

1.

Osnovni pojmovi o elektricitetu

1.0. Uvod

U olujnim ljetnim 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. Njena energija i sila vezane su uz količinu nagomilanog električnog naboja. Zbog te činjenice prvo ćemo proučiti svojstva električnih naboja, a zatim i način “proizvodnje” i korisne upotrebe. Prije toga ćemo se ukratko osvrnuti na povijesne spoznaje o elektricitetu.

Starogrčki je filozof *Thales* (tales) 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* (džilbert) 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* (frenklin) (1706. – 1790.) je bez ikakvog razloga nazvao elektricitet na staklenom štapu pozitivnim, a na ebonitu negativnim.

1.1. Električni naboj

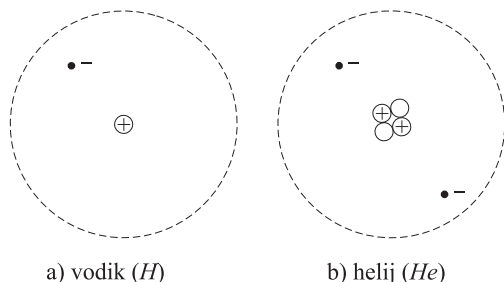
Danas se zna da je materija sastavljena od sitnih, oku nevidljivih čestica zvanih atomi. U prirodi oko nas postoji 90 vrsta atoma koji se međusobno razlikuju po svojoj unutarnjoj građi i nekim drugim osobinama. Atom se sastoji od jezgre i elektrona, a jezgra se sastoji od protona i neutrona koji imaju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

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

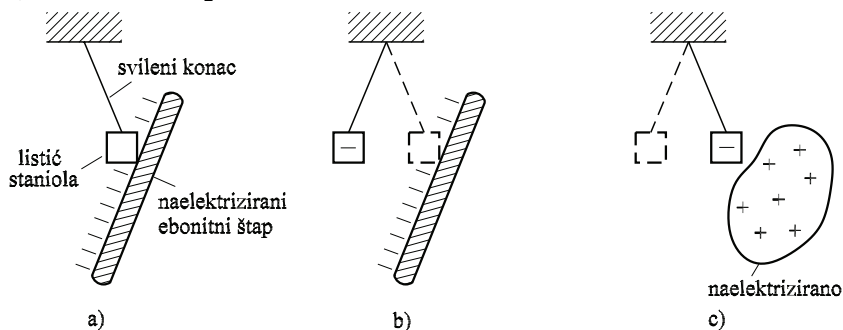
Najjednostavniji je atom vodika (H), koji ima jedan elektron a u jezgri jedan proton (*slika 1.1.a*). Sljedeći element je helij (He), koji ima dva elektrona, a u jezgri dva protona i dva neutrona (*slika 1.1.b*). Ostali elementi imaju veći broj elektrona i isto toliko protona, ali ne i neutrona. Svi ti elektroni kruže oko jezgre u koncentričnim orbitama. Svaka orbita sadrži strogo određen broj elektrona.



Slika 1.1. Shematski prikaz građe atoma vodika i helija.

Vanjska ili zadnja orbita zove se **valentna orbita**, a pripadajući elektroni se zovu **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 električno 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 štapiom dodirnemo listić od staniola koji visi na svilenom niti (*slika 1.2.a*), nakon toga će se taj listić od staniola odbijati od naelektriziranog štapa (*slika 1.2.b*), ali će ga privlačiti naelektrizirano krzno (*slika 1.2.c*). 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**.



Slika 1.2. Sile naelektriziranog tijela na kuglicu stiropora: a) dodir kuglice stiropora s naelektriziranim ebanitim štapiom; b) naelektrizirana kuglica se odbija od naelektriziranog štapa; c) naelektriziranu kuglicu privlači naelektrizirano krzno.

Također možemo zaključiti da se neko tijelo od izolatora može naelektrizirati trenjem (trljanjem), a neko tijelo od vodiča dodiranjem. 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.

