanog električnog naboja u oblacima. Njezina energija i sila vezane su uz količinu nagomilanog električnog naboja. Zbog te činjenice prvo ćemo proučiti svojstva električnih naboja, a zatim i kako se naboj može “proizvesti” i korisno upotrijebiti. Prije toga ćemo se ukratko osvrnuti na povijesne spoznaje o elektricitetu.

Starogrčki filozog *Tales* je oko 600 godina prije nove ere zapisao da jantar natrljan krznom privlači lake predmete kao što su kosa, vuna i slično. Tek je 1600. godine engleski liječnik *William Gilbert* zapazio da i neka druga tijela trljanjem dobivaju ista svojstva. Budući da se jantar na starogrčkom jeziku zove **elektron**, Gilbert je rekao da se tijelo trljanjem naelektriziralo. Otuda i proizlaze svi nazivi u elektrotehnici. Tek u drugoj polovici 18. stoljeća došlo se do spoznaje da postoje dvije vrste naboja. Američki fizičar *Benjamin Franklin* (1706. – 1790.) je bez ikakvog posebnog razloga nazvao elektricitet na staklenom štapu pozitivnim, a na ebonitu negativnim.

1.1. Električni naboj

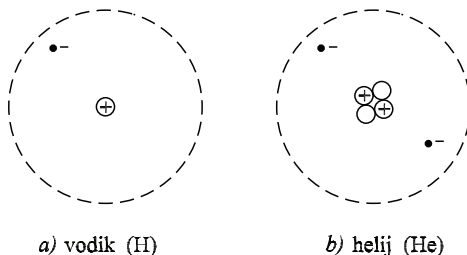
Danas se zna da je tvar sastavljena od sitnih, oku nevidljivih čestica zvanih atomi. U prirodi oko nas postoji 90 vrsta atoma koji se međusobno razlikuju po svojoj unutarnjoj građi i nekim drugim osobinama. Atom se sastoji od jezgre i elektrona, a jezgra se sastoji od protona i neutrona koji imaju svoju masu (sl. 1.1).

Promjer atoma je oko 10^{-10} m, jezgre oko 10^{-14} m, a elektrona oko 10^{-15} m. Masa elektrona je $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg, protona $m_p = 1.674 \cdot 10^{-27}$ kg, a neutrona $m_n = 1.674 \cdot 10^{-27}$ kg. Osim mase, svaki proton sadrži pozitivan tzv.

elementarni električni naboj, a elektron negativan elementarni naboj. Količina tih elementarnih naboja je jednaka i iznosi

$$e_0 = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C (kulona) } .$$

Jedinica za mjerenje količine naboja je kulon, a označava se velikim slovom C. Iz praktičnih je razloga za elementarni naboj elektrona i protona izabrana tako mala jedinica.

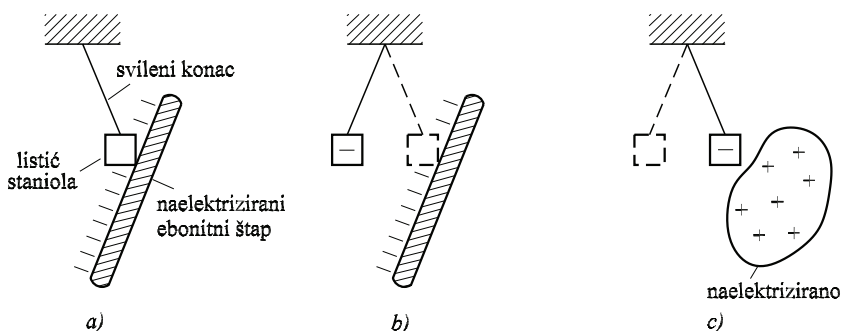


Sl. 1.1. Shematski prikaz građe atoma: a) vodika; b) helija

Najjednostavniji je atom vodika (H), koji ima jedan elektron, a u jezgri jedan proton (sl. 1.1a). Sljedeći element je helij (He), koji ima dva elektrona, a u jezgri dva protona i dva neutrona (sl. 1.1b). Ostali elementi imaju veći broj elektrona i isto toliko protona, ali ne i neutrona. Svi ti elektroni kruže oko jezgre u koncentričnim orbitama. Svaka orbita sadrži strogo određen broj elektrona. Vanjska ili zadnja orbita zove se **valentna orbita**, a pripadajući elektroni **valentni elektroni**. Valentni elektroni određuju električna svojstva svakog elementa, jer samo oni pod određenim uvjetima mogu napustiti matični atom. Zbog toga što ima isti broj elektrona i protona, atom je električki neutralan prema okolini.

Neko električki neutralno tijelo postane naelektrizirano ako ga napusti određeni broj elektrona ili ako primi elektrone s drugog tijela. U to se možemo lako uvjeriti sljedećim **Pokusom**. Trljanjem štapa od ebonita (vrsta tvrde gume) krznom oba tijela će se naelektrizirati, istom količinom, ali suprotnih naboja. Oba će tijela privlačiti komadiće stiropora koji se priljubi uz naelektrizirano tijelo. Ako zatim naelektriziranim štapom dodirnemo listić od staniola koji visi na svilenoj niti (sl. 1.2a), nakon toga će se taj listić od staniola odbijati od naelektriziranog štapa (sl. 1.2b), ali će ga privlačiti naelektrizirano krzno (slika 1.2c). Što se dogodilo nakon dodira štapa i staniola? Dio negativnih elektrona sa štapa prešao je na staniol koji je **vodič**, za razliku od stiropora koji je **izolator**. Odatle zaključujemo **da se istoimeni naboji odbijaju, a raznoimeni privlače**.

Također možemo zaključiti da se neko tijelo od izolatora može naelektrizirati trenjem (trljanjem), a neko tijelo od vodiča dodirrom. Do istog zaključka došli bismo ako bismo stakleni štap trljali lanenom krpom. Eksperimentom bismo utvrdili da naelektrizirani štap ima suprotan naboj od naelektriziranog ebonitnog štapa. Dokazano je da je stakleni štap trljanjem izgubio elektrone, pa je na njemu ostao višak pozitivnog naboja.



Sl. 1.2. Sile naelektriziranog tijela na listić staniola: a) dodir listića staniola s naelektriziranim ebonitnim štapom; b) naelektrizirani listić se odbija od naelektriziranog štapa; c) naelektrizirani listić privlači naelektrizirano krzno

Poznato je da se u nekim tvorničkim pogonima trenjem stvara električni naboj, npr., ako kroz plastične cijevi teče nafta, suha pšenica, lijekovi (tablete) itd. Zbog toga u takvim pogonima dolazi do požara ako nema dobre zaštite. Većina nas je osjetila električni naboj u vidu peckanja pri izlasku iz automobila ako smo na sebi imali odjeću od sintetike. Ako na isti automobil stavimo metalnu traku koja dodiruje zemlju, tada nećemo osjetiti peckanje pri izlasku. Što se dogodilo? Metalna traka je sprovela elektricitet u zemlju. Zbog toga se takvi materijali zovu **vodiči**, a automobilske gume, kao i ebonitni i stakleni štap, zovu se **izolatori**.

