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, plaštevi 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

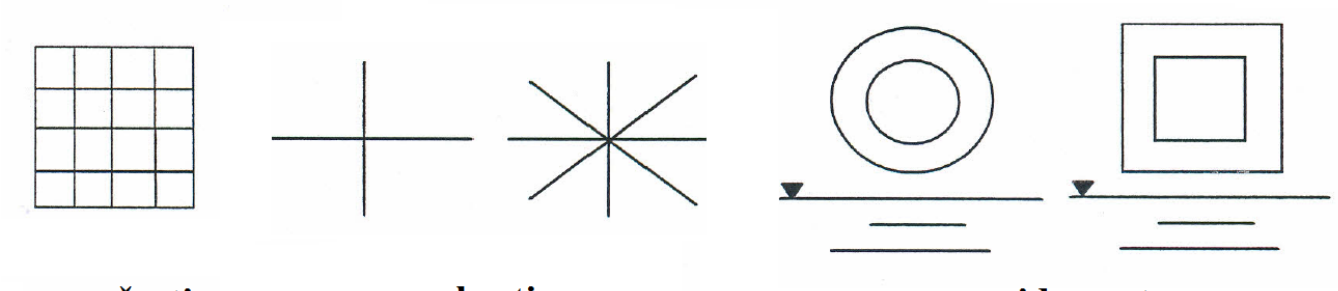
- Uzemljivači (konstruktivno) mogu biti:

  horizontalni, vertikalni i kosi.

- **Horizontalni uzemljivač** je sastavljen od horizontalno položenih provodnika, paralelnih sa površinom tla, na relativno maloj dubini.

- Horizontalni uzemljivač može biti:

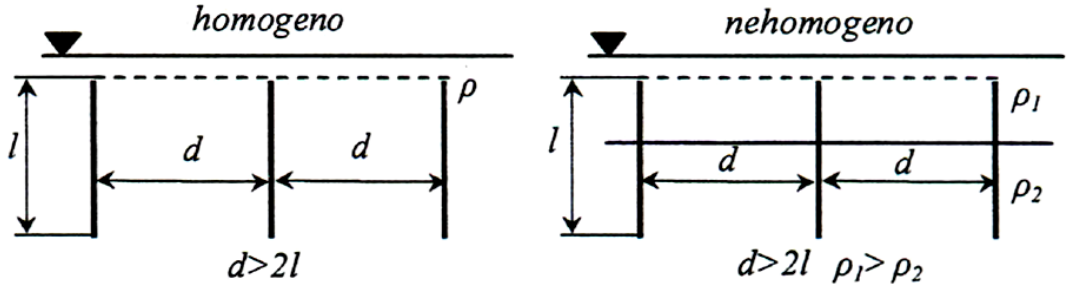
  1) mrežasti, 2) zrakasti, 3) u vidu prstenova, 4) u vidu kombinacije tih oblika.



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.

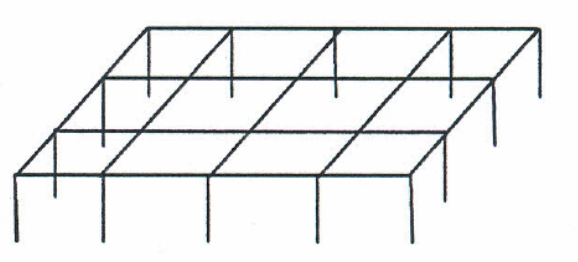
Sl. 2



- **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 elekirični 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**

