

DOI: [10.46793/CIGRE37.B2.01](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B2.01)**B2.01****ANALIZA OTPORNOSTI UZEMLJIVAČA DALEKOVODNIH STUBOVA NAKON
PRIMENE DODATNIH MERA NA POPRAVCI UZEMLJENJA****ANALYSIS OF THE RESISTANCE OF TRANSMISSION TOWER EARTHING AFTER
THE APPLICATION OF ADDITIONAL MEASURES ON THE EARTHING****Boris Šušić, Svetozar Tomović, Leda Minić, Dejan Dmitrić, Miloš Dabović***

Kratak sadržaj: Uvod će dati ostvrt na tehničke zahteve u vezi uzemljivača stubova dalekovoda, svrhu korištenja te upotrebu i način računanja otpornosti uzemljivača. Daće se objašnjenje kako je računata otpornost uzemljivača i kako je izvedeno uzemljenje na terenu. U pitanju je tipski uzemljivač oko stuba, koji se sastoji od dva prstena oko svake temeljne stopa i zajednički prsten oko svih stopa. Pored toga biće objašnjeno na koji način se vršilo merenje otpornosti uzemljenja pojedinih stubova. Pored vrednosti otpornosti uzemljivača daće se i izmerene vrednosti specifične otpornosti tla u kome je postavljen uzemljivač. Potom će se dati proračuni za primenu dodatnih mera kao i rezultati proračuna. Dodatne mere se sastoje od izrade krakova i sonde koji se povezuju na osnovni uzemljivač. Sonde su postavljene vertikalno u tlu i oko njih i korišten je zamenski materijal (GEM – ground enhanced material). Nakon toga biće prikazani rezultati ponovnih merenja otpornosti uzemljivača, posle primene dodatnih mera. Na kraju će se dati rezultati analize, odnosno pokazaće se koliko je smanjena vrednost otpornosti uzemljivača nakon primene dodatnih mera.

Ključne reči: uzemljenje, dalekovod, merenje uzemljenja

Abstract: The introduction will explain the technical requirements regarding the earthing, the purpose of use, and method of calculating the resistance of the earthing. An explanation will be given as to how the resistance of the earthing was calculated and how earthing was carried out in the site. It is a typical earthing around the tower, which consists of two rings around each foundation and a common ring around all four legs. In addition, it will be explained how the earthing resistance of individual tower was measured. In addition to the resistance value of the earthing, the measured values of the specific resistance of the soil in which the earthing is installed will also be given. So calculations will be provide for the application of additional measures as well as the results of the calculations. Additional measures consist of making horizontal rods and vertical rods that are connected to the basic earthing.

* Boris Sušić, GOPA Tech ogranak, boris.susic@gopa.eu

Svetozar Tomović, Kodar, svetozar.tomovic@kodar.rs

Leda Minić, Crnogorski elektroprenosni sistem, leda.minic@cges.me

Dejan Dmitrić, Kodar, dejan.dmitric@kodar.rs

Miloš Dabović, Kodar, milos.dabovic@kodar.rs

The vertical rods were placed in soil and around the soil and a substitute material (GEM – ground enhancement material) was used. After that, the results of re-measurements of the resistance of the earthing will be shown, after the application of additional measures. At the end, the results of the analysis will be given, it will be shown how much the resistance value of the earthing has decreased after the application of additional measures.

Key words: *Earthing, Overhead line, Measurement of Earthing*

1 UVOD – UZEMLJENJE DALEKOVODNIH STUBOVA

Uzemljenje je električno provodno spajanje pojedinih delova voda sa zemljom;

Uzemljenje na dalekovodu predstavlja povezivanje određenih metalnih elemenara, koji nisu pod naponom radi zaštite od prenapona, poboljšanja bezbednosti i stabilnosti sistema.

Uzemljenje dalekovodnih stubova je ključna mera zaštite u elektroenergetskim sistemima. Njegova osnovna namena je da omogući bezbedno odvođenje struje u zemlju u slučaju kvara na mreži ili u slučaju udara groma. Na ovaj način se štite ljudi, koji se mogu naći u blizini stubova u slučaju kvara. Takođe štiti se oprema i kao i sama prenosna i distributivna elektroenergetska mreža od oštećenja i potencijalno opasnih napona.

Najčešće se koriste uzemljivači u obliku metalnih šipki, traka ili mreža, koji se postavljaju u tlo u neposrednoj blizini stuba. Otpornost uzemljenja treba da bude što manja, a vrednosti se određuju u skladu sa tehničkim normama i karakteristikama tla.

Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1kV do 400kV, Službeni list SFRJ 65/88 i SRJ 18/92[1], definiše kako se postavlja uzemljenje oko dalekovodnih stubova. Članom 78, Pravilnika je navedeno da kod stubova nadzemnog voda koji pripadaju mreži sa efiksano uzemljenom neutralnim tačkom imaju, po pravilu uzemljivač u obliku: „jednog ili dva prstena oko svakog temelja ili oko svih temelja jednog stuba. Najmanja dubina ukopavanja uzemljivača je 0,5m.“

U Članu 82 se navodi: „Ako se uzemljenjem izvedenim prema članu 78 ovog pravilnika ne postigne otpornost koja obezbeđuje zaštitu od groma, potrebno je međusobno povezivati pojedinačne uzemljivače ili postaviti još jedan prsten oko svih temelja stuba na dubini od 1m, odnosno položiti zrakaste uzemljivače ukupne dužine približne dužini uzemljivača prstena, ako je to povoljnije s obzirom na teren.

