

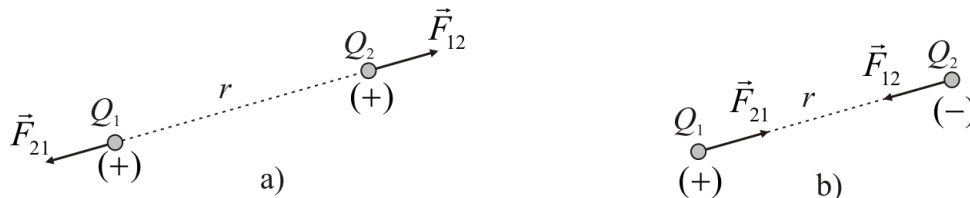
2. Elektrostatičko polje

Equation Chapter (Next) Section 2

Naelektrisanu tela koja se ne pomeraju u prostoru, niti menjaju količinu naelektrisanja u toku vremena, stvaraju u svojoj okolini elektrostatičko polje. Čovek svojim čulima ne može da registruje postojanje tog polja, ali ako se u prostor nekog naelektrisanog tela unese drugo naelektrisano telo doći će do pojave sile između ta dva tela, koja može da se registruje posmatranjem ta dva tela. U nekim slučajevima se tela privuku, a u nekim se odbiju. Sila koja ih primorava da se odbiju ili privuku može da se registruje i izmeri odgovarajućim instrumentima i tako potvrdi postojanje elektrostatičkog polja. Osim toga moguće je izmeriti vrednosti fizičkih veličina kojima se to polje opisuje.

2.1. Kulonov zakon

U prvom delu je rečeno da su tela naelektrisana kada imaju višak ili manjak elektrona u odnosu na protone. To znači da mogu biti naelektrisana pozitivnom ($Q > 0$) i negativnom ($Q < 0$) količinom naelektrisanja. Sila između dva naelektrisana tela iste prirode (istog znaka) je odbojna. Sila između dva naelektrisana tela suprotnog znaka je privlačna. Pri tome je intenzitet te sile srazmeran proizvodu količine naelektrisanja tih tela, a obrnuto srazmeran kvadratu rastojanja između njih. Ovu zakonitost je merenjem ustanovio francuski fizičar Šarl Kulon, oko 1787 godine, posmatrajući dva tačkasta naelektrisanja. Tačkasta naelektrisanja su naelektrisana tela čije su dimenzije mnogo manje od njihovog rastojanja, kao što je ilustrovano na slici 2.1.



2.1 Sile između dva tačkasta naelektrisanja. (a) odbojna sila, (b) privlačna sila.

Sila između dva tačkasta naelektrisanja predstavlja Kulonov zakon, i iskazana je jednačinom:

$$F_{12} = F_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad (2.1)$$

gde je F_{12} sila kojom prvo naelektrisano telo deluje na drugo, F_{21} sila kojom drugo naelektrisano telo deluje na prvo, Q_1 i Q_2 količine naelektrisanja tačkastih tela, r međusobno

rastojanje tela, a ε_0 konstanta koja je utvrđena eksperimentalno iz jednačine (2.1). Kako su eksperimenti vršeni u vakuumu, ta konstanta je nazvana permitivnost vakuuma i iznosi $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m. Sile F_{12} i F_{21} su istog pravca i intenziteta, ali suprotnih smerova.

Primer 2.1

Izračunati silu između dva tačkasta naelektrisanja koja se nalaze u vakuumu na rastojanju 10 mm. Pri tome prvo telo ima višak od $2 \cdot 10^7$ elektrona, a drugo telo manjak od $4 \cdot 10^7$ elektrona.

Rešenje. Da bismo izračunali silu između tih naelektrisanja potrebno je da odredimo vrstu i količinu naelektrisanja svakog od njih. Prvo tačkasto naelektrisanje je negativno sa količinom naelektrisanja $Q_1 = -2 \cdot 10^7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = -3,2 \cdot 10^{-12}$ C, dok je drugo tačkasto naelektrisanje pozitivno sa dva puta većom količinom naelektrisanja $Q_2 = 6,4 \cdot 10^{-12}$ C. Kako su količine naelektrisanja ta dva tela suprotna po znaku, sila između njih će biti privlačna. Koristeći izraz (2.1) intenzitet sile je $18,43 \cdot 10^{-12}$ N, odnosno 18,43 pN. Prilikom računanja intenziteta sile uzimaju se apsolutne vrednosti količine naelektrisanja. ■

Primer 2.2

Tačkasto naelektrisanje čija je količina naelektrisanja $Q_1 = -3$ nC deluje odbojnom silom na drugo tačkasto naelektrisanje silom intenziteta 9 nN. Ako je rastojanje između tela 30 mm, izračunati količinu naelektrisanja drugog tela.

Rešenje. Prvo tačkasto naelektrisanje je negativno a sila je odbojna. To znači da i drugo tačkasto naelektrisanje ima negativnu količinu naelektrisanja. Koristeći izraz (2.1) dobijamo da je $Q_2 = -0,3$ pC. ■

2.2. Električno polje

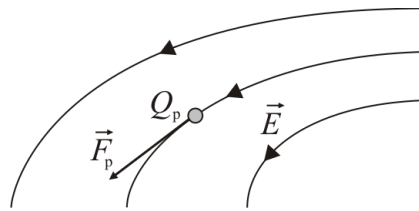
U prethodnom odeljku smo videli da u slučaju dve naelektrisane čestice, Q_1 i Q_2 , možemo da registrujemo i izmerimo električnu silu koja se javlja između njih. Ukoliko imamo jednu naelektrisanu česticu ili naelektrisanu telo, npr. Q_1 , ono ne može delovati silom na samo sebe. Međutim, znamo da će se sila pojaviti ako se u prostor oko tela Q_1 unese neko drugo naelektrisanu telo. To znači da je naelektrisanu telo Q_1 ipak izmenilo prostor u kome se nalazi. Novo fizičko stanje oko naelektrisanih tela naziva se električno polje. Električno polje se opisuje vektorom jačine električnog polja $\vec{E}$, jedinica je njutn po kulonu (N/C) ili češće volt po metru (V/m).

Vektor jačine električnog polja u okolini naelektrisanog tela se definiše izrazom:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_p}{Q_p} \text{ (N/C)}, \quad (2.2)$$

gde je Q_p probno naelektrisanje koje se unosi u električno polje (prostor oko naelektrisanog tela), a F_p sila kojom električno polje deluje na to probno naelektrisanje. Probno naelektrisanje predstavlja malo pozitivno naelektrisanje, $Q_p > 0$. Silu na probno naelektrisanje je moguće izmeriti i tako odrediti intenzitet vektora $\vec{E}$.

Ako na probno naelektrisanje postavljeno u neki deo prostora deluje sila, tada u tom delu prostora postoji i električno polje. Električno polje prikazano na slici 2.2 je registrovano (uočeno) postojanjem sile F_p na Q_p .