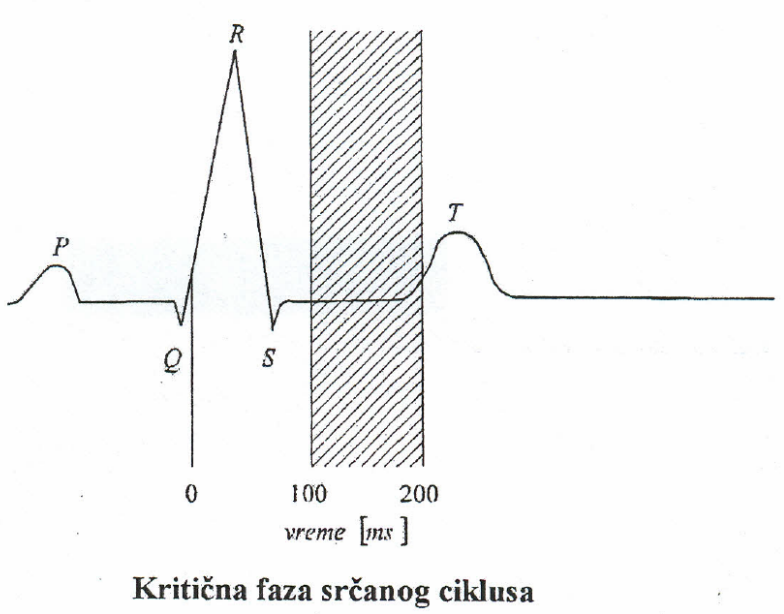
Efektivna vrednost struje električnog udara (mA)	Dejstvo
< 1	Ne oseća se
1 ÷ 9	Blage bezbolne reakcije; moguća je voljna kontrakcija mišića i odvajanje od delova pod naponom.
10 ÷ 20	Grčenje mišića i bolovi u rukama i nogama; odvajanje od dela pod naponom najčešće nije moguće, posle prekida proticanja 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 l2,5mA, a za 50% je l6mA. Kod žena na kojima su vršeni eksperimenti ove struje su iznosile 8mA, oclnosno 10,5mA.
- **Struje (10 - 50)mA** se moraju smatrati opasnim, i to više što su bliže gornjoj granici.
- Pogođena osoba najčešće neće moći da se odvoji od dela pod napanom, 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 elektricni 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

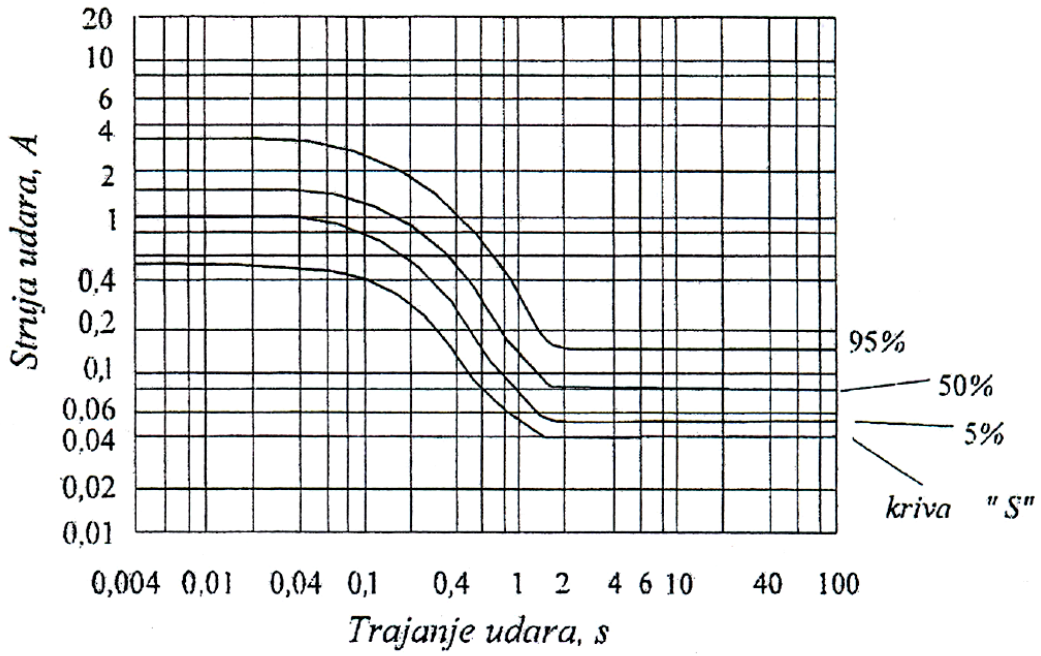
Sl. 4

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 fibrilaclje zavisi od efektivne vrednosti struje i njenog trajanja.

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



Sl. 5 **Fibrilacione struje**

➢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 stuja električnog udara.

- 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:

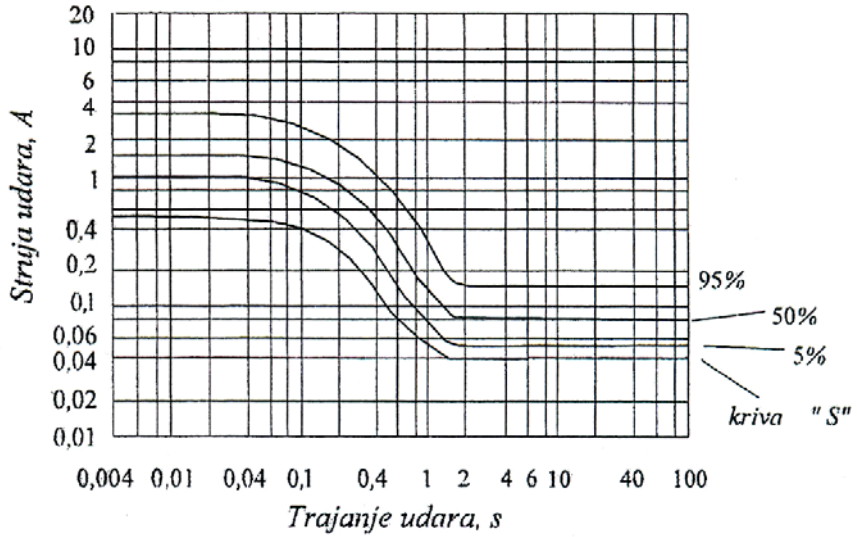
$$I_d \leq \frac{0.116}{\sqrt{t}} \quad , 0.03s \leq t \leq 3s$$

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

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

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

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



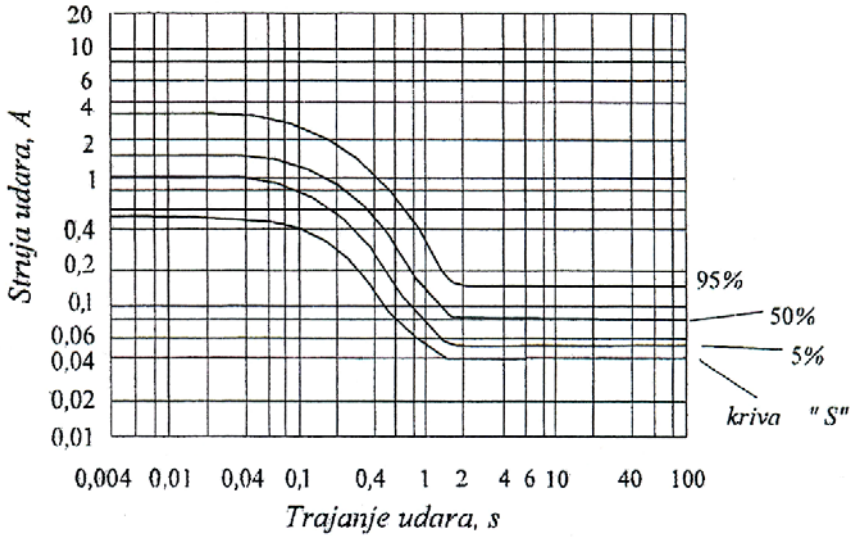
Fibrilacione struje

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.



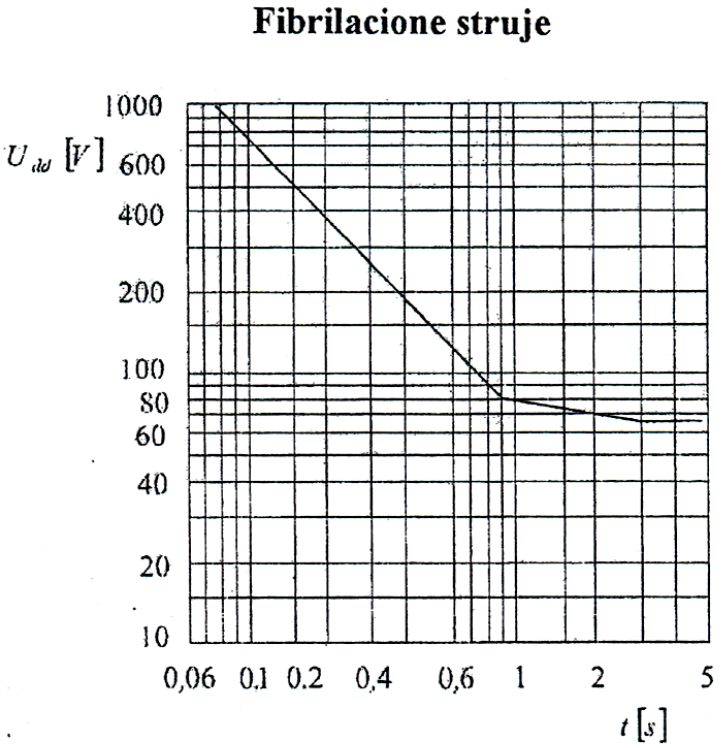
Sl. 5 **Fibrilacione struje**

- 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 1000 Ω .



