

Alan Župan, mag.ing.el.  
HEP-OPS d.o.o.  
alan.zupan@hops.hr

Ana Tomasović Teklić, dipl.ing.el.  
KONČAR-Institut za elektrotehniku  
at.teklic@koncar-institut.hr

Dr.sc. Božidar Filipović-Grčić, dipl.ing.el.  
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
bozidar.filipovic-grcic@fer.hr

## ANALIZA UTJECAJA ELEKTRIČNE ŽELJEZNICE NA KVALITETU NAPONA U PRIJENOSNOJ 110 KV MREŽI

### SAŽETAK

U radu je analiziran utjecaj električne željeznice na kvalitetu napona u prijenosnoj 110 kV mreži na mjestu priključenja. U programu za proračun prijelaznih elektromagnetskih pojava EMTP-RV izrađen je model električne diodne lokomotive, kontaktne mreže i elektrovučne podstanice (EVP) za proračun utjecaja električne željeznice na 110 kV prijenosnu mrežu. Izračunati su naponi i struje na 25 kV i 110 kV razini te je analiziran sadržaj viših harmonika. Mjerenje kvalitete napona i negativnog povratnog djelovanja izvršeno je u TS 110/35/25 kV Oštarije na 110 kV sabirnicama i ukupno šest 110 kV odvoda s analizatorima kvalitete električne energije. Izmjerene i izračunate vrijednosti napona uspoređene su s normom IEC 61000-3-6 koja definira granice pojedinih harmonika napona. Usporedbom rezultata proračuna i mjerenja može se zaključiti da je utjecaj električne željeznice na mjestu priključenja posebno izražen pojavom harmonika svojstvenih željeznici, a to su harmonici reda  $3n$ , koji su najveći u fazama na koje se priključuje električna željeznica.

**Ključne riječi:** Kvaliteta električne energije, električna željeznica, modeliranje, harmonici

### SUMMARY

This paper describes an influence of electric railway system on power quality in 110 kV transmission system. A model of diode locomotive, contact wire and electric railway substation was developed in EMTP-RV software in order to calculate an influence of electric railway system on power quality in 110 kV transmission system. Currents and voltages were calculated at 25 kV and 110 kV networks and harmonics spectrum was analyzed. Power quality measurements were performed on 110 kV level in 110/35/25 kV substation on 110 kV buses and six 110 kV line and transformer bays using power quality analyzers. Measured and calculated voltage harmonics were compared to IEC 61000-3-6. By comparing calculation results and measurement it can be concluded that the influence of electric railways at a connection point is noticeable regarding the voltage harmonics of order  $3n$  which are characteristic for electric railways.

**Key words:** power quality, electric railway, modeling, harmonics

## 1. UVOD

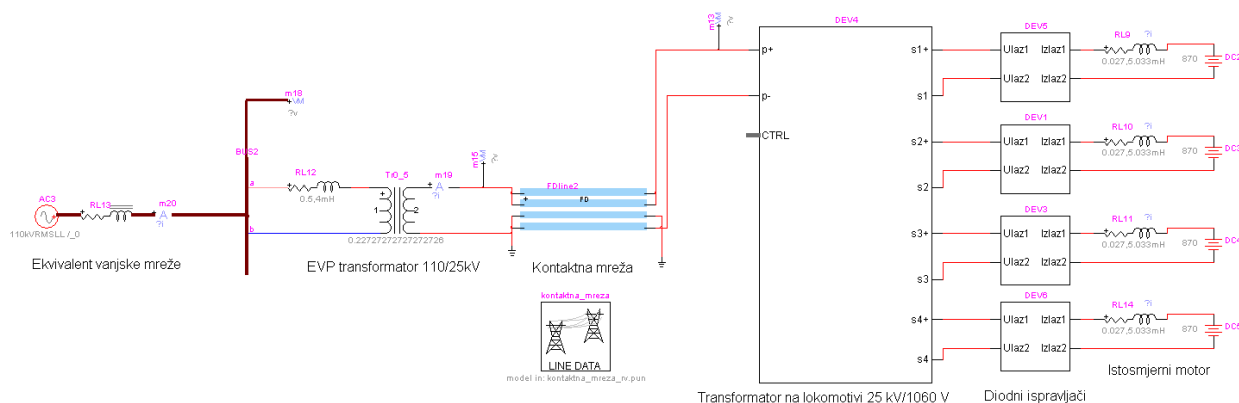
Kvaliteta električne energije (KEE) je obilježje električne energije u određenoj točki elektroenergetskog sustava (EES) promatrano u usporedbi s referentnim tehničkim parametrima koji se određuju na temelju višegodišnjih iskustava stečenih analizama stanja u elektroenergetskim mrežama. Pod KEE obično se misli na neprekinutost napajanja (raspoloživost električne energije) i kvalitetu napona.

