

Dean Dereani
Cemex Hrvatska d.d.
dean.dereani@cemex.com

Ivo Zlatunić
Fractal d.o.o.
ivo@fractal.hr

Tomislav Vuletić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
tomislav.vuletic@dalekovod.hr

Stipe Vukasović
Cemex Hrvatska d.d.
stipe.vukasovic@cemex.com

Ante Kovačević
Kapar d.o.o.
kapar@st.ht.hr

ANALIZA ZDRUŽENOG UZEMLJIVAČKOG SUSTAVA TVORNICE CEMENTA SV.JURAJ

SAŽETAK

U referatu su prikazane aktivnosti i kriteriji na osnovu kojih je održavanje uzemljivača pojedinačnih objekata (ukupno 74 uzemljivača objekata) koji se nalaze u sastavu tvornice cementa Sv. Juraj analizirano i objedinjeno u jedan plan održavanja združenog uzemljivačkog sustava. Distributivni sustav tvornice cementa obuhvaća tri naponske razine i tri sustava uzemljenja prisutnim u istim objektima. Obzirom na funkcije uzemljivačkog sustava (pogonsku, zaštitnu i zaštitu od munje) kojima je zajednički dio temeljni uzemljivač sa svojim otporom bilo je potrebno iz više različitih Pravilnika i Propisa te prozvanih normi definirati potrebne aktivnosti provjere funkcionalnosti sustava, granične vrijednosti i intervale ponavljanja održavanja kojima usklađujemo sve zahtjeve legislative sa optimalnim angažiranjem svih potrebnih resursa te minimalnim utjecajem na vremensku raspoloživost postrojenja.

Ključne riječi: združeni uzemljivački sustav, otpor uzemljivača, funkcije uzemljivačkog sustava

GLOBAL EARTHING SYSTEM ANALISES FOR CEMENT PLANT SV.JURAJ

SUMMARY

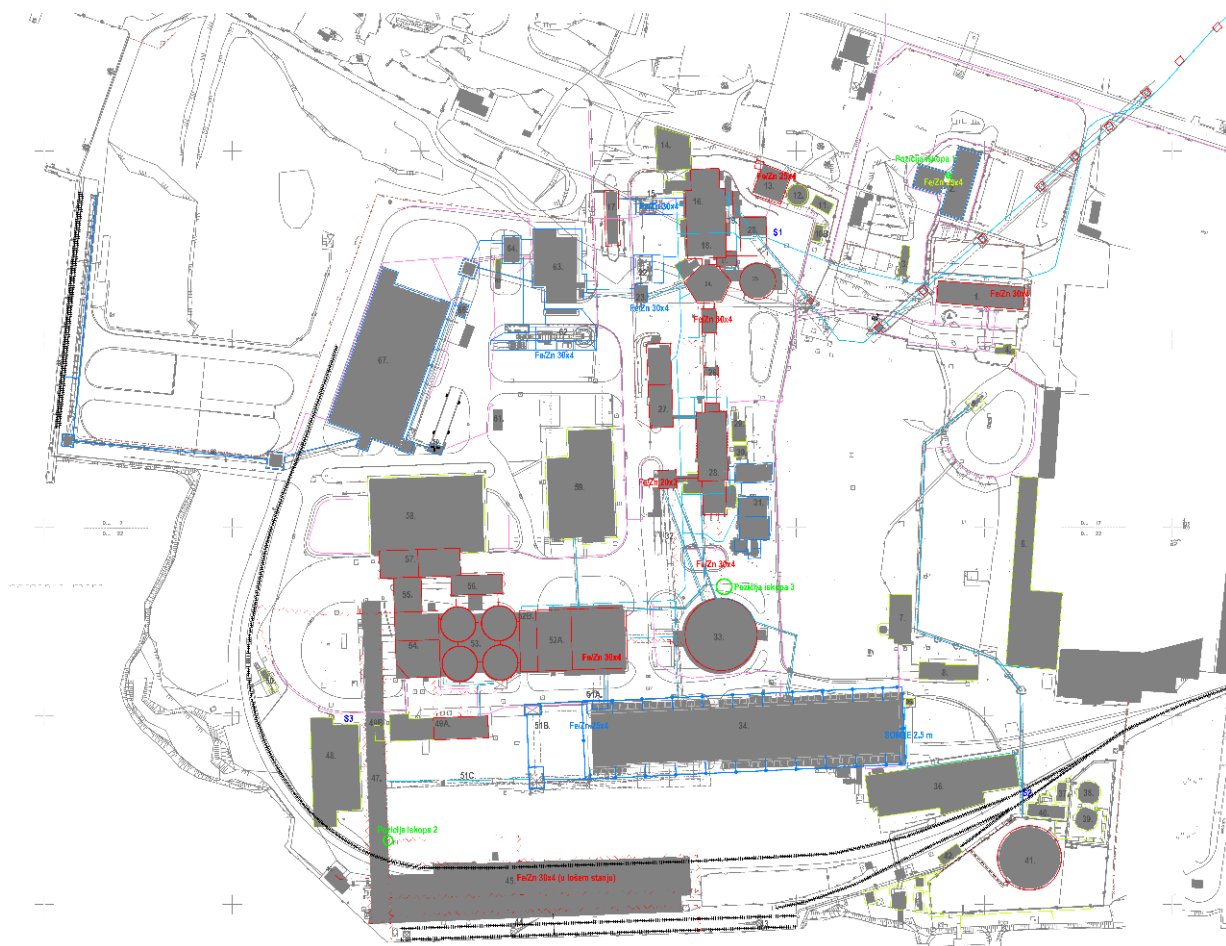
The article presents the activities and criteria which are analyzed and integrated in one plan of maintaining the global grounding system according 74 objects grounding systems belonging in cement plant Sv.Juraj. The cement plant power distribution systems comprise three voltage levels and three grounding systems present in same facilities. Due to the functions of grounding system (protection of humans, protection of equipment and lightning protection), which share underground installation with its resistance, it was necessary to define scope of activities to check the functionality of the system, the limit values and intervals of maintenance activities according different regulations, bylaws and obligatory norms with goal to determine optimal engagement of all required resources and minimal impact to the availability of production in plant.

