

5. Uzemljenje elektroenergetskih uređaja i postrojenja

LITERATURA ZA DEO PREDAVANJA IZ ELEKTROMAGNETNE KOMPATIBILNOSTI

1. Osnovna literatura

1.1 Jovan Nahman, Vladica Mijailović:

"ODABRANA POGLAVLJA IZ VISOKONAPONSKIH POSTROJENJA"

Elektrotehnički fakultet, Akademska misao, Beograd, 2002.

Poglavlje: Uzemljenje postrojenja, pp. 115 - 168

1.2 Milenko Đurić: " VISOKONAPONSKA POSTROJENJA "

Beopres, Beograd, 2009.

Poglavlje : Uzemljenje postrojenja, pp.350 - 379

1.3 Jovan Nahman, Vladica Mijailovic : "RAZVODNA POSTROJENJA“

Elektrotehnički fakultet, Akademska misao, Beograd, 2015.

Poglavlja : Uzemljenje i uzemljivači, pp.327 - 368

2. Pomoćna literatura:

2.1 Jovan Nahman :

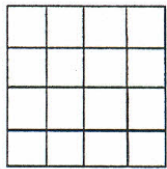
"UZEMLJENJE NEUTRALNE TAČKE DISTRIBUTIVNIH MREŽA“

Naučna knjiga, Beograd, 1980.

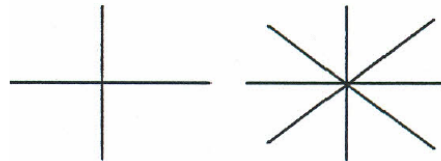
- ❖ **Uzemljenje podrazumeva skup sredstava i mera** kojima se obezbeđuje:
 - normalan rad elektroenergetskih objekata i uređaja,
 - bezbedan rad i kretanje ljudi i životinja u blizini objekata,
 - zaštita ljudi i uređaja od prenapona i struja pri atmosferskim pražnjenjima.
- ❖ **Uzemljiti** znači galvanski povezati provodne delove uređaja sa uzemljivačkim sistemom.
- ❖ **Uzemljivački sistem** čine uzemljivač i drugi metalni delovi koji su u kontaktu sa tlom (zaštitna užad nadzemnih vodova, plaštev i kablova, temeljni uzemljivači i dr.).
- ❖ **Uzemljivač** predstavlja jedan ili više provodnika položenih u tlo tako da je ostvaren neposredan kontakt sa tlom, ili jedan provodnik ili više provodnika koji su položeni u beton koji je po velikoj površini u dodiru sa tlom.

TIPOVI UZEMLJIVAČA

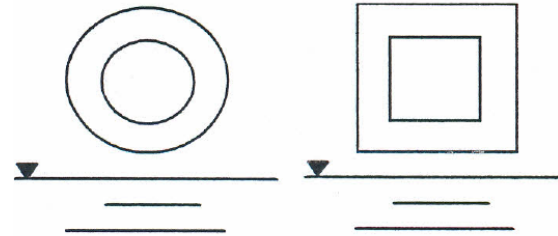
- ❖ Uzemljivači (konstruktivno) mogu biti:
horizontalni, vertikalni i kosi.
- ❖ **Horizontalni uzemljivač** je sastavljen od horizontalno položenih provodnika, paralelnih sa površinom tla, na relativno maloj dubini.
- Horizontalni uzemljivač može biti:
1) mrežasti, 2) zrakasti, 3) u vidu prstenova, 4) u vidu kombinacije tih oblika.



Sl. 1 mrežasti

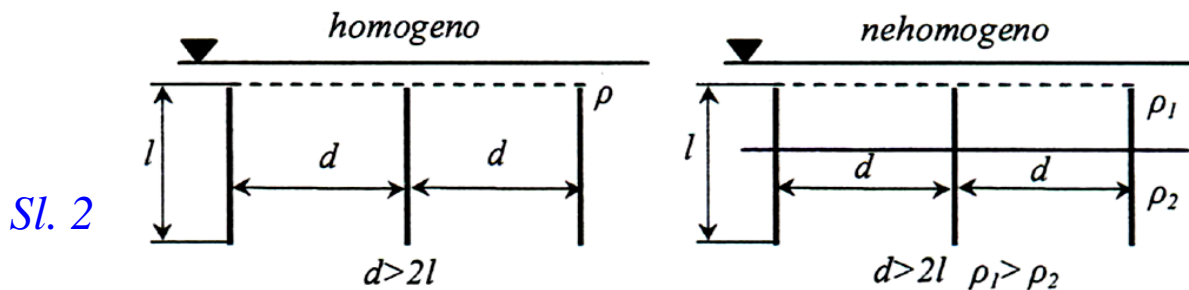


zrakasti



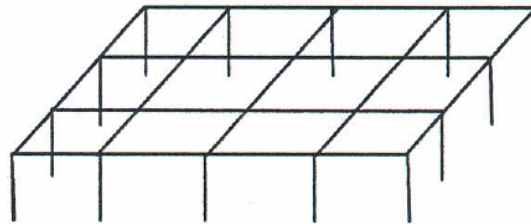
u vidu prstenova

- ❖ **Vertikalni uzemljivač** 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 prethodno pomenutih 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.



Sl. 3

ELEKTRIČNI UDAR

❖ Efekti struje električnog udara

- ❖ Ljudi mogu biti izloženi električnom udaru od, najčešće, struja industrijske učestanosti, koje su i najopasnije jer se električni udari usled jednosmernih i visokofrekventnih struja lakše podnose.
- ❖ Do električnog udara dolazi kada kroz čovekovo telo protekne struja zbog premošćenja neke potencijalne razlike delovima tela.
- ❖ Najopasniji električni udari su usled struja koje se kroz čovekovo telo uspostavljaju na putu **ruka-ruka** i **ruka-noga**, pošto prolaze preko srca i organa za disanje.
- ❖ Struje koje se uspostavljaju na putu **noga-noga** manje su opasne.
Međutim radi sigurnosti u praktičnim proračunima smatra se da su ove struje jednako opasne kao i one prethodno pomenute.

- ❖ Posledice električnog udara zavise od efektivne vrednosti struje kroz čovekovo telo i trajanja njenog proticanja.

Tab.1. Dejstvo električnog udara od struje industrijske učestanosti

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.

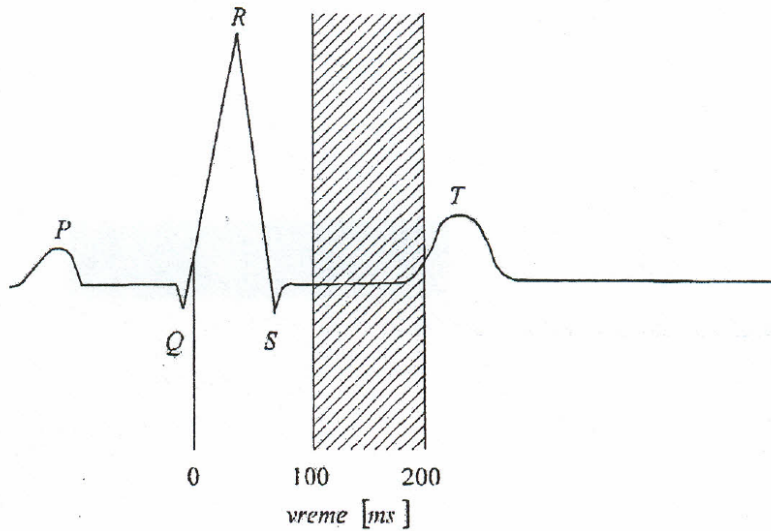
- ❖ Orijentacioni pregled efekata proticanja struje na kritičnom putu dat je u Tab.1. Ova tabela je sastavljena na osnovu eksperimenata na ljudima i životinjama, kao i na osnovu iskustvenih saznanja i rekonstrukcija pojedinih nesrećnih slučajeva.
- ❖ Granične struje pri kojima je, još uvek, moguće voljno odvajanje od dela pod naponom (*let-go currents*) za 90% muškaraca je 12,5mA, a za 50% je 16mA. Kod žena na kojima su vršeni eksperimenti ove struje su iznosile 8mA, očno 10,5mA.
- ❖ **Struje (10 - 50)mA** se moraju smatrati opasnim, i to više što su bliže gornjoj granici.
- ❖ Pogodena osoba najčešće neće moći da se odvoji od dela pod naponom, pa će struja električnog udara proticati kroz telo sve dok se ne isključi deo pod naponom.

- ❖ Kod dugog delovanja ovakvih struja dolazi do obamrlosti, gubitka svesti, prestanka disanja, pa i smrti usled gušenja.
- ❖ Pogođenim osobama treba, posle odvajanja od napona, davati veštačko disanje. Kod struja reda 50mA do gubitka svesti i gušenja dolazi već posle nekoliko minuta.
- ❖ Ako su struje električnog udara u opsegu (50 - 500)mA , obično dolazi do ventrikularne fibrilacije- nekoordinisanog treperenja srčanih zalizaka, usled čega se obustavlja tok krvi u organizmu.
- ❖ Usled prestanka rada srca smrt nastupa u roku od nekoliko minuta. Zbog prirode dejstva struje, veštačko disanje ne pomaže. Pogođena osoba se može povratiti samo defibrilacijom srca elektrošokovima.
- ❖ Međutim, osobi koja je pretrpela električni udar treba uvek davati veštačko disanje do dolaska medicinske ekipe, jer se ne može znati priroda dejstva struje kojoj je pomenuta osoba bila izložena.

❖ Kriterijumi opasnosti

- ❖ Da bi se ustanovio rizik od nastanka fibrilacije u zavisnosti od trenutka nastanka i trajanja udara, efektivne vrednosti struje i pojedinih drugih činilaca, izveden je veliki broj eksperimenata na ovcama, psima i svinjama.
- ❖ Dobijeni rezultati omogućili su da se izvedu izvesni zaključci i uspostave neki kriterijumi opasnosti.

❖ Kriterijumi opasnosti



Kritična faza srčanog ciklusa

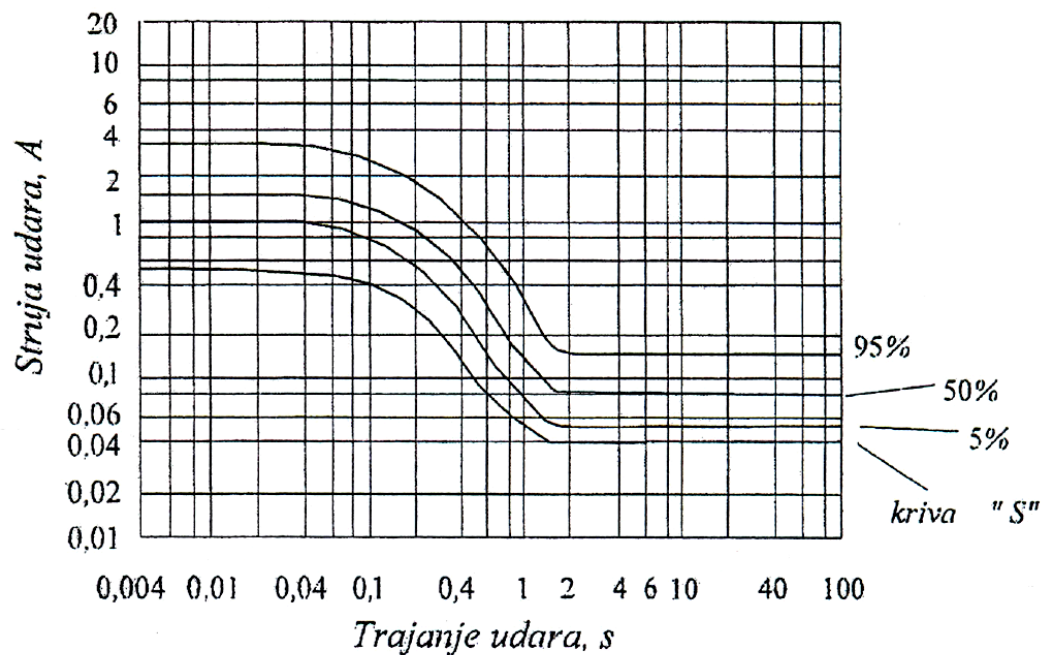
Sl. 4

Ustanovljeno je da:

-će ventrikularna fibrilacija nastupiti, nezavisno od toga kolika je struja samo ako do udara dođe u toku S-T faze srčanog ciklusa i ako trajanje električnog udara nije duže od $(1/3)$ dužine trajanja jednog srčanog ciklusa (što je približno 0,3 s);

- ako udar traje duže od trećine srčanog ciklusa verovalnoća nastanka fibrilacije zavisi od **efektivne vrednosti struje i njenog trajanja.**

- ❖ Na slici su prikazane **granične krive** za nastanak fibrilacije sa određenom verovatnoćom.



➤ Date su krive vrednosti struja pri kojima nastupa ventikularna fibrilacija sa verovatnoćama 95%, 50% i 5%.

➤ Prema IEC definišu se "S" krive (*Safety curve*) dozvoljenih struja električnog udara.

Sl. 5 Fibrilacione struje

- ❖ Američki propisi polaze od pretpostavke da je kritična veličina **toplotni impuls struje električnog udara**:

$$S = \int_0^t i^2(t) dt$$

- ❖ Na osnovu pomenute pretpostavke i raspoloživih eksperimentalnih rezultata propisuje se sledeći kriterijum za struju električnog udara:

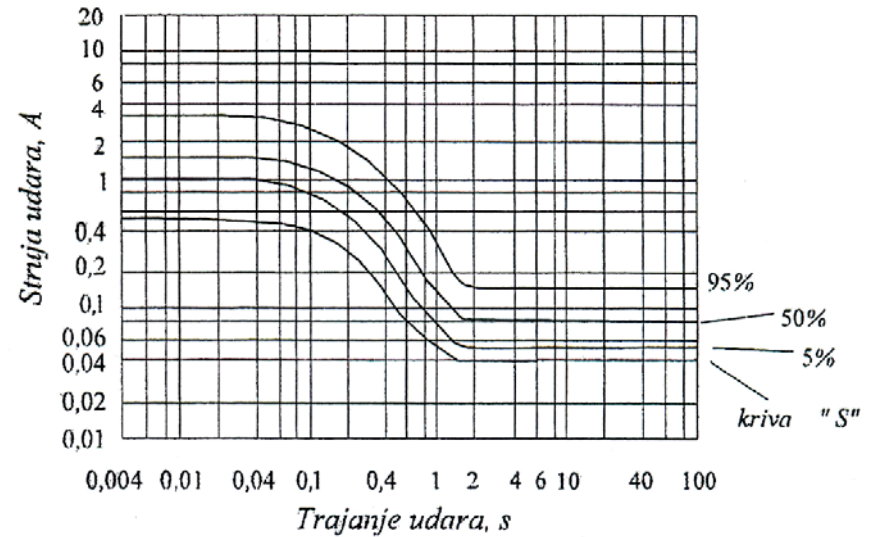
$$I_d \leq \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad , 0.03s \leq t \leq 3s$$

- ❖ Pri tome je učinjena pretpostavka da je masa pogođene osobe 50 kg .
- ❖ Za osobe čija masa nije manja od 70kg koristi se kriterijum:

$$I_d \leq \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad , 0.03s \leq t \leq 3s$$

$$I_d \leq \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad , 0.03s \leq t \leq 3s$$

$$I_d \leq \frac{0.157}{\sqrt{t}} \quad , 0.03s \leq t \leq 3s$$



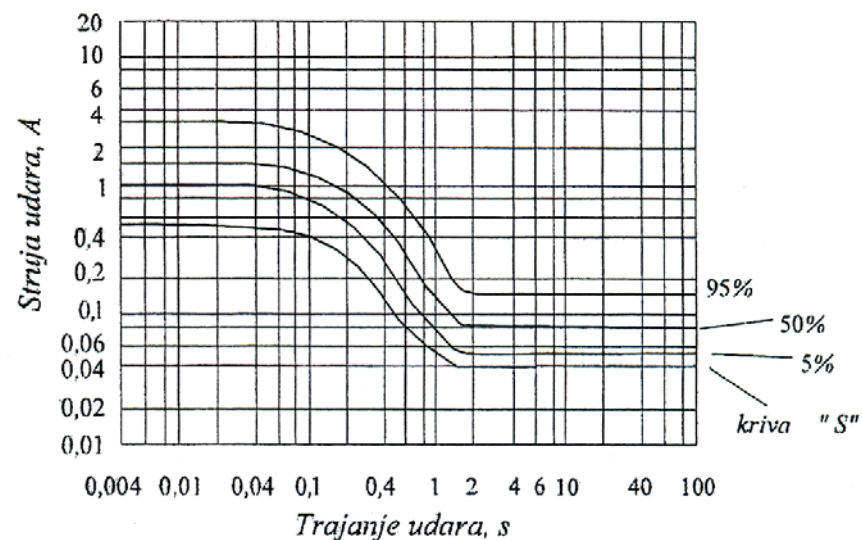
Fibrilacione struje

IEC - "S" krive (*Safety curve*) dozvoljenih
 stuja električnog udara

- ❖ Na osnovu drugačije statističke interpretacije ekperimentalnih rezultata predloženi su kriterijumi koji količinu struje električnog udara smatraju merodavnom veličinom koju treba ograničiti:

$$Q = \int_0^t i(t) dt$$

- ❖ Krive na Sl.5 u vremenskom intervalu (0,04 - 2)s približno odgovaraju ovom kriterijumu.



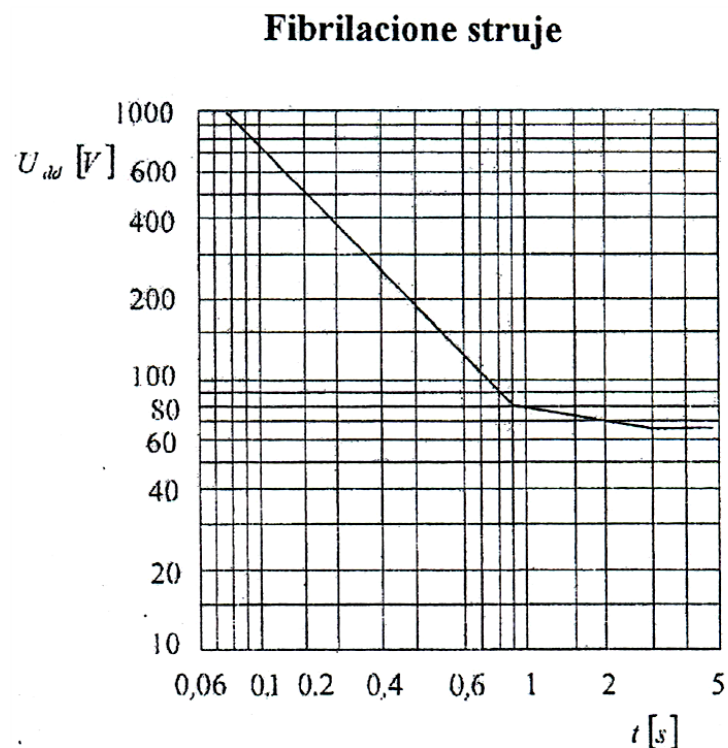
Sl. 5 Fibrilacione struje

- ❖ Na slici je prikazana **kriva dozvoljenih napona dodira prema VDE preporukama**, koja takođe uvažava prethodni kriterijum (Q).

- ❖ **Dozvoljeni naponi dodira** dobijeni su prema relaciji:

$$U_{dd} = Z \cdot I_d$$

gde je Z - impedansa čovekovog tela za koju je usvojeno da iznosi 1000Ω .



