1.1 Stacionarno električno polje

Stacionarno električno polje je ono polje koje vlada među naelektrisanjima u stacionarnom kretanju. Stacionarnost kretanja se ogleda u tome što je srednja makroskopska brzina naelektrisanih čestica u svakom trenutku i na svakom mjestu (gdje postoji stacionarni tok) ista po intenzitetu, pravcu i smjeru.

Kao i svaki drugi strujni tok tako i stacionarni stvara u okolnoj sredini magnetno polje i to stacionarno magnetno polje. Otuda je opravdano govoriti o stacionarnom elektromagnetnom polju kao cjelini. Međutim, kako smo ranije utvrdili, veza između stacionarnog električnog i stacionarnog magnetnog polja je relativno slaba veza, što je i omogućilo da se ova dva polja nezavisno tretiraju.

Diferencijalne jednačine koje zadovoljavaju stacionarno električno polje dobijaju se iz opštih Maksvelovih jednačina uz uslov da su vremenski izvodi jednaki nuli, te se one svode na oblik

$$\mathrm{rot}\,\vec{E} = 0 \tag{1}$$

$$\mathrm{div}\,\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \tag{2}$$

Po svojoj formi ove jednačine koje definišu stacionarno električno polje identične su onim jednačinama koje definišu elektrostatičko polje. Međutim, suštinska razlika među njima je u tome što elektrostatičko polje ne može da egzistira u provodnoj sredini. Matematički se ova razlika izražava relacijom

$$\vec{J} \neq 0 \tag{3}$$

Što znači da stacionarno električno polje postoji u provodnoj sredini

$$\vec{E}_{stac} = \frac{\vec{J}}{\sigma} \tag{4}$$

1.1.1 Stacionarno električno polje u provodnoj sredini

Osnovna jednačina u provodnoj sredini glasi

$$\mathrm{div}\,\vec{E} = +\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{5}$$

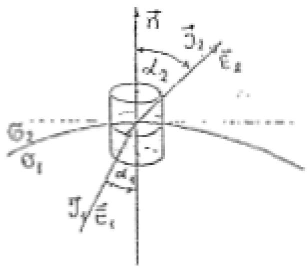
Odnosno, kako je $\vec{E} = -\mathrm{grad}\,V$, a $\mathrm{div}(\mathrm{grad}\,V) = \Delta V$, te je

$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{6}$$

A ovo je poznata Poasonova diferencijalna jednačina, koja se u slučaju $\rho = 0$ uprošćava i svodi na Laplasovu diferencijalnu jednačinu

$$\Delta V = 0 \tag{7}$$

Razmotrimo, sada, granične uslove na razdvojnoj površini između dvije različite provodne



sredine (σ_1 , σ_2). Naime, neka stacionarni strujni tok teče iz prve u drugu sredinu (vidi sliku). Tok nailazi pod uglom α_1 u odnosu na normalu granične površine. Zbog diskontinuiteta u provodnosti ovih sredina doći će do prelamanja strujnih linija pod uglom α_2 u odnosu na istu normalu. Uočimo u graničnoj oblasti jedan mali valjak čije baze ΔS leže u različitim sredinama a visina toga valjka $\Delta h \to 0$. Pretpostavimo da na graničnoj površini nema slobodnih naelektrisanja $\rho = 0$. Primjenom jednačine kontinuiteta u obliku

$$\oint_S \vec{J} d\vec{S} = 0 \tag{8}$$

Dobijamo granični uslov za električne komponente

$$J_{1n} = J_{2n} = J_n \text{ , odnosno} \tag{9}$$

$$\sigma_1 E_{1n} = \sigma_2 E_{2n} \text{ , odnosno} \tag{10}$$

$$\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \tag{11}$$

Ako umjesto malog valjka uočimo mali pravougaonik čije osnovice leže u različitim sredinama a visina $\Delta h \to 0$ i dobijamo sledeći odnos

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = 0 \text{ , } (\rho = 0) \tag{12}$$

$$E_{1t} = E_{2t} \tag{13}$$

Zakon prelamanja sada glasi

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}\alpha_2} = \frac{\dfrac{E_{1t}}{E_{1n}}}{\dfrac{E_{2t}}{E_{2n}}} = \frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \tag{14}$$

Jednačina kontinuiteta u diferencijalnoj formi, kao što znamo, glasi (za $\rho \neq 0$):

$$\operatorname{div} \vec{J} = \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{15}$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \rho / \varepsilon \text{ (za linearne sredine)} \tag{16}$$

