

mr. sc. Viktor Lovrenčić, dipl. ing. el.
C&G d.o.o. Ljubljana, Slovenija
viktor.lovrencic@c-g.si

Janez Bračko, dipl. ing. el.
C&G d.o.o. Ljubljana, Slovenija
janez.bracko@c-g.si

Jadran Lovrenčić
C i G d.o.o. Pula
info@cig.hr

Danilo Gambaletta, dipl. ing. el.
HEP ODS, Elektroistra, Pula
danilo.gambaletta@hep.hr

Andrea Venier, dipl. ing. el.
HEP ODS, Elektroistra, Pula
andrea.venier@hep.hr

UPORABOM GRAFITNOG PRAHA USPJEŠNO SANIRANO UZEMLJENJE TRANSFORMATORSKE STANICE

SAŽETAK

Otpor uzemljenja uzemljivača transformatorske stanice (TS) ovisi o specifičnom otporu tla između uzemljivača i referentne zemlje te dimenzijama i izvedbi uzemljivača. Projektant ima više mogućih rješenja za smanjenja otpora uzemljivača npr. produžavanjem uzemljivača što može biti neracionalno i skupo te zbog ograničenja prostora često i neizvedivo ili da se oko uzemljivača položi zemlja s boljom provodljivošću (crnica, humus, ilovača, glina), kemijske sonde ili posebni materijali (gel, bentonit, grafitni prah). Prezentiran je pregled praktične uporabe raznih dodataka za smanjenje otpora uzemljivača na osnovi iskustava u slovenskoj i hrvatskoj distribuciji. Prikazana je uspješna sanacija uzemljenja TS uporabom grafitnog praha, koji praktično prepolovi vrijednost otpora uzemljivača.

Ključne riječi: uzemljivač, specifični otpor tla, grafitni prah, TS

SUCCESSFULLY RESTORING GROUNDING OF SUBSTATION BY USING THE GRAPHITE POWDER

SUMMARY

Ground resistance of transformer station (TS) earthing depends on the soil resistivity between the earthing and reference ground and dimensions or construction of earthing. The designer has several possible solutions to reduce earthing resistance: from earthing extension, which can be unrational and costly, and because of space constraints, often unfeasible, and one can put a ground with better conductivity (black earth, humus, clay), chemical probes or special materials (gel, bentonite, graphite powder) around the earthing. There is presented a review of the practical use of various accessories to reduce ground resistance based on experiences in Slovenian and Croatian distributions. A successful TS ground restoring by using graphite powder is presented, which practically halves value of the ground resistance.

Keywords: earthing, soil resistivity, graphite powder, TS

1. UVOD

Otpor uzemljenja odnosno otpor zemlje između uzemljivača i referentne zemlje je neposredno ovisan o specifičnom otporu tla u kojeg se ukopava uzemljivač.

Projektant nakon poznatog podatka o specifičnom otporu tla traži tehnološko rješenje pravilnog izbora materijala i izvedbe uzemljivača (uže, traka, štap). Projekt uzemljivačkog sustava mora zadovoljiti sve zahtjeve te sigurnost ljudi s obzirom na napone koji se u uzemljivačkim sustavima javljaju pri najvećim strujama zemljospoja, mora zajamčiti mehaničku čvrstoću i otpornost na koroziju, kao i toplinsko podnošenje najveće struje kvara.

Parametri mjerodavni za dimenzioniranje uzemljivačkog sustava jesu vrijednost struje kvara, trajanje kvara i značajke tla. Značajke tla (ilovača, pijesak, šljunak, kamenito tlo), odnosno specifični otpor tla, znatno se razlikuju ovisno o vrsti tla, veličini zrna, gustoći i vlažnosti. Nakon izbora materijala, presjeka, dužine i izvedbe uzemljivača, uz mjerenjem potvrđenih značajki tla, projektant može doći u situaciju da ne može postići zahtijevan otpor uzemljenja.

Otpor uzemljenja uzemljivača ovisi o specifičnom otporu tla te dimenzijama i izvedbi uzemljivača, a uglavnom ovisi o duljini uzemljivača i malo o njegovu presjeku. Projektantu ostaje moguće rješenje u produžavanju uzemljivača, što može biti neracionalno i skupo te zbog ograničenja prostora često i neizvedivo.

Postoje rješenja da se oko uzemljivača položi zemlja s boljom provodnošću (crnica, humus, ilovača, glina), da se uzemljivač poveže na kemijske sonde ili korištenjem posebnih materijala (gel, bentonit, grafitni prah).

U nizu takvih aditiva, 2006. godine počelo se u Sloveniji koristiti grafitni prah. Grafitni prah je u posljednjih godina korišten na više lokacija. Korištene su štapne sonde, a u jednom slučaju trakasti uzemljivač. Dobiveni rezultati bili su zadovoljavajući, jer se otpor uzemljenja uzemljivača uporabom grafitnog praha smanjio za približno dva puta.

Hrvatski pilot projekt polaganja uzemljivača u grafitni prah je prvi put realiziran na području HEP ODS Elektroistra (TS San Marco) u okolici Rovinja. Prezentiran je pregled praktične uporabe raznih dodataka za smanjenje otpora uzemljivača na osnovi iskustava u slovenskoj i hrvatskoj distribuciji. Prikazana su tehnička rješenja i rezultati uporabe grafitnog praha, koji praktično prepolovi vrijednost otpora uzemljivača.

Kompleksnost mogućih tehničkih rješenja s pregledom propisa i standarda prezentirana je na konferenciji HO CIRED-u 2014 [1].

2. PROPISI I NORME NA PODRUČJU SUSTAVA UZEMLJENJA

Slovenija i Hrvatska imaju zajedničke korijene u djelomično ili u cijelosti važećim tehničkim propisima, koje su naslijedile od bivše države (SFRJ). Zadnja tri desetljeća individualnog razvoja Slovenija i Hrvatska imale su donekle različit pristup kod preuzimanja starih tehničkih propisa SFRJ i JUS standarda (normi), te stvaranja vlastitih nacionalnih tehničkih propisa.

Upravo činjenica da se u zadnja tri tranzicijska desetljeća na području tehničkih propisa i normi događaju česte promjene, projektanti te stručnjaci u nadzoru, izgradnji i održavanju imaju problema kod uporabe relevantne regulative. Mijenjaju se osnovni zakoni koji se harmoniziraju s direktivama i odredbama EU, ali se kasni na pripremi i prihvaćanju podzakonskih akata, koji su u većini još iz doba SFRJ.

