



Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Specifična upornost zemlje

Seminarska naloga za predmet **Razdelilna in industrijska omrežja**

Poročilo izdelal: **Luka Strnad**

Mentor: prof. dr. Grega Bizjak

Študijsko leto **2016/17**



Povzetek

V seminarski nalogi sem predstavil specifično upornost zemlje, njene karakteristične vrednosti in kako jo izračunamo. Opisal sem metode s katerimi merimo specifično upornost in sicer metodo posredne meritve s pomočjo treh sond, merjenje specifične upornosti tal s pomočjo štirih sond ter Wennerjevo metodo merjenja specifične upornosti tal. Vključil sem tudi udarno upornost.

Ključne besede: specifična upornost zemlje, meritvene metode, udarna upornost.



Kazalo

1. Uvod.....	1
1.1. Ponikalna upornost	1
1.2. Specifična upornost zemlje.....	1
2. Izhodišče za določanje specifične upornosti zemlje	5
3. Merilne metode za določanje specifične upornosti tal.....	6
3.1. Metoda posredne meritve s pomočjo treh sond	8
3.2. Merjenje specifične upornosti zemlje s pomočjo štirih sond	9
3.3. Wennerjeva metoda merjenja specifične upornosti zemlje	11
3.4. Določitev specifične upornosti dvoplastne zemlje	13
4. Vrste ozemljil in izračun njihovih ozemljilnih upornosti.....	15
4.1. Površinska ozemljila.....	15
4.2. Palična ozemljila.....	15
4.3. Obročasta ozemljila	16
4.4. Temeljska ozemljila.....	16
5. Udarna upornost zemlje	17
6. Vprašanja in naloga.....	20
7. Viri	21



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko
Laboratorij za razsvetljavo in fotometrijo
Razdelilna in industrijska omrežja

Luka Strnad, dipl. inž. el. (UN)
luka.strnad6@gmail.com



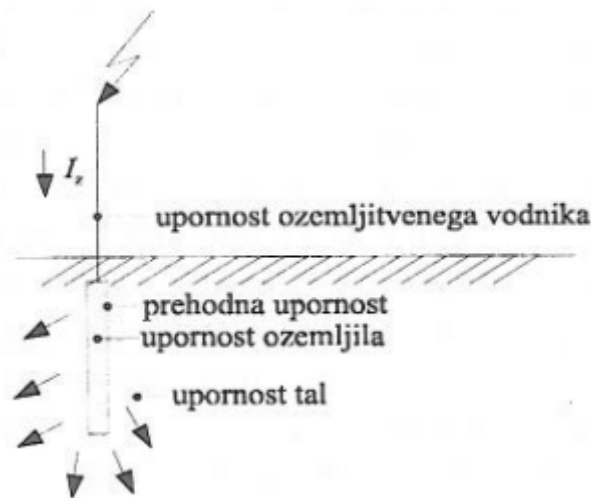
1. Uvod

Pri obravnavi geoelektričnih lastnosti tal sta najpomembnejši veličini ponikalna upornost in specifična upornost zemlje. [1]

1.1. Ponikalna upornost

Ponikalna upornost ozemljila je značilna lastnost ozemljila. Ozemljilo je naprava oz. konstrukcija, ki povezuje umetne prevodne dele z zemljo. Ponikalno upornost nekega ozemljila izračunamo tako, da padec napetosti na ozemljilu delimo z zemljostičnim tokom. Če natančneje pogledamo, ugotovimo, da sestoji iz[1]:

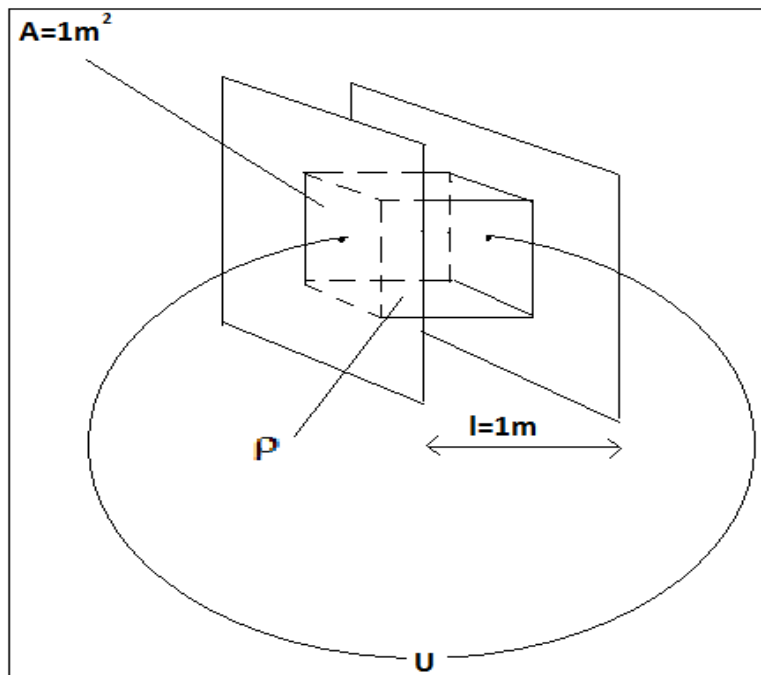
- upornosti ozemljitvenega voda
- upornosti ozemljila
- prehodne upornosti
- upornosti zemlje.



Slika 1: Posamezne upornosti, ki tvorijo ponikalno upornost [1]

1.2. Specifična upornost zemlje

Zaradi lažjega razumevanja je dogovorjeno, da je specifična upornost zemlje, podana za navidezno kocko, sestavljeno iz kompaktnega in homogenega materiala, s stranicami 1m (slika 2).



Slika 2: Model za specifično upornost zemlje

Na dveh nasprotnih ploskvah te kocke naj bosta nameščeni dve kovinski plošči. Plošči naj bosta na medsebojni razdalji 1m, vsaka plošča naj ima površino 1m^2 . Zaradi pritisnjene napetosti teče po homogenem materialu (zemlji) med ploščama električni tok, ki ga definira pritisnjena napetost in uporovni material. Sestava tal je zaradi geoloških plasti na različnih globinah različna in nehomogena, zato je točna določitev specifične upornosti tal ne nekem širšem obravnavanem prostoru zelo težavna. Predpostavimo, da gre za homogeno zemljo in znane dimenzije, tako lahko zapišemo izraz za definiranje specifične upornosti zemlje[2]:

$$\rho_z = \frac{U_p \cdot A_p}{I \cdot l_{hk}} \left[\frac{V \cdot m^2}{A \cdot m} = \Omega m \right]$$

Kjer je:

A_p površina prevodne zemlje (1m^2),

I električni tok (A),

l_{hk} višina modela kocke zemlje (m),

U_p napetost med ploščama (V),

ρ_z specifična upornost zemlje (Ωm).

