

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad
PROJEKTIRANJE UZEMLJIVAČA TS 10(20)/0,4 KV

Rijeka, rujan 2015

Toni Brenčić
0069058652

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

PROJEKTIRANJE UZEMLJIVAČA TS 10(20)/0,4 KV

Mentor: Doc. Dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, rujan 2015

Toni Brenčić
0069058652

TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike
Br.: 602-04/15-14/01
Rijeka, 06.03.2015.

ZADATAK

za završni rad

Pristupnik: Toni Brenčić

Matični broj: 0069058652
Lokalni matični broj: 12800018

Naziv zadatka:

PROJEKTIRANJE UZEMLJIVAČA TS 10(20)/0,4 KV

Naziv zadatka na
engleskom jeziku:

10(20)/0,4 KV SUBSTATION GROUNDING DESIGN

Sadržaj zadatka:

U radu je potrebno prikazati metodologiju projektiranja uzemljivača transformatorskih stanica 10(20)/0,4 kV. Prikazati vrste uzemljenja i karakteristične veličine uzemljivača te metodologiju dimenzioniranja sustava uzemljenja. Izvršiti proračun uzemljivača gradske KTS 10(20)/0,4 kV 1x630 kVA.

Zadano: 17.03.2015.

Mentor:

Doc. dr. sc. Dubravko Franković

Predsjednica Povjerenstva:

Vera Gradišnik
Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik

Zadatak preuzeo dana: 17.03.2015.

Toni Brenčić

(potpis pristupnika)

Dostaviti:

- Predsjednica Povjerenstva
- Mentor
- Djelovođa Povjerenstva
- Evidencija studija
- Pristupnik
- Arhiva Zavoda

IZJAVA

Izjavljujem s punom materijalnom i moralnom odgovornošću da sam ovaj rad samostalno napravio, te da u njemu nema kopiranih ili prepisanih dijelova teksta tuđih radova, a da nisu označeni kao citat s napisanim izvorom odakle su preneseni.

Svojim vlastoručnim potpisom potvrđujem da sam suglasan da se ovaj moj rad javno objavi na internetu.

U Rijeci, 15.9.2015

Toni Brečić

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OSNOVNI POJMOVI.....	2
3.	VRSTE UZEMLJENJA PREMA NAMJENI.....	3
4.	VRSTE UZEMLJIVAČA	5
4.1.	Štapni uzemljivač.....	5
4.2.	Trakasti uzemljivač.....	8
4.3.	Temeljni uzemljivač.....	9
4.3.1.	Utjecaj starenja na otpor uzemljenja temeljnog uzemljivača.....	10
5.	MATEMATIČKI MODEL RASPODJELE POTENCIJALA OKO UZEMLJIVAČA.....	11
5.1.	Utjecaj potencijala površine zemlje na iznos struje kroz čovjeka.....	12
5.2.	Smanjenje struje kroz tijelo nasipavanjem tla šljunkom.....	15
6.	PROJEKTIRANJE UZEMLJIVAČA TS 10(20)/0,4 kV	17
6.1.	Matematički model.....	17
6.2.	Postupak projektiranja uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV.....	19
6.3.	Izvedebe uzemljivača sa združenim ili odvojenim radnim i zaštitnim uzemljivačima.....	26
7.	IZVOĐENJE UZEMLJENJA TS 10(20)/0,4 kV	29
8.	ISPITIVANJE UZEMLJENJA TS 10(20)/0,4 kV.....	31
9.	NUMERIČKI PIRIMJER PRORAČUNA UZEMLJIVAČA TS 10(20)/0,4 kV	35
10.	ZAKLJUČAK.....	38
11.	LITERATURA.....	39

1. UVOD

Cilj ovog završnog rada prikazati je metodologiju projektiranja uzemljivača transformatorskih stanica 10(20)/0,4 kV, prikazati vrste uzemljenja i karakteristične veličine uzemljivača te metodologiju dimenzioniranja sustava uzemljenja, te napraviti proračun uzemljivača jedne gradske KTS 10(20)/0,4 kV 1x630 kVA.

Pod pojmom uzemljenje podrazumjeva se električki-vodljivi spoj između zemlje tj. uzemljivača i nekog uzemljenog metalnog dijela električnog uređaja, neke točke mreže ili nekog postrojenja. Uzemljivač je spojen sa zemljom na taj način da je u nju ukopan kako bi s njom ostvario galvanski spoj.

Uzemljenje se izvodi kako bi:

- osigurali sigurnost živih bića za vrijeme normalnog stanja električnog sustava i narušenog stanja električnog sustava,
- omogućili ispravan rad električnih uređaja, instalacija, postrojenja i mreža,
- uspostavili stabilan napon za vrijeme prijelaznog stanja te smanjili mogućnost nastajanja kvarova za to vrijeme,
- osigurali sigurnost za ljude s obzirom na napone koji nastaju u uzemljivačkim sustavima pri strujama zemljospoja.

Struje zemljospoja pri svom prolasku kroz uzemljivački sustav stvaraju neke neželjene napone. Spomenuti naponi nazivaju se dodirni napon i napon koraka, a njihove vrijednosti ni u kojem poremećaju električnog sustava ne smiju dostići takvu vrijednost da mogu ugroziti ljudski život. Vrijednosti ovih napona kontrolira se na taj način da je uzemljenje izvedeno tako da svojim dimenzijama te oblikom zajedno sa slojevima tla u kojem se nalazi u bilo kojem poremećaju sustava, onemoguće pojavljivanje napona čiji je iznos veći od dozvoljenog.

Uzemljivač u odnosu na zemlju u koju je položen ne pruža veliki veliki otpor struji pa se njegov otpor zanemaruje. Za vrijeme prolaska struje kroz zemlju nastaje pad napona. Pad napona ovisi o struji zemljospoja I_z i o otporu zemlje, koji pak ovisi o specifičnom otporu tla u kojemu se uzemljivač nalazi. Otpornost tla ovisi dakle o vrsti tla u koje se polaže uzemljivač, ali znatno ovisi i o vlažnosti koja se konstantno mijenja ovisno o temperaturi i vremenu. Za vrijeme kad su temperature ispod nule i tlo se zaledi, specifični otpor postaje znatno veći. Kako bi što više smanjili vremenske utjecaje na otpor uzemljivača pri njegovom polaganju potrebno je poštivati određena pravila, o čemu će kasnije biti više riječi.

Prema zadaći koju uzemljivač ima u postrojenju postoje četiri osnovne vrste uzemljenja:

- pogonsko ili radno uzemljenje,
- zaštitno uzemljenje,
- gromobransko uzemljenje,
- združeno uzemljenje.

Uzemljenja se razlikuju po mjestu u postrojenju na koje je uzemljivač spojen kako bi ispunio svoju namjenu.

2. OSNOVNI POJMOVI

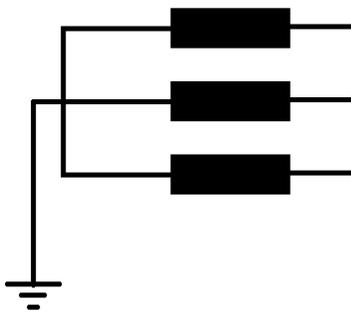
Kako bi što bolje razumjeli uzemljivače i sustave uzemljenja potrebno je definirati osnovne pojmove:

- Otpor rasprostiranja R_r - to je onaj otpor koji pruža zemlja između uzemljivača i mjesta na kojem je presjek kroz koji se struja širi tako velik da je struja zanemarivo mala. Slojevi zemlje u kojima nam je struja zanemarivo mala nazivamo neutralna zemlja, referentna zemlja ili daleka zemlja.
- Otpor uzemljenja R_z - sastoji se od prethodno spomenutog otpora rasprostiranja i otpora zemljovoda R_{zv} (metalnog dijela). No kako je otpor zemljovoda oko milijardu puta manji od otpora rasprostiranja zanemarujemo ga, te pod pojmom otpor uzemljenja podrazumijevamo otpor rasprostiranja. Otpor uzemljenja izražava se kao omjer napona uzemljenja U_z i struje I_z uzemljenja.
- Napon uzemljenja U_z - je napon između samog uzemljivača i neutralne zemlje
- Struja uzemljenja I_z - je struja koja preko uzemljivača teče u zemlju, a može biti istosmjerna ili izmjenična te raznih frekvencija. Struja uzemljenja najčešće se javlja u slučaju kvara, no katkad je uzemljivač sastavni dio strujnog kruga kao na primjer kod uzemljenja neutralne točke transformatora ili generatora.
- Udarni (impulsni) otpor uzemljenja R_i - je otpor koji daje uzemljenje pri odvođenju struje munje . Struja munje ima impulsni oblik. Taj otpor razlikuje se od onog koji se javlja protjecanjem istosmjerne ili izmjenične struje frekvencije 50 ili 60 Hz. Udarni otpor uzemljenja pored duljine uzemljivača, specifične otpornosti tla ovisi i o obliku i trajanju prenaponskog vala.
- Otpornost tla ρ_z - podatak je koji je neophodan pri računanju otpora uzemljenja, on se ili procjenjuje na osnovi analize i izvida strukture tla ili se otpornost tla mjeri na mjestu i dubini na kojoj će uzemljivač biti postavljen. Također, važno je utvrditi vlažnost i temperaturu mjesta na kojem će se položiti uzemljivač kako bi pravilno odredili otpornost tla, a kasnije i pravilno projektirali uzemljivač. Jedinica za otpornost je Ωm .

3. VRSTE UZEMLJENJA PREMA NAMJENI

U uvodu su nabrojane vrste uzemljivača prema ulogama koje oni imaju u pogonu. Četiri osnovne vrste s kojima se susrećemo su pogonsko ili radno uzemljenje, zaštitno uzemljenje, gromobransko uzemljenje te združeno uzemljenje. U nastavku će biti opisane karakteristike pojedinih vrsta uzemljenja .

- Pogonsko(radno) uzemljenje – je uzemljenje kojeg karakterizira to da je sa uzemljivačem spojena točka postrojenja koja je u normalnom pogonu sastavni dio strujnog kruga. Takvo uzemljenje koristi se pri uzemljivanju nultočke transformatora, krutog ili neposrednog uzemljenja zvjezdišta, uzemljenja zvjezdišta preko otpora, uzemljenja reaktancije ili impedancije ili uzemljenja nultog vodiča niskonaponske mreže. Na slici je prikazano najčešće pogonsko uzemljenje, a to je uzemljenje zvjezdišta transformatora



Slika 3.1. Uzemljenje nultočke transformatora

- Zaštitno uzemljenje – je uzemljenje kojeg karakterizira to da je uzemljivačem spojena točka postrojenja koja u normalnom pogonu ne pripada strujnom krugu i ne smije imati galvansku vezu s njim. To uzemljenje služi da uslijed kvara na izolaciji uzemli strujni krug te time onemogućiti da nam dijelovi postrojenja koji u normalnom pogonu nisu pod naponom budu pod naponom. Tu se misli na kućišta, konstrukcijske dijelove, ograde, vrata, metalne cijevi i sl.
- Gromobransko uzemljenje - je uzemljenje koje služi za odvođenje struje munje u zemlju. Struja munje uzrokovana je atmosferskim pražnjenjima. Gromobrankska zaštita izvedena je na taj način da gromobrankska instalacija na sebe privuče atmosfersko pražnjenje koje bi se inače izvršilo na objektu na kojem je gromobrankska zaštita postavljena. Struja munje prolazi kroz gromobranksku instalaciju te preko uzemljenja odlazi u zemlju. Gromobranksko uzemljenje može biti izvedeno na taj način da je odvojeno ili zajedničko s pogonskim ili zaštitnim uzemljenjem. Struja munje ima impulsni oblik te na to treba paziti pri dimenzioniranju gromobranskog uzemljenja. Zbog oblika struje munje gromobrankski uzemljivač se naziva i impulsni uzemljivač.
- Združeno uzemljenje – je takvo uzemljenje kod kojeg su dva ili više različitih uzemljenja spojena na jedan uzemljivač. Često se pogonsko i zaštitno ili pogonsko, zaštitno i gromobranksko uzemljenje spajaju na isti uzemljivač. Kako bi uzemljivač na koji je spojeno više uzemljenja obavio svoju funkciju potrebno ga je pravilno projektirati. Pogonsko uzemljenje cijelo vrijeme

obavlja svoju funkciju, zaštitno uzemljenje samo za vrijeme kvara, a gromobransko samo za vrijeme atmosferskih pražnjenja. Pri projektiranju takvih uzemljivača treba paziti jer ono mora zadovoljiti uvjete uzemljenja svih vrsta koja se spajaju zajedno.

Pojedina uzemljenja obavljaju više funkcija kao na primjer uzemljenje metalnog ili betonskog dalekovodnog stupa sa zaštitnim užetom, gdje se uzemljivač mora projektirati tako da obavlja funkciju zaštitnog i gromobranskog uzemljivača.

4. VRSTE UZEMLJIVAČA

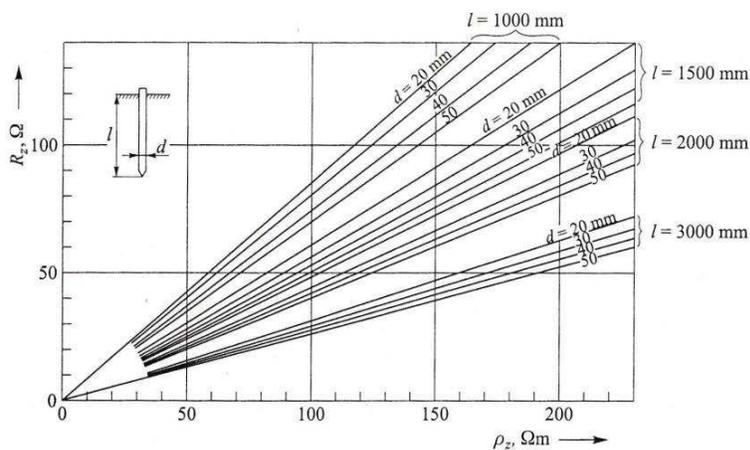
Vrste uzemljivača koje se najčešće susreću u uzemljivačkom sustavu transformatorske stanice su okomito ukopani, trakasti i temeljni uzemljivači.