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:

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

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

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

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

VRSTE UZEMLJENJA

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

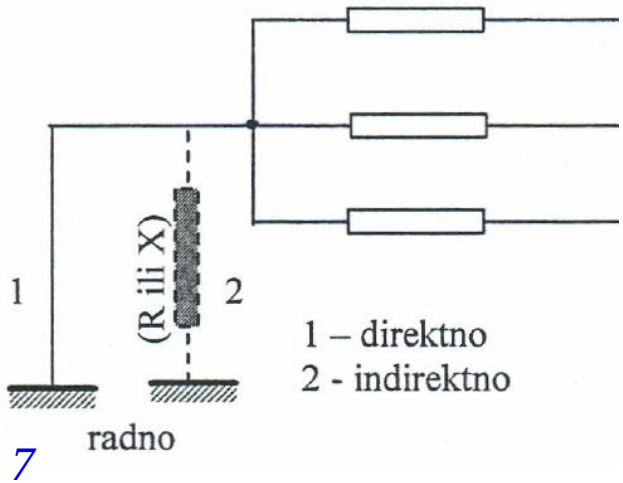
- Kod visokonaponskih postrojenja tipično je da jedan uzemljivač (sistem uzemljenja) obavlja sve funkcije ovih uzemljenja.

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 omogučava 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 uzemijivača koja zavisi isključivo od konstruktivnih parametara uzemljivača i parametara tla.

❖ **Impedansa uzemljenja $\underline{Z}_u$** je impedansa koju, pri frekvenciji 50 Hz, sistem uzemljenja suprostavlja 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**.

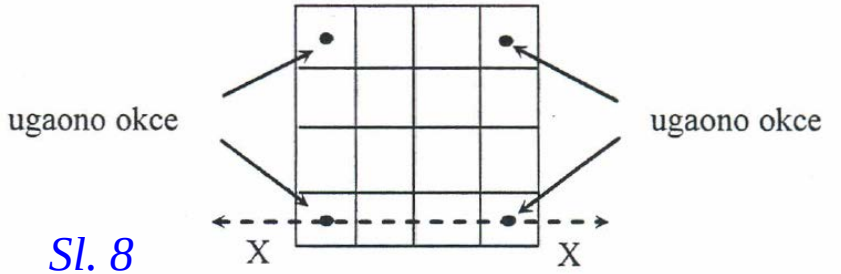
- Maksimalna vrednost potencijalne razlike dodira za ceo uzemljivač definisana je izrazom:

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

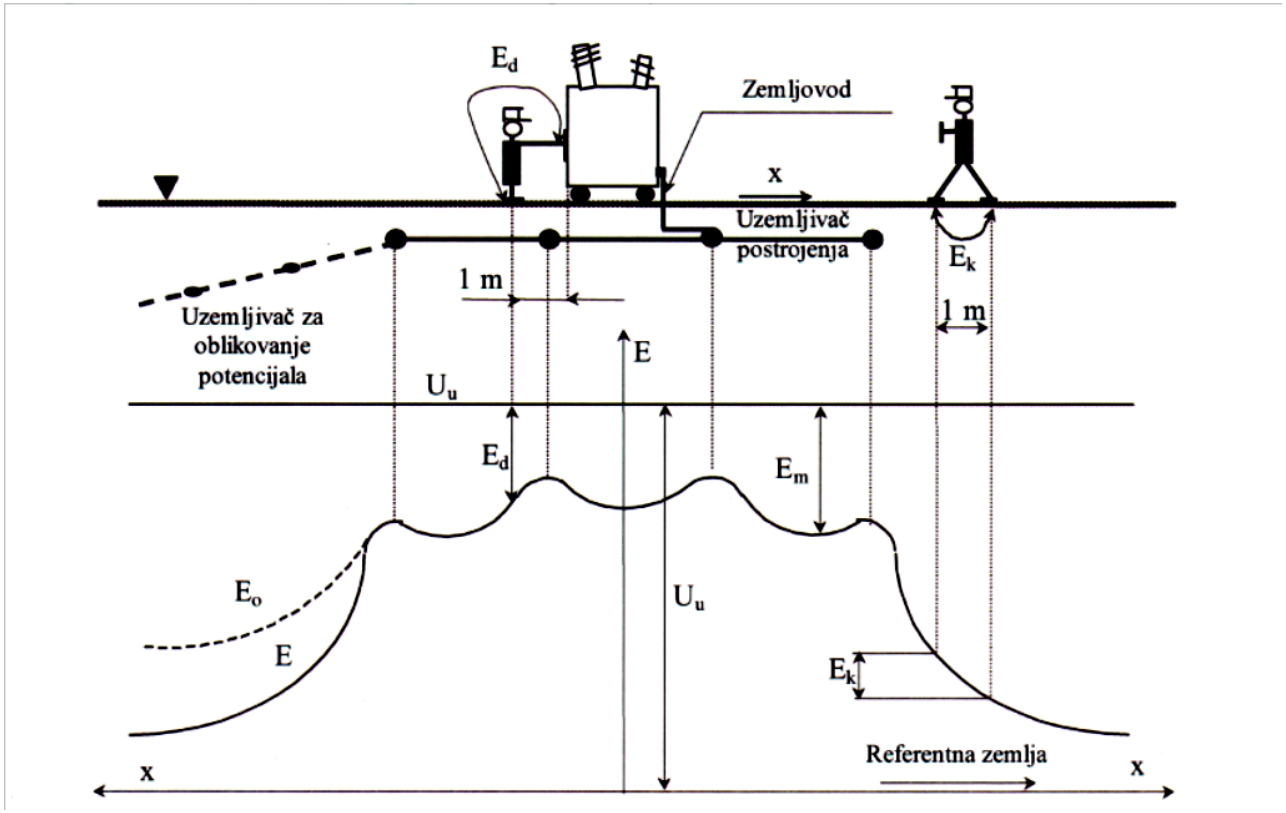
  gde je V_{0min} najmanja vrednost potencijala tla iznad uzemljivača (na celoj površini postrojenja).