2.2 Uz definiciju električnog polja

2.2.1. Električno polje tačkastog naelektrisanja

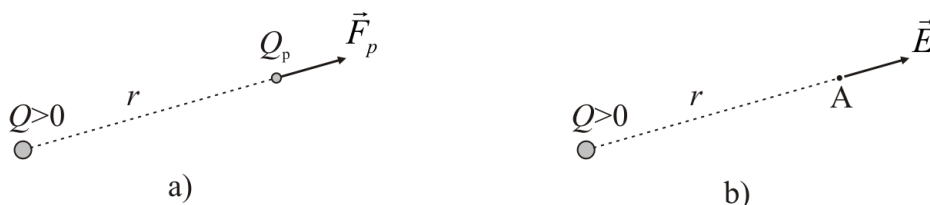
Ukoliko se u električno polje pozitivnog tačkastog naelektrisanja Q , prikazanog na slici 2.3.a, u neku tačku A na rastojanju r , unese malo probno naelektrisanje Q_p , tada na to naelektrisanje deluje Kulonova sila opisana u delu 2.1. Intenzitet te sile iznosi:

$$F_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_p}{r^2}.$$

Ukoliko na prethodni izraz primenimo izraz (2.2), dobijamo izraz za intenzitet vektora jačine električnog polja tačkastog naelektrisanja na rastojanju r :

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}. \quad (2.3)$$

Vektor jačine električnog polja je vektorska veličina, dakle osim inteziteta ima i pravac i smer. Kako je Q_p pozitivna skalarna veličina, to znači da je pravac i smer vektora $\vec{E}$ isti kao i smer sile $\vec{F}_p$, kao što je prikazano na slici 2.3.b.

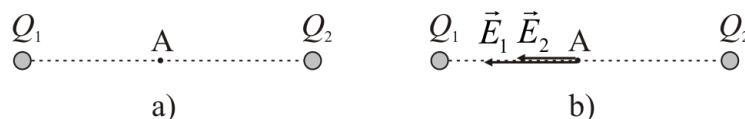


2.3 a) Sila i b) Električno polje tačkastog naelektrisanja.

Kada bi naelektrisanje tačkastog izvora bilo negativno tada bi Kulonova sila na probno naelektrisanje (malo pozitivno naelektrisanje) bila privlačna. To znači da bi u tom slučaju vektor električnog polja bio usmeren ka izvoru.

Primer 2.3

Izračunati vektor jačine električnog polja u tački A koje stvaraju dva tačkasta naelektrisanja $Q_1 = -3 \text{ nC}$ i $Q_2 = 2 \text{ nC}$ međusobno udaljena 6 cm , ako se tačka A nalazi na sredini rastojanja ova dva izvora.

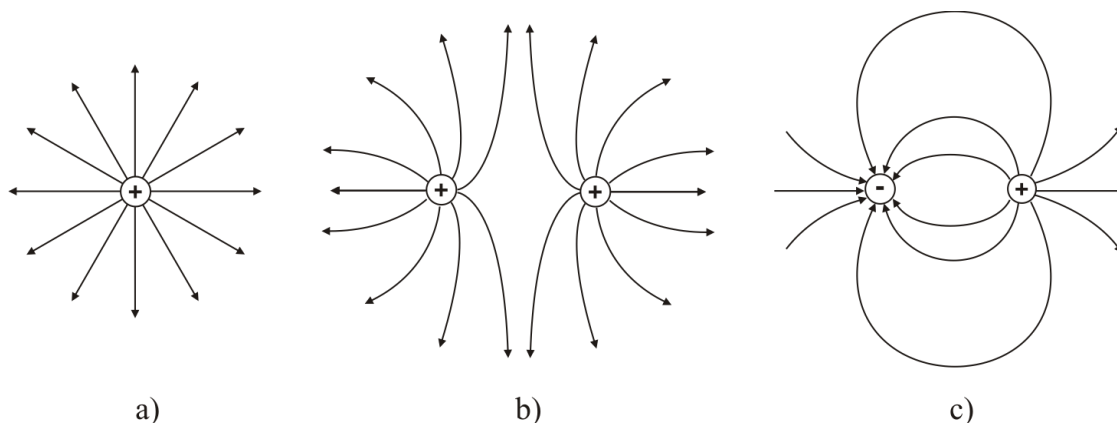


Rešenje. Prvo tačkasto naelektrisanje je negativno, tako da je smer vektora jačine električnog polja u tački A prema izvoru. Drugo tačkasto naelektrisanje je pozitivno, pa je smer vektora jačine električnog polja u tački A od izvora. Intezitete ta dva vektora nalazimo koristeći izraz (2.3), tako da je $E_1 = 900\text{V/m}$, a $E_2 = 600\text{V/m}$. Električno polje u tački A dobija se sabiranjem vektora $\vec{E}_1$ i $\vec{E}_2$, $\vec{E}_A = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Kako su vektori istog smera, ukupno polje u tački A iznosi $E_A = 1500\text{V/m}$, sa smerom prema Q_1 . ■

2.2.2. Linije vektora električnog polja

Električno polje se grafički predstavlja linijama (slika 2.2). Linije polaze-izviru na pozitivnim naelektrisanjima, a završavaju-poniru na negativnim naelektrisanjima. Ove linije se često zovu i linije sile, pošto je električna sila srazmerna električnom polju koje deluje na malo probno naelektrisanje $\vec{F}_p = Q_p \vec{E}$. Kada bi uneli Q_p u električno polje ono bi se, pod dejstvom električne sile F_p , kretalo duž tih linija.

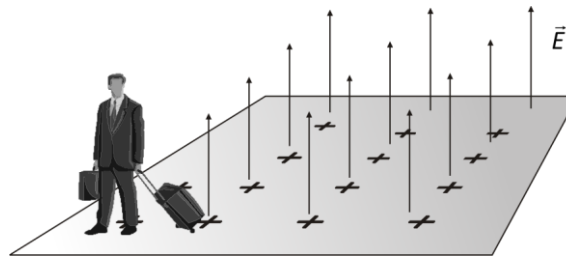
Linije vektora električnog polja usamljenog tačkastog naelektrisanja (tela čije su dimenzije mnogo manje od rastojanja u kojima se određuje polje) su radijalne (sferno simetrične), kao što je prikazano na slici 2.4.a. Kreću iz tela, i idu u svim pravcima u prostoru. Ako je naelektrisanje pozitivno, linije su usmerene od tela. Ako je negativno, linije su usmerene ka telu. U prisustvu drugog tačkastog izvora linije električnog polja postaju zakrivljene, a njihov oblik zavisi od vrste i količine naelektrisanja tačkastih izvora, kao što je ilustrovano na slikama 2.4.b i 2.4.c.



2.4 Linije električnog polja: a) usamljenog tačkastog naelektrisanja, b) dva tačkasta naelektrisanja istog znaka i c) dva tačkasta naelektrisanja suprotnog znaka

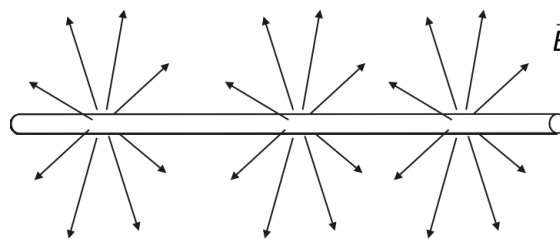
Osim tačkastog naelektrisanja, uvode se pojmovi površinskog i linijskog naelektrisanja.