Glede na celotni presek zemlje in površino prevajanja električnega toka, postane zemlja zelo dober prevodnik električnega toka, saj se tokovnice porazdelijo in je že nekaj metrov od vstopne elektrode (ozemljila) gostota toka skozi zemljo zelo majhna.

Sposobnost prevajanja električnega toka zemlji omogočajo različne kemične soli, ki so lahko kisle, bazične ali nevtralne. Tudi vlažnost zemlje je ključnega pomena pri prevajanju



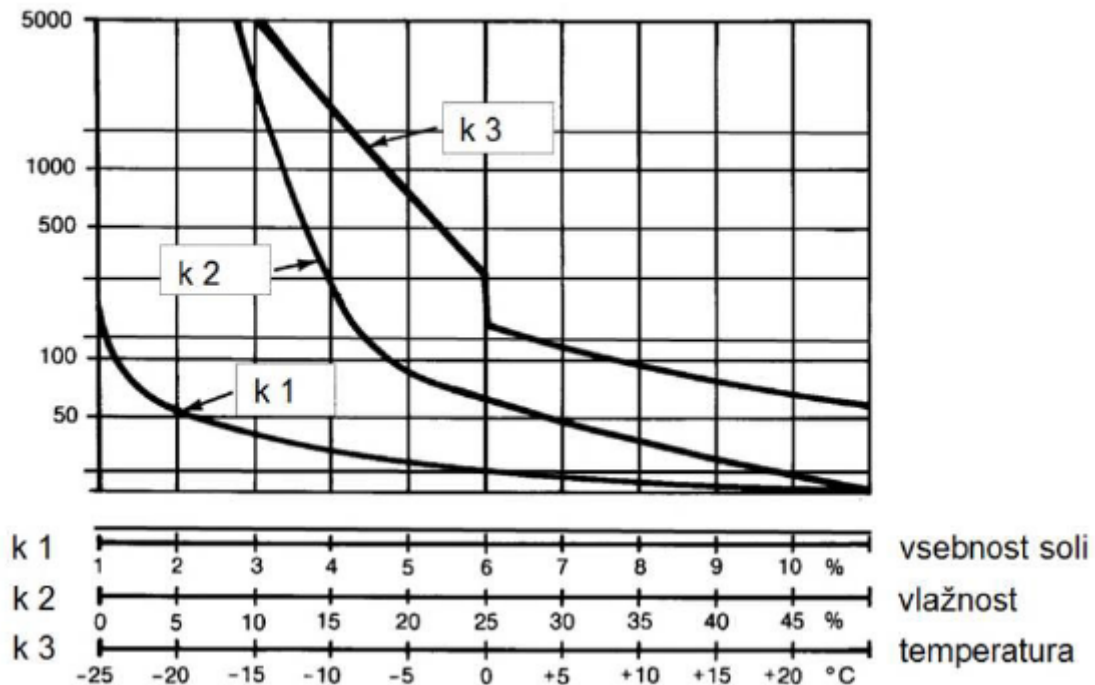
električnega toka, saj ima suha zemlja vlogo izolatorja. V primeru kristalizacije molekul se ob zmrzali specifična električna upornost zemlje zelo poveča. Že zelo majhne količine soli v kombinaciji z vlago tvorijo elektrolit, ki je sposoben prevajati električni tok. Na prevodnost zemlje vpliva tudi velikost zrnastih elementov sestavine zemlje, njena kompaktnost in vsebnost kamnin. Kamnine imajo zelo veliko upornost, zato skozi njih električni tok teče izredno slabo, kot lahko vidimo v preglednici 1[2].

Preglednica 1: Specifične upornosti kovin in različnih sestavin zemlje.

vrsta prevodne snovi	specifična upornost (Ωm)	vrsta prevodne snovi	specifična upornost (Ωm)
Aluminij	$2,26 \times 10^{-8}$	Lapor	50-70
Baker	$1,59 \times 10^{-8}$	Peščenec	75-90
Cink	$5,64 \times 10^{-8}$	Kremenčev pesek, kremen	90-120
Železo	$8,53 \times 10^{-8}$	Kamnita prst	125-230
Kositer	$10,48 \times 10^{-8}$	Čisti kremenčev pesek	250-320
Svinec	$19,8 \times 10^{-8}$	Prod v podtalnici	230-340
Nemagnetna jekla	69×10^{-8}	Prod nad višino podtalnice	620-700
Magnetna jekla	57×10^{-8}	Apnenec	600-800
Morska voda	1-10	Čisti ledeniški pesek	1200-1800
Ilovica in glina	20-35	Kompaktna skala, beton	1500-3000
Šota	25-40	Granit marmor	5000-100000

V zemlji z veliko kamenja električni tok v večini teče le po vmesnem prevodnem prostoru. Močan vpliv na specifično upornost zemlje imajo tudi letni časi, toda izključno le zaradi različne vlažnosti ali temperatur pod lediščem. Temperatura vpliva na specifično upornost zemlje torej le posredno in le na vrhno plast zemlje. Ob visokih zunanjih temperaturah in vetrovnem vremenu se vrhna plast zemlje hitro izsuši, s tem pa se poveča tudi specifična upornost zemlje. Pri temperaturah pod lediščem lahko vrhna plast zemlje (do globine 0,7 m) zmrzne, s tem se zelo poveča specifična upornost in posledično zemlja slabo prevaja električni tok. Slika 3 kaže odvisnost spreminjanja specifične upornosti peščenjaka, pomešanega z ilovico, glede na delež vsebnosti različnih soli (k_1), vlažnost zemlje (k_2) in glede na okoliško temperaturo (k_3)[2].

Specifična upornost (Ωm)



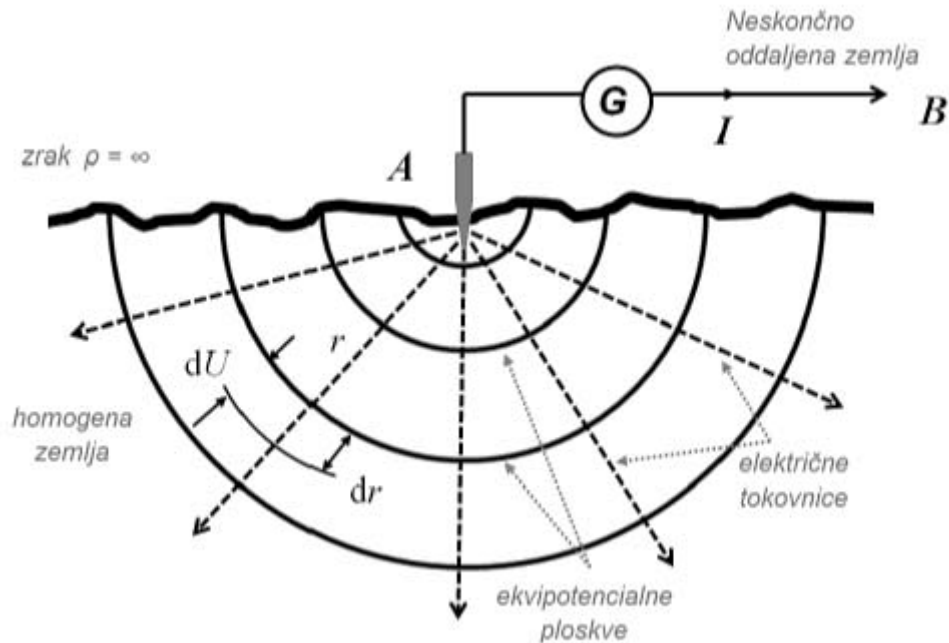
Slika 3: Krivulje sprememb specifične upornosti zemlje v odvisnosti od soli, vlažnosti in temperature