Ako se postupkom iz stava 1 ovog člana ne postigne otpornost koja štiti od povratnog preskoka, odustaje se od daljeg polaganja uzemljivača.“

2 NAČIN IZVOĐENJA UZEMLJIVAČA

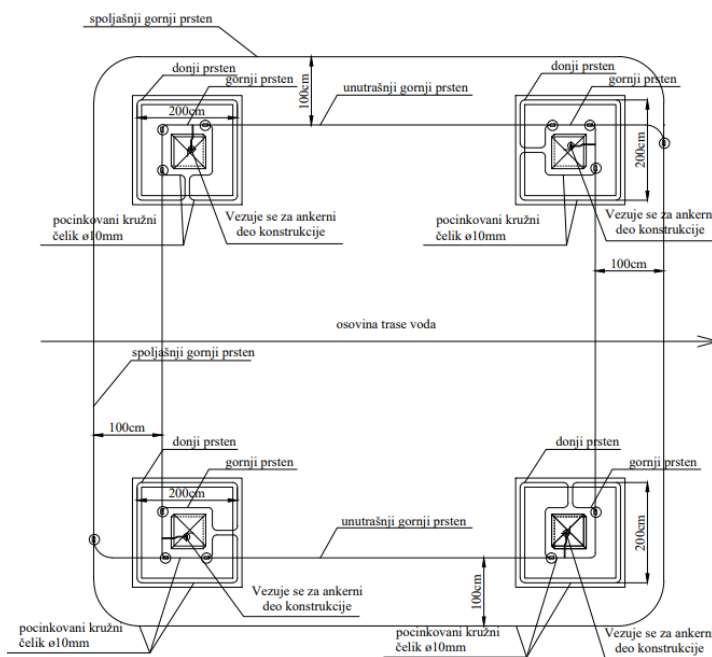
U ovom poglavlju je objašnjeno na koji način je postavljen uzemljivač dalekovodnih stubova koji su predmet analize.

Projektovani uzemljivač se sastoji od:

-Osnovnog uzemljivača oko svake noge stuba (sastoji se od gornjeg prstena postavljenog na 0.6 m od površine tla i donjeg prstena postavljenog u nivou temeljne ploče). Osnovni uzemljivači su međusobno povezani;

-Spoljašnjeg prstena postavljenog na udaljenosti 1 m od osnovnog uzemljivača na dubini od 0.6m, koji je povezan na osnovi uzemljivač.

Na ovaj način je izvedeno uzemljenje na svim stubovima, što je u skladu sa Članom 78 Pravilnika.



Slika 1: Skica primenjenog tipa uzemljivača

3 IZMERENE VREDNOSTI OTPORNOSTI UZEMLJENJA

Nakon ugradnje izvršena su merenja otpornosti uzemljenja i merenje specifične otpornosti zemlje u na stubnim mestima.

Merenja su vršena uređajem marke METREL model MI 3290, prikazanog na slici 2.



Slika 2: Merni uređaj

Kako je dalekovod izgrađen, postavljeno je i zaštitno uže sa optičkim vlaknima, merenje otpornosti je izvršeno visokofrekventnom (HF) metodom, gde nije bilo potrebe za galvanskim odvajanjem uzemljenja od ostatka konstrukcije stuba.

Metoda se zasniva na činjenici da je zbog visoke frekvencije ispitnog signala, impedansa zaštitnog užeta postaje toliko velika da se struja kroz OPGW može zanemariti, u skladu sa EN 50522. Dakle prilikom merenja u zemlju se ubrizgava naizmenična struja visoke frekvencije (25 kHz) preko pomoćne sonde (H).

Pad napona meri se pomoćnom sondom (S). I konačno otpor uzemljivača se određuje iz odnosa napona i struje:

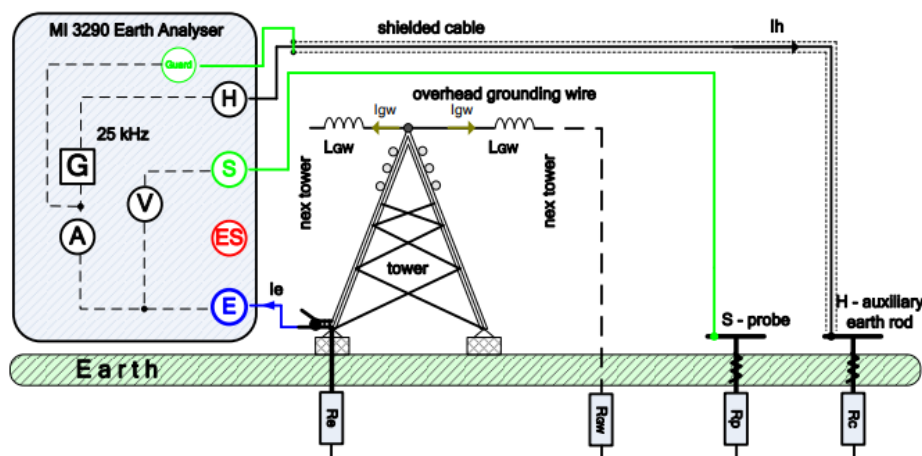
$$R_e = \frac{U_{S-E}[V]}{I_e[A]} [\Omega]$$

