

10. Prevodnik v električnem polju

Vsebina poglavja: prevodnik v zunanem električnem polju, površina prevodnika je ekvipotencialna ploskev, elektrostaticna indukcija (influenca), polje znotraj votline prevodnika, Faradayeva kletka, prevodnik z nabojem v luknji prevodnika, električno polje na površini prevodnika, sila na površinski naboj.

Že v prejšnjem poglavju smo ugotovili, da polja znotraj žile koaksialnega kabla ni, niti ga ni znotraj prevodnega oklopa koaksialnega kabla. Ali je to le posledica simetrične porazdelitve naboja in uporabe Gaussovega zakona, ali je to splošna lastnost prevodnikov? Odgovor dobimo z razmislekom o lastnostih prevodnikov: dober prevodnik ima to lastnost, da je tudi v primeru nevtralnosti (brez presežkov naboja) mnogo elektronov, ki so zelo šibko vezani na jedro, kar pomeni, da jih že najmanjše zunanje polje lahko premakne iz ravnovesne lege.

Prevodnik v zunanem električnem polju. Tisti trenutek, ko prevodnik postavimo v zunanje električno polje \vec{E}_{zunanje} , na vse naboje v prevodniku deluje električna sila, v skladu z zvezo $\vec{F} = Q\vec{E}$. Prosti oziroma šibko vezani elektroni se pomaknejo v nasprotni smeri polja (ker so negativnega predznaka) do roba prevodnika.* Koliko pa se jih pomakne? Toliko, kolikor »zahteva« zunanje polje, oziroma toliko, da se vzpostavi novo stacionarno stanje, v katerem je znotraj prevodnika polje enako nič. Kaj pa ostane tam, kjer so prej bili elektroni, pa so se zaradi delovanja zunanjega polja odmaknili? Ostane primanjkljaj elektronov, torej presežek števila protonov nad elektroni, kar deluje kot pozitiven naboj.

Očitno bodo premaknjeni naboji delovali (delujejo) z lastnim električnim poljem \vec{E}_{nabojev} tako, da bo električno polje v prevodniku $\vec{E}_{\text{v prevodniku}} = \vec{E}_{\text{zunanjih nabojev}} + \vec{E}_{\text{nabojev na površini p.}} = 0$.

$$\vec{E}_{\text{v prevodniku}} = 0$$

SLIKA: a) V zunanje polje vstavimo prevodnik. b) Po (hitrem) prehodnem pojavu pride do prerazporeditve naboja (presežka elektronov na eni strani in pomanjkanja na drugi strani) tako, da je polje znotraj prevodnika enako nič.

Polje znotraj (pa tudi v okolici) polprevodnika se spremeni ob prerazporeditvi naboja v prevodniku, saj na polje vplivajo tudi prerazporejeni naboji.

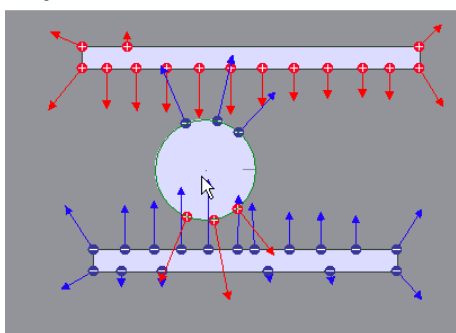
* V resnici elektron ne prepotuje celotne razdalje od enega roba do drugega roba prevodnika pač pa se elektroni le zamaknejo med samo. Povprečna hitrost elektronov v prevodniku je relativno počasna (reda) in ji rečemo tudi hitrost drifta, saj med prenosom trkajo z atomi v prevodniku tako, da njihova pot ni premočrtna pač pa se le v povprečju gibljejo v nasprotni smeri polja. Prerazporeditev, ki smo ji priča, ko vstavimo prevodnik v polje pa je skoraj hipna. Več o prevajanju v prevodnikih bomo govorili v poglavju o tokovnem polju (poglavje 24).

Površina polprevodnika je ekvipotencialna ploskev.

Če je polje znotraj prevodnika enako nič, potem bo tudi napetost med poljubnima dvema točkama znotraj prevodnika enaka nič, saj velja $U_{12} = \int_{T_1}^{T_2} \vec{E} \cdot d\vec{l}$. To pa tudi pomeni, da imajo vse točke v in na površini prevodnika enak potencial. V tem smislu rečemo, da je površina prevodnika ekvipotencialna ploskev.

