

II Uzemljenje i uzemljivački sistemi

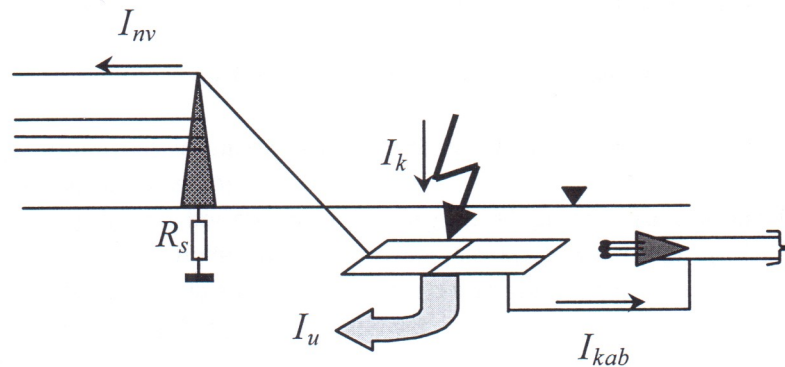
Pod pojmom uzemljenja u elektroenergetskom sistemu podrazumeva se skup svih sredstava i mera koje se preduzimaju u cilju obezbeđenja uslova za normalan rad sistema, bezbedan rad i kretanje ljudi i životinja u blizini objekata koji mogu doći pod napon u normalnim ili havarijskim situacijama i zaštitu ljudi i opreme od struja i napona koji se javljaju pri atmosferskim pražnjenjima.

Uzemljiti znači galvaniski povezati provodne delove aparata i opreme sa uzemljivačkim sistemom.

Uzemljivački sistem čine međusobno galvaniski povezani uzemljivač i drugi metalni delovi koji su u neposrednom kontaktu sa tлом (temeljni uzemljivači, zaštitna užad nadzemnih vodova, plaštevii kablova itd.).

Uzemljivač predstavlja jedan ili više provodnika položenih u tlo, tako da je ostvaren neposredan kontakt sa tлом [5].

Elementi koji najviše utiču na karakteristike uzemljivačkog sistema su kablovi, vazdušni vodovi, temeljni uzemljivači objekta i uzemljivač.



Slika 2.1 Uzemljivački sistem

Projektant može u najvećoj meri uticati na karakteristike uzemljivača, a preko njih i na karakteristike celog uzemljivačkog sistema, pošto se ostali elementi uzemljivačkog sistema uglavnom biraju prema drugim kriterijumima.

Ponekad u praksi, ako se ne mogu ostvariti potrebne karakteristike uzemljivačkog sistema samo preko uzemljivača, moraju se i ostali elementi birati prema ovim kriterijumima.

2.1 Tipovi uzemljivača

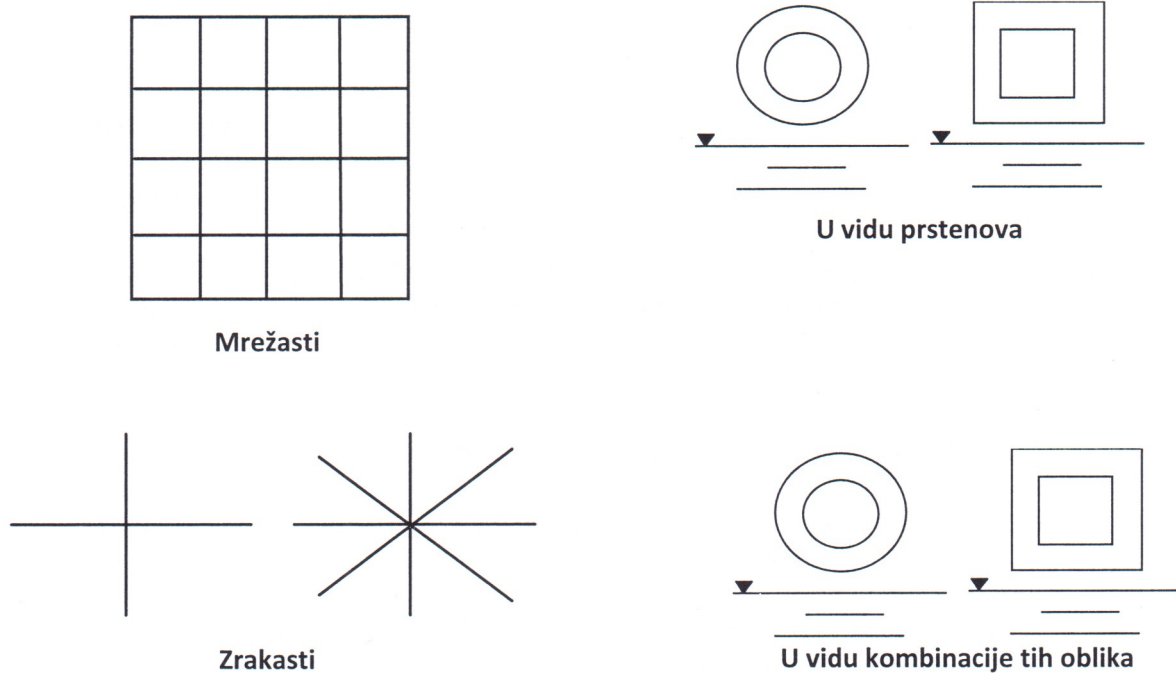
Uzemljivači (konstruktivno) mogu biti

- **horizontalni**
- **vertikalni**
- **kosi**

Horizontalni uzemljivač (površinski) sastavljen je od horizontalno položenih provodnika, paralelnih sa površinom tla, ukopanih na relativno maloj dubini.

Horizontalni uzemljivač može biti (slika 2.2):

- mrežasti
- zrakasti
- u vidu prstenova
- u vidu kombinacije tih oblika



Slika 2.2 Vrste horizontalnih uzemljivača

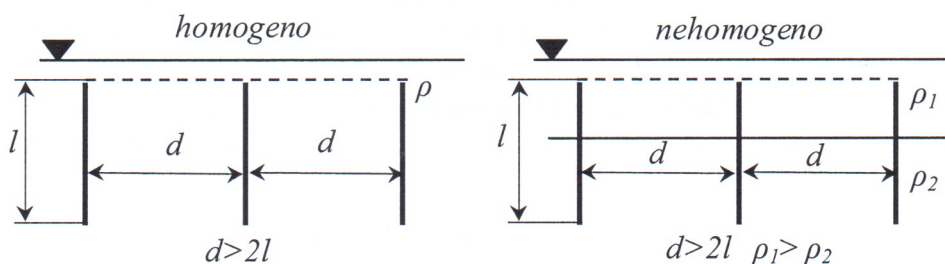
Vertikalni uzemljivač (dubinski) je sastavljen od jednog ili više štapnih uzemljivača koji su vertikalno pobijeni u tlo i međusobno su povezani.

Ovakvi uzemljivači se u principu koriste kada je raspoloživi prostor za uzemljivač mali ili kada je tlo nehomogeno, a niži slojevi tla su bolje provodni od površinskog sloja. U tom slučaju vertikalni elementi – štapovi - moraju biti dovoljno dugi da značajnije prodru u niže slojeve tla.

Tipične dužine štapova su od 1 do 5 m, a mogu biti i veće.

Kosi uzemljivač je štapni uzemljivač koso pobijen u tlo.

Moguće su i kombinacije ovih tipova uzemljivača. U praksi se najčešće horizontalnim (mrežastim) uzemljivačima dodaju vertikalni elementi, najčešće po obodu, pogotovo u slučajevima kada su donji slojevi tla bolje provodni od površinskog sloja.



Slika 2.3 Primeri korišćenja jorizontalnih i vertikalnih uzemljivača

Uticaj ovih elemenata ogleda se u tome što se i preko njih odvodi neki deo struje kvara u tlo, tako da je struja koja se odvodi sa uzemljivača manja od ukupne struje kvara.

2.2 Vrste uzemljenja

Prema nameni, uzemljenja se dele na:

- **pogonska (radna),**
- **zaštitna**
- **gromobranska**

Pogonsko (radno) uzemljenje je uzemljenje dela strujnog kola kojim se obezbeđuje željena funkcija i/ili radne karakteristike tog kola. **Ovo uzemljenje je uvek galvanski vezano u strujno kolo i ono je u svakom trenutku deo tog kola.**

Pogonsko uzemljenje može biti :

- **direktno** - izvodi se direktnim, neposrednim vezivanjem neke tačke električnog kola na sistem uzemljenja.
- **indirektno** – izvodi se vezivanjem neke tačke električnog kola na sistem uzemljenja preko neke impedanse (aktivne otpornosti, induktivnosti ili njihove kombinacije).

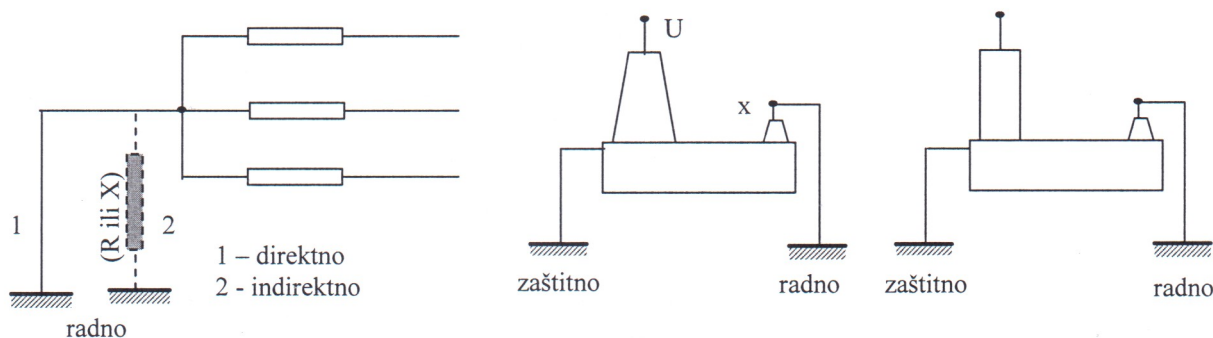
Zaštitno uzemljenje je uzemljenje metalnih delova koji ne pripadaju strujnom kolu i nisu u neposrednom kontaktu s njim. **U normalnom režimu rada ono nije deo strujnog kola.** Ovo uzemljenje postaje deo strujnog kola samo u slučaju kvara kada ti metalni delovi mogu doći pod napon. Zaštitno uzemljenje smanjuje taj napon i sprečava nastanak uslova opasnih po život ljudi koji rukuju tim aparatima ili opremom pogođenom kvarom ili se kreću u njihovoj blizini.

