

# 4. ELEKTROMAGNETIZAM

## 4.1 ELEKTROSTATIKA

### 4.1.1 Osnovni pojmovi elektrostatičke. Kulonov zakon

Od antičkih vremena poznato je da se tela mogu naelektrisati, odnosno da im se može dovesti, i da se sa njih može odvesti naelektrisanje. Postoje dve vrste naelektrisanja, koja iz istorijskih razloga nazivamo "pozitivno" i "negativno". Najmanju količinu naelektrisanja nazivamo **elementarno naelektrisanje**. Obeležavamo elementarno naelektrisanje sa  $e$  ili  $-e$ , gde znak zavisi od vrste naelektrisanja. Tela mogu biti naelektrisana samo celobrojnim umnoškom elementarnog naelektrisanja,  $q = Ne$ . Nosioци elementarnog **negativnog** naelektrisanja su elektroni, a nosioци elementarnog pozitivnog naelektrisanja su **protoni**. Elementarna naelektrisanja različitog znaka su jednaka po svojoj apsolutnoj vrednosti. Za tela na kojima se nalaze jednake količine pozitivnog i negativnog naelektrisanja kažemo da su **elektroneutralna**. Jedinica za količinu naelektrisanja u SI sistemu naziva se **kulon** [ $C$ ], pri čemu je

$$e = 1.602 \cdot 10^{-19} C.$$

Naelektrisanja oko sebe stvaraju **električno polje**, izmenjeno stanje prostora preko kojeg se ostvaruje interakcija naelektrisanih čestica.

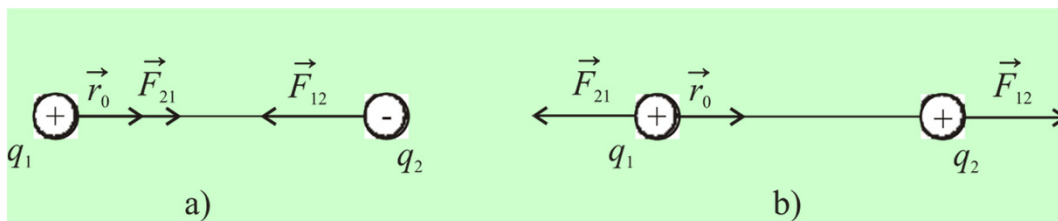
Francuski fizičar Kulon otkrio je 1785. godine zakonitost po kojoj interaguju tačkasta naelektrisanja.

- Sila kojom interaguju dva nepokretna tačkasta naelektrisanja koja se nalaze u vakuumu srazmerna je proizvodu njihovih količina naelektrisanja, a obrnuto srazmerna kvadratu njihovog međusobnog rastojanja (**Kulonov zakon**).

Kulonov zakon moguće je predstaviti u vektorskom obliku:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r}_0, \quad \epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$$

pri čemu je sa  $\vec{F}_{12}$  označena sila kojom čestica  $q_1$  deluje na česticu  $q_2$ , dok je  $\vec{r}_0$  jedinični vektor usmeren od naelektrisanja  $q_1$  ka naelektrisanju  $q_2$ .



Ilustracija interakcije: a) raznoimenih tačkastih naelektrisanja  
b) istoimenih tačkastih naelektrisanja

Ako se naelektrisanja nalaze u homogenoj supstancijalnoj sredini, Kulonov zakon ima sledeći oblik:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1q_2}{r^2} \vec{r}_0,$$

gde je dielektrična propustljivost supstancijalne sredine,  $\epsilon_r$ , veličina koja opisuje električna svojstva date sredine. Za sve supstancijalne sredine vrednost dielektrične propustljivosti  $\epsilon_r$  veća je od jedinice.

## 4.1.2 Osobine elektrostatičkog polja

Postojanje električnog polja utvrđujemo uvođenjem tzv. "probnog" naelektrisanja  $q_{pr}$  u prostor oko tela koje je izvor polja. Električno polje opisujemo veličinom koja se naziva **jačina električnog polja**, a koja je sa silom kojom naelektrisanja interaguju i sa probnim naelektrisanjem povezana sledećom relacijom:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{pr}},$$

Koristeći Kulonov zakon, iz gornjeg izraza direktno sledi da jačina električnog polja u nekoj tački zavisi samo od naelektrisanja koje je izvor polja

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{pr}q}{q_{pr}r^2} \vec{r}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{r}_0$$

Ako se u nekom delu prostora nalazi više naelektrisanja, tada će u proizvoljnoj tački prostora rezultujuća jačina električnog polja biti jednaka vektorskom zbiru jačina električnih polja koje stvaraju pojedinačna naelektrisanja, odnosno

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i.$$

### 4.1.3 Rad Kulonove sile. Potencijal električnog polja

Elementarni rad Kulonove sile pri pomeranju naelektrisanja  $q'$  u polju naelektrisanja  $q$  dat je izrazom:

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} \vec{r}_0 \cdot d\vec{l},$$

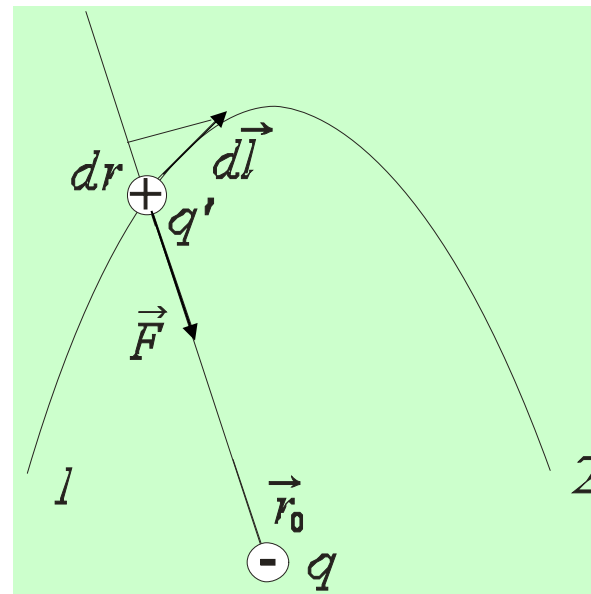
$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r_2}$$

Potencijalnu energiju naelektrisanja  $q'$  u polju naelektrisanja  $q$  moguće je predstaviti izrazom:

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r} + const.$$

Konstanta u gornjem izrazu obično se bira tako da potencijalna energija za beskonačno udaljena tela postane jednaka nuli. Pri takvom izboru konstante, potencijalna energija je data izrazom:

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r}.$$



**Potencijal polja** definisaćemo kao fizičku veličinu koja je brojno jednaka potencijalnoj energiji po jedinici naelektrisanja tela unetog u električno polje. Na ovaj način definisan potencijal ne zavisi od naelektrisanja tela koje je uneto u polje, već samo od naelektrisanja tela koje je izvor polja, kao i od udaljenosti od izvora polja do tačke u kojoj računamo potencijal. S obzirom na rečeno, potencijal električnog polja predstavljamo sledećim izrazom:

$$\varphi = \frac{E_p}{q'} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad .$$

Potencijal električnog polja je skalarna fizička veličina. Jedinica za potencijal u SI sistemu je volt,  $[\varphi] = \frac{J}{C} = V$ .

Koristeći pojam potencijala moguće je rad Kulonove sile pri pomeranju naelektrisanja na putu  $1 \rightarrow 2$  izračunati iz

$$A_{12} = E_{p1} - E_{p2} = q'(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Potencijal električnog polja sistema naelektrisanja jednak je algebarskoj sumi potencijala pojedinačnih naelektrisanja, odnosno

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i.$$

## 4.2 STALNA ELEKTRIČNA STRUJA

### 4.2.1 Jednosmerna električna struja

**Električna struja** predstavlja usmereno kretanje naelektrisanja (elektrona ili jona). Ako se smer naelektrisanja ne menja u toku vremena, govorimo o **jednosmernoj struji**; nasuprot tome, ako se smer naelektrisanja menja u toku vremena, govorimo o **naizmjeničnoj struji**.

Električnu struju u metalnim provodnicima čini usmereno kretanje negativno naelektrisanih čestica – elektrona.

**Jačinu struje**  $I$  definišemo kao količinu naelektrisanja koja u jedinici vremena prođe kroz neku zamišljenu površinu. Ako sa  $dq$  obeležimo proteklu količinu naelektrisanja, a sa  $dt$  odgovarajući interval vremena, tada je

$$I = \frac{dq}{dt} .$$

Jedinica za jačinu struje u SI sistemu je amper,  $[I] = \frac{C}{s} = A$ . Iz istorijskih razloga kao tehnički smer struje uzima se smer kretanja pozitivno naelektrisanih čestica.

## 4.2.2 Elektromotorna sila

Da bi u provodniku nastalo usmereno kretanje elektrona potrebno je da na naelektrisane čestice deluju spoljašnje sile. Međutim, da bi se naelektrisane čestice kretale po zatvorenoj putanji potrebno je da na njih deluju sile neelektrične prirode. Naime, rad konzervativnih sila, kakva je i elektrostatička, na zatvorenoj konturi jednak je nuli. **Elektromotornu silu** definišemo kao rad koji sile neelektrične prirode izvrše na jediničnom pozitivnom naelektrisanju pri jednom obilasku po konturi

$$E = \frac{A_n}{e} \cdot$$

Jedinica za elektromotornu silu u SI sistemu je volt [V].