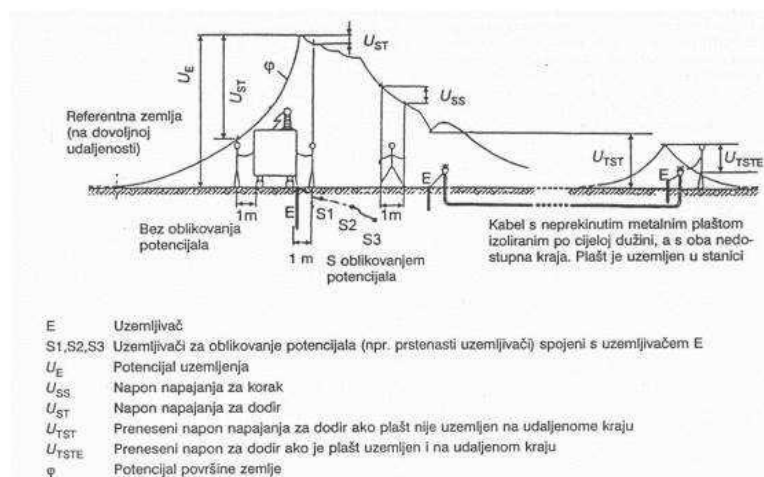
2.1. Definicije

Propisi i norme imaju zadaću opisati sve potrebne definicije koje su osnova za međusobno razumijevanje stručnjaka.

Proučavajući važeće propise i norme izabrana je norma HD 637 S1 (bez dodatak SIST i HRN te godište objave zbog jednostavnosti zapisa) koja je pomogla kod pojašnjenja pojedinih pojmova (citati toč. 2.7. Uzemljenje):

- **ZEMLJA** - označuje zemlju kao mjesto i zemlju kao vodljivi materijal, npr. humus, ilovača, pijesak, šljunak i kamen,
- **REFERENTNA ZEMLJA (daleka zemlja)** - dio zemlje izvan područja utjecaja uzemljivača ili uzemljivačkog sustava gdje se između bilo kojih dviju točaka ne pojavljuje nikakav napon uslijed struje prema zemlji. Općenito se smatra površinom zemlje,

- **UZEMLJIVAČ** - vodič koji je u vodljivom dodiru sa zemljom ili vodič položen u beton i koji je velikom površinom u dodiru sa zemljom (npr. temeljni uzemljivač),
- **ZEMLJOVOD** - vodič koji dio postrojenja kojega treba uzemljiti spaja s uzemljivačem ili koji međusobno spaja uzemljivače, bilo da je izvan zemlje ili da je položen u zemlju,
- **UZEMLJIVAČKI SUSTAV** - mjesno ograničen sustav vodljivo spojenih uzemljivača ili metalnih dijelova jednake učinkovitosti (npr. temelji stupova, armature kabela, metalni plaševi kabela), vodiča za uzemljenje i vodiča za izjednačenje potencijala,
- **UZEMLJIVAČ ZA OBLIKOVANJE POTENCIJALA** - vodič koji se s obzirom na njegov razmještaj ne primjenjuje radi postizanja određenog otpora uzemljenja, nego radi oblikovanja potencijala,
- **SPECIFIČNI OTPOR TLA (ρ_E)** - specifični električni otpor tla,
- **OTPOR UZEMLJENJA (R_E) (UZEMLJIVAČA)** - otpor zemlje između uzemljivača i referentne zemlje,
- **IMPEDANCIJA UZEMLJENJA (Z_E) (UZEMLJIVAČKOG SUSTAVA)** - impedancija između uzemljivačkog sustava i referentne zemlje,
- **UZEMLJENJE SUSTAVA** - uzemljenje neke točke aktivnoga kruga koje je potrebno radi pravilnog rada opreme ili stanica,
- **POTENCIJAL UZEMLJENJA (U_E)** - napon između uzemljivačkog sustava i referentne zemlje,
- **POTENCIJAL POVRŠINE ZEMLJE (ϕ)** - napon između neke točke na površini zemlje i referentne zemlje,
- **NAPON DODIRA (U_T)** - dio potencijala uzemljenja uslijed zemljospoja koji može premostiti čovjek uz pretpostavku da struja kroz ljudsko tijelo teče od ruke prema stopalu (vodoravni razmak od dostupnog dijela je 1m),
- **NAPON KORAKA (U_S)** - dio potencijala uzemljenja uslijed zemljospoja koji može premostiti čovjek pri koraku od 1m uz pretpostavku da struja kroz ljudsko tijelo teče od jednog stopala prema drugom,
- **PRENESENI POTENCIJAL** - potencijal uzemljivačkog sustava izazvan strujom prema zemlji koji se preko spojenog vodiča (npr. metalni plašt kabela, PEN vodič, cjevovod, tračnica) prenosi u područje maloga ili nikakva potencijala prema referentnoj zemlji. To dovodi do razlike potencijala između tog vodiča i njegove okolice. Definicija se odnosi i na vodič spojen s referentnom zemljom koji ulazi u područje potencijala.



Slika 1. Primjer profila potencijala površine zemlje i napona u slučaju protjecanja struje kroz uzemljivače (Izvor: HRN HD 637 S1:1999)

2.2. Uporaba propisa i normi u Hrvatskoj

Stručni udžbenik [3] je hrvatskim elektrotehničkim stručnjacima na području uzemljivača i sustava uzemljenja velika pomoć pri razumijevanju teorije i prakse te kod pregleda uporabe propisa i standarda, ali zbog vremena nastanka (2004.) korisnik ga mora koristiti s rezervom.

Prednost je što je autor na jednom mjestu je [3] prikupio, revidirao i na aplikativan način prezentirao tu kompleksnu građu kao osnovu za planiranje, projektiranje, izgradnju i održavanje različitih vrsta uzemljenja i sustava uzemljenja.

Nakon dugogodišnjeg rada konačno je 2010. godine objavljen novi Pravilnik (NN br. 105/10). Sigurnosni zahtjevi u novom Pravilniku o tehničkim zahtjevima za elektroenergetska postrojenja nazivnog napona iznad 1 kV, koji se odnose na temeljne zahtjeve, izolaciju, vrstu opreme, sigurnosne mjere, pomoćna postrojenja i upravljačke sustave te sustave za uzemljenje, usklađeni su s odredbama hrvatske norme.