Smatra se da se električni naboj pojavljuje na tijelima kao višekratnik elementarnog naboja, tj.

$$Q = ne_0.$$

Svako naelektrizirano tijelo djeluje silom na sitne predmete kao što su stiropor, kosa, papir i slično. Ta sila potječe od viška električnog naboja na tom tijelu.

Primjer 1.1. *Koliko elektrona ima naboj od $Q = 1 \text{ C}$?*

Rješenje. $n = \frac{Q}{e_0} = \frac{1 \text{ C}}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 6.25 \cdot 10^{18}$ elektrona. Dakle, ogroman broj elektrona.

1.2. Vodiči i dielektrici

U električnom pogledu materijali se mogu podijeliti na vodiče i dielekt-ri-ke. Za električne pojave najveću ulogu imaju valentni elektroni, tj. elektroni u posljednjoj ljusci atoma, koja može biti i nepopunjena. Kod nepopunjene valentne ljuske elektroni se mogu pomicati na njezine slobodne putanje. Veza takvih elektrona s jezgrom je slaba. Pod djelovanjem vanjskih sila ti se elektroni lako odvajaju od svog atoma i mogu se slobodno kretati u krutim tvarima, od atoma do atoma.

Takvi se elektroni zovu **slobodni elektroni** ili **elektroni vodljivosti**. Smatra se da u metalima na svaki atom dolazi po jedan slobodni elektron. Tako, npr., u kubnom metru (m^3) ima oko 10^{29} atoma, a isto toliko i slobodnih elektrona. Materijali koji imaju tako velik broj slobodnih elektrona zovu se **vodiči**. Pod djelovanjem i najmanjih električnih sila slobodni elektroni se počinju kretati u smjeru tih sila. Najbolji vodiči su metali: srebro, bakar, aluminij itd.

Za razliku od vodiča, kod dielektrika postoji mnogo manji broj slobodnih elektrona. Kod dielektrika su elektroni čvrsto vezani za atome pa je za njih karakteristična tzv. **polarizacija** atoma i molekula, o čemu će detaljnije biti govora kasnije. Dielektrici mogu biti krute, tekuće i plinovite tvari. Posebnu grupu dielektrika čine **izolatori**, koji imaju mnogo puta manji broj slobodnih elektrona nego vodiči.

U tekućinama se neutralne molekule raspadaju na tzv. pozitivne i negativne ione. Pod utjecajem električnih sila ti ioni počinju se kretati u smjeru tih sila.

Ioni postoje i u plinovima, koji se također usmjereno kreću u smjeru električnih sila. U nekim plinovima nema iona, pa ne može doći do takvog kretanja čestica plina pod djelovanjem električnih sila. Takvi plinovi ponašaju se kao dobri izolatori.

Kruta tijela koja imaju manje od 10^{10} slobodnih elektrona u prostornom metru spadaju u izolatore. Što je broj slobodnih elektrona manji, materijal je bolji izolator. Izolatori su, npr., plastika, porculan, guma, staklo, zrak, papir i sl.

Kod poluvodiča se broj slobodnih elektrona kreće od 10^{12} do 10^{20} u prostornom metru.

Za razliku od izolatora, vodiči se ne mogu naelektrizirati trljanjem, već samo dodirom.

1.3. Mjerne jedinice

U elektrotehnici je prihvaćen sustav jedinica koji nosi naziv MKSA. Taj naziv dobiven je po početnim slovima četiriju osnovnih jedinica: **metar, kilogram, sekunda i amper**, čije su vrijednosti usvojene dogovorom. Taj je sustav dio potpunog internacionalnog sustava jedinica čija je službena skraćenica SI, prema početnim slovima francuskog izraza *Système International*.

U elektrotehnici se upotrebljavaju razne fizikalne veličine, kao što su sila, snaga, brzina, ubrzanje, itd. Prve tri od navedenih jedinica upotrebljavaju se u mehanici, a kao četvrta je definirana električna jedinica za jakost struje. Iz tih četiriju osnovnih jedinica izvode se ostale jedinice, kako u mehanici, tako i u elektrotehnici. Izvedene jedinice koje se upotrebljavaju u elektrotehnici objasniti ćemo u postupku uvođenja određenih fizikalnih veličina i zakona. Jednu smo takvu jedinicu već upotrijebili: jedinica za količinu električnog naboja je kulon (C), čija

je dimenzija

$$1 \text{ C (kulon)} = 1 \text{ As (ampersekunda)} .$$

Za napon se koristi jedinica volt (V).

Tablica 1.1.

veličina	oznaka veličine	jedinica
duljina	s, l, d	metar (m)
vrijeme	t	sekunda (s)
masa	m	kilogram (kg)
površina	S	kvadratni metar (m^2)
volumen	V	kubni metar (m^3)
brzina	v	metar u sekundi (m/s)
akceleracija	a	metar u sekundi na kvadrat (m/s^2)
sila	F	njutn (N)
energija i rad	W, A	džul (J)
snaga	P	vat (W)

Jedinice koje se upotrebljavaju u mehanici bit će definirane u predmetu fizika. Stoga ćemo mi samo navesti neke jedinice u kojima se mjere određene fizikalne veličine. Tako se, npr., masa mjeri u kilogramima (kg), dužina u metrima (m), a vrijeme u sekundama (s). U tablici 1.1. su uz osnovne navedene i još neke izvedene jedinice iz mehanike, koje se koriste i u elektrotehnici.

Pored četiriju navedenih osnovnih jedinica (m, kg, s, A), SI sustav ima još tri osnovne jedinice: za temperaturu **kelvin** (K), za intenzitet svjetlosti **kandela** (cd) i za množinu tvari **mol** (mol).

Uz ove jedinice MKSA sustav dopušta korištenje i nekoliko izvedenih jedinica, poput litre (l), $1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3 = 1 \text{ dm}^3$.

U elektrotehnici se često susreću razne fizikalne jedinice čije su brojčane vrijednosti mnogo manje ili mnogo veće od jedinice kojom se mjeri. Zbog toga su uvedene pomoćne jedinice koje se razlikuju od osnovnih jedinica za faktor 10^n , a n je cijeli broj (pozitivan ili negativan). Te pomoćne jedinice imaju isto ime, samo se uz naziv osnovne jedinice dodaje određeni prefiks, kako je prikazano u sljedećoj tablici (tablica 1.2.).

Tablica 1.2.

n	10^n	prefiks (i njegova skraćenica)	primjer
-18	10^{-18}	ato (a)	aJ = 10^{-18} J
-15	10^{-15}	femto (f)	fm = 10^{-15} m
-12	10^{-12}	piko (p)	pJ = 10^{-12} J
-9	10^{-9}	nano (n)	ns = 10^{-9} s
-6	10^{-6}	mikro (μ)	μ m = 10^{-6} m
-3	10^{-3}	mili (m)	mV = 10^{-3} V
-2	10^{-2}	centi (c)	cm = 10^{-2} m
-1	10^{-1}	deci (d)	dl = 10^{-1} l
1	10^1	deka (da)	dag = 10 g
2	10^2	hekto (h)	hl = 10^2 l
3	10^3	kilo (k)	kV = 10^3 V
6	10^6	mega (M)	MW = 10^6 W
9	10^9	giga (G)	GJ = 10^9 J
12	10^{12}	tera (T)	TW = 10^{12} W
15	10^{15}	peta (P)	Ps = 10^{15} s
18	10^{18}	eksa (E)	Em = 10^{18} m

Provjerite svoje znanje 1.1. — 1.3.