Gde je

R_e – izmereni (izračunati) otpor uzemljivača

U_{S-E} – Izmeren napon između sonde

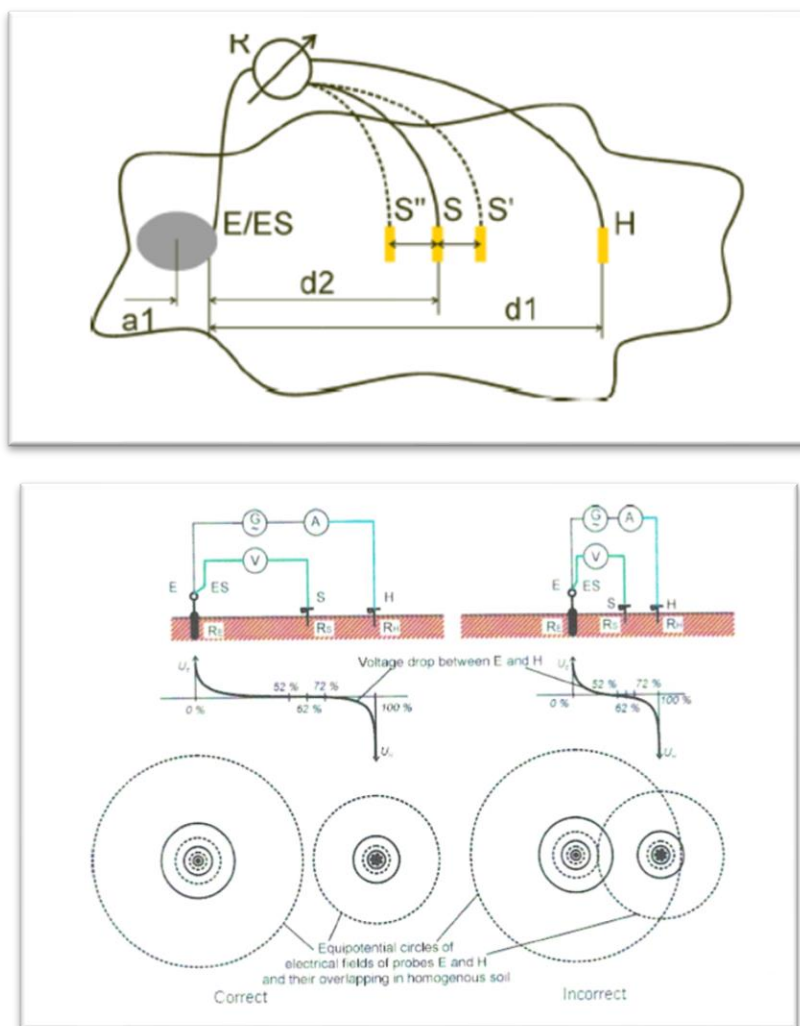
I_e – izmerena struja



Slika 3: Šematski prikaz merenja uzemljenja HF metodom

Sonda E je povezana sa uzemljeničkom elektrodom (šipkom). Sonda H služi za zatvaranje merne petlje. Napon između sonde S i E je pad napona na izmerenom otporu. Ako se S sonda postavi preblizu sistemu uzemljenja, meriće se premali otpor (videće se samo deo naponskog levka). Ako je S sonda postavljena preblizu H sonde, otpor uzemljenja naponskog levka H sonde bi poremetio rezultat.

Važno je da se zna veličina uzemljivača za pravilno postavljanje sonde. Parametar a predstavlja maksimalnu dimenziju uzemljujuće elektrode (ili sistema elektroda). Nakon što se definiše maksimalna dimenzija uzemljivača, merenja se mogu izvršiti pravilnim postavljanjem ispitnih sonde. Merenje sa tri položaja probne sonde S (S'' , S , S') ima za cilj da proveriti da li je odabrana udaljenost d_1 dovoljno dugačka.



Slika 4: Pravilan položaj sonde

Distance pomoćnih elektoeda bi pri prvom merenju trebalo odrediti :

$$d_1 > 5a$$

$$d_2 = 0,62d_1 - 0,38a_1$$

pri čemu je a_1 udaljenost tačke spajanja sistema uzemljenja i centra. Zatim se radi drugo i treće mjerenje sa pomjeranjem sonde prema sledećim relacija:

$$d_2 = 0,52d_1 - 0,38a_1$$

$$d_2 = 0,72d_1 - 0,38a_1$$

U slučaju pravilno odabranog d_1 , rezultati merenja 2 i 3 su simetrični oko rezultata merenja 1. Razlike (merenje 2 - merenje 1, merenje 3 - merenje 2) moraju biti niže od 10%. Veće razlike ili nesimetrični rezultati znače da naponski levak utiče na merenje i d_1 treba povećati.