Ukoliko je izobličenje napona veće od vrijednosti propisane standardom, može doći do poremećaja u radu uređaja koji su priključeni na elektroenergetski sustav. Utjecaji harmoničkih izobličenja ne moraju biti odmah vidljivi, no dugoročno mogu imati ozbiljne posljedice. Osim paralelne i serijske rezonancije, što je najopasnija pojava uzrokovana višim harmonicima, u mreži se mogu javiti problemi kao što su dodatni gubici koji dovode do smanjenja životne dobi opreme (transformatora, sinkronih i asinkronih strojeva, vodova i kabela, kondenzatorskih baterija i dr.), krive prorade zaštitnih uređaja i smanjenja učinkovitosti proizvodnje i prijenosa električne energije.

Električna vuča (25 kV, 50 Hz) je jednofazni potrošač priključen na linijski napon između dvije faze preko transformatora 110/25 kV. Zbog toga se negativno povratno djelovanje elektrovučnih podstanica (EVP-a) prvenstveno očituje kroz nesimetriju napona [1]. Osim nesimetrije napona, električna vuča unosi harmoničko izobličenje u elektroenergetski sustav [2],[3]. To se događa zbog uređaja energetske elektronike koji se koriste za upravljanje pogonskog sustava vlaka, a radi se o upravljivim diodnim ili tiristorskim mosnim spojevima. U radu je opisan model diodne električne lokomotive.

## 2. MODEL ELEKTRIČNE VUČE I PRIJENOSNE MREŽE

Za procjenu utjecaja električne vuče na strujna i naponska izobličenja na mjestu priključenja modeliran je dio 110 kV mreže na koji je spojena električna vuča. Izrađen je model EVP-a, kontaktne mreže koja napaja električne lokomotive, te diodne lokomotive u programu EMTP-RV (Slika 1) [4].



Slika 1. Model za analizu utjecaja električne željeznice na kvalitetu napona u prijenosnoj 110 kV mreži u programu EMTP-RV

### 2.1. Model prijenosne mreže

Prijenosna 110 kV mreža modelirana je Theveninovim ekvivalentom (impedancija u seriji s naponskim izvorom). Impedancija u nultom i direktnom sustavu izračunata je iz struja jednopolnog i trolnog kratkog spoja na mjestu priključenja.

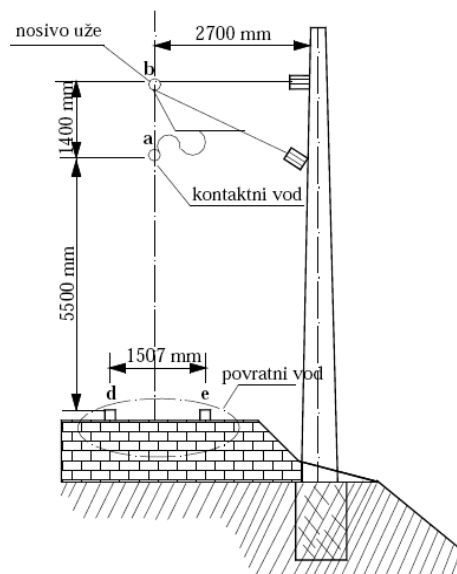
### 2.2. Model elektrovučne podstanice

Na prijenosnu mrežu priključena je elektrovučna podstanica koja se sastoji od jednog transformatora 110/27.5 kV nazivne snage 7.5 MVA. Impedancija transformatora izračunata je na temelju nazivnih podataka transformatora.