Pitanja

- 1.1. Što znate o naelektriziranosti tijela i vrsti naboja?
- 1.2. Što znate o građi atoma?
- 1.3. Što je elementarni naboj?
- 1.4. Od čega se sastoji atomska ljuska?
- 1.5. Što su valentni elektroni?
- 1.6. Što sadrže elektron, proton i neutron?
- 1.7. Koja je jedinica za količinu naboja?
- 1.8. Koliki je iznos elementarnog naboja?
- 1.9. Koja su svojstva električnih naboja?

- 1.10. Može li se naboj uništiti?
- 1.11. Kada je tijelo naelektrizirano?
- 1.12. Kada je tijelo električki neutralno?
- 1.13. Kako se naelektrizira ebonitni štap?
- 1.14. Kakve su sile između istoimenih, a kakve između raznoimenih naboja?
- 1.15. Koja su svojstva vodiča, a koja dielektrika?
- 1.16. Može li elektronski naboj izazvati požar?
- 1.17. Kako se električni naboj pojavljuje u naelektriziranim tijelima?
- 1.18. Koje su osnovne jedinice SI sustava?
- 1.19. Koje izvedene jedinice poznajete?
- 1.20. Što znate o pomoćnim jedinicama?

Zadaci za vježbu

- 1.1. Kolika je količina naboja na naelektriziranom tijelu koje sadrži 10000 elektrona viška?
- 1.2. Koliko elektrona ima u skupu naboja od $Q = 1 \text{ mC}$?
- 1.3. Koliko protona ima količina naboja $Q = 300 \text{ mC}$?
- 1.4. Kolika je ukupna masa elektrona iz zadatka 1.2.?
- 1.5. Kolika je ukupna masa protona iz zadatka 1.4.?

1.4. Coulombov zakon

Prva istraživanja zakona sile između dvaju naelektriziranih tijela izveo je francuski fizičar *Charles Augustin Coulomb* 1784. i 1785. godine. Pomoću torzijske vage on je mjerio sile između dvaju naelektriziranih tijela čije su dimenzije mnogo manje od njihovog razmaka.

Zbog toga se ta dva naboja mogu promatrati kao točkasti naboji. Budući da tijela miruju, naboji se zovu **statički** (mirni) naboji.

Coulomb je došao do zaključka da dva istoimena točkasta naboja među sobom djeluju odbojnom (sl. 1.3a), a dva raznoimena privlačnom silom (sl. 1.3b), koja je proporcionalna produktu naboja Q_1 i Q_2 , a obrnuto proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti r^2 (sl. 1.3). **Sila na svaki naboj je ista**, tj. $F_{12} = F_{21} = F$ i iznosi

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

gdje se sila mjeri u njutnima (N), naboj u kulonima (C), razmak u metrima (m), a k je konstanta proporcionalnosti, koja je jednaka

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9, \quad \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}.$$

Konstanta

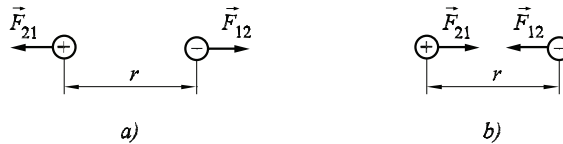
$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \left(\frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} = \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \right)$$

zove se **apsolutna permitivnost vakuuma**, a konstanta ϵ_r zove se **relativna permitivnost** ili **relativna dielektrična konstanta**, koja za vakuum iznosi 1, za zrak $\epsilon_r = 1.0006$ (približno 1), a za morsku vodu $\epsilon_r = 81$ itd.

Permeabilnost ili dielektričnost je svojstvo dielektrika koje određuje električnu popustljivost dielektrika.

Sila u dielektriku čija je relativna permitivnost ϵ_r bit će za ϵ_r manja nego u vakuumu.

Smjerovi sila na naboje ovise o predznacima naboja Q_1 i Q_2 . Ako su oba naboja pozitivna (+) ili negativna (-), sile su odbojne (sl. 1.3a), a ako je jedan naboj pozitivan (+), a drugi negativan (-), tada je sila privlačna (sl. 1.3b).



Sl. 1.3. Coulombove sile između dvaju točkastih naboja: a) istoimenih; b) raznoimenih

Sile između dvaju naboja djeluju na pravcu koji spaja ta dva naboja, a smjer ovisi o predznaku naboja (sl. 1.3). One su jednake po iznosu $F_{12} = F_{21} = F$, ali su suprotnih smjerova. **Fizikalna veličina koja ima iznos i smjer zove se vektorska veličina i označava se strelicom iznad odgovarajuće veličine, npr. \vec{F}_{12} .**

Na slici 1.3 a i b nacrtani su stvarni smjerovi sila.

U okolnom prostoru oko električnog naboja stvara se posebno stanje koje se manifestira silom na uneseni naboj u taj prostor. To posebno stanje zove se **električno polje**. Sile u električnom polju mogu biti vrlo velike, tako da mogu rascijepiti ogromno stablo pri udaru groma.

Primjer 1.2. *Odredite iznos i smjer sila u vakuumu između naboja $Q_1 = 2 \text{ nC}$ i $Q_2 = 6 \text{ nC}$, koji su razmaknuti na udaljenosti:*

- a) $r_1 = 1 \text{ m}$; b) $r_2 = 2 \text{ m}$; c) $r_3 = 3 \text{ m}$; d) $r_4 = 4 \text{ m}$.

Rješenje. Sile su odbojne (slika 1.3), jer su naboji istoimeni.

Iznosi sila su:

$$a) F_a = F_{12} = F_{21} = \frac{k Q_1 Q_2}{\epsilon_r r_1^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-9} \cdot 6 \cdot 10^{-9}}{1^2} = 108 \cdot 10^{-9} \text{ N} = 108 \text{ nN};$$

$$b) F_b = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-9} \cdot 6 \cdot 10^{-9}}{2^2} = 27 \text{ nN};$$

$$c) F_c = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-9} \cdot 6 \cdot 10^{-9}}{3^2} = 12 \text{ nN};$$

$$d) F_d = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-9} \cdot 6 \cdot 10^{-9}}{4^2} = 6.75 \text{ nN}.$$

Uočite da je sila F_b četiri puta manja od sile F_a , jer je razmak $r_2 = 2r_1$ dva puta veći. Isto tako na razmak $r_3 = 3r_1$ sila F_c je devet puta manja od sile F_a ($F_c = \frac{F_a}{9}$).

Primjer 1.3. U dielektriku $\epsilon_r = 4$ nalaze se dva naboja, $Q_1 = 5 \text{ nC}$ i $Q_2 = -2 \text{ nC}$ na razmaku $d = 10 \text{ cm}$. Odredite iznos i smjer sile na naboje.