Krivulja velja le za opisan material zemlje, drugačna sestava zemlje ima drugačno obliko krivulj. Vrhnja plast tal (do globine 3 m) je ponavadi dokaj homogena kot posledica erozije kamnin, rečnih naplavin, humusa v gozdovih ali obdelovalne rodovitne plasti na določenem področju. Pri meritvah specifične upornosti zemlje do globine 1 m je ugotovljeno, da je kljub izjemni izsušenosti vrhnje plasti zemlje (do 0,4 m), na globini 0,8 m zemlja še vedno primerno vlažna in lahko učinkovito prevaja električni tok[2].

Pri obravnavanju vrhnje plasti zemlje privzamemo, da je obravnavano območje homogeno in tudi obvladljivo z meritvami. Pri obravnavanju globljih plasti pa homogenosti zemlje ne moremo pričakovati, saj trase daljnovodov potekajo po obširnem področju, kjer je veliko različnih struktur zemlje. Zaradi tega je treba specifično upornost zemlje določiti s primernimi metodami za določitev dvoplastnega modela, narejenih na podlagi podatkov, pridobljenih z meritvami. V primeru, da bi zemljo za analizo pridobivali z geološkimi vrtnami, rezultati analize ne bi bili pravilni, saj bi z vrtnanjem porušili kompaktnost zemlje. Podatke o specifični upornosti zemlje potrebujemo zaradi izračuna in načrtovanja ponikalne upornosti ozemljil, saj je le-ta odvisna od geometrije ozemljila in predvsem od specifične upornosti zemlje na mestu prehoda toka v ozemljilo[2].

2. Izhodišče za določanje specifične upornosti zemlje

Predpostavimo, da v zemljo skozi plitko zabito tokovno sondo teče električni tok med točkama A in B in povzroči v zemlji polkrogelne ekvipotencialne ploskve, kot kaže slika 4.



Slika 4: Ekvipotencialne ploskve pri prehodu toka skozi zemljo.

V okolici sonde se zaradi prehoda toka skozi zemljo vzpostavi potencial. Tokovnice električnega toka so pravokotne na navidezne ekvipotencialne ploskve, ki nastajajo kot posledica porazdelitve vsote padcev napetosti na uporovnem materialu oziroma zemlji. Na neki razdalji dr nastane ustrezen diferencial padca napetosti dU , kot je razvidno iz slike 4. Gostota toka J se porazdeli po preseku zemlje tako, da lahko za tok I skozi polkroglo zapišemo izraz [2]:

$$I = \frac{dU}{(\rho_z \cdot dr) / (2 \cdot \pi \cdot r^2)} \Rightarrow \frac{2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dU}{\rho_z \cdot dr},$$

po preureditvi izraza dobimo novo obliko:

$$dU = \frac{\rho_z \cdot I \cdot dr}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \Rightarrow U = \frac{\rho_z \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^r \frac{dr}{r^2}$$



Iz obeh izrazov je razvidno, da lahko glede na specifično upornost homogene zemlje v vsaki izbrani točki izrazimo napetost v določeni točki zemlje, ki je oddaljena od mesta vrinjenega toka I za razdaljo r :

$$U = \frac{\rho_z \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Izraz lahko preuredimo in dobimo osnovo za določitev specifične upornosti zemlje po sliki 4 z izrazom:

$$\rho_z = \frac{U \cdot 2\pi \cdot r}{I} \quad [\Omega\text{m}]$$

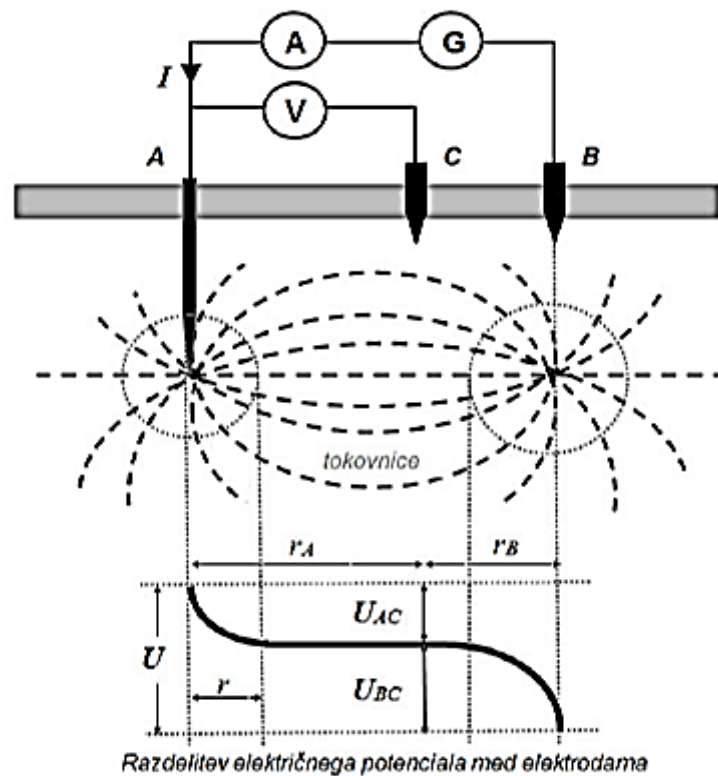
Pri homogeni zemlji steče približno polovica električnega toka do globine, ki je enaka dvakratni razdalji med razmaknjenimi tokovnimi sondami, skozi kateri ob meritvi vsilimo v zemljo električni tok. Če v takšni geološki tvorbi obstaja na majhnem področju zemlja ali kamnina z višjo specifično upornostjo, bo električni tok tekkel po lažji poti v okolici te električne ovire in sicer po zemlji z nižjo specifično upornostjo. Zvišanje potencialne razlike med dvema točkama zemlje ob prevajanju toka se pri meritvi posredno odraža kot povečana specifična upornost. [2]

3. Merilne metode za določanje specifične upornosti tal

Na mestu merjenja specifične upornosti v zemljo vrinemo električni tok, kot kaže slika 5. Na neki medsebojni razdalji v zemljo zabijemo sonde v točkah A in B. Napetost oz. razliko potencialov iz točke A ali iz B lahko določimo na vsaki razdalji med njima. Potencial v neki točki C je odvisen od razdalje r_A in r_B , kot je razvidno iz izraza:

$$V = \frac{I \cdot \rho_z}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

Iz tega izraza so razvite tudi druge metode za merjenje specifične upornosti zemlje.