4.1. Štapni uzemljivači

Štapni uzemljivači su uzemljivači čiji su vodiči okomito ukopani u zemlju. Ime su dobili zbog svojeg oblika. Njihov vrh mora biti na dubini na kojoj nema utjecaja smrzavanja. U kontinentalnim krajevima naše regije ta dubina iznosi pola metra pa se ta vrijednost u tim krajevima i koristi kod postavljanja uzemljivača. Štapni uzemljivači obično su duljine od jednog do tri metra. Izvode se čeličnim pocinčanim ili bakrenim cijevima, čeličnim pocinčanim šipkama te raznim profilima pocinčanog čelika, kao što su T, L, U, ... Normama su određeni minimalna debljina stjenka, te minimalne debljine promjera za pojedine materijale. Minimalne dimenzije čeličnih pocinčanih cijevi koje se koriste su: promjer 38 mm, debljina stijenke 3,5 mm. Kod bakrenih štapnih uzemljivača zbog boljih svojstva pri vođenju električne struje mogu se koristiti nešto manji presjeci. Minimalan presjek u tom slučaju iznosi 30 mm^2 , a minimalna debljina stijenke 2,5 mm. Kako bi otpor uzemljenja bio što manji, uzemljivaču se pri proizvodnji može dodati bakrena prevlaka. Uzemljivači se u zemlju postavljaju vibracijskim čekićem. Kako pri zabijanju uzemljivača u tlo ne bi došlo do njegovog oštećenja na njegov gornji kraj postavlja se udarna glava, a s donje strane postavlja se nastavak u obliku stošca kako bi uzemljivač što lakše prodirao u zemlju. Neki proizvođači uzemljivača na taj način obrade uzemljivač da na njih nije potrebno montirati nikakve nastavke već su njihovi krajevi već spremni za postavljanje.

Određivanje otpora uzemljenja R_z uz pomoć dijagrama:

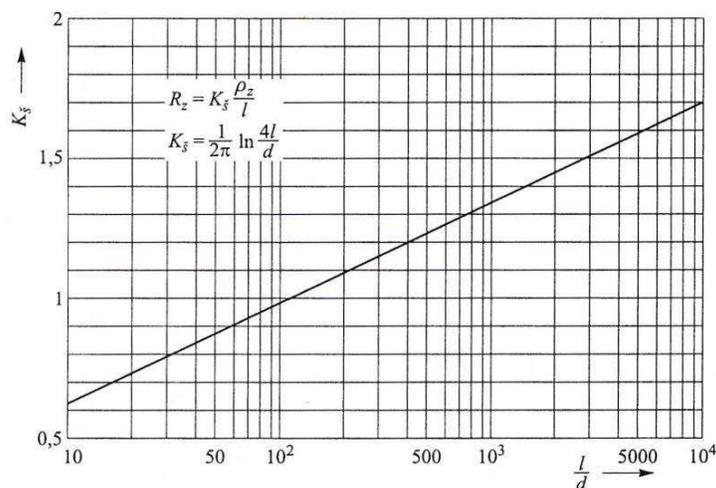
Otpor uzemljenja štapnog(šipke) ili cjevastog uzemljivača može se očitati iz sljedećeg dijagrama:



Slika 4.1.1. Otpor uzemljenja štapnog ili cjevastog uzemljivača za različite otpornosti tla, promjere uzemljivača i duljine uzemljivača

Na osi x nalazi se otpornost tla, a na osi y nalazi se vrijednost otpora uzemljenja R_z . Za svaku duljinu i promjer uzemljivača nacrtana je odgovarajuća linija. Iz dijagrama se može zaključiti kako povećanjem promjera, te povećanjem duljine uzemljivača dobiva se manji otpor uzemljenja. Može se zaključiti i to da sam presjek uzemljivača na otpor uzemljenja ne utječe značajno, kao njegova duljina.

Otpor uzemljenja može se dobiti i iz sljedećeg grafa:



Slika 4.1.2. Faktor K_s štapnog i cijevastog uzemljivača za različite omjere l/d

U tom slučaju se na x osi nalazi se omjer između duljine i promjera uzemljivača (l/d). Kako bi se u tom slučaju odredio otpor uzemljenja R_z najprije se izračuna omjer l/d , te se za taj omjer iz grafa odredi vrijednost faktora K_s . Nakon toga otpor uzemljivača R_z izračuna se prema sljedećem izrazu:

$$R_z = K_s \frac{\rho_z}{l} \quad (4.1.1.)$$

Na otpor uzemljenja utječe i dubina t na kojoj se uzemljivač nalazi. Pod dubinom uzemljivača podrazumijeva se udaljenost od gornjeg vrha uzemljivača do površine zemlje. Otpor uzemljenja postavljenog na dubinu t računa se sljedećim izrazom:

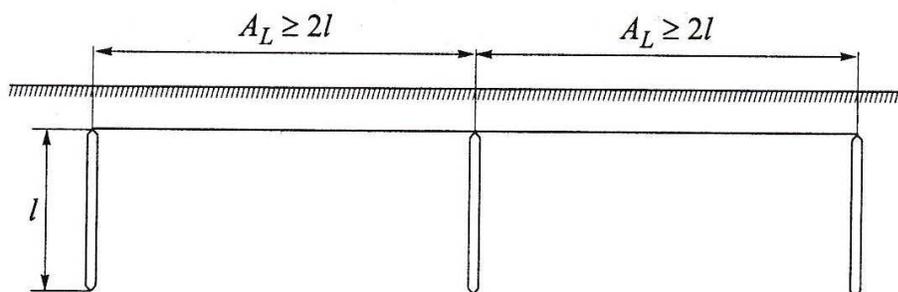
$$R_z = \frac{\rho_z}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4t_h + t}{4t_h - t} \right) \right] \quad (4.1.2.)$$

t_h u prethodnom izrazu predstavlja dubinu na kojoj se nalazi sredina uzemljivača te se računa po sljedećem izrazu:

$$t_h = t + \frac{1}{2} \quad (4.1.3.)$$

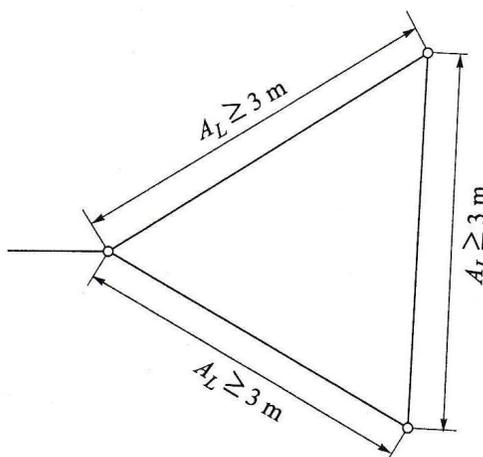
Ako se jednim štapnim uzemljivačem ne može ostvariti dovoljno niski otpor uzemljenja tada se više štapnih uzemljivača može spojiti u mrežu. Štapni uzemljivači u mrežu mogu se položiti na više načina. Jedni od najkorištenijih su:

- Spoj u liniju: pri takvom spoju uzemljivača minimalni razmak između dva uzemljivača mora biti dvostruko veći od duljine samog uzemljivača



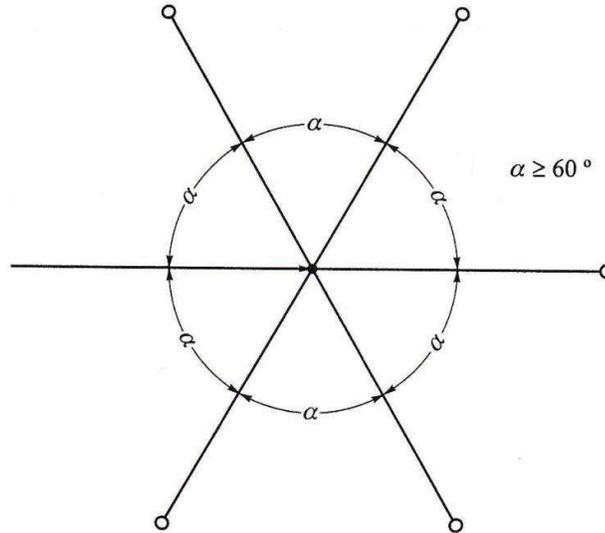
Slika 4.1.3. Štapni uzemljivači spojeni u liniju

- Spoj u trokut: pri takvom spoju uzemljivača minimalni razmak između dva uzemljivača mora iznositi minimalno 3 metra.



Slika 4.1.4. Štapni uzemljivači spojeni u trokut

- Zrakasti spoj: pri takvom spoju uzemljivača maksimalni kut između dva uzemljivača smije iznositi 60° kako ne bi došlo do njihovog međudjelovanja što bi rezultiralo povećanjem otpora uzemljenja.



Slika 4.1.5. Zrakasti spoj štapnih uzemljivača

Što su uzemljivači udaljeniji njihov međusobni utjecaj je manji, a s time i otpor uzemljenja. U slučaju kad je uzemljivač sastavljen od više štapnih uzemljivača otpor uzemljenja R_{zn} računa se po sljedećem izrazu:

$$R_{zn} = \frac{R_z}{\mu n} \quad (4.1.4.)$$

Oznaka n predstavlja broj štapnih uzemljivača, dok oznaka μ predstavlja koeficijent međusobnog utjecaja uzemljivača. Njega se očitava iz tablice i to na sljedeći način. Najprije se odredi omjer razmaka uzemljivača A_L i duljine pojedinog štapnog uzemljivača l . Tada se za taj omjer iz tablice očitava koeficijent μ .

		μ					
Broj štapova		4	6	10	20	40	60
$\frac{A_L}{l}$	2	0,8	0,76	0,7	0,65	0,6	0,55
	3	0,85	0,8	0,76	0,7	0,66	0,64

Tablica 4.1. Koeficijent međusobnog utjecaja štapnih uzemljivača μ

4.2. Trakasti uzemljivači

Za razliku od štapnih uzemljivača trakasti uzemljivači polažu se vodoravno. To su najčešće čelične pocinčane trake po kojima je takva vrsta uzemljivača i dobila ime. Polažu se na dubinu od pola do jednog metra. Polaganje u dubinu manju od pola metra nije preporučljivo zbog smrzavanja tla u zimskim uvjetima, te sušenja tla u ljetnim uvjetima što bi

rezultiralo drastičnim povećanjem otpora uzemljenja. Ako se pak polaže uzemljivač dublje u zemlju povećava se napon dodira. Napon dodira povećava se jer je sloj zemlje između uzemljivača i stopala deblji što rezultira većim padom napona, a time većom razlikom potencijala između tla i uzemljenog elementa. Pronalaženjem kompromisa došlo se do dubine polaganja između pola i jednog metra. Minimalni presjek pocinčanih trakastih uzemljivača iznosi 100 mm^2 , a minimalna debljina iznosi 3,5 mm. U uvjetima gdje je teško postići zadovoljavajući otpor uzemljenja koristi se i bakrena užad te šipke, a njihov proračun identičan je proračunu uzemljenja trakastih uzemljivača.

Otpor trakastog uzemljivača računa se po sljedećem izrazu:

$$R_z = \frac{K_k \rho_z}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{l}{2h} \right) \quad (4.2.1.)$$

Oznaka d označava ekvivalentni promjer te se za njegovu vrijednost uzima polovicu širine trake. Kao što je prije navedeno, zemlja u kojoj je položen uzemljivač zbog vremenskih uvjeta mijenja specifičnu otornost te kako bi uzemljivač zadovoljavao u svim uvjetima potrebno je u izraz uvrstiti korekcijski faktor K_k . Korekcijski faktor K_k ima vrijednosti od 1 do 1,5. Oznaka l predstavlja duljinu uzemljivača.

Iz izraza zaključujemo da sama duljina uzemljivača značajno utječe na otpor uzemljenja za razliku od dubine polaganja.

4.3. Temeljni uzemljivači

Temeljni uzemljivači kako i njihov naziv govori postavljaju se u temelj objekta. To su pocinčane čelične trake dimenzija 25 x 4 mm te 30 x 3,5 mm ili trake od pocinčanog betonskog željeza promjera 10 mm. Postavljaju se na taj način da između njih i zemlje mora biti najmanje 10 cm betona, te da uzemljivač čini zatvorenu krivulju koja se prostire rubovima temelja.

Kako bi se ostvarila još bolja veza između betona i uzemljivača temeljni uzemljivač spaja se sa željeznom armaturom koja se postavlja u temelje objekta. Temeljni uzemljivač i željezna armatura povezuju se spojnicama ili zavarivanjem. Prednost temeljnih uzemljivača u odnosu na uzemljivače koji se polažu u zemlju je ta što uzemljivač u betonu ne korodira pa je njegova trajnost daleko veća, a otpor uzemljenja s vremenom manje raste. Manji otpor uzemljenja postignut je i time što je kontakt između betona i zemlje uvijek vlažan pa time ima i manji otpor, za razliku od uzemljivača položenih u zemlju gdje uslijed suša može doći do toga da je zemlja u koju je položen uzemljivač suha pa on i zemlja nemaju dobar kontakt, uslijed čega dolazi do povećanja otpora uzemljenja. Isto vrijedi i za slučaj uzemljenja gdje jako teško dolazi do zamrzavanja zemlje koja se nalazi ispod temelja. Također, površina dodira uzemljenja i zemlje kod temeljnih uzemljivača daleko je veća u odnosu na onu kod uzemljivača postavljenih u zemlju.

Otpor uzemljenja temeljnih uzemljivača računa se pomoću formule za polukuglaste uzemljivače. Kako temelji objekata nemaju oblik polukugle, već više imaju oblik kvadra taj izračun ima približnu vrijednost.

$$R_z = \frac{\rho_z}{\pi d} \quad (4.3.1.)$$

Promjer d u prethodnom izrazu računa se po sljedećem izrazu:

$$d = 1,57 \cdot \sqrt[3]{V_t} \quad (4.3.2.)$$

Oznaka V_t predstavlja volumen temelja u m^3 .