Sl. 6 Dozvoljeni naponi dodira prema VDE 0141

- ❖ Domaći propisi zasnovani su, takođe, na pretpostavci da je količina elektriciteta koju apsorbuje organizam veličina koja određuje opasnost od nastupanja ventrikularne fibrilacije.
- ❖ Kriterijum je isti za dozvoljene napone dodira i koraka, i ima oblik:

$$U_{doz}(V) = 1000, \text{ za } t \leq 0.075s,$$

$$U_{doz}(V) = 75/t, \text{ za } 0.075 < t \leq 1.153s,$$

$$U_{doz}(V) = 65, \text{ za } t > 1.153s; \text{ gde je } (t) \text{ trajanje kvara.}$$

- ❖ SRPS EN 50522
 - ❖ Pravilnik o tehničkim normativima (PTN) za uzemljenje elektroenergetskih postrojenja
 - ❖ ...
-

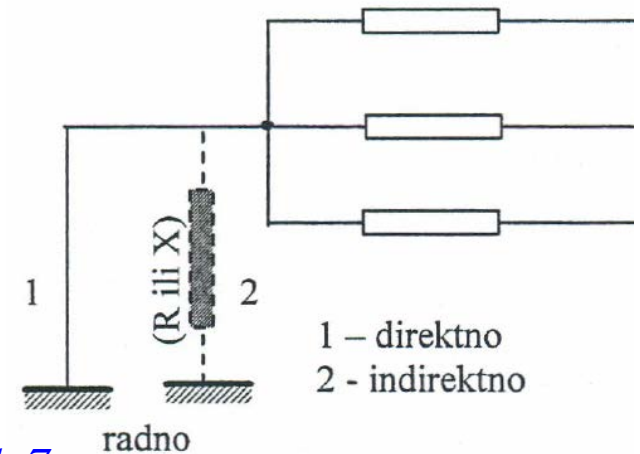
VRSTE UZEMLJENJA

- ❖ Prema nameni uzemljenja se dele na:
 - pogonska (radna),
 - zaštitna,
 - gromobranska.

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

VRSTE UZEMLJENJA

- ❖ 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).



Sl. 7

- ❖ **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 opremom pogođenom kvarom ili se kreću u njihovoj blizini.
- ❖ **Gromobransko uzemljenje** je uzemljenje gromobranske instalacije i služi za odvođenje struja atmosferskog praznjenja u tlo.

❖ Tipični primeri :

- *uzemljenje neutralne tačke transformatora.*

- U mrežama najviših napona (110 kV, 220 kV, 400kV) primenjuje se direktno uzemljenje.
- Kod distributivnih transformatora 10(20)/0.4 kV takođe 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*

KARAKTERISTIČNE VELIČINE UZEMLJIVAČA

- ❖ **Struja odvođenja sa uzemljivača u tlo I_u** - deo ukupne struje kvara koji se odvodi u tlo sa samog uzemljivača ($I_u \leq I_k$).
- ❖ **Otpor rasprostiranja uzemljivača R_u**
 - To je otpor kojim se uzemljivač suprotstavlja proticanju struje kada je drugi uzemljivač u strujnoj petlji daleko od posmatranog (nije moguće stvoriti 50 Hz struju samo kroz jedan uzemljivač).
 - Otpor rasprostiranja je jedina karakteristična veličina uzemljivača koja zavisi isključivo od **konstruktivnih parametara uzemljivača** i **parametara tla**.
- ❖ **Impedansa uzemljenja Z_u** je impedansa koju, pri frekvenciji 50 Hz, sistem uzemljenja suprotstavlja odvođenju struje u tlo.
 - Izračunava se kao paralelna veza otpora rasprostiranja uzemljivača i impedanse uzemljenja nadzemnih i kablovskih vodova.

- ❖ Svi potencijali se određuju prema referentnoj zemlji.
- ❖ **Potencijal uzemljivača** (V_u) je potencijal uzemljivača u odnosu na "daleku" ili "referentnu" zemlju, čiji potencijal ne zavisi od struje posmatranog uzemljivača. Kako je uslovno potencijal "referentne" zemlje ($V_{ref}=0$) napon uzemljivača jednak je njegovom potencijalu.

$$U_{uz} = V_u - V_{ref} = V_u$$

$$V_u = R_u \cdot I_u$$

❖ **Potencijalna razlika dodira E_d** je razlika potencijala uzemljivača V_u i neke tačke na tlu postrojenja V_0 .

❖ 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:

$$E_d = V_u - V_0 = U_u - V_0$$

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 izraza 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.

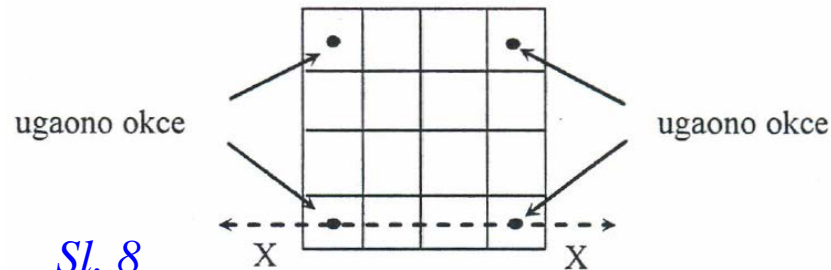
- ❖ Pošto raspored opreme u postrojenju često nije unapred poznat, u postupku projektovanja se često koristi **maksimalna vrednost potencijalne razlike dodira E_m** .
- ❖ Maksimalna vrednost potencijalne razlike dodira za ceo uzemljivač definisana je izrazom:

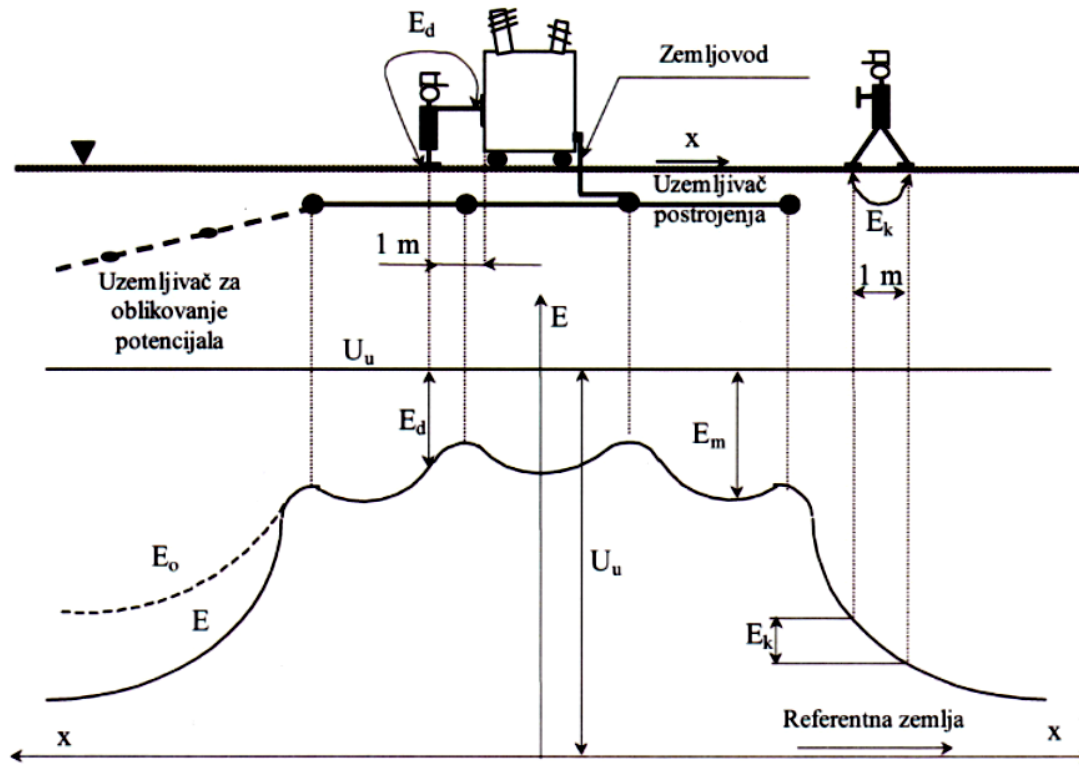
$$E_m = V_u - V_{0\min}$$

gde je $V_{0\min}$ najmanja vrednost potencijala tla iznad uzemljivača (na celoj površini postrojenja).

- ❖ 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**.
- ❖ **Potencijalna razlika ugaonog okca** - razlika potencijala uzemljivača i potencijala tačke na površini tla koja se nalazi na preseku dijagonala ugaonog okca uzemljivača.
- ❖ Na Sl. 9 je prikazan tipičan oblik krive raspodele potencijala (E) na površini tla duž pravca koji prolazi sredinom ivičnog polja (okca) uzemljivačke mreže koja je prikazana na Sl.8.
- ❖ Na Sl. 9 su označene i karakteristične vrednosti potencijala i potencijalnih razlika koje se javljaju pri odvođenju struje sa uzemljivača u tlo.





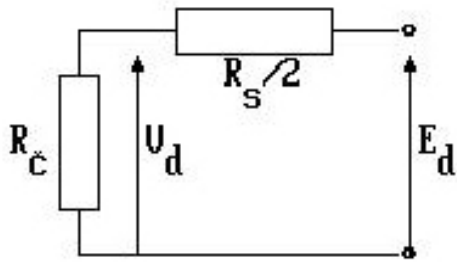
Sl. 9

- ❖ **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 prethodnoj slici (Sl.9) je isprekidanom linijom prikazan uticaj dodatnog uzemljivača za oblikovanje raspodele potencijala na tu raspodelu (E_o).
- ❖ **Prelazna otpornost površina tla - stopalo R_s** , smatra se da je jednaka otporu rasprostiranja metalne kružne ploče prečnika $D_e = 0,16$ m na površini tla.

$$R_s = \frac{\rho_{pov}}{2D_e}$$

gde je ρ_{pov} specifična otpornost površinskog sloja tla.

- ❖ **Napon dodira U_d** - stvarni napon kome je izložen čovek prilikom dodira.
- ❖ Strujno kolo se zatvara putem ruka - stopalo.
- ❖ Pretpostavlja se da pogođena osoba stoji sa sastavljenim stopalima.



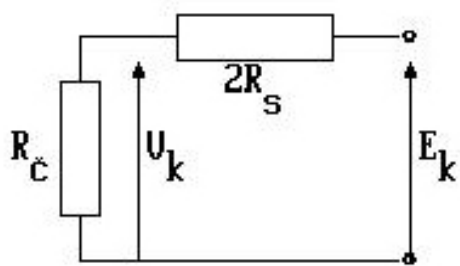
Sl. 10 Šema za određivanje napona dodira

$$U_d = \frac{R_č}{R_č + R_s/2} E_d = \frac{E_d}{1 + R_s/(2R_č)} = \frac{E_d}{1 + 1,56 \times 10^{-3} \rho_{pov}}$$

$$s_d = 1 + 1,56 \times 10^{-3} \rho_{pov}$$

$$U_d = \frac{E_d}{s_d}$$

- ❖ **Napon koraka U_k** - stvarni napon kome je izložen čovek prilikom koraka.
- ❖ Strujno kolo se zatvara putem stopalo - stopalo.



Sl. 11 Šema za određivanje napona koraka

$$U_k = \frac{R_{\check{c}}}{R_{\check{c}} + 2R_s} E_k = \frac{E_k}{1 + 2R_s/R_{\check{c}}} = \frac{E_k}{1 + 6,25 \times 10^{-3} \rho_{pov}}$$

$$s_k = 1 + 6,25 \times 10^{-3} \rho_{pov}$$

$$U_k = \frac{E_k}{s_k}$$

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.
- ❖ **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 preseci provodnika**, s obzirom na **mehanička naprezanja** i **koroziju**, kao i **najveće trajno dozvoljene struje provodnika** u sistemu uzemljenja određeni su propisima.

Izbor materijala i preseka uzemljivača

- predmet više standarda, propisa i tehničkih preporuka
- međusobno su usaglašeni
- razlika: ...

❖ Uzemljivač ne sme biti manjeg preseka od utvrđenog :

- SRPS HD 60364-5-54 Električne instalacije niskog napona - uzemljenje i zaštitni provodnici

Tabela 5.1. Najmanje mere i uslovi za uzemljivače prema standardu SRPS HD 60364-5-54 [3.4.19]

Materijal ¹⁾	Vrsta uzemljivača	Najmanji presek (mm ²)	Najmanja debljina (mm)	Naročiti uslovi
Gvožđe vruće pocinkovano sa najmanjim slojem cinka od 70 µm	Traka	100	3	
	Okrugli puni profil	78	Φ 10	Kod složenih dubinskih uzemljivača najmanje Φ 20 mm
	Cev			Najmanje Φ 25 mm, najmanja debljina zida 2 mm
	Profilisani (L, U ili I profil)	100	3	

Izbor materijala i preseka uzemljivača

- predmet više standarda, propisa i tehničkih preporuka
- međusobno su usaglašeni
- razlika: ...

❖ Uzemljivač ne sme biti manjeg preseka od utvrđenog :

- Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000V

Tabela 5.2. Najmanje mere i obavezni uslovi za uzemljivače prema Pravilniku [6.1.1]

Materijal	Provodnik uzemljivača	Najmanji presek (mm ²)	Najmanja debljina (mm ²)	Ostali obavezni uslovi
Toplo pocinkovan čelik	Traka	100	4	–
	Okrugli puni	78 (Φ 10 mm)	–	Kod nastavljenih vertikalnih provodnika najmanji prečnik 20 mm
	Cev	–	–	Najmanji prečnik 25 mm; najmanja debljina 2 mm
	Profilisani čelik	–	–	–
Čelik presvučen bakrom	Okrugli puni	Za čelik: 50 Za bakar: 30	–	Kod nastavljenih vertikalnih provodnika najmanji prečnik 15 mm
Bakar	Traka	50	2	–
	Uže	35	–	Najmanji prečnik žice 1,8 mm
	Okrugli puni	35	–	–
	Cev	–	–	Najmanji prečnik 20 mm; najmanja debljina 2 mm

- ❖ DIMENZIONISANJE PREMA NAPONIMA (POTENCIJALIMA) koji se javljaju u sistemu uzemljenja svodi se na samo dva kriterijuma :

$$U_d = \frac{E_d}{s_d} \leq U_{doz}$$

$$U_k = \frac{E_k}{s_k} \leq U_{doz}$$

- ❖ DOZVOLJENI NAPONI DODIRA U_{ddoz} , ODNOSNO KORAKA U_{kdoz} , određeni su propisima i daju se u funkciji vremena trajanja kvara t .
- ❖ Prema našim propisima je: $U_{ddoz} = U_{kdoz} = U_{doz}$
- ❖ Dozvoljena vrednost napona dodira, odnosno koraka U_{doz} određena je propisima i daje se u funkciji vremena trajanja kvara:

$$U_{doz}(V) = 1000, \text{ za } t \leq 0.075s,$$

$$U_{doz}(V) = 75/t, \text{ za } 0.075 < t \leq 1.153s,$$

$$U_{doz}(V) = 65, \text{ za } t > 1.153s; \text{ gde je } (t) \text{ trajanje kvara.}$$

❖ VREME TRAJANJA KVARA (ZEMLJOSPOJA) t određuje se za normalne uslove rada zaštitne opreme i prekidača.

❖ Minimalni dozvoljeni presek provodnika uzemljivača je:

$$s_{min}(mm^2) = k \sqrt{A_0} ,$$

$$s_{min}(mm^2) = k \cdot I(kA) \cdot \sqrt{t(s)}$$

$$k_{Cu} = 6,25, k_{Fe} = 15,0, A_0(kA^2 \cdot s).$$

❖ Ako se struja menja u vremenu s obzirom na delovanje zaštite i automatsko ponovno uključenje:

$$s_{min}(mm^2) = k \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^n I_j^2 \cdot t_j}$$

I_j - struja u vremenskom intervalu j ,
 t_j - trajanje vremenskog intervala j ,
 n - broj vremenskih intervala

- ❖ U slučaju da postoji mogućnost višestrukog uzastopnog uspostavljanja struje zemljospoja (automatsko ponovno uključenje - 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.

(Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000V)

Dimenzionisanje provodnika uzemljivača prema struji kratkog spoja

❖ Struja koja ulazi u uzemljivač teče kroz dva provodnika istog preseka i grana se najmanje na dve strane.

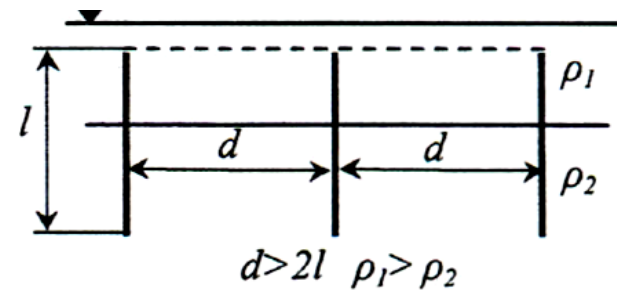


❖ Za termičko dimenzionisanje provodnika uzemljivača merodavan je toplotni impuls POLOVINE UKUPNE trostruke nulte komponente struje kvara u postrojenju.

OBLIKOVANJE I IZVOĐENJE UZEMLJIVAČA

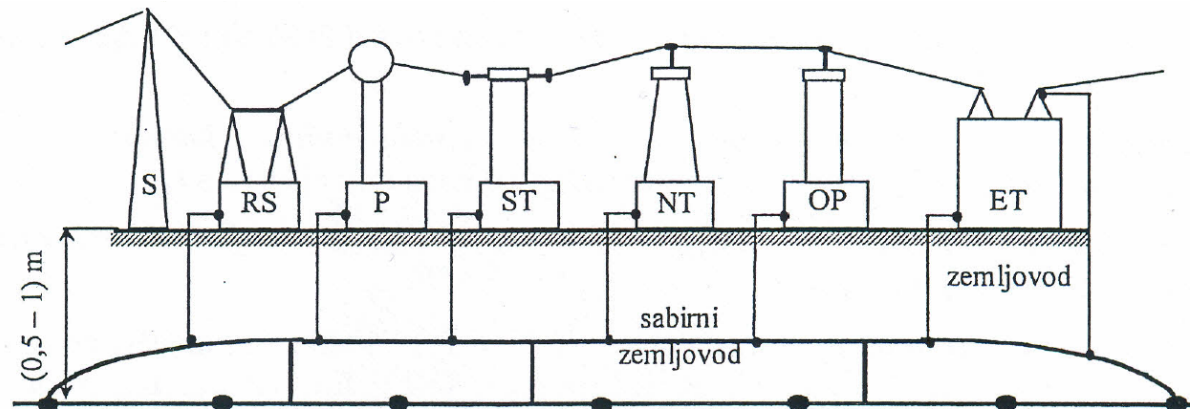
- ❖ Oblikovanje uzemljivača zavisi od :
 - raspoloživog prostora,
 - rasporeda opreme i drugih uređaja na površini tla koji se uzemljuju,
 - vrste i karakteristika tla.
- ❖ Uslov je da se postignu dovoljne vrednosti otpora rasprostiranja uzemljivača, pri čemu stvarne vrednosti napona dodira i koraka 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 l 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.



Sl.12

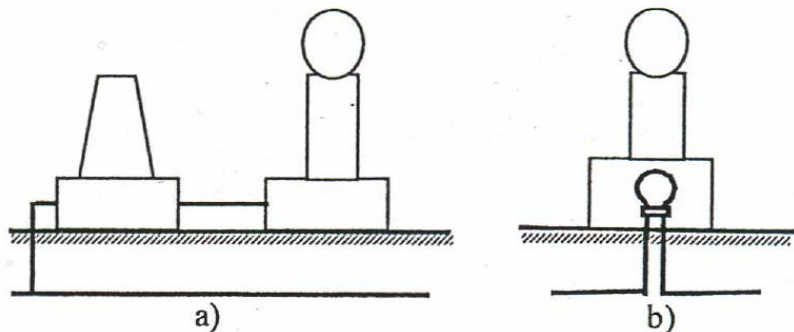
- ❖ KONTAKT UZEMLJIVAČA SA TLOM mora se ostvariti **dober kontakt** provodnika uzemljiivača sa tлом u koje su položeni.
- ❖ U slučaju kamenitog ili šljunkovitog terena, u rov u koji se polaže provodnik uzemljiivača treba najpre nasuti **dobro provodnu zemlju** ili neki drugi **dobro provodni materijal** (bentonit, crveni mulj), tako da provodnik leži u toj zemlji ili tom materijalu.