Merenje specifičnog otpora zemlje

Specifični otpor zemlje za različite vrste tla poprima vrednosti od nekoliko Ωm do nekoliko hiljada Ωm . Vrednost otpornosti za određenu vrstu tla je izuzetno promenjiva. To se događa zbog toga što je provodljivost struje u zemlji elektrolitske prirode te zavisi od količine disociranih jona, a ta količina opet o rastvorljivosti prisutnih soli i o stepenu vlažnosti tla. Zato se otpornost znatno menja sa vlažnošću tla, temperaturom tla i količinom soli u tlu. Na sledećoj slici vidi se pretpostavljena vrednost specifičnog otpora tla pri određenim vrednostima soli, vlage i temperatura.

Kao što je poznato za različitu vrstu tla imamo različite vrednosti specifičnog otpora zemlje. U narednoj tabeli su date te karakteristične vrednosti:

Tabela 1: Karakteristične specifične otpornosti tla

Vrsta zemljišta,vode i drugih materijala	Tipični rasponi specifične otpornosti tla (Ωm)
Morska voda	0,1-1
Jezerska voda i reke	1-10
Močvarno zemljište	5-40
Glina	20-100
Glinasta zemlja slabe vlažnosti i mešovita zemlja	120-200
Vlažni pesak	90-150
Zemlja crnica	50-200
Suvi pesak	200-300
Šljunak	400-2000
Beton	50-500
Kamenito zemljište	1000-4000
Granit, slojevita stijena	10000-50000
Led	10000-100000

Poznavanje specifičnog otpora tla predstavlja glavni ulazni parametar prilikom proračuna uzemljenja i stoga je od presudne važnosti.

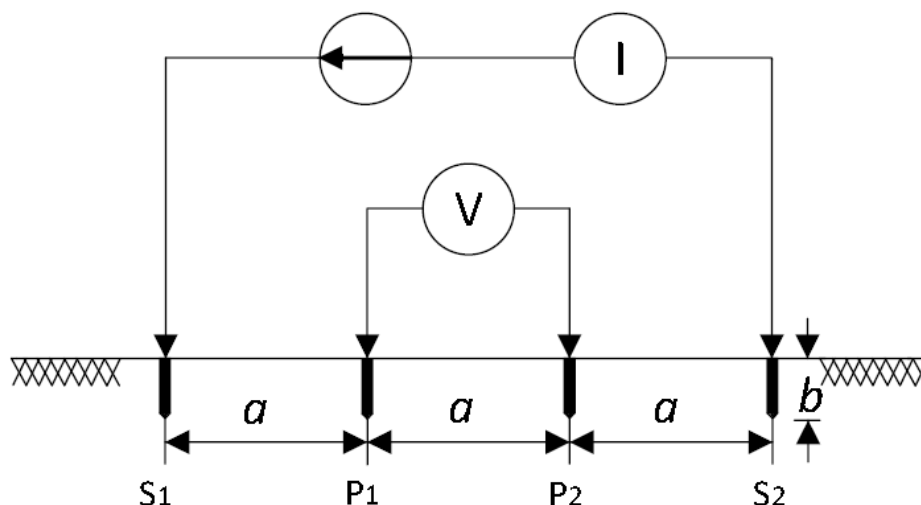
Postoji nekoliko metoda mjerenja specifičnog otpora zemljišta, a u ovom konkretnom slučaju korištena je Wenner-ova metoda merenja čija je principijelna šema data na sledećoj slici.

$$\rho_a = \frac{4 * \pi * a * R}{1 + \frac{2 * a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Ako je dubina na koju je zabijena sonda, b, mala u odnosu na međusobni razmak između sonde, a, onda se za izračinavanje prividnog specifičnog otpora tla može koristiti pojednostavljena jednačina:

$$\rho_a = 2 * \pi * a * R,$$

pri čem je a - rastojanje između sonde u metrima, a R izmereni otpor u Ω . U konkretnom slučaju rastojanje između sonde (a) je bilo 10m i 4m, a dubina ukopavanja sonde (b) se kretala u zavisnosti od terena i iznosila je od 0,2 do 0,6m.



Slika 4: Merenje specifične otpornosti tla

Takom i nakon izgradnje dalekovodnih stubova izvršena su merenja otpornosti uzemljivača kao i specifične otpornosti tla. Rezultati merenja su pokazali da je od ukupno 295 stubova, na 91 mestu postignuta zadovoljavajuća vrednost otpornosti uzemljivača, dok se na ostale 204 lokacije moraju primeniti dodatne mere kako bi se vrednost uzemljenja dodatno spustila.

4 DODATNE MERE

Nakon prikupljanja svih izmerenih rezultata rađene su dodatne mere na mestima gde rezultat otpornosti uzemljenja nije bio zadovoljavajući, odnosno gde je vrednost uzemljenja bilo preko 28.5 Ω .