Rješenje. Sile su privlačne (slika 1.3). Razmak d treba izraziti u metrima, pa je

$$d = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m} = 10^{-1} \text{ m}.$$

Budući da smo odredili smjer sile na svaki naboj, nije potrebno uvrštavati predznake naboja u formulu za silu, već apsolutnu vrijednost naboja

$$F = k \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2} = \frac{9 \cdot 10^{-9}}{4} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{(10^{-1})^2} = 0.25 \text{ N}.$$

Primjer 1.4. Koliki je razmak potreban u vakuumu između naboja Q_1 i Q_2 iz primjera 1.3 da bi sile bile jednake silama u primjeru 1.3?

Rješenje. Ako se te sile izjednače, $F_1 = F_2$, odnosno

$$\frac{k Q_1 Q_2}{\epsilon_r d_1^2} = \frac{k Q_1 Q_2}{1 d_2^2}, \text{ dobijemo da je } d_2 = \sqrt{\epsilon_r} \cdot d_1 = 2 \cdot 0.1 = 0.2 \text{ m}.$$

1.5. Električno polje

Oko svakog električnog naboja postoji posebno uzbuđeno stanje, koje se zove **električno polje** E . Prisutnost električnog polja može se utvrditi tako da se u taj prostor unese neki probni naboj Q_0 . Tada na probni naboj Q_0 djeluje sila čiji je iznos

$$F = Q_0 E,$$

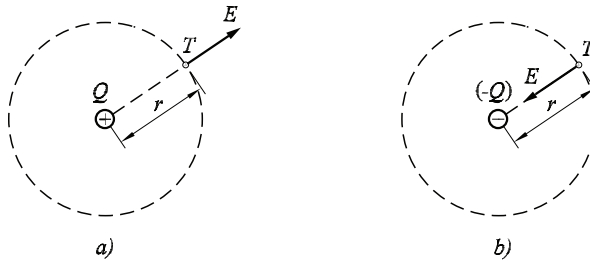
a E je iznos ili jakost električnog polja, **koje se mjeri u V/m (voltima po metru)**. Električno polje E je vektorska veličina kao i sila. Smjer sile na probni naboj ovisi o smjeru vektora električnog polja \vec{E} i predznaku naboja Q_0 .

1.5.1. Električno polje točkastog naboja

Pomoću prethodno dane definicije polja i Coulombovog zakona može se pokazati da je jakost električnog polja na udaljenosti r od točkastog naboja Q u nekoj točki T (sl. 1.4) jednaka

$$E = \frac{k}{\epsilon_r} \cdot \frac{Q}{r^2}.$$

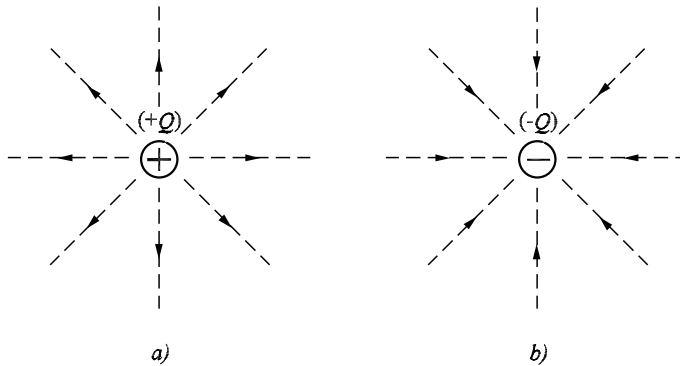
Jakost tog polja opada s kvadratom udaljenosti kao kod Coulombovih sila. To znači da će na dva puta većoj udaljenosti od ishodišta polje biti četiri puta manje.



Sl. 1.4. Električno polje točkastog naboja Q : a) pozitivnog; b) negativnog

Smjer električnog polja pozitivnog točkastog naboja je od naboja prema točki T (sl. 1.4a), a kod negativnog obratno (sl. 1.4b). Iznos tog polja na zamišljenoj kugli polumjera r svuda je isti, samo se smjer polja mijenja.

Električno polje slikovito se prikazuje pomoću **električnih silnica** (sl. 1.5). Iz pozitivnog naboja silnice izlaze radialno na sve strane jednako (sl. 1.5a), a kod negativnog ulaze u naboj (sl. 1.5b).

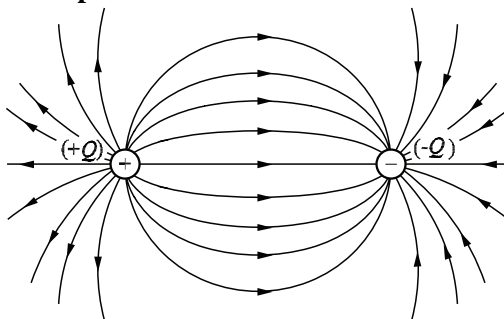


Sl. 1.5. Silnice električnog polja točkastog naboja: a) pozitivnog; b) negativnog

Gustoća silnica ovisi o jakosti električnog polja, pa je gustoća silnica veća u blizini naboja (Q), jer je tu i jakost polja veća (sl. 1.5).

Ako u prostoru postoji više naboja, onda se električno polje u nekoj točki dobije vektorskim zbrajanjem, a silnice se spajaju tako da se nikada ne sijeku. Silnica električnog polja je zamišljena linija po kojoj bi se gibao probni naboj Q_0 ako se unese u električno polje. Jakost električnog polja duž neke silnice ne mora biti konstantna. Tako, npr., kod dvaju točkastih naboja istih iznosa i suprotnih polariteta silnice izviru iz pozitivnog naboja ($+Q$) i sve poniru u negativni naboj ($-Q$) (sl. 1.6). Ni na jednoj silnici električno polje nije konstantno, a najveće je duž najkraće silnice. Najveća jakost polja je uz same naboje i postupno opada s udaljavanjem od naboja.

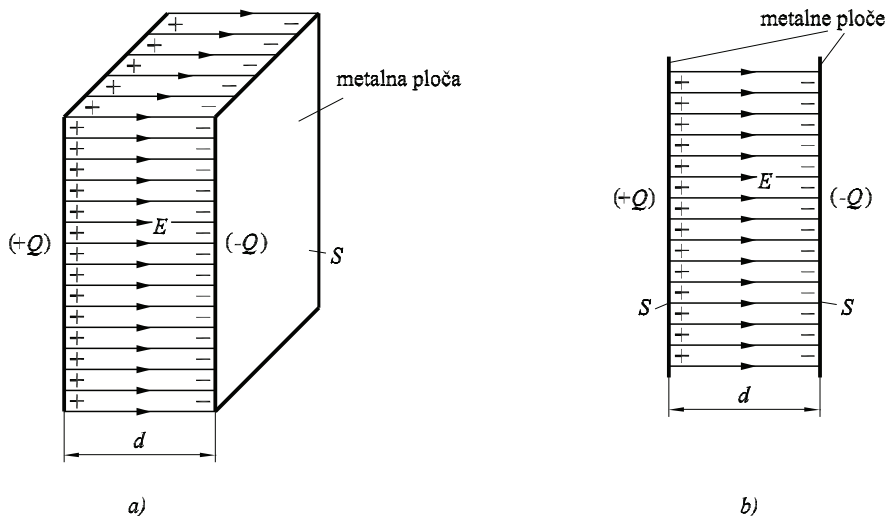
Dva jednaka suprotno naelektrizirana naboja na malom razmaku čine sustav koji se zove **električni dipol**.