S druge strane, Omov zakon u najopštijem obliku glasi

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_{st}) \tag{17}$$

Za $\sigma = const$ (homogena i izotropna sredina) gornji izraz daje

$$\operatorname{div}\vec{J} = \operatorname{div}\sigma(\vec{E}+\vec{E}_{st}) = 0 \qquad (18)$$

(jer je $J = const$ za stacionarna strujanja), odnosno

$$\operatorname{div}\vec{E} + \operatorname{div}\vec{E}_{st} = 0 \qquad (19)$$

$$\operatorname{div}\vec{E} = -\operatorname{div}\vec{E}_{st} \qquad (20)$$

$$\rho = -\varepsilon \operatorname{div}\vec{E}_{st} \qquad (21)$$

Ovo je izraz za slobodno naelektrisanje u stacionarnom strujom toku.

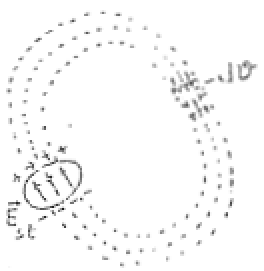
Gdje dolazi do gomilanja slobodnog naelektrisanja u stacionarnom toku?

Očigledno, prema gornjem izrazu, u samom izvoru!

Međutim, tamo gdje nema izvora, tj tamo gdje je $E_{st} = 0$ važi da je i $\rho = 0$.

Kako sve ovo da shvatimo?

Prije svega, kad god posmatramo neki element zapremine $d\upsilon$ unutar neke provodne



sredine onda se stacionarnost strujnog toka sastoji u tome da u svakom vremenskom trenutku uočeni element napušta određena količina slobodnog naelektrisanja, ali da u istom tom trenutku na mjestu tih naelektrisanja dolaze nova u istoj količini i u istom rasporedu, tako da je ukupna količina naelektrisanja u elementu $d\upsilon$ konstantna veličina ($\rho = const$). (Koliko izađe toliko naelektrisanja i uđe.) A pošto je provodna sredina prvobitno bila nenaelektrisana proizilazi da je ukupno naelektrisanje (slobodno), u posmatranom domenu, i svakom trenutku isto!

Gdje još može da dođe do gomilanja elektriciteta (slobodnog) u stacionarnom strujnom toku?

U tom cilju posmatrajmo tačke odnosno domen $d\upsilon$ van izvora. Tada iz

$$\operatorname{div}\sigma(\vec{E}+\vec{E}_{st}) = 0 \text{ , slijedi} \qquad (22)$$

$$\operatorname{div}\sigma\vec{E} = 0 \qquad (23)$$

Sada napravimo ovakvu pretpostavku: neka je

$$\sigma \neq const \qquad (24)$$

Dakle, sredina je nehomogena te je σ neka funkcija. U tom slučaju iz pretposljednje relacije slijedi

$$\sigma \operatorname{div}\vec{E} + \vec{E}\operatorname{grad}\sigma = 0 \qquad (25)$$

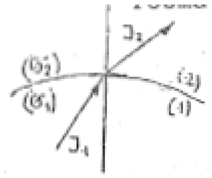
$$\operatorname{div}\vec{E} = -\frac{\vec{E}}{\sigma}\operatorname{grad}\sigma \qquad \Rightarrow \qquad (26)$$

$$\rho = -(\varepsilon/\sigma)\vec{E}\operatorname{grad}\sigma \qquad (27)$$

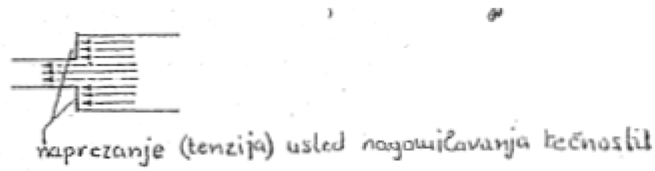
Ovo je izraz za gustinu slobodnog naelektrisanja na onom mjestu gdje je $\sigma \neq const$!

Znači, na mjestima nehomogenosti, tj na mjestima gdje je $\sigma \neq const$ dolazi do gomilanja slobodnog naelektrisanja! Tipičan primjer takvog nehomogenog mjesta jeste dodirna površina između dvije provodne sredine.

Zašto, fizički gledano, dolazi do gomilanja elektriciteta?