Poznato je da se u nekim tvorničkim pogonima trenjem stvara električni naboj, npr. ako kroz plastične cijevi teče nafta, suha pšenica, ljekovite tablete itd. Zbog toga u takvim pogonima dolazi do požara ako nema dobre zaštite. Većina nas je osjetila električni naboj pri izlasku iz automobila ako smo na sebi imali odjeću od sintetike.

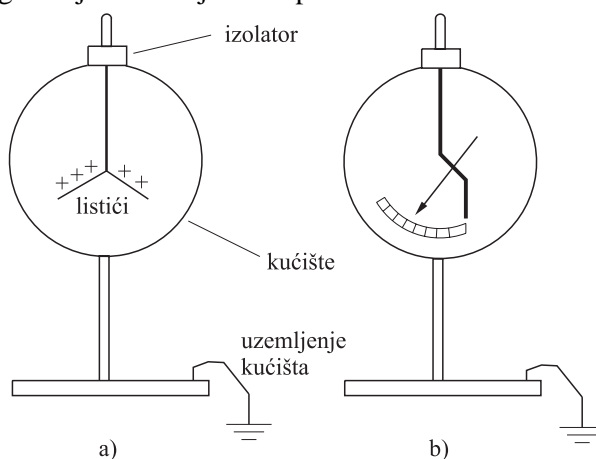
Smatra se da se električni naboj pojavljuje na tijelima kao višekratnik elementarnog naboja, tj.

$$Q = ne_0.$$

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.

Količina naboja može se mjeriti spravom koja se zove **elektrometar**, a njen se princip zasniva na radu **elektroskopa**. Elektroskop se sastoji od metalnog kućišta u obliku valjka u kojem je metalni štapić na čijem se donjem kraju nalaze dva listića od zlata ili aluminijsa (*slika 1.3.a*). Štapić je izolatorom izoliran od kućišta, npr. porculanom. Na gornjem kraju štapića nalazi se metalna pločica ili kuglica. Listići se šire kad se naelektriziranim tijelom dodiruje kuglica elektroskopa, bez obzira kojim je nabojem tijelo naelektrizirano. Ako je tijelo bilo naelektrizirano negativnim nabojem (koji se stvara u ebonitnom štapu), tada elektroni pri dodiru prelaze na kuglicu i listiće. Pritom se listići nabiju istoimenim nabojem jednakog iznosa i djeluju jedan na drugog odbojnom silom uslijed čega se listići šire. Kut između listića proporcionalan je s količinom naboja. Ako se skala elektroskopa baždari, tada takav elektroskop postaje instrument za mjerenje naboja i zove se elektrometar (*slika 1.3.b*).

Listići elektroskopa će se vratiti u početni položaj ako se kuglica elektroskopa natrlja krpom kojom je trljan štap. To pokazuje da se krpa naelektrizirala istom količinom suprotnog naboja od naboja na štapu.



Slika 1.3. a) Elektroskop; b) elektrometar.

Ponovite isti eksperiment sa staklenim štapom i objasnite pojavu. Što će se dogoditi ako se elektroskop koji je prethodno dotaknut nabijenim ebonitnim štapom dotakne nabijenim staklenim štapom?

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 dielektrike. 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 njene slobodne putanje. Veza takvih elektrona s jezgrom je slaba. Pod djelovanjem vanjskih sila ti elektroni se 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 kasnije biti detaljnije govora. 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 se ioni počinju 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 slično.

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 od početnih slova četiriju osnovnih jedinica: **metra, kilograma, sekunde i ampera**, čije su vrijednosti usvojene dogovorom. Taj je sustav dio potpunog međunarodnog sustava jedinica čija je zvanična 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 definirana je 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 jedinice	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	newton (njutn) (N)
energija i rad	W, A	joule (džul) (J)
snaga	P	watt (vat) (W)

Jedinice koje se upotrebljavaju u mehanici bit će definirane u predmetu fizika. Mi ćemo stoga 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). Uz osnovne u tablici 1.1. navedene su i još neke izvedene jedinice iz mehanike koje se koriste i u elektrotehnici.