Gromobrantsko uzemljenje je uzemljenje gromobrantske instalacije i služi za odvođenje struja atmosferskog pražnjenja u tlo. Ono ograničava napon na koji dolazi gromobrantska instalacija pri odvođenju struje kako bi se sprečili povratni preskoci na pogonska električna kola i metalne objekte.

Kod visokonaponskih postrojenja tipično je da jedan uzemljivač (sistem uzemljenja) obavlja sve ove funkcije.

Tipični primeri :

- **uzemljenje neutralne tačke transformatora.** U mrežama najviših napona (110 kV, 220 kV, 400 kV) primenjuje se direktno uzemljenje. Kod distributivnih transformatora 10(20)/0.4 kV također se primenjuje direktno uzemljenje na strani 0.4 kV pošto se na taj način omogućava da se u niskonaponskoj mreži potrošači mogu vezivati na fazni i međufazni napon. U mrežama srednjeg napona 10(20) kV i 35 kV primenjuje se indirektno uzemljenje i na taj način se ograničava struja zemljospoja. **Kod autotransformatora se neutralna tačka obavezno uzemljuje direktno.**
- **uzemljenje kraja jednopolno izolovanog naponskog transformatora**
- **uzemljenje odvodnika prenapona**



Slika 2.4 Primeri različitih vrsta uzemljenja

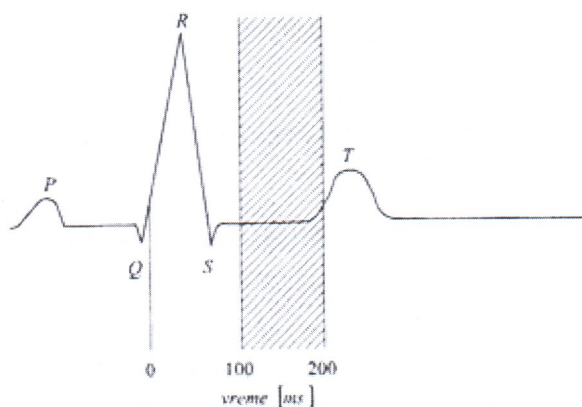
2.3 Kriterijumi opasnosti od električnog udara

Opasnost od električnog udara zavisi, kako su mnoga ispitivanja na ljudima i životinjama pokazala od nekoliko osnovnih činilaca: vrste struje (naizmjenična, jednosmerna, impulsna), njene vrednosti i učestanosti (ako je naizmjenična), dužine trajanja udara i puta prolaska kroz telo. U daljim ćemo se razmatranjima, s obzirom na predmet našeg interesovanja, ograničiti na opisivanje uticaja naizmjenične struje 50 (60) Hz. Efekti struje električnog udara na čovečiji organizam različiti su zavisno od vrednosti struje. Na osnovu velikog broja eksperimenata na ljudima i životinjama, kao i rekonstrukcije pojedinih nesrećnih slučajeva, može se dati orijentaciona klasifikacija pomenutih uticaja, prikazana je u tabeli (2.1). Efekti se odnose na slučaj električnog udara na putu ruka-ruka ili ruka-noga. Podaci u tabeli važe za zdrave osobe, prosečne konstitucije.

Tabela 1. Efekti struja različitih vrednosti na čoveka

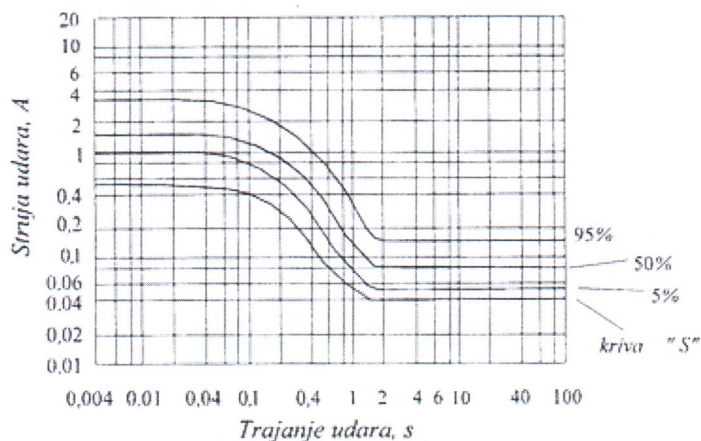
| Efektivna vrednost struje električnog udara (mA) | Dejstvo |
|--|---|
| < 1 | Ne oseća se |
| 1 ÷ 9 | Blage bezbolne reakcije; moguća je voljna kontrakcija mišića i odvajanje od delova pod naponom. |
| 10 ÷ 20 | Grčenje mišića i bolovi u rukama i nogama; odvajanje od dela pod naponom najčešće nije moguće, posle prekida proticanja struje organizam obično ostaje bez posledica. |
| 20 ÷ 50 | Veliki bolovi, snažne kontrakcije mišića, otežano disanje. |
| 50 ÷ 100 | U slučaju dužeg delovanja moguća ventrikularna fibrilacija srca. |
| 100 ÷ 500 | Fibrilacija vrlo verovatna. |
| > 500 | Opekotine na mestima dodira; opšti mišićni tonus sprečava pojavu fibrilacije. |

Granične struje pri kojima može da dođe do opuštanja uhvaćenog kontakta pod naponom, tzv. „let go-current“ ustanovljene su eksperimentima na većem broju osoba od strane Dalcila. Izvedena merenja pokazala su da 90% muškaraca može da otpusti provodnik pri stujama manjim od 12,5mA, a 50% pri strujama manjim od oko 16mA. Kod ispitivanih žena ove vrednosti su iznosile 8mA odnosno 10,5mA. Struje u opsegu 10-50mA se moraju smatrati opasnim budući da se usled grčenja mišića pogođena osoba u većini slučajeva neće moći da odvoji od napona i tako će biti izložena trajnijem delovanju struje. Kod dugotrajnog delovanja razmatranih struja dolazi do asfiksije (obamrlosti, prestanka disanja), gubitka svesti i smrti. Trajnijom primenom veštačkog disanja i masažom srca odmah posle odvajanja od napona, pogođeno lice se uglavnom može povratiti bez posledica.



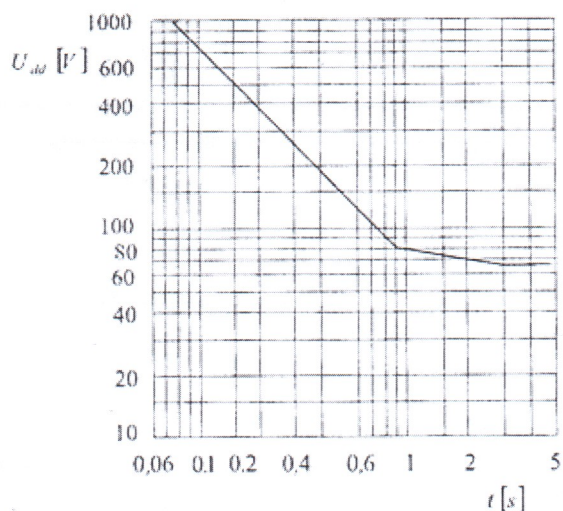
Slika 2.5 Kritična faza srčanog ciklusa

U opsegu 50-500mA dolazi, kod dovoljno duge izloženosti udaru, do acikličnog nekoordinisanog treperenja srčanih zalisaka – „ventikularne fibrilacije“ usled koje se blokira rad srca i prestaje cirkulacija krvi. Spontano reaktiviranje srca nakon prestanka proticanja struje je neizvesno i malo verovatno. Veštačko disanje i masaža na licu mesta obično ne pomažu već je potrebna brza specijalistička intervencija i defibrilacija srca elektrošokovima. Pošto vitalni nervni centri ne mogu da ostanu bez krvi više od nekoliko minuta, fibrilacija u najvećem broju slučajeva dovodi do smrti. Eksperimentima na životinjama došlo se do vrednosti sa slike 2.6.



Slika 2.6 Fibrilacione struje

Radi jednostavnosti praktičnih proračuna obično se ne propisuju granične struje električnog udara već dozvoljeni naponi, koji se dobijaju množenjem pomenutih struja sa usvojenom vrednošću otpornosti čovečijeg tela. Usvaja se da je otpornost čoveka $R_{\Sigma} = 1000\Omega$.



Slika 2.7 Dozvoljeni naponi dodira

2.4 Karakteristične veličine uzemljivača

Sve karakteristične veličine uzemljivača definišu se na osnovu :

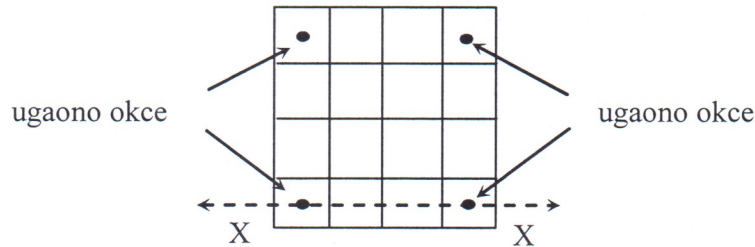
- struje koja se odvodi sa uzemljivača u tlo I_u
- potencijala koji se javljaju na tlu kao posledica odvođenja struje u tlo V .

Svi potencijali se određuju prema referentnoj zemlji.