- 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. 8


E_d
Zemljovod
x
Uzemljivač
postrojenja
E_k
1 m
1 m
Uzemljivač za
oblikovanje
potencijala
E
U_u
E_d
E_m
E_o
E
U_u
E_k
Referentna zemlja
x
x

Sl. 9

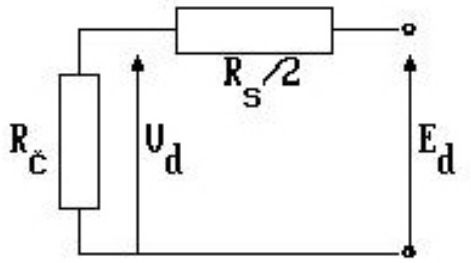
- **Oblikovanje potencijala** - podešavanje raspodele potencijala na površini tla u cilju smanjenja potencijalnih razlika dodira i koraka.
- Izvodi se polaganjem dodatnih provodnika uzemljivača na mestima na kojima se javljaju nedozvoljene vrednosti ovih razlika.
- Na prethodnoj slici (Sl.9) je isprekidanom 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.



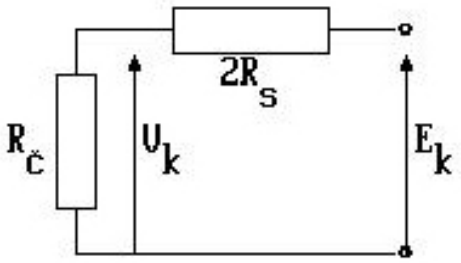
Sl. 10 Šema za određivanje napona dodira

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

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

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

- **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

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

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

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

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 :

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

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

- 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:

$$U_{doz}(V) = 1000, \ za \ \ t \le 0.075s,$$
$$U_{doz}(V) = 75/t, \ za \ \ 0.075 < t \le 1.153s,$$
$$U_{doz}(V) = 65, \ za \ \ t > 1.153s; \ gde \ je \ (t) \ trajanje \ kvara.$$

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

- Minimalni dozvoljeni presek provodnika uzemljivača je:

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

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

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

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

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

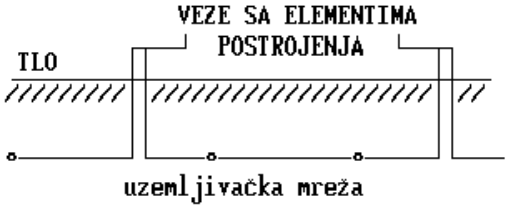
I_j - *struja u vremenskom intervalu j,*
t_j - *trajanje vremenskog intervala j,*
n - *broj vremenskih intervala*