### 2.3. Model kontaktne mreže

Kontaktna mreža je stabilno postrojenje koji služi za napajanje električnih vučnih vozila (električnih lokomotiva i vlakova) električnom energijom.

Slika 2 prikazuje 25 kV kontaktnu mrežu koja se sastoji od nosivog užeta i kontaktnog vodiča.



Slika 2. Konfiguracija kontaktne mreže 25 kV, 50 Hz

Kontaktne mreže je modelirana frekvencijski ovisnim J.Marti modelom prema kojemu se frekvencijski ovisna karakteristična impedancija  $Z(\omega)$  i faktor rasprostiranja  $A(\omega)$  aproksimiraju racionalnim funkcijama višeg reda. Tablica I prikazuje parametre modelirane kontaktne mreže.

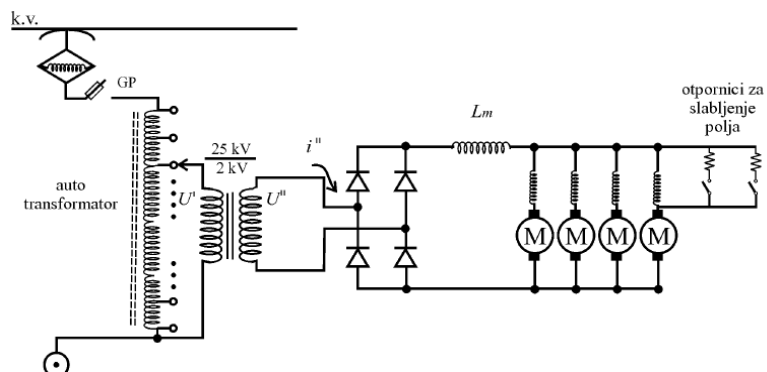
Tablica I. Podaci parametara kontaktnog voda, nosivog užeta, tračnica i okolnog tla

Kontaktne vodič Ri 100	$R_k = 0.1759 \Omega/\text{km}$ $r_k = 6 \text{ mm}$ $S_k = 100 \text{ mm}^2$
Nosivo uže Ecu 120	$R_u = 0.153 \Omega/\text{km}$ $r_u = 6.18 \text{ mm}$ $S_u = 120 \text{ mm}^2$
Tračnice UIC 60	$O = 68.5 \text{ cm}$ $\rho_t = 0.22 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ $\mu_t = 250$
Okolno zemljište	$\rho = 100 \Omega\text{m}$ $R_z = 0.0493 \Omega/\text{km}$

U modelu za proračune u obzir je uzet povratni vod kojeg čine tračnice i okolna zemlja, a služi da se zatvori strujni krug koji napaja električne lokomotive. Podaci parametara kontaktnog voda, nosivog užeta, tračnica i okolnog tla prikazani su u Tablici I.

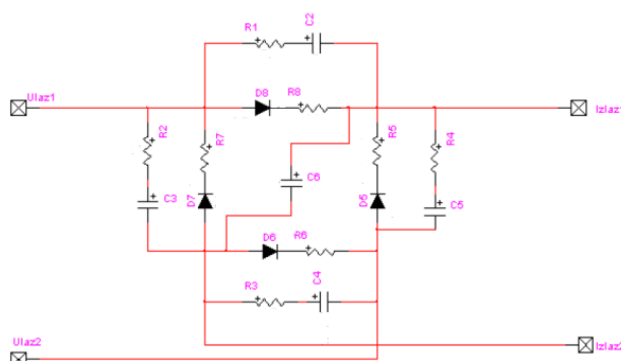
#### 2.4. Model diodne lokomotive

Diodna električna lokomotiva sastoji se od autotransformatora koji transformira napon kontaktne mreže 25 kV, 50 Hz na napon od 2 kV i koji preko diodnih ispravljača napaja četiri istosmjerna elektromotora. Autotransformator je u EMTP-RV modeliran impedancijom izračunatom iz pokusa kratkog spoja i praznog hoda. Slika 3 prikazuje električnu shemu napajanja motora u diodnoj lokomotivi.