Referentna zemlja – deo zemlje dovoljno udaljen od uzemljivačkog sistema na kome se potencijal pri odvođenju struje sa sistema uzemljenja ne menja. To znači da potencijal referentne zemlje za vreme odvođenja struje u zemlju ima istu vrednost kao kada nema odvođenja struje.

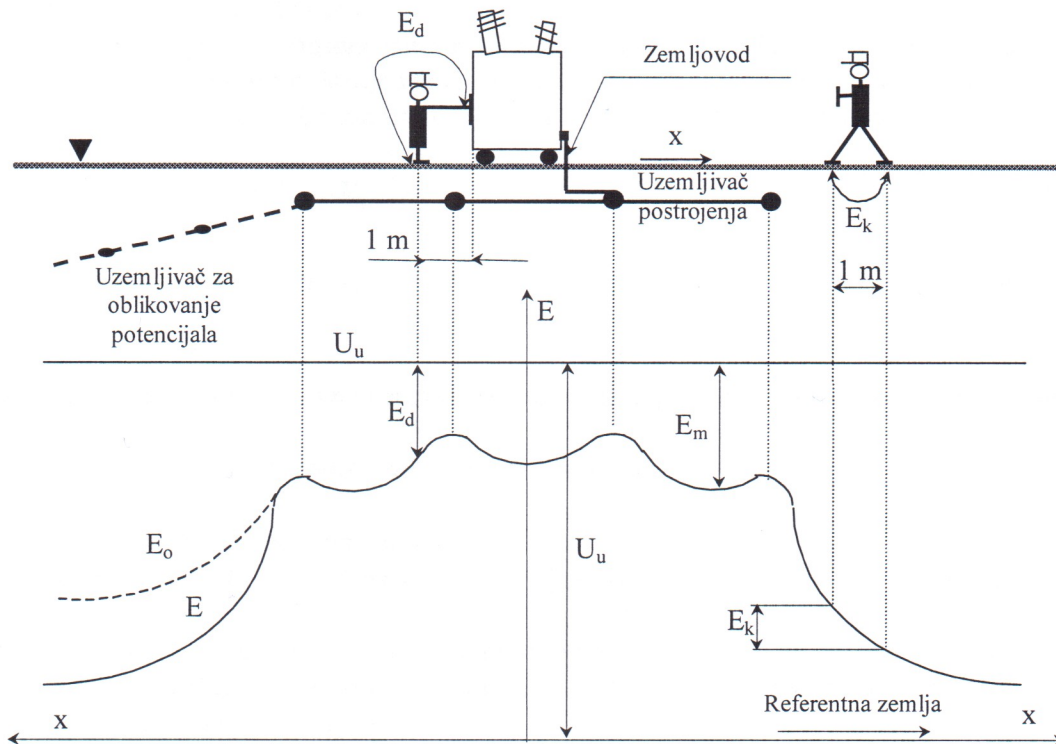
$$\left(V_T = \int_{-\infty}^T \vec{K} d\vec{l} = \int_{-\infty}^R \vec{K} d\vec{l} + \int_R^T \vec{K} d\vec{l} = V_R + V_{TR}, \quad V_R = 0 \Rightarrow V_{TR} = V_T = U_u \right) \quad (45)$$

Ugaono (ivično) okce – deo tla iznad uzemljivača uz njegovu spoljašnju ivicu, ovičen elementima uzemljivača, u uglu uzemljivačke mreže. U ovom okcu se dobijaju najveće razlike potencijala, pošto su iznad njega najmanji potencijali tačaka na površini tla iznad uzemljivača.



Slika 2.8 Ugaono okce

Na slici 2.8 je prikazan tipičan oblik krive raspodele potencijala (E) na površini tla duž pravca koji prolazi sredinom ivičnog polja (okca) uzemljivačke mreže. Na istoj slici su označene i karakteristične vrednosti potencijala i potencijalnih razlika koje se javljaju pri odvođenju struje sa uzemljivača u tlo.



Slika 2.9 Raspodela potencijala na površini tla

Vrhovi krive raspodele potencijala javljaju se na mestima gde su elementi uzemljivača, dok su udubine otprilike na sredini između elemenata.

Struja odvođenja sa uzemljivača u tlo I_u – deo ukupne struje kvara koji se odvodi u tlo sa samog uzemljivača

$$I_u \leq I_k$$

Napon uzemljivača U_u – razlika potencijala na koji dolazi uzemljivač za vreme odvođenja struje u tlo i potencijala referentne zemlje. Ovako definisana vrednost napona uzemljivača poklapa se sa vrednošću potencijala uzemljivača V_u .

Otpor rasprostiranja uzemljivača R_u – definiše se kao odnos potencijala prema referentnoj zemlji na koji dolazi uzemljivač pri odvođenju struje u tlo i te struje, pri čemu je taj potencijal jednak naponu uzemljivača. Tada je:

$$R_u = \frac{V_u}{I_u} = \frac{U_u}{I_u} \quad (46)$$

To je otpor kojim se tlo suprotstavlja odvođenju struje sa uzemljivača i ima praktično aktivan karakter.

Otpor rasprostiranja je jedina karakteristična veličina uzemljivača koja zavisi isključivo od konstruktivnih parametara uzemljivača i parametara tla.

Impedansa uzemljenja Z_u – impedansa koju sistem uzemljenja pri učestanosti 50 Hz suprotstavlja odvođenju struje u tlo. Ova impedansa je u stvari paralelna veza otpora rasprostiranja uzemljivača i impedansi uzemljenja nadzemnih i kablovskih vodova.

$$Z_u = \frac{U_u}{I_u} \quad (47)$$

Impedansom uzemljenja obuhvataju se i **prirodni uzemljivači** koji se nalaze van teritorije uzemljivača ili su prostorno odvojeni od uzemljivača (cevovodi, armiranobetonske konstrukcije zgrada, brane i dr.) ako su uključeni u sistem uzemljenja, kao i **uzemljivači susednih postrojenja ili objekata** ako sa tim uzemljivačima postoji galvanska veza (na primer, preko električne zaštite ili plašta kablova, veza preko neutralnog provodnika niskonaponske mreže i dr.).

Potencijalna razlika dodira E_d – **potencijalna razlika koja postoji između uzemljenih objekata i stajališta koja se može premostiti dodirom**. Strujno kolo se tada zatvara preko ruke (ruku) i stopala čoveka pri čemu se smatra da su stopala udaljena 1 m od uređaja koji se dodiruje. Definiše se izrazom

$$E_d = V_u - V_o = U_u - V_0 \quad (48)$$

gde je V_u potencijal uzemljivača, V_0 potencijal tačke na tlu iz koje se ostvaruje dodir, a U_u napon uzemljivača.

Potencijalna razlika dodira je osnovna karakteristična veličina prema kojoj se dimenzioniše uzemljivač.

Iz (48) se vidi da vrednost **potencijalne razlike dodira zavisi od** :

- **raspodele potencijala na površini tla**
- **rasporeda i razmeštaja opreme i drugih uzemljenih delova koji mogu doći pod napon.**

Pošto raspored opreme u postrojenju često nije unapred poznat, u postupku projektovanja se često koristi **maksimalna vrednost potencijalne razlike dodira** E_m . To je maksimalna vrednost potencijalne razlike dodira za ceo uzemljivač i definisana je izrazom:

$$E_m = V_u - V_{0min} \quad (49)$$

gde je V_{0min} apsolutni minimum potencijala tla iznad uzemljivača na celoj površini postrojenja.

Ova potencijalna razlika zavisi isključivo od raspodele potencijala na površini tla, odnosno od oblika uzemljivača i električnih karakteristika tla.

Važe uslovi:

$$V_0 \geq V_{0\min} \quad (50)$$

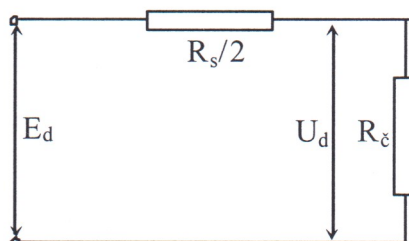
$$E_d \leq E_m \quad (51)$$

U realnim uslovima **potencijalna razlika E_d može biti i nekoliko desetina procenata manja od E_m** . Ako je uzemljivač projektovan tako da vrednost E_m zadovoljava propise, tada sigurno zadovoljava i u pogledu E_d .

Potencijalna razlika koraka E_k – potencijalna razlika između dve tačke na površini tla međusobno udaljene 1 m, koje se mogu premostiti korakom. U ovom slučaju strujno kolo se u principu zatvara preko nogu.

Oblikovanje potencijala – podešavanje raspodele potencijala na površini tla u cilju smanjenja potencijalnih razlika dodira i koraka. Izvodi se polaganjem dodatnih provodnika uzemljivača na mestima na kojima se javljaju nedozvoljene vrednosti ovih razlika. Na slici je isprekidanom linijom prikazan uticaj dodatnog uzemljivača za oblikovanje raspodele potencijala na tu raspodelu (E_0).

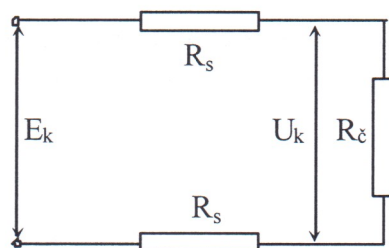
Napon dodira U_d – stvarni napon kome je izložen čovek prilikom dodira. On je manji od potencijalne razlike dodira E_d za pad napona na prelaznoj otpornosti površina tla – stopalo. Strujno kolo se zatvara putem ruka – stopalo.



Slika 2.10 Napon dodira

Pošto se pretpostavlja da pogođena osoba stoji sa sastavljenim stopalima, ekvivalentni prelazni otpor stopalo – tlo je dvostruko manji nego kod koraka.

Napon koraka U_k – stvarni napon kome je izložen čovek prilikom koraka. On je također manji od potencijalne razlike koraka E_k za pad napona na prelaznoj otpornosti površina tla – stopalo. Strujno kolo se zatvara putem stopalo – stopalo.