Pravilnici, objavljeni u Narodnim Novinama, su sa obaveznom primjenom, dok norme nisu, sve dok ih pravilnik ili propis ne navede kao takve. Ako se pravilnik i norma razlikuju, važe odredbe pravilnika. Kako bi se izbjegla česta promjena pravilnika zbog usklađivanja, suvremeni pravilnici i tehnički propisi ne razrađuju detaljno oblast koju pokrivaju, nego upućuju na normu bez navođenja datuma (tzv. nedatirano upućivanje). Takav je i Pravilnik (NN 105/10), koji upućuje na normu HRN HD 637 S1, a time na njenog važećeg slijednika istog naziva HRN EN 61936-1: 2012/A1: 2014.

Elektroenergetska postrojenja moraju ispunjavati tehničke i sigurnosne zahtjeve sukladno odredbama norme HRN HD 637 S1 i Pravilnika (NN 105/10). U vrijeme njegovog donošenja, Pravilnik je bio u skladu sa normom. U međuvremenu je harmonizacijska norma HD, 2002. godine u izmijenjenom obliku prerasla u IEC normu. Nove izmjene nastale su 2010. s novom verzijom norme (Edition 2.0), koja je dopunjena (Amendment 1) 2014. godine.

HD 637 S1: 1999 – Električna postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV je prihvaćena kao hrvatska norma HRN HD 637 S1:2002. godine. Prevedena je na hrvatski jezik. Nakon predviđenih rokova za harmonizaciju, HD norma je zamijenjena sa IEC 61936-1 (Ed. 1.0): 2002. Ova norma nije nikad važila u Hrvatskoj. Zamijenjena je normom IEC 61936-1 (Ed. 2.0): 2010. Ova je norma usvojena kao HRN EN 61936-1:2012, uz ispravak 2013. i izmjene A1:2014. Oblast uzemljenja je iz HD norme prebačena u EN 50522:2010 koja je preuzeta kao HRN EN 50522:2012 – Uzemljenje električnih postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV.

3. PROJEKTIRANJE, IZVOĐENJE I ODRŽAVANJE SUSTAVA UZEMLJENJA

Navedeni propisi i norme zahtijevaju od stručnjaka elektrotehnike odlično poznavanje sustava uzemljenja u području projektiranja, izvođenja i održavanja.

Analizirajući propise, norme, pojedine projekte, održavanje i periodična mjerenja može se doći do zaključka da mali broj stručnjaka odlično poznaje problematiku sustava uzemljenja.

3.1. Osnovna rješenja uzemljivača

Projektant uzemljivačkog sustava (zaštitno uzemljenje, uzemljenje sustava, uzemljenje za zaštitu od groma) mora kod dimenzioniranja uzemljivačkih sustava zadovoljiti četiri zahtjeva:

- zajamčiti sigurnost ljudi s obzirom na napone koji se u uzemljivačkim sustavima javljaju pri najvećim strujama zemljospoja,
- zajamčiti mehaničku čvrstoću i otpornost na koroziju,
- zajamčiti toplinsko podnošenje najveće struje kvara,
- izbjeći štetu za imovinu i opremu.

Parametri mjerodavni za dimenzioniranje uzemljivačkog sustava jesu: vrijednost struje kvara, trajanje kvara i značajke tla.

Uzemljivači moraju biti od materijala koji mogu podnijeti koroziju, moraju biti otporni na mehaničke utjecaje pri ugradbi i u normalnom pogonu te moraju biti propisanih minimalnih dimenzija uzemljivača obzirom na mehaničku čvrstoću i koroziju.

Uzemljivače po obliku odnosno položaju dijelimo na:

- vodoravni uzemljivač - uzemljivač koji je položen na maloj dubini do oko 1m - može biti traka, okrugla šipka ili uža, a izvodi se kao zrakasti, prstenasti ili mrežasti uzemljivač ili njihova kombinacija,
- štapni uzemljivač - uzemljivač koji je ukopan ili zabijen na dubinu većoj od 1m - može biti cijev, okrugla šipka ili materijal drugačijega profila.

Zanimljiva je definicija norme JUS N.B2.754 u točki 2.2.2.1 koja govori o uporabi punila za poboljšanje prolaznog otpora tla »Ako je uzemljivač ukopan neposredno u kamenito tlo ili šljunak prijelazni otpor je velik. U takvim slučajevima je potrebno oko uzemljivača nasuti provodni sloj zemlje.«. U Pravilniku (Sl. I. SFRJ, br. 4/74) u članku br. 66 možemo naći tablicu o procijenjenim vrijednostima specifičnog otpora različitih vrsta zemlje (Tablica I):

Tablica I. Procijenjene vrijednosti specifičnog otpora različitih vrsta zemlje

VRSTA ZEMLJE	SPECIFIČNI OTPOR (Ωm)
Močvara	30
Ilovača, oranica	100
Vlažni pijesak	200
Vlažni šljunak	500
Suhi pijesak ili šljunak	1000
Kamenito tlo	3000

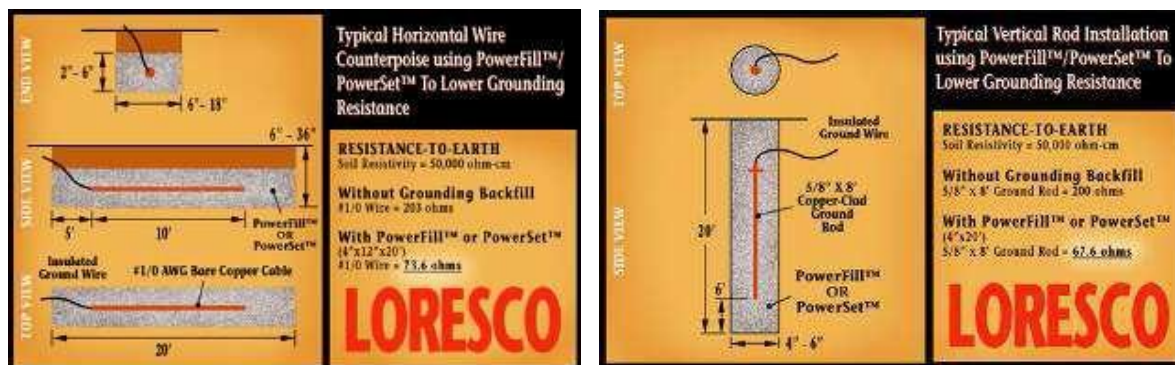
U praksi se posteljica iz dobro provodljivog punila s niskim specifičnim otporom može izvoditi od različitih materijala:

- prirodni materijali (crnica, ilovača),
- industrijski otpad (crvena zemlja – otpad kod prerade glinice),
- specijalni produkti (kemijske sonde, bentonit, gelovi, grafitni prah).