Slika 5: Meritev specifične upornosti zemlje s pomočjo cevne vertikalnega ozemljila.

Za merjenje specifične upornosti zemlje poznamo merilne metode s tremi sondami in merilne metode s štirimi sondami. Vsem metodam je skupno, da je za pravilen rezultat potrebno izvesti več meritev. Meritve je potrebno izvesti tudi v različnih smereh in z različno medsebojno razporeditvijo merilnih sond[2].

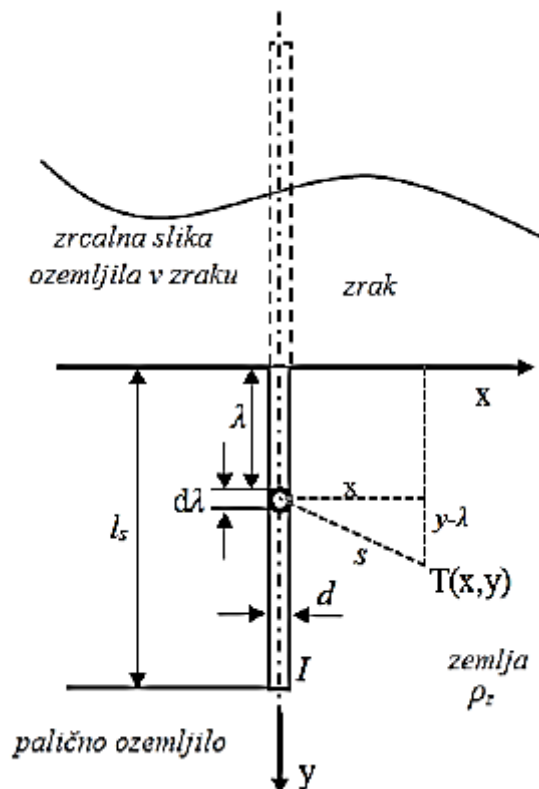
Za merjenje uporabljamo merilno opremo, katere primer je prikazan na sliki 6. Na sliki je ozemljitveni tester Fluke 1625, ki lahko opravlja vse vrste meritev upornosti tal. Popoln set sestavljajo tester, komplet dveh vodnikov, treh kolutov z žico, dveh merilnih klešč in štirih paličastih ozemljil.[3]



Slika 6: Merilna oprema za merjenje specifične upornosti.[3]

3.1. Metoda posredne meritve s pomočjo treh sond

Metoda posredne meritve s pomočjo treh sond temelji na merjenju ponikalne upornosti cevastega ozemljila, zabitega v zemljo. Metodo in shemo vezave kaže slika 5. Okrogla kovinska cev, dolžine 2 do 6 m, je zabita navpično v zemljo in služi kot tokovna sonda »A«. Tu prehaja električni tok v zemljo. Tokovna sonda »B« bi morala biti po teoriji neskončno daleč, v praksi pa vsaj za faktor 10 v primerjavi z dolžino l_s tokovne sonde »A«, če gledamo sliko 7.



Slika 7: Osnova za izračun potenciala v okolici paličnega ozemljila.

Tokovna sonda »B« je kovinska palica, zabita vsaj 0,5 m globoko v zemljo. Za merjenje potenciala potrebujemo še tretjo sondo »C«, s katero na različnih mestih merimo potencial. Pri merjenju pazimo na to, da merimo v področju, kjer nismo več v potencialnem ljuaku pomožne tokovne sonde »B«. To preverimo na način, da se s spremembo lokacije sonde napetost U_{AC} ne spreminja. Če imamo dolgo zabito sondo »A« in pomožno tokovno sondo »B« na veliki medsebojni razdalji, lahko merimo potencial s sondo »C« v več smereh, pri enaki razporeditvi sond »A« in »B«.[2]

Prednost metode pri meritvah se izkaže na težko dostopnih terenih tras daljnovodov. Pri določanju specifične upornosti zemlje ρ_z gre za analitični izračun, ki izhaja iz izraza za določitev upornosti vertikalnega cevastega ozemljila. Če gledamo sliko 5, lahko iz vrednosti vrinjenega toka I in izmerjene napetosti U na nekem konstantnem območju, izračunamo upornost ozemljila R_{oz} . Pod pojmom konstantno območje pri tej meritvi razumemo območje,



ki je izven potencialnega lijaka tokovnih sond »A« in »B«. Ponikalna upornost ozemljila R_{oz} je vsota vseh upornosti, ki nasprotujejo toku zemeljskega stika, od mesta okvare skozi zemljo do mesta neskončno oddaljene zemlje. Iz znanih vrednosti sedaj lahko izpeljemo izraz za določitev specifične upornosti zemlje. V homogeni zemlji lahko za potencial, ki ga povzroči navpična palica tik pod površino zemlje, uporabimo izpeljavo za krogelno ozemljilo. Palico razdelimo na neskončno število malih kroglic $d\lambda$ in upoštevamo vpliv potenciala vsakega od teh delov vzdolž paličnega ozemljila, kot kaže slika 7. Potencial v točki »T« lahko zapišemo z nastavkom izraza [2]:

$$dV = \frac{I}{l_s} \cdot d\lambda \cdot \frac{\rho_z}{4 \cdot \pi \cdot s}$$

Palično ozemljilo je neposredno pod površino zemlje, zato moramo upoštevati tudi zrcalno sliko ozemljila v zraku, kar upoštevamo pri mejah integriranja v naslednjem izrazu:

$$V = \frac{I \cdot \rho_z}{4\pi \cdot l_s} \cdot \int_{-l_s}^{+l_s} \frac{d\lambda}{s} = \frac{I \cdot \rho_z}{4\pi \cdot l_s} \cdot \int_{-l_s}^{+l_s} \frac{d\lambda}{\sqrt{x^2 + (y - \lambda)^2}}$$

Po integriranju in preureditvi izrazov dobimo izraz za analitični izračun ponikalne upornosti vertikalno vkopane palice v homogeni zemlji. Tako lahko s preureditvijo izraza ustrezno izrazimo tudi specifično upornost zemlje ρ_z :