Slika 2.11 Napon koraka

Prelazna otpornost površina tla-stopalo R_s smatra se da je jednaka otporu rasprostiranja kružne ploče prečnika $D_e = 0.16$ m na površini tla

$$R_s = \frac{\rho}{2D_e} \quad (52)$$

Za napon dodira se dobija

$$\frac{E_d}{R_{\check{c}} + \frac{R_s}{2}} = \frac{U_d}{R_{\check{c}}} \quad (53)$$

pa je

$$U_d = \frac{R_{\check{c}}}{R_{\check{c}} + \frac{R_s}{2}} E_d = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{2R_{\check{c}}}} E_d \quad (54)$$

a to se može napisati kao

$$U_d = \frac{E_d}{s_d} \quad (55)$$

$$s_d = 1 + \frac{R_s}{2R_{\check{c}}} \quad (56)$$

dok se za napon koraka dobija

$$\frac{E_k}{R_{\check{c}} + 2R_s} = \frac{U_k}{R_{\check{c}}} \quad (57)$$

$$U_k = \frac{R_{\check{c}}}{R_{\check{c}} + 2R_s} E_k = \frac{1}{1 + \frac{2R_s}{R_{\check{c}}}} E_k \quad (58)$$

što se može napisati kao

$$U_k = \frac{E_k}{s_k} \quad (59)$$

$$s_k = 1 + 2 \frac{R_s}{R_{\check{c}}} \quad (60)$$

Parametar $R_{\check{c}}$ u izrazima (10) i (12) predstavlja **otpor tela čoveka na putu noge – ruke**. Obično se za $R_{\check{c}}$ usvaja vrednost između 1000 Ω i 3000 Ω . Po važećim propisima se uzima $R_{\check{c}} = 1000 \Omega$. Za tu vrednost dobija se

$$s_d = 1 + 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \quad (61)$$

$$s_k = 1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \quad (62)$$

2.5 Dimenzionisanje sistema uzemljenja

Sistem uzemljenja se dimenzioniše prema

- **toplotnim naprezanjima,**
- **naponima koji se javljaju u sistemu uzemljenja.**

Pri tome se smatra da postojeći zaštitni uređaji i prekidači funkcionišu normalno.

Dimenzionisanje prema toplotnim naprezanjima svodi se na pravilan izbor materijala koji se koristi za provodnike uzemljivača i odgovarajućeg preseka provodnika.

Elementi koji se uzemljuju povezuju se sa uzemljivačem sa najmanje dva provodnika – dvostrukom vezom. U proveru na termička naprezanja se uzima samo jedan presek – za slučaj sigurnosti, ako se prekine jedna veza, druga mora izdržati termička naprezanja.

Materijal za provodnike tipično je **bakar** (uže) i **pocinkovani čelik** (traka ili kružni profil), a mogu se koristiti i drugi materijali sa odgovarajućim toplotnim, mehaničkim i hemijskim karakteristikama.

Najmanji dozvoljeni preseki provodnika, s obzirom na mehanička naprezanja i koroziju kao i najveće trajno dozvoljene struje provodnika u sistemu uzemljenja određeni su propisima.

Dimenzionisanje prema naponima (potencijalima) koji se javljaju u sistemu uzemljenja svodi se na **samo dva kriterijuma** :

$$U_d = \frac{E_d}{s_d} \leq U_{doz} \quad (63)$$

$$U_k = \frac{E_k}{s_k} \leq U_{doz} \quad (64)$$

Očigledno je da **vrednost otpora rasprostiranja uzemljivača nije kriterijum prema kome se dimenzioniše sistem uzemljenja**.

Dozvoljeni naponi dodira U_{ddoz} , odnosno napona koraka U_{kdoz} , određeni su propisima i daju se u funkciji vremena trajanja kvara t . Prema našim propisima je

$$U_{ddoz} = U_{kdoz} = U_{doz} \quad (65)$$

pri čemu je **dozvoljena vrednost napona dodira, odnosno koraka** U_{doz} , određena propisima i daje se u **funkciji vremene trajanja kvara**

$$U_{doz} = \begin{cases} 1000V & t \leq 0.075 \text{ s} \\ \frac{75}{t} & 0.075 \text{ s} \leq t \leq 1.153 \text{ s} \\ 65 \text{ V} & t \geq 1.153 \text{ s} \end{cases} \quad (66)$$

Vreme trajanja kvara (zemljospoja) t određuje se za normalne uslove rada zaštitne opreme i prekidača. U slučaju da postoji mogućnost višestrukog uzastopnog uspostavljanja struje zemljospoja (automatsko ponovno uključanje – **APU**) vreme t se dobija kao:

- zbir pojedinačnih vremena trajanja zemljospojeva ako pauze između ponovnih uspostavljanja zemljospojeva nisu duže od 0.5 s,
- vreme trajanja jednog zemljospoja ako su te pauze duže od 0.5 s.

2.6 Oblikovanje i izvođenje uzemljivača

Oblikovanje uzemljivača zavisi od :

- **raspoloživog prostora,**
- **rasporeda opreme i drugih uređaja na površini tla koji se uzemljuju,**
- **vrste i karakteristika tla.**

Uslov je da se postignu dovoljne vrednosti otpora rasprostiranja uzemljivača, pri čemu stvarne vrednosti napona dodira i koraka u svakoj tački tla moraju zadovoljiti propise.

Uzemljivač u obliku mreže horizontalno položenih provodnika – polaže se na dubini od 0.5 do 1 m, zbog efekta zaleđivanja površinskog sloja tla. Važe pravila

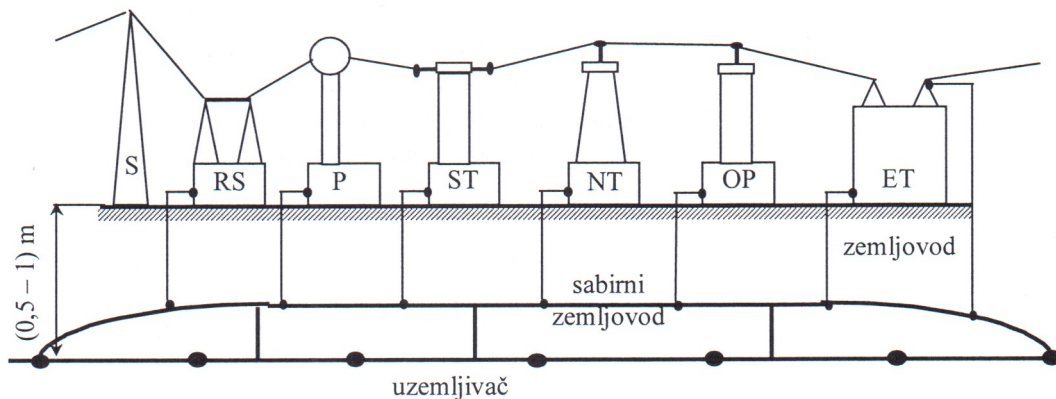
- sve uzemljene metalne mase moraju biti unutar spoljašnjeg okvira uzemljivačke konture,
- moraju biti udaljene najmanje 1 m od ovog okvira u horizontalnom pravcu.

Štapni uzemljivači – postavljaju se u zemlju vertikalno. Njihova primena je opravdana u slučajevima kada niži slojevi tla u koje prodiru imaju manju specifičnu otpornost od viših slojeva.

Ako se uzemljivač sastoji od više štapnih uzemljivača oni treba da su međusobno razmaknuti. Najmanja vrednost razmaka između štapova treba da bude jednaka njihovoj dvostrukoj dužini.

Kontakt uzemljivača sa tlom – mora se ostvariti dobar kontakt provodnika uzemljivača sa tlom u koje su položeni. **U slučaju kamenitog ili šljunkovitog terena**, u rov u koji se polaže provodnik uzemljivača **treba najpre nasuti dobro provodnu zemlju ili neki drugi dobro provodni materijal (bentonit, crveni mulj)**, tako da provodnik leži u toj zemlji ili tom materijalu.

Na slici je prikazan primer povezivanja uzemljenih elemenata postrojenja sa uzemljivačem.



Slika 2.12 Primer povezivanja uzemljenih elemenata postrojenja sa uzemljivačem

Pri povezivanju elemenata koji se uzemljuju važe neka dodatna pravila :

- **svaki element se povezuje sa uzemljivačem dvostrukom vezom** (sa dva provodnika). Pri tome se svaki od njih dimenzioniše u termičkom pogledu kao da kroz njega protiče ukupna struja kvara. Ovo je zbog sigurnosti, za slučaj da je jedna veza loša ili da dođe do njenog prekida.
- **svaki element se vezuje preko svog zemljovoda.**
- **svako spojno mesto između provodnika ili između provodnika i elementa mora biti urađeno kvalitetno i zaštićeno od korozije.**

2.7 Postupak dimenzionisanja uzemljivača

Postupak dimenzionisanja uzemljivača svodi se na nekoliko koraka :

1. Najpre se proceni **raspoloživi prostor** na kome će se izgraditi uzemljivač i određuju maksimalno moguće, odnosno maksimalno moguće dimenzije uzemljivača.
2. Određuju se **električne karakteristike tla** – da li je tlo homogeno ili ne, specifične otpornosti i debljine slojeva tla. Ponekad se ispituju i **hemijske karakteristike**, zbog mogućnosti pojave korozije.
3. Opredeljuje se za **tip uzemljivača** – mreža sa ili bez vertikalnih elemenata - i određuje se **dubina ukopavanja** (0.5 do 1 m).