Sl. 1.6. Silnice dvaju točkastih naboja istih iznosa i suprotnih predznaka (električni dipol)

1.5.2. Homogeno električno polje

Vrlo zanimljivo električno polje dobije se ako se dvije paralelne ploče naelektriziraju suprotnim nabojima (sl. 1.7). Takav se slučaj u praksi ostvaruje ako su ploče metalne. Ukupni naboj se na svakoj ploči raspodijeli se jednoliko po njezinoj površini.



Sl. 1.7. Homogeno električno polje između naelektriziranih metalnih paralelnih ploča: a) trodimenzionalni prikaz; b) dvodimenzionalni prikaz

Između suprotno naelektriziranih paralelnih metalnih ploča uspostavljeno je električno polje čije su silnice paralelne, a jakost polja konstantna duž svake silnice i iznosi

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_r S}$$

Opisano polje između ploča zove se **homogeno električno polje**. Zbog suprotno naelektriziranih električnih ploča između njih djeluju privlačne sile iznosa

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{\epsilon_0 \epsilon_r S}.$$

Treba istaći da tamo gdje postoje sile, postoji i energija, o čemu će biti više govora u sljedećoj točki.

Primjer 1.5. *Izračunajte jakost električnog polja na udaljenosti $r = 50$ cm od naboja $Q = 25$ nC u zraku.*

Rješenje. U zraku je $\epsilon_r = 1$, a udaljenost se mora pretvoriti u metre $r = 50$ cm = 0.5 m.

Traženo polje iznosi

$$E = \frac{k}{\epsilon_r} \cdot \frac{Q}{r} = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{25 \cdot 10^{-9}}{0.5^2} = 900 \text{ V/m}.$$

Primjer 1.6. *Ako se na udaljenost $r = 50$ cm od naboja $Q = 25$ nC iz prethodnog primjera unese probni naboj $Q_0 = 5$ nC, odredite silu na taj naboj.*

Rješenje. Tražena sila iznosi

$$F = Q_0 E = 5 \cdot 10^{-9} \cdot 900 = 4.5 \cdot 10^{-6} \text{ N} = 4.5 \text{ } \mu\text{N}.$$

Sila je odbojna, tj. teži da se naboj Q_0 udalji od naboja Q .

Primjer 1.7. *Dvije suprotno naelektrizirane metalne ploče (sl. 1.7) naelektrizirane su nabojem $Q = 88.54$ nC. Ploče su površine $S = 100$ cm², razmaknute su za $d = 2$ mm, i između njih se nalazi zrak. Odredite jakost električnog polja između ploča.*

Rješenje. Prvo treba kvadratne centimetre pretvoriti u kvadratne metre:

$$S = 100 \text{ cm}^2 = 100 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 10^{-2} \text{ m}^2.$$

Traženo polje iznosi

$$E = \frac{Q}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S} = \frac{88.54 \cdot 10^{-9}}{1 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2}} = 10^6 \text{ V/m}.$$

Do proboja u zraku dolazi kod električnog polja $E = 3 \cdot 10^6$ V/m, što znači da ovdje neće doći do proboja.

Primjer 1.8. *Odredite iznos sile na svaku ploču iz primjera 1.7.*

Rješenje. Sila iznosi

$$F = \frac{Q^2}{2\epsilon_r \epsilon_0 S} = \frac{(88.54 \cdot 10^{-9})^2}{2 \cdot 1 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}} = 44.27 \cdot 10^{-6} \text{ N}.$$

Sila je vrlo mala jer je količina naboja mala.

Primjer 1.9. Koliki je iznos električnog polja između dviju suprotno naelektriziranih ploča (slika 1.7)? Zadano je: $Q = 18 \text{ pC}$, $S = 2 \text{ cm}^2$, $\epsilon_r = 1$.

Rješenje. Gustoća naboja na pločama iznosi:

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{18 \cdot 10^{-12} \text{ C}}{2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 9 \cdot 10^{-9} \text{ C/m}^2.$$

Traženo električno polje iznosi:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{9 \cdot 10^{-8} \text{ As/m}}{8.854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}} = 10.16 \cdot 10^3 \text{ V/m} = 10.16 \text{ kV/m}.$$

Provjerite svoje znanje 1.4. i 1.5.

Pitanja

- 1.21. Objasnite Coulombov zakon.
- 1.22. Što je permitivnost?
- 1.23. Što je apsolutna permitivnost vakuumu?
- 1.24. Što je relativna permitivnost?
- 1.25. Kakve sile djeluju između dvaju negativnih naboja?
- 1.26. Za koliko se puta promijeni sila ako se razmak između naboja poveća dva puta?
- 1.27. Za koliko se promijeni sila ako se svaki naboj poveća dva puta, a razmak smanji dva puta?
- 1.28. Što je električno polje i kako se definira?
- 1.29. Kolika je jakost električnog polja točkastog naboja na udaljenosti r ?
- 1.30. U kojem smjeru djeluje električno polje točkastog naboja?
- 1.31. Koja je jedinica za jakost električnog polja?
- 1.32. Što su silnice električnog polja?
- 1.33. Kakvo je elektrostatsko polje?
- 1.34. Kakvo je polje u dijelu gdje je gustoća silnica veća?
- 1.35. Ako je u nekoj točki poznata jakost električnog polja, kako se računa sila na naboj Q_0 koji se unese u tu točku?
- 1.36. Kako se određuje polje više naboja?
- 1.37. Koje polje nazivamo nehomogenim?
- 1.38. Kakvo je polje između dviju paralelnih ploča velike površine ako je pložna gustoća naboja $\sigma = \text{konst.}$?

Zadaci za vježbu

- 1.6. Kolike sile djeluju između dvaju točkastih naboja $Q_1 = 5 \mu\text{C}$ i $Q_2 = -2 \mu\text{C}$, razmaknutih na udaljenosti $r = 2 \text{ cm}$, $\epsilon_r = 1$? Kakve su to sile?
- 1.7. Kolika je sila između naboja u zadatku 1.6. ako se razmak između naboja poveća dva puta?
- 1.8. Kolika je sila u zadatku 1.7. ako se oko naboja nalazi dielektrik dielektričnosti $\epsilon_r = 2$?
- 1.9. Koliki bi trebao biti razmak u primjeru 1.7. da sila ostane ista uz uvjet da je $\epsilon_r = 4$?
- 1.10. Između dvaju jednakih naboja na razmaku $d = 1 \text{ m}$ i $\epsilon_r = 1$ djeluje odbojna sila $F = 0.1 \text{ N}$. Koliki je iznos naboja? Koliki bi bio iznos naboja da se sile privlače?
- 1.11. Između dvaju naboja na razmaku $d = 1.5 \text{ m}$ i $\epsilon_r = 1$ djeluje privlačna sila $F = 1 \text{ N}$. Odredite naboj Q_1 ako je naboj $Q_2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ C}$.
- 1.12. Odredite ϵ_r ako je između dvaju naboja $Q_1 = 1 \text{ nC}$ i $Q_2 = 1 \mu\text{C}$ na razmaku $r = 3 \text{ cm}$ izmjerena sila $F = 0.2 \text{ mN}$.
- 1.13. Na udaljenosti $r = 2 \text{ cm}$ od točkastog naboja $Q = 5 \mu\text{C}$ odredite jakost polja u vakuumu.
- 1.14. Koliki je iznos naboja ako je na udaljenosti $r = 2 \text{ cm}$ izmjereno električno polje $E = 2000 \text{ V/m}$: a) u vakuumu, b) u dielektriku $\epsilon_r = 2$?