Slobodno se može reći da je najveći problem uporabe punila tehničko praćenje karakteristika uzemljivača, odnosno karakteristika otpora koji je u pogonu duže vrijeme. Zato stručnjaci nemaju dovoljno povratnih informacija o djelotvornosti punila na duži rok uporabe.

Grafitni prah [6], ima odlične karakteristike i praktično prepolovi vrijednost otpora uzemljivača ukoliko ga položimo u posteljicu grafitnog praha; ima nizak specifičan otpor od 10 Ωm , zrno 1 mm, čisti je ugljik (99,35 % C), higroskopan je, netopljiv u vodi, postojan na udar groma, ima nizak udarni otpor, neosjetljiv na visoke temperature i vlagu te je i ekološki prihvatljivo punilo.

Na web stranici <http://www.loresco.com/calculators.html> je dostupan kalkulator s kojim se vrlo jednostavno proračuna otpor uzemljivača u konfiguraciji trake ili štapa (Slika 2).



Slika 2. Tipiko rješenje uporabe grafitnog praha

U nastavku prikazan je proračun otpora uzemljivača kod specifičnog otpora zemlje 500 Ωm (poboljšanje za cca 40 %):

- a) za trakasti uzemljivač:

$$\frac{\text{Klasično bez grafitnog praha}}{\text{Sa grafitnim prahom}} = \frac{203 \, \Omega}{73,6 \, \Omega} = 2,76$$

$$(203 - 73,6) \times 100/203 = \mathbf{63,7 \, \%}$$

- b) za štapni uzemljivač:

$$\frac{\text{Klasično bez grafitnog praha}}{\text{Sa grafitnim prahom}} = \frac{200 \, \Omega}{67,6 \, \Omega} = 2,95$$

$$(200 - 67,6) \times 100/200 = \mathbf{66,2 \, \%}$$

4. PRAKTIČNA RJEŠENJA UZEMLJIVAČA

Ukratko su predstavljena praktična rješenja uporabe punila (bentonit, grafitni prah) u sustavu uzemljenja u Hrvatskoj i Sloveniji [1-7]. Kod proračuna za projektiranje se preporučuje uporaba literature, hrvatskog priručnika [3] i vrlo starog slovenskog priručnika [7], koji mogu biti od velike pomoći projektantima, jer nude praktične primjere proračuna uzemljivača.

Veoma teško je pronaći cjelovitu sliku životne dobi pojedinog uzemljivača na konkretnim objektima. Često u kombinaciji potrebnih podataka analize stanja uzemljivača nedostaje bar neki od potrebnih podataka: nedostaju proračuni, nema podataka o mjerenju specifičnog otpora tla (uglavnom procjena), nedostaju prva i periodična mjerenja, nema podataka o mjernoj metodi, nedostaju podaci o vremenskim uvjetima na dan mjerenja (suho, mokro tlo) nema analiza uzroka povećanja otpora uzemljivača kroz vrijeme pogona (korozija, slabi spojevi, oštećenja). Tako opisana slika predstavlja otežanu dijagnostiku stanja uzemljenja na pojedinom području ili konkretnom objektu.

Iako je propisan rok od 5 godina za periodična mjerenja, to se u praksi vrlo rijetko sustavno provodi najčešće zbog nedostatka financijskih sredstava, osposobljenih mjerača i kvalitetne mjerne opreme.

4.1. Testiranje rješenja uzemljivača u Sloveniji

Kad slovenska distribucija mjerenjem potvrdi previsoke otpore uzemljivača traže se pogodna tehnička rješenja, od pregleda stanja uzemljivača (korozija, spojevi), ugradnje dodatnih uzemljivača (traka, štap), do uporabe kemijskih sondi ili dodatnih punila (bentonit, grafitni prah).

U radu su predstavljeni rezultati i rješenja s uporabom punila odnosno uporaba grafitnog praha na više objekata: distributivna TS, uzemljenje 110 kV stupa i 3 kV DC željezničkog stupa, te sustava uzemljenja kliničkog centra.

4.1.1. Uzemljenje distributivne TS

Kod izgradnje TS 0,95/0,4 kV Osankarica i njenog priključenja preko SKS 0,95 kV na postojeću TS 20/0,95/0,4 kV Lukanja izrađen je izvedbeni projekt br. 301/04-SB (zahtjev $R_{UZ} < 2 \Omega$). Nakon izgradnje mjerenjima je potvrđena neuspješna izvedba sustava uzemljenja, jer je postignut $R_{UZ} = 7,3 \Omega$.

Trafo stanica se nalazi na slovenskom Pohorju, sastav tla je mješavina granita i lapora s visokim specifičnim otporom izmjerenim Wennerjevom metodom, $\rho = 1.345 \Omega m$ (Slika 3).



Slika 3. Trakasti uzemljivač u posteljici grafitnog praha TS Lukanja

Sanacija sustava uzemljenja je realizirana u ljetu 2007. godine, a prvo mjerenje otpora uzemljivača realizirano je u zimi 2007. godine, te ponovno mjerenje dvije godine kasnije 2009. godine (Tablica II):

- upotrijebljena su dva stara kraka duljine 30 m ($21,36 \Omega$) i 70 m ($10,54 \Omega$) - izmjereno $7,3 \Omega$,
- ugrađena su nova tri kraka duljine 25 m u posteljici grafitnog praha (proračunata vrijednost otpora pojedinog kraka iznosi 25Ω , odnosno novog dodatnog uzemljivača $8,33 \Omega$),

- mjerene vrijednosti i proračuni se razlikuju (Tablica II) zbog različitih ulaznih podataka (specifični otpor tla, utjecaj suhe ili vlažne ili čak smrznute zemlje).

Tablica II. Podaci otpora uzemljivača TS Lukanja

Željena vrijednost otpota uzemljivača $R_{uz} (\Omega)$	Stara vrijednost otpota uzemljivača (mjerjenje VI/07) $R_{uz} (\Omega)$	Nova vrijednost otpota uzemljivača (mjerjenje XII/07) $R_{uz} (\Omega)$	Vrijednost otpota uzemljivača (mjerjenje 2009.) $R_{uz} (\Omega)$
1,8	7,3	4,8	1,26

Tablica II prikazuje velike razlike između proračunatih vrijednosti te stvarno izmjerenih. Posebno je zanimljiva usporedba otpora uzemljivača iz 2007. godine, kada je bio izmjeren otpor 4,8 Ω i dvije godine kasnije, samo 1,26 Ω . Nema posebne analize razloga, osim da se je tijekom dvije godine kompaktirala nasuta zemlja oko uzemljivača i da je prvo mjerjenje izvedeno u suhoj i skoro smrznutoj zemlji.