Kada jedna dimenzija naelektrisanog tela može da se zanemari u odnosu na druge dve kaže se da je u pitanju površinsko naelektrisanje. Vektor jačine električnog polja površinskog naelektrisanja se grafički predstavlja linijama koje polaze od tela (površine) i normalne su na površinu tela, kao što je prikazano na slici 2.5.



2.5 Linije električnog polja u slučaju pozitivnog površinskog naelektrisanja.

Ukoliko su dve dimenzije naelektrisanog tela zanemarljive u odnosu na treću kaže se da je u pitanju linijsko naelektrisanje. Vektor jačine električnog polja linijskog naelektrisanja se grafički predstavlja linijama koje polaze od tela i idu radialno u ravnima normalnim na pravac linije (osno simetrične), kao što je prikazano na slici 2.6. To može da bude štap od izolatora koji je naelektrisan trenjem. Takav štap može da privuče komadiće papira, vlasi kose ili neke druge lakše predmete.

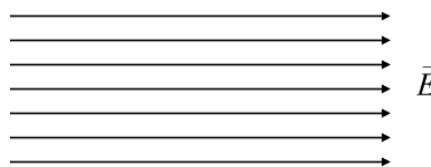


2.6 Linije električnog polja u slučaju pozitivnog linijskog naelektrisanja.

Linijama polja se može ilustrovati i njegova jačina. Tamo gde su linije gušće tamo je električno polje većeg intenziteta. Na primer u blizini tačkastog izvora linije su gušće, što znači da je tu polje jače.

2.2.3. Homogeno električno polje

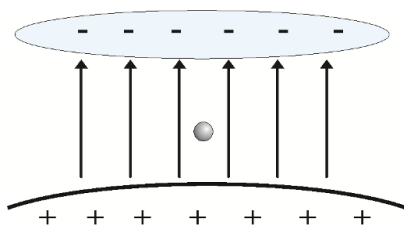
Ukoliko je u svakim tačkama u nekom delu prostora vektor jačine električnog polja istog pravca, smera i intenziteta, tada je u tom delu prostora električno polje homogeno. Homogeno električno polje se predstavlja pravim paralelnim linijama na jednakom rastojanju. Izvori homogenog električnog polja su uglavnom ravne naelektrisane površi.



2.7 Linije homogenog električnog polja.

Primer 2.4

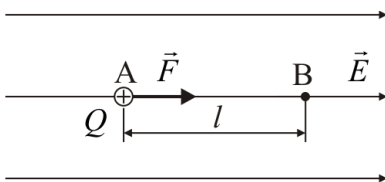
Izračunati intenzitet sile kojom homogeno električno polje između oblaka i zemlje deluje na naelektrisanu kuglicu, ako je jačina električnog polja je $E = 5 \text{ kV/m}$, a količina naelektrisanja kuglice je $Q = 10 \mu\text{C}$. U kom smeru deluje sila na kuglicu?



Rešenje. Sila kojom električno polje deluje na naelektrisanu kuglicu računa se pomoću izraza $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$. Zamenom brojnih vrednosti, intenzitet sile je $F = 50 \cdot 10^{-3} \text{ N}$, odnosno 50 mN. Smer sile je na gore, u smeru električnog polja, zato što je naelektrisanje kuglice pozitivno.

2.3. Potencijal i napon u električnom polju

Ukoliko se u električno polje $\vec{E}$, u neku tačku A, unese neko malo pozitivno naelektrisanje telo Q , tada na to telo deluje električna sila $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$ u smeru električnog polja, kao što je prikazano na slici 2.8.



2.8 Uz definiciju rada i napona u homogenom električnom polju.

Pod dejstvom te sile dolazi do pomeranja naelektrisanja Q od tačke A do tačke B u pravcu i smeru električne sile, odnosno u pravcu i smeru električnog polja (zato što je $Q > 0$). Prilikom tog pomeranja, sila električnog polja je izvršila rad

$$A_{AB} = F \cdot l_{AB} = Q \cdot E \cdot l_{AB}, \quad (2.4)$$

gde je l_{AB} rastojanje između tačaka A i B. U izrazu (2.4), proizvod $E \cdot l$ ne zavisi od količine naelektrisanja tela koje se pomera. Taj proizvod je nazvan napon i označava se sa U . Jedinica za napon je volt (V). Napon između tačaka A i B je

$$U_{AB} = E \cdot l. \quad (2.5)$$

Dakle, napon između dve tačke je brojno jednak količniku rada utrošenog pri prenošenju naelektrisanja od jedne do druge tačke i samog tog naelektrisanja:

$$U_{AB} = \frac{A_{AB}}{Q}. \quad (2.6)$$

Osim napona, definiše se i pojam potencijala koji može da se pridruži svakoj tački u električnom polju. Potencijal neke tačke je brojno jednak količniku rada utrošenog pri prenošenju naelektrisanja od te tačke do referentne tačke i samog tog naelektrisanja:

$$V_A = \frac{A_{AR}}{Q}. \quad (2.7)$$

Obeležava se sa slovom V , a jedinica je volt (V). Položaj referentne tačke R se u napred određuje i važi za sve tačke čiji se potencijal određuje.

Ukoliko poznajemo potencijale tačaka tada možemo da odredimo i napon između njih. Pri tome je napon između dve tačke u električnom polju jednak razlici potencijala tih tačaka:

$$U_{AB} = V_A - V_B. \quad (2.8)$$

Napon je skalarna veličina ali može da se kaže da je usmerena skalarna veličina zato što je bitno da li je rad električnog polja bio u smeru od A do B ili od B do A . To znači da je

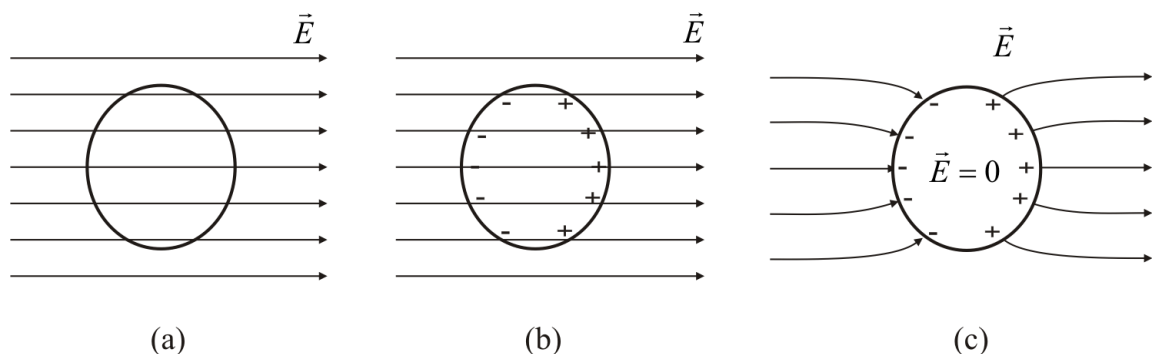
$$U_{BA} = -U_{AB}.$$

2.4. Provodnici u elektrostatičkom polju

Kada se provodnik nađe u električnom polju $\vec{E}$, tada na svaki slobodni elektron unutar provodnika deluje električna sila $\vec{F}_e = -e\vec{E}$, gde je znak „-“ zato što je naelektrisanje elektrona negativno. Usled velike pokretljivosti elektrona u dobrim provodnicima-metalima, pod dejstvom te sile, lako dolazi do kretanja slobodnih elektrona. Atom koga je napustio slobodni elektron postaje pozitivno naelektrisan, odnosno postaje pozitivni jon - katjon. Na taj način u provodniku u električnom polju dolazi do razdvajanja negativnih nosilaca naelektrisanja (elektroni) i pozitivnih nosilaca naelektrisanja (katjona). Ponašanje i uloga provodnika u elektrostatičkom polju je opisana u nastavku.