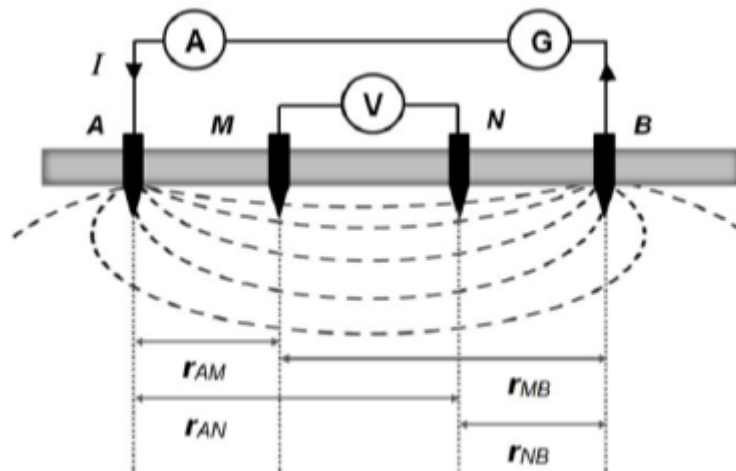
$$R_{oz} = \frac{\rho_z}{2 \cdot \pi \cdot l_s} \cdot \ln \frac{4 \cdot l_s}{d} \Rightarrow \rho_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_s}{\ln \frac{4 \cdot l_s}{d}} \cdot R_{oz}$$

3.2. Merjenje specifične upornosti zemlje s pomočjo štirih sond

Pri metodi meritve specifične upornosti zemlje s pomočjo štirih sond je uporabljeno enako teoretično izhodišče. Razlika je le v uporabi dveh tokovnih sond »A« in »B« in dveh napetostnih merilnih sond »M« in »N«. Vse sonde so enakih oblik in velikosti ter pri meritvi vse do enake globine »b« nameščene v merjeni zemlji. Meritve se izvajajo v ravni liniji pri različni medsebojni oddaljenosti merilnih sond (A, M, N, B). Globina sond »b« je odvisna od medsebojne razdalje med sondami. Po zunanjih tokovnih sondah »A« in »B« vrinemo izmenični električni tok skozi zemljo [2].

Z notranjimi sondami »M« in »N« merimo padec napetosti oz. razliko potencialov, katerega povzročata električni tok, ki teče preko zunanjih sond in preko upornosti merjene zemlje. Kako potekajo tokovnice v globino zemlje je odvisno od medsebojne razdalje med tokovnimi sondama, zato je metoda s štirimi sondami primerna za meritve specifične upornosti zemlje na različnih globinah. Na sliki 8 vidimo osnovno izhodišče za obravnavo metode merjenja s

pomočjo štirih merilnih sond. S štirižičnimi metodami ne merimo direktno specifične upornosti celotne zemlje, temveč le specifično upornost zemlje na določeni plasti, torej pri različnih globinah.



Slika 8: Izhodiščna skica za obravnavo padcev napetosti med sondama A in B.

Če poznamo specifično upornost homogene zemlje, lahko po sliki 8 zapišemo razliko potenciala med točkama »A« in »B«. Potencial zaradi vpliva tokovne sonde »A« na sondi »M« zapišemo z izrazom :

$$V_M = \frac{\rho_z \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r_{AM}}$$

Električni tok skozi obe sondi je enak, vendar nasprotno usmerjen, zato zapišemo potencial zaradi tokovne sonde »B« na sondi »M« z enačbo :

$$V_M = -\frac{\rho_z \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r_{MB}}$$

iz slednjih dveh izrazov sedaj lahko zapišemo potencial na sondi »M«, ki ga povzročata obe tokovni sondi z enačbo:

$$V_{1M} = \frac{\rho_z \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} \right)$$



enako lahko zapišemo izraz za potencial na sondi »N« :

$$V_{2N} = \frac{\rho_z \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{NB}} \right)$$

Iz zadnjih dveh enačb lahko izrazimo razliko potencialov oziroma napetost na notranjih napetostnih sondah »M« in »N« :

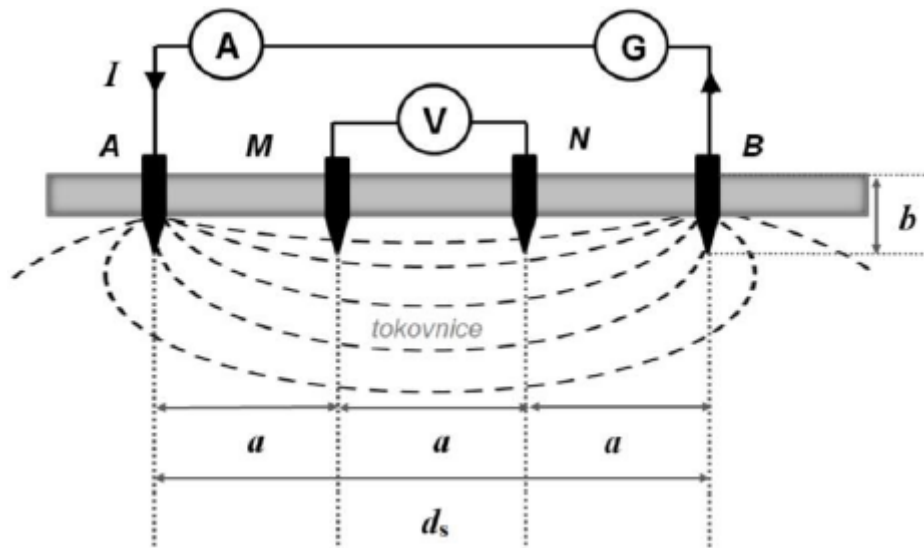
$$\Delta U_{MN} = \frac{\rho_z \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} \right) - \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{NB}} \right) \right)$$

Izraz v dvojnem oklepaju lahko poimenujemo tudi geometrijski faktor G_f , ki se spreminja z medsebojnimi razdaljami med sondami. Celoten izraz za izračun specifične upornosti zemlje po metodi štirih sond poenostavimo in dobimo izraz [2]:

$$\rho_z = \frac{\Delta U_{MN} \cdot 2 \cdot \pi}{I \cdot G_f}$$

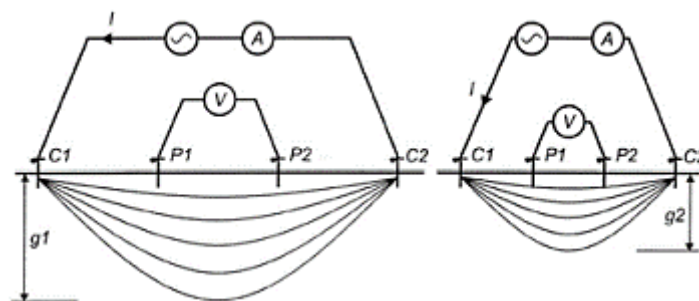
3.3. Wennerjeva metoda merjenja specifične upornosti zemlje

Wennerjeva metoda merjenja specifične upornosti zemlje je zasnovana na postavitvi štirih enakih sond premočrtno pri enaki medsebojni razdalji »a«. Sonde so zabite v zemljo do globine »b«, kot kaže slika 9 [2].