Key words: global grounding system, resistance to earth, functions of grounding systems

1.1. Cilj analize

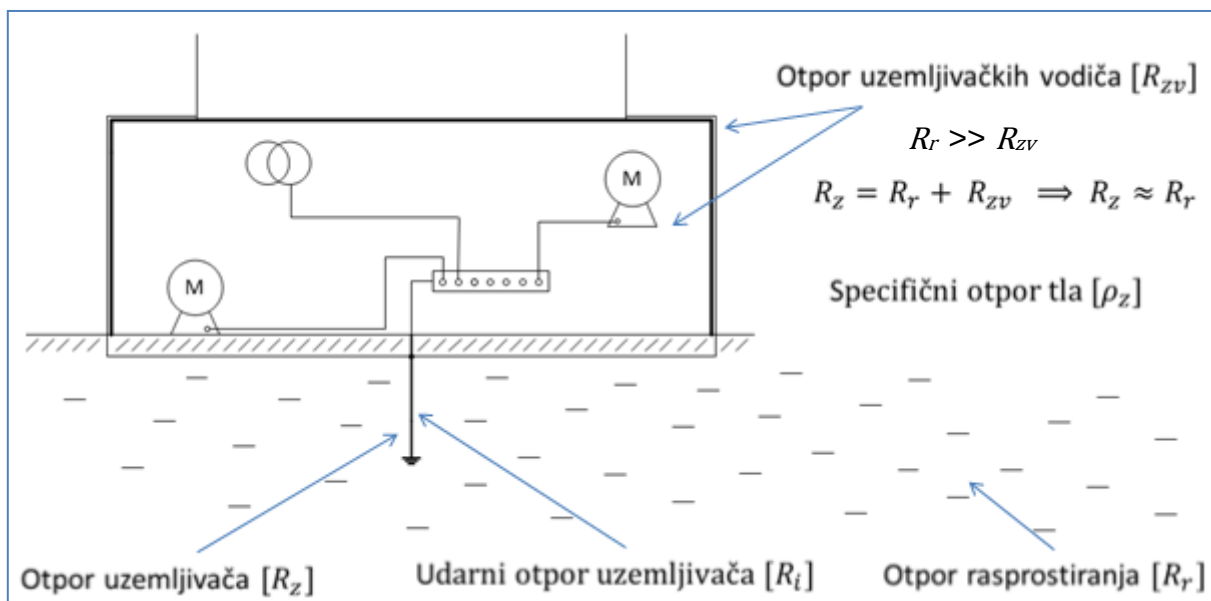
Rad prikazuje poduzete aktivnosti za podizanje stupnja pouzdanosti svih funkcija sustava uzemljenja (pogonsko, zaštitno uzemljenje i zaštita od udara munje) te usklađivanje sa zahtjevima regulative uz prihvatljive troškove eksploatacije i održavanja.