Posmatrajmo strujni tok (stacionarni) usmjeren od sredine (1) ka sredini (2). Sredine su različitih provodnosti σ_1 i σ_2, što znači da je broj slobodnih naelektrisanja po jedinici zapremine <u>različit</u>. To opet znači da jedno te isto polje ne stvara isti (stacionarni) tok struje. Tako će u prvoj sredini biti $J_1 = \sigma_1 E$, a u drugoj $J_2 = \sigma_2 E$. Dakle, $J_1 \neq J_2$! Ta razlika naelektrisanja <u>**mora se zadržati na granici**</u>. (analogno primjeru iz hidrodinamike kada tečnost struji iz šire u užu posudu, vidi sliku)



Kolika je gustina naelektrisanja η nagomilanog na granici?

Slično kao i u Elektrostatici i ovdje možemo pisati

$$\eta = D_{2n} - D_{1n} \tag{28}$$

$$\eta = \varepsilon_2 E_{2n} - \varepsilon_1 E_{1n} \tag{29}$$

$$\eta = \varepsilon_2 \frac{J_{2n}}{\sigma_2} - \varepsilon_1 \frac{J_{1n}}{\sigma_1} \tag{30}$$

$$J_{2n} = J_{1n} = J_n \tag{31}$$

$$\eta = (\frac{\varepsilon_2}{\sigma_2} - \frac{\varepsilon_1}{\sigma_1}) J_n \tag{32}$$

Površinska gustina izdvojenog slobodnog naelektrisanja na granici dvije homogene sredine (površina diskontinuiteta) može imati značajnu vrijednost ako se parametri sredina bitno međusobno razlikuju!

1.1.2 Analogija između elektrostatičkog i stacionarnog električnog polja u slabo provodnoj sredini

Da se može ustanoviti analogija između elektrostatičkog i stacionarnog električnog poja vidi se iz samih Maksvelovih jednačina

$$\mathrm{rot}\,\vec{E} = 0 \tag{33}$$

$$\mathrm{div}\,\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \tag{34}$$

Koje važe za obje vrste polja. Međutim, razlikuju se granični uslovi (koji inače i određuju rješenje diferencijalne jednačine)!

Osnovna karakteristika elektrostatičkog polja, kao što znamo, jeste da je uvijek tangencijalna komponenta polja jednaka nuli; tj

$$E_t = 0 \tag{35}$$

Što nije slučaj kod stacionarnog električnog polja. Naime, stacionarno električno polje zadovoljava istu (Laplasovu) diferencijalnu jednačinu ($\Delta V = 0$), ali granica između dvije sredine različitih provodnosti **nije ekvipotencijalna**, jer je

$$E_t \neq 0 \ ! \tag{36}$$

Ovo ima za posledicu da je

$$V_1 - V_2 = \int_1^2 \vec{E}d\vec{l} = \int_1^2 E_t dl \neq 0 \tag{37}$$

$$V_1 \neq V_2 \ ! \tag{38}$$

Možemo zaključiti: u opštem slučaju stacionarnog električnog polja u ma kakvoj sredini **ne možemo** uspostaviti analogiju između stacionarnog električnog polja i elektrostatičkog polja.

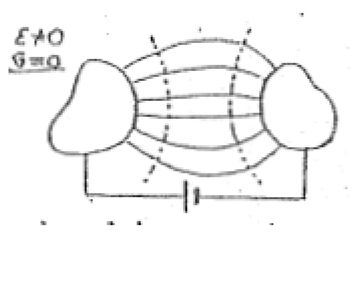
Razmotrimo sada jedan poseban slučaj, tj slučaj $\sigma_1 \gg \sigma_2$. Naime, posmatrajmo stacionarni strujni tok iz jedne dobro provodne sredine (kakav je metal) u neku drugu, slabo provodnu sredinu (kakva je zemlja ili elektrolit). Tada ćemo imati

$$\mathrm{tg}\,\alpha_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}\mathrm{tg}\,\alpha_1 \tag{39}$$

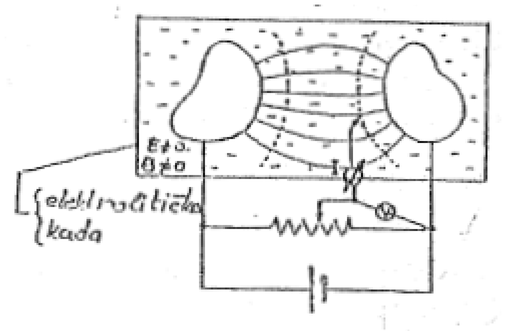
A ovaj izraz teži nuli kad $\sigma_2 \to 0$, te i

$$\alpha_2 \to 0 \ ! \tag{40}$$

Ovo znači da linije stacionarnog električnog polja izlaze pod **pravim** uglom iz dobro provodne sredine u slabo provodnu sredinu. drugim riječima, metalna elektroda u slabo provodnoj sredini je ekvipotencijalna.