Dodatne mere su se sastojale od izrade horizontalnih krakova, polaganih na dubini od 0.6 m te ugradnje vertikalnih sondi duž krakova. Vertikalne sonde (pocinkovane čelične šipke, prečnika 16 mm) su polagane u zemlju (najčešće stenu) na način da je prvo izbušena rupa prečnika 5 cm te je u nju nalivena GEM (ground enhancement material) masa u koju je zatim postavljena sonda.



Slika 5: Način postavljanja GEM mase

Zavisno od dobijenih rezultata uzemljenja kao i specifične otpornosti zemlje, urađen je proračun koji je pokazao koliko je potrebno krakova i koje dužine, kao i broj sondi po kraku.

Broj krakova kretao se od 1 do 4, dok je dužina pojedinog kraka bila od 16 do 64 m..

Broj vertikalnih sodni je bio od 3 do 16 po kraku, gde su one bile međusobno udaljene 4 m.

Proračunom je određena klasifikacija dodatnih mera u 12 kategorija,

- Dodatna mera 1 (DM1) - 1 krak dužine 16 m sa 4 sonde dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4 m

- Dodatna mera 2 (DM2) - 1 krak dužine 24 m sa 6 sondi dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4 m

- Dodatna mera 3 (DM3) - 1 krak dužine 48 m sa 12 sondi dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4 m

- Dodatna mera 4 (DM4) - 2 kraka dužine 48 m sa po 12 sondi dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4 m

- Dodatna mera 5 (DM5) - 1 krak dužine 64 m sa 16 sondi dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4 m

- Dodatna mera 6 (DM6) - 2 kraka dužine 12 m sa po 3 sondi dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4 m

- Dodatna mera 7 (DM7) - 2 kraka dužine 16 m sa po 4 sonde dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4 m

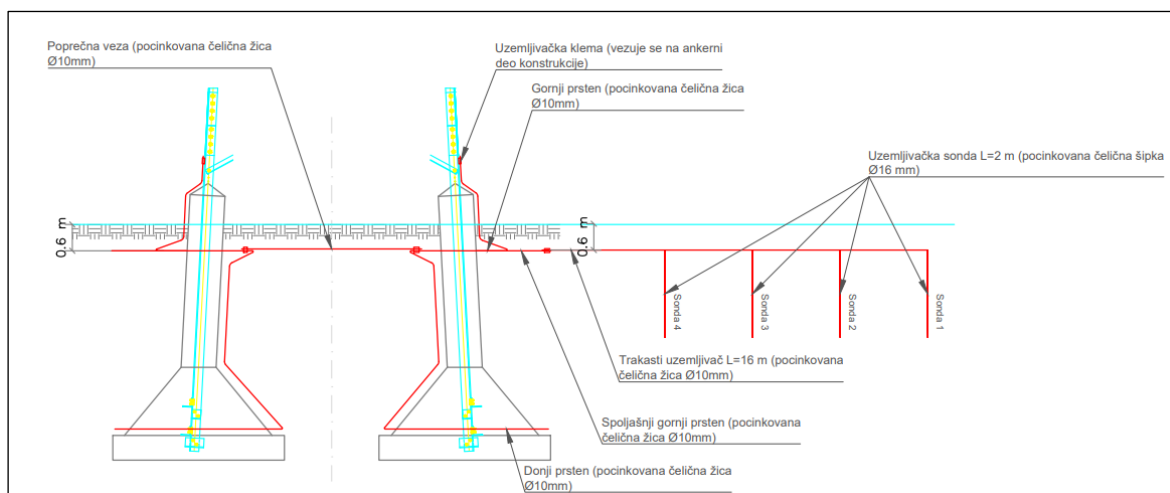
- Dodatna mera 8 (DM8) - 2 kraka dužine 24 m sa po 6 sondi dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4 m

- Dodatna mera 9 (DM9) - 2 kraka dužine 32 m sa po 8 sondi dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4 m

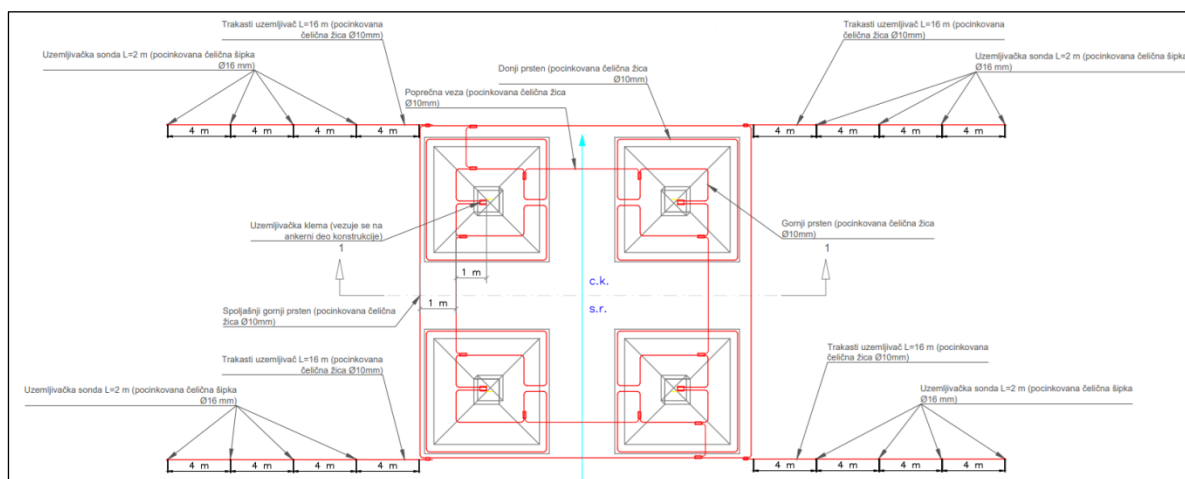
- Dodatna mera 10 (DM10) - 3 kraka dužine 16 m sa po 4 sonde dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4m