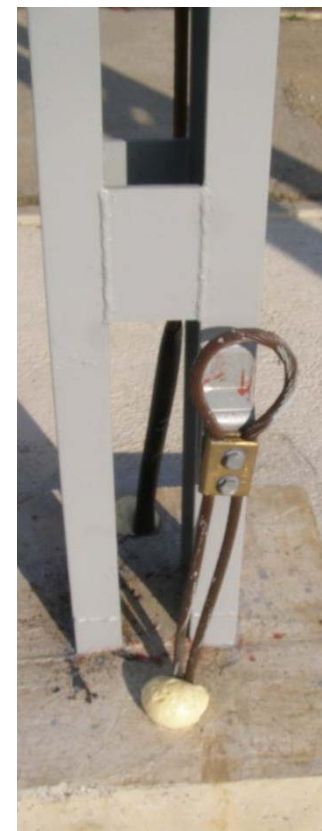
Sl.13.a Primer povezivanja uzemljenih elemenata postrojenja sa uzemljiivačem.

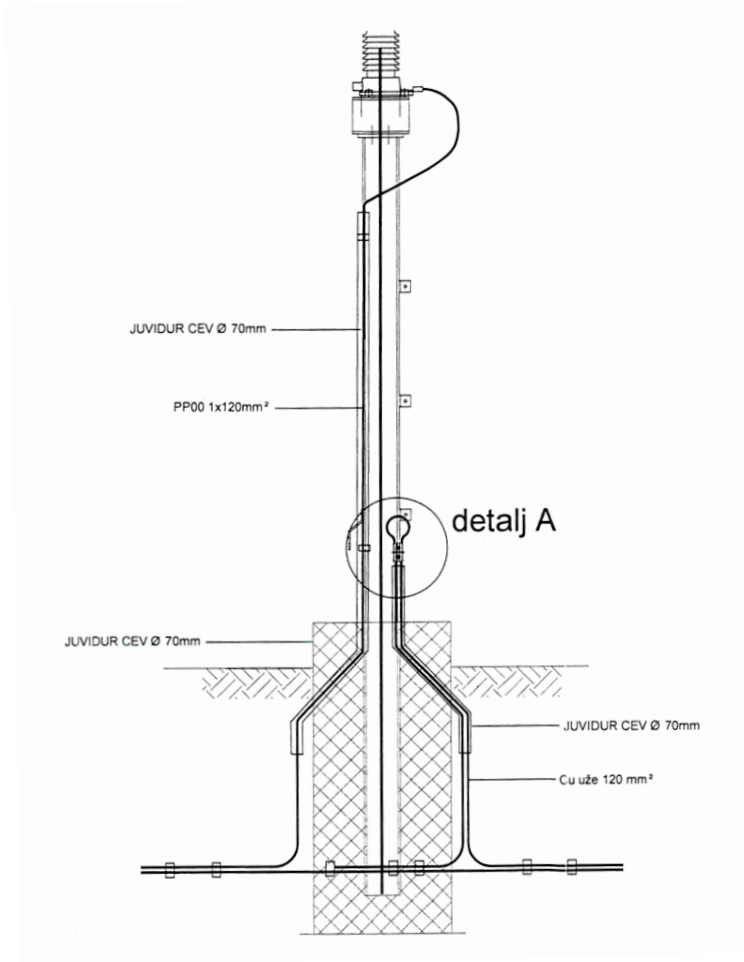
- ❖ **Zemljovod** - je provodnik koji spaja uređaj koji treba uzemljiti sa uzemljivačem ili sa sabirnim zemljovodom.
- ❖ **Sabirni zemljovod** - je provodnik na koji je priključeno više zemljovoda.
- ❖ Pri povezivanju elemenata koji se uzemljuju važe neka dodatna pravila :
 - svaki element se povezuje sa uzemljivačem **dvostrukom vezom** (sa dva provodnika). Pri tome se svaki od njih dimenzioniše u termičkom pogledu kao da kroz njega protiče polovina struje kvara.
 - 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**.

- ❖ Elementi koji se uzemljuju povezuju se sa uzemljivačem sa najmanje dva provodnika - dvostrukom vezom.



*Sl. 13.b Primer nepravilnog i pravilnog povezivanja elemenata sa uzemljivačem
a) nepravilno b) pravilno*

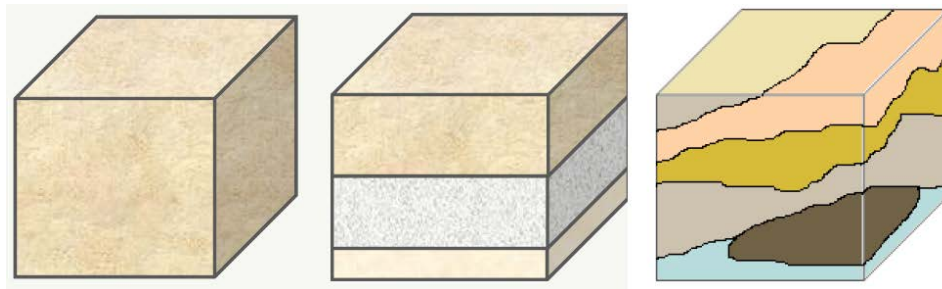




POSTUPAK DIMENZIONISANJA UZEMLJIVAČA

Postupak dimenzionisanja uzemljivača svodi se na nekoliko koraka :

1. Procena **raspoloživog prostora** na kome će se izgraditi uzemljivač.
2. Određivanje **električnih karakteristika tla** - da li je tlo homogeno ili ne, specifične otpornosti i debljine slojeva tla. Ponekad se ispituju i hemijske karakteristike, zbog mogućnosti pojave korozije.



POSTUPAK DIMENZIONISANJA UZEMLJIVAČA

Postupak dimenzionisanja uzemljivača svodi se na nekoliko koraka :

1. Procena **raspoloživog prostora** na kome će se izgraditi uzemljivač.
2. Određivanje **električnih karakteristika 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. Određivanje **tipa uzemljivača i dubine ukopavanja**.
4. **Izbor materijala i tipa provodnika** (bakar, pocinkovani čelik ili neki drugi materijal, uže ili neki drugi presek).
5. Određivanje **maksimalno dozvoljene vrednosti napona dodira i koraka U_{doz}** na osnovu poznatog vremena trajanja kvara t .

6. Određivanje vrednosti 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. Usvajanje minimalne konfiguracije uzemljivača

Postoje dve mogućnosti :

- ako je poznata dispozicija (raspored) opreme na površini tla, ona treba da omogući povezivanje svih metalnih masa sa uzemljivačern.
- 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:

$$E_d = k_d \cdot \rho \cdot \frac{I_u}{L}$$

gde su: 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 prethodnom izrazu uvaži:

$$E_d \leq E_{ddoz} = s_d U_{doz}$$

minimalna ukupna dužina svih elemenata mreže se dobija iz

$$L_{min} \geq k_{du} \cdot \rho \cdot \frac{I_u}{E_{ddoz}}$$

- Vrednosti faktora dodira k_d u realnim slučajevima kreću od 1.2 do 2.
 - Usvojena vrednost k_{du} (ovog faktora u prethodnom izrazu) 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. Proračun otpora rasprostiranja R_u te konfiguracije.

9. Proračun stvarne raspodele struje kvara u sistemu uzemljenja.

Obuhvatajući eventualne uticaje vazdušnih vodova, kablova i temeljnih uzemljivača, ako ovi uticaji postoje. Tako se **dobija stvarna vrednost struje odvođenja sa uzemljivača I_u .**

10. Provera izabranog preseka na toplotna naprezanja.

11. Izračunavanje stvarnih 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:

$$\begin{aligned} U_d \leq U_{doz} &\Leftrightarrow E_d \leq E_{ddoz} = s_d U_{doz} \\ U_k \leq U_{doz} &\Leftrightarrow E_k \leq E_{kdoz} = s_k U_{doz} \end{aligned}$$

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.

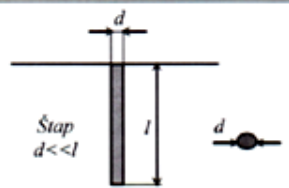
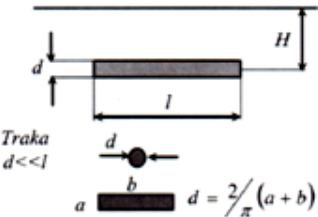
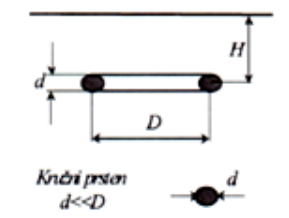
- ❖ Ako se iz određenih razloga (vrlo velike struje odvođenja sa uzemljivača u tlo, pogotovo u uslovima lošeg tla, velikog ρ) kao konačno rešenje dobije vrlo gusta mreža (okca manja od reda $(10 \times 10)m^2$), mogu se primeniti i neke dodatne mere kao što su:
 - primena bolje provodne zemljovodne užadi kod vazdušnih 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 20cm) slabo provodnog materijala, sa velikom specifičnom otpornošću (tucanik, šljunak).
- ❖ Ako se primenjuje mera nasipanja, uticaj tog nasutog sloja obuhvata se samo 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.

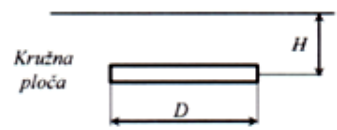
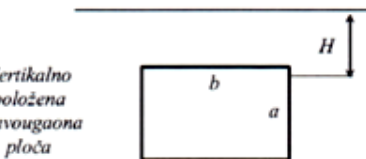
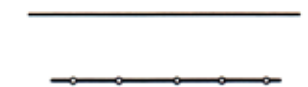
PRORAČUN KARAKTERISTIČNIH VELIČINA UZEMLJIVAČA

- ❖ Proračun karakterističnih veličina uzemljivača svodi se na proračun:
 - otpora rasprostiranja
 - napona (potencijalnih razlika) dodira i koraka.
- ❖ Pri tome se smatra da je struja odvođenja sa uzemljivača I_u poznata.
- ❖ Karakteristične veličine uzemljivača mogu se dovoljno tačno proračunati primenom razvijenih računarskih programa.
- ❖ Međutim, vrednosti ovih veličina mogu se dovoljno tačno proceniti i primenom praktičnih formula poluempirijskog karaktera.
- ❖ U nastavku su dati izrazi za proračun otpora rasprostiranja nekih jednostavnih, tipičnih pojedinačnih uzemljivača.
- ❖ Ovi uzemljivači se u praksi koriste za uzemljenje manjih pojedinačnih objekata, ali nisu pogodni za veća elektroenergetska postrojenja.

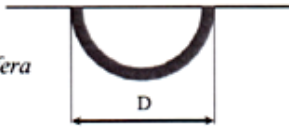

- ❖ Za veća elektroenergetska postrojenja (prostorno i po značaju) u praksi se uobičajeno koriste horizontalne uzemljivačke mreže, sa ili bez vertikalnih elemenata.


Tab. 2.a Izrazi za proračun otpora rasprostiranja nekih tipičnih uzemljivačkih konfiguracija

Уземљивач	Израз за прорачун отпора распростирања
 <p>Štap $d \ll l$</p>	$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4 \cdot l}{d}$
 <p>Traka $d \ll l$</p> <p>a b $d = \frac{2}{\pi}(a + b)$</p>	$\frac{\rho}{\pi l} \cdot \ln \frac{2 \cdot l}{d}, H = 0$ $\frac{\rho}{\pi l} \cdot \ln \frac{l}{\sqrt{H \cdot d}}, H > 0$
 <p>Kružni prsten $d \ll D$</p>	$\frac{\rho}{\pi^2 D} \cdot \ln \frac{8 \cdot D}{d}, H = 0$ $\frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4 \cdot D}{\sqrt{Hd}}, H > 0$

Уземљивач	Израз за прорачун отпора распростирања
 <p>Kružna ploča</p>	$\frac{\rho}{2 \cdot D} \cdot H = 0$ $\frac{\rho}{4 \cdot D} \cdot \left(1 + \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \frac{D}{4 \cdot H}\right), H > 0$
 <p>Vertikalno položena pravougaona ploča</p>	$\frac{\rho}{4\sqrt{ab}}$
 <p>Mreža</p> <p>S – površina koju pokriva mreža</p> <p>L – ukupna dužina provodnika mreže</p>	$0.44 \cdot \frac{\rho}{\sqrt{S}} + \frac{\rho}{L}$

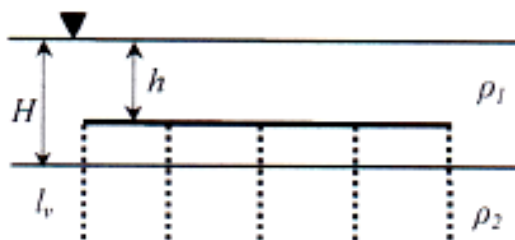
Tab. 2.b Izrazi za proračun otpora rasprostiranja nekih tipičnih uzemljivačkih konfiguracija

Уземљивач	Израз за прорачун отпора распрострања
<p><i>polusfera</i></p> 	$\frac{\rho}{\pi \cdot D}$
<p>Темељни уземљивач</p> 	$\frac{\rho}{\pi \cdot d}$ $d = 1.24 \cdot \sqrt[3]{V}$ <p><i>V – запремина армирано-бетонског темеља</i></p>

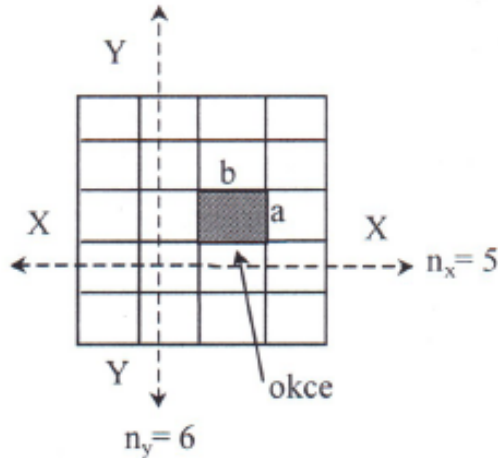
Уземљивач	Израз за прорачун отпора распрострања
<p>Зракасти хоризонтално положени симетрични уземљивачи</p> 	$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \left(\ln \frac{L^2}{d \cdot H} + A_k \right)$ <p><i>L – укупна дужина проводника</i> <i>H – дубина полагања</i> <i>d – пречник попречног пресека</i> <i>ρ – специфична ел. отпорност тла</i> <i>A_k – коефицијент који зависи од облика уземљивача:</i></p> <p>$A_k = 0.26$</p> <p>$A_k = 0.87$</p> <p>$A_k = 2.13$</p> <p>$A_k = 5.27$</p> <p>$A_k = 7.20$ за $\frac{l}{D} = 1.5$</p>

Praktične metode proračuna karakterističnih veličina horizontalnih mrežastih uzemljivača

- ❖ Za veća elektroenergetska postrojenja se obično koriste horizontalne uzemljivačke mreže, sa ili bez dodatih vertikalnih elemenata
- ❖ Za slučajeve kada je uzemljivač položen u homogenom ili nehomogenom (dvoslojnom) tlu, daju se praktični izrazi za proračun:
 - otpora rasprostiranja
 - potencijalnih razlika dodira i koraka



● Primer:



S – površina koju pokriva uzemljivačka mreža

N – broj okaca mreže, $N=5 \cdot 4=20$

n – broj paralelnih provodnika mreže:

$$n = \sqrt{n_x n_y} = \sqrt{5 \cdot 6}$$

D – srednje rastojanje između susednih provodnika u mreži:

$$D = \sqrt{a \cdot b} = \sqrt{\frac{S}{N}}$$

a) Proračun karakterističnih veličina za uzemljivač položen u homogenom tlu

- Proračun otpora rasprostiranja

- mrežasti uzemljivač kvadratnog i pravougaonog oblika bez verikalnih elemenata

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

- mrežasti uzemljivač sa vertikalnim elementima raspoređenim duž obima mreže

$$R_{uh} = 0.13 \frac{\rho}{\sqrt{S}} \left(1 - 0.45 \sqrt{\frac{l}{\sqrt{S}}} \right) \log_{10} \left(\frac{2400\sqrt{S}}{N} \right) \quad \frac{l}{\sqrt{S}} \leq 0.2$$

l – dužina jednog vertikalnog elementa

- Proračun maksimalne potencijalne razlike dodira

$$E_{dh} = \rho K_m K_{im} \frac{I_u}{L_{em}}$$

K_m – faktor gustine mreže

K_{im} – faktor neravnomernosti raspodele struje

L_{im} - ekvivalentna dužina provodnika, $L_{im} = L + 1.15L_v$

- Proračun potencijalne razlike koraka

$$E_{kh} = \rho K_s K_{is} \frac{I_u}{L_{es}}$$

K_s – faktor gustine mreže

K_{is} – faktor neravnomernosti raspodele struje

L_{is} - ekvivalentna dužina provodnika, $L_{is} = L + 2L_v$

b) Proračun karakterističnih veličina za uzemljivač položen u gornjem sloju dvoslojnog tla

- Proračun otpora rasprostiranja

- mrežasti uzemljivač kvadratnog i pravougaonog oblika bez verikalnih elemenata

$$R_{un} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^x R_{uh}$$

- mrežasti uzemljivač sa vertikalnim elementima raspoređenim duž obima mreže

$$R_{un} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{0.76} R_{uh} , \quad \rho_2 \leq \rho_1$$

- Proračun maksimalne potencijalne razlike dodira

$$E_{dn} = C_m E_{dh}$$

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

C_m – korekcionni faktor zbog nehomogenosti

- Proračun potencijalne razlike koraka

$$E_{dn} = C_s E_{dh}$$

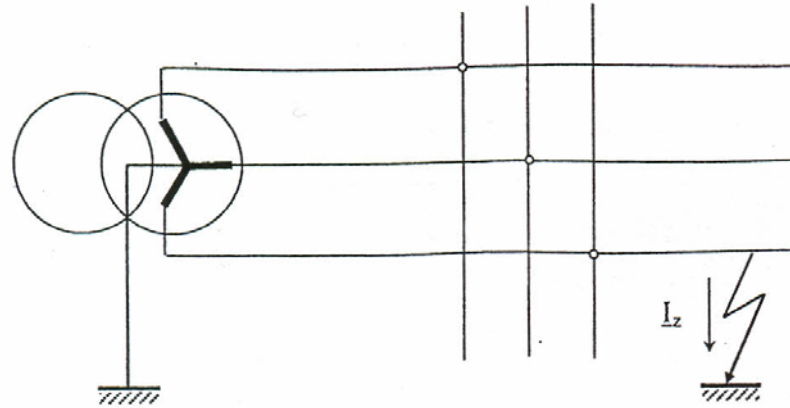
$$C_s = 1 + 0.8 \log_{10} \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Načini uzemljenja neutralne tačke u mrežama

- ❖ Mreže najviših, napona $U_n \geq 110$ kV - primenjuje se direktno (efikasno) uzemljenje neutralne tačke.
- ❖ Distributivne mreže srednjih napona 10, 20 i 35 kV - primenjuje se
 - izolovana neutralna tačka, kada su struje zemljospoja relativno male,
 - uzemljenje preko male impedanse (otpornosti) zbog ograničavanja vrednosti struje zemljospoja u mrezi na 300 (900) A,
 - uzemljenje neutralne tačke sa kompenzacijom struje zemljospoja (Petersen prigusnica), kada su struje zemljospoja opet male.
- ❖ Distributivne mreže napona 0.4 kV - primenjuje se direktno uzemljenje neutralne tačke zbog ostvarenja mogućnosti priključenja potrošača na fazni i međufazni napon.