2.4.1. Elektrostatička indukcija

Posmatrajmo provodnu (metalnu) kuglu koja se nalazi u stranom elektrostatičkom polju $\vec{E}$, kao što je prikazano na slici 2.9.a. Pod dejstvom stranog električnog polja slobodni elektroni će se kretati suprotno od smera električnog polja i nagomilavati na levoj strani provodnika, slika 2.9.b. Oni čine negativna naelektrisanja, (-). Na suprotnoj strani provodnika ostaju atomi sa manjkom elektrona tako da oni postaju pozitivni joni. Ovi joni predstavljaju pozitivna naelektrisanja, (+). Na taj način, pomeranjem elektrona u provodniku usled dejstva stranog električnog polja, dolazi do razdvajanja naelektrisanja. Ova pojava se naziva elektrostatička indukcija. Treba napomenuti da je provodnik i dalje električno neutralan, odnosno da nije naelektrisan. Kod njega je samo došlo do razdvajanja pozitivnih i negativnih naelektrisanja.

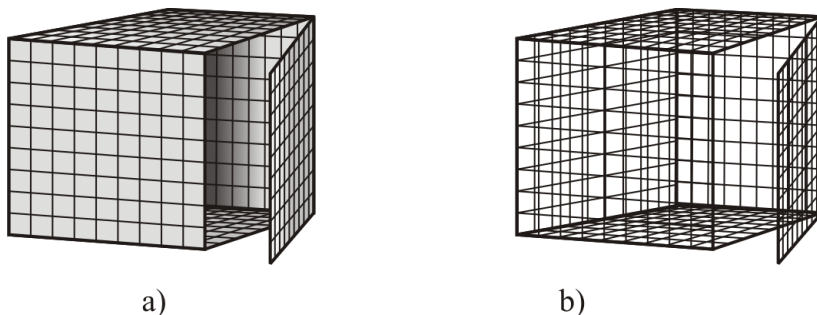


2.9 Provodnik u stranom elektrostatičkom polju. Elektrostatička indukcija.

Negativna naelektrisanja idu na jednu stranu, a pozitivna na drugu stranu. Tako razdvojena naelektrisanja počinju da stvaraju svoje unutrašnje električno polje koje je suprotnog smera od spoljašnjeg. Povećanjem broja razdvojenih naelektrisanja povećava se i unutrašnje polje unutar provodnika koje teži da poništi spoljašnje polje. Preraspodela traje vrlo kratko, sve dok se unutar provodnika potpuno ne poništi strano polje. Naelektrisanja unutar

provodnika utiču i na linije stranog elektrostatičkog polja van provodnika, primoravajući ih da završavaju i polaze sa površine provodnika pod pravim uglom.

Ukoliko se umesto metalne kugle u strano električno polje postavi šuplja metalna ljuska efekat je potpuno isti. Rezultat je da unutar šupljine nema električnog polja. Šuplje provodno telo može da se koristi kao zaklon za zaštitu osetljivih uređaja od električnog polja i naziva se Faradejev kavez. Unutar Faradejevog kaveza nema elektrostatičkog polja. Sličnu ulogu može imati i kućica od relativno guste žičane mreže, slika 2.10.



2.10 Faradejev kavez: a) od provodnih ploča i b) od provodne mreže.

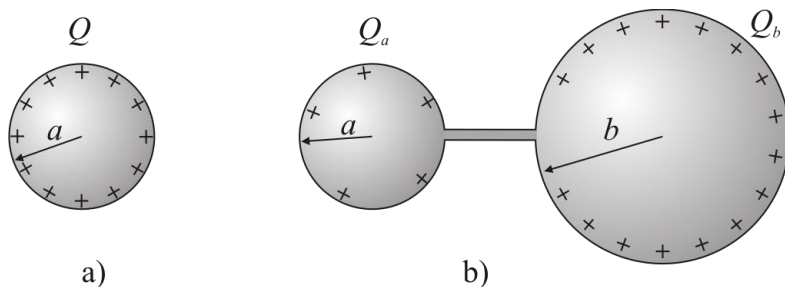
2.4.2. Raspodela naelektrisanja usamljenog provodnog tela i uzemljenje

Provodno telo je moguće naelektrisati dodavanjem ili oduzimanjem elektrona. Ako se provodno telo naelektriše, tada se ta naelektrisanja raspodeljuju samo po površini provodnika. Gde će ih biti više, a gde manje zavisi od oblika tela. Ako je to provodna kugla ili provodna lopta tada se naelektrisanja raspoređuju podjednako po celoj površini. Na slici 2.11.a je prikazana raspodela pozitivnih jona (katjona) na telu kome nedostaju elektroni.

Ako bi sada tu metalnu kuglu poluprečnika a naelektrisanu naelektrisanjem Q spojili provodnikom sa nenaelektrisanom provodnom kuglom poluprečnika $b > a$, dobili bi jedno novo telo prikazano na slici 2.11.b. Na tom novom telu dolazi do preraspodele naelektrisanja. Deo naelektrisanja sa male kugle prešao bi na veliku. Ukupna količina naelektrisanja Q male kugle bi se podelila na Q_a i Q_b pri čemu važi

$$\frac{Q_a}{Q_b} = \frac{a}{b}.$$

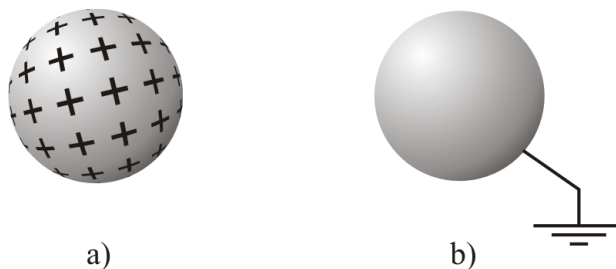
To znači da će na većoj kugli biti veća ukupna količina naelektrisanja. Ovde se kora napomenuti da broj „+“ simbola prikazanih na slici oslikava gustinu naelektrisanja a ne njihovu količinu.