- 1.15. Odredite ϵ_r ako je naboj $Q_1 = 1 \text{ nC}$, a na udaljenosti $r = 3 \text{ cm}$ izmjerena je jakost polja $E = 2000 \text{ V/m}$.
- 1.16. Kolika je jakost polja na sredini razmaka dvaju točkastih naboja, $Q_1 = -Q_2 = 5 \mu\text{C}$, ako je razmak $r = 150 \text{ cm}$?
- 1.17. Koliko je polje na sredini razmaka između dvaju točkastih naboja, $Q_1 = Q_2 = 8 \mu\text{C}$, ako je razmak $r = 90 \text{ cm}$?
- 1.18. Kolika sila djeluje na naboj $Q_0 = 5 \mu\text{C}$ ako se unese u električno polje jakosti $E = 2000 \text{ V/m}$?
- 1.19. Dvije paralelne ploče razmaknute na $d = 1 \text{ cm}$ i površine $S = 2 \text{ m}^2$, naelektrizirane su suprotnim nabojem iznosa $Q = 3 \text{ nC}$. Ako je između ploča zrak, kolika je jakost polja između njih?
- 1.20. Kolika je sila između ploča iz zadatka 1.19.?
- 1.21. Koliko će se puta promijeniti sila u zadatku 1.20. ako je dielektrik između ploča $\epsilon_r = 3$?

1.6. Električna energija i potencijal

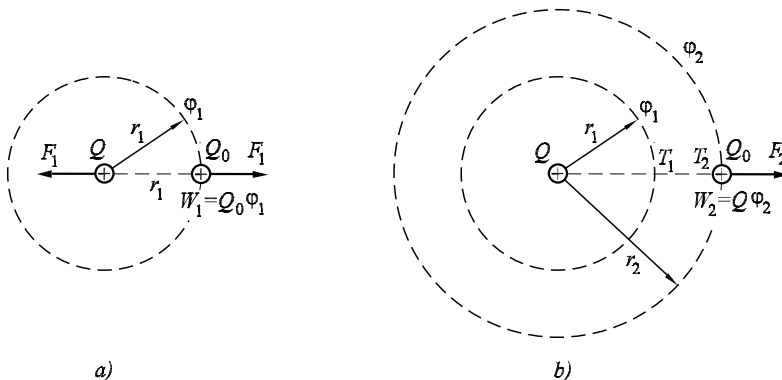
1.6.1. Energija dvaju točkastih naboja i potencijal točkastog naboja

Pokazano je da između dvaju pozitivnih naboja djeluju odbojne sile. Postojanje sile između naboja je znak da u sustavu tih naboja postoji energija. Smjer sile je takav da želi smanjiti energiju sustava. Ta energija u ovom slučaju je **potencijalna energija**, jer ovisi o međusobnom položaju tih naboja. Ona je nastala tako da je pri približavanju tih naboja izvršen rad neke druge sile na savladavanju električne sile između naboja. Sav utrošeni rad te vanjske sile je prešao u električnu potencijalnu energiju, koja u slučaju dvaju naboja na razmaku r_1 (sl. 1.8a) iznosi

$$W_1 = Q_0 \varphi_1,$$

gdje je φ_1 nova fizikalna veličina, koja se zove **električni potencijal** naboja Q na udaljenosti r_1 (sl. 1.8a) i iznosi

$$\varphi_1 = \frac{k Q}{\epsilon_r r_1}.$$



Sl. 1.8. Potencijalna energija dvaju naboja: a) na udaljenosti r_1 ; b) na udaljenosti r_2

Na zamišljenoj opisanoj kugli polumjera r_1 oko naboja Q iznos potencijala φ je svuda jednak (sl. 1.8a).

Zbog toga ćemo za površinu te kugle reći da ona predstavlja jednu **ekvipotencijalnu plohu**. Već smo rekli da stanje oko električnog naboja Q možemo opisati vektorskom veličinom koju smo nazvali električno polje, a sada konstatiramo da se to stanje može opisati i skalarnom veličinom koja se zove **električni potencijal** φ .

Zbog djelovanja sile F_1 (sl. 1.8a) naboj Q_0 se pomakne iz točke T_1 u točku T_2 (sl. 1.8b), gdje ga zaustavi neka vanjska protusila. U tom položaju energija sustava tih dvaju naboja iznosi

$$W_2 = Q_0\varphi_2,$$

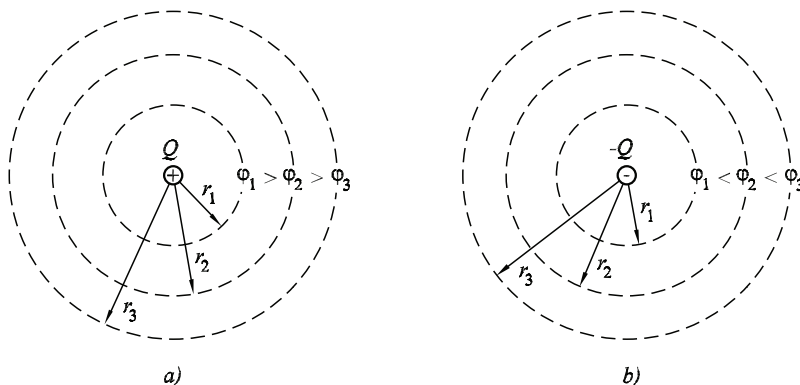
gdje je φ_2 potencijal naboja Q na udaljenosti r_2 i iznosi

$$\varphi_2 = \frac{k}{\varepsilon_r} \cdot \frac{Q}{r_2}.$$

Zamišljena kugla polumjera r_2 oko naboja Q predstavlja također ekvipotencijalnu plohu čiji je potencijal φ_2 . Energija W_2 je manja od energije W_1 točkastog naboja Q . Pitamo se kamo je nestala ta energija? Smanjenje energije je utrošeno na izvršeni rad električne sile pri prenošenju naboja Q_0 iz točke T_1 u točku T_2 i on je jednak

$$A_{12} = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Taj rad je pozitivan ($A_{12} > 0$), jer je $\varphi_1 > \varphi_2$.



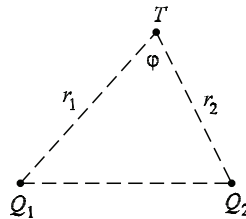
Sl. 1.9. Ekvipotencijalna ploha oko točkastog naboja: a) pozitivnog ($Q > 0$); b) negativnog ($Q < 0$)

Tako npr. ako se naboj Q_0 premjesti s udaljenosti r_1 od naboja Q pod djelovanjem električne sile na udaljenost $r_2 = 2r_1$, električna sila između naboja smanji se četiri puta, a energija sustava dva puta. Energija sustava se smanjila jer je smanjenje energije utrošeno u rad električne sile. Ako se naboj Q_0 udalji

u beskonačnost, tada je energija sustava jednaka nuli. Zbog toga se računa da je uzima, da je referentna točka za potencijalnu energiju i potencijal točkastog naboja u beskonačnosti. Za referentnu točku može se uzeti bilo koja točka u blizini naboja, ali je tada formula složena. Oko pozitivnog električnog naboja potencijal je pozitivan i opada s udaljenosti (sl. 1.9a), a oko negativnog naboja je negativan (sl. 1.9b) i negativniji je u točki bližoj naboju.