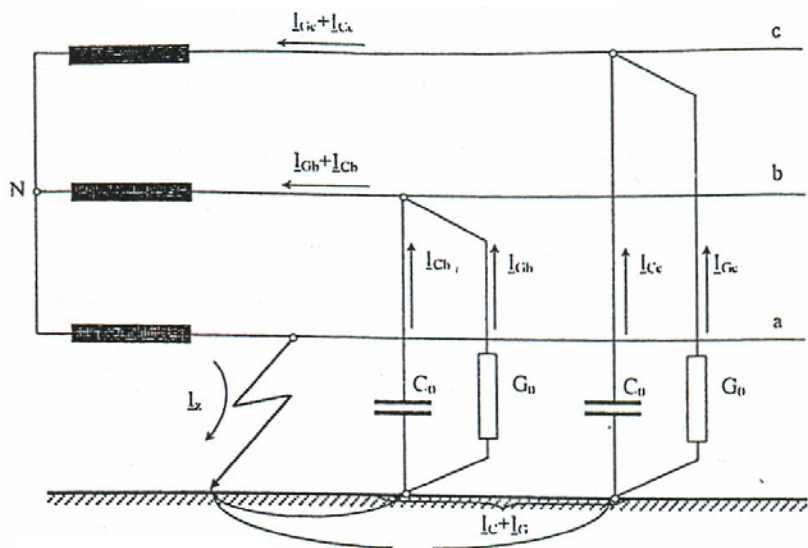
Načini uzemljenja neutralne tačke u mrežama

Direktno uzemljena mreža

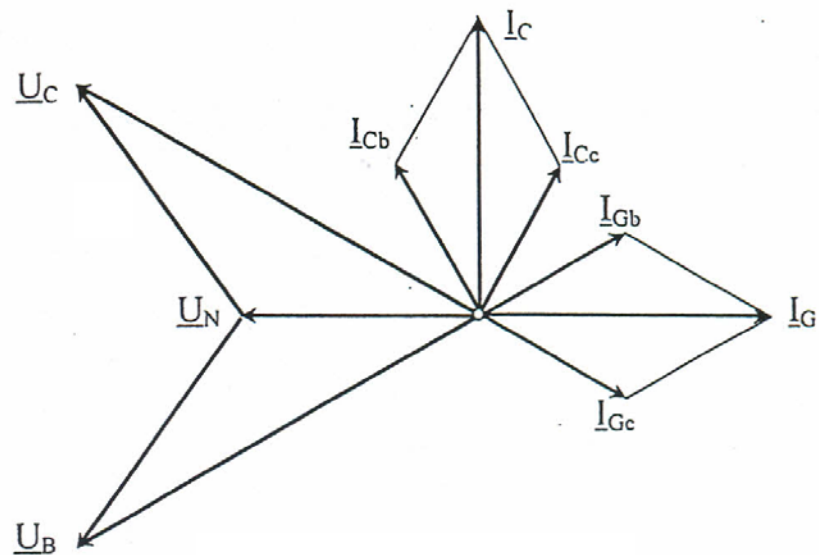


Sl. 14.1

Mreža sa izolovanim zvezdištem

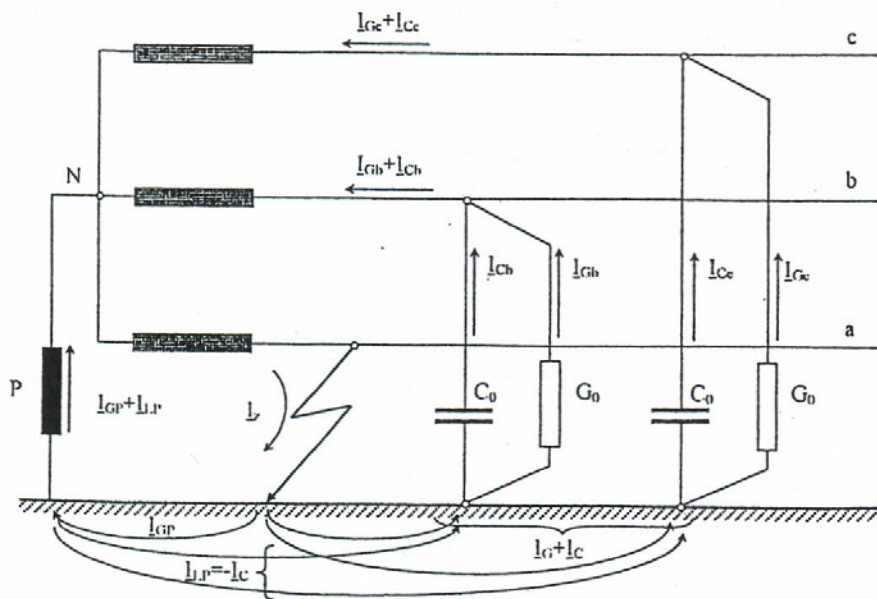


Sl. 14.2.a Struje zemljospoja u mreži sa izolovanim zvezdištem

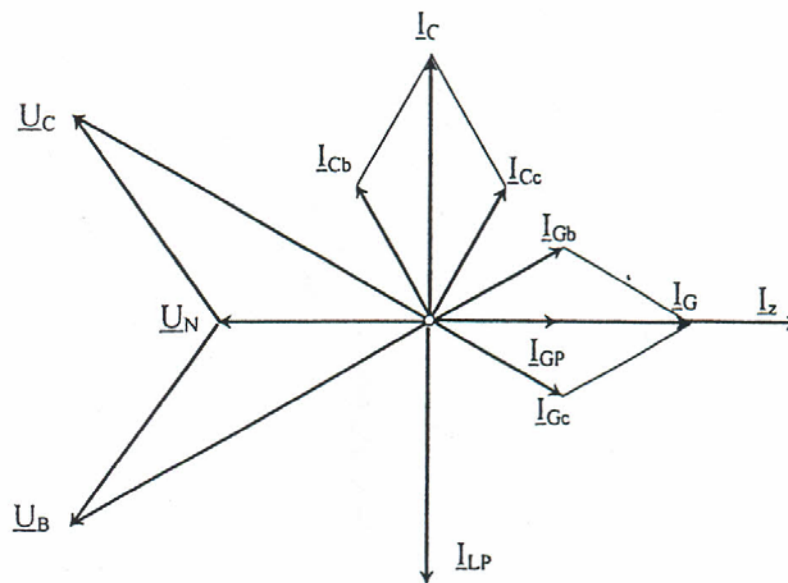


Sl. 14.2.b Fazorski dijagram

Mreža sa kompenzacijom struje zemljospoja

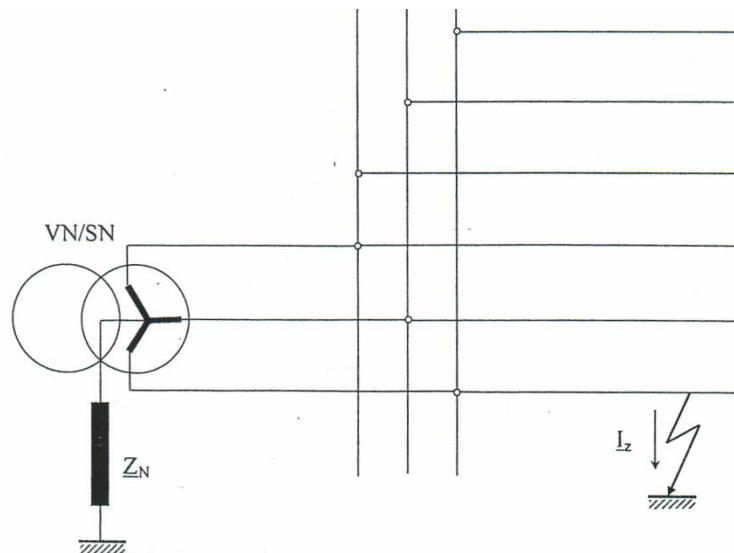


Sl. 14.3.a Mreža sa zvezdištem uzemljenim preko kompenzacione prigušnice

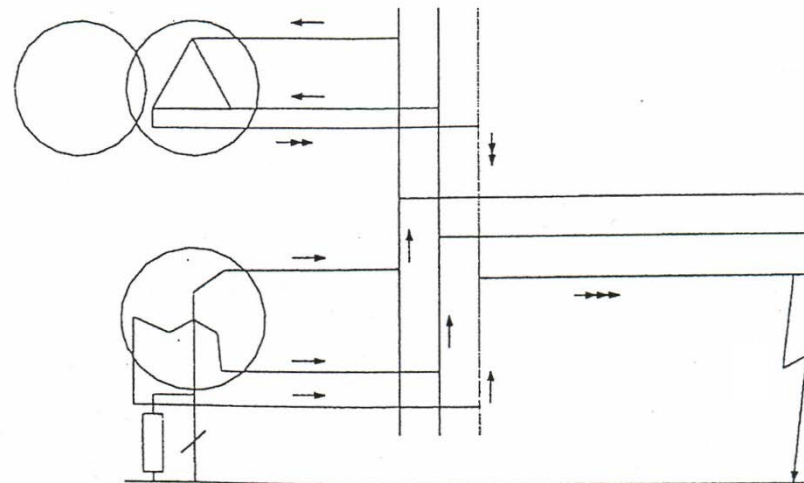


Sl. 14.3.b Fazorski dijagram struja i napona za kompenzovanu mrežu

Uzemljenje preko male impedanse



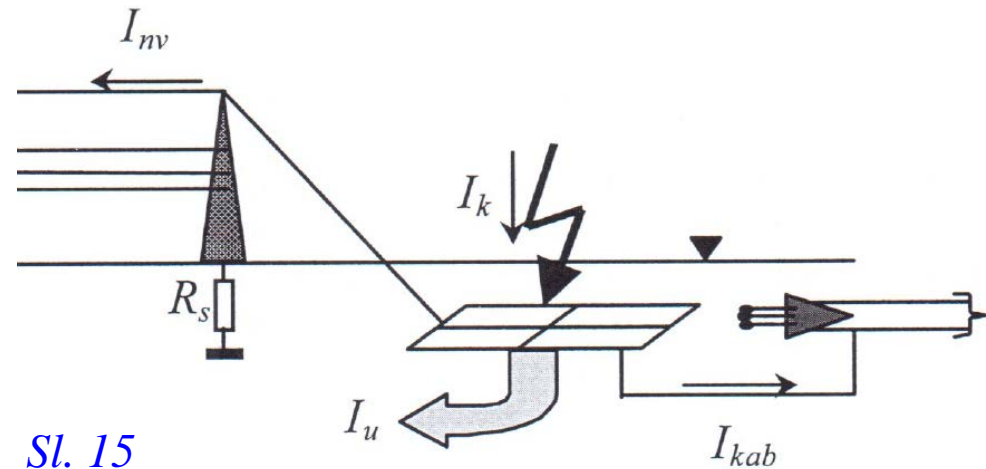
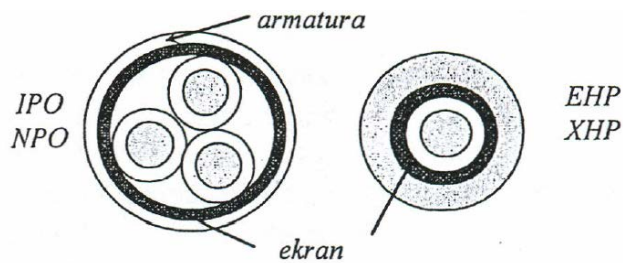
Sl. 14.4.a Mreža sa zvezdištem uzemljenim preko male impedanse



Sl. 14.4.b Uzemljenje zvezdišta preko transformatora za uzemljenje

Elementi koji najviše utiču na karakteristike uzemljivačkog sistema:

- **kablovi** - njihovi plaševi i električne zaštite,
- **vazdušni vodovi** - njihova zaštitna užad i uzemljenja stubova,
- **temeljni uzemljivači objekata** - ako postoje
- **uzemijivač**.

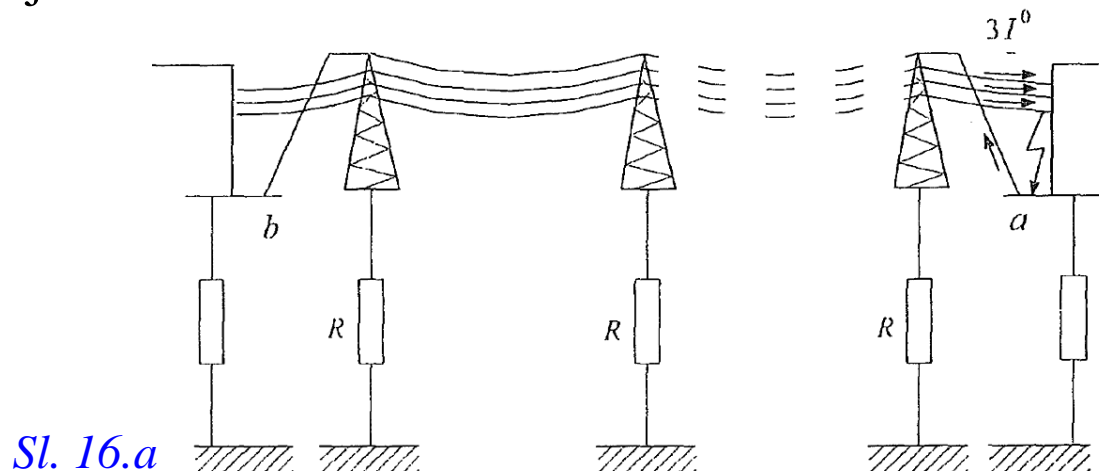


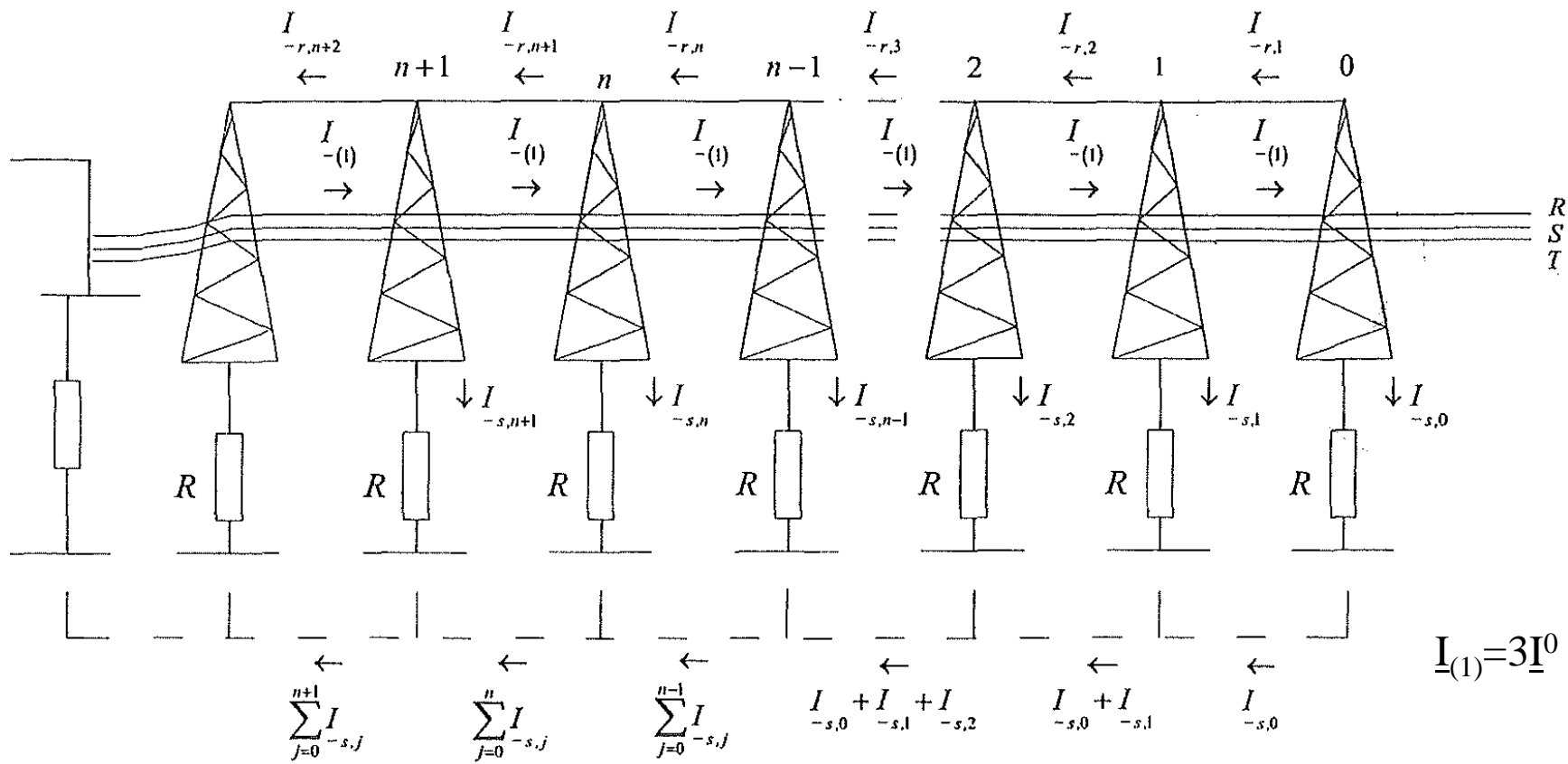
Sl. 15

- ❖ Nadzemni vodovi i kablovi mogu značajno da utiču na karakteristike uzemljivačkih sistema i zato ih uvek treba uzimati u obzir pri projektovanju uzemljenja postrojenja.
- ❖ Često se značajan deo struje zemljospoja 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 sa 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 zadovoljavaju propisane kriterijume bezbednosti.

Nadzemni vodovi

- ❖ Razmatra se slučaj zemljospoja u postrojenju na kraju nazemnog voda: po faznim provodnicima voda protiče trostruka nulta komponenta struje $3I_0$ koja se delom vraća preko zaštitnog užeta, a delom preko zemlje.
- ❖ Pretpostavlja se da je vod homogen, sa jednako dugim rasponima i da su otpori uzemljenja jednaki.





Sl. 16.b Raspodela struje duž zemljovodnog užeta za slučaj jednofaznog zemljospoja

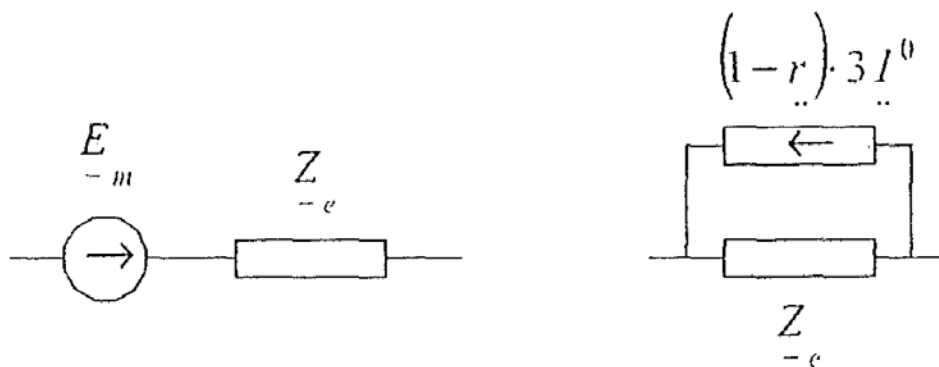
- ❖ Struja koja teče duž zemljovodnog užeta ima dve komponente:
 - jedna je deo struje kvara koja se vraća u napojno postrojenje, i njena vrednost opada sa udaljavanjem od mesta kvara, a
 - druga je indukovana, kao posledica elektromagnetne sprege između faznog provodnika u kvaru i užeta.
- ❖ Indukovana komponenta, za usvojenu pretpostavku jednakih raspona, ima istu vrednost duž svakog raspona.

- ❖ Na svakom rasponu se u zaštitnom provodniku usled magnetske sprege sa faznim provodnikom indukuje ems:

$$\underline{E}_m = -\underline{Z}_m \cdot 3\underline{I}_0$$

pri čemu je sa \underline{Z}_m označena međusobna impendansa provodnika za povratni put struje preko tla.