U tvornici cementa Sv. Juraj postoje tri naponske razine sa različitim metodama uzemljenja pri čemu je 35kV razina uzemljena preko malog otpornika (TN-C), 6kV razina ima IT sustav i 0,4kV razina ima TN-C i TN-C/S sustav distribuiran unutar 74 objekta izgrađenih u različitim razdobljima unutar zadnjih 50 godina. Dosadašnji plan preventivnih aktivnosti koji se temeljio na uputama iz pojedinačnim projekata spomenutih objekata, a uvažavajući pri tome činjenicu da su temeljni uzemljivači objekata vjerojatno međusobno povezani potaknuo je izradu elaborata tj. analizu sustava uzemljenja za cijeli industrijski kompleks sa namjerom utvrđivanja njegovog stanja, prepoznavanje eventualnih nedostataka iz aspekta združenog uzemljivačkog sustava te utvrđivanja zajedničkih preventivnih aktivnosti koje u budućnosti mogu ukazati na stanje sustava. Kompletan slika uzemljivačkog sustava je prikazana je slikom 1.



Slika 1. Situacija uzemljivačkog sustava tvornice

1.3 Oprema obuhvaćena analizom



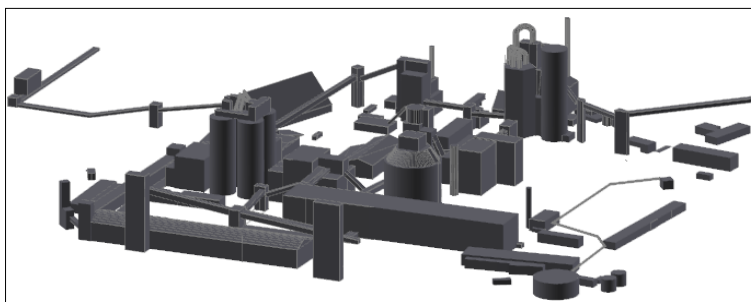
Slika 2. Elementi uzemljivačkog sustava

Uzemljivački sustav je skup veza između metalnih dijelova i zemlje, sa ciljem da se tim dijelovima nametne najmanja moguća razlika napona prema zemlji. Kako je otpor uzemljivačkih vodiča (R_{zv}) zanemariv u odnosu na otpor rasprostiranja (R_r), a ukupni otpor uzemljivača (R_Z) je zbroj otpora rasprostiranja i otpora uzemljivačkih vodiča, može se smatrati da su otpor rasprostiranja i otpor uzemljivača približno jednaki ($R_Z \sim R_r$).

Uzemljivački sustav ima tri funkcije:

- **Zaštitno uzemljenje** – u slučaju dozemnog kvara uzemljivač postrojenja bude tako izveden da naponi dodira i koraka, budu manji od propisima dozvoljenih napona na svim mjestima unutar i izvan ograde postrojenja.
- **Pogonsko uzemljenje** – omogućuje djelovanje zaštite i pravilan rad opreme odnosno postrojenja.
- **Zaštita od udara munje** - preuzima na sebe izravni udar munje. Prihvaćenu struju munje odvodi sa objekta u zemlju.