- Dodatna mera 11 (DM11) - 4 kraka dužine 12 m sa po 3 sondi dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4 m

- Dodatna mera 12 (DM12) - 4 kraka dužine 16 m sa po 4 sonde dužine 2 m na međusobnom razmaku od 4m



Slika 6: Grafički prikaz DM1



Slika 7: Grafički prikaz DM12

Izračunavanje otpornosti sonde koja je postavljena u GEM masu, daće se na primeru dodatne mere DM1, koja će se analogno primeniti za ostale mere.

Kao dodatna mera 1 (DM1) biće primenjena mera dodavanja jednog kraka dužine 16 m i 4 sonde dužine 2 m, na međusobnom rastojanju od 4 m. Sonde su pocinkovane čelične šipke prečnika Ø 16 mm, koje se postavljaju u rupe prečnika Ø 50 mm. Nakon postavljanja sonde rupa se popunjava GEM masom.

Otpor sonde oko koje se postavlja GEM masa računa se po obrascu:

$$R_s = \frac{c}{2\pi L} \left(\rho \left(\ln \frac{8L}{D_b} - 1 \right) + \rho_b \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right) - \rho_b \left(\ln \frac{8L}{D_b} - 1 \right) \right) \quad (1)$$

gde je:

ρ (Ωm) – otpornost okolnog tla

ρ_b (Ωm) – otpornost GEM mase

D_b (m) – prečnik rupe u koji se ubacuje sonda i koja se popunjava GEM masom

L (m) – dužina sonde

d (m) – prečnik sonde

c – koeficijent korekcije zbog primene GEM mase

Otpor trakastog uzemljivača za dužinu L računa se prema obrascu:

$$R_T = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{d} (\Omega) \quad (2)$$

Ekvivalentni otpor trakastog uzemljivača dužine L i broja sonde n postavljenih u GEM masu, iznosi:

$$R_{T+nS} = \frac{R_S * R_T}{n * R_T + R_S} (\Omega) \quad (3)$$

Nakon primene dodatnog seta mera na projektovani uzemljivač, dobija se da je ekvivalentni otpor uzemljivača stuba:

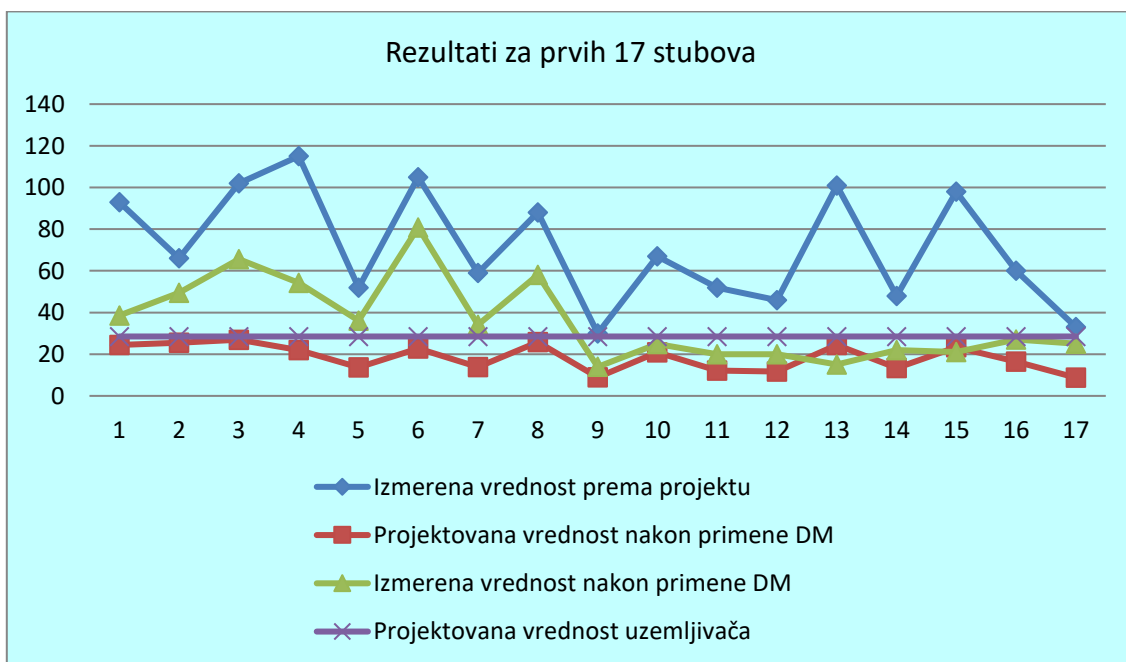
$$R_e = \frac{R_{O+P} * R_{T+nS}}{R_{O+P} + R_{T+nS}} (\Omega) \quad (4)$$

U proračunu se za R_{O+P} uzima izmerena vrednost otpora uzemljivača.