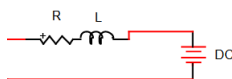
Slika 3. Električna shema napajanja motora u diodnoj lokomotivi

Diodni ispravljač [5] (Slika 4) modeliran je spajanjem dioda u mosni spoj pri čemu je svakoj diodi paralelno priključen otpor i kapacitet. U obzir su uzeti kapaciteti zaštitnih kondenzatora dioda i kapacitet paralelno motoru.



Slika 4. Diodni ispravljač

Istosmjerni motori modelirani su elektromotornom silom (induciranim protunaponom motora), prigušnicom i otporom. Prigušnica služi za glađenje ispravljenih struja, a otpori za stalno i regulirano slabljenje polja glavne uzbude (Slika 5).



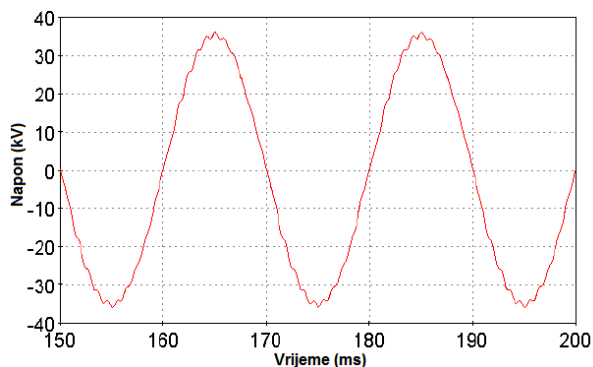
Slika 5. Istosmjerni motor

### 3. PRORAČUN UTJECAJA DIODNE LOKOMOTIVE NA KVALITETU NAPONA U PRIJENOSNOJ MREŽI

U radu je simulirana vožnja diodne lokomotive konstantnom brzinom. Sve izračunate vrijednosti odnose se na trenutak kada je lokomotiva udaljena 1 km od EVP-a. U ovom modelu izračunati su valni oblici napona i struja na 25 kV i 110 kV.

#### 3.1. Naponsko izobličenje u 25 kV kontaktnoj mreži uzrokovano električnom vučom

Diodna električna lokomotiva uzrokuje naponsko izobličenje u 25 kV kontaktnoj mreži. Ukupno harmoničko izobličenje (THD – eng. total harmonic distortion) napona kontaktne mreže prilikom kretanja vlaka konstantnom brzinom na udaljenosti 1 km od EVP-a iznosi 2.06 %. Valni oblik napona prikazan je na slici 6. Značajan je udio viših neparnih harmonika napona od kojih su najizraženiji 21. i 23. harmonik. Vrijednosti neparnih harmonika napona i struje prikazane su u Tablici II.



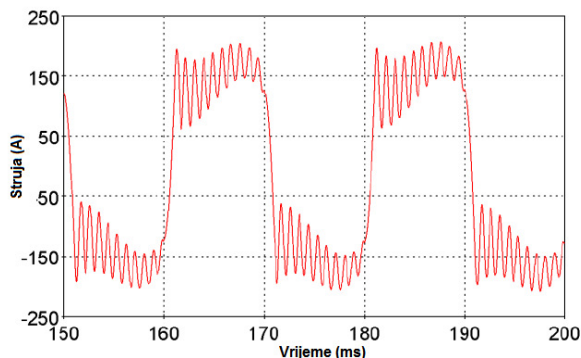
Slika 6. Valni oblik napona napona na 25 kV u kontaktnoj mreži

Tablica II. Naponski i strujni harmonici na 25 kV

Broj harmonika	25 kV	
	$U$ (V)	$I$ (A)
1	35280	194
3	125.1	35.2
5	116.7	31.0
7	107.7	10.5
21	421.0	26.7
23	421.0	26.7

### 3.2. Strujno izobličenje u 25 kV kontaktnoj mreži uzrokovano električnom vučom

Naponsko izobličenje uzrokuju viši harmonici struja koji na impedancijama kontaktne mreže uzrokuju padove napona. Valni oblik struje kontaktne mreže prikazan je na slici 7. Najveći doprinos u strujnom izobličenju u 25 kV kontaktnoj mreži imaju 3., 21. i 23. strujni harmonik čije su vrijednosti prikazane u tablici II.