2.11 Raspodela naelektrisanja na provodniku.

Ukoliko bi tu istu metalnu kuglu poluprečnika a naelektrisanu naelektrisanjem Q spojili provodnikom sa zemljom, opet bi došlo do preraspodele naelektrisanja. Planeta Zemlja se može

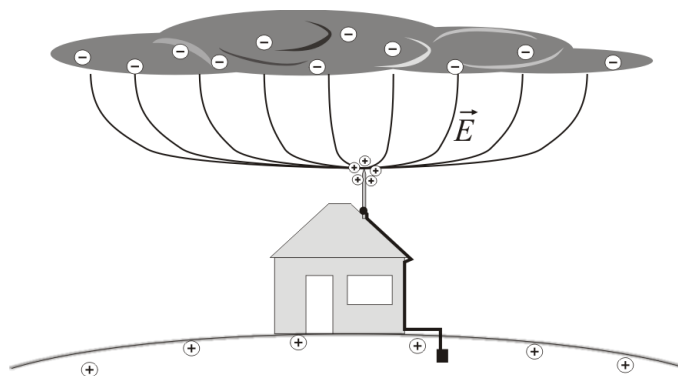
posmatrati kao velika provodna lopta. Kako je poluprečnik Zemlje vrlo velik, $b = 6378\text{km}$, to znači i da je odnos Q_a/Q_b vrlo mali. Drugim rečima, Q_a postaje zanemarljivo malo i praktično jednako nuli. To znači da sva naelektrisanja koja se nalaze na provodnim telima, nakon spajanja tela sa zemljom, odlaze u zemlju, a tela postaju razelektrisana (slika 2.12). Povezivanje provodnog tela sa Zemljom naziva se uzemljavanje. Provodna tela kao što su metalna kućišta raznih mašina, alata i uređaja kako u industriji tako i u domaćinstvu ne bi smela da budu naelektrisana. Dodirivanjem naelektrisanih provodnih tela rukom naelektrisanja sa tih tela prelaze na ruku, što može da izazove oštećenje tkiva osobe koja je dodirnula naelektrisana tela. Stoga je uzemljavanje metalnih kućišta mašina, alata i uređaja i odvođenje neželjenog naelektrisanja u zemlju veoma važno.



2.12 a) Naelektrisani metalni objekat i b) Razelektrisani uzemljeni metalni objekat.

2.4.3. Gromobrani

Gromobrani se koriste za zaštitu od udara groma. To su provodnici kod kojih je jedan kraj uzemljen a drugi postavljen iznad objekta kojeg treba da zaštite od atmosferskog pražnjenja. Gromobrani rade na principu elektrostatičke indukcije. Naelektrisanje iz obalaka privlači naelektrisanje suprotnog znaka iz Zemlje, koje se sada nagomilava na vrhu gromobrana (slika 2.13). To nagomilano naelektrisanje stvara veliko električno polje u okolini gromobrana. Negativna naelektrisanja koja krenu iz oblaka biće privučena električnim poljem gromobrana. Gromobran uvlači naelektrisanja u odvodi ih u Zemlju. Na taj način je sprečeno da naelektrisanja iz oblaka odu na neku drugu stranu.

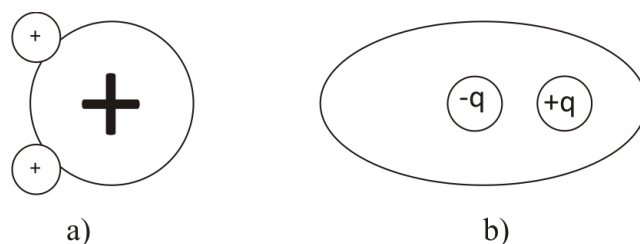


2.13 Gromobran u obliku šiljka i način postavljanja gromobrana.

2.5. Dielektrici u električnom polju

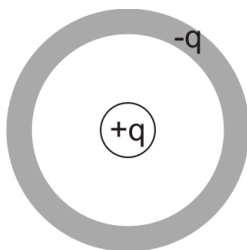
Dielektrici (električni izolatori) su materijali kod kojih atomi teško otpuštaju elektrone iz spoljnih ljuski. Nema ili ima jako malo elektrona koji bi mogli slobodno da se kreću. Pri tome razlikujemo dielektrike sa polarnim i nepolarnim molekulima. Kod nekih materijala molekuli su zbog svoje prirode čak i u odsustvu električnog polja polarizovani. Na primer molekuli vode

čine veliki atom kiseonika i dva mala atoma vodonika. Kiseonik ima mnogo više pozitivnog naelektrisanja (protona) u odnosu na dva atoma vodonika. Centar pozitivnog naelektrisanja je pomeren malo u levo. Elektroni kruže oko celog molekula tako da je njihov centar pomeren malo u desno. Centri pozitivnog i negativnog naelektrisanja su razdvojeni tako da polarizovani molekul može da se predstavi kao dipol prikazan na slici 2.14.



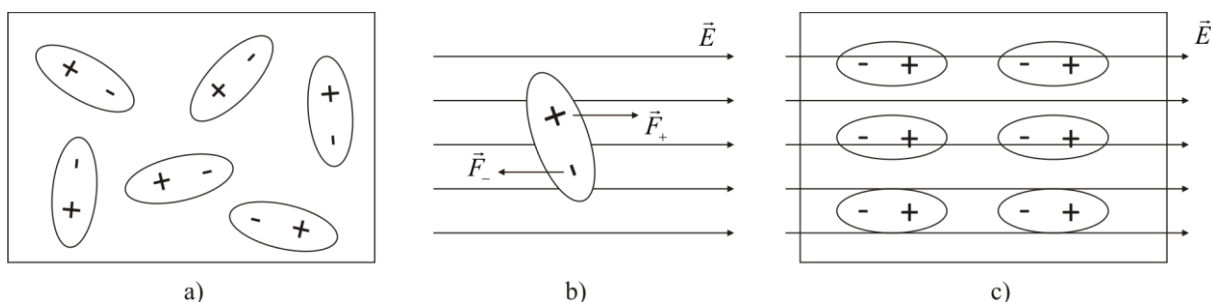
2.14 a) Polarni molekul vode i b) Dipol kao model polarnog molekula.

U drugu grupu spadaju dielektrici kod kojih su centri pozitivnog i negativnog naelektrisanja preklapljeni. Elektroni kruže po kružnoj putanji čiji se centar poklapa sa centrom pozitivnog naelektrisanja. Takvi molekuli nemaju dipol pa se nazivaju nepolarni molekuli. Mogu da se predstave pomoću modela prikazanog na slici 2.15.



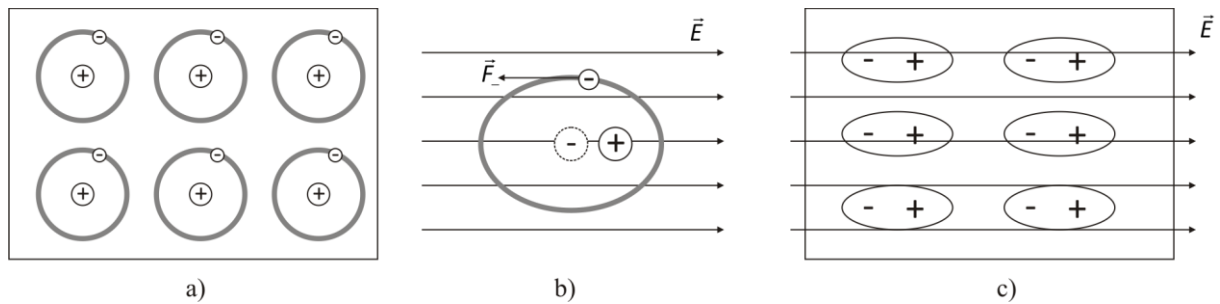
2.15 Model nepolarnog molekula.