Pored četiri navedene jedinice (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 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)	$\mu\text{m} = 10^{-6}$ 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 1.2. i 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. Čemu služi elektroskop, a čemu elektrometar?
- 1.16. Može li elektrostatski naboj izazvati požar?
- 1.17. Kako se električni naboj pojavljuje u nenaelektriziranim tijelima?
- 1.18. Što su vodiči, a što dielektrici?
- 1.19. Što su izolatori?
- 1.20. Koje su osnovne jedinice sustava SI?
- 1.21. Koje izvedene jedinice poznajete?
- 1.22. 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 je elektrona u skupu naboja od $Q = 1 \text{ mC}$?
- 1.3. Koliko je protona u količini 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* (kulon) 1784. i 1785. godine. Pomoću torzijske vage on je mjerio sile između dvaju naelektriziranih tijela čije su dimenzije mnogo manje od njihovog razmaka.

U tom se slučaju ta dva naboja mogu promatrati kao točkasti naboji. Budući da tijela miruju, naboji se zovu **statički** (mirni) naboji, jer kruženje elektrona oko jezgre ne izaziva nikakve vanjske električne efekte.

Coulomb je došao do zaključka da dva istoimena točkasta naboja među sobom djeluju odbojnom, a dva raznoimena privlačnom silom koja je proporcionalna produktu naboja Q_1 i Q_2 , a obrnuto proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti r^2 (*slika 1.4.*). **Sila na svaki naboj je ista**, tj. $F_{12} = F_{21} = F$ i iznosi

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

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

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

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.

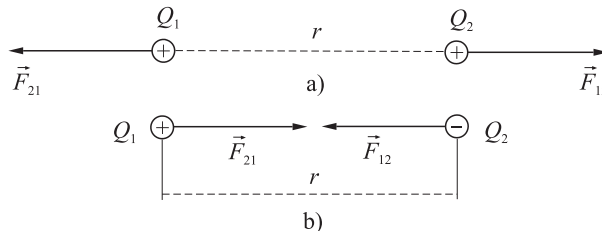
Permeabilnost ili dielektričnost je svojstvo dielektrika koje određuje električnu propustljivost dielektrika.

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

Smjerovi sila na naboje zavise o predznacima naboja Q_1 i Q_2 . Ako su oba naboja pozitivna (+) ili negativna (-), sile su odbojne (*slika 1.4.a*), a ako je jedan naboj pozitivan (+), a drugi negativan (-), tada su sile privlačne (*slika 1.4.b*).

Sile između dvaju naboja djeluju na pravcu koji spaja ta dva naboja, a smjer ovisi o predznaku naboja (*slika 1.4.*). 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 1.4. a i b nacrtani su stvarni smjerovi sila.



Slika 1.4. Coulombove sile između dvaju točkastih naboja: a) istoimenih; b) raznoimenih.

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

Primjer 1.2. *Odredite iznos i smjer sile između naboja $Q_1 = 2\text{nC}$ i $Q_2 = 4\text{nC}$ u vakuumu, 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 1.4.a*) jer su naboji istoimeni.

Iznosi sile su:

$$\text{a) } F_a = F_{12} = F_{21} = \frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{r_1^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-9} \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{0.1^2} = 108 \cdot 10^{-9} \text{N} = 108 \text{nN};$$

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

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

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

Uočite da je sila F_b četiri puta manja od sile F_a , jer je razmak $r_b = 2r_a$ dvaput veći.

Isto tako na razmak $r_c = 3r_a$ sila F_c devet je puta manja od sile F_a $\left(F_c = \frac{F_a}{9}\right)$.