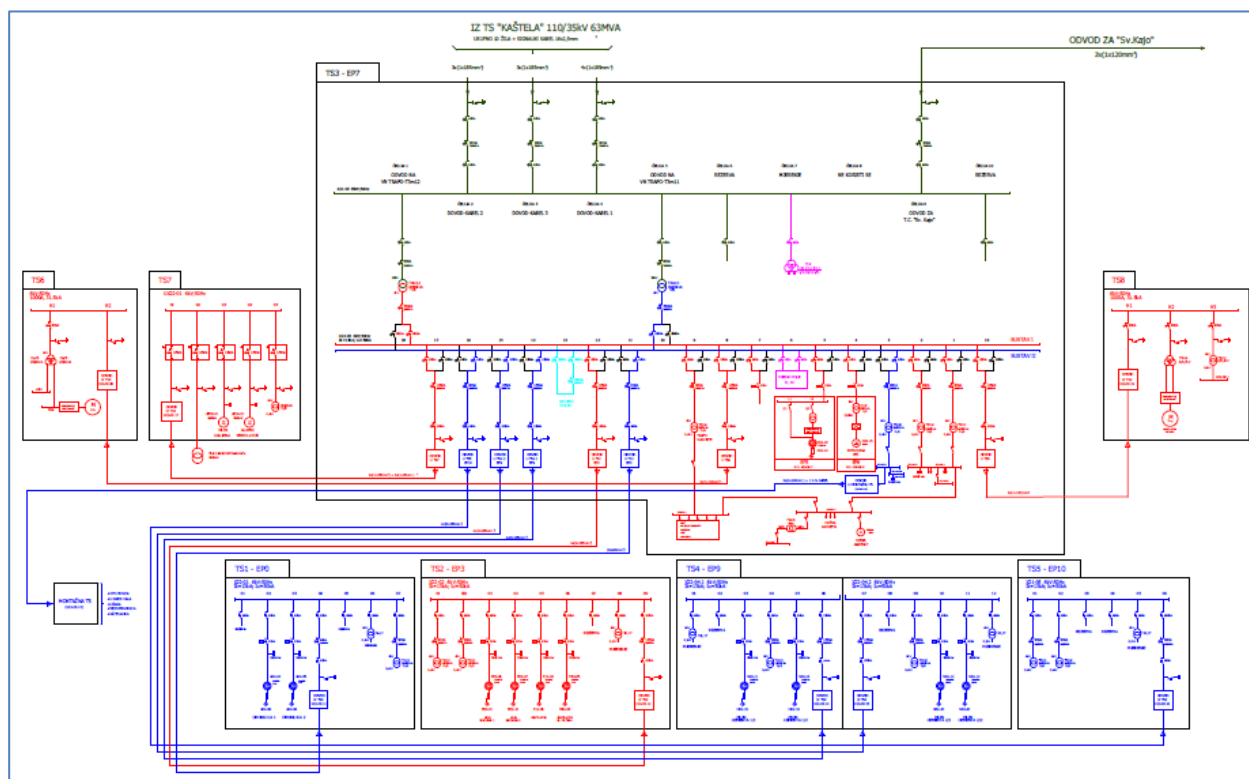
Analizom su obuhvaćeni **nadzemni dijelovi** sustava odgovorni za zadovoljavanje triju navedenih funkcija (uzemljivački vodiči odgovorni za pogonsko i zaštitno uzemljenje, vodiči za izjednačavanje potencijala odgovorni za zaštitno uzemljenje, te hvataljke i munjovodi odgovorni za zaštitu udara od munje) i **podzemni** dio sustava (temeljni uzemljivači sa međusobnim vezama) na kojeg su spojeni svi nadzemni dijelovi. Za lakšu analizu međuovisnosti objekata izrađen je 3D model na kojeg su preklopljene zone štićenja i model raspodjele potencijala (Slika 3.).



Slika 3. 3D prikaz svih objekata tvornice Sv. Juraj

2. ANALIZA UZEMLJIVAČKIH SUSTAVA

U sustavu tvornice cementa postoje tri naponske razine koje su nalaze unutar kompleksa tvornice. Tvornica cementa se napaja 35 kV kabelom iz trafostanice „TS Kaštela“ s transformatora 63 MVA (110/35) kV. Udaljenost „TS Kaštela“ do tvornice cementa je cca. 2400 m (Slika 4.).



Slika 4. Jednopolna shema razvoda 35 i 6 kV razina tvornice Sv. Juraj

Tvornica cementa je promjera cca. 500 m. Unutar tvornice 35 kV kabel dolazi u zgradu centralno upravljačke stanice (CUS-e) u transformatorsku stanicu TS3 na sabirnicu. S 35 kV-ih sabirnica se napajaju dva transformatora 16 MVA i 20 MVA (35/6) kV.

Na 6 kV strani su odvodi prema transformatorima (6/0,4) kV u istom objektu i odvodi prema transformatorima (6/0,4) kV u drugim objektima. 6 kV sabirnice postoje i u drugim objektima (trafostanicama) s odvodima prema transformatorima i odvodima kojima se direktno napajaju 6 kV motori.