4. Odabira se **materijal i tip provodnika** – bakar, pocinkovani čelik ili neki drugi materijal, uže ili neki drugi presek.
5. Određuje se **maksimalno dozvoljena vrednost napona dodira i koraka U_{doz}** (prema našim propisima vrednost U_{doz}), na osnovu poznatog vremena trajanja kvara t .
U skladu sa izrazima (64) i (65) mogu se odrediti i **odgovarajuće maksimalno dozvoljene vrednosti potencijalne razlike dodira E_{ddoz} i koraka E_{kdoz}** .
6. Određuje se **vrednost ukupne struje kvara I_k ($I_k \geq I_u$)** i, koliko je moguće, procenjuje **vrednost struje I_u** koja se odvodi u tlo sa samog uzemljivača.
7. Usvaja se neka **minimalna konfiguracija uzemljivača**. Postoje dve mogućnosti :
 - **ako je poznata dispozicija** (raspored) **opreme na površini tla**, ona treba da omogući povezivanje svih metalnih masa sa uzemljivačem.
 - **ako nije poznata dispozicija opreme** usvaja se neka početna konfiguracija mreže koja obuhvata celu potrebnu površinu, a ima minimalan broj okaca. Pri tome je pogodno najpre proceniti **minimalno potrebnu ukupnu dužinu svih provodnika mreže**. Za to je pogodno poći od relacije

$$E_d = k_d \rho \frac{I_u}{L} \quad (67)$$

gde je

E_d – potencijalna razlika dodira,

k_d – faktor dodira,

ρ – specifična otpornost površinskog sloja tla,

I_u – struja koja se odvodi sa uzemljivača u tlo,

L – ukupna dužina svih elemenata uzemljivačke mreže.

Ako se u izrazu (67) kao granični slučaj usvoji da je

$$E_d = E_{ddoz} \quad (68)$$

minimalna ukupna dužina svih elemenata mreže mora biti

$$L_{min} \geq k_{du} \rho \frac{I_u}{E_{ddoz}} \quad (69)$$

Pošto se vrednosti faktora dodira k_d u realnim slučajevima kreću od 1.2 do 2, usvojena vrednost k_{du} ovog faktora u izrazu (69) treba da bude unutar tih granica. U praksi se pokazalo da usvojena početna vrednost k_{du} treba da je reda veličine 1.2 do 1.4. Nakon toga se formira početna konfiguracija mreže, najpogodnije simetrična, pri čemu stvarna ukupna dužina treba da je $\geq L_{min}$.

8. Nekim od raspoloživih postupaka računa se **otpor rasprostiranja R_u** te konfiguracije.
9. Računa se **stvarna raspodela struje kvara u sistemu uzemljenja**, obuhvatajući eventualne uticaje vazдушnih vodova, kablova i temeljnih uzemljivača, ako ovi uticaji postoje. Tako se dobija **stvarna vrednost struje odvođenja sa uzemljivača I_u** .
10. Vršiti se **provera izabranog preseka na toplotna naprezanja na osnovu određene vrednosti stvarne struje odvođenja sa uzemljivača I_u** . Ako izabrani provodnik ne zadovoljava u ovom pogledu, bira se odgovarajući presek i procedura se nastavlja.
11. Računaju se **stvarne vrednosti napona dodira U_d i koraka U_k , odnosno potencijalnih razlika dodira E_d i koraka E_k za usvojenu konfiguraciju** i upoređuju sa maksimalno dozvoljenim vrednostima. Ako su zadovoljeni propisani uslovi

$$U_d \leq U_{ddoz} \Leftrightarrow E_d \leq E_{ddoz} \quad (70)$$

$$U_k \leq U_{kdoz} \Leftrightarrow E_k \leq E_{kdoz} \quad (71)$$

postupak se završava. **Ako propisani uslovi nisu zadovoljeni**, usvaja se neka **složenija konfiguracija** i ponavlja se procedura od tačke 8 do tačke 11 sve dok se ne dobije rešenje koje zadovoljava propisane uslove.

Ako se iz određenih razloga (vrlo velike struje odvođenja sa uzemljivača u tlo, pogotovo u uslovima lošeg tla, velikog ρ) kao **konačno rešenje dobije vrlo gusta mreža** (okca manja od reda $10 \times 10 \text{ m}^2$), mogu se primeniti i **neke dodatne mere** kao što su :

- **primena bolje provodne zemljovodne užadi kod vazдушnih vodova,**
- **smanjenje redukcionog faktora kablovskih vodova,**
- **ugradnja nagaznih rešetki na kritičnim mestima, povezanih sa uzemljivačem,**
- **asfaltiranje ili nasipanje terena na kritičnim mestima tankim slojem (15 do 20 cm) slabo provodnog materijala, sa velikom specifičnom otpornošću (tucanik, šljunak).**

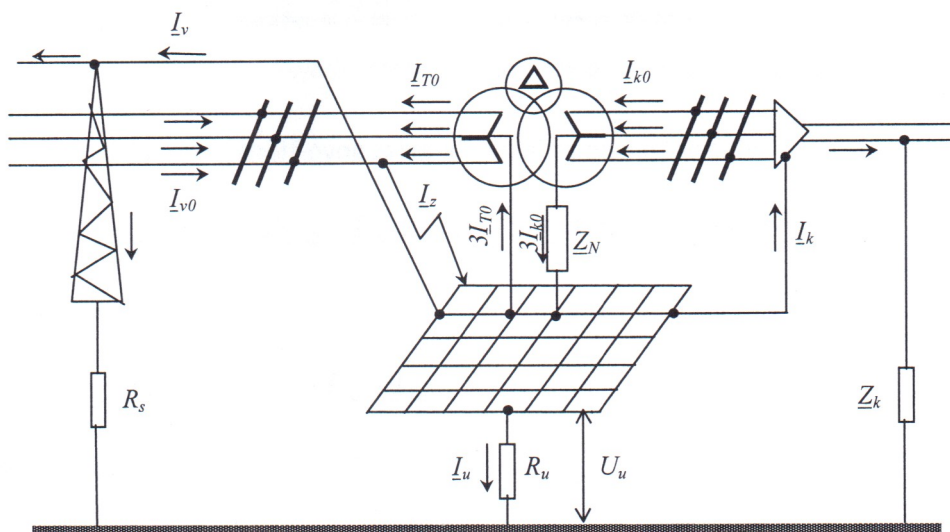
Ako se primenjuje mera nasipanja, uticaj tog nasutog sloja obuhvata se samo u izrazima , u proračunu vrednosti faktora s_d i s_k , kada se za ρ uzima vrednost specifične otpornosti tog nasutog sloja. Svi ostali proračuni rade se sa realnim parametrima tla.

2.8 Uzemljenje transformatorske stanice Visoki/Srednji napon

Za dimenzionisanje uzemljenja TS visoki/srednji napon kritični su obično kvarovi na strani mreže visokog napona pošto su ove po pravilu efikasno uzemljene i imaju znatne struje zemljospoja [4].

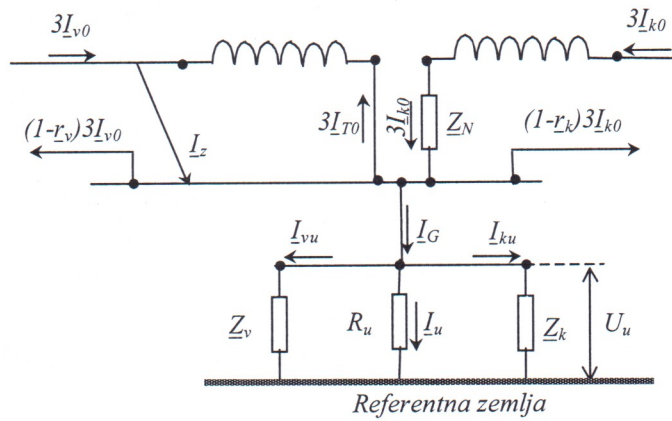
Raspodela struja u sistemu uzemljenja TS za slučaj zemljospoja na strani visokog napona pokazana je na slici.

Na slici su prikazani samo tokovi struja nultog redosleda. Zbog jednostavnosti, prikazan je samo jedan napojni vod, jedan transformator i jedan kabl.

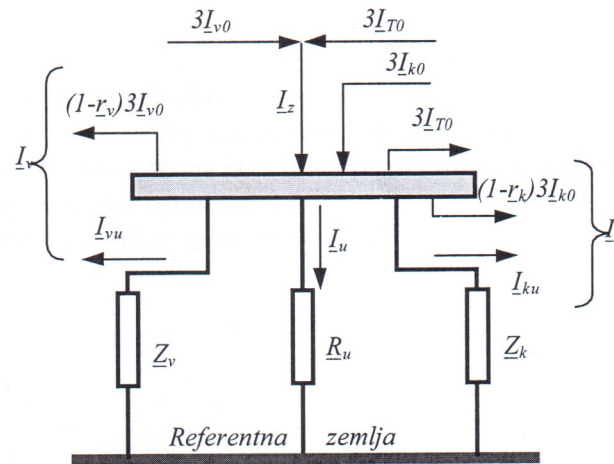


Slika 2.13 Raspodela struja u sistemu uzemljenja TS za slučaj zemljospoja na strani visokog napona

Šematski prikaz raspodele struja za slučaj sa sl. 2.13 prikazan je na sl. 2.14, dok je na sl. 2.15 prikazana šema sa sl. 2.14 nešto jednostavnije.