Slika 9: Merjenje specifične upornosti po Wennerjevi metodi

Z izvajanjem meritev pri različnih razdaljah med merilnimi sondami, je mogoče izmeriti specifično upornost tal na različnih globinah. Pri večjih razdaljah med sondami se merilni tok zaključuje preko globljih plasti zemlje [4], pri manjših razdaljah pa bolj preko površinskih kot lahko vidimo na Sliki 10.



Slika 10: Vpliv razmika a na zajeto globino [4]

Če je zemlja na nekem območju homogena, je doseg globine merjenja » g « približno enak razdalji med sondami » a «. Zaradi tega je meritve večkrat ponavljati pri različnih medsebojnih razdaljah sond » a « in v različnih smereh, saj tako dobimo natančnejše rezultate. Električni tok I , ki teče med zunanjsima sondama, ustvari v merjeni zemlji med notranjsima sondama na razdalji » a « napetost kot posledico razlike potencialov. Iz vrednosti toka in napetosti izračunamo upornost R , iz katere lahko izračunamo specifično upornost zemlje v globini ($g \approx a$) :

$$\rho_{(a)} = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad [\Omega\text{m}]$$

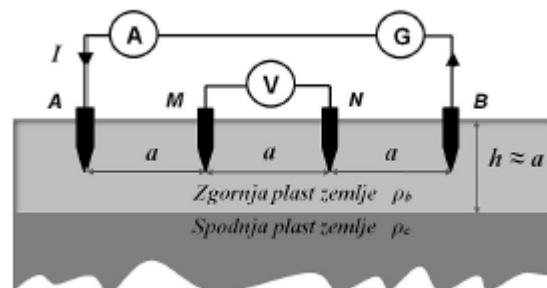
V izrazu je upoštevana tudi globina namestitve sond. Izraz lahko poenostavimo, če globina namestitve merilnih sond proti razmiku med sondami ne presega vrednosti ($20 \cdot b \leq a$):

$$\rho_{(a)} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad [\Omega \text{m}]$$

Pri razdaljah $a = 1-15$ m je potrebno sonde namestiti v globino vsaj 0,2 m. Pri medsebojnih razdaljah, večjih od 15 m, je priporočljivo sonde namestiti v globino vsaj 0,5 m. Za zanesljivo meritev velja omejitev, da mora biti globina namestitve sond ($a > 3 \cdot b$). Priporočljive medsebojne razdalje med sondami so med 2 m do 30 m. Pri izvedbi meritev moramo predvsem paziti, da so meritve izvedene v razmerah, kjer se pričakuje najslabša prevodnost zemlje do globine približno 1,5 m. Za dober rezultat je treba meritev nekajkrat ponoviti na različnih razdaljah. Kadar se izkaže nehomogenost oz. različna specifična upornost na različnih globinah, je treba postopek ponoviti tudi v smeri, ki je za kot 90° premaknjena proti prvotni smeri merjenja [2].

3.4. Določitev specifične upornosti dvoplastne zemlje

Metoda za določitev specifične upornosti zemlje temelji na medsebojni primerjavi izmerjenih in izračunanih vrednosti. V preteklosti so pri nehomogeni zemlji (slika 11) specifično upornost določali grafično, v novejšem času pa se v ta namen uporabljajo numerični postopki.



Slika 11: Model določanja dvoplastne zemlje z meritvami po Wennerjevi razporeditvi.

Osnova za primerjavo je kriterijska funkcija $\psi(\rho_b, \rho_c, h)$, ki definira relativno odstopanje med vrednostmi navideznih specifičnih upornosti, pridobljenimi po Wennerjevi metodi in izračunano specifično upornostjo po enačbi:



$$\rho_{(a)} = \rho_b \left[1 + 4 \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right) \right]$$

Kjer so :

- a*** razdalja med merilnimi sondami (m),
- b*** globina namestitve sond pri merjenju (m),
- d*** premer paličnega ozemljila ali okroglega vodnika (m),
- h*** debelina zgornje plasti zemlje (m),
- K*** faktor refleksije,
- ls*** dolžina vertikalnega ozemljila (m),
- N*** število iteracij (meritev),
- R*** ohmska upornost (Ω),
- R_{oz}*** ponikalna upornost ozemljila (Ω),
- $\rho_{(a)}$*** specifična upornost plasti v določeni globini zemlje (Ωm),
- ρ_c*** specifična upornost spodnje plasti zemlje (Ωm),
- ρ_b*** specifična upornost zgornje plasti zemlje (Ωm),
- ρ_z*** specifična upornost zemlje (Ωm).

Specifična upornost zgornje in spodnje plasti ter debelina zgornje plasti *h* se določijo z enačbami:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_b} = 1 + 4 \sum_{n=1}^m \left[\left(1 - \frac{n(1-K^2)}{2K} \right) \left(\frac{K^n}{\sqrt{A}} - \frac{K^n}{\sqrt{B}} \right) \right],$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \rho_c} = \sum_{n=1}^m \left[\left(\frac{2n}{K} (1-K^2) \right) \left(\frac{K^n}{\sqrt{A}} - \frac{K^n}{\sqrt{B}} \right) \right],$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} = \frac{16\rho_b h}{a^2} \sum_{n=1}^m \left(\frac{K^n}{\sqrt{B^3}} - \frac{K^n}{\sqrt{A^3}} \right).$$



Enačbe so osnova za programsko izračunavanje specifične upornosti dvoslojne zemlje.

4. Vrste ozemljil in izračun njihovih ozemljilnih upornosti

Glede na izvedbo ločimo globinska in površinska ozemljila, glede na obliko pa palična, ploščna, mrežasta, tračna, temeljska ozemljila, betonske armature ter kovinske vodovodne cevi in ostale vkopane konstrukcije pod določenimi pogoji.

4.1. Površinska ozemljila

Poleg temeljskih ozemljil so največkrat uporabljena vrsta ozemljil. Izvedena so z žico, trakovi ali vrvmi, vkopanimi med 0,5 in 1 m globoko. Največkrat so izvedena s trakovi. V našem okolju se za tovrstno ozemljevanje uporablja pocinkani jekleni trak 25 x 4 mm. Evropski standardi in naše tehnične smernice priporočajo za valjanec prerez 90 mm² ali masivni okrogli ali pleteni baker s prerezom 50 mm². Ponikalno upornost R_E izračunamo z enačbo:

$$R_E = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l}{d}\right)$$

Kjer so :

ρ ... specifična upornost tal [Ωm],

l ... dolžina ozemljila [m],

d ... premer ozemljila [m].