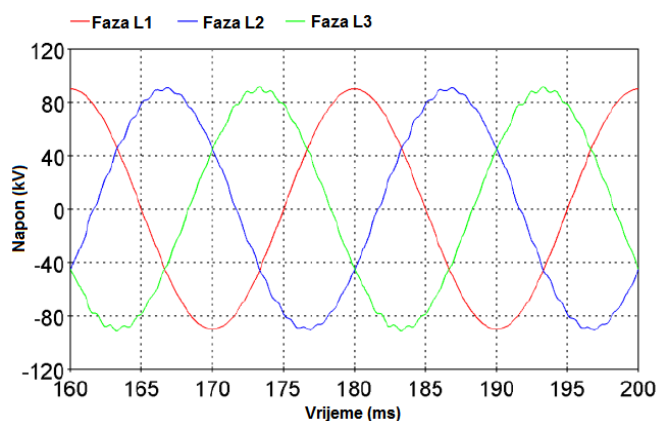


Slika 7. Valni oblik struje na 25 kV kontaktnoj mreži

### 3.3. Naponsko izobličenje na 110 kV uzrokovano električnom vučom

Ukupno naponsko i strujno izobličenje u kontaktnoj mreži 25 kV, 50 Hz kojeg uzrokuje diodna lokomotiva prenosi se preko transformatora 110/25 kV u EVP-ima na naponsku razinu 110 kV, odnosno prenosi se u prijenosnu mrežu. Ukupno harmoničko izobličenje napona kojeg uzrokuje diodna lokomotiva iznosi 1.63%, a valni oblik napona prikazan je na slici 8.

Značajan je udio viših neparnih harmonika napona od kojih je najizraženiji 21. i 23. harmonik. Vrijednosti neparnih harmonika napona i struje na mjestu priključenja EVP-a prikazane su u tablici III.



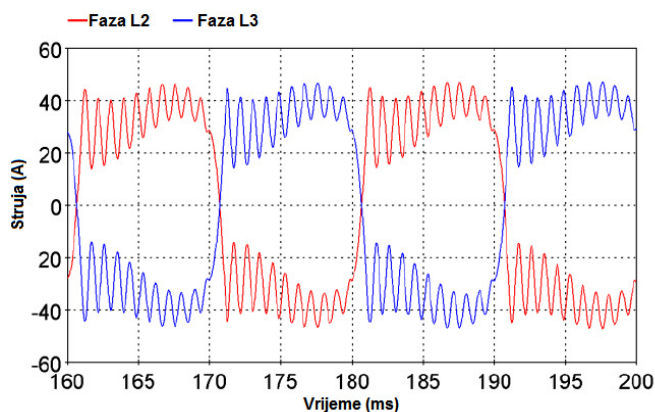
Slika 8. Valni oblik napona na 110 kV u EVP-u

Tablica III. Naponski i strujni harmonici na 25 kV

Broj harmonika	110 kV	
	$U$ (V)	$I$ (A)
1	89560	40.1
3	251.2	11.4
5	234.4	6.4
7	216.4	4.2
21	931.4	5.5
23	841.8	5.5

### 3.4. Strujno izobličenje na 110 kV uzrokovano električnom vučom

Strujno izobličenje na 110 kV razini je veće nego naponsko izobličenje, a najveći doprinos u ukupnom strujnom izobličenju imaju 3. i 5. harmonik čije su vrijednosti prikazane u tablici III. Valni oblik struje na 110 kV prikazan je na slici 9.