Potencijal dvaju naboja u nekoj točki (sl. 1.10) računa se tako da se potencijali oba naboja zbroje

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{k}{\varepsilon_r} \cdot \frac{Q_1}{r_1} + \frac{k_0}{\varepsilon_r} \cdot \frac{Q_2}{r_2}.$$



Sl. 1.10. Potencijal dvaju točkastih naboja u točki T

Potencijal više točkastih naboja u nekoj točki jednak je sumi potencijala tih naboja:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n = \frac{k}{\varepsilon_r} \cdot \frac{Q_1}{r_1} + \frac{k}{\varepsilon_r} \cdot \frac{Q_2}{r_2} + \dots + \frac{k}{\varepsilon_r} \cdot \frac{Q_n}{r_n}.$$

Ako imamo raspodjelu naboja na nekom naelektriziranom tijelu, tada možemo izračunati potencijal u svakoj točki oko toga tijela.

1.6.1.1. Električni napon

Razlika potencijala između dviju točaka (sl. 1.8b) zove se **napon** i označava se:

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

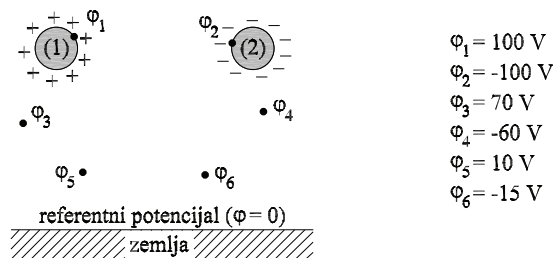
Potencijal opada u smjeru električnog polja, pa se može reći da je razlika potencijala jednaka padu napona između dviju točaka, T_1 i T_2 , odnosno ekvipotencijalnih ploha (sl. 1.8b). Treba istaći da je razlika potencijala U_{21} između točaka T_2 i T_1 istog iznosa ali suprotnog predznaka

$$U_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = -U_{12}.$$

Jedinica za mjerenje potencijala i napona je volt, oznaka V, a za rad i energiju džul, oznaka J.

Električni napon je vrlo važan pojam u elektrotehnici. Kasnije ćemo pokazati da se električni napon može proizvesti na više načina.

U praksi se najčešće za referentni potencijal iznosa nula ($\varphi = 0$) uzima tlo. Tako su npr. za dva naelektrizirana tijela iznad tla (sl. 1.11) izmjereni sljedeći potencijali u nekim točkama.



Sl. 1.11. Potencijali oko dvaju naelektriziranih tijela iznad tla

Za te točke se može reći da su to naponi prema tlu. Napon između tijela (1) i (2)

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = 100 - (-100) = 200 \text{ V},$$

dok je napon između tijela (2) i tijela (1)

$$U_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = -200 \text{ V} = -U_{12}.$$

Predznak minus (–) znači da je potencijal točke (2) na nižem potencijalu od točke (1). To je ujedno najveći napon na ovoj slici, dok su naponi između svih ostalih točaka manji u što se lako uvjeriti.

Primjer 1.10. *Odredite potencijal na udaljenosti $r = 50 \text{ cm}$ od naboja $Q = 25 \text{ nC}$ u zraku.*

Rješenje. Traženi potencijal je

$$\varphi = \frac{k}{\epsilon_r} \cdot \frac{Q}{r} = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{25 \cdot 10^{-9}}{0.5} = 450 \text{ V}.$$

Primjer 1.11. *Kolika je energija sustava dvaju naboja ako se naboju $Q = 25 \text{ nC}$ na udaljenosti $r = 50 \text{ cm}$ donese naboj $Q_0 = 5 \text{ nC}$?*

Rješenje. U primjeru 1.10. izračunali smo potencijal φ naboja Q na udaljenosti $r = 50 \text{ cm}$, pa je tražena energija

$$W = Q_0 \varphi = 5 \cdot 10^{-9} \cdot 450 \text{ V} = 2.25 \mu\text{J}.$$

Primjer 1.12. *Odredite napon koji vlada između točke udaljene $r_1 = 25 \text{ cm}$ i točke udaljene $r_2 = 100 \text{ cm}$ od naboja $Q = 25 \text{ nC}$ u zraku.*

Rješenje. Točka T_1 može biti bilo gdje na ekvipotencijalnoj kugli polumjera r_1 , a točka T_2 na ekvipotencijalnoj kugli polumjera r_2 (sl. 1.8b). Traženi napon je

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{kQ}{\epsilon_r} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 25 \cdot 10^{-9}}{1} \left(\frac{1}{0.25} - \frac{1}{1} \right) = 675 \text{ V}.$$

Primjer 1.13. Koliki rad izvrši naboj Q pri premještanju naboja $Q_0 = 5 \text{ nC}$ iz ekvipotencijalne plohe φ_1 na ekvipotencijalnu plohu φ_2 iz primjera 1.12?

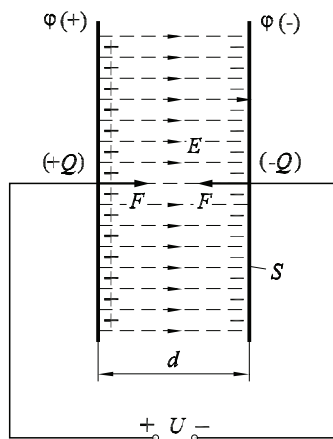
Rješenje. Traženi rad je

$$A_{12} = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = Q_0 \cdot U_{12} = 5 \cdot 10^{-9} \cdot 675 = 3.375 \mu\text{J}.$$

Za taj se iznos smanjila potencijalna energija dvaju naboja.

1.6.2. Energija i napon između dviju paralelnih metalnih suprotno naelektriziranih ploča

Utvdili smo da između paralelnih metalnih suprotno naelektriziranih ploča vlada homogeno električno polje i djeluju privlačne sile (sl. 1.12) koje teže spojiti ploče.



Sl. 1.12. Energija i napon sustava paralelnih suprotno naelektriziranih metalnih ploča

Zbog postojanja sila sustav ima potencijalnu energiju (W), koja će se sva utrošiti na rad (A) potreban da se ploče “priljube”. Poznato je da je rad A jednak produktu sile F i puta (u ovom slučaju d), pa se tim postupkom dobije da je energija sustava suprotno naelektriziranih ploča

$$W = \frac{QU}{2},$$

gdje je U napon između naelektriziranih ploča, koji iznosi

$$U = Ed.$$

Dakle, napon između ploča (U) jednak je produktu jakosti homogenog električnog polja (E) i razmaka između ploča (d). Pozitivna ploča se nalazi na potencijalu $\varphi_{(+)}$ koji je veći od potencijala negativne ploče $\varphi_{(-)}$, pa se napon može prikazati kao razlika potencijala ploča.

$$U = \varphi_{(+)} - \varphi_{(-)} = Ed.$$

Ta formula je primjenjiva i u strujnim krugovima, koje ćemo izučavati u nastavku. Na kraju možemo zaključiti da veća količina naboja na okupu ima veću potencijalnu energiju, što je evidentno kod olujnih oblaka iz kojih sijevaju snažne munje.