- ❖ Električna šema zaštitnog užeta na jednom rasponu sa indukovanom ems \underline{E}_m i sopstvenom impedansom zaštitnog užeta na jednom rasponu za povratni put struje preko tla \underline{Z}_e može se zameniti ekvivalentnom šemom sa strujnim izvorom:



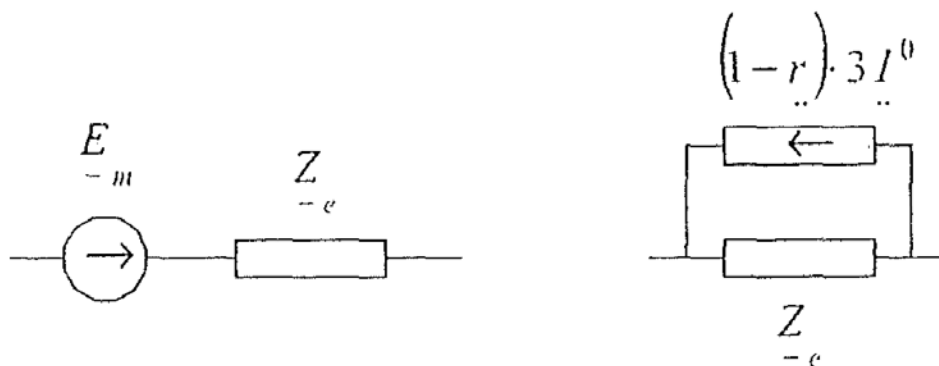
Sl. 17

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

$$\underline{r} = 1 - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_e}$$

gde je \underline{r} **redukциони faktor** koji pokazuje smanjenje struje koja se odvodi u zemlju sa uzemljivača

Sl. 17



❖ Za n-ti raspon važi:

$$\underline{I}_{r,n} = \underline{I}_{s,n} + \underline{I}_{r,n+1}$$

$$\underline{Z}_e \underline{I}_{r,n} - \underline{Z}_m \underline{I}_{(1)} + R \underline{I}_{s,n} - R \underline{I}_{s,n-1} = 0$$

gde su:

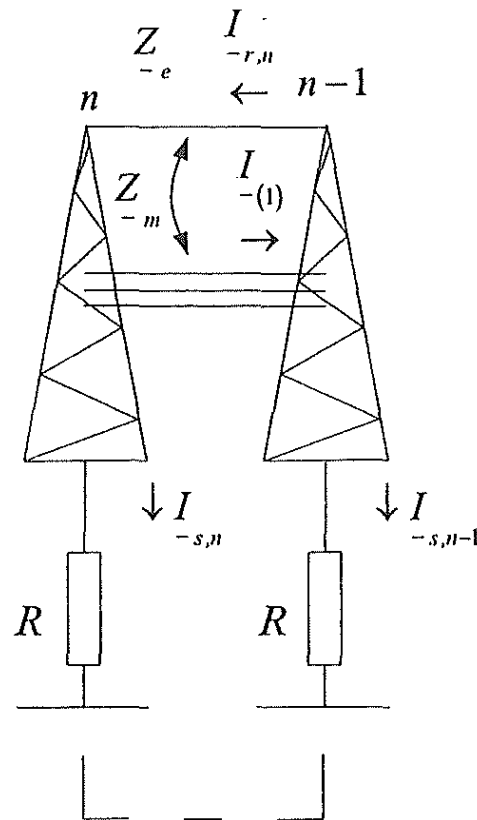
$\underline{I}_{s,j}$ - je struja koja se preko uzemljenja stuba j odvodi u tlo ($j=0, \dots, n+1$),

$\underline{I}_{r,k}$ - struja koja teče duž raspona k , ($k = 1, \dots, n + 2$)

$\underline{I}_{(1)}$ - struja jednofaznog zemljospoja.

❖ Struja duž n-tog raspona:

$$\underline{I}_{r,n} = \frac{R}{\underline{Z}_e} (\underline{I}_{s,n-1} - \underline{I}_{s,n}) + (1 - \underline{r}) \underline{I}_{(1)}$$



Primena Kirhofovog zakona za n-ti raspon

- ❖ Struja koja teče duž zemljovodnog užeta ima dve komponente:

$\frac{R}{Z_e} (\underline{I}_{s,n-1} - \underline{I}_{s,n}) \longrightarrow$ komponenta čija vrednost opada sa udaljavanjem od mesta kvara i koja se odvodi preko uzemljenja stubova i

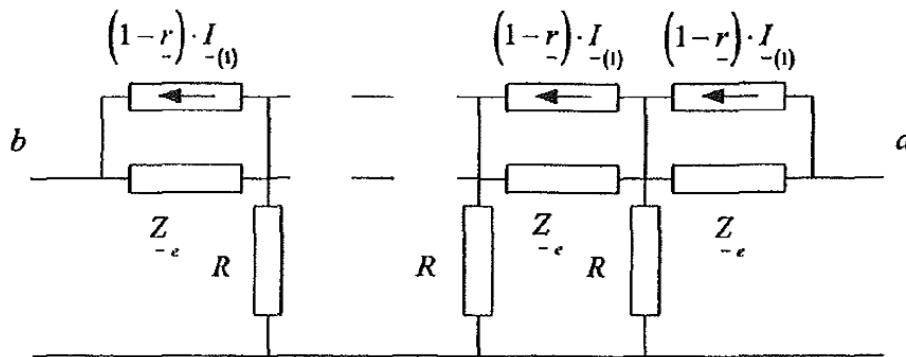
$(1 - \underline{r}) \underline{I}_{(1)} \longrightarrow$ komponenta koja je ista na svakom rasponu i javlja se kao posledica elektromagnetne sprege.

Ova komponenta struje se ne odvodi u tlo preko uzemljenja stubova i ispoljava se samo na krajevima voda.

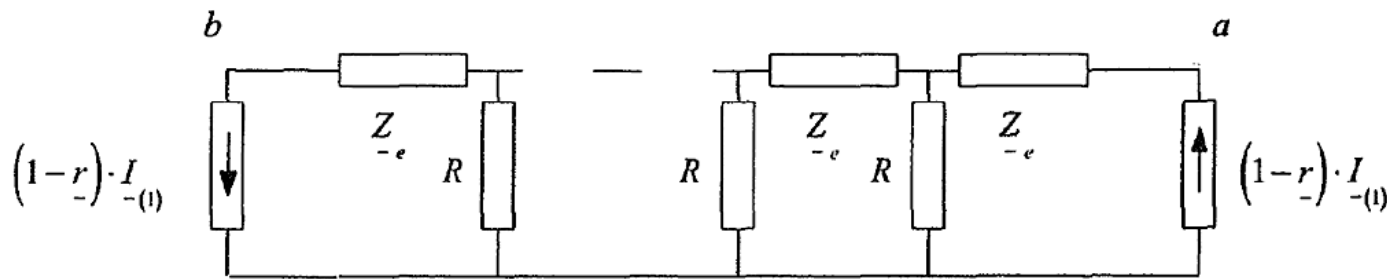
- ❖ Zamenska šema za proračun struja i napona zaštitnog užeta data je na Sl. 18.

❖ Zamenska šema zaštitnog užeta:

- Strujni izvori na susednim rasponima međusobno su jednaki.
- Komponenta struje kroz zaštitno uže koja je posledica magnetske indukcije od faznih provodnika ne odvodi se u tlo preko uzemljenja stubova, tako da može da se koristi modifikovana šema na Sl. 19.



Sl. 18



$$\underline{I}_{(1)} = 3\underline{I}^0$$

Sl. 19

- ❖ Lančasta šema imedansi užeta i otpora uzemljenja stubova može se svesti na simetričnu “pi” šemu:
- ❖ Parametri u “pi” šemi se izračunavaju prema:

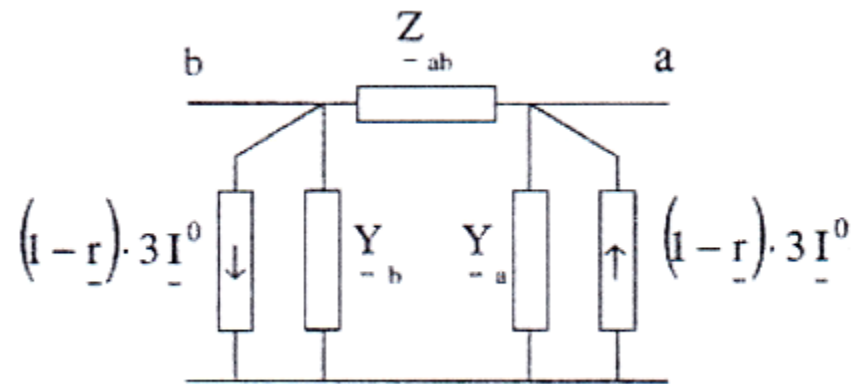
$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z} \cdot \text{sh}(n\underline{g})$$

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

gde je n broj raspona.

- ❖ Parametri u “pi” šemi se za $yZ_e \ll 1$ izračunavaju prema:

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



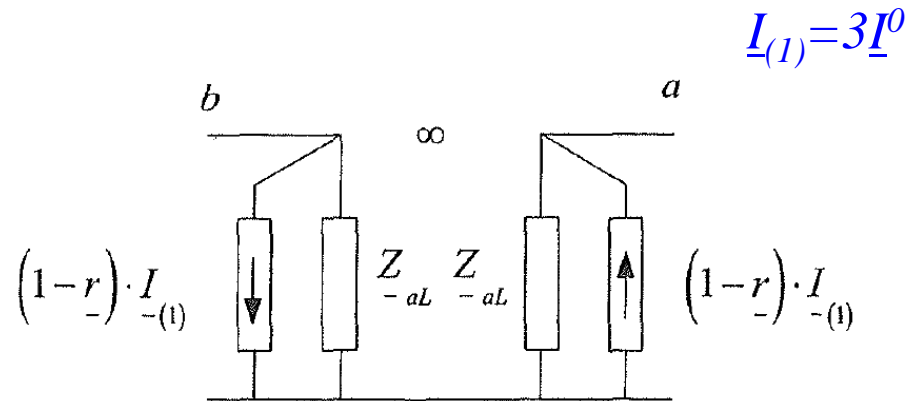
Sl. 20

- ❖ Ako je n veliko (dugačak vod), tada je $\text{th}\left(\frac{ng}{2}\right) \approx 1$, tako da se dobija:

$$\underline{Z}_a = \frac{1}{\underline{Y}_a} \approx \frac{\underline{Z}_e}{2} + (\underline{Z}_e R)^{\frac{1}{2}}$$

gde \underline{Z}_a (\underline{Z}_{aL}) predstavlja impedansu uzemljenja dugog voda koja uključuje impedanse zaštitnih provodnika i otpore uzemljenja stubova.

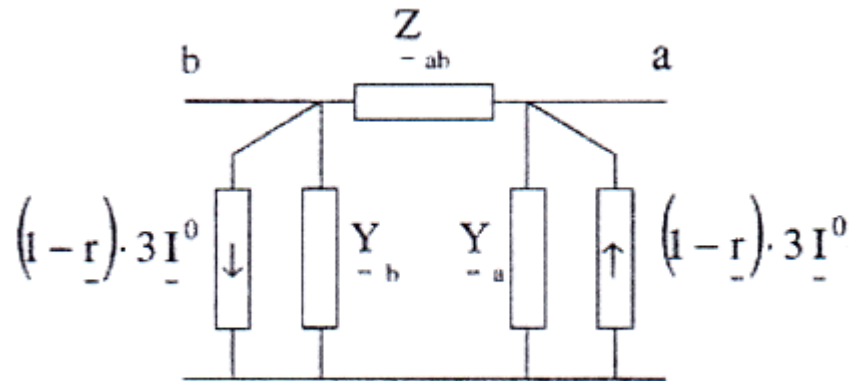
- ❖ Ako je n veliko, \underline{Z}_{ab} se može izostaviti u “pi” šemi jer je mnogostruko veća od impedanse \underline{Z}_a , tako da je zamenska šema za duge vodove prikazana na Sl. 21.
- ❖ U indeksu L označava da se odgovarajući simbol odnose na duge vodove.



Sl. 21

Kablovi sa neizolovanim omotačima

- ❖ Kabl sa neizolovanim omotačem provodi struju duž omotača, ali deo ove struje odvodi u tle jer se ponaša i kao uzemivač.
- ❖ U proračunima uzemljenja on se može modelovati kao specifični nadzemni vod čija je ekvivalentna "pi" šema prikazana na Sl. 22.



Sl. 22

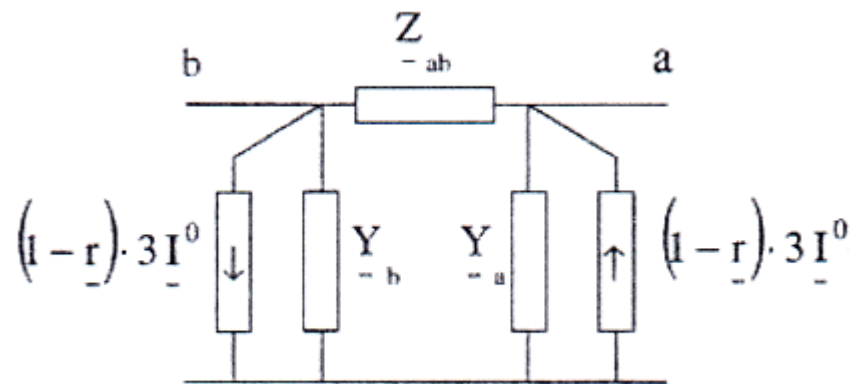
- ❖ Parametri u “pi” šemi se izračunavaju prema:

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z} \cdot \text{sh}(kL) \quad \underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}} \cdot \text{th}\left(\frac{kL}{2}\right)$$

$$\underline{Z} = \left(\frac{\underline{z}}{s}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \underline{k} = (\underline{z}s)^{\frac{1}{2}} \quad s = \frac{\pi}{\rho \ln\left(\frac{L}{\sqrt{HD}}\right)}$$

- gde su:

dl - dužina malog segmenta kabela;
s- odvodnost plašta po jedinici dužine;
L- dužina kabela ($n \cdot dl = L$);
H - dubina polaganja kabela



Sl. 22

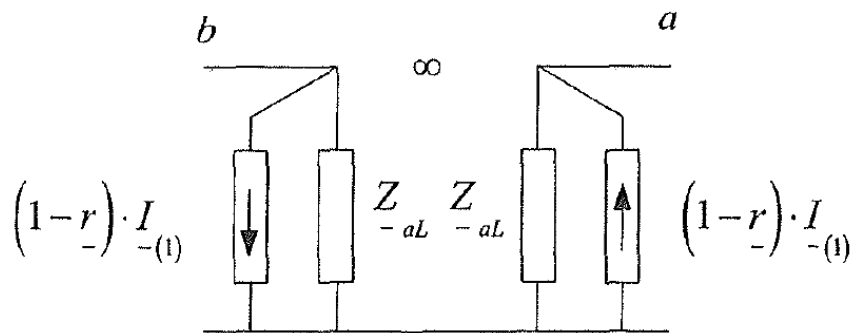
z- impedansa plašta po jedinici dužine;
ρ- specifična električna otpornost tla;
D- spoljašnji prečnik plašta;

❖ Za duge kablove sa neizolovanim plaštom važi: $\text{th}\left(\frac{kL}{2}\right) \approx 1$

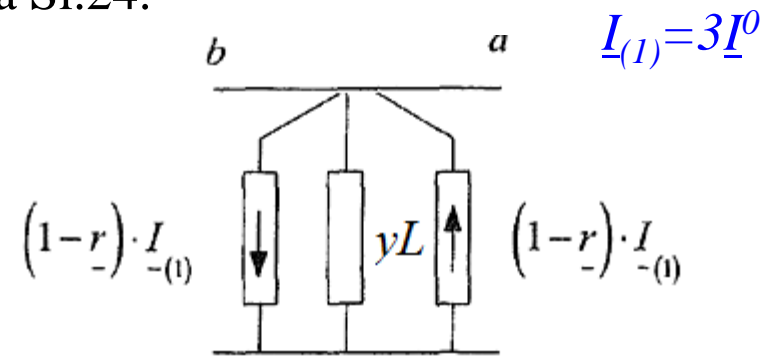
❖ Kod dugih kablova zamenska šema plašta dobija oblik kao na Sl. 23, jer je impedansa \underline{Z}_{ab} vrlo velika, tako da se može izostaviti iz šeme.

$$\underline{Z}_{aL} = \frac{1}{\underline{Y}_{aL}} = \frac{1}{\underline{Y}_{bL}} = \underline{Z}$$

❖ Kod kratkih kablova mogu se zanemariti padovi napona u plaštu, pa se zamenska šema svodi na jednostavnu šemu na Sl.24.

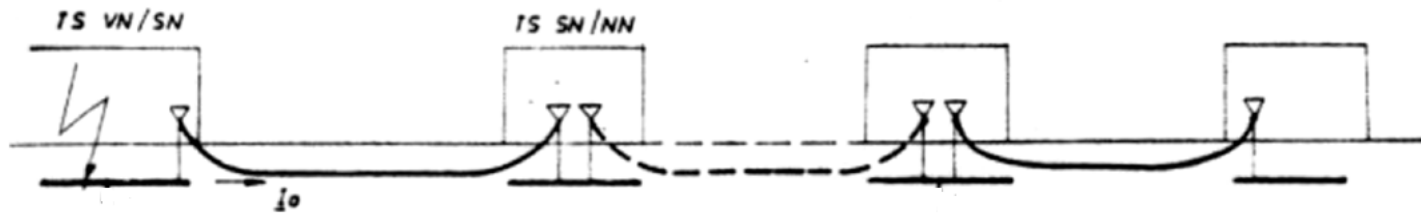


Sl. 23



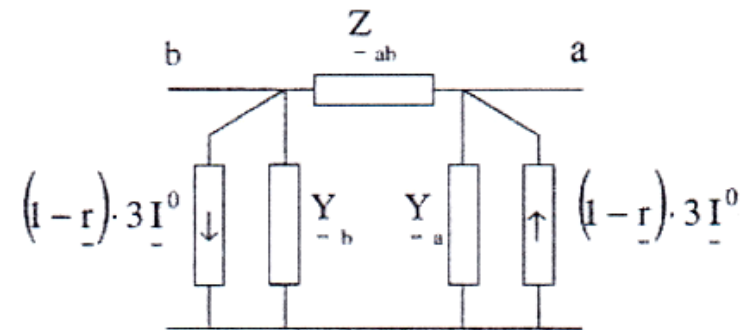
Sl. 24

Kablovi sa izolacionim spoljnim omotačem



Sl. 25

❖ Pretpostavlja se da kabl ima metalni ekran koji se vezuje za uzemljivač izvornog postrojenja i uzemljivač napajane transformatorske stanice.