Slika 9. Valni oblik struje na 110 kV u elektrovučnoj postanici

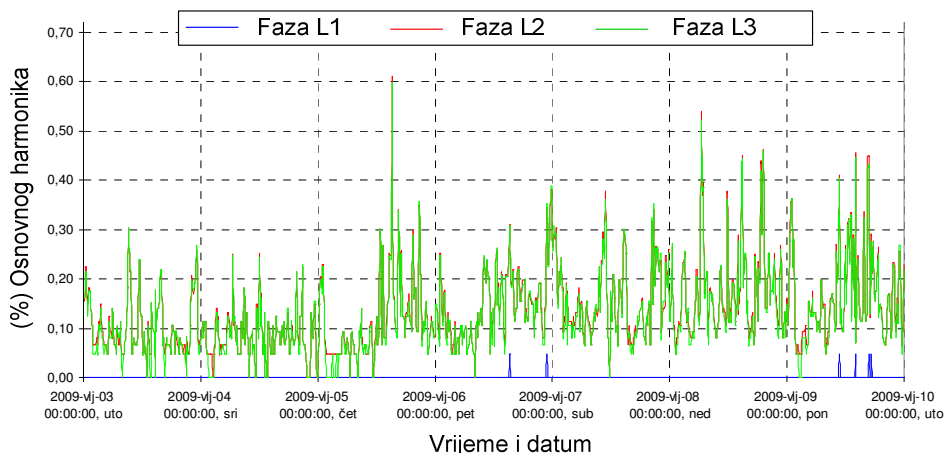
Rezultati proračuna pokazuju kako je ukupno izobličenje napona i struja najveće na 25 kV razini, a smanjuje se s udaljenosti.

## 4. MJERENJE UTJECAJA DIODNE LOKOMOTIVE NA KVALITETU NAPONA U PRIJENOSNOJ MREŽI

Mjerenje negativnog povratnog djelovanja električne vuče na kvalitetu napona na mjestu priključenja provedeno je u TS 110/35/25 kV Oštarije za period od sedam dana [6]. Jednopolna shema sa prikazom mjesta na kojima su postavljeni analizatori kvalitete električne energije prikazana je na slici 10. Za vrijeme mjerenja prometovale su diodne i tiristorske lokomotive.

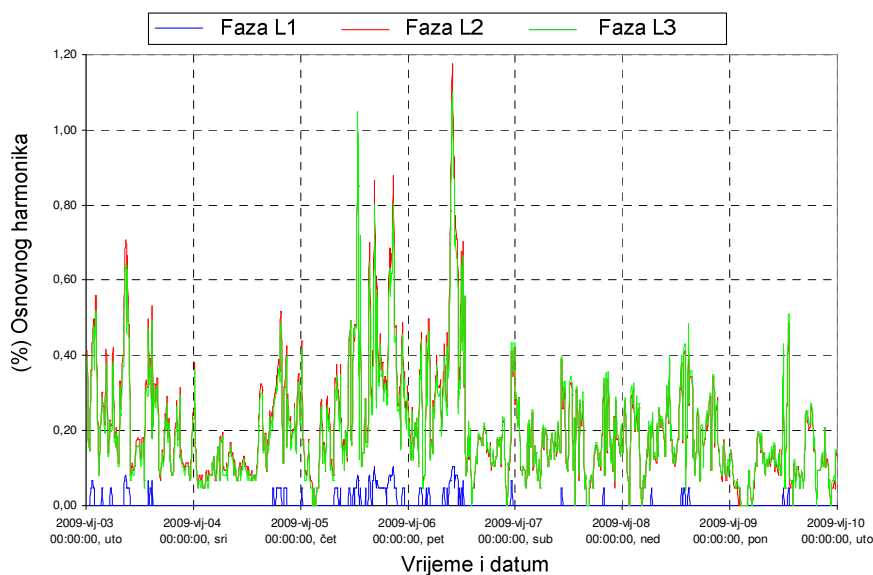


Vrijednosti devetog naponskog harmonika u fazama L2 i L3 poprimaju vrijednosti veće od nule dok je vrijednost tog harmonika u fazi L1 nula (Slika 13). Maksimalne vrijednosti u 95% tjedna za faze L2 i L3 iznose 0.3%, dok za fazu L1 iznosi 0%.



Slika 13. Deveti naponski harmonik na 110 kV sabirnicama u TS 110/35/25 kV Oštarije

Vrijednosti  $3n$  harmonika specifične su za diodne i tiristorske lokomotive. Maksimalna vrijednost dvadeset i prvog naponskog harmonika u fazama L2 i L3 u 95% tjedna iznosi 0.5%, a u fazi L1 jednaka nuli (Slika 14).