Primjer 1.14. *Izračunajte napon koji vlada između suprotno naelektriziranih ploča u primjeru 1.7. ako je između njih razmak $d = 2 \text{ mm}$.*

Rješenje. U primjeru 1.7. izračunali smo da između ploča vlada homogeno električno polje jakosti $E = 10^6 \text{ V/m}$, pa je traženi napon

$$U = Ed = 10^6 \text{ V/m} \cdot 0.002 \text{ m} = 2000 \text{ V}.$$

To je vrlo velik napon, puno puta veći od napona u kućnim instalacijama.

Primjer 1.15. *Odredite električnu energiju sustava iz primjera 1.14.*

Rješenje. Tražena energija je

$$W = \frac{QU}{2} = \frac{88.54 \cdot 10^{-9} \cdot 2000 \text{ V}}{2} = 88.54 \mu\text{J}.$$

Primjer 1.16. *Metalne paralelne ploče, svaka površine $S = 1000 \text{ cm}^2$ na razmaku $d = 0.5 \text{ cm}$ priključene su na napon $U = 100 \text{ V}$. Odredite energiju sustava ako je između ploča zrak ($\epsilon_r = 1$).*

Rješenje. Iz formule $U = Ed = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_r S} d$ dobijemo da je naboj na pločama

$$Q = \frac{US\epsilon_0\epsilon_r}{d} = \frac{100 \text{ V} \cdot 1000 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm} \cdot 1}{0.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 17.7 \text{ nC}.$$

Sada se može izračunati tražena energija

$$W = \frac{QU}{2} = \frac{17.7 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 100 \text{ V}}{2} = 0.885 \mu\text{J}.$$

Provjerite svoje znanje 1.6.

Pitanja

- 1.39. Kako električno polje može obavljati rad?
- 1.40. Koliki je rad dvaju točkastih naboja?
- 1.41. Na račun čega se obavlja rad u električnom polju?
- 1.42. Kakav je predznak rada električnog polja na pozitivnom, a kakav na negativnom naboju?
- 1.43. Tko je obavio rad ako je predznak negativan?
- 1.44. Kolika je potencijalna energija dvaju naboja na razmaku r ?
- 1.45. Kako se definira električni potencijal?
- 1.46. Koliki je potencijal točkastog naboja na udaljenosti r ?
- 1.47. Što je električni napon?
- 1.48. U kojem smjeru opada potencijal?
- 1.49. Kakav je potencijal oko pozitivnog, a kakav oko negativnog naboja?

- 1.50. Koja je jedinica za potencijal, a koja za napon?
- 1.51. Kako se računa potencijal više točkastih naboja?
- 1.52. Kako se određuje napon u homogenom polju?
- 1.53. Koliki je napon između paralelnih naelektriziranih ploča različitih polariteta?
- 1.54. Kolika je sila između paralelnih i naelektriziranih ploča?
- 1.55. Koliki rad mogu obaviti paralelne naelektrizirane ploče?
- 1.56. Kolika je potencijalna energija sustava naelektriziranih paralelnih ploča s različitim polaritetima?
- 1.57. Što su ekvipotencijalne plohe kod naelektriziranih ploča?

Zadaci za vježbu

- 1.22. Dva naboja, $Q_1 = 5 \text{ nC}$ i $Q_2 = -2 \text{ nC}$ nalaze se na razmaku $r_1 = 9 \text{ cm}$. Koliki je obavljen rad ako se taj razmak smanji na polovicu? Tko je izvršio rad? ($\epsilon_r = 1$).
- 1.23. Razmak između dvaju naboja iz zadatka 1.22. poveća se dva puta. Koliki je obavljeni rad i tko ga je obavio?
- 1.24. Dva naboja, $Q_1 = 5 \text{ nC}$ i $Q_2 = 2 \text{ nC}$ nalaze se na razmaku $r_1 = 9 \text{ cm}$. Koliki je izvršeni rad ako se taj razmak smanji na polovicu i tko je izvršio rad? ($\epsilon_r = 1$).
- 1.25. Odredite potencijal oko točkastog naboja $Q = 5 \text{ nC}$ na udaljenosti $d = 10 \text{ cm}$. ($\epsilon_r = 1$).
- 1.26. Koliki je potencijal iz zadatka 1.25. na udaljenosti: a) $d_1 = 2d$; b) $d_2 = \frac{d}{2}$?
- 1.27. Koliki je potencijal na udaljenosti $d = 50 \text{ cm}$ od točkastog naboja $Q = -8 \text{ nC}$? ($\epsilon_r = 1$).
- 1.28. Koliki je potencijal iz zadatka 1.27. na udaljenosti $d - 1 = 2d$? Koji je od tih dvaju potencijala veći? Kolika je razlika potencijala između tih dviju točaka?
- 1.29. Odredite potencijale na udaljenosti $r_1 = 9 \text{ cm}$ i $r_2 = 18 \text{ cm}$ oko naboja $Q = -5 \text{ nC}$ u zraku.
- 1.30. Dva naboja, $Q_1 = -Q_2 = 5 \text{ nC}$ razmaknuti su u zraku $d = 9 \text{ cm}$. Odredite točke u kojima je potencijal nula.
- 1.31. U vrhovima kvadrata stranice $a = 9 \text{ cm}$ nalaze se naboji, redom $Q_1 = 8 \text{ nC}$, $Q_2 = -2 \text{ nC}$, $Q_3 = 5 \text{ nC}$ i $Q_4 = -3 \text{ nC}$. Odredite potencijal u središtu kvadrata.
- 1.32. Koliki je rad kada se naboj $Q = -5 \mu\text{C}$ premjesti iz točke potencijala $\varphi_1 = 500 \text{ V}$ u točku potencijala $\varphi_2 = -500 \text{ V}$? Tko je izvršio rad?
- 1.33. Napon između paralelnih ploča iznosi 1000 V . Koliko je polje E i naboj Q na pločama ako je $S = 1000 \text{ cm}^2$ i $d = 1 \text{ cm}$, a $\epsilon_r = 2$?
- 1.34. Kolika je potencijalna energija u zadatku 1.33.?
- 1.35. Kolika je sila između ploča u zadatku 1.33.?
- 1.36. Koliki teret može podići sustav ploča u zadatku 1.33.?
- 1.37. Dvije paralelne ploče, svaka površine $S = 500 \text{ cm}^2$ razmaknute su na $d = 1 \text{ cm}$ i naelektrizirane suprotnim nabojima iznosa $Q = 8 \mu\text{C}$. Odredite napon između ploča ako je $\epsilon_r = 1$.
- 1.38. Kolika je potencijalna energija akumulirana na pločama u zadatku 1.37.?
- 1.39. Ako se ploče iz zadatka 1.37. razmaknu na dvostruko veću udaljenost, što se dogodilo s energijom i kolika je? Obrazložite.