Polje na nevtraln prevodno telo.

Če deluje polje na nevtraln prevodno telo, pride znotraj tega telesa do prerazporeditve elektronov, ki se premaknejo v smeri polja in pustijo za sabo pomanjkanje elektronov oz. pozitiven naboj. Presežkov pozitivnega naboja je enako veliko kot prerazporejenih elektronov, tako, da je vsota vseh nabojev znotraj telesa še vedno enaka nič. Prerazporeditvi naboja rečemo **elektrostatična indukcija** ali tudi **influenca**.

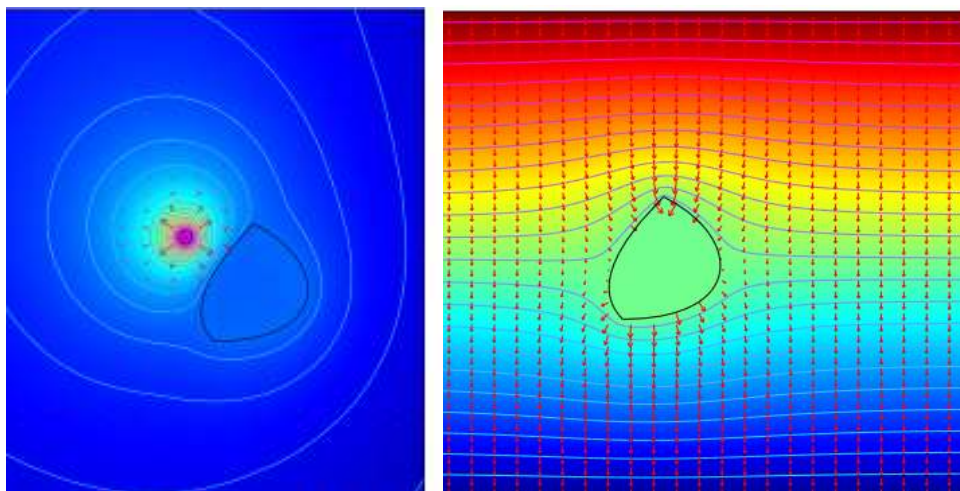


Simulacija elektrostatične indukcije s programom Jacob.
<http://jacob.fe.uni-lj.si>

SLIKA: Proces prerazporeditve nabojev zaradi delovanja zunanjega polja imenujemo elektrostatična indukcija.

Ali je polje znotraj votline prevodnika v kateri ni nabojev različno od nič?

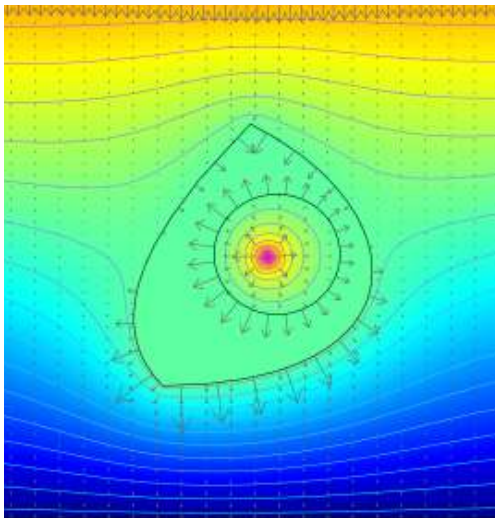
Če bi to polje obstajalo, potem bi imeli znotraj votline prevodnika ekvipotencialne ploskve in po Gaussovem zakonu bi morali z integracijo polja okoli ekvipotencialne ploskve dobiti množino zaobjetega naboja. Ker pa tega ni, je tudi polje znotraj votline prevodnika enako nič.



SLIKA: Levo prevodnik v nehomogenem električnem polju, desno prevodnik v homogenem električnem polju. V barvah je prikazana velikost potenciala, z linijami ekvipotencialne ploskve in s puščicami električno polje.

Kaj pa, če je poleg zunanjega polja naboj tudi v votlini prevodnika? Ali je tudi v tem primeru polje v notranjosti prevodnika enako nič?