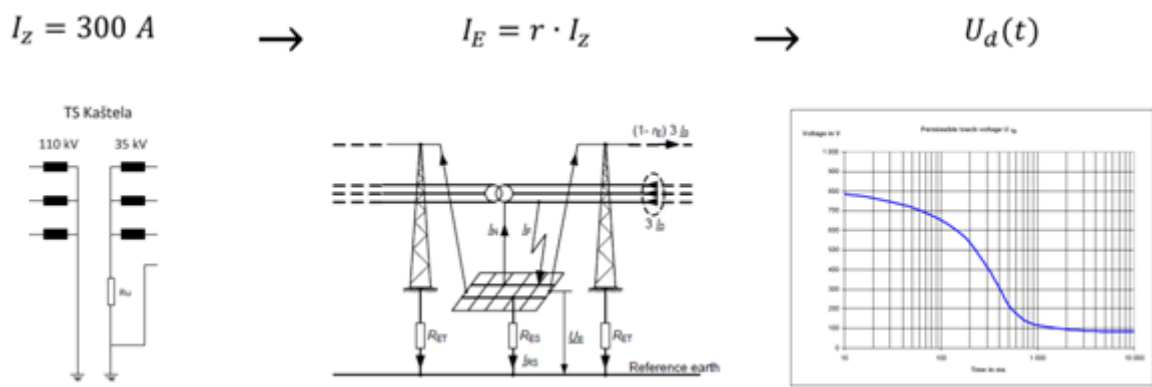
Nakon transformacije na 0,4 kV napajaju se trofazna i jednofazna trošila koja se nalaze unutar i izvan objekata koji su opremljeni temeljnim uzemljivačem.

2.1. 35kV TN sustav – kriterij za zaštitno uzemljenje

35 kV strana transformatora 110/35 kV uzemljena je preko malog otpornika (70Ω) zbog ograničenja struje kvara na 300A.

Kriterij zaštitne funkcije kaže da otpor uzemljivača mora biti manji od omjera dozvoljenog napona dodira i struje kvara:

$$R_Z \leq \frac{U_d}{I_E} \quad (1)$$



Slika 5. 35kV TN sustav tvornice Sv.Juraj

U normi [HRN EN 50522 - Uzemljenje električnih postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1kV] je definiran trajno dozvoljeni napon dodira 80VAC (Slika 5.), ali kako se 35kV postrojenje nalazi u objektu gdje su smješteni radni prostori za zaposlenike a koji su napojeni sa instalacijama niskog napona, kao stroži kriterij uzima se kriterij iz norme [HD 60364-4-41 - Niskonaponske električne instalacije – Sigurnosna zaštita – Zaštita od električnog udara] koji dozvoljava napon dodira od 50VAC. Norma HRN EN 50522 za tip kabela kojim se napaja 35kV postrojenje dozvoljava upotrebu redukcijskog faktora ($r = 0,6$), pa je konačni kriterij zaštitne funkcije na 35kV TN sustavu:

$$R_Z \leq \frac{50V}{0,6 \times 300A} = 0,28\Omega \quad (2)$$

2.2. 6kV IT sustav – kriterij za zaštitno uzemljenje

Kako je kod IT sustava uzemljenja, zvjezdište izolirano, jedini spoj sa zemljom se ostvaruje preko dozemnih kapaciteta kabela. Maksimalna kapacitivna struja u kompleksu tvornice iznosi do cca. 17A, a proradna struja zaštite nadzora dozemnog spoja je 15A. Nerijetko se izolirana mreža ostavlja kratkotrajno pod naponom i u slučaju nastupa zemljospoja (uz indikaciju kvara) jer se napon na niskonaponskoj strani ne mijenja, a fazni napon na 6 kV strani poprimi linijski napon tako da se pogon može nastaviti, ali je nužno otkloniti kvar u što kraćem roku, da se smanji rizik nastanka zemljospoja druge faze na nekoj lokaciji.

$$R_Z \leq \frac{50V}{17A} = 2,9\Omega \quad (3)$$

2.3. 0,4kV TN sustav – kriterij za zaštitno uzemljenje

U TN sustavima najveći dio struje pri jednopolnom kratkom spoju se vraća kroz PE i N vodič prema zvjezdištu transformatora tako da struja zaobilazi put kroz tlo. Iznimka od navedenog su samo situacije u kojima dolazi do prekida PEN vodiča, ali navedene situacije se rijetko događaju i moguće ih je

u potpunosti izbjeći kroz redovna ispitivanja instalacija. Struja kvara je ograničena priradnom strujom zaštite npr. u slučaju osigurača 16A (B karakteristike, $5 \times I_n$), otpor rasprostiranja ili otpor uzemljivačkih vodiča koji osigurava da napon dodira ne pređe dozvoljeni nivo, iznosi:

$$R \leq \frac{50V}{5 \times 16A} = 0,625\Omega \quad (4)$$

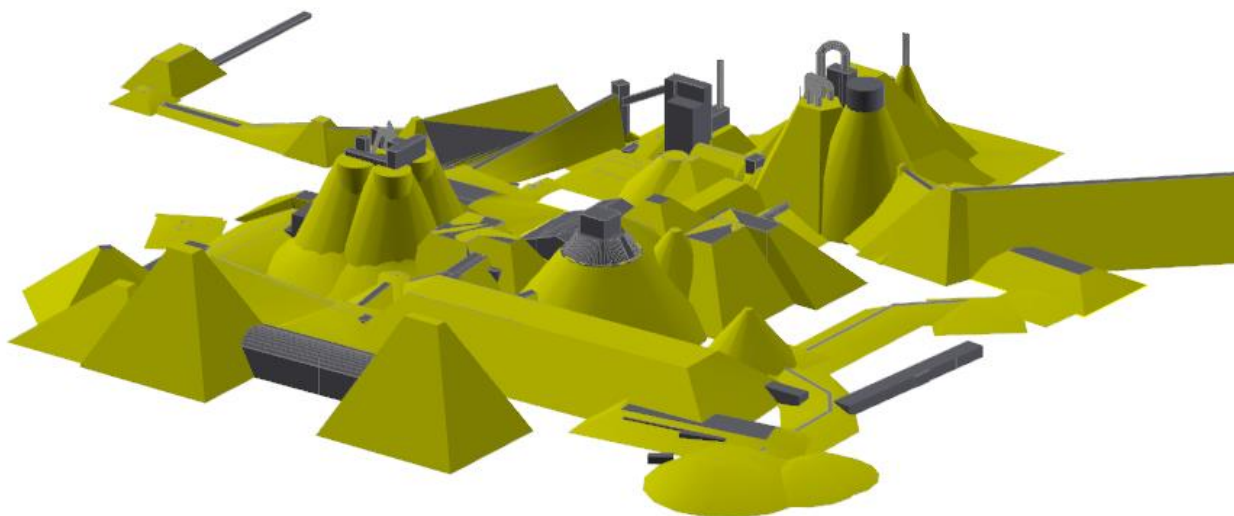
U konačnici može se zaključiti da ako je mjereni otpor rasprostiranja manji od gore navedenih vrijednosti, ne mogu se pojaviti opasni naponi dodira i koraka.

2.4. Kriterij za pogonsko uzemljenje

Uzemljivački sustav kroz funkciju pogonskog uzemljenja osigurava brzo djelovanje zaštitnih uređaja, a time sprječavanje taljenja vodiča i topljenje izolacije. Također efikasnim odvođenjem prenapona štiti izolaciju od skraćivanja životnog vijeka. Kriterij za pogonsko uzemljenje podrazumijeva kontinuitet uzemljivačkih vodiča ($R_{zv} < 1\Omega$ prema IEEE normi) te otpor uzemljenja koji će omogućiti razvijanje struje kvara dovoljne da osigura brz isklon zaštitnih uređaja koji sprječava taljenje vodiča i topljenje izolacije.

2.5. Kriterij za zaštitu od udara munje

Prema normi HR EN 62305-3 preporučljivo je da stacionarni otpor uzemljenja bude manji od 10Ω , a da udarni otpor uzemljenja bude manji od 20Ω . Izvršena je analiza međusobnih utjecaja zaštitnih zona objekata metodama zaštitnog kuta, kotrljajuće kugle i metodom mreže prema već definiranim LPS razinama pojedinih objekta na temelju 3D modela tvornice (Slika 3. i 6.).



Slika 6. Prikaz objekata tvornice sa zonama šticećenja prema pripadajućim LPS-ovima

3. OBAVLJENA MJERENJA I ANALIZE

Pri pojavi dozemnog kratkog spoja uzemljivač poprimi povišeni potencijal u odnosu na neutralnu zemlju. Također potencijal zemlje u krugu i oko postrojenja poprimi određeni potencijal. Visina i raspored potencijala na tlu i na uzemljivaču ovise o obliku uzemljivača, otpornosti tla i iznosu ulazne struje u uzemljivač.

3.1. Mjerenje otpora rasprostiranja

Mjerenje otpora uzemljenja provodi se izmjeničnim naponom U-I metodom, a otpor se dobije kao kvocijent mjerenog potencijala i struje koja se utiskuje u promatrani uzemljivač. Mjerenje potencijala na tlu naziva se i „FOP – fall of potencial method“.