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 1.4.b*). 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 da bi sile bile jednake silama u primjeru 1.3.?*

Rješenje: Iz uvjeta da sile u oba slučaja trebaju biti jednake ($F_1 = F_2$) slijedi da je

$$\frac{k}{\epsilon_r} \frac{Q_1 Q_2}{d_1^2} = \frac{k}{1} \frac{Q_1 Q_2}{d_2^2}.$$

Odatle se dobije da je $d_2 = \sqrt{\epsilon_r} \cdot d_1 = 2 \cdot 0.1 = 0.2\text{m}$.

1.4.1. Sile između više naboja *

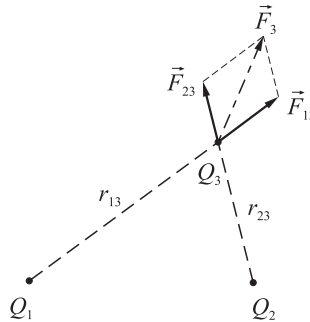
Ako u blizinu naboja Q_1 i Q_2 dovedemo treći naboj Q_3 (slika 1.5.), tada na taj naboj djeluje sila naboja Q_1 i sila naboja Q_2 . Ukupna sila \vec{F}_3 na naboj Q_3 jednaka je vektorskom zbroju tih dviju sila (slika 1.5.).

Za vektorsko zbrajanje kaže se još i geometrijsko zbrajanje, a izvodi se tako da se vektoru \vec{F}_{13} doda vektor \vec{F}_{23} .

Ista se vrijednost dobije ako se na vektor \vec{F}_{23} doda vektor \vec{F}_{13} , pa se na taj način dobije paralelogram sila, a dijagonala tog paralelograma je rezultirajuća sila \vec{F}_3 , slika 1.5.

Taj postupak je matematički složen, pa ćemo se ograničiti na dva karakteristična slučaja:

- a) sile su na istom pravcu i
- b) sile su okomite.

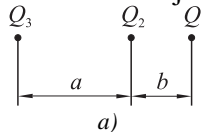


Slika 1.5. Sila na naboj Q_3 kojom djeluju naboji Q_1 i Q_2 .

Primjer 1.5. Odredite sile na svim trima nabojima koji se nalaze na istom pravcu na slici 1.6.a. Zadano: $Q_1 = 2\mu\text{C}$, $Q_2 = 5\mu\text{C}$, $Q_3 = 6\mu\text{C}$, $a = 20\text{ cm}$, $b = 10\text{ cm}$, $\epsilon_r = 1$.

Rješenje:

Prvo ćemo ucrtati stvarne sile na svaki od preostalih dvaju naboja (slika 1.6.), pa ćemo kod računanja sile uzeti apsolutne vrijednosti naboja. Zatim ćemo izračunati sve sile između pojedinih naboja, pri čemu treba uzeti da je $a = 0.2\text{ m}$ i $b = 0.1\text{ m}$.



Slika 1.6.

* Tko želi više

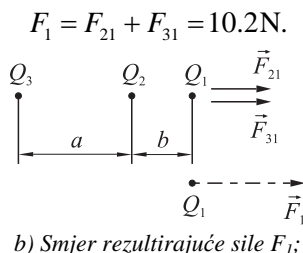
$$F_{12} = F_{21} = \frac{k}{\epsilon_r} \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{b^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{0.1^2} = 9 \text{ N};$$

$$F_{13} = F_{31} = \frac{k}{\epsilon_r} \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_3|}{(a+b)^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{0.3^2} = 1.2 \text{ N};$$

$$F_{23} = F_{23} = \frac{k}{\epsilon_r} \cdot \frac{|Q_2| \cdot |Q_3|}{a^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{0.2^2} = 6.75 \text{ N}.$$

Sada možemo računati točne sile.