- 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

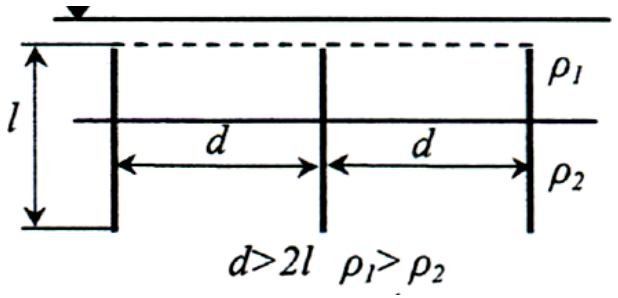
- Oblikovanje uzemljivača zavisi od :
  - raspoloživog prostora,
  - rasporeda opreme i drugih uređaja na površini tla koji se uzemljuju,
  - vrste i karakteristika tla.
- **Uslov je** da se postignu dovoljne vrednosti otpora rasprostiranja uzemljivača, pri čemu stvarne vrednosti napona dodira i koraka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

- Ako se uzemljivač sastoji od više štapnih uzemljivača oni treba da su međusobno razmaknuti.

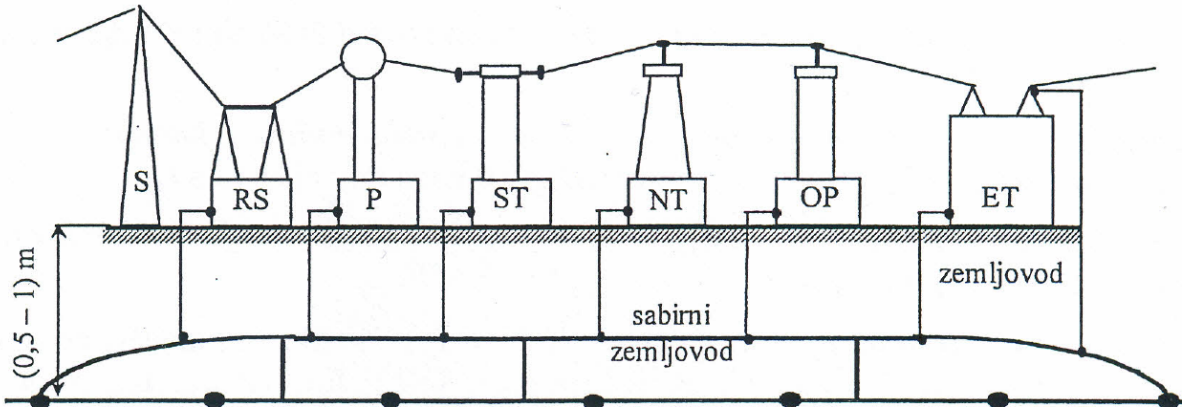
- Najmanja vrednost razmaka između štapova treba da bude jednaka njihovoj dvostrukoj dužini.



Sl.12

- KONTAKT UZEMLJIVAČA SA TLOM mora se ostvariti 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.

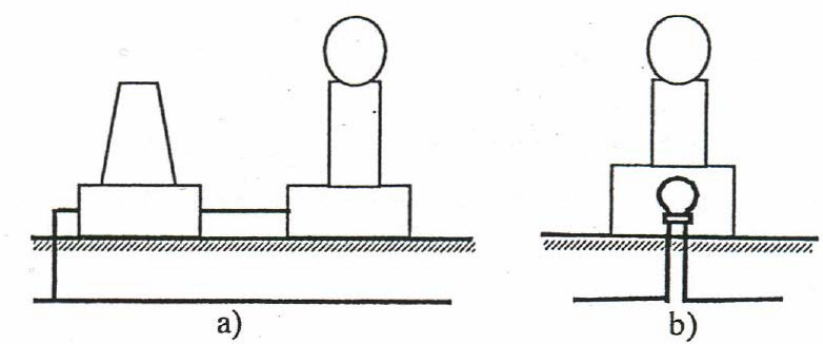


Sl.13.a Primer povezivanja uzemljenih elemenata postrojenja sa uzemljivačem.

- **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.