Za potrebe ispitivanja otpora uzemljivača, formirana je petlja 35 kV kabelskim vodovima od TS3 Sv. Juraj (Cemex) preko pomoćnih sabirnica u TS 110/35 kV Kaštela i kabelskog voda do pomoćnog uzemljivača TS 35/10 kV Kaštela (cca 7,6km).

Prilikom mjerenja postignuta je struja mjerenja od 30 A, pri kojoj je na najudaljenijoj mjernoj točki izmjerena razlika potencijala od 1,246 V. Uz pretpostavku da je maksimalni iznos struje koji može biti utisnut u uzemljivač TS Sv. Juraj oko 300 A (35 kV mreža uzemljena preko otpornika za ograničavanja struje jednopolnog kratkog spoja), potencijal uzemljivača u tom slučaju iznosi 12,46 V. Izmjereni otpor rasprostiranja uzemljivača iznosi **0,041 Ω** .

3.2. Mjerenje potencijala metalnih masa i tla

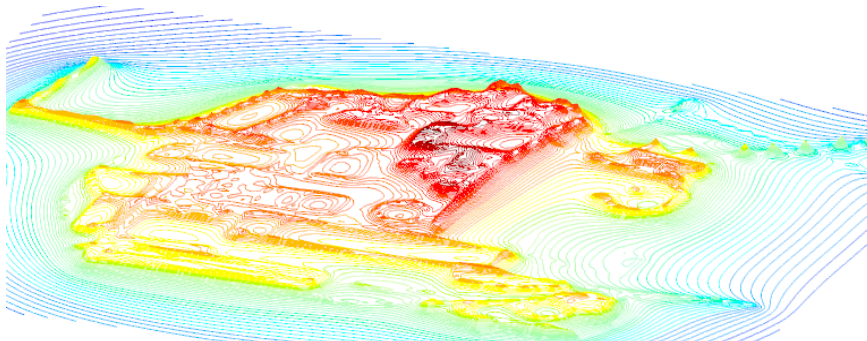
Izvršeno je mjerenje potencijala metalnih masa i tla (ukupno 194 točaka) na području tvornice cementa sv. Juraj kako bi se utvrdila raspodjela potencijala na tlu (Slika 7.).



Slika 7. Prostorni prikaz točaka mjerenja potencijala

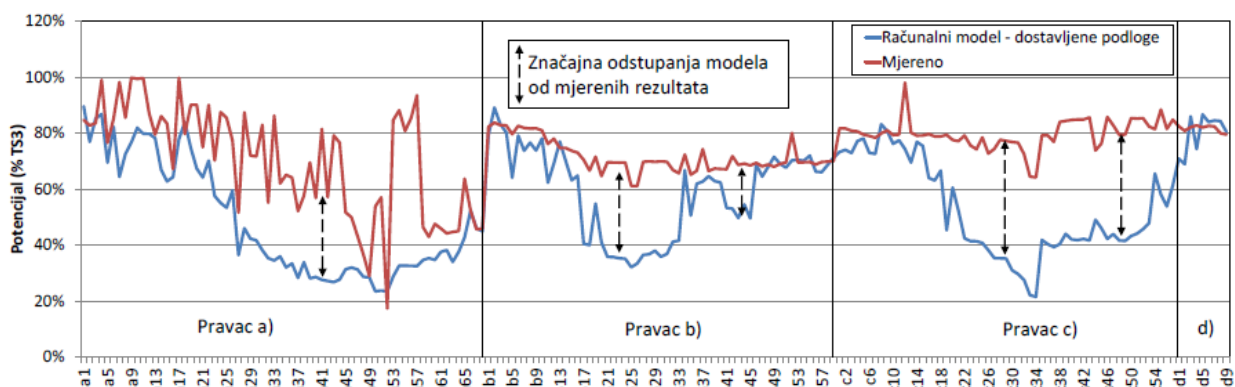
3.3. Prikaz modela raspodjele potencijala i usporedba sa mjerenjima potencijala na tlu i potencijala metalnih masa

Na osnovu dostupne dokumentacije izrađen je matematički model temeljnih uzemljivača objekata unutar tvorničkog kruga tvornice Sv.Juraj. Na modelu je simulirano mjesto utiskivanja struje 300A u glavnoj trafostanici (TS3) i raspodjela potencijala tla (Slika 8.).