4.1.2. Uzemljenje 110 kV dalekovodnog stupa

U Sloveniji je grafitni prah upotrijebljen prvi puta 2006. godine kod uzemljenja 10 čeličnih stupova željezničke mreže 3 kV DC u izvedbi štapastog uzemljivača dubine 3 m, promjera 50 mm i debljine stijenke 6,3 mm. Svaka sonda je popunjena sa 40 kg grafitnog praha.

Pozitivni rezultati su dali poticaj operatoru prijenosa (ELES), tako da je sanirao nekoliko stupova na dva različita dalekovoda. U jednom slučaju je bio problem šljunkovitog terena, a u drugom nedostatak prostora na parkiralištu (Slika 4).



Slika 4. Ograničen prostor i bušenje za montažu štapastog uzemljivača uz 110 kV stup

Na stupnom mjestu br. SM 25 A, dalekovoda 2x110 kV TE-TOL - Kleče, Črnuče – Kleče, 6.8.2012. godine izmjeren je otpor 25,2 Ω (Slika 5), a zahtijevano je 15,5 Ω . Pristupilo se sanaciji u skučenom prostoru s tri štapne sonde duljine 6 m punjene grafitnim prahom i postignut je otpor 8,5 Ω , mjereno 6.6.2013. godine.

Dalekovod 2x 110 kV Cirkovce - Zlatoličje izgrađen 1968. godine zanimljiv je jer se nalazi na polju rijeke Drave što znači da su tla pretežito šljunčana s visokim specifičnim otporom. Nakon periodičnog mjerjenja sanirana su tri uzemljivača na stupnim mjestima br. 20, 22 i 23 sa četiri kraka trakastog uzemljivača dužine 25 m, u posteljici od grafitnog praha. Rezultati mjerjenja (Tablica III) upozoravaju da bez analize stvarnog stanja i postupka ugradnje uzemljivača nije moguće komentirati postignute otpore uzemljivača.

Tablica III. Rezultati mjerenja otpora uzemljivača na DV 2x110 kV Cirkovce – Zlatoličje (SM 20)

SM	Podatak iz projekta (staro 1968.)	Mjerenje	Mjerenje	Mjerenje	Nov proračun (grafit)	Novo mjerenje (grafit)	Novo mjerenje (grafit)
		IV/1999	IV/2004	III/2008		XII/2010	X/2013
20	nema podatka	9,7 Ω	10,7 Ω	15,8 Ω	nema podatka	9,3 Ω	8,9 Ω

4.1.3. Uzemljenje objekta sa specijalnim zahtjevima (bolnica UKCLJ)

Kod gradnje nekoliko novih objekata u UKC Ljubljana (npr. Urgentni blok) upotrijebljen je grafitni prah kao punilo za štapne uzemljivače. UKCLJ se nalazi na šljunkovitom području i temelji (Slika 5) su praktično na terenu specifičnog otpora od preko 1.000 Ω m.

U konkretnom primjeru sanacije starog sustava uzemljenja, koji je već imao ugrađenih 45 kemijskih sonde tipa CR-8 dodano je još 21 štapnih cijevnih uzemljivača od prokroma (dužine 5,5 m, promjera 50 mm) položenih u zaštitnu perforiranu čeličnu cijev i (dužine 5,5 m, promjera 100 mm) položenih u izbušenu rupu dubine preko 4 m, promjera 150 mm. Potrošeno je oko 45 kg grafitnog praha po sondi (Slika 6.).

Prosječan otpor 21 sonde je bio 51,57 Ω odnosno zajednički otpor je bio 2,44 Ω . Povezivanjem svih kemijskih i novih sonde te drugih elemenata u zajednički sustav uzemljenja postignut je otpor 0,63 Ω .



Slika 5. Šljunkovito tlo oko UKCLJ



Slika 6. Štapasti uzemljivač s grafitnim prahom u šljunku

4.2. Testiranje rješenja uzemljivača u Hrvatskoj

Hrvatska distribucija ima iskustva sa kemijskim sondama i punilom od bentonita. Prezentirani su praktični primjeri uporabe tih materijala na području HEP ODS d.o.o. Elektroistra Pula.

4.2.1. Dosadašnja iskustva u primjeni kemijskih sonde u Elektroistri Pula

U Elektroistri se prilikom izgradnje novog sustava veza prišlo izgradnji pet repetitorskih stanica. Na dvije od njih, Sveti Martin i Goli, nije bio moguće klasičnim metodama postići tražene otpore uzemljenja (< 5 Ω).

Odlučeno je da se željeni iznosi otpora uzemljenja pokušaju dobiti primjenom potpuno novog načina uzemljenja, pomoću kemijskih sonde. Takav način uzemljenja uobičajen je do tada bio u SAD-u upravo za ovakve vrste objekata, ali isto tako i za uzemljenje klasičnih elektroenergetskih objekata.

Kemijske sonde upotrijebljene su i za poboljšanje otpora uzemljenja na dalekovodu 35 kV Raša - Starca.

4.2.1.1. Repetitorske postaje

Na lokacijama repetitorskih postaja Sveti Martin i Goli uzemljenje je izvedeno posebnim kemijskim sondama. Ugradnja sondi izvršena je 3. rujna (Sveti Martin) i 4. rujna (Goli) 1991. godine.

Za polaganje kemijskih sondi bušene su rupe promjera 300 mm i dubine 3 m. Koristilo se dijamantno svrdlo. U središte tako izbušene rupe položena je sonda, koja je pridržavana dok se preostali prostor bušotine zapunjavao žitkom mješavinom čiste zemlje, riječnog pijeska, specijalnog punila (GAF) i vode. Sonde su isporučene s umetnutim punilom. Nakon što su položene, sve sonde međusobno su povezane bakrenim užetom presjeka 70 mm² i spojene na postojeći sustav uzemljenja. Svaka sonda nalazi se u svom zdencu, pokrivenom plastičnim poklopcem, koji ujedno služi i kao mehanička zaštita.

Sonde su periodički dopunjavane vodom uz istovremeno mjerenje otpora uzemljenja, radi praćenja njegove promjene u ovisnosti o vremenu proteklom od polaganja sonde. Mjerenja su vršena Behrendovom metodom. Nekoliko puta su izvršena kontrolna mjerenja UI metodom. Mjerenjem su dobiveni rezultati gotovo istih iznosa, neovisno o korištenoj mjernoj metodi.