Sl. 26

Impedanse

- Sopstvena impedansa zaštitne užadi sa povratnim putem struje kroz zemlju je:

$$\underline{Z}_e = 0.05 + R_1 + j \left(0.0628 \ln \frac{D_e}{r_e} + 0.016 \mu_r \right) \quad [\Omega/\text{km}]$$

gde su:

R_1 – aktivna otpornost užeta na 1 km dužine, r_e – poluprečnik užeta,
 μ_r – relativna magnetna permeabilnost užeta, D_e – prividna dubina
povratnog puta struje kroz zemlju $D_e = 658 \sqrt{\rho / f}$

- Za zaštitinu užad od čelika je $\mu_r = 30$, za užad Al/Fe i druge nemagnetne materijale je $\mu_r = 1$
-

- ❖ Međusobna impedansa faznih provodnika sa zaštitnim provodnicima je:

$$\underline{Z}_m = 0.05 + j0.0628 \cdot \ln \frac{D_e}{d_m} \quad [\Omega/\text{km}]$$

gde je sa d_m označeno srednje geometrijsko rastojanje faza od zaštitnih provodnika, za slučajeve jednog i dva zaštitna užeta je:

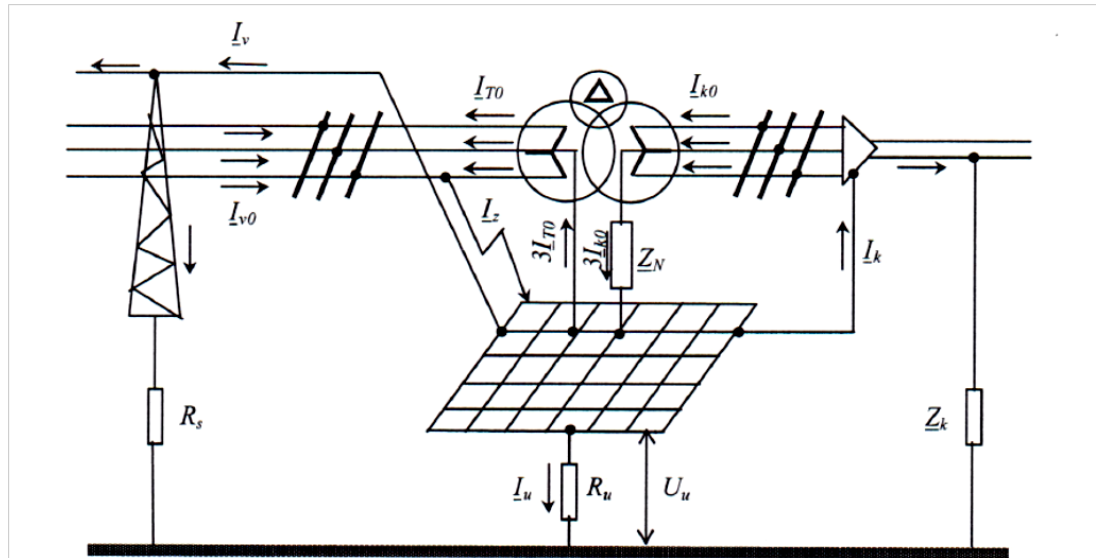
$$d_m = (d_{az} \cdot d_{bz} \cdot d_{cz})^{\frac{1}{3}} \quad d_m = (d_{az_1} \cdot d_{bz_1} \cdot d_{cz_1} \cdot d_{az_2} \cdot d_{bz_2} \cdot d_{cz_2})^{\frac{1}{6}}$$

- ❖ U slučaju dva užeta na međusobnom rastojanju d , ekvivalentni poluprečnik užeta:

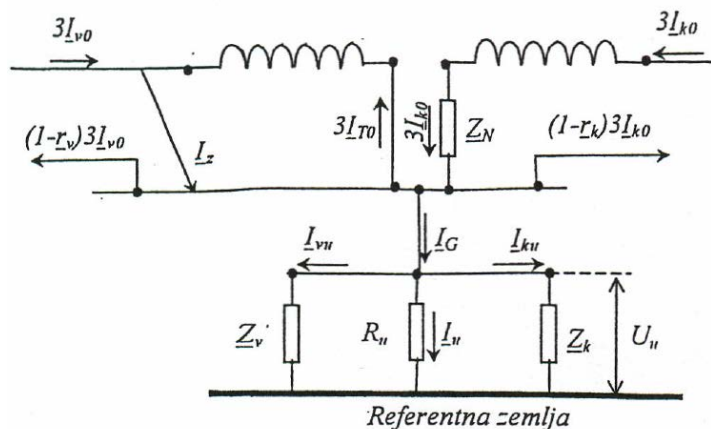
$$r_e = \sqrt{r_{e1} \cdot d}$$

Raspodela struje zemljospoja u sistemu uzemljenja transformatorske stanice

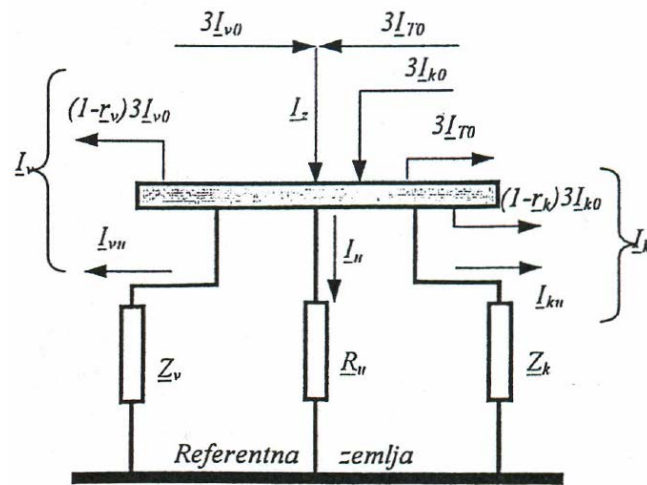
- ❖ Za dimenzionisanje uzemljenja TS visoki/srednji napon kritični su obično kvarovi na strani mreže visokog napona pošto je mreža visokog napona po pravilu direktno uzemljena.



Sl. 27



Sl. 28.a Šematski prikaz raspodele struje zemljospoja



Sl. 28.b Pojednostavljena raspodela struje zemljospoja

❖ Primenom prvog Kirchoff-ovog zakona dobija se:

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

➤ r - redukциони faktor - smanjuje struju koja se sa uzemljivača odvodi u zemlju

❖ Sređivanjem se dobija:

$$\underline{I}_u = \underline{r}_v 3\underline{I}_{v0} + \underline{r}_k 3\underline{I}_{k0} - \underline{I}_{vu} - \underline{I}_{ku}$$

❖ Zbir struja kroz impedanse zaštinog provodnika i plašta kabla \underline{Z}_v i \underline{Z}_k su:

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

❖ Otpor rasprostiranja uzemljivača je:

$$R_u = \frac{U_u}{I_u}$$

❖ Struja koja se odvodi u tlo sa uzemljivača je:

$$\underline{I}_u = \frac{\underline{r}_v 3\underline{I}_{v0} + \underline{r}_k 3\underline{I}_{k0}}{1 + R_u \left(\frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k} \right)}$$

❖ Napon uzemljivača se računa prema izrazu:

$$\underline{U}_u = (\underline{r}_v 3\underline{I}_{v0} + \underline{r}_k 3\underline{I}_{k0}) \cdot \underline{Z}_e$$

gde je \underline{Z}_e ekvivalentna impedansa sistema uzemljenja: $\underline{Z}_e = \left(\frac{1}{R_u} + \frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k} \right)^{-1}$

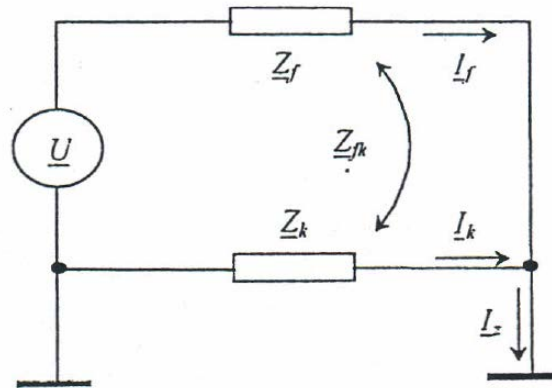
❖ U slučaju većeg broja vodova, prethodni izrazi postaju:

$$\underline{I}_u = \frac{\sum_i \underline{r}_i 3\underline{I}_{0i}}{1 + R_u \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_i}} \quad \underline{U}_u = \left(\sum_i \underline{r}_i 3\underline{I}_{0i} \right) \cdot \underline{Z}_e \quad \underline{Z}_e = \left(\frac{1}{R_u} + \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_i} \right)^{-1}$$

❖ **U prethodno datim izrazima su stvarne struje i impedanse, a ne vrednosti svedene na određeni naponski nivo.**

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.
- ❖ Na Sl. 29 je prikazana jednostavna šema iz koje se lako dobija izraz za redukциони faktor.



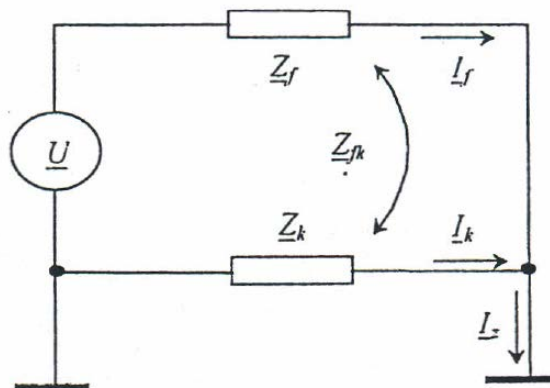
Sl. 29

- ❖ Na Sl. 29 \underline{Z}_f predstavlja sopstvenu impedansu petlje provodnik energetskega voda zemlja, \underline{Z}_k sopstvenu impedansu petlje uzemljeni provodnik - zemlja, a \underline{Z}_{fk} međusobnu impedansu ovih petlji.
- ❖ Za kolo na Sl. 29 važe izrazi:

$$\underline{Z}_f \underline{I}_f + \underline{Z}_{fk} \underline{I}_k = \underline{U}$$

$$\underline{Z}_{fk} \underline{I}_f + \underline{Z}_k \underline{I}_k = 0$$

$$\underline{I}_f + \underline{I}_k = \underline{I}_z$$



Sl. 29

- ❖ Redukcioni faktor voda računa se generalno kao odnos struje koja se odvodi u zemlju \underline{I}_z i struje kroz energetski provodnik \underline{I}_f tako da se dobija:

$$\underline{r} = \frac{\underline{I}_z}{\underline{I}_f} = \frac{\underline{Z}_k - \underline{Z}_{fk}}{\underline{Z}_k} = 1 - \frac{\underline{Z}_{fk}}{\underline{Z}_k} .$$

gde su:

\underline{Z}_k - impedansa uzemljenog provodnika paralelnog energetskom vodu (zemljovodno uže ili plašt kabla),

\underline{Z}_{fk} - međusobna impedansa uzemljenog provodnika i energetskog voda.

Raspodela struja kod zemljospoja na stubu

- ❖ Struja koja se odvodi preko uzemljenja stuba voda u direktno uzemljenoj mreži je jednaka:

$$\underline{I}_u = \underline{r} \underline{I}_{(1)} \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_L + 2R_T}$$

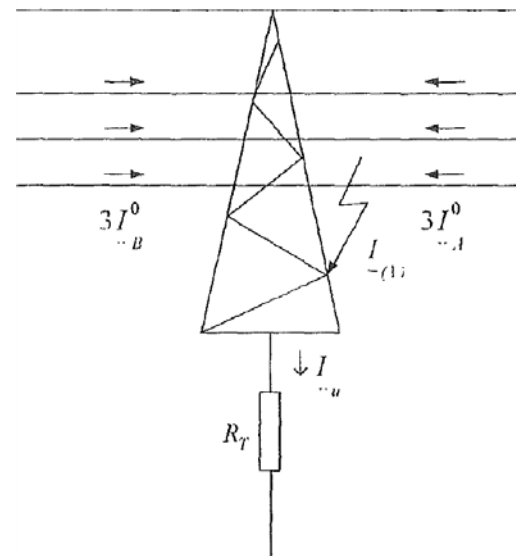
$$\underline{I}_{(1)} = 3\underline{I}_A^0 + 3\underline{I}_B^0$$

gde su:

\underline{Z}_L - impedansa uzemljenja zaštitnog užeta dugog voda,

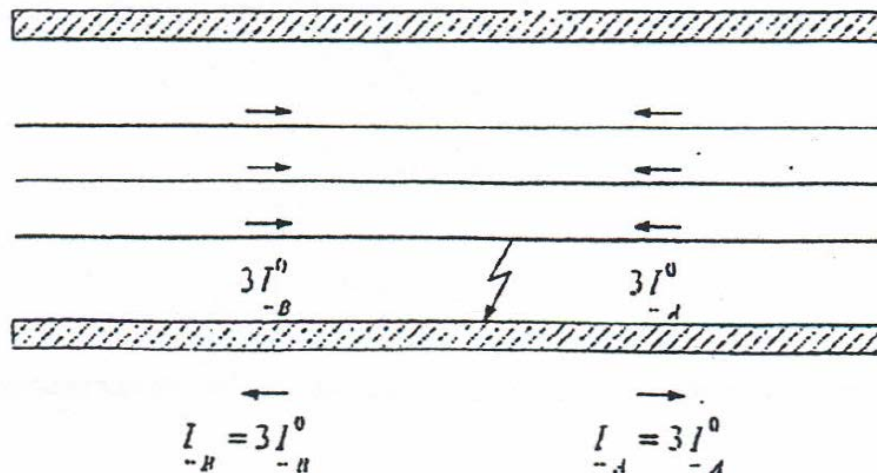
\underline{r} - njegov redukcionni faktor,

$\underline{I}_{(1)}$ - struja jednofaznog zemljospoja.



Sl. 30.a

- ❖ Kod zemljospojeva na trožilnom kablu, sa zajedničkim metalnim omotačem za sve tri faze, struja kvara se odvodi preko plašta, sa jedne i druge strane mesta kvara (Sl. 18.b).

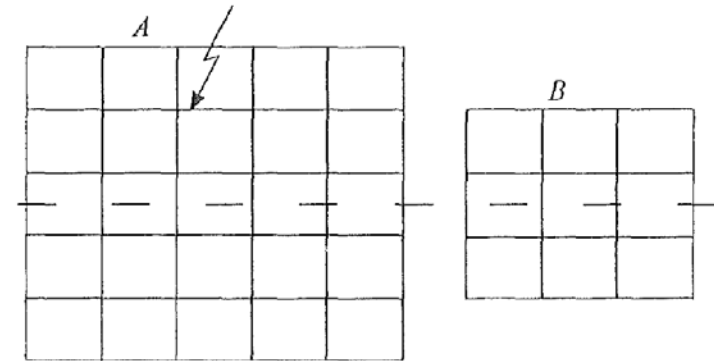


Sl. 30.b

Uzajamni uticaji uzemljivača

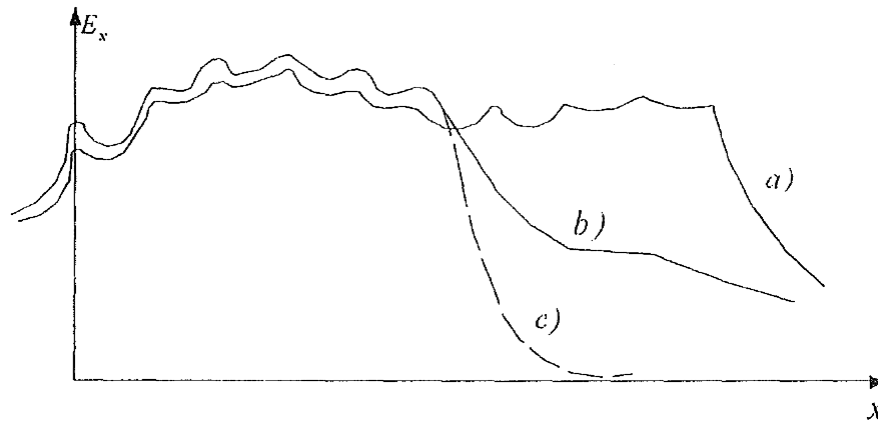
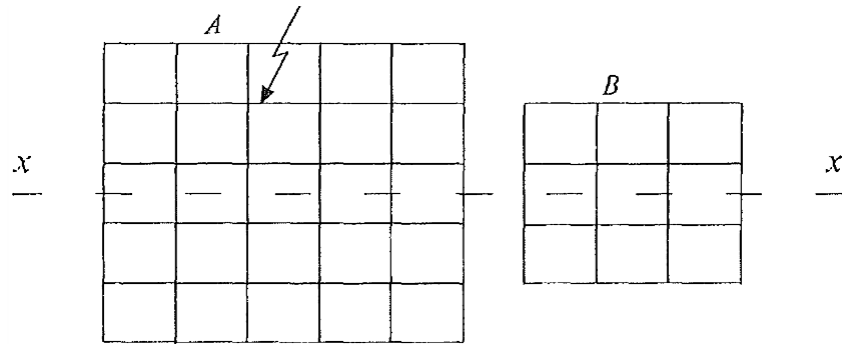
Objekti u blizini elektroenergetskih postrojenja

- ❖ Neka se u blizini uzemljivača nekog elektroenergetskog postrojenja, (označimo ga sa A), nalazi stambeni ili drugi objekat koji ima svoj uzemljivač B.
- ❖ U razmatranom slučaju se mogu imati sledeće okolnosti:
 - a) Uzemljivač B je povezan sa uzemljivačem A;
 - b) Uzemljivač B nije povezan sa drugim uzemljivačima;
 - c) Uzemljivač B je preko niskonaponske mreže povezan sa uzemljenjima ove mreže i nalazi se, približno, na nultom potencijalu.



Sl. 31

- ❖ Na Sl. 32 prikazana je raspodjela potencijala na površini tla duž pravca x- x u slučaju odvođenja struje sa uzemljivača A.



Sl. 32

- ❖ U slučaju **a)** nivo potencijala je nešto niži nego u slučaju **b)**.
- ❖ Povezivanjem uzemljivača, u izvesnoj meri se smanjio otpor rasprostiranja, a time i potencijal na koji dolaze uzemljivači.
- ❖ U razmatranom slučaju može biti kritična raspodela potencijala kod uzemljivača B, na strani suprotnoj od uzemljivača A. Zbog strmine potencijalne krive, ovde se mogu pojaviti opasni naponi dodira i koraka.
- ❖ U slučaju **b)** uzemljivač B izjednačava potencijal tla oko ovog objekta i imaju se mali gradijenti potencijala na tlu. Ako se objekat sa uzemljivačem B napaja električnom energijom iz postrojenja A ili niskonaponske mreže, preko provodnika napojnog voda se u objekat unose potencijali različiti od onog na kome se nalazi uzemljivač B, što može dovesti do oštećenja izolacije ovih provodnika. Da bi se to sprečilo, napajanje iz postrojenja A se može izvesti preko izolacionog transformatora.

- ❖ U slučaju c) se u prostoru između uzemljivača A i B uspostavlja vrlo strma raspodela potencijala koja može da prouzrokuje opasne napone koraka.
- ❖ Iz prethodno rečenog zaključuje se da koordinaciji uzemljenja treba posvetiti pažnju i, u zavisnosti od konkretne situacije, izabrati najracionalnije rešenje.