5 MERENJE NAKON URADJENIH DODATNI MERA

Nakon urađenih dodatnih mera izvršeno je ponovno merenje otpornosti uzemljivača dalekovodnih stubova.

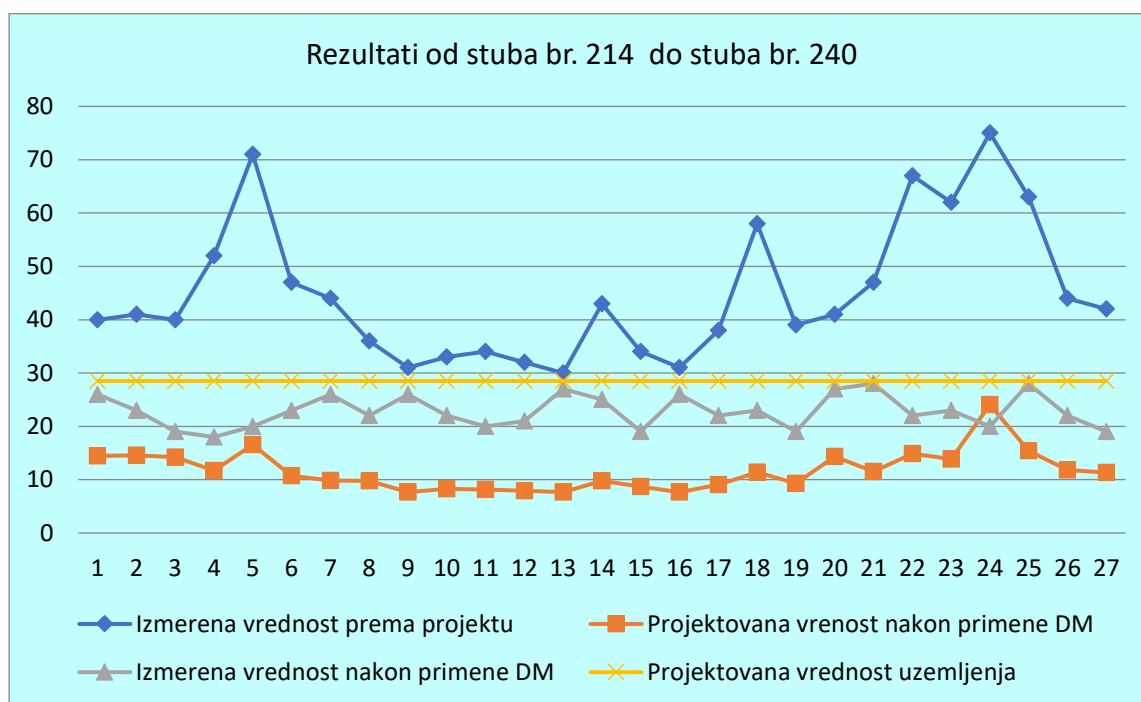
Od ukupno 204 stuba, na koliko je bilo potrebo korigovati uzemljivač, primenom dodatnih mera na njih 177 je postignuto zahtevano uzemljenje, dok je na ostalih 27 stubnih mesta, vrednost otpornosti uzemljenja smanjena za određeni procenat.



Slika 8: Grafički prikaz rezultata merenja na prvih 17 stubova

Tabela 2: Tabela prikaz rezultata merenja za prvih 17 stubova

Red.br.	Projektovana vrednost uzemljivača (Ω)	Izmerena otpornost projektovanog uzemljenja (Ω)	Primena dodatne mere za poboljšanje uzemljenja	Projektovana vrednost uzemljenja nakon dodatnih mera (Ω)	Izmerena vrednost uzemljenja (Ω)
1	28,5	93	DM6	24,43	38,5
2	28,5	66	DM1	25,44	49,4
3	28,5	102	DM7	26,96	65,6
4	28,5	115	DM11	22,05	54,2
5	28,5	52	DM1	13,62	36,1
6	28,5	105	DM6	22,77	80,8
7	28,5	59	DM1	13,85	34,1
8	28,5	88	DM1	25,87	58,01
9	28,5	30	DM1	8,9	13,93
10	28,5	67	DM1	20,97	24,9
11	28,5	52	DM1	12,1	20
12	28,5	46	DM1	11,72	20
13	28,5	101	DM7	24,44	15
14	28,5	48	DM1	13,4	22
15	28,5	98	DM7	23,42	21
16	28,5	60	DM1	16,46	27
17	28,5	33	DM1	8,73	25