Slika 2.14 Šematski prikaz raspodele struje zemljospoja



Slika 2.15 Pojednostavljena raspodela struje zemljospoja

Sa sl. 2.15 se primenom prvog Kirchoff-ovog zakona dobijaju sledeće formule:

$$\underline{I}_u = 3\underline{I}_{v0} - (1-r_v)3\underline{I}_{v0} - \underline{I}_{vu} + 3\underline{I}_{T0} - 3\underline{I}_{T0} + 3\underline{I}_{k0} - (1-r_k)3\underline{I}_{k0} - \underline{I}_{ku} \quad (72)$$

Sređivanjem se dobija

$$\underline{I}_u = r_v 3\underline{I}_{v0} + r_k 3\underline{I}_{k0} - \underline{I}_{vu} - \underline{I}_{ku} \quad (73)$$

Može se napisati da je

$$\underline{I}_{vu} + \underline{I}_{ku} = \underline{U}_u \left(\frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k} \right) \quad (74)$$

gde su \underline{Z}_v i \underline{Z}_k impedanse zaštitnog provodnika vazdušnog voda i plašta (električne zaštite) kablova. Pošto je

$$R_u = \frac{U}{I_u} \quad (75)$$

dobija se da je struja koja se odvodi u tlo sa samog uzemljivača \underline{I}_u

$$\underline{I}_u = \frac{\underline{r}_v 3\underline{I}_{0v} + \underline{r}_k 3\underline{I}_{0k}}{1 + R_u \left(\frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k} \right)} \quad (76)$$

Napon uzemljivača se računa prema izrazu

$$\underline{U}_u = (\underline{r}_v 3\underline{I}_{0v} + \underline{r}_k 3\underline{I}_{0k}) \cdot \underline{Z}_e \quad (77)$$

gde je \underline{Z}_e ekvivalentna impedansa sistema uzemljenja

$$\underline{Z}_e = \left(\frac{1}{R_u} + \frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k} \right)^{-1} \quad (78)$$

U ovim izrazima je

R_u – otpor rasprostiranja uzemljivača,

$\underline{r}_v, \underline{r}_k$ - redukcioni faktori vazdušnog, odnosno kablovskog voda,

$3\underline{I}_{0v}, 3\underline{I}_{0k}$ – trostruka nulta komponenta struje kroz faze provodnike vazdušnog, odnosno kablovskog voda,

$\underline{Z}_v, \underline{Z}_k$ – impedanse zaštitnog užeta, odnosno plašta (električne zaštite) kablova.

U slučaju većeg broja vodova ovi izrazi se generališu u oblik

$$\underline{I}_u = \frac{\sum_i \underline{r}_i 3\underline{I}_{0i}}{1 + R_u \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_i}} \quad (79)$$

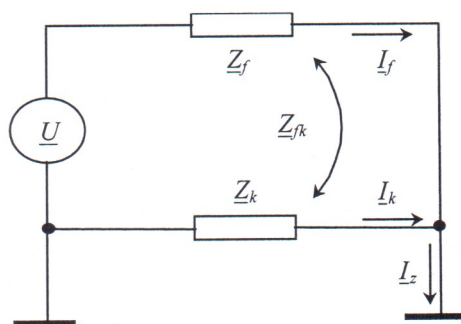
$$\underline{U}_u = \left(\sum_i \underline{r}_i 3\underline{I}_{0i} \right) \cdot \underline{Z}_e \quad (80)$$

$$\underline{Z}_e = \left(\frac{1}{R_u} + \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_i} \right)^{-1} \quad (81)$$

Oznake u ovim izrazima imaju ista značenja, sako indeks i označava da se odgovarajući parametar odnosi na i – ti vod, odnosno kabl.

2.8.1 Redukcioni faktor

Redukcionim faktorom se obuhvata elektromagnetni uticaj uzemljenih provodnika paralelnih energetskom vodu kao što su omotači kablova, zemljovodna užad nadzemnih vodova, metalni cevovodi, šine i drugi uzemljeni delovi na raspodelu struje zemljospoja.



Slika 2.16 Šema za proračun redukcionog faktora

Redukcioni faktor voda računa se generalno kao odnos struje koja se odvodi u zemlju I_z i struje kroz energetski provodnik I_f tako da se dobija

$$r = \frac{I_z}{I_f} = \frac{Z_k - Z_{fk}}{Z_k} \quad (82)$$

gde je Z_k - impedansa uzemljenog provodnika paralelnog energetskom vodu (zemljovodno uže ili plašt kabla),

Z_{fk} - međusobna impedansa uzemljenog provodnika i energetskog voda.

Redukcioni faktor kablova sa izolovanim metalnim plaštom može se izračunati pomoću izraza

$$r = \frac{R_p}{\sqrt{(R_{1k} + R_z l)^2 + (X_k l)^2}} \quad (83)$$

gde je

R_p – otpornost plašta kabla,

l – dužina kabla (km),

R_{1k} – otpornost plašta kabla sa uključenim otporima uzemljivača na njegovim krajevima,

R_z – podužna otpornost povratnog puta kroz zemlju, koja se računa iz izraza

$$R_z = \frac{\mu \omega}{8} \quad (\Omega/\text{km})$$

i za $\mu \approx \mu_0$ i $f = 50$ Hz dobija se $R_z \approx 0,05$ (Ω/km).

X_k – podužna reaktansa plašta kabla. Računa se iz izraza

$$X_k = 0,1445 \cdot \log \frac{D_e}{r_k} \quad (\Omega/\text{km})$$

pri čemu je r_k srednji prečnik plašta, a D_e dubina povratnog puta kroz zemlju

$$D_e = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}},$$

gde je $f = 50$ Hz, a ρ srednja vrednost specifične električne otpornosti tla duž trase kabla.

2.9 Iznošenje potencijala iz postrojenja

U slučaju zemljospoja u nekoj od transformatorskih stanica, na njenom uzemljivaču će se uspostaviti potencijal-napon uzemljivača [4][5]. Ovaj napon će se delom preneti preko ekrana/metalnih plašteva kablova, koji polaze iz postrojenja, na susedne objekte. U tom smislu najkritičniji su kvarovi u izvornoj transformatorskoj stanici, jer se ovi karakterišu znatnim strujama zemljospoja i porastima napona uzemljivača.

Napon koji se preko kabla iz razmatranog postrojenja prenese u TS srednji/visoki napon se približno određuje po formuli

$$U_i = k_i \cdot U_u \quad (84)$$

Veličina U_i predstavlja ujedno i napon na koji dolazi uzemljivač TS srednji/niski napon, a i napon na neutralnom provodniku mreže niskog napona ako su pomenute TS izvedene sa objedinjenim uzemljivačem. U slučaju da je mreža niskog napona nulovana, U_i predstavlja i napon koji će se pojaviti na nulovanim aparatima pomenute mreže.

Potencijalna razlika dodira kod TS srednji/niski napon i objekata mreže niskog napona manja je od napona U_i pošto se stalna mesta ne nalaze na nultom potencijalu, usled uticaja uzemljivača i drugih metalnih delova u tlu koji odvede struje kvara.

Tako se može pisati

$$E_d = f_d \cdot U_i \quad (85)$$

gde se sačinioem $f_d \leq 1$ obuhvata uticaj izjednačenosti potencijala.

U slučaju idealne izjednačenosti potencijala, koja se može postići u stambenim objektima ima se $f_d \approx 0$.

Merenjima izvedenim kod niza objekata 10 i 0,4 kV mreža utvrđene su vrednosti sačinioea f_d navedene u tabeli 2.2.

Napon dodira usled izlazećeg potencijala jednak je;

$$U_d = \frac{f_d \cdot k_i}{s_d} \cdot U_u \quad (86)$$

sa s_d je označen sačinilac dodria za mesto kvara kod određenog objekta mreže srednjeg ili niskog napona.

Vrednosti sačinioea s_d zavise, saglasno (13), od specifične otpornosti tla na mestu stajanja koja određuje prelazni otpor između stopala i tla.

Željena bezbednost od izlazećeg potencijala postići će se ako kod svih objekata bude zadovoljen uslov (15), gde je ovog puta U_{dd} napon dodira dozvoljen van postrojenja.

Kriterijum koji se sa stanovišta izlazećeg potencijala postavlja pred uzemljivač izvorne gradske TS biće tako, s obzirom na (38)

$$U_u \leq \frac{s_d}{f_d \cdot k_i} \cdot U_{dd} \quad (87)$$

Potreban otpor rasprostiranja uzemljivača je na osnovu (39)

$$R_u \leq \frac{s_d}{f_d \cdot k_i} \cdot \frac{U_{dd}}{I_u} \quad (88)$$

Ova dva, gornja, kriterijuma moraju da budu zadovoljena kod svih objekata mreže srednjeg i niskog napona na kojima se može javiti izlazeći potencijal. Pošto se u zgradama, posebno kod novijih naselja, obično imaju male vrednosti f_d , a visoke vrednosti s_d , kritičnijim u pogledu izlazećeg potencijala mogu se smatrati razvodne i priključne kablovske kutije i stubovi u mreži niskog napona.

Opasni naponi mogu se pojaviti naročito u slučaju kada se pomenuti objekti nalaze nad dobro provodnim tlom, i u blizini izvorne TS visoki/srednji napon.

Problemu iznošenja potencijala posvećena je posebna pažnja i u „Pravilniku o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000V“, objavljenom u Službenom listu (22.12.1995. broj 61, 673/član 55) [6].

„Ako se pri zemljospoju u postrojenju na koje su vezana postrojenja za neposredno napajanje javnih (distributivnih niskonaponskih mreža, preko plaštova, armatura ili električnih zaštita napojnih kablova iznose potencijali koji u napajanim postrojenjima i dalje, u niskonaponskim mrežama i instalacijama potrošača mogu da izazovu napone dodira veće od dozvoljenih napona dodira prema članu 13. ovog pravilnika (komentar: pomenuti član se odnosi na problem dimenzionisanja uzemljivača, obrađen u tački 2.4 ovog rada), moraju da se preduzmu mere za ograničavanje napona dodira na dozvoljene vrednosti [11]. Naponi dodira manji su od dozvoljenih napona dodira ako naponi uzemljenja u postrojenjima za neposredno napajanje javnih (distributivnih) niskonaponskih mreža ne prelaze dvostruku vrednost dozvoljenih napona dodira. U suprotnom, primenjuje se jedna, ili kombinacija više sledećih mera:

1. **smanjenje napona uzemljivača** postrojenja iz koga se iznosi potencijal (smanjenje struje zemljospoja, impendanse uzemljenja postrojenja, redukcionih faktora vodova preko koji se napaja postrojenje i sl.)

2. **preduzimanje dodatnih zaštitnih mera** u niskonaponskoj mreži i instalacijama potrošača (izjednačavanje potencijala kod potrošača i drugih ugroženih objekata niskonaponske mreže, zaštitno izolovanje i sl.);
3. **skraćenje vremena trajanja zemljospoja** u postrojenju iz koga se iznosi potencijal, što se postiže odgovarajućim izborom i podešavanjem uređaja relejne zaštite;
4. **izolovanje** jednog kraja električne zaštite kabla koji ima izolovani plašt.”