U posljednje vrijeme ulogu gromobranskih uzemljivača preuzele su armatura temelja ili podzemne metalne instalacije. To rješenje koristi se kako bi se smanjila cijena izgradnje, a dodatne temeljne uzemljivače dodaje se jedino u slučaju kad nedostaje armature temelja ili se armatura temelja ne smije koristiti za uzemljivanje.

4.3.1. Utjecaj starenja na otpor uzemljenja temeljnog uzemljivača

Istraživanjima njemačkog znanstvenika Herberta Fritscha došlo se do ovisnosti otpora uzemljenja s godinama eksploatacije. Te ovisnosti dobile su se pokusima s različitim dimenzijama temelja, te na tlima različitih otpornosti. Dobivene su vrijednosti otpora uzemljenja za period od 14 godina, a rezultate možemo vidjeti u sljedećoj tablici:

Vrijeme eksploatacije, god.	1	1	2	3	4	6	9	10	12	13	14
Površina temeljnog uzemljivača, m^2	672	400	448	462	1325	630	953	674	798	667	445
$\rho_z, \Omega m$	61	61	30	16	28	23	23	21	21	23	23
R_z , izmjeren, Ω	1,4	4,5	1,2	2,9	1	5,1	11,5	6,5	11,2	26,3	9
R_z , izračunat, Ω	1,41	1,83	0,85	0,45	0,46	0,55	0,45	0,49	0,45	0,53	0,65
R_z , izmjeren, Ω	0,99	2,46	1,41	6,49	2,17	9,27	25,7	13,4	25,1	30,5	13,8
R_z , izračunat, Ω											

Tablica 4.3.1. Ovisnost otpora uzemljenja o godinama eksploatacije

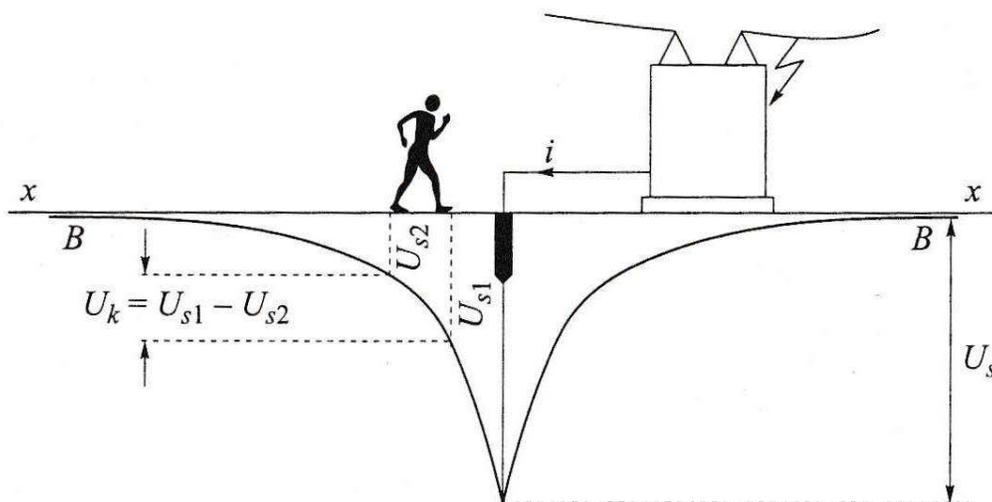
Iz rezultata prikazanih u tablici vidi se da otpor uzemljenja može porasti i više od 30 puta. Tijekom prvih 5 godina otpor polagano raste, dok se nakon toga očitava veći porast otpora uzemljenja. Kako bi otpor uzemljenja cijelo vrijeme eksploatacije uzemljivača bio u dozvoljenim granicama pri dimenzioniranju uzemljivača potrebno je primijeniti faktore korekcije K_{tuz} . Njihova vrijednost ovisi o tome koliko dugo će se objekt odnosno uzemljivač koristiti. Ukoliko će se objekt koristiti manje od 5 godina faktor korekcije imat će vrijednost 2, dok će za vrijeme eksploatacije dulje od 5 godina faktor korekcije iznositi 10. Ako otpor uzemljivača nakon nekoliko godina prijeđe maksimalni dopušteni otpor, temeljnom uzemljivaču dodaju se trakasti odnosno štapni uzemljivači kako bi spustili vrijednost otpora uzemljenja na prihvatljivu vrijednost.

Računanje otpora uzemljenja nakon određenog broja godina izvodi se prema sljedećem izrazu:

$$R_z = K_{tuz} \frac{\rho_z}{\pi d} \quad (4.3.1.1.)$$

5. MATEMATIČKI MODEL RASPODJELE POTENCIJALA OKO UZEMLJIVAČA

Pri prolasku struje od uzemljivača kroz zemlju javlja se otpor rasprostiranja. Taj otpor opada s udaljavanjem od uzemljivača. To se može predočiti na taj način da se zamisli stožac. Stožac predstavlja „vodič“ kroz koji teče struja rasprostiranja. Struja iz uzemljivača kreće iz vrha stošca. Na tom mjestu presjek, „vodiča“ je najmanji te je njegov otpor najveći. Kako se udaljavamo od uzemljivača presjek stošca postaje veći, a s time i otpor rasprostiranja postaje manji. U trenutku kad kroz uzemljivač iz bilo kojeg razloga protekne struja, proteći će kroz otpor rasprostiranja. Kako je otpor rasprostiranja veći u tlu bliže uzemljivaču, tamo će i pad napona biti veći. Udaljavanjem od uzemljivača otpor rasprostiranja je manji pa je i pad napona manji, te zbog toga krivulja koja prikazuje odnos potencijala zemlje i udaljenosti od uzemljivača ima eksponencijalni oblik.



Slika 5.1. Prikaz raspodjele potencijala oko uzemljivača i napon koraka

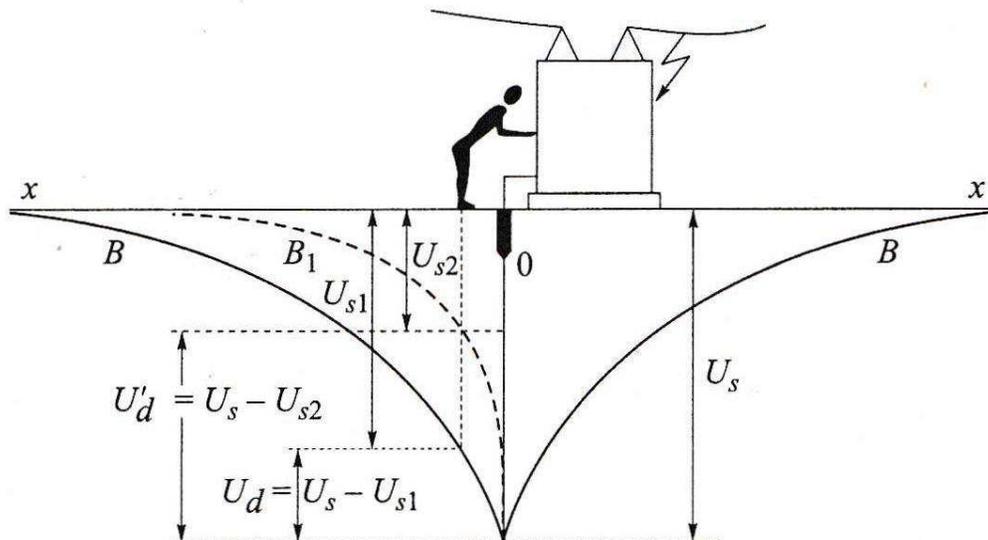
Na prethodnoj slici vidi se kako potencijal zemlje opada kako se udaljavamo od uzemljivača. Zamisli li se čovjek koji hoda prema uzemljivaču i u tom trenutku kroz uzemljivač iz bilo kojeg razloga potekne struja, na tlu oko uzemljivača uspostavi se raspodjela potencijala. Kako je prije rečeno potencijal zemlje ovisi o udaljenosti od uzemljivača. Kako čovjek hoda prema uzemljivaču, jedna noga mu je bliže uzemljivaču od druge. Razmak između njegovih stopala uzima se kao udaljenost od jednog metra te je na njemu tada napon jednak razlici potencijala njegovog lijevog U_{s1} i desnog U_{s2} (ili obrnuto) stopala.

$$U_k = U_{s1} - U_{s2} \quad (5.1.)$$

Rečeno je već da su padovi napona na zemlji veći što smo bliže uzemljivaču, pa će tako i napon koraka biti veći što se čovjek nalazi bliže uzemljivaču. Dakle, može se zaključiti da napon koraka ovisi o struji uzemljenja, otporu uzemljenja te udaljenosti čovjeka od uzemljivača.

Napon dodira javlja se u trenutku kada čovjek dodiruje objekt kroz koji u tom trenutku teče struja uzemljenja. Napon koji u tom trenutku na njemu vlada jednak je razlici potencijala objekta kojeg je dotaknuo rukom i potencijala tla na kojem stoji.

$$U_d = U_s - U_{s1} \quad (5.2.)$$



Slika 5.2. Prikaz raspodjele potencijala oko uzemljivača i dodirni napon

Potencijal tla U_{s1} u tom slučaju određuje se prema krivulji raspodjele potencijala, a udaljenost od objekta iznosi jedan metar. Napon uzemljivača U_s računa se po izrazu:

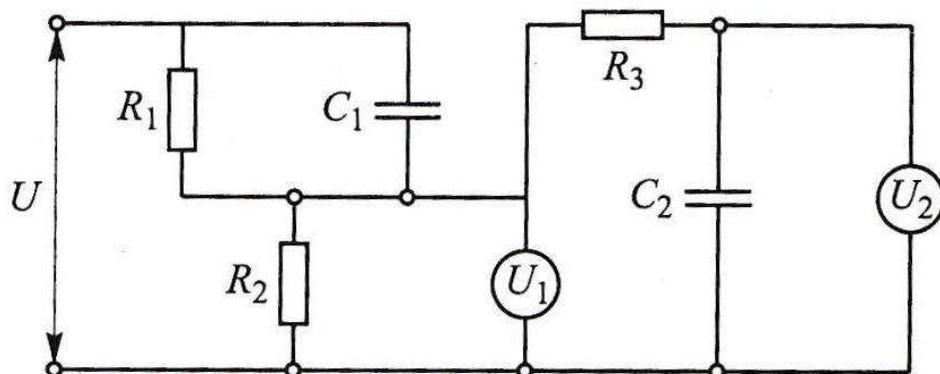
$$U_s = I_z \cdot R_z - V_o \quad (5.3.)$$

Potencijal V_o predstavlja potencijal zanemarive vrijednosti. To je u biti potencijal neke točke tla koji je toliko udaljen da uzemljivač ne utječe na njen potencijal te se uzima da je vrijednost ovog potencijala 5% od potencijala uzemljivača.

5.1. Utjecaj potencijala površine zemlje na iznos struje kroz čovjeka

Kao bi se kvalitetno proračunalo uzemljivački sustav s ciljem zadovoljavanja kriterija zaštita osoba od električnog udara i relevantnih normi važno je poznavati električna svojstva ljudskog tijela, odnosno njegovu impedanciju. Podaci o električnim svojstvima ljudskog tijela prikupljaju se još od izuma električne struje. Najviše podataka prikupljeno je testiranjem na životinjama. Manji dio prikupio se na ljudskim leševima te analizom nesretnih slučajeva. Podaci su prikupljeni s ciljem da se napravi nadomjesna shema ljudskog tijela koja će vjerno prikazati električna svojstva ljudskog tijela kada se ono nalazi pod utjecajem napona. S tim podacima znalo bi se koliki smiju biti napon koraka i dodirni napon u postrojenju, a da ni u kojem slučaju zdravlje ili život ljudi u tom postrojenju ne budu ugroženi. Problem je u tome što impedancija ljudskog tijela nije konstantna već se mijenja ovisno o naponu na ljudskom tijelu, vremenu protjecanja struje, osjetljivosti osobe, starosti, spolu i zdravstvenom stanju. Impedancija tijela najvećim djelom sastoji se od otpora kože.

Otpor kože pri malim naponima i frekvencijama je velik te je takav sposoban onemogućiti struji da proteče kroz tijelo. No povećanjem napona i frekvencije otpor kože se značajno smanjuje te već kod napona većih od 240 V dolazi do proboja te posljedica na koži.



Slika 5.1.1. Nadomjesna električna shema čovjeka

Impedancije R_1 i C_1 predstavljaju ulaznu, R_2 i C_2 izlaznu, a R_3 predstavlja unutarnju impedanciju čovjeka.

Suha koža ima otpor od 100 do 300 $\text{k}\Omega/\text{cm}^2$, no kad je mokra taj otpor može biti i do 100 puta manji.

Električna struja ovisno o njezinoj jačini, obliku, frekvenciji, putu kroz tijelo te vremenu protjecanja kroz tijelo na čovjeka može djelovati na sljedeće načine: osjetilno podražajno, grčanjem mišića, razaranjem te paljenjem tkiva, može ga gušiti, izazvati posljedice na živčanom te respiratornom sustavu te u najgorem slučaju može izazvati ventrikularnu fibrilaciju srca.

Prema djelovanju na organizam, struje dijelimo na: osjetilnu, struju reagiranja te struju ventrikularne fibrilacije. Osjetilnu struju definiramo kao najmanju struju koju čovjek može osjetiti te ona za muškarce iznosi 1,1 mA a za žene 0,7 mA. Struja reagiranja je najmanja struja koja izaziva nehodičnu reakciju. Struja ventrikularne fibrilacije dovodi do zastajivanja srca. U tom slučaju srce se uslijed frekvencije struje koja na njega djeluje zaustavi i samo se ne može opet pokrenuti.