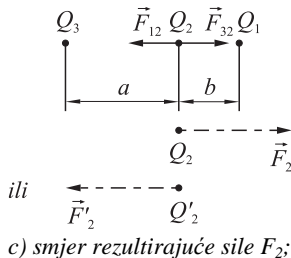
a) Sila na naboj Q_1 sastoji se od sila F_{21} i F_{31} koje djeluju u istom smjeru pa je rezultirajuća sila

$$F_1 = F_{21} + F_{31} = 10.2 \text{ N}.$$


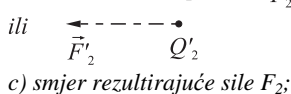
b) Smjer rezultirajuće sile F_1 ;

b) Sile na naboj Q_2 su suprotne. Ako izaberemo referentni smjer rezultirajuće sile u smjeru sile F_{32} (slika 1.6.c), tada je rezultirajuća sila

$$F_2 = F_{32} - F_{12} = 6.75 - 9 = -2.25 \text{ N}.$$



ili



c) smjer rezultirajuće sile F_2 ;

Predznak minus nam kaže da je stvarni smjer suprotan od odabranog referentnog, tj. djeluje ulijevo.

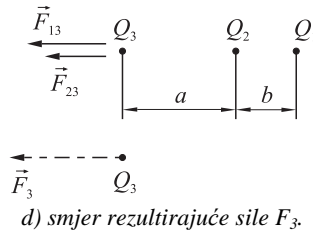
Ako izaberemo da je referentni smjer rezultirajuće sile ulijevo, tj. u smjeru sile F_{12} (slika 1.6.b), tada je

$$F'_2 = F_{12} - F_{32} = 2.25 \text{ N}.$$

Sada rezultirajuća sila djeluje u odabranom referentnom smjeru.

c) Obje sile na naboj Q_3 djeluje ulijevo pa rezultirajuća sila također djeluje ulijevo (slika 1.6.d) i jednaka je:

$$F_3 = F_{13} + F_{23} = 7.95 \text{ N}.$$

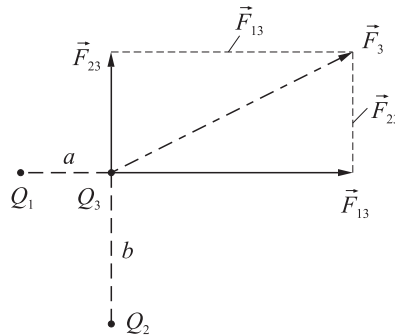


Primjer 1.6. Odredite silu na naboj Q_3 u slučaju kao na slici 1.7. Zadano: $Q_1 = 2\mu\text{C}$, $Q_2 = 5\mu\text{C}$, $Q_3 = 4\mu\text{C}$, $a = 10\text{ cm}$, $b = 20\text{ cm}$, $\epsilon_r = 1$.

Rješenje: Sile F_{13} i F_{23} koje djeluju na naboj Q_3 su okomite i iznose:

$$F_{13} = \frac{k}{\epsilon_r} \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_3|}{a^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{0.1^2} = 7.2\text{ N};$$

$$F_{23} = \frac{k}{\epsilon_r} \cdot \frac{|Q_2| \cdot |Q_3|}{b^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{1} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{0.2^2} = 4.5\text{ N}.$$



Slika 1.7.

Rezultirajuća sila je dijagonala pravokutnika što ga čine sile F_{13} i F_{23} . Primjenom Pitagorina poučka dobije se iznos rezultirajuće sile

$$F_3 = \sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2} = \sqrt{7.2^2 + 4.5^2} = 8.54\text{ N}.$$

Smjer sile ucrtan je na slici 1.7., pri čemu treba voditi računa da se sile ucrtaju u istom mjerilu, npr., 2 mm odgovara sili od 1 N.

1.5. Električno polje

1.5.1. Definicija električnog polja

Zamislimo da se u središte kugle polumjera r stavi naboj Q , a neki pokusni naboj Q_0 premješta se po površini kugle. Tada se iznos sile ne mijenja, a smjer joj ovisi o položaju naboja Q_0 na kugli (slika 1.8.a) i uvijek je usmjeren u smjeru polumjera r .