2.10 Vodovi kao elementi sistema uzemljenja

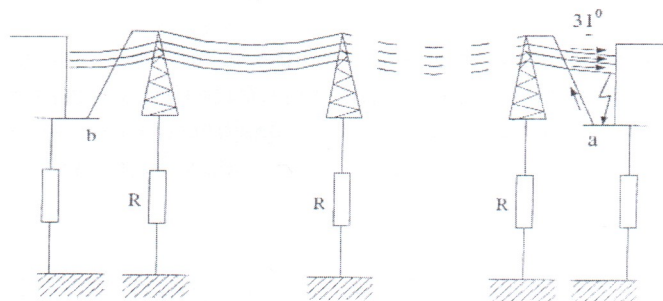
Nadzemni vodovi mogu značajno da utiču na karakteristike uzemljivačkih sistema i zato ih uvek treba uzimati u obzir pri projektovanju uzemljenja postrojenja [4].

Često značajan deo struje zemljospoja se odvodi preko zaštitne užadi nadzemnih vodova i/ili metalnih plašteva ili ekrana kablova, čime se smanjuje struja koja odlazi u tle sa uzemljivača postrojenja u kvaru i, srazmerno njoj, naponi dodira i koraka.

Posebno povoljne uticaje pomenute vrste stvaraju kablovi se neizolovanim metalnim omotačem koji deluju i kao uzemljivači. Međutim, preko zaštitne užadi nadzemnih vodova i plašteva/ekrana kablova iznose se povišeni potencijali iz postrojenja u kvaru, što može da poveća rizike od električnog udara. Zato je u okviru projekata uzemljenja postrojenja u naseljenim mestima potrebno proceniti vrednosti izlazećih potencijala i njima prouzrokovane napone dodira i koraka i obezbediti da ovi zadovoljavaju propisane kriterijume bezbednosti.

2.10.1 Nadzemni vodovi

Posmatraćemo slučaj zemljospoja u postrojenju na kraju nadzemnog voda sl.2.17. Po faznim provodnicima protiče trostruka nulta komponenta struje koja se u izvorno postrojenje vraća delom preko zaštitnog užeta voda, a delom preko zemlje. Pretpostavlja se da je vod homogen, sa jednako dugim rasponima.



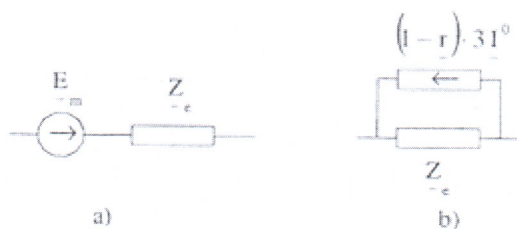
Slika 2.17 Nadzemni vod koji napaja postrojenje sa zemljospojem

Na svakom rasponu se u zaštitnom provodniku, usled magnetne sprege sa faznim provodnicima, indukuje ems:

$$E_m = -Z_m \cdot 3 \cdot I^0 \quad (89)$$

pri čemu je sa Z_m označena međusobna impedansa provodnika za povratni put struje preko tla.

Električna šema raspona prikazana na slici 2.18-a može se zameniti ekvivalentnom šemom sa strujnim izvorom kao na sl.2.18-b. Sa Z_e je označena sopstvena impedansa zaštitnog užeta na jednom rasponu za povratni put struje preko tla.

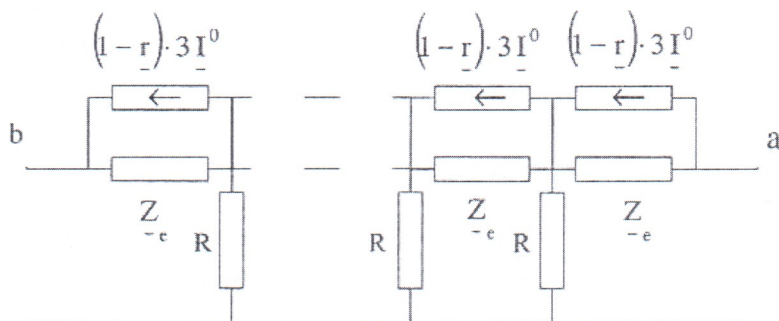


Slika 2.18 Električne šeme zaštitnog užeta na jednom rasponu

Da bi šema sa strujnim izvorom bila ekvivalentna šemi sa naponskim izvorom treba da je:

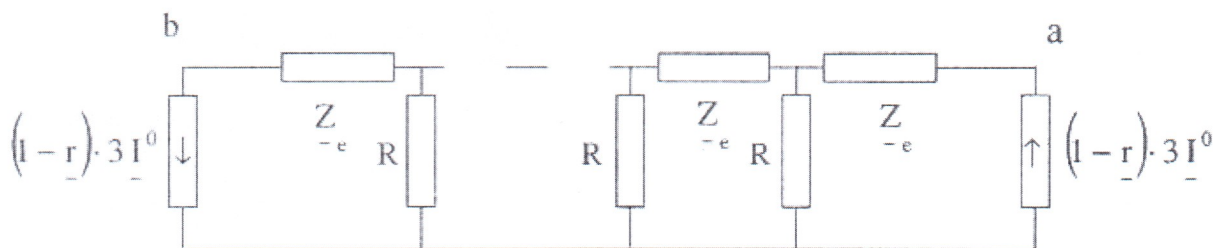
$$r = 1 - \frac{Z_m}{Z_e} \quad (90)$$

S obzirom na sl.2.18-b, zamenska šema voda za proračune struja i napona zaštitnog užeta dobija oblik kao na sl.2.19.



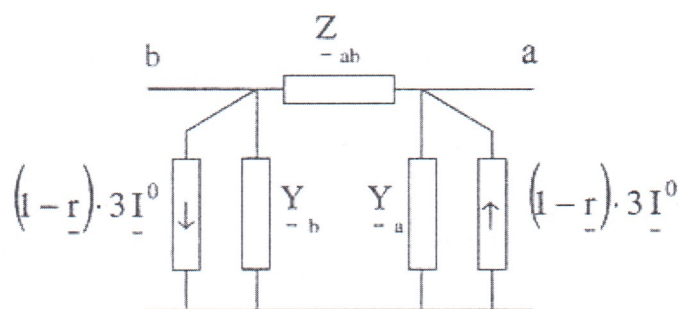
Slika 2.19 Zamenska šema zaštitnog užeta

Kako se vidi sa sl.2.19 strujni izvor na susjednim rasponima međusobno su jednaki. Iz navedenog se zaključuje da se komponenta struje kroz zaštitne provodnike koja je posledica magnetne indukcije od faznih provodnika ne odvodi u tle preko uzemljenja stubova. Ova komponenta struje se ispoljava samo na krajevima voda, kako je pokazano na sl.2.20.



Slika 2.20 Modifikovana šema zaštitnog užeta

Lančasta šema impedansi užeta i otpora uzemljenja stubova može se svesti na simetrični „Π“ četvoropol prikazan na sl.2.21



Slika 2.21 Ekvivalentna Π šema

Parametri u šemi na sl.2.21 izračunavaju se primenom sledećih relacija:

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z} \cdot \text{sh} \left(n \underline{g} \right) \quad (91)$$

$$\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}} \text{th} \left(\frac{n \underline{g}}{2} \right) - \underline{y} \quad (92)$$

gde je n broj raspona. Admitansa \underline{y} jednaka je:

$$\underline{y} = y = \frac{1}{2R} \quad (93)$$

Ostali parametri u šemi definisani su sledećim izrazima:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_e (2 \underline{y} \underline{Z}_e + \underline{y}^2 \underline{Z}_e^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (94)$$

$$\underline{g} = \ln \left[1 + \underline{y} \underline{Z}_e + (2 \underline{y} \underline{Z}_e + \underline{y}^2 \underline{Z}_e^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (95)$$

Ako je $\underline{y} \underline{Z}_e \ll 1$, što je obično slučaj gornji izrazi se uprošćavaju i postaju:

$$\underline{Z} \approx \left(\frac{\underline{Z}_e}{2 \underline{y}} \right)^{\frac{1}{2}} = (\underline{Z}_e R)^{\frac{1}{2}} \quad (96)$$

$$\underline{g} \approx \ln \left[1 + (2 \underline{y} \underline{Z}_e)^{\frac{1}{2}} \right] = \left(\frac{\underline{Z}_e}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (97)$$

ako je n veliko tada je:

$$\text{th} \left(\frac{n \underline{g}}{2} \right) \approx 1 \quad (98)$$

Tako da se iz formule (94) dobija:

$$\underline{Z}_{aL} \equiv \frac{1}{\underline{Y}_{aL}} = \frac{\underline{Z}_e}{2} + \left[\left(\frac{\underline{Z}_e}{2} \right)^2 + \frac{\underline{Z}_e}{2 \underline{y}} \right]^{\frac{1}{2}} \approx \frac{\underline{Z}_e}{2} + (\underline{Z}_e R)^{\frac{1}{2}} \quad (99)$$

U gornjoj formuli (99) indeks L označava da se odgovarajući simboli odnose na duge vodove.

Sa \underline{Z}_{aL} označena je impedansa uzemljenja dugog voda.