Za izračun struje koja teče kroz ljudsko tijelo potrebno je poznavati nadomjesne otpore te napon pod kojim se nalazi ljudsko tijelo. Napon može biti napon koraka ili napon dodira. Pri skraćenom izračunu struje kroz čovjeka I_c nadomjesne otpore strujnog kruga sačinjavaju otpor rasprostiranja R_{rs} i otpor tijela R_c , a ostale prijelazne otpore zanemarujemo. Otpor rasprostiranja R_{rs} predstavlja otpor između ljudskog stopala i zemlje na kojoj čovjek stoji, te ga računamo po sljedećem izrazu:

$$R_{rs} = \frac{\rho_z}{4b} \quad (5.1.1.)$$

ρ_z predstavlja otpornost tla, a b predstavlja polumjer pločastog uzemljivača kojime se nadomješta površina ljudskog stopala AS (m^2) koje ima površinu 200 cm^2 tj. polumjer od 8 cm.

Pri koraku, pošto struja ulazi kroz jednu nogu, a izlazi kroz drugu, ukupni otpor rasprostiranja jednak je zbroju rasprostiranja obje noge te se dobiva izraz:

$$R_{rsk} = 2R_{rs} \quad (5.1.2.)$$

Pri dodiru, uzima se polovica vrijednosti otpora rasprostiranja pošto struja prolazi kroz obje noge u istom smjeru tj. izlazi kroz obje noge iz čega zaključujemo da su otpori rasprostiranja u paraleli te za takav slučaj vrijedi sljedeći izraz:

$$R_{rsd} = \frac{R_{rs}}{2} \quad (5.1.3.)$$

Iz prethodnih izraza može se vidjeti kako je kod napona dodira otpor rasprostiranja 4 puta manji nego kod koraka. Pridodamo li tome da je otpor tijela $R_{\check{c}}$ između ruke i stopala otprilike $1\text{ k}\Omega$, a otpor između stopala otprilike $2\text{ k}\Omega$ možemo zaključiti kako će za slučaj kada bi dodirni i napon koraka bili isti kroz čovjeka proteći višestruko veća struja. Struju kroz ljudsko tijelo računamo prema izrazu:

$$I_{\check{c}k(d)} = \frac{U_{k(d)}}{R_{rsk(d)} + R_{\check{c}k(d)}} \quad (5.1.4.)$$

Kod točnijeg izračuna struje koja kroz ljudsko tijelo prolazi za vrijeme električnog udara u ukupni otpor ljudskog tijela dodaje se uzajamni otpor između stopala R_{ms} . Taj otpor ovisi o otpornosti tla ρ_z i udaljenosti između stopala d_{ms} (m), te se računa prema sljedećem izrazu:

$$R_{ms} = \frac{\rho_z}{2\pi d_{ms}} \quad (5.1.5.)$$

U slučaju koraka, ukupni se otpor računa po izrazu:

$$R_{uk} = R_{\check{c}} + 2(R_{rs} - R_{ms}) \quad (5.1.6.)$$

U slučaju dodira, ukupni se otpor računa po izrazu:

$$R_{ud} = R_{\check{c}} + 0,5(R_{rs} - R_{ms}) \quad (5.1.7.)$$

Struja kroz tijelo računa se prema izrazu:

$$I_{\check{c}k(d)} = \frac{U_k}{R_{uk(d)}} \quad (5.1.8.)$$

Iz prethodnih izraza vidi se kako pri korištenju točnijeg izraza odnosno, dodavanjem otpora između stopala, ukupni otpor tijela postaje još manji, i to posebno kod dodira jer se tada uzima manji razmak između stopala.

5.2. Smanjenje struje kroz tijelo nasipavanjem tla šljunkom

U elektroenergetskim postrojenjima vanjske izvedbe, kako bi se povećala sigurnost ljudi koji se kreću po postrojenju, često se tlo posipava šljunkom. Poznato je da šljunak ima veću otpornost od zemlje. Ako se tlo posipa slojem šljunka povećat će se otpor između uzemljivača i stopala tj. otpor rasprostiranja. Taj sloj šljunka bude debljine 5 do 15 cm te se postavlja na područje iznad samog uzemljivača te na mjestima gdje bi napon koraka i napon dodira mogao poprimiti za čovjeka opasne vrijednosti. On neće smanjiti napon koraka i napon dodira ali će povećanjem ukupnog otpora smanjiti struju koja bi u slučaju nastanka napona (koraka ili dodira) protekla kroz čovjeka.

Za slučaj kad čovjek stoji na tlu koje je nasipano šljunkom, struju kroz tijelo računamo na sljedeći način:

Najprije se izračuna faktor otpornosti tla k . Ovaj faktor ovisan je o otpornosti sloja šljunka ρ_s i o otpornosti sloja zemlje ρ_z , a računa se sljedećim izrazom:

$$k = \frac{\rho_z - \rho_s}{\rho_z + \rho_s} \quad (5.2.1.)$$

Nakon toga izračunamo faktore X_1 i X_2 po sljedećim izrazima:

$$X_1 = \frac{h_s}{b} \quad (5.2.2.)$$

$$X_2 = \frac{h_s}{d_{ms}} \quad (5.2.3.)$$

h_s predstavlja debljinu sloja šljunka u metrima, a d_{ms} predstavlja razmak stopala u metrima.

Uzajamni otpor između stopala računamo po izrazu:

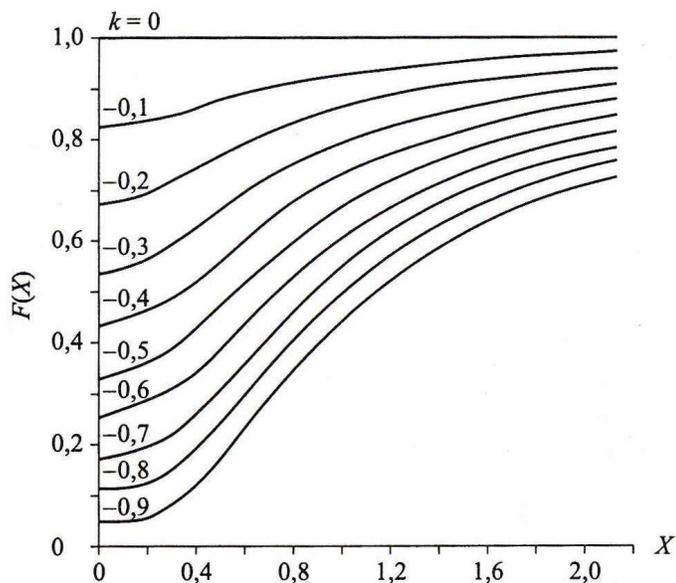
$$R_{ms} = \frac{\rho_s}{2\pi d_{ms}} F(X_2) \quad (5.2.4.)$$

Pri računanju uzajamnog otpora između stopala R_{ms} moramo obratiti pažnju na to da nam udaljenost između stopala nije ista kod napona koraka i napona dodira.

Otpor stopala računa se sljedećim izrazom:

$$R_{rs} = \frac{\rho_s}{4b} F(X_1) \quad (5.2.5.)$$

Vrijednosti funkcija $F(X_1)$ i $F(X_2)$ očitavaju se iz dijagrama gdje za svaki faktor otpornosti tla k , te faktora X_i možemo očitati vrijednost $F(X_i)$.



Slika 5.3.1. Vrijednost $F(X)$ u ovisnosti o faktoru X za određene faktore k

Struja kroz ljudsko tijelo pri naponu koraka računa se po sljedećem izrazu:

$$I_{\check{c}k} = \frac{U_k}{R_{\check{c}} + 2(R_{rs} - R_{ms})} \quad (5.2.6.)$$

Struja kroz ljudsko tijelo pri dodirnom naponu računa se po sljedećem izrazu:

$$I_{\check{c}d} = \frac{U_k}{R_{\check{c}} + 0,5(R_{rs} - R_{ms})} \quad (5.2.7.)$$

6. PROJEKTIRANJE UZEMLJIVAČA TS 10(20)/0,4 KV

Cilj pri projektiranju uzemljivača odrediti je broj, vrstu te prostorni razmještaj elemenata od kojih se uzemljivač sastoji. Kako se pri proračunu nailazi na veliki broj aktivnih i pasivnih dijelova uzemljivača koji se pritom nalaze u homogenom ili pak slojevitom tlu proračun uzemljivača postaje vrlo složen. Da bi taj proračun uopće bilo i moguće izvesti uobičajeni postupak ograničava se na jednostavnije geometrijske oblike. Za izvršenje tih proračuna koristi se računalna oprema.

6.1. Matematički model

Potencijal koji stvara struja uzemljenja I_z jednog pravocrtnog elementa uzemljivača, koji se nalazi u tlu specifične otpornosti ρ_z , duljine L te na udaljenosti r_d računa se sljedećim izrazom:

$$V = \frac{I_z \rho_z}{4\pi L} \int_0^L \frac{dl}{r_d} \quad (6.1.1.)$$

U slučaju kad se uzemljivač sastoji od dva pravocrtna elementa, potencijal jednog, ukoliko kroz drugi teče struja I_z , računa se sljedećim izrazom:

$$V = \frac{I_z \rho_z}{4\pi L} \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \frac{dl_1 dl_2}{r_d} \quad (6.1.2.)$$

Prethodni izraz vrijedi za okomito i paralelno postavljene vodiče. Rješenje prethodnog izraza predstavlja osnovu za proračun potencijala bilo kakve izvedbe uzemljivača tj. rasporeda elemenata uzemljivača.

Ukoliko se uzemljivač sastoji od n pravocrtnih elemenata struja uzemljivača I_{zi} koja teče kroz element „i“, na elementu „j“ prouzročit će porast potencijala V_j koji se računa sljedećim izrazom:

$$V_j = I_{zi} \cdot K_{ij} \quad (6.1.3.)$$

Koeficijent potencijala K_{ij} ovisi o otpornosti zemlje ρ_z , o duljinama elemenata uzemljivača L_1 i L_2 , te o njihovom međusobnom razmaku.

Potencijal elementa „j“ računa se kao zbroj potencijala n elemenata uključujući vlastiti potencijal.

$$V_j = I_{z1} \cdot K_{1j} + I_{z2} \cdot K_{2j} + I_{z3} \cdot K_{3j} + \dots + I_{zi} \cdot K_{ij} + \dots + I_{zn} \cdot K_{nj} \quad (6.1.4.)$$

Formiranjem sustava n linearnih jednažbi koje se nakon toga zapisuju u matričnom obliku dobiva se sljedeća matrica:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{z1} \\ I_{z2} \\ I_{z3} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{zn} \end{bmatrix}$$

Slika 6.1.1. Matrica za izračunavanje potencijala V_j

Pretpostavlja se da je uzemljivač od idealnog vodiča, odnosno da na njemu nema padova napona tj. da su svi elementi uzemljivača na istom potencijalu. Taj potencijal jednak je naponu uzemljivača U_0 .

$$V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n = U_0 \quad (6.1.5.)$$

Kako je zbroj svih struja koje teku kroz elemente uzemljivača jednak ukupnoj struji uzemljivača I_z , rješenje sustava jednažbi proizlazi iz proračuna struja kroz pojedine elemente. Izraz za struju kroz pojedine elemente, u kojoj se u brojniku nalazi subdeterminanta, a u nazivniku determinanta sustava:

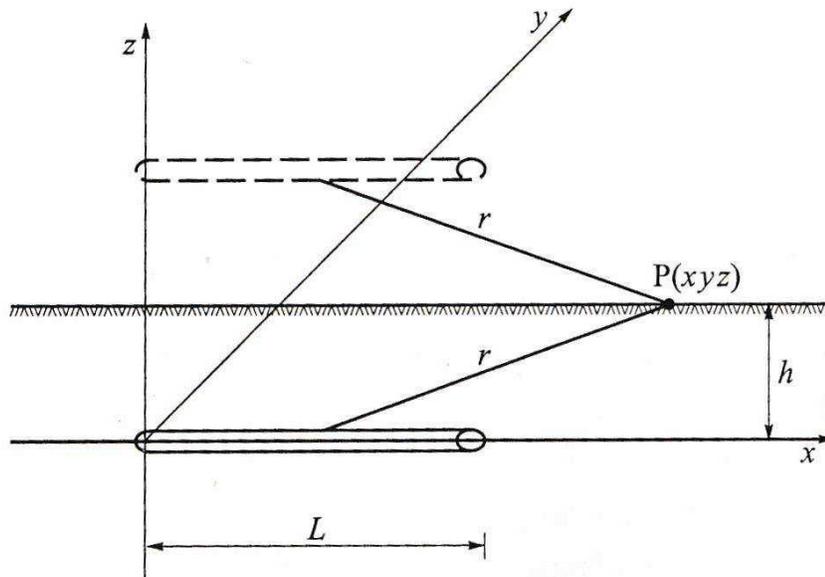
$$I_{zj} = \frac{D_{nj}}{D_r} \quad (6.1.6.)$$

Nakon što se izračunaju struje kroz pojedine elemente može se izračunati otpor uzemljivača R_z i to prema sljedećem izrazu:

$$R_z = \frac{V}{\sum_{i=1}^n I_i} = \frac{U_0}{I_z} \quad (6.1.7.)$$

Potencijal na površini V računa se zbrajanjem koeficijenata potencijala svih elemenata i njima pripadajućih zrcalnih slika. Potencijal na površini zemlje u točki P(x,y) računa se sljedećim izrazom:

$$V = \frac{I_z \rho_z}{2\pi L} \int_0^{L_1} \frac{dx}{\sqrt{(x-L)^2 - Y^2 + h^2}} = \frac{I_z \rho_z}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{h^2 + Y^2 + X^2} + X}{\sqrt{(X-L_1)^2 + Y^2 + h^2} + X - L_1} \quad (6.1.8.)$$



Slika 6.1.2. Raspored elemenata i međusobne udaljenosti kod izračunavanja potencila točke P

U slučaju da uzemljivač predstavlja okomito zabijena sonda potencijal elementa uzemljivača računa se sljedećim izrazom:

$$V = \frac{I_z \rho_z}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{X^2 + (Y+L_1)^2} + Y+L_1}{\sqrt{X^2 + (Y-L_1)^2} + Y-L_1} \quad (6.1.9.)$$

Ukupni potencijal V_p uzemljivača u točki P(x,y) računa se kao zbroj potencijala svih elemenata (sonda) uzemljivača.