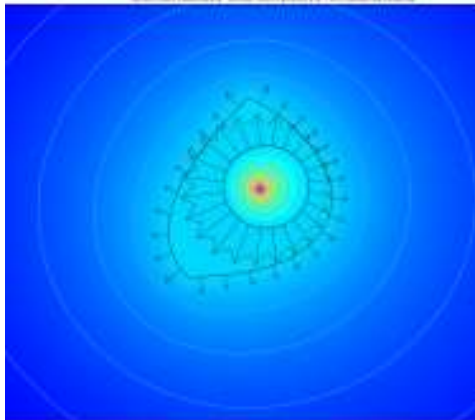
Odgovor je da, saj če bi se v notranjosti prevodnika nahajal naboj in polje, bi naboje premaknilo v smeri, ki jo diktira zunanje polje, npr. v smeri naboja v votlini prevodnika. Če zapišemo Gaussov stavek po prevodniku v okolici votline, hitro ugotovimo, da mora biti na notranji površini prevodnika (ob votlini) enaka množina naboja kot v votlini. Prav tako mora biti enaka množina naboja tudi na zunanji površini prevodnika, saj je prevodnik nevtralen. Ni pa nujno, da je na zunanji površini le naboj nasprotnega predznaka, saj je potrebno upoštevati še zunanje polje.



SLIKA: Levo: Prevodnik v homogenem polju z luknjo v kateri se nahaja naboj. V barvah je prikazana velikost potenciala, z linijami ekvipotencialne ploskve in s puščicami električno polje. Desno: porazdelitev naboja po površini prevodnika z luknjo v primeru, ko se v luknji nahaja naboj.

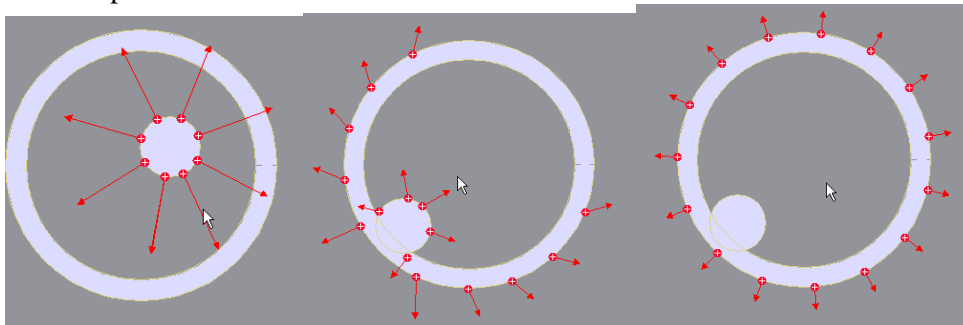
Kaj pa če ni zunanjega polja? Če je torej naboj le v luknji, ki jo obkroža prevodnik.

V tem primeru bo tudi prišlo do elektrostatične indukcije. Na notranji površini se bo induciral naboj nasprotnega predznaka kot je v luknji, na zunanji površini se pa v smislu indukcije nakopiči naboj enakega predznaka kot je v luknji. Kaj pa polje v zunanosti prevodnika? Vpliv polja naboja v luknji in naboja na notranji površini prevodnika se izničita, ostane le polje na zunanji površini prevodnika, ki je enakega predznaka in velikosti kot naboj v luknji. Ta bo povzročil polje v okolici. Če je prevodnika sferične oblike, bo polje v zunanosti enako polju, ki bi ga povzročal točkasti naboj v središču sfere.



SLIKA: Levo: Prevodnik z luknjo v kateri se nahaja naboj. V barvah je prikazana velikost potenciala, z linijami ekvipotencialne ploskve in s puščicami električno polje. Desno: porazdelitev naboja v prevodniku z luknjo v kateri se nahaja naboj.

Faradayeva kletka. Ugotovili smo že, da se v izvotljenem prevodniku postavljenem v zunanje električno polje vzpostavijo take razmere, da na površini prevodnika pride do prerazporeditve naboja, znotraj prevodnika in tudi v votlini pa je polje enako nič. Če hočemo del prostora električno izolirati od okolice, ga moramo torej prevleči s prevodnikom, ki ga običajno ozemljimo. Omeniti velja, da je taka zaščita popolna za elektrostatično (enosmerno) polje, za časovno spremenljivo pa ne popolnoma, odvisno od frekvence motenj in debeline zaščitne plasti*.