Ove dve grupe dielektrika se različito ponašaju u prisustvu električnog polja. U odsustvu električnog polja kod dielektrika sa polarnim molekulima dipoli su haotično orijentisani tako da je ukupno električno polje dipola jednako nuli (slika 2.16.a). Kada se takav dielektrik izloži stranom električnom polju dolazi do zakretanja dipola zbog sile kojom strano električno polje deluje na centre pozitivnog i negativnog naelektrisanja (slika 2.16.b). Rezultat toga je mnoštvo usmerenih dipola orijentisanih kao što je prikazano na slici 2.16.c.



2.16 a) Polarni dielektrik u odsustvu električnog polja, b) zakretanje dipola i c) polarizacija dielektrika.

Na slici 2.17.a je prikazan dielektrik sa nepolarnim molekulima u odsustvu električnog polja. Kada se takav dielektrik unese u električno polje dolazi do deformacije putanje elektrona pod dejstvom sila električnog polja, slika 2.17.b. Putanja se deformiše u elipsu a centar putanje elektrona je pomeren malo u levo u odnosu na jezgro. Deformisani molekuli postaju polarni i mogu da se predstave pomoću dipola. Ovakvi dipoli su orijentisani na način prikazan na slici 2.17.c.



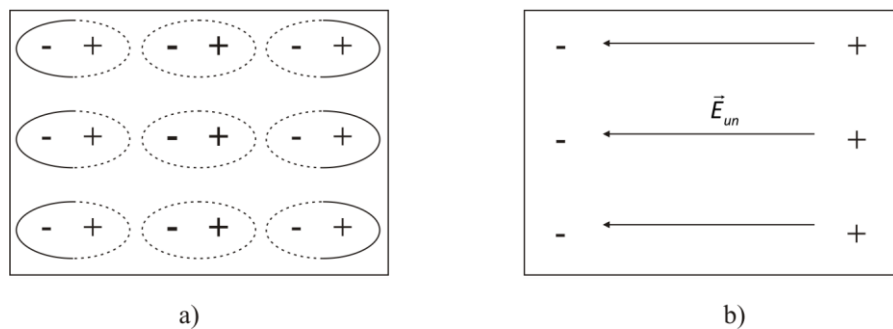
2.17 a) Neutralni atomi unutar dielektrika, b) polarizovani atomi i c) dipol.

Bez obzira na grupu dielektrika krajnji efekat prisustva električnog polja je formiranje mnoštva usmerenih dipola. Ovaj proces naziva se polarizacija dielektrika. Polarizacija u slučaju polarnih molekula se naziva dipolna polarizacija, dok je u slučaju nepolarnih molekula reč o elektronskoj polarizaciji.

Postoji još jedna grupa dielektrika koja se sastoji od pozitivnih i negativnih jona. U odsustvu stranog polja njihov raspored u materijalu je haotičan, pa kažemo da nije dielektrik polarizovan. Prisustvo stranog polja utiče na njihovo pomeranje, tako da se na kraju procesa dobije drugačiji raspored. Pozitivni joni se blago pomeraju na jednu stranu, negativni na drugu stranu, te na taj način formiraju mnoštvo orijentisanih dipola.

2.5.1. Permitivnost dielektrika

U unutrašnjosti dielektrika će se pozitivni i negativni krajevi dipola kompenzovati. Uticaj pozitivnog kraja levog dipola će se poništiti uticajem negativnog kraja njemu susednog desnog dipola, slika 2.18.a. Ostaju samo krajnja leva i krajnja desna nekompenzovana naelektrisanja koja stvaraju unutrašnje električno polje suprotnog smera od spoljašnjeg, slika 2.18.b. Za razliku od provodnika, koji u potpunosti poništavaju spoljašnje električno polje, dielektrici mogu samo da ga oslabe.



2.18 a) Polarizovani dielektrik, b) nekompenzovana naelektrisanja na krajevima dielektrika.

Ako sa E_0 označimo električno polje u koje se unosi dielektrik, sa E_{un} električno polje formiranih i zakrenutih dipola, a sa E ukupno električno polje unutar dielektrika, tada je:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{un} \quad (2.9)$$

Smer unutrašnjeg i spoljašnjeg električnog polja je suprotan, tako da je intenzitet ukupnog električnog polja $E = E_0 - E_{un}$. Dielektrik je svojim prisustvom oslabio električno polje E_0 , tako da možemo da kažemo da je $E < E_0$.

Koliko će ga oslabiti zavisi od osobina dielektrika, a može da se iskaže pomoću permitivnosti dielektrika. Permitivnost se obeležava sa ε , i izražava u faradima po metru (F/m).

Ova osobina dielektrika se zove i dielektrična konstanta. Što je veća permitivnost dielektrika veće je i slabljenje električnog polja unutar dielektrika. Bez obzira na vrstu polarizacije, krajnji rezultat je polarizovani dielektrik koji smanjuje električno polje srazmerno njegovoj permitivnosti. Vakuum je odsustvo materije, tako da u vakuumu nema čestica koje bi mogle da se polarizuju i na taj način smanje električno polje. Vakuum ima najmanju moguću permitivnost koja iznosi $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$. Svaki drugi materijal ima veću permitivnost koja može da se izrazi preko permitivnosti vakuuma:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r, \quad (2.10)$$

gde je ε_r relativna permitivnost. To je neimenovan broj koji kazuje koliko puta je permitivnost nekog dielektrika veća od permitivnosti vakuuma. Odnosno, koliko puta je smanjeno električno polje zahvaljujući nekompenzovanim naelektrisanjima. Na kraju, možemo da kažemo da je dielektrik ε_r puta smanjio električno polje, odnosno

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon_r}. \quad (2.11)$$

Relativna permitivnost vazduha je malo veća od jedan, ali je praktično jednaka jedan, $\varepsilon_r = 1$. Drugi materijali imaju relativnu permitivnost veću od 1. Neke keramike mogu da imaju $\varepsilon_r > 1000$.

2.5.2. Električna čvrstina dielektrika

Kada se dielektrik izloži električnom polju u njemu dolazi samo do zakretanja dipola, ali ne i do kretanja naelektrisanja, što ih i klasifikuje kao izolatore. Međutim, svaki dielektrik se ponaša kao izolator samo do izvesne jačine električnog polja u njemu. Za veće jačine električnog polja dielektrik gubi svoja izolatorska svojstva i počinje da provodi (javlja se električni luk). Ukoliko je električno polje suviše veliko, tada je i sila na elektrone unutar molekula dovoljno velika da istrgne i odvoji od molekula. Takva naelektrisanja počinju da se kreću kroz materijal. Ta pojava se naziva proboj dielektrika.