Vrijednost otpora uzemljenja na Svetom Martinu, primjenom kemijskih sonde za uzemljenje, stabilizirala se na približno 25 Ω, a na Golom na približno 26 Ω. Dobiveni iznosi otpora uzemljenja su obzirom na teren veoma povoljni, no konačni je iznos otpora uzemljenja još uvijek znatno veći od zahtijevanog, trebao je biti manji od 5 Ω.

4.2.1.2. DV 35 kV Raša – Starca

Dvostruki 35 kV dalekovod Labin 3 i 4, između TS 110/35/10(20) kV Raša i TS 35/10(20) kV Starca, dužine 5,235 km, presjeka 3x120 mm², sa zaštitnim užetom i na čelično-rešetkastim stupovima (34 komada) izgrađen je 1967. godine (Slika 7). Nalazi se u zoni s 40 - 45 grmljavinskih dana godišnje.



KEMIJSKA SONDA
prije ugradnje šahta

Glava kutno-rasteretnog
stupa

Stupovi 6 i 7

Slika 7. Detalji sa dalekovoda 35 kV Raša – Starca

Navedeni dalekovod je zbog velikog broja ispada predstavljao prilično nesigurno napajanje Labina, pa su na njegovim krajevima ugrađeni metaloksidni odvodnici prenapona, već na samom početku njihove primjene 1992. godine. Pregledom je ustanovljeno vrlo loše stanje zaštitnog užeta te je i ono zamijenjeno. Dalekovod je međutim i dalje vrlo često ispadao.

Promatrajući trasu dalekovoda uočljivo je da je mali dio dalekovoda neposredno na izlazu iz TS Raša, zbog svog geografskog položaja vrlo vjerojatno najviše izložen udarima groma. Isto su potvrdili i očevici, pa i stanje zaštitnog užeta koje je upravo u tom predjelu najviše oštećeno. Izmjereni su otpori uzemljenja stupova i ustanovljen je izuzetno loš otpor na stupovima 6 i 7, što je potkrijepilo tvrdnju o mogućem uzrokovanju većine kvarova upravo na ovom dijelu dalekovoda. Nakon toga je na stupovima 6 (kutno-rasteretni) i 7 (nosni), u kolovozu 1994. godine izvršeno sljedeće:

- popravljeno je uzemljenje, ugradnjom po tri kemijske sonde duljine dva metra, na međusobnom razmaku od četiri metra i povezane na uzemljivač stupa,
- ugrađeni su odvodnici tip MWK 36, ABB, paralelno sa izolatorskim lancima u sve tri faze, na oba stupa.

Promatranjem događaja na dalekovodu nakon ovih izvršenih radova u razdoblju od 1994. - 2013. može se zaključiti da su zahvati bili efikasni, jer gotovo da više i nema ispada.

4.2.2. Uzemljenje stupne TS

Na području općine Medulin kod izgradnje stupne TS 10(20)/0,4 kV Fontana Pomer radi povećanog specifičnog otpora tla, za poboljšanje otpora uzemljenja korištena je mješavina bentonita i čiste zemlje. Bentonit je vrsta gline koji ima malu specifičnu otpornost. On dobro apsorbira i zadržava vodu i u kontaktu s vodom višestruko povećava volumen, u takvom stanju dobro prijanja uz uzemljivačku traku za uzemljenje s jedne strane, a s druge za okolno tlo te smanjuje prijelazni otpor sa uzemljivača na zemlju. Mjerenjem otpora zaštitnog uzemljenja nakon izgradnje TS Fontana Pomer 2000. godine, utvrđeno je 8,61 Ω , što je zadovoljavalo tadašnje zahtjeve za pogon mreže.

Ponovljenim mjerenjem 2013. godine nakon relativno sušnog perioda u više navrata izmjereno je zaštitno uzemljenje 18,7 Ω . Izmjereni rezultat navodi na potrebu analize zbog značajnog pogoršanja stanja zaštitnog uzemljenja, koje ne zadovoljava uvjete iz projekta i propisa za pogon trafostanice.

Analizom rezultata mjerenja i uviđaja na terenu došlo se do zaključka da je uporaba bentonita za poboljšanje otpora uzemljenja prilikom puštanja u pogon trafostanice zadovoljavala iz razloga što je u to vrijeme bila povećana vlažnost tla (25.4.2000.). Međutim, kasnije uz nekoliko vrlo toplih i sušnih godina zbog toga što se bentonit uslijed vlage odnosno suše skuplja i širi, dolazi do odvajanja od zemlje pa se mijenjaju i rezultati mjerenja otpora uzemljenja, u ovom slučaju na lošije.

Zaključak je da upotreba bentonita kao sredstva za poboljšanje otpora uzemljenja u područjima gdje su povećani sušni periodi (Istra, Primorje i Dalmacija), ne daje dobre rezultate, što dokazuje primjer na TS Fontana Pomer. Navedeni primjer usmjerava na primjenu novih tehnologija.

5. SANACIJA UZEMLJIVAČKOG SUSTAVA TS SAN MARCO S GRAFITNIM PUNILOM

5.1. Proračun novog uzemljivačkog sustava TS SAN MARCO

Na osnovi zbirnih podataka o otporu uzemljenja i naponu dodira, Pogon Rovinj – 10(20) kV mreža napajana iz TS 110/35/10(20) kV Turnina [13], odlučeno je da se sanira uzemljivač TS SAN MARCO, koji je imao otpor 4,6 Ω [13]. Ujedno je i lokacija TS pogodna za sanaciju (travnjak) što je vidljivo na slici 8 i 9.

Podaci za izračun uzemljivača TS SAN MARCO (Slika 8. i 9.) [14]:

- popravljeno je uzemljenje, ugradnjom po tri kemijske sonde, duljine dva metra, na međusobnom razmaku od četiri metra i povezane na uzemljivač stupa,
- granična vrijednost otpora uzemljenja TS: $R_E = 3,29 \Omega$ ($R_{\max} = U_m / I_k = 280 \text{ V} / 5 \text{ A} = 3,29 \Omega$),
- izmjerene maksimalne vrijednosti otpora uzemljenja postojećeg uzemljivača: $R_{E\text{stari}} = 4,17 \Omega$,
- specifični otpor tla: $\rho = 108 \Omega\text{m}$,
- dubina ukopa uzemljivača: $H = 0,7 \text{ m}$,
- dužina jednog kraka trakastog (horizontalno ukopanog) uzemljivača: $l = 25 \text{ m}$,
- polovina širine trake $d = 0,015 \text{ m}$.