Slika 14. Dvadeset i prvi naponski harmonik na 110 kV sabirnicama u TS 110/35/25 kV Oštarije

U tablici IV je dana usporedba mjerenih vrijednosti i planiranih razina prema normi IEC 61000-3-6:2008 [7]. Vrijednosti su izmjerene u periodu od sedam dana na naponskoj razini 110 kV u TS 110/35/25 kV Oštarije.



Tablica IV – Usporedba rezultata mjerenja i planiranih vrijednosti ukupnog harmoničkog izobličenja prema IEC 61000-3-6:2008

	Izmjerene vrijednosti na 110 kV		Planirane razine za VN prema IEC 61000-3-6:2008
	Faze L2 i L3	Faza L1	
THD	1,8 %	0,8 %	3 %
$U_{h3}$	0,9 %	0,3 %	2 %
$U_{h5}$	0,6 %	0,5 %	2 %
$U_{h7}$	0,5 %	0,2 %	2 %
$U_{h9}$	0,3 %	0,0 %	1 %
$U_{h11}$	0,6 %	0,3 %	1,5 %
$U_{h13}$	0,8 %	0,4 %	1,5 %
$U_{h15}$	0,4 %	0,1 %	0,3 %
$U_{h17}$	0,4 %	0,2 %	1,2 %
$U_{h19}$	0,4 %	0,1 %	1,1 %
$U_{h21}$	0,5 %	0,0 %	0,2 %
$U_{h23}$	0,6 %	0,3 %	0,9 %
$U_{h25}$	0,8 %	0,3 %	0,8 %

U Tablici IV prikazane su 10-minutne srednje efektivne vrijednosti u 95% tjedna. Iz tablice je vidljivo da petnaesti i dvadeset i prvi naponski harmonik prelaze planirane razine.

Usporedbom rezultata proračuna i mjerenja može se zaključiti da se utjecaj električne željeznice na mjestu priključenja posebno vidi na harmonicima koji su svojstveni željeznici, a to su harmonici reda  $3n$  koji su najveći u fazama na koje se priključuje električna željeznica.

## 5. ZAKLJUČAK

Električna željeznica je specifično trošilo koje se spaja na dvije faze prienosne mreže te uzrokuje nesimetrično opterećenje mreže na mjestu priključenja. Osim nesimetričnog opterećenja električna željeznica utječe i na naponska i strujna izobličenja zbog uređaja energetske elektronike koji se koriste za upravljanje pogonskog sustava vlaka.

U radu je modelirano kretanje diodne električne lokomotive na udaljenosti 1 km od EVP-a i njen utjecaj na strujna i naponska izobličenja u prienosnoj mreži na mjestu priključenja. Na temelju dobivenih rezultata proračuna i mjerenja u TS 110/35/25 kV Oštarije može se zaključiti da električne lokomotive s diodnim ispravljačima uzrokuju pojavu  $3n$  harmonika na mjestima priključenja.

Buduća istraživanja obuhvatit će proračun i mjerenje širenja strujnih i naponskih harmonika prienosnom mrežom na koju je priključeno više EVP-a.

## 6. LITERATURA

- [1] A. von Jouanne, B. Banerjee: „Assessment of Voltage Unbalance”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16. No. 4, 2001.
- [2] M. Ožegović, K. Ožegović: „Električne energetske mreže“, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Opal computers, Split, 1997.
- [3] A. M. Dan, P. Kiss: „Advanced Calculation Method for Modeling of Harmonic Effect of AC High Power Electric Traction“, 12<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, Cascais, October 2006.
- [4] EMTP-RV dokumentacija, [www.emtp.com](http://www.emtp.com)
- [5] I. Uglešić, I. Kopecki, „Električna željeznica, trošilo elektroprivredne mreže koji uzrokuje izobličenja napona i struja“, časopis Energija, 1992.
- [6] A. Tomasović, „Kvaliteta električne energije negativno povratno djelovanje korisnika mreže na kvalitetu napona“, kvalifikacijski doktorski ispit, Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2010.
- [7] IEC 61000-3-6 Ed 2.0:2008 „Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication“.