Če uporabimo trak, polovica širine traku ustreza njegovemu premeru d .

Značilnosti:

- Glede na globinska so površinska ozemljila občutljivejša na spremembe specifične upornosti površinskih plasti.
- Napetost koraka je na ploskvi, ki jo zavzame površinsko ozemljilo, manjša, na zunanjem robu pa večja.
- Površinska ozemljila so praktično uporabna za oblikovanje potenciala.

4.2. Palična ozemljila



Potekajo navpično v zemljo in so dolžine od 1 do 3 m. Ozemljilo je v obliki cevi iz jekla, katere premer je minimalno 25 mm. Standardi priporočajo, da so stene cevi minimalno debeline 2 mm. Ponikalno upornost R_E izračunamo z enačbo:

$$R_E = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l}{d}\right)$$

kjer pomeni:

ρ ... specifična upornost tal [Ωm],

l ... dolžina ozemljila [m],

d ... premer cevi [m].

4.3. Obročasta ozemljila

Za ozemljevanje zgradb najpogosteje uporabljamo obročasta ozemljila v obliki pravokotnika, narejenega iz vroče pocinkanega železnega traku, ki obkroža objekt. Pravokotna oblika je zelo priročna za priključevanje strelovodnih inštalacij. Ponikalno upornost R_E izračunamo kot:

$$R_E = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l}{d}\right)$$

kjer pomeni:

ρ ... specifična upornost tal [Ωm],

l ... dolžina ozemljila [m],

d ... premer vodnika [m].

Če uporabimo trak, polovica širine traku ustreza njegovemu premeru d .

4.4. Temeljska ozemljila

Najpogosteje jih uporabljamo v strnjenih naseljih, kjer ni prostora za obročasta ozemljila. Jekleni trak se položi direktno v betonski temelj. Beton ščiti ozemljilo pred korozijo in ker je beton ves čas vlažen, ustvarja dober stik z zemljo. Ponikalno upornost R_E izračunamo kot:

$$R_E = \frac{2 \cdot \rho}{\pi \cdot D}$$
$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot l \cdot b}{\pi}}$$

kjer pomeni:

ρ ... specifična upornost tal [Ωm],

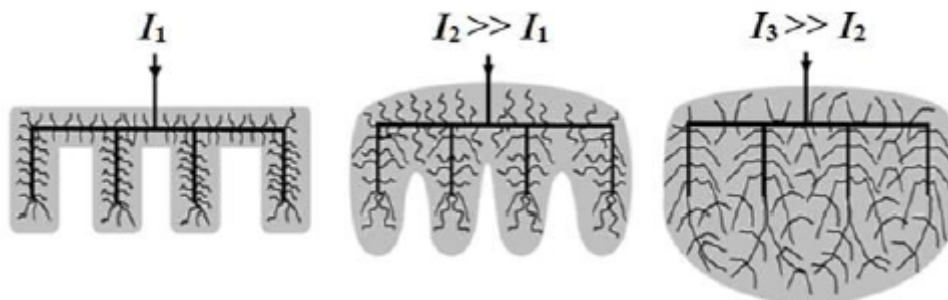
D ... premer nadomestnega ozemljila v krožni obliki [m],

l ... dolžina temeljskega ozemljila [m],

b ... širina temeljskega ozemljila [m].

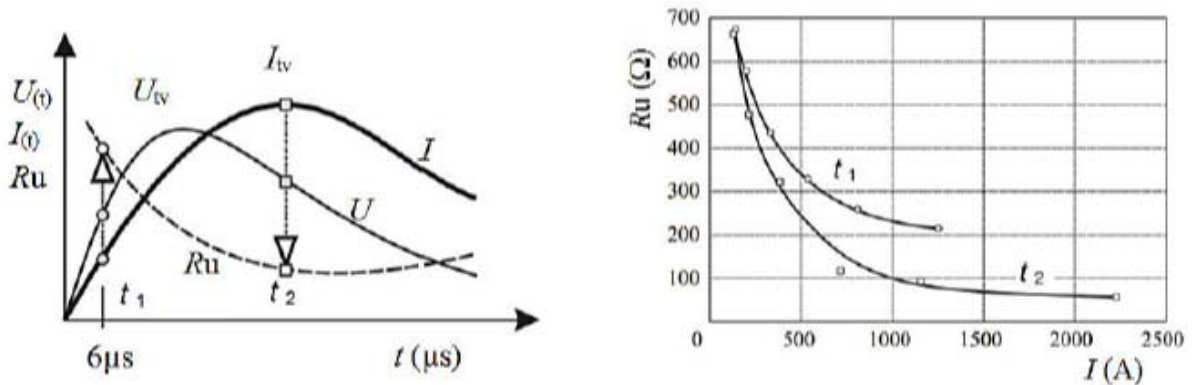
5. Udarna upornost zemlje

Udarna upornost zemlje oz. zmanjšanje prehodne upornosti ozemljila je pojav, pri katerem se okoli ozemljila pojavi navidezni prevodni kanal, po katerem se tok udara razelektri v zemljo. Temu smo lahko priča ob razelektritvah pri udaru strele, ko v zemljo ob ozemljilu, v kratkem času, preko relativno majhne površine ozemljila, teče izredno velik tok. V okolici ozemljila je zemlja, ki vsebuje tudi zračne mehurčke in ob velikih tokovnih gostotah se tu pojavi ionizacijsko območje. V mehurčkih zraka se pojavijo ionizacijski kanali, ki zaradi svoje prevodnosti gostoto toka še povečajo, posledica tega pa je še povečanje električne poljske jakosti in še večji prevodni kanal. Tako pride do pojava udarne upornosti zemlje. Ob takšnem pojavu se v tem času ozemljilo postopoma preoblikuje v polkrogelno ozemljilo, kot kaže slika 12. Iz slike je razvidno, da je oblika koncentriranih elektrod vedno manj pomembna zaradi ustvarjanja navideznega polkrogelnega ozemljila. Ionizacijski proces v zemlji se ne prične sočasno, ko tokovni val prispe na ozemljilo. Za vzpostavitev ioniziranega območja je potreben določen čas, zato je udarna upornost R_u dinamičen časovno odvisen pojav.