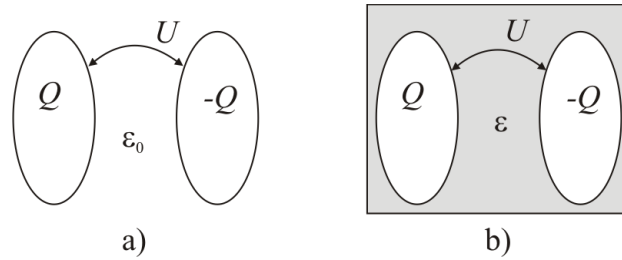
Maksimalna jačina električnog polja koju dielektrik može da izdrži, pre nego što dođe do proboja, naziva se električna čvrstina dielektrika. Označava se sa E_ε a jedinica je (V/m). Električna čvrstina vazduha iznosi oko 3 MV/m. Drugi dielektrici imaju veću električnu čvrstinu. Na primer, električna čvrstina papira je 20 MV/m, teflona 60 MV/m, gume 20 – 40 MV/m, itd.

Da ne bi došlo do proboja, električno polje unutar dielektrika mora biti manje od električne čvrstine, odnosno

$$E < E_\varepsilon. \quad (2.12)$$

2.6. Kondenzatori

Kondenzator obrazuju dva provodna tela (elektrode) koja su postavljena u vakuumu na nekom rastojanju ili su razdvojena izolatorom (dielektrikom), kao što je prikazano na slici 2.19.



2.19 a) Elektrode kondenzatora u vakuumu, b) Elektrode kondenzatora razdvojene dielektrikom.

Ako se kondenzator naelektriše tada su elektrode kondenzatora naelektrisane istom količinom naelektrisanja Q ali suprotnog znaka. Pri tome postoji napon U , između elektroda. Osobina kondenzatora je da mu se srazmerno sa povećanjem naelektrisanja Q povećava i napon U . Koeficijent srazmere zove se kapacitivnost kondenzatora. Obeležava se sa C , jedinica je farad (F) i predstavlja odnos količine naelektrisanja na pločama i napona između ploča:

$$C = \frac{Q}{U} . \quad (2.13)$$

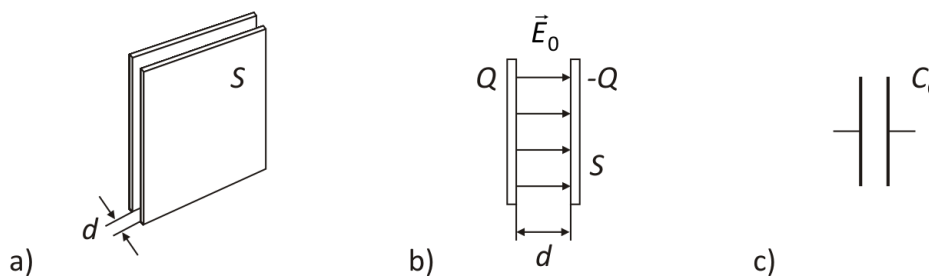
Postoji mnogo kondenzatora različitih oblika i struktura. Najpoznatiji su pločasti, ali postoje i cilindrični i sferni. Primer cilindričnog kondenzatora bi mogao biti koaksijalni kabel. Između elektroda kondenzatora se, u zavisnosti od potrebe, mogu postaviti jedan ili više slojeva različitih dielektrika. Ovde će biti razmatrani samo pločasti kondenzatori bez dielektrika ili sa jednim slojem dielektrika.

2.6.1. Pločasti kondenzator

Najčešći oblik kondenzatora je pločasti kondenzator. Pločasti kondenzator se sastoji od dve ravne paralelne provodne ploče razdvojene dielektrikom. Na slici 2.20 su prikazane ploče kondenzatora između kojih je vakuum ili vazduh. Za razliku od vakuuma, u vazduhu postoje molekuli koji bi mogli da se u prisustvu električnog polja polarizuju i tako smanje električno polje. Međutim, u praksi je uticaj vazduha na smanjenje električnog polja zanemarljiv. U tom smislu se vazduh tretira kao i vakuum. Permitivnost vazduha je jednaka permitivnosti vakuuma. U vazдушnom pločastom kondenzatoru se formira električno polje E_0 koje se izračunava pomoću izraza

$$E_0 = \frac{Q}{\varepsilon_0 S} , \quad (2.14)$$

gde je Q naelektrisanje jedne od ploča, S površina jedne od ploča, a $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ permitivnost vakuuma.



2.20 Vazdušni pločasti kondenzator, električno polje i simbol kondenzatora.

Napon između leve i desne ploče kondenzatora može da se odredi pomoću izraza (2.5):

$$U = E_0 d , \quad (2.15)$$

pri čemu može da se zamisli da je tačka A na levoj ploči, a tačka B na desnoj ploči. Rastojanje između tačaka A i B odgovara rastojanju između ploča, d . Uvrštavajući izraze (2.14) i (2.15) u izraz (2.13) dobija se izraz za kapacitivnost vazdušnog pločastog kondenzatora, prikazanog na slici 2.20,

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d}. \quad (2.16)$$

Ukoliko se između ploča umesto vakuuma ili vazduha postavi dielektrik, tada je u svim prethodnim izrazima potrebno umesto ε_0 staviti ε . Tako je, na primer, električno polje unutar kondenzatora sa dielektrikom permitivnosti ε dato izrazom

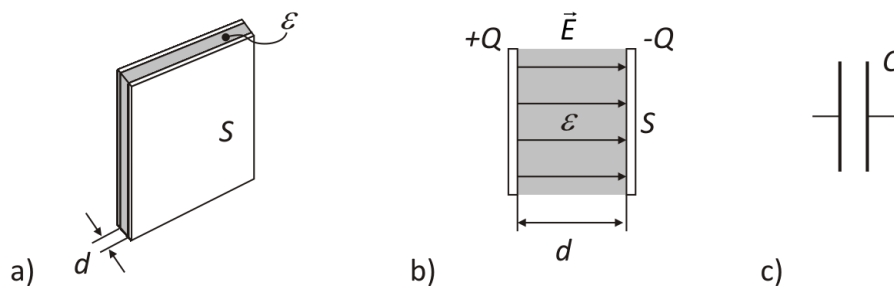
$$E = \frac{Q}{\varepsilon S} = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}. \quad (2.17)$$

Kako je napon između ploča

$$U = Ed, \quad (2.18)$$

to znači da kapacitivnost kondenzatora sa dielektrikom iznosi:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}, \quad \varepsilon_r \geq 1. \quad (2.19)$$



2.21 Pločasti kondenzator, električno polje pločastog kondenzatora i simbol kondenzatora.

Iako se kapacitivnost definiše kao odnos količine naelektrisanja i napona, ona ne zavisi ni od naelektrisanja ni od napona, već isključivo od dimenzija ploča, rastojanja i permitivnosti materijala koji se nalazi između ploča.

Primer 2.5

Izračunati kapacitivnost kondenzatora čije su ploče, dimenzija 2cm sa 3cm, na rastojanju 2 mm, ako je između ploča: a) vazduh, b) guma relativne permitivnosti 70.