Slika 8. Numerički model raspodjele potencijala

Na slici 9. prikazana je usporedba mjerenih i proračunatih vrijednosti potencijala u istim mjernim točkama. Pri tome treba naglasiti da se proračunate vrijednosti odnose samo na potencijale na površini tla.



Slika 9. Grafički prikaz usporedbe mjerenih i proračunatih potencijala na točkama mjernih pravaca

Na temelju prikazanih proračuna mogu se uočiti područja (mjerene točke) u kojima se mjereni i proračunati rezultati slažu, ali i područja u kojima postoje značajna odstupanja. Odstupanja su posljedica nepotpunosti računalnog modela uzemljivača u kojima su pojedini dijelovi uzemljivačkog sustava razdvojeni/izolirani od ostatka sustava (Slika 9.).

4. PREPORUKE ZA BUDUĆE ODRŽAVANJE UZEMLJIVAČKOG SUSTAVA

Tablica I. Preporučene preventivne aktivnosti, sa frekvencijama i kriterijima prihvatljivosti

Aktivnost	Frekvencija	Kriterij	Metoda	Napomena
Mjerenje otpora rasprostiranja	Jednom u 4 godine	$\leq 0,28\Omega$ HRN EN 50522	U/I metoda	Struja niske frekvencije
Mjerenje otpora sustava za izjednačenje potencijala	Jednom u 4 godine	$\leq 1\Omega$ HRN HD 60364-4-41	U/I metoda	Ovisno o zahtijevanom otporu rasprostiranja s obzirom na mjesto utiskivanja struje
Mjerenje kontinuiranosti uzemljivačkih vodiča	Jednom u 4 godine	$\leq 1\Omega$	Metoda s visokim strujama	Prema preporukama IEEE norme
Vizualni pregled	Jednom u 2 godine	Uzemljivačke veze moraju biti kontinuirane HRN HD 60364-6	Kontinuiranost povezanosti svih metalnih masa	Za podzemne vodove potrebni su iskopi
Mjerenje udarnog otpora	Jednom u 4 godine	$\leq 20\Omega$	U/I metoda i procjena koeficijenta rasprostiranja	U navedenoj normi dan je iznos maksimalno dopuštenog stacionarnog otpora $\leq 10\Omega$

5. ZAKLJUČAK

Kompletno stanje združenog uzemljivačkog sustava nije moguće dobiti mjerenjem otpora rasprostiranja prema udaljenoj zemlji iz samo jednog objekta kako je bila dosadašnja praksa. Mjerenje otpora rasprostiranja potrebno je vršiti svake 4. godine na način da se odaberu minimalno 3. radijalno suprotna objekta s različitim pozicijama utiskivanja struje. Nakon većeg broja mjerenja uz relativno niske troškove, moći će se utvrditi postoji li velika razlika u izmjerenim otporima rasprostiranja ovisno o mjestu utiskivanja struje u uzemljivač. Ako rezultati pokažu značajne razlike u izmjerenim vrijednostima otpora preporuča se povezati te dijelove uzemljivača s ostalim uzemljivačkim sustavom ili alternativno propisati mjere i zadovoljenje uvjeta bezopasnosti za izolirani objekt.

5. LITERATURA

- [1] I. Zlatunić, S. Vodopija, G.Paić, Fractal d.o.o. „Analiza značajki uzemljivačkog sustava“. Split, 2016.
- [2] I. Zlatunić, S. Vodopija, G.Paić, Fractal d.o.o. „Osvrt na niskonaponske instalacije“. Split, 2016
- [3] A. Kovačević, Kapar d.o.o. „Projekt rekonstrukcije sustava zaštite od udara munje“. Split, 2016.
- [4] Pravilnik o tehničkim zahtjevima za elektroenergetska postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV (NN 105/10).
- [5] HRN EN 50522, Uzemljenje električnih postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV, 2012.
- [6] Tehnički propis za niskonaponske električne instalacije (NN 76/07 i 38/09).
- [7] HD 60364-4-41, Niskonaponske električne instalacije – Sigurnosna zaštita – Zaštita od električnog udara, 2007
- [8] Tehnički propis za sustave zaštite od djelovanja munje na građevinama (Narodne novine br. 87/08, 33/10)
- [9] HRN EN 62305-3, Zaštita od munje – 3. dio: Materijalne štete na građevinama i opasnost za život, 2013.
- [10] IEEE Std 81™ – 2012, „IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a grounding system“, 2012, IEEE Power and Energy Society