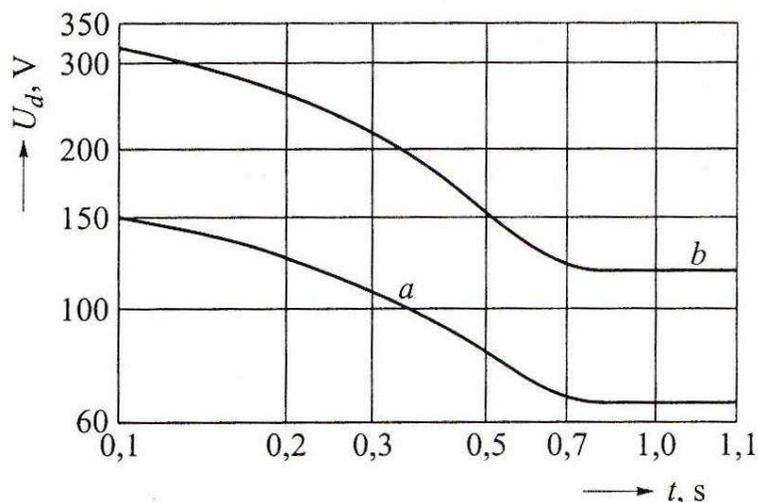
$$V_p = \sum_{i=1}^n V_i \quad (6.1.10.)$$

6.2. Postupak projektiranja uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV

U slučaju kada je neutralna točka uzemljena preko otpornika, uzemljenje se obično izvodi kao združeno uzemljenje kako bi otpor uzemljenja bio što manji. Uvjet koji mora zadovoljiti združeno uzemljenje kako bi se moglo primijeniti je:

$$R_{zdr} \leq \frac{U_d}{r_f I_{KZ}} \quad (6.2.1.)$$

Redukcijski faktor r_f je omjer struje koja teče kroz plašt ili uzemljivač voda i cjelokupne struje zemljospoja I_z , struja I_{KZ} je struja jednopolnog kratkog spoja te njenu vrijednost otpornikom nastojimo ograničiti na vrijednost od 150 ili 300A. Napon dodira koji se smije pojaviti pri protjecanju struje zemljospoja ovisi o vremenu trajanja kvara te se vrijednost koju on smije postići navodi u sljedećem grafu:



Slika 6.2.1. Vrijednost dozvoljenog napona dodira u odnosu o trajanju kvara

Na grafu su krivulje „a“ i „b“. Krivulja „a“ predstavlja vrijednost koju napon dodira smije imati za određeno trajanje kvara ukoliko je uzemljenje na niskonaponskoj mreži izvedeno nulovanjem ili je uzemljenje izvedeno zajedničkim uzemljenjem. Krivulja „b“ odnosi se na ona postrojenja gdje je primijenjen neki drugi sustav zaštite i ne postoji opasnost da preko nultog vodiča dođe do opasnog potencijala i dodirnog napona na elementima niskonaponske mreže i kućištima aparata.

Ukoliko uvjet za združeno uzemljenje nije ispunjen tada se radno uzemljenje mora izvesti odvojeno.

Uvjet koji tada zaštitno uzemljenje mora ispuniti glasi:

$$R_{zz} \leq \frac{1200}{r_f \cdot I_{KZ}} \quad (6.2.2.)$$

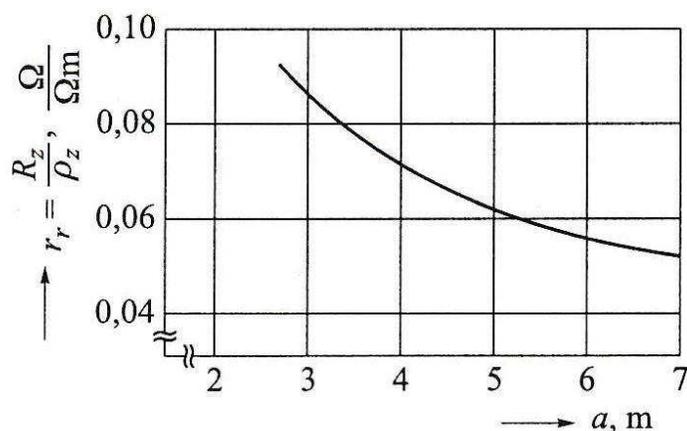
Vrijednost napona od 1200V je vrijednost koju oprema trafostanice mora izdržati iako je dimenzionirana za napon od 2000V. Redukcijski faktor ovisi o vrsti priključka transformatorske stanice odnosno da li pojni vod sadržava zaštitno uže ili ne, ili je možda kabelaške izvedbe. Ukoliko ga sadržava, redukcijski faktor je nešto niži od 1, a ukoliko ne, redukcijski faktor iznosi 1, a u kabelaškoj izvedbi iznosi znatno manje od 1. Redukcijski faktor može se smanjiti spajanjem plašta kabela na uzemljenje transformatorske stanice, ukopavanjem posebnih trakastih uzemljivača uz kabelaške vodove koji se tada spajaju na uzemljenje transformatorske stanice ili spajanjem uzemljenja objekta na sustav združenog uzemljenja. Smanjivanjem redukcijskog faktora povećava se vrijednost od koje otpor zaštitnog uzemljenja mora biti manji te time omogućava uštede na izvedbi uzemljivača. Otpor R_{zz} mjeri se u trafostanici i to bez odvajanja zaštitnog uzemljivača od drugih uzemljivača, također ukupni otpor radnog uzemljenja u niskonaponskoj mreži te instalacijama potrošača mora zadovoljiti sve uvjete zaštite od visokog napona dodira.

U slučaju korištenja združenog uzemljenja otpor uzemljenja R_{zdr} računa se sljedećim izrazom:

$$\frac{1}{R_{zdr}} = \frac{1}{R_{TS}} + \frac{n}{R_{uze}} + \frac{m}{R_{SN}} + \frac{k}{R_{DV}} \quad (6.2.3.)$$

Otpor R_{TS} predstavlja otpor uzemljivača transformatorske stanice, otpor R_{uze} predstavlja otpor bakrene užadi koja se obavezno postavlja uz kabele, a n predstavlja broj bakrenih užadi. Otpor R_{SN} je otpor bakrenih ekrana kabela srednjeg napona koji se galvanski povezuju s uzemljivačem transformacijske stanice, a m predstavlja njihov broj. Otpor bakrenih ekrana visokonaponskih kabela ili zaštitne užadi visokonaponskih vodova predstavlja otpor R_{DV} , a oznaka k predstavlja njihov broj.

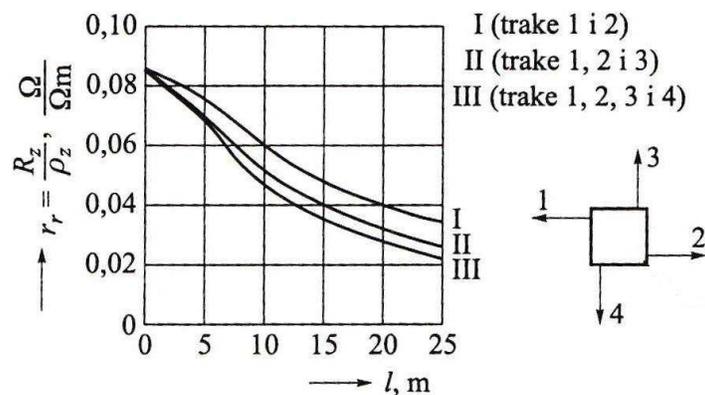
Za transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV, koje se nalaze u vlastitom objektu, uzemljivač se mora sastojati barem od temeljnog uzemljivača te vanjskog prstena koji se ukopava na 1 metar od objekta te spaja na temeljni uzemljivač. Vrijednost reduksijskog faktora r_r takvog uzemljivača očitava se iz sljedećeg grafa:



Slika 6.2.2. Ovisnost reduksijskog faktora r_r o duljini stranice a

Na osi x nalazi se veličina „ a “ koja se izračunava formulom $a = \sqrt{A}$ gde A predstavlja tlocrtnu površinu uzemljivača zgrade, na y osi nalazi se omjer R_z / ρ_z , vrijednost reduksijskog faktora r_r .

Za dodatno smanjenje otpora koriste se dodatne trake koje se spajaju na vanjski prsten. Otpor uzemljivača tada ovisi i o broju traka. U tom slučaju vrijednosti reduksijskog faktora r_r očitavamo iz sljedećeg grafa:



Slika 6.2.3. Ovisnost redukcijskog faktora r_r o broju i duljini traka

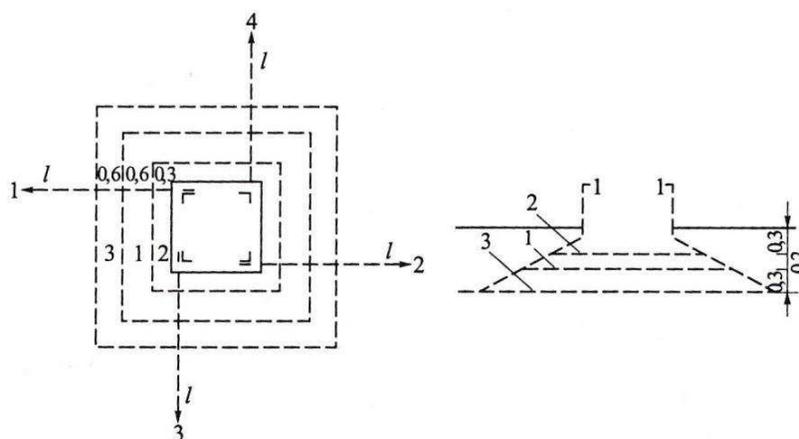
Na x osi nalaze se duljine traka. U ovom grafu nalaze se vrijednosti za vrijednost $a=3$ odnosno za uzemljivač objekta površine 9 m^2 .

Kod transformatorskih stanica stupne izvedbe uzemljivač je sastavljen od najmanje jednog prstena koji se prostire oko stupa na udaljenosti od 1 m. Otpor uzemljenja takvog uzemljivača približno se određuje izrazom:

$$R_{ST} = 0,13 \cdot \rho_z \quad (6.2.4.)$$

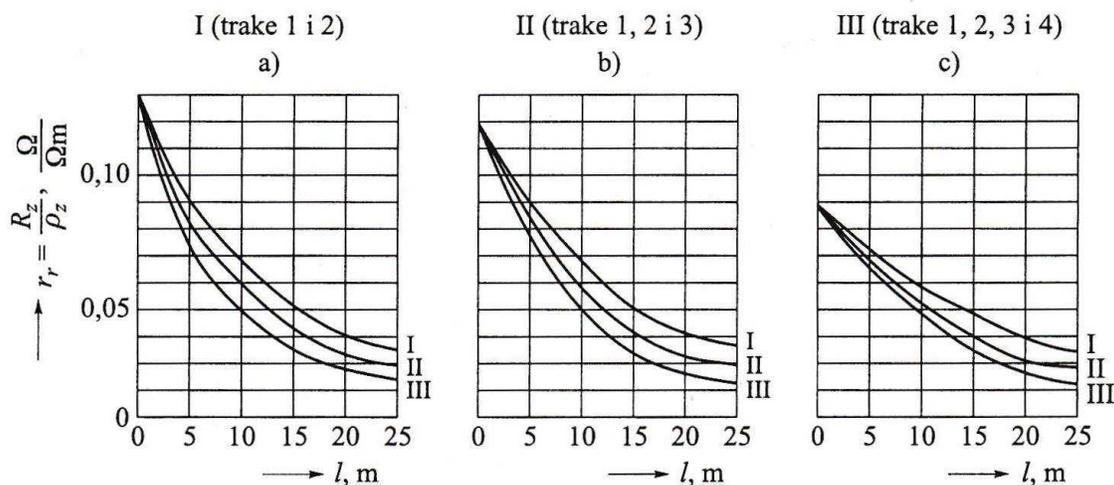
Otpor uzemljenja dodatno se može smanjiti ako se upotrijebi više prstena koji su galvanski povezani te dodavanjem traka.

Na sljedećoj slici prikazan je položaj polaganja trakastih te položaj i dubina polaganja prstenastih elemenata uzemljivača. Svaki prstenasti i trakasti uzemljivač označen je svojim brojem.



Slika 6.2.4. Položaj i dubina polaganja trakastih i prstenastih uzemljivača

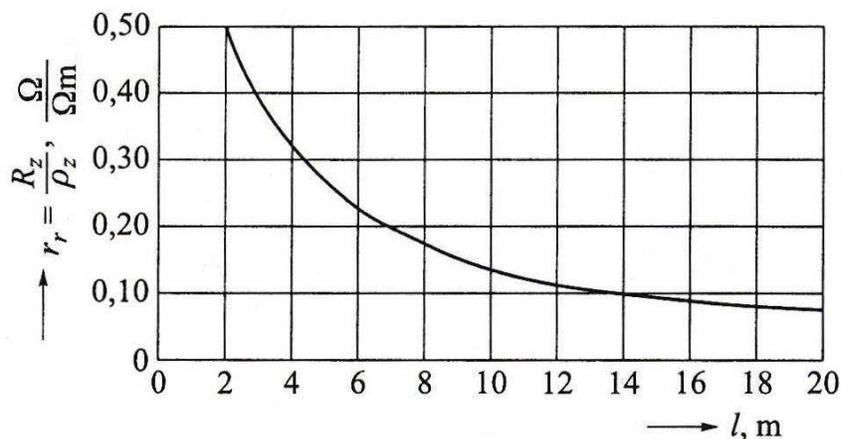
Na sljedećim grafovima prikazane su vrijednosti redukcijskog faktora r_r za različit broj prstenastih i trakastih uzemljivača.