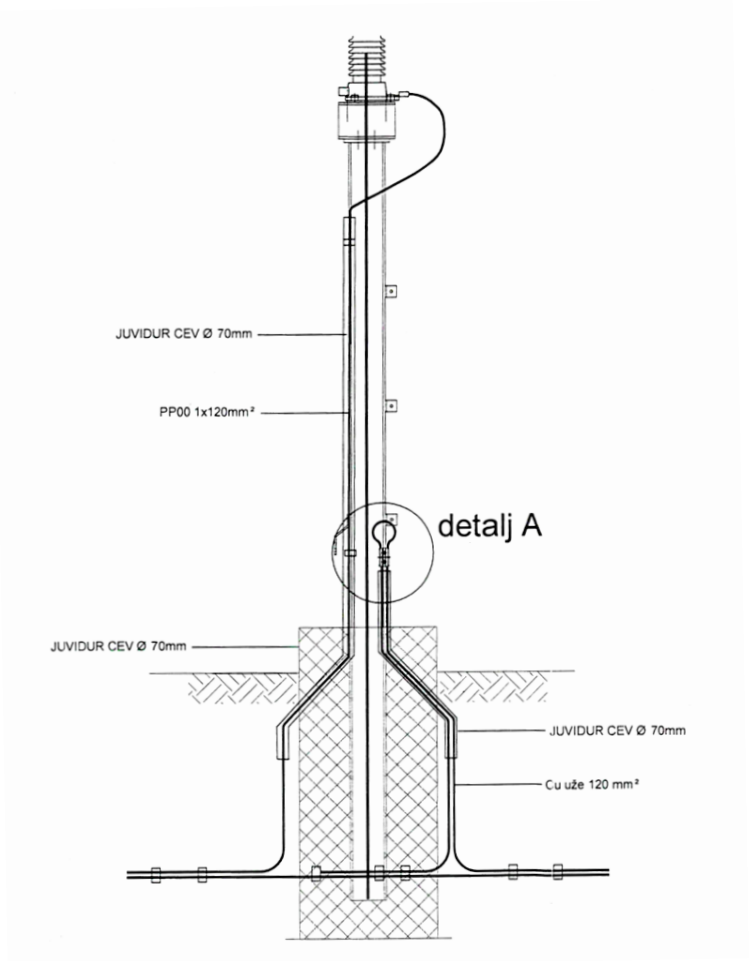
Sl. 13.b Primer nepravilnog i pravilnog povezivanja elemenata sa uzemljivačem a) nepravilno b) pravilno









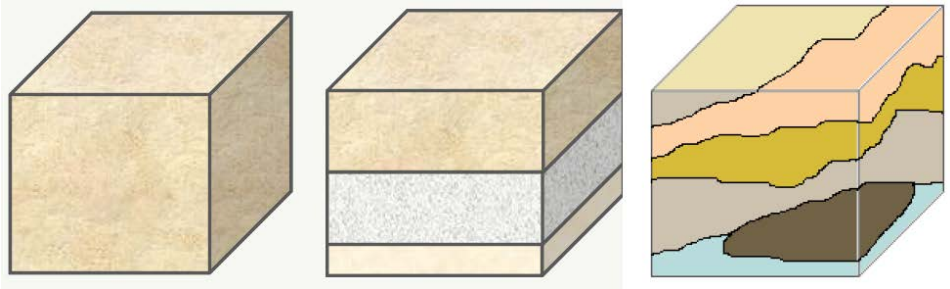

JUVIDUR CEV Ø 70mm
PP00 1x120mm²
detalj A
JUVIDUR CEV Ø 70mm
JUVIDUR CEV Ø 70mm
Cu uže 120 mm²

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: $\boldsymbol{E_d}$ - potencijalna razlika dodira, $\boldsymbol{k_d}$ - faktor dodira,
$\boldsymbol{\rho}$ - specifična otpornost površinskog sloja tla,
$\boldsymbol{I_u}$ - struja koja se odvodi sa uzemljivača u tlo,
$\boldsymbol{L}$ - 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 usiovi:

$$U_d \le U_{doz} \Leftrightarrow E_d \le E_{ddoz} = s_d U_{doz}$$
$$U_k \le U_{doz} \Leftrightarrow E_k \le E_{kdoz} = s_k U_{doz}$$

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 x 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 kritičinim mestima tankim slojem (15 do 20cm) slabo provodnog materijala, sa velikom specifičnom otpornošću (tucanik, šljunak).

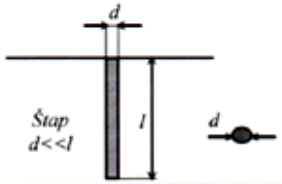
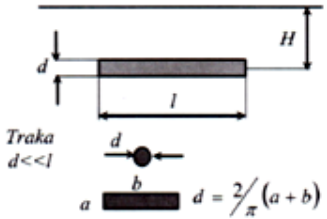
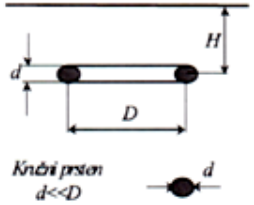
- Ako se primenjuje mera nasipanja, uticaj tog nasutog sloja obuhvata se samo u proračunu vrednosti faktora s_d i s_k, kada se za ρ uzima vrednost specifične otpornosti tog nasutog sloja. Svi ostali proračuni rade se sa realnim parametrima tla.