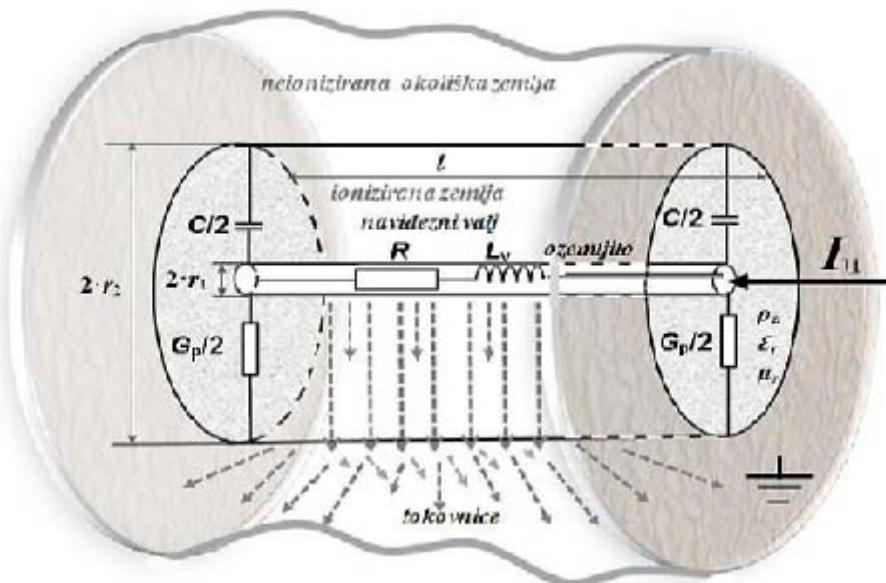
Slika 12: Zmanjšanje upornosti ozemljila zaradi ionizirane zemlje ob ozemljilu

Udarne upornost R_u je občutno nižja od upornosti ozemljila R_{oz} , ki velja v stacionarnih razmerah. Praviloma ne doseže najmanjše vrednosti, ko je tok največji, temveč pada še naprej. To je zakasnitveni čas, potreben za nastanek ionizacijskega območja in traja 10-30 μs . Na sliki 13 je viden potek napetostnega vala $U(t)$, tokovnega vala $I(t)$ ter udarne upornosti $R_u(t) = U(t) / I(t)$. Razvidno je, da je vrednost udarne upornosti ozemljil odvisna od časa.



Slika 13: Udarne upornost v odvisnosti od jakosti toka in časa trajanja.

Specifična upornost lahko znaša med 1 do 10 000 Ωm . Dielektričnost je odvisna od sestave tal in lahko znaša med 1 (zrak) do 80 (voda), relativna permeabilnost pa se giblje okoli vrednosti 1. Slika 14 kaže model ozemljila v zemlji, kateremu se zaradi ionizacije zemlje zmanjša udarna upornost.



Slika 14: Model ionizirane zemlje okoli horizontalno vkopanega ozemljila.



Udarno upornost ozemljila lahko izračunamo na dva načina. Pri prvem upoštevamo predpostavko da je $T_{\check{c}} \approx 10 \mu\text{s}$, specifično upornost povzamemo iz meritev ter upoštevamo izraze za induktivnost L_v , odvodnost G_p , ter zmanjšano učinkovito dolžino ozemljila:

$$L_v = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$G_p = \frac{2 \cdot \pi}{\rho_z} \cdot \frac{1}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$l_u = \sqrt{\frac{T_{\check{c}}}{L_v \cdot G_p}} \approx 0,9 \cdot \sqrt{T_{\check{c}} \cdot \rho_z} \text{ [m]}$$

ter tako izračunamo udarno upornost po izrazu:

$$R_u = \frac{1}{G_p \cdot l_u}$$

Na drugi način lahko ozemljilo v zemlji predpostavimo kot polkroglo z radijem r_e in specifično upornostjo zemljine ρ_z . Ob upoštevanju da je :

$$I_{\text{ion}} = \frac{E_{\text{ion}} \cdot \rho_z}{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{oz}}^2}$$

lahko zapišemo izraz za udarno upornost:

$$R_u = \frac{R_{\text{oz}}}{\sqrt{1 + \frac{I_{\text{TF}}}{I_{\text{ion}}}}}$$

kjer so:

G_p prečna odvodnost ozemljila (S/m),
 I_{ion} tok ionizacije zemlje (kA),



I_{TF}	trenutna vrednost toka okvare (kA),
l_u	optimalna dolžina ozemljila (m),
L_v	vzdolžna induktivnost ozemljila (H/m),
R_u	udarna upornost ozemljila (Ω),
T_ξ	čas čela udarnega tokovnega vala (μs).

6. Vprašanja in naloga

1. Kaj je specifična upornost in kaj vpliva na njeno merjenje?

Specifična upornost zemlje je sposobnost prevajanja električnega toka. Velikost upornosti je odvisna od sestave in vlažnosti tal ter temperature zemlje v okolici ozemljila. Vlažnost zemlje je močno odvisna od vremenskih pogojev in letnega časa. Zato merimo specifično upornost zemlje takrat, ko pričakujemo najneugodnejše vrednosti, ker so le-te pomembne za izračun ozemljil, saj mora le-to opraviti svojo nalogo tudi v neugodnih razmerah.

2. Katere metode se uporabljajo za merjenje specifične upornosti tal?

Metoda posredne meritve s pomočjo treh sond, merjenje specifične upornosti zemlje s pomočjo štirih sond in Wennerjeva metoda meritve specifične upornosti zemlje.

3. Kaj je udarna upornost? Kako nastane?

Udarna upornost zemlje oz. zmanjšanje prehodne upornosti ozemljila je pojav, pri katerem se okoli ozemljila pojavi navidezni prehodni kanal, po katerem se tok udara razelektri v zemljo. V okolici ozemljila je zemlja, ki vsebuje tudi zračne mehurčke in ob velikih tokovnih gostotah se tu pojavi ionizacijsko območje. V mehurčkih zraka se pojavijo ionizacijski kanali, ki zaradi svoje prevodnosti gostoto toka še povečajo, posledica tega pa je še povečanje električne poljske jakosti in še večji prevodni kanal in tako pride do pojava udarne upornosti zemlje.

4. Domača naloga

Odločili smo se za namestitev 3 metre dolgega paličnega ozemljila, kot del ozemljitvenega sistema. Za merjenje upornosti tal na globini treh metrov, smo sonde postavili na razmiku treh metrov. Opravili smo meritev z Wennerjevo metodo in dobili upornost 100Ω . Izračunajte specifično upornost tal.

Podatki:

$a=3\text{m}$

$R=100\Omega$

Izračun:



$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot 3m \cdot 100\Omega = 1885 \Omega$$

7. Viri

- [1] Mag. Koritnik D., dr. Voršič J., Stopenjska metoda geoelektričnega sondiranja zemlje, 6. Konferenca slovenskih elektroenergetikov, Portorož 2003.
- [2] Doktorska disertacija: Robert M., Nov pristop k izvedbi ozemljevanja visokonapetostnih naprav, daljnovodov in kablovodov, Maribor, april 2015.
- [3] Spletni vir: https://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/2633834_6115_ENG_A_W.PDF, pridobljeno dne 24.03.2017.
- [4] Spletni vir: http://lrf.fe.uni-lj.si/download/praktikum_11_12_nneib.pdf, pridobljeno dne 25.03.2017.