Prema tome, ako dvije metalne elektrode, postavljene u dielektričnoj sredini ($\varepsilon \neq 0, \sigma = 0$), priključimo na izvor konstantnog napona (vidi sliku), imaćemo tipičan slučaj elektrostatičkog polja među elektrodama oko njih.

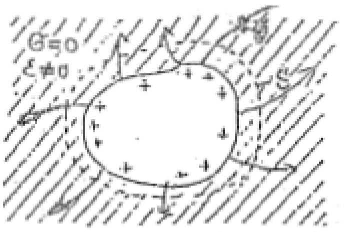


Ako, međutim, isti ovaj sistem uronimo u neku slabo provodnu sredinu (na primjer elektrolit), među elektrodama će se uspostaviti stacionarni strujni tok. Linije struje će isticati odnosno uticati pod pravim uglom u odnosu na metalnu površinu elektroda. Drugim riječima, linije stacionarnog električnog polja biće <u>gotovo</u> identične linijama elektrostatičkog polja toga istog sistema prije njegovog uranjanja u elektrolit.

Ovu analogiju sa elektrostatičkim poljem koristimo praktično u onim slučajevima kada su elektrode složenog geometrijskog oblika a želimo da snimimo oblik linije polja. Snimanje se vidi iz prethodne slike. Za neki napon U_1 očitan instrumentom V, tražimo pomoću indikatora I sve one tačke u polju u kojima je struja jednaka nuli. Skup ovakvih tačaka koje odgovaraju nekom naponu U_1, čini ekvipotencijalnu liniju. Isti postupak se sprovede za neku drugu vrijednost napona U , na primjer U_2, itd

Analogiju sa elektrostatičkim poljem možemo iskoristiti i u slučaju koaksijalnog kabla, kao i u slučaju oklopljenog trožilnog kabla koja nam omogućava da, na osnovu dosadašnjih saznanja, vrlo jednostavno dođemo do oblika polja i u tim slučajevima.

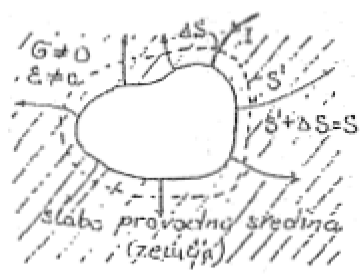
Analogiju između elektrostatičkog i stacionarnog polja možemo iskoristiti i na još jedan način, na primjer, za izračunavanje otpora slabo provodne sredine. Evo i na koji način.



Neka je data metalna elektroda vezana na dugi provodnik (kroz koji protiče struja). Ako je elektroda (vidi sliku) smještena u nekom dobrom dielektriku ($\sigma = 0, \varepsilon \neq 0$), provodnik će dovesti elektrodu na neki potencijal. tako ćemo dobiti jedan slučaj tipičnog elektrostatičkog polja. Ta ovo polje možemo pisati

$$Q = CU = \text{(Gausova teorema)} = \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \varepsilon \oint_S \vec{E} d\vec{S} \qquad (41)$$

Ako istu ovu elektrodu, sada, uronimo u neku slabo provodnu sredinu (pri čemu je elektroda i dalje napajana dugim izolovanim provodnikom), polje oko ove elektrode biće gotovo identično sa prethodnim. Naime, kroz površinu elektrode oticaće struja u okolnu sredinu, jer je $\sigma \neq 0$ iako vrlo malo. S druge strane, čim imamo proticanje struje kroz neki sistem onda možemo govoriti i o otpornosti toga sistema $R = U / I$. Uočimo da je površina elektrode S približno ista sa površinom S', tj $S = S'$, a zatim primijenimo



zakon o konzervaciji elektriciteta, pa je

$$\oint_S \vec{J}d\vec{S} = 0 \ ; \ S = S' + \Delta S \tag{42}$$

$$\int_{S'} \vec{J}d\vec{S} + \int_{\Delta S} \vec{J}d\vec{S} = 0 \tag{43}$$

$$\int_{S'} \vec{J}d\vec{S} = -\int_{\Delta S} \vec{J}d\vec{S} = -(-I) = I \tag{44}$$

$$I = \frac{U}{R} = \int_{S'} \vec{J}d\vec{S} \approx \oint_S \vec{J}d\vec{S} \,?= \sigma \oint_S \vec{E}d\vec{S} \tag{45}$$