Poželjno je da se prije samih građevinskih radova pomoću Wennerove metode na različitim udaljenostima između elektroda izmjeri vrijednost specifičnog otpora.

Pretpostavke za izračun novog sustava uzemljenja i njegove povezanosti s postojećim:

VRSTA ZEMLJE	Specifični otpor (Ωm)
Glina, ilovača, obrađiva zemlja	100
Vlažan pijesak	200

Otpor uzemljenja trakastog uzemljivača, koji je postavljen na dubini H, izračunavamo po formuli:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{H \cdot d} \quad (1)$$

Postavit ćemo trake RF 30 x 3,5 mm na dubinu $H = 0,7 \text{ m}$ (dužina $l = 25 \text{ m}$).

$$R = k_t \cdot \frac{\rho}{l} \quad (2)$$

$$k_t = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{l^2}{H \cdot d} = 1,75 \quad (3)$$

Otpor pojedinačnih krakova novog uzemljivača:

$$R = k_t \cdot \frac{\rho}{l} \quad (4)$$

$$R = 1,75 \cdot \frac{108 \Omega m}{25 m} = 7,56 \Omega \quad (5)$$

Poboljšanje otpora uzemljenja s korištenjem grafitnog praha je cca 36 %.

Otpor kraka uzemljivača u grafitnom prahu je $7,56 \Omega \times 0,64 = 4,84 \Omega = \text{cca } 5 \Omega$

Ukupni otpor novog uzemljivača:

Iz otpora pojedinačnih krakova novog uzemljivača i starog uzemljivača možemo izračunati ukupni otpor novog uzemljivača:

$$\frac{1}{R_{Enov}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (6)$$

$$\frac{1}{R_{Enov}} = \frac{1}{5 \Omega} + \frac{1}{5 \Omega} + \frac{1}{5 \Omega} \quad (7)$$

$$\frac{1}{R_{Enov}} = 3 \cdot 0,2 = 0,6 \Omega^{-1} \quad (8)$$

$$R_{Enov} = 1,67 \Omega \quad (9)$$

S povezivanjem starog i novog uzemljivača dobivamo:

$$\frac{1}{R_{Euk}} = \frac{1}{R_{Enov}} + \frac{1}{R_{Estar}} \quad (10)$$

$$\frac{1}{R_{Euk}} = \frac{1}{1,67 \Omega} + \frac{1}{4,17 \Omega} \quad (11)$$

$$R_{Euk} = 1,2 \Omega < 3,2 \Omega \quad (12)$$

Tijekom završne sanacije uzemljenja potrebna je rezerva od barem 10 %, dakle postići otpor udruženog uzemljenja max. $1,32 \Omega$.

5.2. Izvedba novog uzemljivačkog sustava TS SAN MARCO

Izrađen je prsten oko TS i tri kraka uzemljenja dužine 25 m. Svi novi krakovi uzemljenja i prsten povezuju se sa starim uzemljivačem.

U iskopani rov najprije se nanosi zemlja visoke kakvoće na kojoj se nalazi inox traka $30 \times 3,5$ mm RH1 (EN 62305-3). Inox traka obasipa se grafitnim prahom (Slike 10-12), a na vrh se dodaje još zemlja visoke kakvoće. Nanesena zemlja mora biti učvršćena, a rov se na vrhu nasipa s postojećom zemljom.

Postavljanje trake za uzemljenje u grafitni prah (Slike 10-12):

- iskopan je rov dubine cca 80 cm; 3 kraka dužine 25 m i prsten oko stupa trafostanice (2 m od stupa),
- na mjestima gdje je zemlja slaba (npr. kamenje) potrebno je dodati kvalitetnu zemlju i dno rova izravnati,
- pomoću motike na sredini rova iskopa se mali rov u kojeg se postavlja inox traka,
- inox traka spaja se s postojećom bakrenom žicom koja je priključena na vijak za uzemljenje na betonskom stupu (2x),
- inox traka postavlja se od stupa na svaku stranu rova,
- inox traka se spojkama poveže s postojećom Fe-Zn trakom u zemlji,
- na inox traku nanese se grafitni prah - jedna vreća pokrije cca 2,8 m dužine trake,
- inox traku malo se podigne da grafitni prah obuhvati traku,
- preporučljivo je da se na prijelazu iz zemlje inox traka izolira,
- zemlja se nasipava u rovove.



Slika 8 - 9. Lokacija i pogled na TS SAN MARCO



Slika 10 - 12. Struktura rova i faze polaganja inox trake i grafitnog praha

5.3. Rezultati mjerenja novog uzemljivačkog sustava TS SAN MARCO

Neovisna institucija je izvršila mjerenja otpora uzemljenja prije [14] i poslije sanacije uzemljivačkog sustava [15]. Ujedno su vršena paralelna mjerenja izvođača sanacije uzemljivača (prikazani rezultati su u tablici IV).



Slika 13-14. Lokacija novih inox traka (crtkano) i pozicije sonde (mjerenja) TS SAN MARCO

Legenda: E – priključak na uzemljivač – ispitno mjesto;
S – priključak na prvu sondu (20 m od uzemljivača);
H – priključak na drugu sondu (40 m od uzemljivača).

Lokacija novih inox traka (crtkano) i pozicije sonde (mjerenja neovisne institucije) TS SAN MARCO su prikazane na slici 13-14. Rezultati mjerenja su prezentirani u tablici IV.

Razlika u rezultatima prezentiranih u tablici IV. se može povezati:

- s različitim pozicioniranjem sonde (unutar/izvan potencijalnog lijevka) odnosno većih ili manjih razdaljina (S, H) od priključka uzemljivača (E) te rasporedom istih (npr. u ravnoj crti E - S (20 m) – R - H (40 m) ili u jednakokraničnom trokutu kada su sonde u vrhu trokuta sa stranicama 50 m),
- zbog nehomogenosti strukture terena (mješovito, kamen, humus, vlažno, suho),
- zbog nepoznavanja stvarnog položaja starog uzemljivača,
- ovisno o iskustvu ispitivača te kvalitetom mjerne opreme.