Uzemljenje ograde

- ❖ Melalne ograde postrojenja se moraju uzemljiti da bi se ograničili opasni potencijali koji se kod njih mogu pojaviti.
- ❖ **Potencijal** na koji dolazi ograda postrojenja **usled dejstva električnog polja od nadzemnog voda** koji prolazi iznad nje jednak je, u normalnom pogonu:

$$\underline{E}_f = R \cdot \frac{\sum_{k=1}^n \underline{U}_k \cdot j\omega C_k}{1 + R \cdot j\omega C_e}$$

a u slučaju zemljospoja:

$$\underline{E}_f = R \cdot \underline{U}_0 \frac{j\omega \sum_{k=1}^n C_k}{1 + R \cdot j\omega C_e}$$

gde su:

R - otpornost uzemljenja ograde;

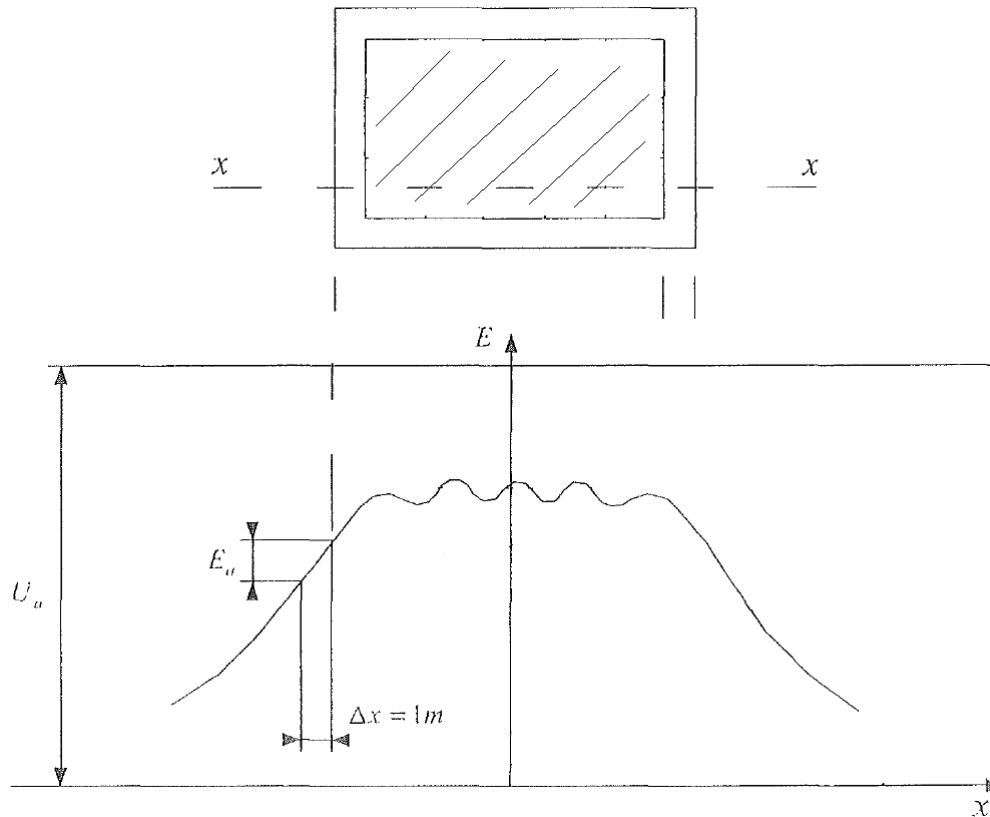
U_k - naponi faza voda u normalnom pogonu;

U_0 - nulte komponente napona faza voda kod zemljospoja;

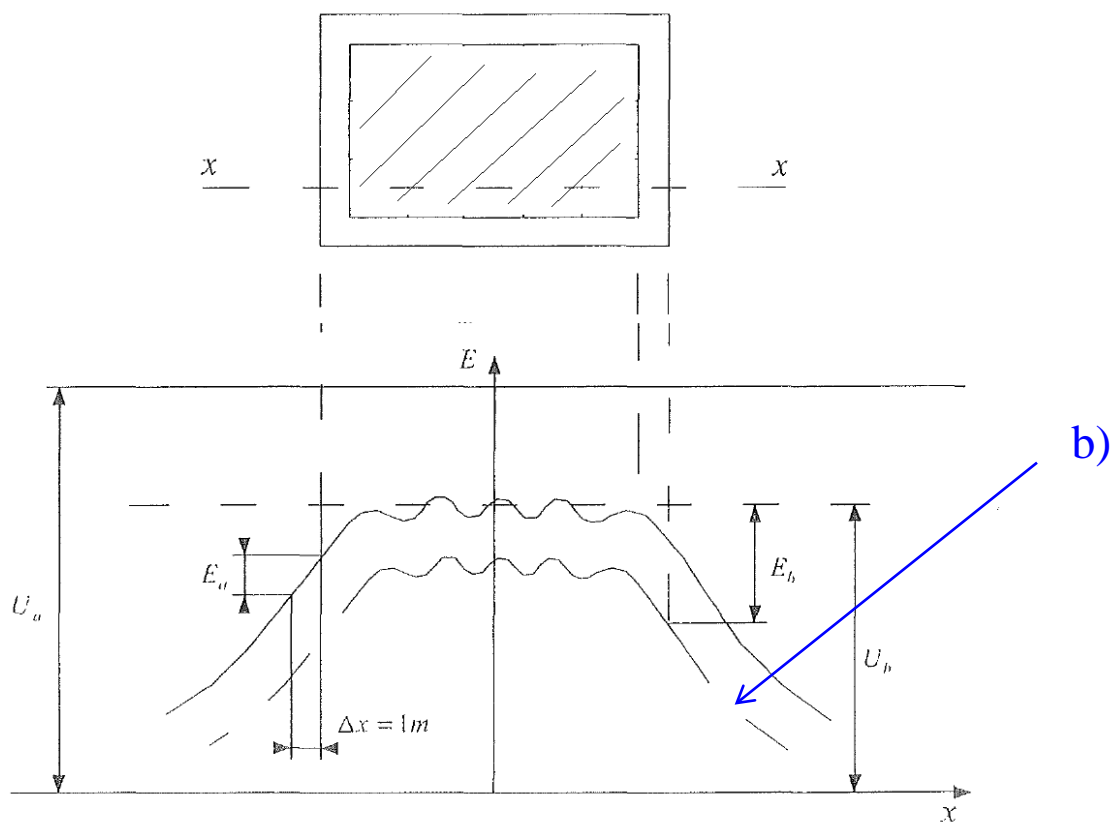
C_k - međusobni kapacitet faznih provodnika voda i ograde;

C_e - ekvivalentni kapacitet, jednak zbiru svih međusobnih kapaciteta i kapaciteta ograde.

- ❖ Na ogradi se u normalnom pogonu javljaju potencijali ako se kapaciteti C_k za pojedine faze razlikuju, sto je uvek slucaj.
- ❖ Potencijali u slučaju zemljospoja su nekoliko puta veći od onih u normalnom pogonu i uspostavljaju se i kada se kapaciteti C_k ne razlikuju.
- ❖ **Postoje dva načina uzemljenja metalne ograde:**
 - a) Ograda se uzemljuje posebnim uzemljivačem koji nije povezan sa uzemljivačem postrojenja.
 - Ovaj uzemljivač se obično izvodi u obliku jedne konture koja se polaže sa spoljašnje strane ograde na rastojanju (0,5 - 1)m i na dubini od 0,5m.
 - Ograda se za uzemljivač vezuje na više mesta, najmanje na svakom drugom stubu.
 - b) Uzemljivač ograde je sastavni deo uzemljivača postrojenja i polaže se neposredno pored ograde.
 - Ograda se, kao i u slučaju a), povezuje sa uzemljivačem na više mesta.



Sl. 33 Raspodela potencijala na površini tla duž pravca x- x za slučaj a) uzemlj. ograde nije povezan sa uzemljivačem postrojenja



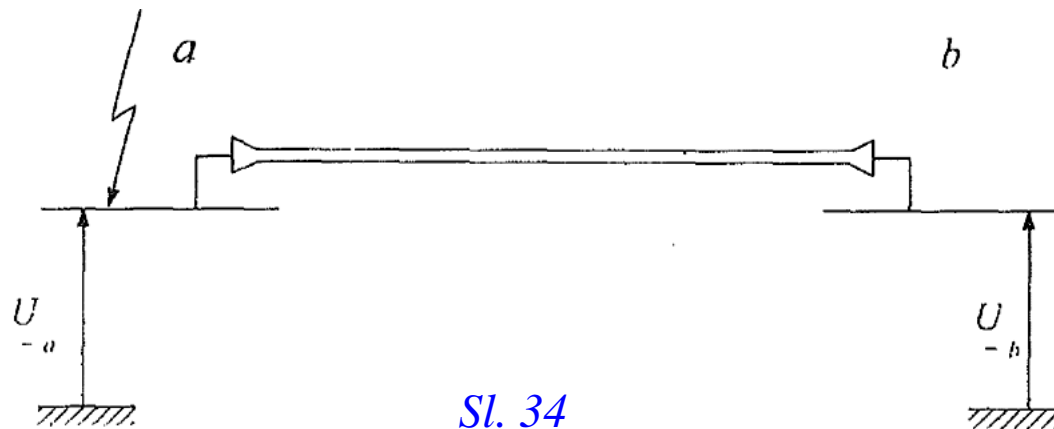
Sl. 33 Raspodela potencijala na površini tla duž pravca x- x
 za slučaj a) uzemlj. ograde nije povezan sa uzemljivačem postrojenja i
 b) uzemlj. ograde je povezan sa uzemljivačem postrojenja

- ❖ U slučaju **a)** na ogradi se, kod dodira spolja, pojavljuju male potencijalne razlike dodira E_a .
- ❖ Ograda dolazi na potencijal okolnog tla na dubini polaganja njenog uzemljivača.

- ❖ U slučaju **b)** opšti nivo potencijala tla je niži nego u slučaju a) zbog smanjivanja otpora rasprostiranja uzemljivača.
- ❖ Napon uzemljivača U_b je, takođe, manji od napona U_a , iz istog razloga.
- ❖ Potencijalna razlika koja se može premostiti dodirom spolja može iznositi nekoliko desetina procenata napona U_b .

Iznošenje potencijala iz TS u gradskim kablovskim distributivnim mrežama

- ❖ Razmotrićemo okolnosti koje se uspostavljaju kod uzemljivača TS $x/0.4$ kV/ kV, najbližih izvornim TS 110(35)/ x kV/kV iz kojih se napajaju kablom.
- ❖ Metalni omotač ili ekran kabla povezan je sa uzemljivačem izvorne TS, tako da se kod zemljospoja u ovoj TS **povišeni potencijal, preko pomenutog plašta ili ekrana, prenosi na uzemljivač TS $x /0,4$ kV/kV.**



Sl. 34

- ❖ Potencijalna razlika dodira i napon dodira kod postrojenja b povezani su poznatom opštom relacijom:

$$U_d = \frac{E_d}{s_d} \quad s_d = 1 + 1,56 \times 10^{-3} \rho$$

gde je sa ρ označena specifična električna otpornost površinskog sloja tla kod postrojenja b.

- ❖ Potencijalna razlika dodira \underline{E}_d proporcionalna je naponu uzemljivača postrojenja b prema okolnom tlu:

$$E_d = k_o (U_b - E_{ab})$$

gde su:

k_o - faktor oblikovanja potencijala uzemljivača postrojenja b.
Tipična vrednost k_o za gradske zidane TS x/0.4 kV/kV je 0,3;

E_{ab} - označen je potencijal tla oko postrojenja b usled odvođenja struja sa uzemljivača izvorne TS.

❖ Uzemljivač se može aproksimirati kružnom horizontalnom pločom jednake površine kao stvarni uzemljivač. Tada je:

$$E_{ab} = \frac{\rho I_a}{\pi D} \arcsin \frac{D}{2l}$$

gde su:

I_a - struja koja se odvodi u tle sa uzemljivača izvorne TS;

ρ - specifična električna otpornost tla.

D - prečnik ekvivalentne ploče

A - površina uzemljivača

l - rastojanje od ose simetrije uzemljivača izvorne TS do uzemljivača TS b.

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} A} = 1,13\sqrt{A}$$

❖ Za otpornost rasprostiranja uzemljivača izvorne TS uzeto je:

$$R_a = \frac{\rho}{2D}$$

❖ Potencijal tla oko postrojenja b

$$E_{ab} = I_a R_a \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{2l}$$

❖ Između napona U_a i U_b postoji veza:

$$U_b = k_i U_a \quad \text{gde je } k_i \text{ koeficijent izlazećeg potencijala.}$$

❖ Uslov koji treba zadovoljiti je da naponi dodira kod TS b ne budu veći od dozvoljenih ($U_d \leq U_{doz}$) je zadovoljen ako je:

$$R_a \leq \frac{s_d}{k_o k_i} \frac{U_{doz}}{I_a} \left(1 - \frac{2}{\pi k_i} \arcsin \frac{D}{2l} \right)^{-1}$$

MODELOVANJE UZEMLJIVAČA NA RAČUNARU

- ❖ Uzemljivač se sastoji od n pravolinijskih elemenata koji su međusobno galvanski povezani.
- ❖ Dužina elemenata je dovoljno mala da se mogu zanemariti padovi napona na njima – uzemljivač je ekvipotencijalan.
 - Za provodnike od bakra prethodna pretpostavka je zadovoljena za dužine provodnika do reda 200m.
- ❖ Nepravolinijski provodnici se mogu (sa zadovoljavajućom tačnošću) modelovati sa nekoliko pravolinijskih segmenata.
- ❖ Jednačine koje povezuju potencijale elemenata uzemljivača i struje koje se odvode sa njih su oblika:

$$[r] \cdot [I] = [\varphi] \quad (1)$$

gde su:

$[r]$ – $n \times n$ matrica sopstvenih otpornosti r_{ii} i međusobnih otpornosti r_{ij} ($i \neq j$)
elementa uzemljivača,

n - broj elemenata uzemljivača,

$$[r] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$r_{ii} = \frac{\varphi_i}{I_i} \quad r_{ij} = \frac{\varphi_j}{I_i} \quad (3)$$

φ_i - potencijal i -tog elementa u odnosu na tačku u ∞ ,

φ_j - potencijal na koji dolazi j -ti element usled odvođenja struje sa i -tog elementa,

I_i - struja koja se odvodi u tlo sa i -tog elementa,

$r_{ij} = r_{ji}$ matrica $[r]$ je simetrična

[I] –matrica kolona, reda $n \times 1$, čiji su elementi struje odvođenja sa elemenata uzemljivača. $[I] = [I_1 \ I_2 \ I_3 \ \dots \ I_n]^T$

[φ] –matrica kolona, reda $n \times 1$, čiji su elementi potencijali na koje dolaze elementi uzemljivača pri odvođenju struja u tlo. $[\varphi] = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \ \dots \ \varphi_n]^T$

Ako je uzemljivač ekvipotencijalan tada je: $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \dots = \varphi_n = U_u$,

pa je:

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} U_u = [1] U_u \quad (4)$$

[1] – $n \times 1$, vektor jedinica

U_u napon uzemljivača u odnosu na tačku u beskonačnosti.

Relacija (1) postaje:

$$[r] \cdot [I] = [1] U_u \quad (5)$$

- ❖ Struja odvođenja sa uzemljivača je:

$$I_u = \sum_{i=1}^n I_i = [1]^T \cdot [I] \quad (6)$$

Na osnovu relacije (5) se može napisati: $[I] = [r]^{-1} \cdot [1] \cdot U_u$ (7)

- ❖ Otpor rasprostiranja uzemljivača je:

$$R_u = \frac{U_u}{I_u} = \frac{1}{([1]^T \cdot [r]^{-1} \cdot [1])} \quad (8)$$

Izračunavanje izraza se svodi na sabiranje svih elemenata matrice $[r]^{-1}$

- ❖ Napon uzemljivača je:

$$U_u = R_u \cdot I_u \quad (9)$$

❖ Potencijal neke tačke M u okolini uzemljivača je:

$$\varphi_M = \sum_{i=1}^n \varphi_{iM} \quad (10)$$

gde je φ_{iM} potencijal koji stvara element i u tački M .

Ako je:

$$\varphi_{iM} = r_{iM} \cdot I_i \quad (11)$$

gde su: r_{iM} - uzajamna otpornost tačke M i elementa i ,

I_i - struja odvođenja sa elementa i ,

relacija (10) se može napisati kao:

$$\varphi_M = \sum_{i=1}^n r_{iM} \cdot I_i \quad (12)$$

ili, u matričnom obliku:

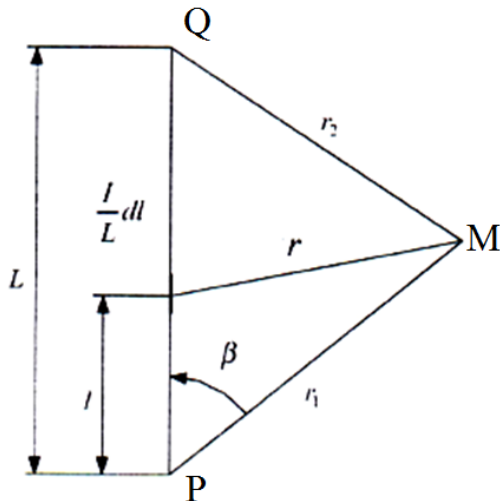
$$\varphi_M = [r_M] \cdot [I] = [r_M] \cdot [r]^{-1} \cdot [1] \cdot U_u \quad (13)$$

gde $[r_M]$ predstavlja $1 \times n$ vektor međusobnih otpornosti r_{iM} elemenata uzemljivača i tačke M .

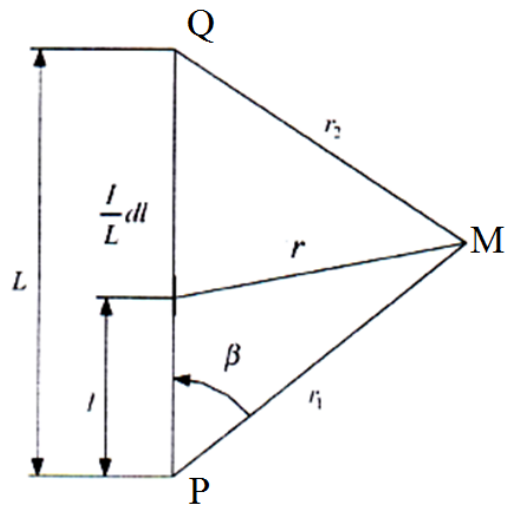
- ❖ Svi izrazi važe nezavisno od oblika elemenata.

Sopstvene i međusobne otpornosti pravolinijskih provodnika u neograničenom homogenom tlu

- ❖ Izrazi za sopstvene i međusobne otpornosti elemenata uzemljivača se izvode na osnovu izraza za potencijal koji u tački M stvara pravolinijski element sa koga se odvodi struja.
- ❖ Provodnik je u neograničenom prostoru specifične otpornosti ρ .



- P, Q - početna i krajnja tačka elementa
- L - dužina provodnika
- dl - elementarni deo, kao tačkasti strujni izvor (sfera)
- Neka je podužna gustina struje koja se odvodi sa provodnika konstantna i jednaka: $\frac{I}{L}$



➤ Struja koja se odvodi sa elementa dl je:

$$I_{dl} = \frac{I}{L} dl \quad (14)$$

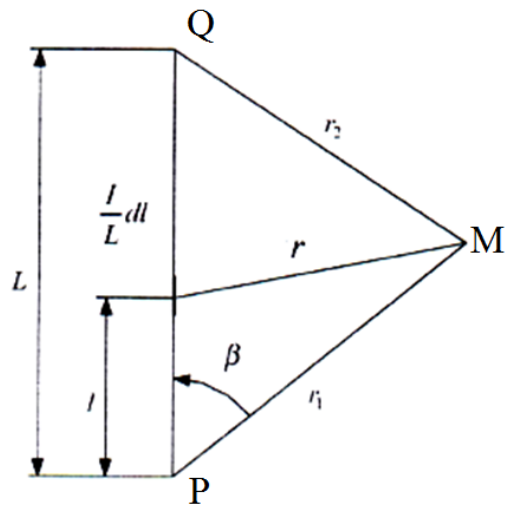
➤ Posmatra se radijalno strujno polje pri odvođenju struje sa sfere u okolni prostor specifične otpornosti ρ .

➤ Potencijal tačke M na rastojanju r_M od centra sfere je:

$$\varphi_M = \int_{r_M}^{\infty} E \cdot dr = \int_{r_M}^{\infty} \rho \cdot J \cdot dr = \int_{r_M}^{\infty} \rho \cdot \frac{I}{4\pi r^2} \cdot dr = \frac{\rho I}{4\pi r_M} \quad (15)$$

❖ U slučaju provodnika i dužine L sa koga se odvodi struja I , potencijal u tački M koji potiče od elementarnog strujnog provodnika dužine dl je:

$$d\varphi_{iM} = \frac{\rho I}{4\pi L} \cdot \frac{dl}{r} \quad (16)$$



- ❖ Potencijal tačke M koji potiče od provodnika dužine L sa koga se odvodi struja I je:

$$\varphi_M = \frac{\rho I}{4\pi L} \cdot \int_L \frac{dl}{r} \quad (17)$$

- ❖ Međusobna otpornost provodnika i dužine L i tačke M je:

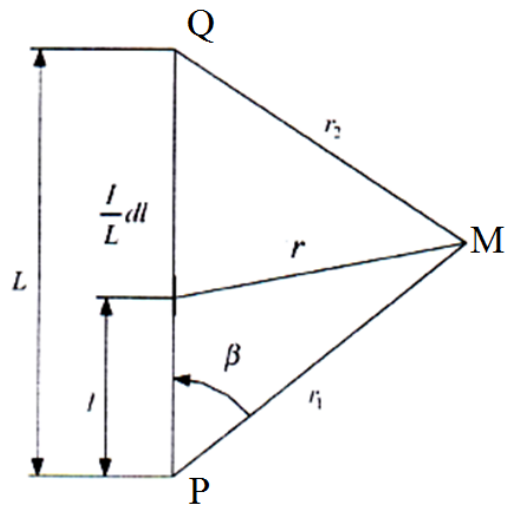
$$\alpha_M = \frac{\varphi_M}{I} = \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \int_L \frac{dl}{r} \quad (18)$$

- ❖ Na osnovu slike je:

$$r^2 = l^2 + r_1^2 - 2 \cdot l \cdot r_1 \cos \beta \quad r_2^2 = L^2 + r_1^2 - 2 \cdot L \cdot r_1 \cos \beta \quad (19.a \text{ i } 19.b)$$

- ❖ Sređivanjem (19.a) i (19.b) dobija se:

$$\Rightarrow r = \sqrt{l^2 - \frac{l}{L}(r_1^2 + L^2 - r_2^2) + r_1^2} \quad (20)$$



❖ Kada se izraz (20) uvrsti u izraz (18) dobija se:

$$\alpha_M = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{D+L}{D-L} \quad (21)$$

gde je:

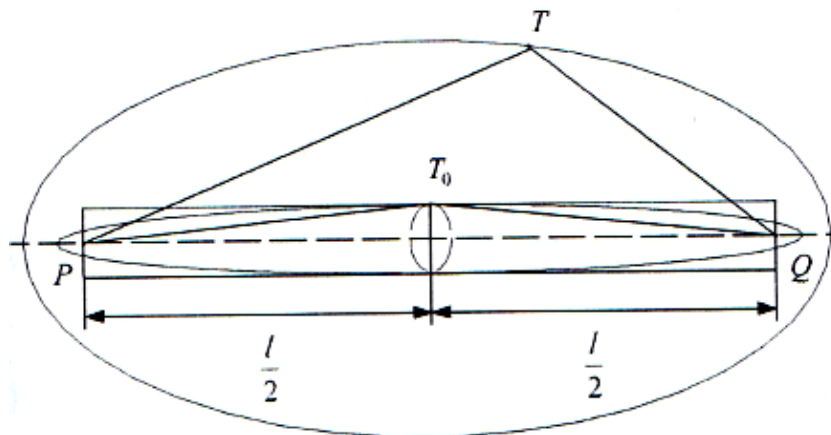
$$D=r_1+r_2 . \quad (22)$$

za $r_1+r_2=\text{const}$ definiše se elipsoid -
ekvipotencijalna površ

❖ Potencijal tačke M je:

$$\varphi_M = \alpha_M \cdot I = \frac{\rho I}{4\pi L} \ln \frac{r_1+r_2+L}{r_1+r_2-L} \quad (23)$$

- ❖ Sopstvena otpornost pravolinijskog provodnika može se odrediti kao otpornost rasprostiranja rotacionog elipsoida oko ose provodnika, pri čemu mu je kraća osa jednaka prečniku provodnika, a krajevi P i Q su žiže.