(iz gornje relacije koristimo vrijednost integrala). Konačno dobijamo:

$$\frac{U}{R} = \sigma \frac{CU}{\varepsilon} \qquad \Rightarrow \qquad RC = \frac{\varepsilon}{\sigma} \tag{46}$$

Dakle, postupak izračunavanja slabo provodne sredine svodi se na sledeće: Najprije se dati sistem elektroda smjesti u idealni dielektrik. (Kapacitet sistema ili možemo izračunati unaprijed ili ga možemo izmjeriti.) Zatim dati sistem postavimo u slabo provodnu sredinu koju karakteriše izvjesna otpornost proticanja strujnog toka. Tu otpornost izračunavamo po gornjoj formuli.

Na primjer, u slučaju koaksijalnog kabla imaćemo

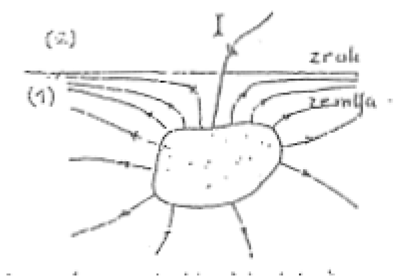
$$C = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\frac{b}{a}} \tag{47}$$

$$R = \frac{1}{C}\frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{\varepsilon}{\sigma}\frac{\ln\frac{b}{a}}{2\pi\varepsilon l} = \frac{\ln\frac{b}{a}}{2\pi\sigma l} \tag{48}$$

($R \to \infty$ kad $\sigma \to 0$)

1.1.3 Metod ogledanja kod stacionarnog električnog polja

A. **Opšti principi**. Neka je data, na primjer, nekakva elektroda (metalno tijelo) postavljena u zemlji, kao na slici. Neka se elektroda napaja tankim izolovanim provodnikom kroz koji protiče struja I. Sa elektrode naelektrisanje će se kretati u svim pravcima kroz slabo provodnu sredinu. interesantno bi bilo pitanje: kakav je položaj ovih silnica (strujnih linija) u odnosu na površinu



zemlje (granična površina)? Logično je potražiti pomoć od graničnih uslova! Naime, granični uslov daje relaciju

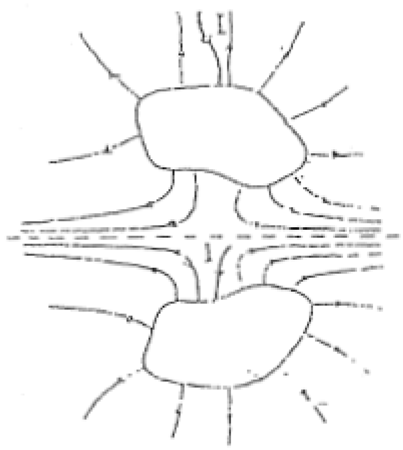
$$J_{1n} = J_{2n} \tag{49}$$

Za svaki elementarni valjak na graničnoj površini. A sada problem uprošćavamo smatrajući daje vazduh idealan dielektrik, što je, realno gledano, i opravdano, s obzirom da je provodnost zemlje mnogo veća! Ovakav rezon ima za posledicu

$$J_{2n} = 0 \tag{50}$$

Što, opet, uzrokuje i ovakvu posledicu

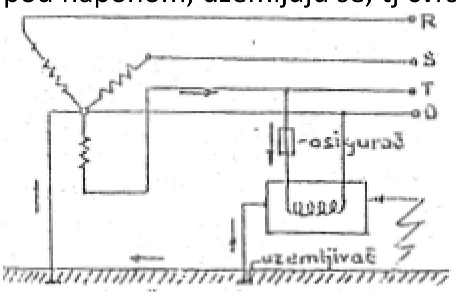
$$J_{1n} = 0 \tag{51}$$



Dakle, stacionarne linije „klize“ uz površinu zemlje. Odnosno, jedan dio strujnih linija tj struje teče po površini zemlje. Odnosno, površina zemlje nije ekvitpotecijalna površina!