Tablica IV. Izmjerena vrijednost otpora uzemljenja prije i poslije sanacije uzemljivačkog sustava

I FAZA		II FAZA		Smanjenje
Datum ispitivanja	16.11.2017	Datum ispitivanja	23.01.2018	
	Ru (Ω)^{1,2}		Ru (Ω)^{3,4}	
Mjerno mjesto 1	4,06 (3,86)	Mjerno mjesto 1	0,85 (0,74)	
Mjerno mjesto 2	2,37 (2,18)	Mjerno mjesto 2	1,26 (0,52)	
Mjerno mjesto 3	3,66 (3,24)	Mjerno mjesto 3	0,77 (0,68)	
Mjerno mjesto 4	4,17 (4,25)	Mjerno mjesto 4	1,65 (1,20)	
Srednja vrijednost	3,56¹ (3,38)²	Srednja vrijednost	1,13³ (0,78)⁴	4x (4,33x)

gdje je: Ru (Ω) – Izmjerena vrijednost otpora uzemljenja

1,2: (1) – mjerenja neodvisne institucije prije sanacije [14]; (2) – mjerenja izvođača,

3,4: (3) – mjerenja neodvisne institucije nakon sanacije [15]; (4) – mjerenja izvođača.

6. ZAKLJUČAK

Prikazana praktična rješenja s grafitnim prahom predstavljaju neka od mogućih rješenja i mogu se upotrijebiti uvijek kada je to ekonomski ili tehnički opravdano.

Da bi se potvrdile tehničke i ekonomske prednosti uporabe punila, odnosno grafitnog praha, mora se poznavati i prepoznati utjecaj puno faktora:

- vrsta tla (otpor, vlažnost, kiselost, korozivnost) – podaci bi morali biti mjereni u istim uvjetima (suho, vlažno, toplo, hladno) s istom mjernom metodom i instrumentima uz iskusno osoblje,
- stručnjaci iz održavanja morali bi imati dokumentaciju o uzemljivačima (proračun, tip, količine materijala, starost – prva ugradnja, npr. fotografija polaganja, sanacije, mjerenja),
- praćenje podataka otpora uzemljivača od projekta preko periodičnog ispitivanja uz zahtjev da izvješće o rezultatima mjerenja odgovori na sva u gornjoj alineji navedena tehnička pitanja, uz komentar o stanju uzemljivača na terenu (otkopati te provjeriti spojeve i korozivnost materijala),
- ekonomska analiza (količina materijala, građevinski radovi, utjecaj na okoliš, zahtjevi za održavanje, otpornost na koroziju).

Pilot projekt sanacije uzemljivačkog sustava TS SAN MARCO je u potpunosti uspio. Rezultati sanacije su bolji od računskih što je potvrđeno mjerenjima.

Uporabom grafitnog punila smanjen je otpor uzemljenja transformatorske stanice ispod maksimalno dozvoljenog!

7. LITERATURA

- [1] V. Lovrenčić, D. Mišković, S. Drandić, "Pregled uporabe materijala za smanjenje otpora uzemljenja transformatorskih stanica". 4. (10.) savjetovanje Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije CIRED (SO1-15), Seget donji/Trogir, svibanj 2014.

- [2] M. Vidmar, "Načrtovanje, projektiranje, graditev, obratovanje in vzdrževanje elektroenergetskega sistema, njegovih objektov, postrojev, naprav in napeljav, Skladno s pravno ureditvijo", ELEK, Ljubljana, ožujak 2005.
- [3] F. Majdandžić, "Uzemljivači i sustavi uzemljenja", Graphis, Zagreb, lipanj 2004.
- [4] D. Petranović, "Izrada pravilnika o tehničkim zahtjevima za elektroenergetska Postrojenja nazivnog napona iznad 1 kV", 2.(8.) savjetovanje HO CIRED, SO1-15, Umag, svibanj 2010.
- [5] N. Vrandečić, "Problem određivanja najveće dopuštene impedancije uzemljivača u mreži uzemljenoj preko maloomskog otpornika", 3. (9.) savjetovanje HO CIRED, SO2-17, Sveti Martin na Muri, Hrvatska, svibanj 2012.
- [6] Prospektna dokumentacija, LORESCO®, SAD (Dostupno na <http://www.loresco.com/index.html>).
- [7] A. Bajec, "Ozemljitve v električnih napravah, I. DEL", Elektrotehniški priročnik, Snopič 4, Elektrotehniško društvo Slovenije, Ljubljana, 1960.
- [8] V. Lovrenčić, J. Bračko, "Izboljšanje prevodnosti tal pri izvedbi ozemljitev z uporabo polnil s predstavitvijo pilotskega projekta uporabe grafitnega praha Loresco®", 28. posvetovanje o Močnostni elektroenergetiki in sodobnih električnih inštalacijah »Kotnikovi dnevi«, Radenci, Slovenija, ožujak 2007.
- [9] S. Hutter, G. Šagovac, "Provjera stanja uzemljivačkih sustava distribucijskih stanica TS 10(20)/0.4 kV u rezonantno uzemljenim SN mrežama", 2.(8.) savjetovanje HO CIRED, SO1-15, Umag, svibanj 2010.
- [10] D. Mišković, "Smanjenje broja povratnih preskoka na nadzemnim srednjenaponskim vodovima s visokim otporima uzemljivača", Sveučilište u Zagrebu – Fakultet elektrotehnike i računarstva, Magistarski rad, Zagreb, 2001.
- [11] Elaborat provedbe sanacije uzemljivačkog sustava TS SAN MARCO s korištenjem punila LORESCO, 1. faza: koncept i proračun, br. 173/JB/17, C&G Ljubljana/CiG Pula, 22.12.2017.
- [12] Elaborat provedbe sanacije uzemljivačkog sustava TS SAN MARCO s korištenjem punila LORESCO, 2. faza: sanacija, br. 188/JB/18, C&G Ljubljana/CiG Pula, 30.1.2018.
- [13] Zapisnik o mjeranju otpora uzemljenja i napon dodira br. 328-08-15/01-RM, Lokacija: Pogon Rovinj – 10(20) kV mreža napajana iz TS 110/35/10(20) kV Turnina, TRAFOSTANICA TS „SAN MARCO“, ZAŠTITA INŽENJERING KONZALTING d.o.o. Rovinj, 3.9.2015.
- [14] Zapisnik o mjeranju otpora uzemljenja br. 375-11-17/02-RM, Lokacija: Pogon Rovinj – 10(20) kV mreža napajana iz TS 110/35/10(20) kV Turnina, ZAŠTITA INŽENJERING KONZALTING d.o.o. Rovinj, 16.11.2017.
- [15] Zapisnik o mjeranju otpora uzemljenja br. 015-01-18/01-RM/NR, Lokacija: Pogon Rovinj – 10(20) kV mreža napajana iz TS 110/35/10(20) kV Turnina, TRAFOSTANICA TS „SAN MARCO“, ZAŠTITA INŽENJERING KONZALTING d.o.o. Rovinj, 23.1.2018.