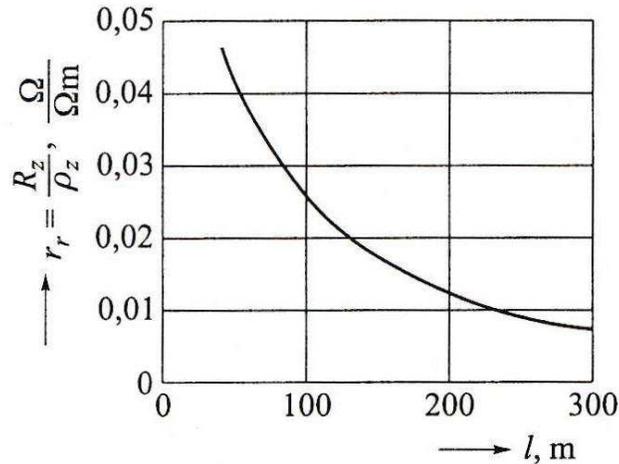
Slika 6.2.5. Vrijednosti redukcijskog faktora r_r za različit broj prstenastih i trakastih uzemljivača

Prvi graf prikazuje vrijednosti za uzemljivač koji se sastoji od jednog, dva i tri prstenastih uzemljivača te dva nasuprotno postavljena trakasta uzemljivača. Drugi graf prikazuje vrijednosti za uzemljivač koji se sastoji od jednog, dva ili tri prstenasta uzemljivača te tri trakasta uzemljivača. Treći graf prikazuje vrijednosti za uzemljivač koji se sastoji od jednog, dva, ili tri prstenasta te četiri trakasta uzemljivača.

Vrijednost redukcijskog faktora kod trakastog uzemljivača postavljenog na dubinu od pola metra koji se koristi za uzemljavanje neutralnog vodiča prikazana je na sljedećem grafu:

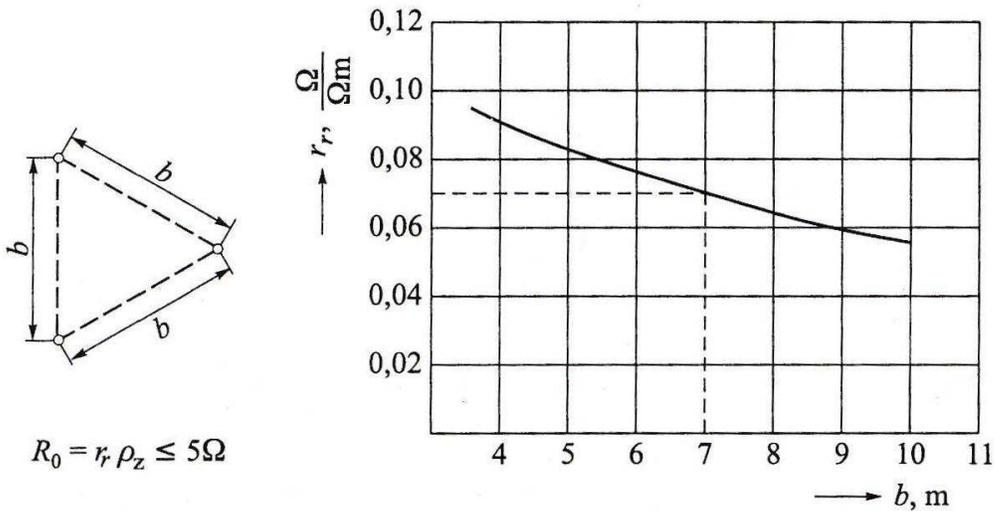


Slika 6.2.6. Vrijednost redukcijskog faktora za različite duljine kratkih trakastih uzemljivača



Slika 6.2.7. Vrijednost redukcijskog faktora za različite duljine dugačkih trakastih uzemljivača

Radni uzemljivač kod uzemljivača s odvojenim radnim i zaštitnim uzemljivačem izvodi se kao trokutasti uzemljivač. Takav uzemljivač izvodi se sa trakastim uzemljivačima položenim u zemlju u obliku trokuta te štapnim uzemljivačima koji se nalaze na vrhovima trokuta. Redukcijski faktor takvog uzemljivača očitava se iz sljedećeg grafa:



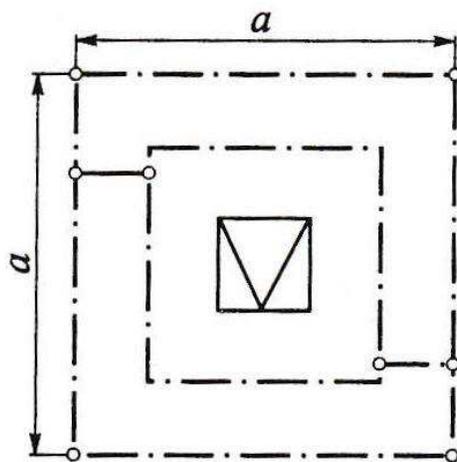
$$R_0 = r_r \rho_z \leq 5 \Omega$$

Slika 6.2.8. Vrijednost redukcijskog faktora r_r za različite duljine trakastih uzemljivača

Oznakom b označena je duljina jednog trakastog uzemljivača. Za svaku duljinu trake uzemljivača može se očitati vrijednost redukcijskog faktora r_r . Otpor radnog uzemljenja dobiva se iz izraza:

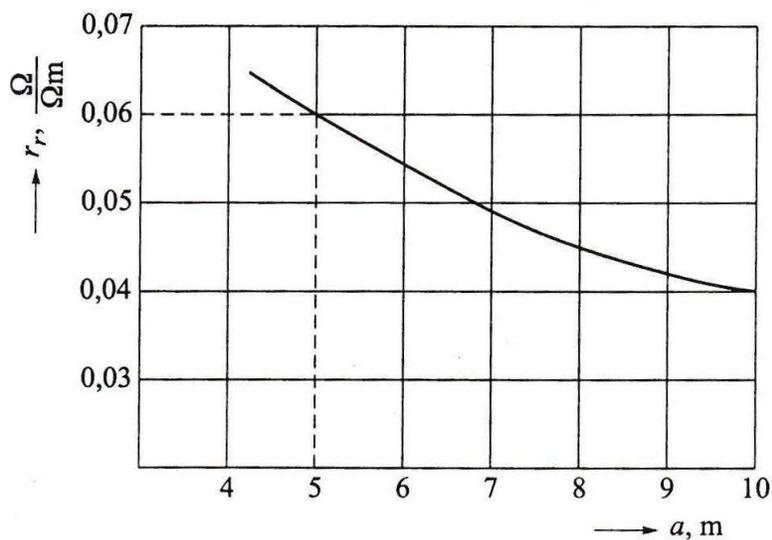
$$R_0 = r_r \cdot \rho_z \tag{6.2.5.}$$

Zaštitni uzemljivač kod uzemljivača s odvojenim radnim i zaštitnim uzemljivačem izvodi se kao prstenasti uzemljivač, sastoji se od dva kvadrata sačinjenih od trakastih uzemljivača. Ti kvadrati međusobno su galvanski povezani. Kod većeg kvadrata u svim vrhovima postavljeni su štapni uzemljivači, dok kod manjeg se oni nalaze u dva nasuprotna vrha. Štapni uzemljivači također se nalaze na mjestima gdje se dva kvadratna uzemljivača galvanski spajaju.



Slika 6.2.9. Zaštitni uzemljivač

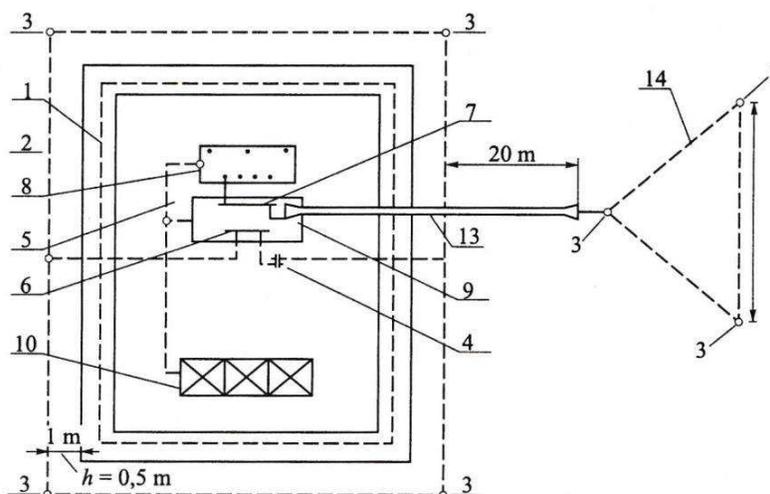
Redukcijski faktor r_r takvog uzemljenja može se očitati iz sljedećeg grafa:



Slika 6.2.10. Vrijednost redukcijskog faktora za različite duljine stranica a

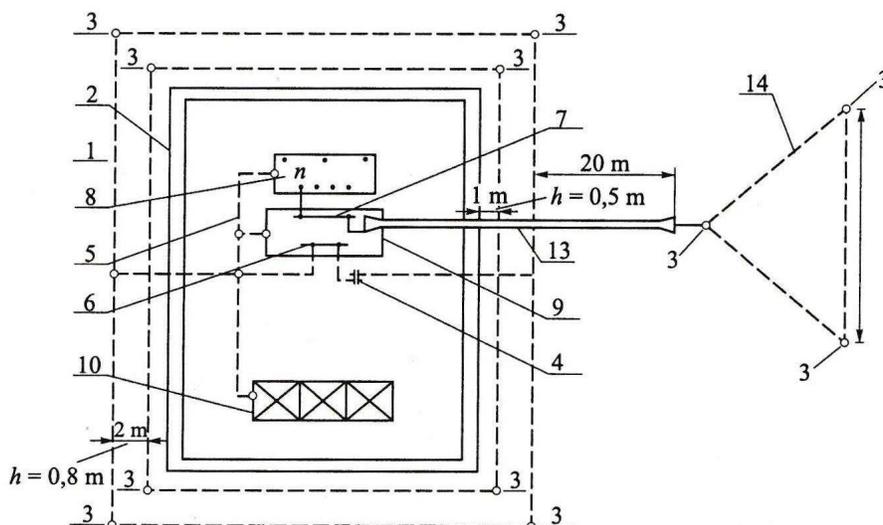
6.3. Izvedbe uzemljivača sa združenim ili odvojenim radnim i zaštitnim uzemljivačima

Izvedba odvojenog zaštitnog i radnog uzemljivača transformatorske stanice kad trafostanica ima ugrađen temeljni uzemljivač:



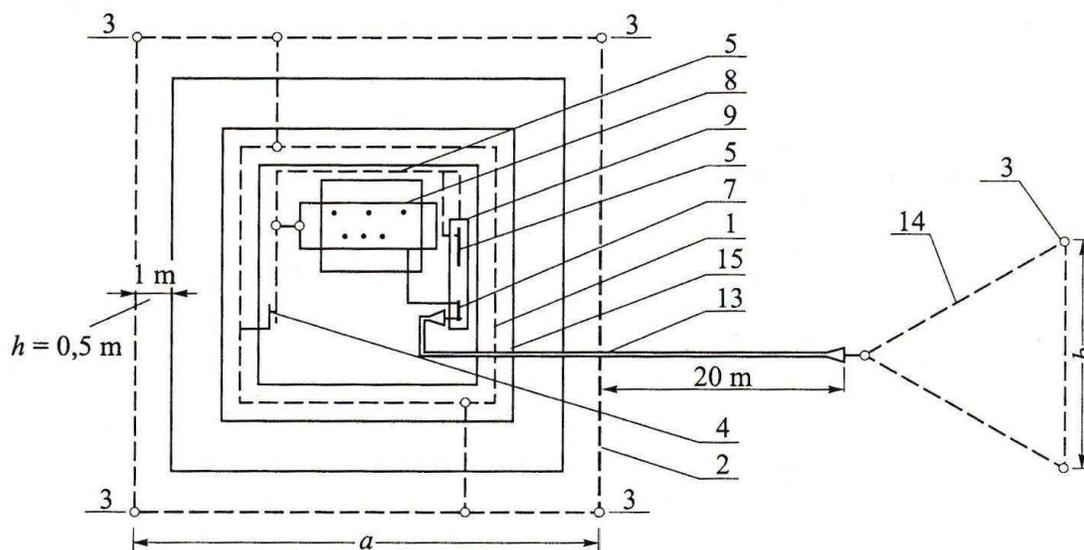
Slika 6.3.1. Izvedba uzemljivača TS slobodnostojeće izvedbe sa odvojenim radnim i zaštitnim uzemljenjem te ugrađenim temeljnim uzemljivačem

Izvedba odvojenog zaštitnog i radnog uzemljivača transformatorske stanice kad trafostanica bez ugrađenog temeljnog uzemljivača:



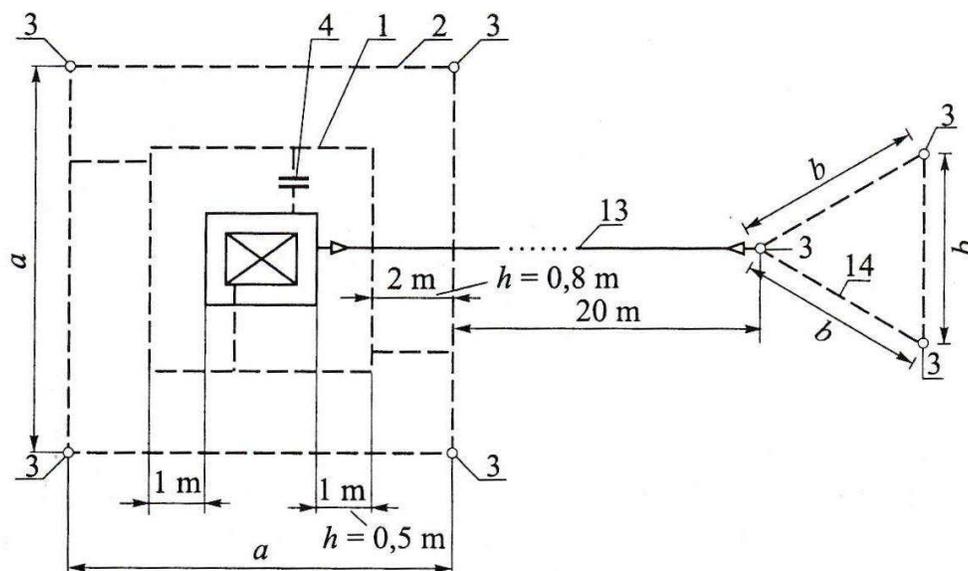
Slika 6.3.2. Izvedba uzemljivača slobodnostojeće TS sa odvojenim radnim i zaštitnim uzemljenjem bez ugrađenog temeljnog uzemljivača