Primijenimo na ovaj slučaj metodu ogledanja (i to u odnosu na ravnu površinu). Kao što smo ranije utvrdili, horizontalnu graničnu ravan zamjenjujemo likom. U našem slučaju lik je ista takva elektroda simetrično postavljena u odnosu na graničnu ravan. Lik-elektroda se takođe napaja strujom I čiji je smjer ka liku. (Dakle, nije bitno da li smo tanki provodnik sa strujom I nacrtali simetrično stvarnom provodniku, već je bitno da je struja I zadržala i kod lika isti smjer, tj ka liku.) U ovom se ogleda i različitost metode ogledanja kod stacionarnog polja od iste kod elektrostatičkog polja, gdje je lik bio suprotnog znaka.

B. **Uzemljivači**. Svi metalni djelovi električnih uređaja koji u normalnom režimu rada nijesu pod naponom, uzemljuju se, tj čvrsto se galvanski vežu za sistem metalnih tijela postavljanih u zemlju. Ovaj sistem metalnih tijela postavljen u zemlju zove se uzemljivač.

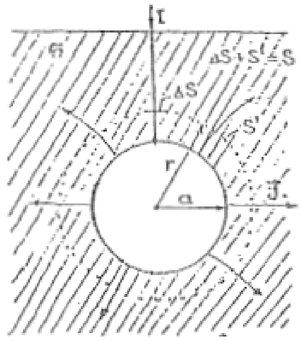


Evo šta je njegova svrha.

U toku eksploatacije nekog električnog uređaja može se desiti da, usled nekog unutrašnjeg kvara, dođe do kratkog spoja između aktivnih djelova uređaja (djelova koji su pod naponom u eksploataciji) i ostalih metalnih djelova, kao što su oklop i slično. Ako oklop ne bi bio uzemljen postojala bi opasnost po život svih onih lica koja bi iz bilo kog razloga, došla u dodir sa ovakvim uređajem. Da bi se ovakva opasnost otklonila u praksi se postupa ovako.

Svi metalni djelovi uređaja koji nijesu aktivni u eksploataciji uzemljuju se. (Uzemljuje se i zvjezdište izvora.) osim toga, na ulazu u uređaj postavljeni su brzo topljivi osigurači. Kada aktivni element dođe u kratak spoj sa metalnim oklopom (a ovaj je uzemljen) u strujnom kolu se uspostavi takozvana struja kratkog spoja koja uvijek ima višestruko veću vrijednost od nominalne struje (struje u eksploataciji). Ovako velika struja u trenutku istopi osigurač i strujno kolo biva trenutno prekinuto. Struja kratkog spoja se preko oklopa uređaja odvodi na uzemljivač, a preko ovog u zemlju. Jasno je da uzemljivač mora imati što manji otpor. U praksi, mali otpor uzemljivača često nije jednostavno postići, jer on zavisi i od specifične otpornosti okolnog tla. Ukoliko je tlo vlažnije utoliko je uzemljenje bolje.

Problem dobrog uzemljivača je veliki praktični problem. U principu, uzemljivač može biti u obliku metalnih šipki ili ploča, zaštićen od korozije. Međutim, najčešće se izvodi ipak u vidu dugih gvozdenih traka, pocinčanih zbog korozije, postavljenih na dubini od oko 1 metra.



1. Primjer. Sferni uzemljivač duboko u zemlji. To je, u stvari, metalna sfera poluprečnika a. Zašto naglašavamo da je ta sfera duboko u zemlji? Iz prethodnog izlaganja odgovor je prost: ako bismo sferu postavili plitko morali bismo uzeti u obzir i zakrivljenost linija polja $\vec{J}$, a to znači da bismo morali uvoditi <u>lik</u> datoj elektrodi.

Da bismo izračunali otpornost ovog uzemljivača polazimo od zakona o konzervaciji elektriciteta

$$\oint_S \vec{J}d\vec{S} = 0 \tag{52}$$

$$\int_{\Delta S} \vec{J}d\vec{S} + \int_{S'} \vec{J}d\vec{S} = 0 \tag{53}$$

$$-I + \int_{S'} \vec{J}d\vec{S} = 0 \tag{54}$$

$$I = \int_{S'} \vec{J}d\vec{S} = J\int_{S'} dS \approx J4\pi r^2\pi \tag{55}$$

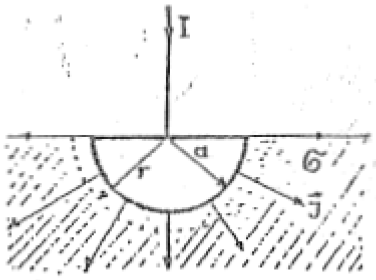
$$J = \frac{I}{4r^2\pi} \ , \ E = \frac{J}{\sigma} = \frac{I}{4r^2\pi\sigma} \tag{56}$$