Rešenje. Površina ploča je $S = 6 \text{ cm}^2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Rastojanje je $d = 2 \text{ mm} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Kapacitivnost vazdušnog kondenzatora je

$$C_0 = \varepsilon_0 S / d = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 10^{-4} / 2 \cdot 10^{-3} = 26,5 \cdot 10^{-13} \text{ F} = 2,65 \text{ pF}.$$

Kapacitivnost kondenzatora sa gumom je

$$C_g = \varepsilon_0 \varepsilon_r S / d = \varepsilon_r C_0 = 70 \cdot 26,5 \cdot 10^{-13} = 1858 \cdot 10^{-13} \text{ F} = 186 \text{ pF}. \blacksquare$$

Primer 2.6

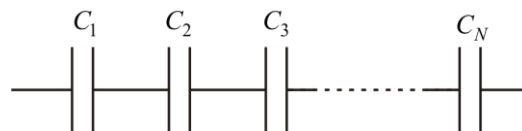
Izračunati maksimalni napon između ploča kondenzatora čije su ploče na rastojanju 2 mm, ako je između ploča dielektrik čija je električna čvrstina 15 kV/cm.

Rešenje. Električna čvrstina predstavlja najveću vrednost električnog polja u dielektriku a da ne dođe do njegovog proboja, odnosno $E_{\max} = E_{\epsilon} = 15 \text{ kV/cm}$. Polazeći od izraza (2.18) sledi da je maksimalni napon $U_{\max} = E_{\max} d$. Uvrštavanjem brojnih vrednosti sledi da je maksimalni napon 3 kV. ■

2.6.2. Redna i paralelna veza kondenzatora

Kondenzatore je u električnim kolima moguće povezivati na više načina: redno, paralelno i mešovito. Na slici 2.22 je prikazana redna veza kondenzatora. U električnim kolima je moguće više redno vezanih kondenzatora zameniti sa jednim kondenzatorom čija se kapacitivnost C_{ekv} određuje pomoću izraza

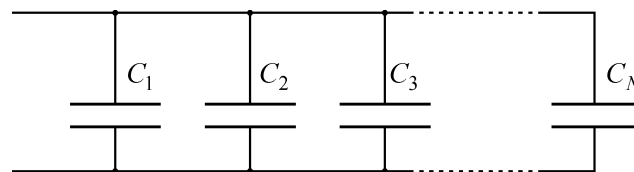
$$\frac{1}{C_{ekv}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N} \quad (2.20)$$



2.22 Redna veza kondenzatora.

Na slici 2.23 je prikazana paralelna veza kondenzatora. U električnim kolima je moguće više paralelno vezanih kondenzatora zameniti sa jednim kondenzatorom čija se kapacitivnost C_{ekv} određuje pomoću izraza

$$C_{ekv} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N \quad (2.21)$$



2.23 Paralelna veza kondenzatora.

Primer 2.7

Izračunati ekvivalentnu kapacitivnost redne veze tri kondenzatora kapacitivnosti $C_1 = 20 \text{ pF}$, $C_2 = 20 \text{ pF}$ i $C_3 = 10 \text{ pF}$.

Rešenje.

$$\frac{1}{C_{ekv}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{10} = \frac{1+1+2}{20} = \frac{4}{20} \Rightarrow C_{ekv} = \frac{20}{4} = 5 \text{ pF.} \blacksquare$$

Primer 2.8

Izračunati ekvivalentnu kapacitivnost paralelne veze tri kondenzatora kapacitivnosti $C_1 = 20 \text{ pF}$, $C_2 = 20 \text{ pF}$ i $C_3 = 10 \text{ pF}$.

Rešenje.

$$C_{ekv} = C_1 + C_2 + C_3 = 20 + 20 + 10 = 50 \text{ pF.} \blacksquare$$

2.7. Energija kondenzatora

Naelektrisanje ploča kondenzatora se vrši priključivanjem kondenzatora na izvor električne energije, na primer na bateriju. Pri tome, naelektrisanja iz baterije prelaze na ploče kondenzatora. Prenosjenje naelektrisanja predstavlja rad. Na kraju procesa prenošenja naelektrisanja (punjenja kondenzatora) možemo da kažemo da kondenzator poseduje energiju jednaku tom utrošenom radu. Ta energija se zove električna energija, obeležava se sa W_e , a jedinica je džul (J).

Ta energija može da se izračuna na sledeći način. Naelektrisane ploče deluju električnom silom jedna na drugu. Jedna ploča želi da privuče drugu ploču silom

$$F = QE, \quad (2.22)$$

gde je Q naelektrisanje jedne od ploča a E električno polje koje stvara druga ploča. Električno polje jedne ploče je dva puta manje od polja koje stvaraju dve ploče, odnosno $E = Q / (2\epsilon S)$. Kada bi leva ploča mogla da privuče desnu ploču tada bi se izvršio rad $A = Fd$, gde je d rastojanje između ploča. Taj rad bi izvršilo električno polje na račun energije W_e koju poseduje električno polje. Prema tome

$$W_e = A = Q \frac{Q}{2\epsilon S} d. \quad (2.23)$$

Uvrštavajući izraze (2.17) i (2.18) u izraz (2.23) energija sadržana u kondenzatoru se određuje pomoću izraza

$$W_e = \frac{1}{2} QU. \quad (2.24)$$

Jedinica za energiju je džul (J).

Ukoliko se ploče kondenzatora priključe na bateriju (izvor naelektrisanja), tada se ploče naelektrisu, a napon između ploča postane jednak naponu baterije. Za takav kondenzator se kaže da je napunjen, i da sadrži energiju W_e . Ukoliko se kondenzator odvoji od baterije, količina naelektrisanja, napon i energija ostaju nepromenjeni. To znači da kondenzatori mogu da akumuliraju i čuvaju električnu energiju. Ukoliko se na kondenzator priključi neki prijemnik (sijalica), tada će naelektrisanja napustiti ploče kondenzatora. Ploče će se razelektrisati $Q = 0$ i napon između ploča će biti jednak nuli, $U = 0$. Kondenzator je pri tome svoju električnu energiju W_e predao prijemniku nakon čega se ispraznio tako da je na kraju $W_e = 0$.

Primer 2.9

Ako je na kondenzatoru, koji je napunjen električnom energijom $100 \mu\text{J}$, napon između ploča 10 V , odrediti količinu naelektrisanja na pločama i kapacitivnost kondenzatora.

Rešenje. Količina naelektrisanja na pločama može da se odredi na osnovu izraza (2.24), tako da je $Q = 2W_e / U$. Uvrštavanjem brojni vrednosti dobija se $Q = 2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 2 \text{ mC}$. Kapacitivnost kondenzatora je jednaka $C = Q / U = 0,5 \text{ mF} = 500 \mu\text{F}$. ■

Primer 2.10

Koliko puta će se promeniti kapacitivnost a koliko puta energija kondenzatora ako se napon poveća 3 puta.

Rešenje. Kapacitivnost ne zavisi ni od napona ni od količine naelektrisanja, već isključivo od dimenzija ploča, rastojanja i permitivnosti dielektrika. To znači da se kapacitivnost neće promeniti. Količina naelektrisanja će se povećati 3 puta, zato što je $Q = CU$. Energija će se povećati 9 puta. ■