Transformatorska stanica tornjić izvedbe s odvojenim radnim i zaštitnim uzemljivačima:



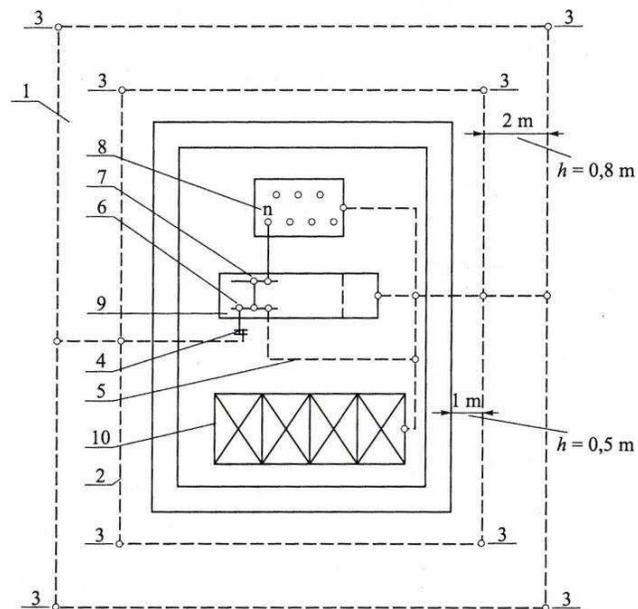
Slika 6.3.3. Izvedba uzemljivača TS tipa tornjić sa odvojenim radnim i zaštitnim uzemljenjem

Transformatorska stanica stupne izvedbe s odvojenim radnim i zaštitnim uzemljivačima:



Slika 6.3.4. Izvedba uzemljivača TS stupne izvedbe sa odvojenim radnim i zaštitnim uzemljenjem

Transformatorska stanica sa združenim uzemljenjem izvedenu kao slobodnostojeći objekt. Uzemljivač se sastoji od dva prstenasta uzemljivača te štapnim uzemljivačima na kutovima.



Slika 6.3.5. Izvedba uzemljivača TS slobodnostojeće izvedbe sa združenim uzemljenjem

Oznake elemenata na prethodnim slikama.

1. Temeljni uzemljivač
2. Vanjska kontura bakrenog užeta
3. Pocinčani željezni cijevni uzemljivači
4. Ispitna spojnica zaštitnog uzemljivača
5. Pocinčana željezna traka koja služi za izjednačavanje potencijala unutar TS
6. Zaštitna sabirnica
7. Nulta sabirnica
8. Transformator snage
9. Niskonaponski razvod
10. Blok visokog napona
11. Kabel 1 kV
12. Bakreno uže

7. IZVOĐENJE UZEMLJENJA TS 10(20)/0,4 KV

Kako bi zaštita u električnom postrojenju bila pouzdana i sigurna od presudne je važnosti kvalitetno izvesti sustav uzemljenja. Uzemljenjem se vrši veza između nadzemnih kućišta i vodiča te metalnih masa položenih u zemlju s ciljem odvođenja struja atmosferskih pražnjenja te zemljospoja u zemlju. Kako napon koraka i dodirni napon nebi prešli određene vrijednosti pri izvođenju uzemljenja nužno je da nam vrijednost otpora uzemljenja ne bude veća od one koju smo proračunali. Na otpor uzemljenja može se utjecati oblikom, dimenzijama i brojem uzemljivača. Otpor uzemljenja određen je i otpornošću zemljišta koja ovisi o vrsti tla u kojeg se ukopava uzemljivač.

Najčešće korišteni materijal je pocinčano željezo, a u zemljištu u kojem se očekuje brže korodiranje uzemljivača uzemljivač se poolovljuje. Uzemljenje je poželjno postaviti u tlo koje je vlažno, odnosno vlaži se prirodnim putem.

Pri izvođenju uzemljenja postoje određena pravila, koja nam osiguravaju da će uzemljivač zadovoljiti sve sigurnosne uvjete, ona su kako slijedi:

- uzemljivač se mora ukopati na dubinu od najmanje pola metra, zbog toga što se pretpostavlja da će na toj dubini otpornost tla malo varirati s promjenom vlage i temperature, te da se tlo na toj dubini neće zalediti ili isušiti što bi drastično povećalo otpornost tla,
- uzemljivač treba izbjegavati polagati u šljunčana i kamenita tla jer s takvim tлом uzemljivač ne može ostvariti dobar kontakt što dovodi do velikog otpora rasprostiranja odnosno uzemljivača,
- trakasti i pločasti uzemljivači moraju se polagati na taj način da im dulje stranice stoje okomito na tlo kako uslijed slijeganja tla ne bi izgubili kontakt sa zemljom sa svoje donje strane,
- pri ukopavanju uzemljivač je dobro okružiti slojem zemlje(bez šljunka i kamena) kako bi uzemljivač ostvario što bolji kontakt s tлом u koje je položen,
- nakon što smo prekrili uzemljivač zemljom potrebno je je zbiti kako uslijed prolaska vode oko uzemljivača ona ne bi isprala zemlju te ostavila uzemljivač okružen kamenjem.

Polaganje štapnih uzemljivača može se izvršiti na više načina. Jedan od načina je zabijanje uzemljivača. Ono se vrši posebnim napravama koje koriste stlačeni zrak, eksplozije ili veliku učestalost udaranja kako bi uzemljivač zabili u zemlju. Nedostatak takve metode je nemogućnost zabijanja štapa ako on na svom putu kroz zemlju naiđe na kamen. Vibracije koje bi time nastale oslabile bi kontakt uzemljivača i zemlje te time povećale otpor rasprostiranja, odnosno otpor uzemljenja. Drugi način polaganja štapnih uzemljivača naziva se zabijanje ispiranjem. Kroz štapni uzemljivač tjera se voda pod visokim tlakom, ona ispiru zemlju koja se nalazi na dnu uzemljivača, te uslijed toga uzemljivač propada u tlo. Treći način polaganja štapnih uzemljivača naziva se zabijanje bušenjem. Na vrh uzemljivača montira se svrdlo ili je vrh uzemljivača izveden kao svrdlo. Postupak bušenja može biti suh ili mokar.

U slučajevima kada je produljenje uzemljivača ekonomski neisplativo ili tehnički neizvedivo otpor uzemljivača se može smanjiti na način da se oko uzemljivača nasipa zemlja s boljom vodljivim svojstvima, kao što je: crnica, humus, glina i ilovača. Također, mogu se koristiti i kemijske sonde ili posebni materijali kao što su gelovi, bentoniti i grafitni prah.

Posebni materijali koriste se na taj način da se postave oko uzemljivača te svojim svojstvima smanje otpor rasprostiranja. U slučaju vodoravnog postavljanja uzemljivača oni se postavljaju u posteljicu od takvih materijala, dok kod okomitog postavljanja uzemljivač se nalazi u cijevi punjenom takvim materijalom kao što se vidi na sljedećoj slici:



Slika 7.1. Trakasti uzemljivač u cijevi punjenoj grafitnim prahom

Korištenjem grafitnog praha otpor uzemljivača smanjuje se za oko 65%. Umjesto grafitnog praha može se koristiti i vrsta gline zvana bentonit. Prednost bentonita je mala specifična otpornost i sposobnost apsorpiranja vode što dovodi do povećanja volumena odnosno povećanja dodirne plohe sa okolnim tlom. To dovodi do smanjenja otpora između uzemljivača i okolnog tla. No takvo rješenje ima nedostatak da za vrijeme dužih sušnih razdoblja otpor značajno raste. Zaključuje se da takvo rješenje nije pogodno u krajevima s dužim sušnim razdobljima.

Problem kod takvih rješenja je nedostatak podataka koji govore o promjenama karakteristika otpora s vremenom.

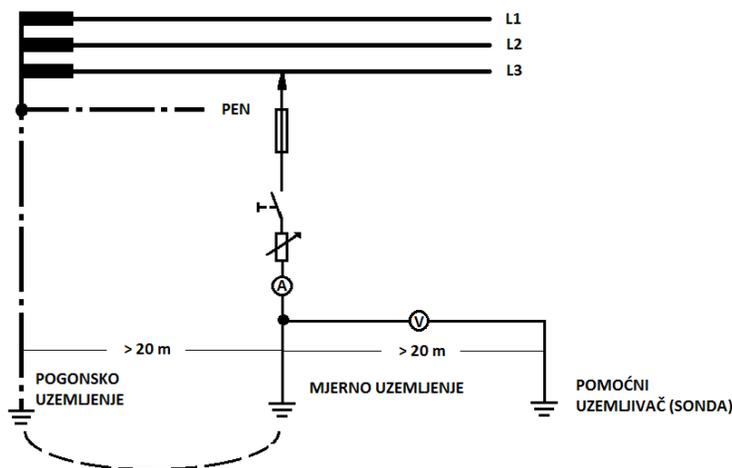
Temeljni uzemljivači polažu se po rubovima u temeljnu ploču ili temelje vanjskih zidova građevine. Ukoliko je zgrada veće kvadrature potrebno je ugraditi i poprečne veze. Materijal koji se koristi kao uzemljivač najčešće su pocinčane željezne trake dimenzija 30 mm x 3,5 mm. Izvod s uzemljenja mora biti dugačak 1,5 m, te se mora nalaziti u blizini kućnog priključka. U slučajevima kada se temeljni uzemljivač koristi i kao uzemljivač gromobranskog sustava potrebno je predvidjeti priključke nadzemnog dijela s uzemljivačem.

8. ISPITIVANJE UZEMLJIVAČA TS 10(20)/0,4 KV

Pri ispitivanju uzemljenja misli se prvenstveno na mjerenje njegovog otpora, koji utječe na napon dodira i napon koraka, tj. na sigurnost osoblja. Ispitivanje uzemljenja vrši se i prije puštanja postrojenja u pogon kako bi se utvrdila ispravnost projekta te izvedba uzemljivača. Kako s vremenom dolazi do promjena u tlu u kojem se uzemljivač nalazi izvršavaju se i periodična ispitivanja uzemljenja kako bi bili sigurni da otpor nije veći od najvećeg dopuštenog.

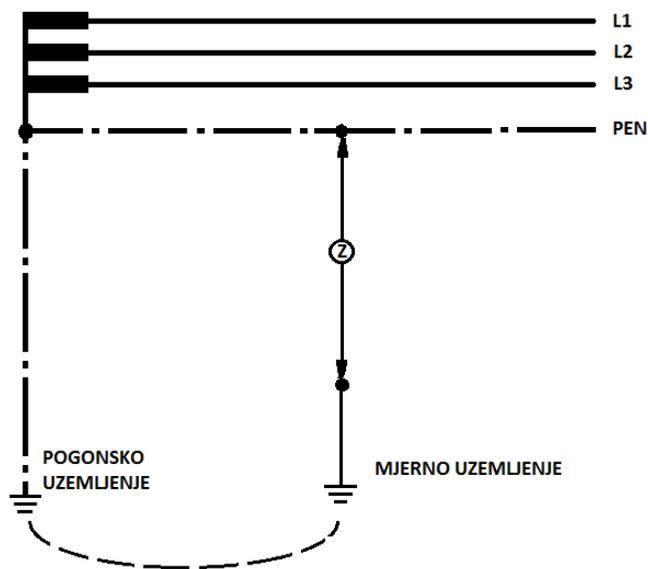
Otpor tj. impedancija uzemljenja kod visokonaponskih postrojenja najčešće se mjeri U/I metodom te mjerenjem uz pomoć mjernog mosta.

Kod U/I metode mjerenje se vrši na taj način da na uzemljivač čiji otpor mjerimo preko promjenjivog otpora priključimo fazni napon. Promjenjivi otpornik poprima vrijednosti od 20Ω do $1k\Omega$. Njegova uloga je da na sebe preuzme dio faznog napona kako bi na uzemljivaču vladao za njega primjeren napon. Kako bi odredili vrijednost otpora uzemljenja moramo odrediti napon uzemljivača te struju koja teče kroz uzemljivač. Napon uzemljivača razlika je potencijala između mjerenog uzemljivača i neutralne zemlje. Sonda koja se koristi za priključak voltmetra na neutralnu zemlju zabija se u zemlju na udaljenosti ne manjoj od 20 metara, te se tijekom mjerenja povremeno premješta kako bi rezultati bili pouzdaniji. Druga stezaljka voltmetra spaja se na mjereni uzemljivač. Struju koja teče kroz mjereni uzemljivač mjerimo ampermetrom čija je jedna strana spojena na promjenjivi otpornik, a druga strana na uzemljivač. Važno je da struja koju puštamo kroz uzemljivač za potrebe mjerenja ne bude toliko velika da prouzrokuje opasne dodirne napone.



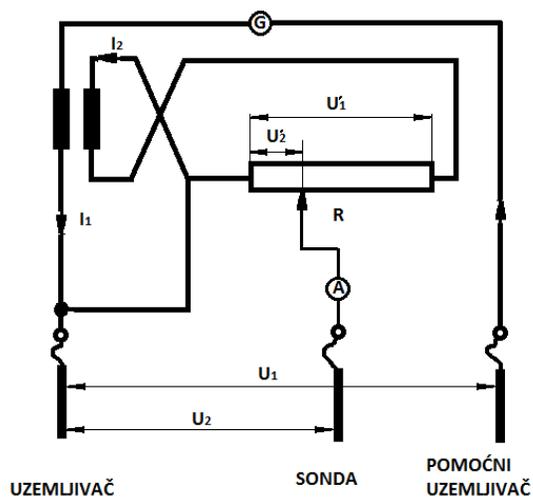
Slika 8.1. U/I metoda

Na mjestima na kojima se nalazi mnogo uzemljivača, te sondu nije moguće postaviti u neutralnu zemlju mjeri se impedancija petlje između dva uzemljivača. Impedancija petlje u tom slučaju predstavlja nam otpor uzemljenja zbog toga što je otpor pogonskog uzemljenja zanemarivo mali.