SLIKA: Proces prenosa naboja iz notranjega prevodnika na zunanje ob dotiku.

Električno polje na površini prevodnika.

Ugotovili smo že, da je površina prevodnika ekvipotencialna ploskev. To tudi pomeni, da na površini ne more obstajati komponenta polja, ki je usmerjena vzdolž površine prevodnika. Taki komponenti rečemo tangencialna komponenta, pravokotno na površino pa je normalna komponenta. Če bi tangencialna komponenta polja obstajala, bi to polje delovalo na šibko vezane elektrone v kovini in jih premaknila v novo ravnovesno lego. Velja torej:

$$E_{t, \text{na površini prevodnika}} = 0.$$

Poleg tega smo na treh primerih (ploščati, valjni in krogelni kondenzator) ugotovili, da je polje na površini prevodnika enako σ/ϵ_0 . Ali to velja splošno? DA. Polje na površini polprevodnika je usmerjeno v smeri normale na površino in je enako[†]

$$\vec{E}_{\text{na površini prevodnika}} = \vec{e}_n \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$$

SLIKA: Polje na površini prevodnika.

* Znano je, da avto smatramo kot precej varnega pred udarom strele, ker je njegova karoserija iz prevodnika. Podobno velja za letala, kjer pa je kljub temu potrebna pazljiva dodatna zaščita elektronike pred udari strel. Poleg tega so moderna letala lahko zgrajena iz neprevodnih kompozitnih materialov (zaradi večje trdote in manjše teže), ki jim je ravno zaradi nevarnosti strel potrebno vgraditi dodatno prevodno plast.

[†] Za bolj natančno razlago glej A.R.Sinigoj: Osnove elektromagnetike.



Faradayeva kletka učinkovito varuje ne le pred elektrostatičnim poljem, pač pa tudi dinamičnim. Neučinkovita je le pri magnetostatičnem polju.
<http://tesladownder.com/>

Razlika med poljem naelektrene ravnine in poljem na površini prevodnika.

Za polje naelektrene ravnine smo ugotovili, da je enako $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ in kaže v smeri pravokotno na ravnino. Tik nad površino prevodnika lahko vpliv nabojev na polje razdelimo na dva dela. En del polja prispevajo naboji na površini, ti prispevajo polja $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$, vsi ostali naboji pa tudi toliko, zato je polje na površini naelektrenega prevodnika enako $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$.

SLIKA: Vpliv nabojev na prevodniku na skupno električno poljsko jakost v točki na prevodniku.

* **Sila na naboj na površini prevodnika.** Če je na površini prevodnika električno polje, mora na naboje na površini (na telo) delovati sila v skladu z izrazom $\vec{F} = Q\vec{E}$. Upoštevati je potrebno električno polje na naboje σ na površini prevodnika, ki je posledica ostalih nabojev na prevodniku. To polje je enako polovici celotnega polja na površini prevodnika* oz. $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$.

Sila na naboje σ je ploskovna sila (ali pritisk) in je enaka $\vec{f}_e = \vec{e}_n \frac{\sigma^2}{2\epsilon_0}$. Celotno silo na objekt

pa bi dobili z integracijo ploskovne sile po celotni površini $\vec{F}_e = \frac{1}{2\epsilon_0} \int_A \sigma^2 \cdot d\vec{A}$.

Vprašanja za obnovo:

1. Koliko je polje znotraj prevodnika v električnem polju in zakaj?
2. Kako imenujemo proces prerazporeditve naboja?
3. Kako se prerazporedijo naboji v prevodniku, če je v njem luknja, v luknji pa je (ali ni) naboj?
4. Razloži princip delovanja Faradayeve kletke.
5. Kolikšni sta tangencialna in normalna komponenta polja na površini prevodnika?
6. Ali (in kako) se spremeni polje izven prevodnika ob vnosa prevodnika v prostor z električnim poljem?

Za raziskovalce:

* Drugače povedano, električna poljska jakost na površini prevodnika velja pravzaprav tik nad površino, medtem, ko je električna poljska jakost na naboje σ na površini prevodnika enaka povprečni jakosti v

notranjosti in zunanosti: Ker je v notranjosti polje enako nič, je polje na mestu nabojev enako $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$.