- ❖ Sopstvena otpornost α_s se određuje kao odnos potencijala tačke T_0 na koji dolazi elipsoid kada se sa ose provodnika razvomerno odvodi struja i te struje.

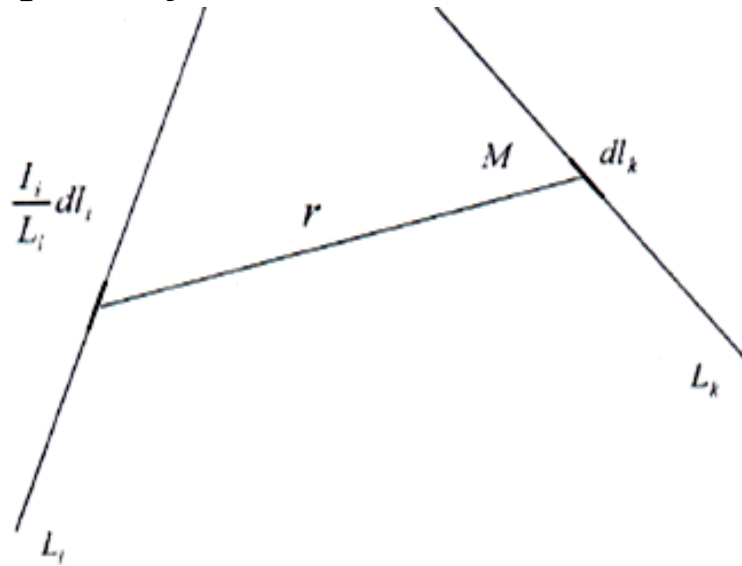
❖ Za tačku T_0 je:

$$r_1 = r_2 = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \Rightarrow \alpha_s = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \frac{\sqrt{L^2 + d^2} + L}{\sqrt{L^2 + d^2} - L} \quad (24)$$

❖ Pošto je $d \ll L$:

$$\alpha_s = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d} \quad (25)$$

- ❖ Međusobna otpornost dva pravolinijska provodnika određuje se metodom srednjih potencijala.



- ❖ Međusobna otpornost dva pravolinijska provodnika i i k je:

$$\alpha_{ik} = \frac{\varphi_{ik}}{I_i} = \frac{\rho}{4\pi L_i L_k} \cdot \int_{L_k} \int_{L_i} \frac{dl_i dl_k}{r} \quad (29)$$

- ❖ Potencijal tačke M usled odvođenja struje sa provodnika i je:

$$\varphi_{iM} = \frac{\rho I_i}{4\pi L_i} \cdot \int_{L_i} \frac{dl_i}{r} \quad (26)$$

- ❖ Ako se računa po celoj dužini provodnika k , tada je:

$$\varphi_{ik} = \frac{1}{L_k} \cdot \int_{L_k} \varphi_{iM} dl_k \quad (27)$$

$$\varphi_{ik} = \frac{\rho I_i}{4\pi L_i L_k} \cdot \int_{L_k} \int_{L_i} \frac{dl_i dl_k}{r} \quad (28)$$

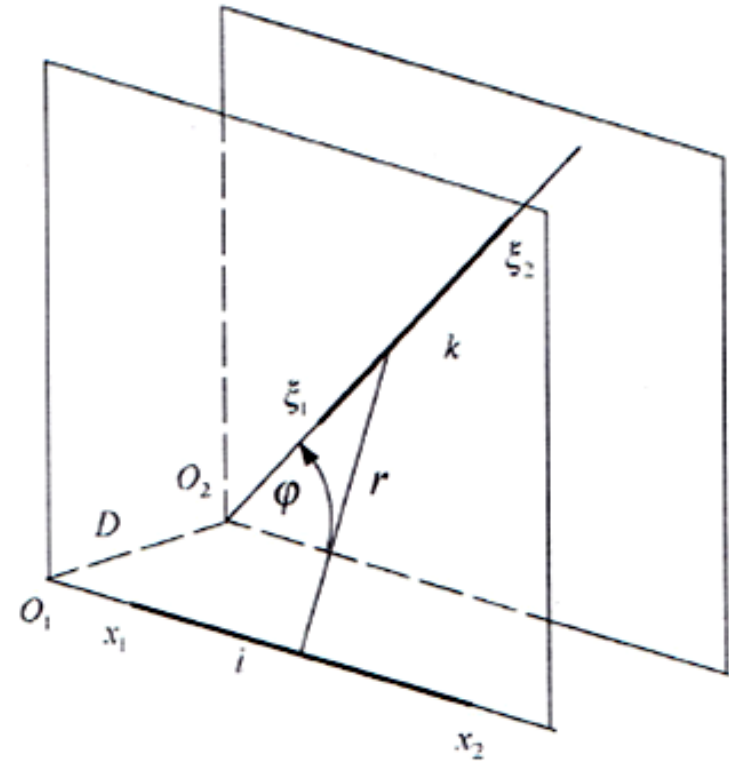
❖ Integral (29) se naziva Nojmanov integral.

❖ Jedno analitičko rešenje Nojmanovog integrala dao je Cejtlin u specifičnom koordinatnom sistemu:

D – zajednička normala za i , k

x_1, x_2 – koodinate u odnosu na O_1

ξ_1, ξ_2 – koodinate u odnosu na O_2



- ❖ Opšte rešenje za proračun Nojmanovog integrala je:

$$\int_{L_k} \int_{L_i} \frac{dl_i dl_k}{r} = P(x_1, \xi_1) + P(x_1, \xi_2) - P(x_2, \xi_1) - P(x_2, \xi_2) \quad (30)$$

gde su:

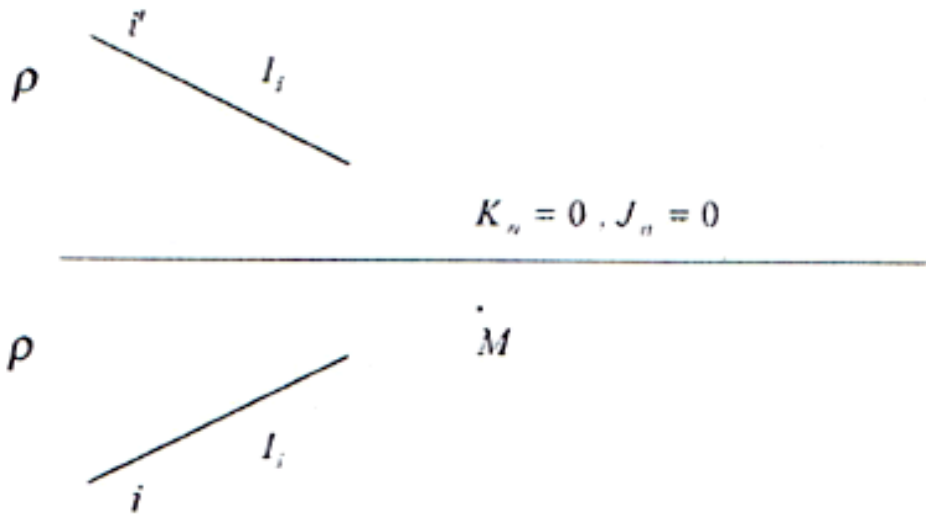
$$P(x, \xi) = x \ln |\xi - x \cos \varphi + r| + \xi \ln |x - \xi \cos \varphi + r| + \frac{2D}{\sin \varphi} \operatorname{arctg} \left(\frac{x + \xi + r}{D} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \quad (31)$$

$$r = \sqrt{x^2 + \xi^2 - 2 \cdot x \cdot \xi \cos \varphi} \quad (32)$$

- ❖ Pri izračunavanju funkcije $\operatorname{arctg}(\cdot)$ u (31) uglove koji odgovaraju pozitivnim vrednostima tangensa treba uzimati u granicama $(0 - \pi/2)$, a uglove koji odgovaraju negativnim vrednostima tangensa u granicama $(-\pi/2 - 0)$.
- ❖ Za paralelne provodnike je $\varphi=0, D \neq 0$
- ❖ Za neparalelne provodnike u istoj ravni je $\varphi \neq 0, D=0$

Ograničeno homogeno tlo

- ❖ Zbog konačne dubine ukopavanja uzemljivači se nalaze u ograničenom homogenom tlu.
- ❖ Uticaj površine zemlje obuhvata se uvođenjem lika uzemljivača, simetrično u odnosu na površinu tla.



- ❖ Sa lika provodnika se odvodi ista struja koja se odvodi sa provodnika
- ❖ Međusobna otpornost provodnika i i tačke M je:

$$r_{iM} = \alpha_{iM} + \alpha_{i'M} \quad (33)$$

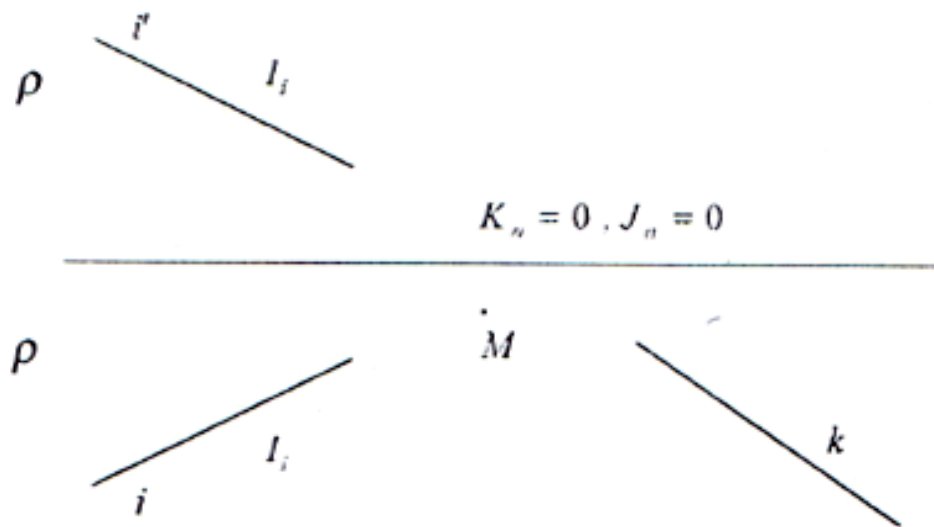
- ❖ Ako se tačka M nalazi na površini tla biće

$$r_{iM} = 2\alpha_{iM} \quad (34)$$

❖ Međusobna otpornost provodnika i i k je:

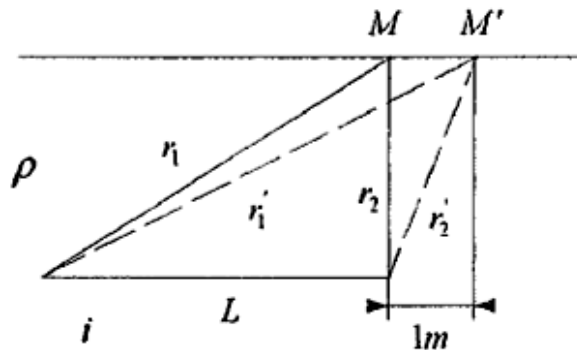
$$r_{ik} = \alpha_{ik} + \alpha_{i'k} \quad (35)$$

jer se srednji potencijali na provodniku k , koji potiču od provodnika i i njegovog lika sabiraju.



Primer

Odrediti kritičnu vrednost potencijalne razlike koraka za uzemljivač u obliku horizontalnog provodnika kružnog preseka 35 mm^2 , dužine 5 m , ukopanog na dubinu od $0,7 \text{ m}$ preko koga se odvodi struja od $I_u = 300 \text{ A}$. Tlo je homogeno $\rho = 100 \Omega\text{m}$.



Dvoslojno tlo

- ❖ U slučaju dvoslojnog tla, međusobne otpornosti provodnika uzemljiivača i tačke M mogu se odrediti uvođenjem četiri serije beskonačnih likova.
- ❖ Z - koordinate krajnjih tačaka likova pojedinih serija (za tipove A, B, C i D) jednake su:

$$\begin{aligned}Z_A(s) &= z + 2sh \\Z_B(s) &= -z - 2sh \\Z_C(s) &= -z + 2sh \\Z_D(s) &= z - 2sh,\end{aligned}\tag{36}$$

gde su:

z - dubina krajnjih tačaka elementa k ,

h - debljina gornjeg sloja i

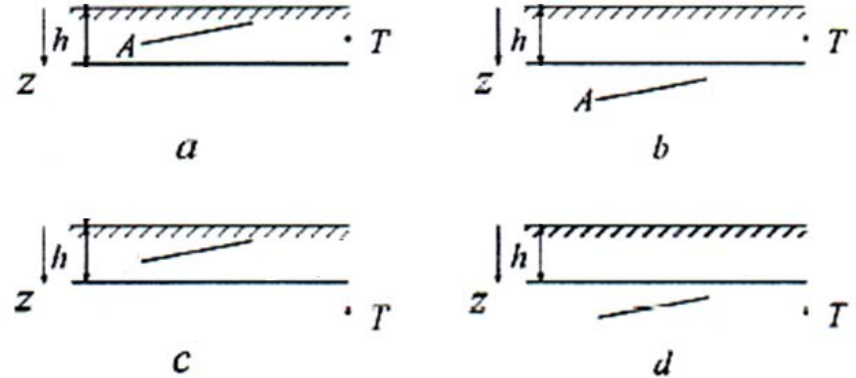
s - indeks serije

❖ Na slici su prikazani različiti položaji elemenata k i tačke T .

❖ Sa g je označen faktor refleksije:

$$g = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (37)$$

gde su sa ρ_1 i ρ_2 označene specifične otpornosti gornjeg i donjeg sloja tla, respektivno.

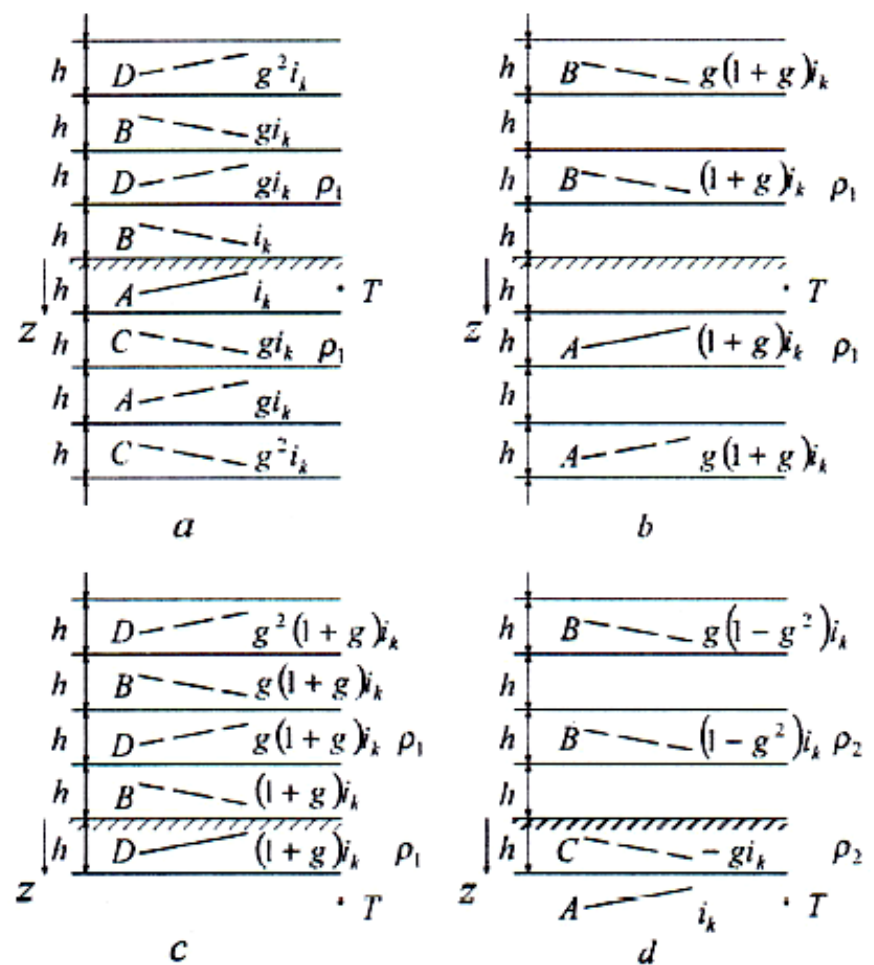


❖ Na slici su prikazane serije likova za različite položaje elemenata k i tačke T.

❖ Sa g je označen faktor refleksije:

$$g = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (37)$$

gde su sa ρ_1 i ρ_2 označene specifične otpornosti gornjeg i donjeg sloja tla, respektivno.



❖ **Međusobna otpornost provodnika i i tačke T :**

- ako su tačka T i provodnik i u gornjem sloju tla:

$$r_{kT} = \alpha_{AT}(0) + \alpha_{BT}(0) + \sum_{s=1}^{\infty} g^s (\alpha_{AT}(s) + \alpha_{BT}(s) + \alpha_{CT}(s) + \alpha_{DT}(s)) \quad (38)$$

- ako je tačka T u gornjem, a provodnik i u donjem sloju tla:

$$r_{kT} = (1 + g) \sum_{s=0}^{\infty} g^s (\alpha_{AT}(s) + \alpha_{BT}(s)) \quad (39)$$

- ako je tačka T u donjem, a provodnik i u gornjem sloju tla:

$$r_{kT} = (1 + g) \sum_{s=0}^{\infty} g^s (\alpha_{BT}(s) + \alpha_{DT}(s)) \quad (40)$$

- ako su tačka T i provodnik i u donjem sloju tla:

$$r_{kT} = \alpha_{AT}(0) - g\alpha_{CT}(1) + (1 - g^2) \sum_{s=0}^{\infty} g^s \alpha_{BT}(s) \quad (41)$$

- ❖ Simbol $\alpha_{AT}(s)$ označava međusobnu otpornost između lika A u seriji s i tačke T u neograničenom homogenom tlu.
- ❖ Analogno značenje imaju i drugi simboli.
- ❖ U (38)-(40) međusobne otpornosti se računaju sa ρ_1 , a u (41) sa ρ_2
- ❖ Redovi brzo konvergiraju jer je $|g| < 1$, a i međusobne otpornosti se smanjuju sa udaljavanjem likova, tako da se u proračunima uzima u obzir samo nekoliko prvih likova u seriji.

- ❖ Međusobne otpornosti elemenata mogu se računati metodom srednjih potencijala na osnovu potencijala tačaka na provodnicima, primenom numericke integracije.