Sem sila neelektrične prirode, na naelektrisane čestice koje se kreću po konturi, deluje i elektrostatička sila. Ukupan rad koji ove sile izvrše nad naelektrisanom česticom u toku njenog pomeranja iz položaja 1 u položaj 2 jednak je:

$$A_{12} = A_{el.} + A_n.$$

Imajući u vidu vezu između rada i potencijala, odnosno elektromotorne sile, prethodni izraz transformiše se u:

$$A_{12} = e(\varphi_1 - \varphi_2) + eE_{12}.$$

**Napon** definišemo kao fizičku veličinu brojno jednaku radu koji sile električne prirode i neelektrične prirode izvrše na jediničnom pozitivnom naelektrisanju pri njegovom pomeranju po delu strujnog kola

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{e}.$$

Kombinovanjem poslednja dva izraza dobija se:

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

Deo strujnog kola na kojem deluju sile neelektrične prirode predstavlja nehomogeni deo kola. Očigledno je da deo strujnog kola na kojem ne deluju sile neelektrične prirode predstavlja homogeni deo kola, na kojem je  $E_{12} = 0$ , što dovodi do:

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

Često korišćenim terminom "pad napona", ima se u vidu promena razlike potencijala.

## 4.2.3 Omov zakon

- Jačina struje koja protiče kroz homogeni deo metalnog provodnika proporcionalna je padu napona na delu provodnika (**Omov zakon za deo strujnog kola**).

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}.$$

Električni otpor zavisi od oblika provodnika, karakteristika materijala od kojeg je provodnik napravljen, kao i od uslova u kojima se provodnik nalazi. Otpor homogenog provodnika cilindričnog oblika računa se pomoću izraza:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

gde je  $l$  dužina provodnika,  $S$  površina poprečnog preseka, a  $\rho$  specifični otpor provodnika, veličina koja zavisi od karakteristika provodnika i temperature provodnika. Za većinu metala na temperaturama koje su veće od oko  $100K$  specifični otpor je proporcionalan apsolutnoj temperaturi:

$$\rho \sim T$$

Koristeći Celzijusovu temperaturnu skalu, izraz (4.38) može se zapisati u sledećem obliku:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t).$$

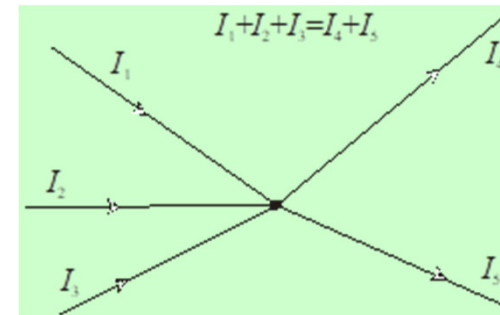
## 4.2.4 Kirhofova pravila

U osnovi rešavanja problema koji se odnose na razgranata strujna kola leže dva Kirhofova pravila. Prvo Kirhofovo pravilo odnosi se na čvorove razgranatog strujnog kola.

- Algebarska suma jačina struja koje ulaze u čvor razgranatog strujnog kola, jednaka je nuli (**I Kirhofovo pravilo**).

Matematička formulacija I Kirhofovog pravila ima sledeći oblik:

$$\sum_k I_k = 0,$$



pri čemu se sve struje koje se ulivaju u čvor uzimaju sa istim znakom (plus npr.), dok se struje koje izviru iz čvora uzimaju sa suprotnim znakom (minus npr.).

Drugo Kirhofovo pravilo povezuje elektromotorne sile i padove napona u zatvorenim strujnim konturama.

- Algebarska suma elektromotornih sila u nekoj zatvorenoj konturi strujnog kola jednaka je sumi padova napona u toj konturi (**II Kirhofovo pravilo**).

Matematička formulacija II Kirhofovog pravila ima sledeći oblik:

$$\sum_k I_k R_k = \sum_k E_k.$$

## 4.2.5 Džul – Lencov zakon

U toku usmerenog kretanja kroz kristalnu rešetku metala elektroni se sudaraju sa atomskim ostacima koji se nalaze u čvorovima kristalne rešetke. Pri sudarima deo energije koju imaju elektroni prenosi se na atomske ostatke. Kao rezultat ove interakcije. Povećanje energije atomskih ostataka praćeno je povećanjem makroskopski merljive veličine koju nazivamo temperatura.

- U provodniku kroz koji protiče električna struja oslobodi se količina toplote koja je proporcionalna otporu provodnika, kvadratu jačine struje koja protiče kroz provodnik i vremenu proticanja (**Džul – Lencov zakon**).

Ova zakonitost može se predstaviti sledećom formulom:

$$Q = RI^2t \quad ,$$

gde je  $R$  otpor provodnika,  $I$  jačina struje koja protiče, a  $t$  vreme proticanja. Ako podelimo oslobođenu količinu toplote vremenom proticanja, dobićemo oslobođenu količinu toplote u jedinici vremena, odnosno snagu električne struje:

$$P = \frac{dQ}{dt} = RI^2 = UI = \frac{U^2}{R}$$