Jednakost (98) se može smatrati zadovoljenom ako je:

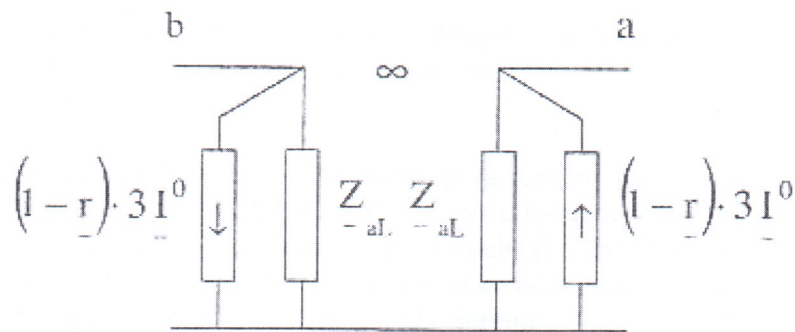
$$e^{-\frac{n \underline{g} R}{2}} \leq \varepsilon \cdot e^{\frac{n \underline{g} R}{2}} \quad (100)$$

gde je g_r - realni deo \underline{g} , a ε – mali broj. Za, na primer $\varepsilon = 0,05$ iz (100) se dobija:

$$n \geq \frac{3}{\varepsilon g_r} \quad (101)$$

Za n koje zadovoljava (101) impedansa \underline{Z}_{ab} u šemi na sl.2.21 je mnogostruko veća od impedanse \underline{Z}_{aL} i može se izostaviti iz šeme. Tako ova dobija izgleda kao na sl.2.22.

Može se primetiti da, kod dugih vodova prilike na krajevima a i b voda ne utiču jedne na druge. One su određene isključivo parametrima voda.



Slika 2.22 Zamenska šema za duge vodove

1.4 Praktične metode proračuna karakterističnih veličina horizontalnih mrežastih uzemljivača

Za veća elektroenergetska postrojenja (prostorno i po značaju) u praksi se uobičajeno koriste horizontalne uzemljivačke mreže, sa ili bez dodatnih vertikalnih elemenata.

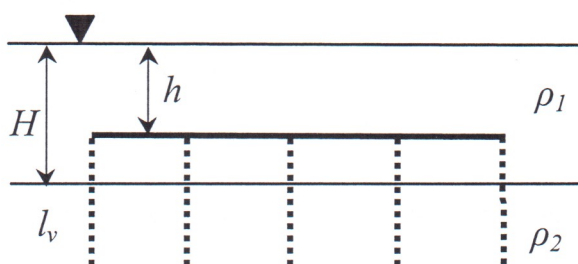
Zato se ovde daju praktični izrazi za proračun karakterističnih veličina ovakvih uzemljivača.

Daju se izrazi za proračun:

- **otpora rasprostiranja,**
- **potencijalnih razlika dodira i koraka**

za slučaj kada je uzemljivač položen u homogenom ili nehomogenom (dvoslojnom) tlu.

Generalno se pretpostavlja da je uzemljivač položen u gornjem sloju tla.



Slika 1.1 Primer uzemljivačke mreže u dvoslojnom tlu

U izrazima za proračune koriste se sledeće oznake :

I_v - struja koja se odvodi sa uzemljivača u tlo

S - površina koju pokriva uzemljivačka mreža

L - ukupna dužina provodnika mreže

d - prečnik provodnika mreže

h - dubina polaganja mreže

N - broj okaca mreže

D - srednje rastojanje između susednih provodnika u mreži ($D = \sqrt{S/N}$)

n - broj paralelnih provodnika mreže u jednom karakterističnom pravcu. U slučaju različitog broja provodnika za pojedine pravce uzima se srednja geometrijska vrednost $n = \sqrt{n_x n_y}$

ρ_1, ρ_2 - specifična otpornost gornjeg, odnosno donjeg sloja tla, respektivno

H - debljina gornjeg sloja tla u dvoslojnom tlu

l - dužina jednog vertikalnog elementa

n_v - broj vertikalnih elemenata mreže

L_v - dužina svih vertikalnih elemenata

R_{uh} - otpor rasprostiranja uzemljivača za slučaj homogenog tla ($\rho = \rho_1$)

R_{un} - otpor rasprostiranja uzemljivača za slučaj nehomogenog (dvoslojnog) tla

E_{mh} - maksimalna potencijalna razlika dodira za slučaj homogenog tla ($\rho = \rho_1$)

E_{mn} - maksimalna potencijalna razlika dodira za slučaj nehomogenog (dvoslojnog) tla

E_{kh} - potencijalna razlika koraka za slučaj homogenog tla ($\rho = \rho_1$)

E_{kn} - potencijalna razlika koraka za slučaj nehomogenog (dvoslojnog) tla

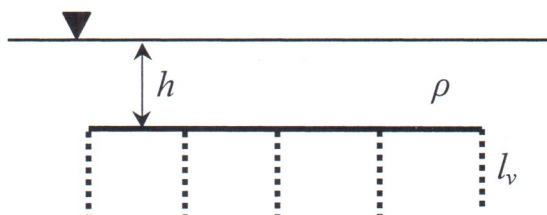
E_d, E_k - stvarna potencijalna razlika dodira i koraka, respektivno

U_d, U_k - stvarni napon dodira i napon koraka, respektivno;

$U_{d\text{doz}}, U_{k\text{doz}}$ - dozvoljeni napon dodira, odnosno koraka, respektivno

t_i - vreme trajanja kvara.

1.4.1 Proračun karakterističnih veličina za uzemljivač položen u homogenom tlu



Slika 1.2 Karakteristične veličine

- **Proračun otpora rasprostiranja**

a) Mrežasti uzemljivač kvadratnog i pravougaonog oblika:

$$R_{uh} = 0.13 \frac{\rho}{\sqrt{S}} \log_{10} \left(\frac{2400\sqrt{S}}{N} \right) \quad (22)$$

b) Mrežasti uzemljivač sa vertikalnim elementima raspoređenim duž obima mreže:

$$R_{uh} = 0.13 \frac{\rho}{\sqrt{S}} \left(1 - 0.45 \sqrt{\frac{l}{\sqrt{S}}} \right) \cdot \log_{10} \left(\frac{2400\sqrt{S}}{N} \right) \quad \frac{l}{\sqrt{S}} \leq 0,2 \quad (23)$$

- **Proračun maksimalne potencijalne razlike dodira**

$$E_{mh} = \rho K_m K_{im} \frac{I_u}{L_{em}} \quad (24)$$

pri čemu je :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (25)$$

$$K_{ii} = \begin{cases} 1 & \text{ako postoje vertikalni elementi po obimu i/ili uglovima} \\ 1 / (2n)^{2/n} & \text{ako ne postoje vertikalni elementi} \end{cases} \quad (26)$$

$$K_h = \sqrt{1+h} \quad (27)$$

Faktor neravnomernosti raspodele struje K_{im} računa se iz izraza

$$K_{im} = 0.656 + 0.172 n \quad (28)$$

Ekvivalentna dužina provodnika L_{em} računa se iz izraza

$$L_{em} = L + 1,15 \cdot L_v \quad (29)$$

- **Proračun potencijalne razlike koraka**

$$E_{kh} = \rho K_s K_{is} \frac{I_u}{L_{es}} \quad (30)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{W}{D} \right] \quad (31)$$

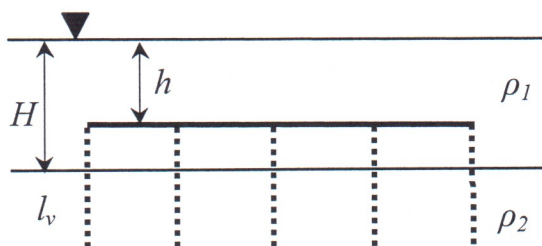
$$W = \begin{cases} 0 & \text{za } n = 2 \\ 0.5 + 0.9 \cdot \ln \frac{n-1}{2} & \text{za } n > 2 \end{cases} \quad (32)$$

$$K_{is} = 0.94 + 0.047 n \quad (33)$$

$$L_{es} = L + 2L_v \quad (34)$$

1.4.2 Proračun karakterističnih veličina za uzemljivač položen u gornjem sloju dvoslojnog tla

Pretpostavlja se da je mreža položena u gornjem sloju nehomogenog, dvoslojnog tla. Dodavanje vertikalnih elemenata ima smisla samo ako je $\rho_1 > \rho_2$.



Slika 1.3 Postavljanje uzemljivača u dvoslojnom tlu

1.4.2.1 Proračun otpora rasprostiranja

a) Mrežasti uzemljivač kvadratnog i pravougaonog oblika

$$R_{un} = C_g R_{uh} \quad (35)$$

$$C_g = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^x \quad (36)$$

$$x = \begin{cases} 0.14 \cdot \log_{10} \left(\frac{44 N \sqrt{S}}{H^2} \right) & 0.2 \leq \frac{\rho_2}{\rho_1} < 1 \\ 0.12 \cdot \log_{10} (3160 \cdot N \sqrt{S}) - 0.2 \cdot \log_{10} H \cdot \log_{10} \frac{1000}{\sqrt{S}} & 1 \leq \frac{\rho_2}{\rho_1} \leq 5 \end{cases} \quad (37)$$

b) Mrežasti uzemljivač sa vertikalnim elementima raspoređenim duž obima (usvojeno da je dužina vertikalnih elemenata jednaka dvostrukoj debljini gornjeg sloja tla)

$$R_{un} = C_R R_{uh} \quad (38)$$

$$C_R = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0.76}, \text{ za } \rho_2 \leq \rho_1 \quad (39)$$

1.4.2.2 Proračun maksimalne potencijalne razlike dodira

Navedeni izrazi važe i za mrežaste i za kombinovane uzemljivače pod uslovom da dužina vertikalnih elemenata pojedinačno nije veća od 3 m.

$$E_{mn} = C_m E_{mh} \quad (40)$$

Korekcionni faktor zbog nehomogenosti tla C_m se računa iz izraza:

$$C_m = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^x \quad (41)$$

$$x = \begin{cases} 0.042 \cdot \log_{10}(3.53 H) \cdot (\log_{10} N)^2 - 0.5 \cdot \log_{10} \frac{H}{6} & \rho_2 < \rho_1 \\ 0.12 \cdot \log_{10}(N\sqrt{S}) - 0.16 \cdot \log_{10}(4.6H) & \rho_2 > \rho_1 \end{cases} \quad (42)$$

1.4.2.3 Proračun potencijalne razlike koraka

$$E_{kn} = C_s E_{kh} \quad (43)$$

$$C_s = 1 + 0.7 \log_{10} \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (44)$$