$$U = \int_a^\infty \vec{E}d\vec{l} = \int_a^\infty Edr = \frac{I}{4\pi\sigma}\int_a^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{I}{4\pi\sigma a} \tag{57}$$

$$R_{uz} = \frac{U}{I} = \frac{1}{4\pi\sigma a} \tag{58}$$

Analizirajući ovaj izraz zapažamo da što je σ veće to je R_{uz} manje, i što su dimenzije elektrode veće R_{uz} je manje.

2. Primjer. Polusferni uzemljivač. U ovom slučaju je važno uočiti da površina zemlje <u>ne utiče</u> na pravac linija polja $\vec{J}$.



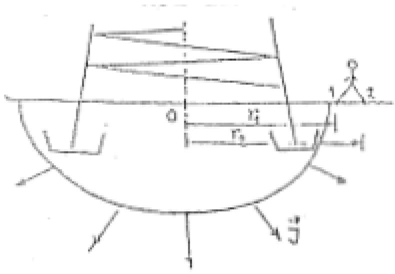
$$I = \int_S J dS = J 2 r^2 \pi \tag{59}$$

$$J = \frac{I}{2r^2\pi} \;, E = \frac{J}{\sigma} = \frac{I}{2\pi\sigma r^2} \tag{60}$$

$$U = \int_a^{\infty} E dr = \frac{I}{2\pi\sigma a} \tag{61}$$

$$R_{uz} = \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi\sigma a} \tag{62}$$

Dakle, pri istoj struji I otpornost polusfernog uzemljivača je duplo veća.



Kod dalekovoda kao uzemljivač koriste se prstenaste trake (pošto je beton vrlo loš provodnik). Ovakav uzemljivač može se aproksimirati, na zadovoljavajući način, sa polusfernim uzemljivačem.

Kada je riječ o dalekovodu onda je u tijesnoj vezi sa njim i pojam takozvanog napona koraka. Ovaj pojam biće objašnjen u sledećoj tački, a ovdje samo napomenimo činjenicu da je iskustvo utvrdilo da napon koraka ne smije preći vrijednost od 125 V!

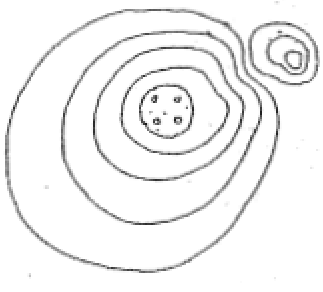
C. Napon koraka. U slučaju kvara na dalekovodu (zemljospoj) uzemljivačem protiču vrlo jake struje, reda kA. Za vrijeme zemljospoja u zemlji vladaju velike potencijalne razlike (jako električno polje).

Izračunajmo potencijalnu razliku između dviju tačaka koje se nalaze na rastojanjima r_1 i r_2 od ose stuba (na kome se desio zemljospoj).

$$U_{12} = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{I}{2\pi\sigma r^2} dr = \frac{I}{2\pi\sigma} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{I}{2\pi\sigma} \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} = I a R_{uz} \frac{\Delta r}{r^2} \tag{63}$$

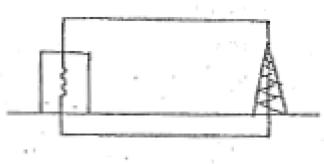
Ako je struja jaka, a otpor nije baš mali, između dviju tačaka u okolini stuba vlada velika potencijalna razlika. Ako je Δr dužina ljudskog koraka (0,7m) osoba je izložena opasnosti!

Kao što smo u uvodnoj napomeni rekli, napon koraka u velikim energetskim objektima ne smije preći vrijednost 125V (usvojeno).



Nije samo dovoljno da otpor uzemljivača bude što manji. A evo zašto. Ekvipotencijalne linije, oko temelja stuba, nijesu u stvarnosti koncentrični krugovi. Već zbog nehomogenosti zemlje (prisustvo različitih materijala kao i metalnih tijela) ekvipotencijalne linije su nepravilne. Ta nepravilnost uzrokuje zgušnjavanje istih na nekim mjestima. (Od ranije znamo, tamo gdje su linije gušće polje je jače.) Na takvim mjestima napon koraka može da poprimi opasne vrijednosti.