Slika 9: Grafički prikaz rezultata merenja od stuba br. 214 do stuba br. 240

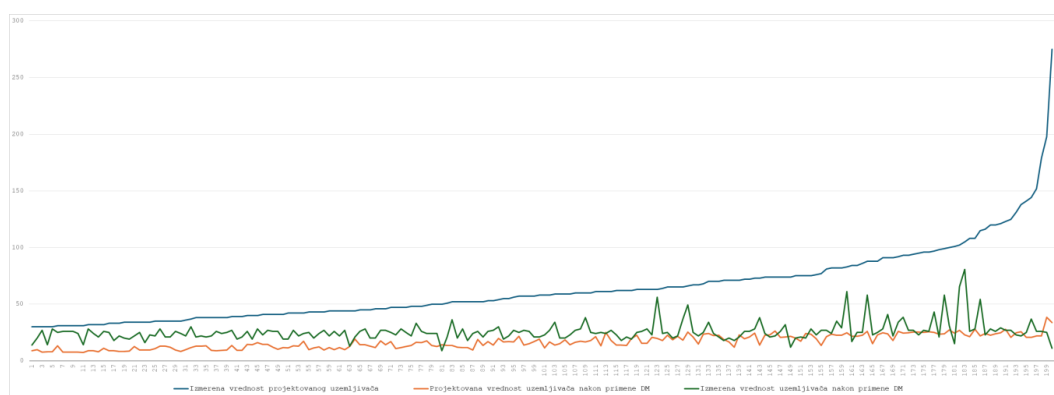
6 ZAKLJUČAK

Od 204 stubnih mesta na kome se nije postigla zadovoljavajuća vrednost uzemljenja, primenjene su dodatne mere kako je ranije objašnjeno.

Nakon merenja po primeni dodatnih mera na 177 lokacije se postiglo zahtevano uzemljenje. Na preostalih 26 lokacija vrednost uzemljenja se spustila izmedju - 11% i 74 % od prvoizmerene vrednosti uzemljenja sa osnovnim uzemljivačem.

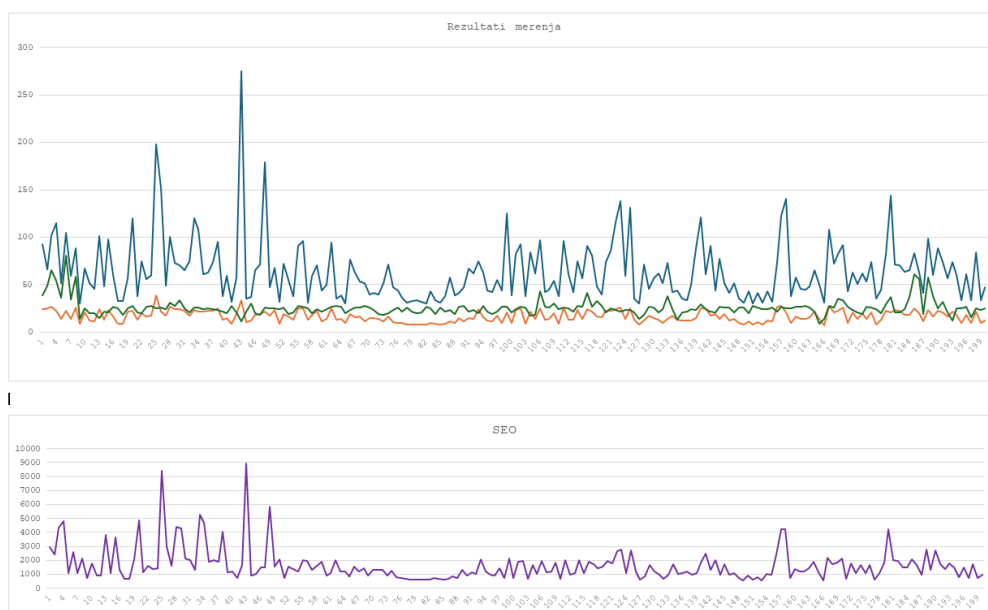
Kroz primenu dodatnih mera, pokazano je da se nije mogao pronaći i izvesti, univerzalni obrazac na koji način da se postigne zahtevana vrednost otpornosti uzemljenja.

Takodje pokazalo se da je kod većih vrednosti, značajno smanjena vrednost otpornost uzemljenja, dok je kod vrednosti uzemljenja nešto većih od zahtevane, dosta teško dolazilo do smanjivanja vrednosti uzemljivača.



Slika 10: Gradacijski poređana prvobitna merenja od najmanje do najveće vrednosti

Uočeno je, odnosno potvrđeno je, da je izmerena otpornost u direktnoj korelaciji sa specifičnim električnim otporom (SEO) tla što se i moglo očekivati.



Slika 11: Poređenje dobijenih rezultata sa izmerenim SEO

Prilikom merenja specifične električne otpornosti tla kao i vrednosti uzemljenja primećeno je značajno odstupanje u rezultatima ukoliko se promeni pravac postavljanja mernih sondi i različita udaljenost sodni. Što navodi na zaključak da je tlo nehomogeno (što se moglo zaključiti i vizuelnim pregledom lokacija), odnosno da se specifična električna otpornost različita za različite pravce i dubine slojeva, što dalje znači da je za dobro funkcionisanje uzemljivača, dovoljno pronaći barem jedan pravac koji će zadovoljiti tražene uslove.

7 LITERATURA

- [1] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1kV do 400kV
- [2] EN 50522:2010 Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c.