Slika 8.2. Mjerenje impedancije petlje

Kompensacijska metoda mjerenja se u praksi najčešće koristi. Instrumenti koji se pritom koriste nazivaju se mjerni mostovi. Na sljedećoj slici prikazana je načelna shema mjernog mosta za mjerenje otpora uzemljenja:



Slika 8.3. Nadomjesna shema mjernog mosta za mjerenje otpora uzemljenja

Princip mjerenja temelji se na uspoređivanju dvaju napona. Uspoređuje se napon između uzemljivača i sonde te napon na promjenjivom otporniku. Mjerni most radi na taj način da se izmjeničnim izvorom protjera struja koja će proteći kroz primarni namot strujnog

transformatora, kroz uzemljivač, zemlju, te kroz pomoćni uzemljivač natrag u izvor. Prolazeći kroz zemlju nastaje pad napona U_1 . Struja sekundara strujnog mjernog transformatora na projenjivom otporniku stvori pad napona U'_1 . U tlo između uzemljivača i pomoćnog uzemljivača zabije se sonda te ona obuhvati dio pada napona U_1 kojeg će se nazvati napon U_2 . Napon U_2 prouzrokovat će struju koja će na promjenjivom otporniku stvoriti pad napona U'_2 . U trenutku kada se na klizniku promjenjivog otpora odabere vrijednost otpora koja je jednaka vrijednosti otpora uzemljenja izjednače se padovi napona U_2 i U'_2 te je struja kroz ampermetar jednaka nuli. Vrijednost otpora uzemljenja tada se može očitati sa skale promjenjivog otpornika.

Usljed mjerenja zbog stranih napona koji se javljaju sa drugih uzemljivača i napona smetnji koji se induciraju u kabelu kojim mjerimo važno je primijeniti metode eliminacija smetnji.

Jedne od korištenijih metoda su:

- Metoda titranja: ovu metodu moguće je primijeniti ukoliko u postrojenju postoji nezavisni izvor električne energije (agregat za vlastitu potrošnju ili nužno napajanje). Frekvencija tog agregata pri mjerenju namješta se na vrijednost koja će za par desetinki herca odstupati od frekvencije mreže. Taj nezavisni izvor u mjerenju će izazvati napon smetnje U_s te će on zajedno sa naponom koji izaziva mjerna struja stvoriti konstantan napon. Prosječni izmjereni napon dobije se iz sljedećeg izraza:

$$U_T = \frac{U_{1T} + U_{2T}}{2} \text{ za } 2U_s < U_1 \quad (8.1.)$$

$$U_T = \frac{U_{1T} + U_{2T}}{2} \text{ za } 2U_s > U_1 \quad (8.2.)$$

$$U_T = \frac{U_{1T}}{2} \text{ za } 2U_s = U_1 \quad (8.3.)$$

- Vektorsko mjerenje: kako bi se izbjeglo induciranje napona u mjernim vodovima oni se pri mjerenju postavljaju okomito na ispitni. Ukoliko to nije moguće mjerачem vektora izmjeri se udio inducirano napona te oduzme od ukupnog izmjerenog napona.
- Deblokiranje istosmjernih struja: ukoliko pri mjerenju napon smetnje sadrži veliki udio istosmjernog napona, uporabom voltmetra s funkcijom deblokiranja istosmjernog napona moguće ih je izmjeriti
- Metoda promjene polariteta: kod ove metode na uzemljivač se narine mrežni napon. Mjerenje se vrši u tri koraka. Najprije se očita napon i struja za jedan smjer struje, pa za drugi smjer struje, te na kraju napon U_s za slučaj kad kroz uzemljivač ne teče struja mreže. Vrijednosti mjerenog napona U_{mj} i struje I_{mj} dobivaju se iz sljedećih izraza:

$$U_{mj} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2}{2}} - U_s \quad (8.4.)$$

$$I_{mj} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2}} - I_s \quad (8.5.)$$

Impedancija uzemljivača Z dobiva se iz sljedećeg izraza:

$$Z = \frac{U_{mj}}{I_{mj}} \quad (8.6.)$$

9. NUMERIČKI PRIMJER PRORAČUNA UZEMLJIVAČA TS 10(20)/0,4 KV

U ovom poglavlju izvršen je proračun uzemljivača novopredviđene gradske KTS 10(20)/0,4 kV 1x630 kVA. Njeno napajanje planirano je transformatorskom stanicom 110/20kV čije je zvjezdište uzemljeno preko malog otpora, što ograničava struju kratkog spoja na 300A. Kapacitivna struja zemljospoja 20kV mreže, za potrebe proračuna iznosi 100A.

Zadane vrijednosti:

Specifični otpor tla: $150\Omega\text{m}$
Površina transformatorske stanice: 9m^2
Broj kratkih trakastih uzemljivača: 15
Duljina kratkih trakastih uzemljivača: 15m
Površina temeljnih uzemljivača: 100m^2
Broj temeljnih uzemljivača: 50

Uzemljenje mora zadovoljiti uvjete zaštite koji se odnose na napon dodira i napon koraka. Kako bi bili sigurni da će uvjeti zaštite biti zadovoljeni otpor združenog uzemljenja mora zadovoljiti sljedeći uvjet:

$$R_{zdr} \leq \frac{U_d}{r \cdot I_1} \quad (9.1.)$$

$$I_1 = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (9.2.)$$

U_d predstavlja dozvoljeni napon dodira čija vrijednost iznosi 65 V, a I_1 predstavlja maksimalnu vrijednost struje jednopolnog kvara u srednjenaponskoj mreži. U ovom primjeru iznosi: 300 A djelatna struja jednopolnog kvara ograničena otpornikom u zvjezdištu TS 110/10(20) kV uz kapacitivnu struju iznosa 100 A. Kako je transformatorska stanica gradske izvedbe vodovi su kabelski. U tom slučaju redukcijski faktor pojnog voda iznosi 0,37.

$$I_1 = \sqrt{300^2 + 100^2} \quad (9.2.)$$

$$I_1 = 316,23\text{A} \quad (9.2.)$$

$$R_{zdr} \leq \frac{65\text{V}}{0,37 \cdot 316,27\text{A}} \leq 0,555\Omega \quad (9.1.)$$

Otpor združenog uzemljenja računa se sljedećim izrazom:

$$\frac{1}{R_{zdr}} = \frac{1}{R_{TS}} + \frac{n_k}{R_u} + \frac{n_t}{R_t} \quad (9.3.)$$

Oznaka R_T predstavlja otpor uzemljenja transformatorske stanice, a računa se sljedećim izrazom:

$$R_T = r_r \cdot \rho_z \quad (9.4.)$$

Uzemljenje transformatorske stanice izvedeno je od dva prstena i dva trakasta uzemljivača. Površina trafostanice iznosi 9 m^2 , a svaki trakasti uzemljivač dug je 10 m. Faktor r_r za takvu izvedbu uzemljivača može se očitati iz grafa sa slike 8.2.5. te iznosi $0,06 \text{ m}^{-1}$. Specifična otpornost zemlje zadana je u zadatku te iznosi $150 \Omega\text{m}$.

$$R_T = 0,06 \frac{1}{\text{m}} \cdot 150 \Omega\text{m} = 9 \Omega \quad (9.4.)$$

Oznaka n_k predstavlja broj kratkih trakastih uzemljivača, a R_u predstavlja otpor jednog kratkog trakastog uzemljivača, a njegov otpor računa se sljedećim izrazom:

$$R_u = r_r \cdot \rho_z \quad (9.5.)$$

Faktor r_r očitava se iz sljedeće tablice. U njoj su dane vrijednosti c_r za različite duljine trakastog uzemljivača koji se nalazi na dubini od 0,5 m.

Dužina trake (m)	r_r (m^{-1})
5	0,236
10	0,138
15	0,101
20	0,080
25	0,067
30	0,057

Tablica 9.1. Vrijednosti redukcijskog faktora za različite duljine trakastog uzemljivača

Duljina kratkih trakastih uzemljivača iznosi 15 m, što daje vrijednost korektivnog faktora r_r od $0,101 \text{ m}^{-1}$.

$$R_u = 0,101 \frac{1}{\text{m}} \cdot 150 \Omega\text{m} = 15,15 \Omega \quad (9.5.)$$

Oznaka n_t predstavlja broj temeljnih uzemljivača, a oznaka R_t otpor pojedinog temeljnog uzemljivača. Njegov otpor računa se sljedećim izrazom:

$$R_t = r_r \cdot \rho_z \quad (9.6.)$$

U ovom slučaju faktor r_r izračunava se sljedećim izrazom:

$$r_r = \frac{0,33}{\sqrt{A}} + \frac{0,87}{L} \quad (9.7.)$$

Gdje A predstavlja površinu obuhvaćenu uzemljivačem, a L predstavlja duljinu uzemljivačke trake u temelju. Površina temeljnog uzemljivača zadana je te iznosi 100 m^2 , a duljina trake potrebne za takav temeljni uzemljivač iznosi 40 m .

$$r_r = \frac{0,33}{\sqrt{100\text{m}^2}} + \frac{0,87}{40\text{m}} = 0,05475\text{m}^{-1} \quad (9.7.)$$

Nakon uvrštavanja u izraz za otpor temeljnog uzemljivača R_t dobiva se:

$$R_t = 0,05475 \frac{1}{\text{m}} \cdot 150\Omega\text{m} = 8,2125\Omega \quad (9.6.)$$

Nakon što se vrijednosti pojedinih otpora te brojevi pojedinih uzemljivača uvrste u izraz za otpor združenog uzemljenja dobiva se:

$$\frac{1}{R_{zdr}} = \frac{1}{9\Omega} + \frac{15}{15,15\Omega} + \frac{50}{8,2125\Omega} \quad (9.3.)$$

$$\frac{1}{R_{zdr}} = (0,1111 \frac{1}{\Omega} + 0,9901 \frac{1}{\Omega} + 6,0883 \frac{1}{\Omega}) \quad (9.3.)$$

$$\frac{1}{R_{zdr}} = 7,1895 \frac{1}{\Omega} \quad (9.3.)$$

$$R_{zdr} = 0,1391\Omega \quad (9.3.)$$

Dobivena vrijednost zadovoljava uvjet združenog uzemljenja:

$$R_{zdr} \leq 0,555 \Omega \quad (9.2.)$$

$$0,1391\Omega \leq 0,555\Omega \quad (9.2.)$$

10. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu opisana je metodologija projektiranja uzemljivača transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV. Definirana je svrha samog uzemljivanja električnih uređaja, te vrste uzemljivača koji se koriste za pojedine zadaće koje imaju u postrojenju. Znatno dio rada posvećen je pojašnjenju raspodjele potencijala oko uzemljivača kako bi se shvatile pojave kao što su napon koraka i napon dodira, te utjecaju tih napona na čovjeka. Dobro poznavanje električnih svojstava čovjeka omogućuje pravilno projektiranje uzemljivača, jer jedino tada se sa sigurnošću mogu dozvoliti naponi koraka i naponi dodira određenih vrijednosti. Preveliki naponi dodira i naponi koraka bili bi opasni za ljude, a premali naponi koraka i naponi dodira bez razloga bi povećali cijenu uzemljivača.

Pojašnjena su pravila kojih se treba držati pri izvođenju uzemljenja, te opisani noviji načini kojima se smanjuje otpor uzemljenja. Navedene su i opisane vrste uzemljivača, te definirane veličine koje utječu na njihov otpor, kao i izrazi za njegovo računanje. Kako bi bili sigurni da je električno postrojenje sigurno za rad obavljaju se periodična ispitivanja. U radu su opisani postupci mjerenja otpora.

Glavni cilj ovog rada prikazati je postupak projektiranja uzemljenja transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV. Pod pojmom projektirati misli se na to da se odrede broj, vrsta, dimenzije te prostorni razmještaj uzemljivača kako bi stvorili uzemljenje kojem su troškovi minimalni, a opet zadovoljava sve tehničke uvjete. Opisan je postupak kojim se dolazi do uvjeta koje uzemljenje treba zadovoljiti, te postupak računanja otpora raličitih vrsta uzemljivača. Također prikazane su često korištene izvedbe uzemljenja za različite izvedbe transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV.

Za kraj napravljen je proračun uzemljivača jedne gradske transformatorske stanice 10(20)/0,4 kV kabelaške izvedbe. Iz njega se zaključuje kako je vrlo važno imati točne ulazne veličine, kao što su specifični otpor tla, te dužine elemenata uzemljenja, kao što su trakasti uzemljivači položeni uz kabele. Ukoliko nam te veličine nisu točne, ili u procesu proračuna dođe do greške uzemljenje će biti krivo projektirano. Tu grešku uočiti će se pri ispitivanju uzemljenja, gdje će ona može prouzrokovati dodatne troškove. Na sam otpor uzemljenja najviše utječe specifični otpor tla, te što je njegova vrijednost veća uzemljenje će biti teže izvesti.

11. LITERATURA

- [1] Majdančić, Franjo.: „Uzemljivači i sustavi uzemljenja“, Graphis, Zagreb, 2004.
- [2] Mihalek, Ernest.; i dr.: „Upute za projektiranje distributivnih NNM, I dio“, Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1989.
- [3] Lovrenčić, Viktor.; Mišković, Davor.; Drandić, Silvano.: „Pregled uporabe materijala za smanjenje otpora uzemljenja transformatorskih stanica“,Hrvatski ogranak međunarodne distribucijske konferencije, 4.(10.) savjetovanje, Trogir, 2014.
- [4] Franković, Dubravko.: Materijali sa predavanja: Osnove projektiranja elektroenergetskih postrojenja, Tehnički fakultet Rijeka, 2015.
- [5] Keler, Drago.; Maričević, Miljenko.; Srb, Vjekoslav.: „Elektromonterski priručnik“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1969.
- [6] Niemand, Thomas.; Kunz, Heinz.: „Sustavi uzemljenja u razdjelnim mrežama“, Graphis, Zagreb, 2004.