Dakle, nije dovoljno da su otpor uzemljivača i okolne sredine što manji, već je bitno da ne dođe do zgušnjavanja ekvipotencijalnih linija na površini zemlje oko stuba. Kako to praktično ostvariti?

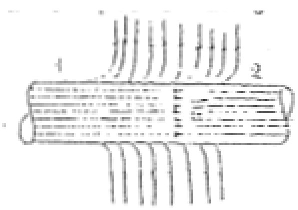


Izvrši se vještački zemljospoj, naravno sa malim naponima! (znači, simuliramo stanje kvara.) Snime se ekvipotencijalne linije. Tako se utvrdi njihovo mjesto! Na mjestu zgušnjavanja postavljaju se metalne trake čime se razbija zgusnutost ekvipotencijalnih linija.

1.1.4 Stacionarno električno polje u dielektriku

Posmatrajmo provodnik u kome je pobuđen stacionarni strujni tok a sam provodnik je smješten u dielektričnoj sredini. (I u okolnom prostoru, razumije se, vlada stacionarno električno polje.) Maksvelove jednačine u opštem obliku, primijenjene na ovaj slučaj, prelaze u ovakvu formu

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{rot}\vec{E}=0 \\ \operatorname{div}\vec{E}=0 \end{aligned}\right\} \quad \text{odnosno} \quad \left\{\begin{aligned} \vec{E}&=-\operatorname{grad}V \\ \Delta V&=0 \end{aligned}\right. \tag{64}$$



Dakle, stacionarno električno polje unutar okolnog dielektrika zadovoljava iste jednačine kao i elektrostatičko polje. Koja je onda bitna razlika među njima?

Još ranije smo istakli da su linije elektrostatičkog polja normalne na površinu provodnika što je imalo za posledicu da je ta ista površina ekvipotencijalna. (Dakle, granični uslovi nijesu isti!)

Kod stacionarnog električnog polja postoji i tangencijalna komponenta polja,

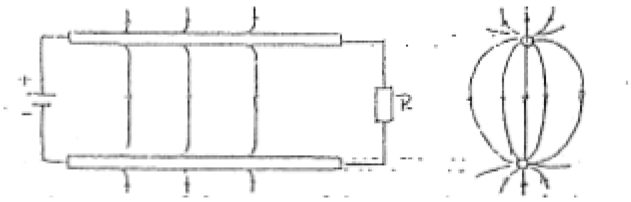
$$E_t=\frac{J_t}{\sigma} \tag{65}$$

Ona postoji kako na površini provodnika tako i u vazduhu (dielektriku). U odnosu na normalnu komponentu

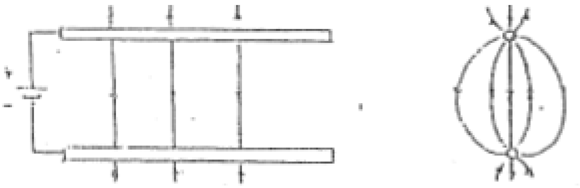
$$E_n=\frac{J_n}{\sigma} \tag{66}$$

tangencijalna komponenta je mnogo manja po svom intenzitetu, tako da je i zakrivljenje linija polja, u graničnoj oblasti, praktično zanemarljivo.

Zato, ako posmatramo ovakav primjer stacionarnog polja:



I uporedimo njegovo polje sa poljem ovakvog sistema (elektrostatičkog)



Možemo, bez velike greške, konstatovati da su ova dva polja <u>ista</u>. Razlika je jedino u tome što, u ovom drugom slučaju polje $\vec{E}$ egzistira i u provodniku ($\vec{E}_t$) koje uslovljava potencijalnu razliku između ma koje dvije tačke naa površini provodnika, tj

$$U_{12} = \int_1^2 \vec{E}d\vec{l} = \int_1^2 E_t dl = V_1 - V_2 \qquad \Rightarrow \quad V_1 > V_2 \tag{67}$$

Na kraju, možemo izvesti ovakav zaključak: kako je tangencijalna komponenta stacionarnog električnog polja mala, te je i zakrivljenje polja $\vec{E}$ malo, to se praktično može uzeti da je oblik stacionarnog polja u okolinom dielektriku <u>isti</u> kao i elektrostatičkog polja, tj istog oblika kao i polje koje je postojalo i ranije, prije uspostavljanja struje.

Napomena: da su provodnici male provodnosti ova zakrivljenost bi bila velika!