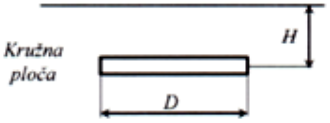
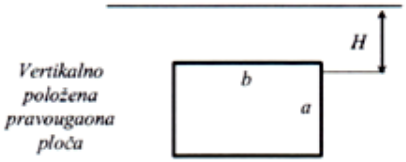
PRORAČUN KARAKTERISTIČNIH VELIČINA UZEMLJIVAČA

- 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.

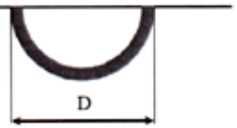
- Za veća elektroenergetska postrojenja (prostorno i po značajuju) u praksi se uobičajeno koriste horizontalne uzemljivačke mreže, sa ili bez vertikalnih elemenata.

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

Уземљивач	Израз за прорачун отпора распростирања
	$\frac{\rho}{2\cdot\pi\cdot l}\cdot\ln\frac{4\cdot l}{d}$
	$\frac{\rho}{\pi l}\cdot\ln\frac{2\cdot l}{d},H=0$ $\frac{\rho}{\pi l}\cdot\ln\frac{l}{\sqrt{H\cdot d}},H>0$
	$\frac{\rho}{\pi^2 D}\cdot\ln\frac{8\cdot D}{d},H=0$ $\frac{\rho}{\pi^2 D}\ln\frac{4\cdot D}{\sqrt{Hd}},H>0$

Уземљивач	Израз за прорачун отпора распростирања
	$\frac{\rho}{2\cdot D},H=0$ $\frac{\rho}{4\cdot D}\cdot\left(1+\frac{2}{\pi}\cdot arctg\frac{D}{4\cdot H}\right),H>0$
	$\frac{\rho}{4\sqrt{ab}}$
	$0.44\cdot\frac{\rho}{\sqrt{S}}+\frac{\rho}{L}$

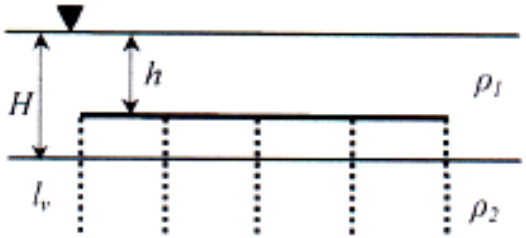
Tab. 2.b Izrazi za proračun otpora rasprostiranja nekih tipičnih uzemljivačkih konfiguracija

Уземљивач	*Израз за прорачун отпора распростирања*
polusfera 	$\frac{\rho}{\pi \cdot D}$
Темељни уземљивач 	$\frac{\rho}{\pi \cdot d}$ $d = 1.24 \cdot \sqrt[3]{V}$ V – *запремина армирано-бетонског темеља*

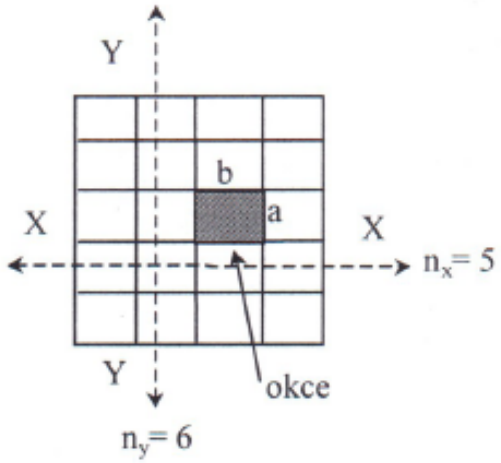
Уземљивач	*Израз за прорачун отпора распростирања*
Зракасти хоризонтално положени симетрични уземљивачи 	$\frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L}\left(\ln\frac{L^2}{d \cdot H} + A_k\right)$ *L – укупна дужина проводника* *H – дубина полагања* *d – пречник попречног пресека* *ρ - специфична ел. отпорност тла*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

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, $N=5\cdot4=20$

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

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

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, $L_{im} = L + 1.15 L_v$

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

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

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

- Proračun maksimalne potencijalne razlike dodira

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

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

C_m – korekcioni faktor zbog nehomogenosti

- Proračun potencijalne razlike koraka

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

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