

Zvonimir Klaić
FERIT Osijek
zvonimir.klaic@ferit.hr

Renato Ćučić
HEP ODS d.o.o. Zagreb
renato.cucic@hep.hr

Kruno Trupinić
HEP ODS d.o.o. Slavonski Brod
kruno.trupinic@hep.hr

Matej Žnidarec
FERIT Osijek
matej.znidarec

Predrag Marić
FERIT Osijek
predrag.maric@ferit.hr

Damir Šljivac
FERIT Osijek
damir.sljivac@ferit.hr

Marinko Stojkov
Sveučilište u Slavonskom Brodu
mstojkov@unisb.hr

Mario Primorac
FERIT Osijek
mario.primorac@ferit.hr

KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE U „STUDIJI NOVIH TEHNOLOŠKIH RJEŠENJA ZA NISKONAPONSKE MREŽE OBZIROM NA PROBLEMATIKU NELINEARNOSTI I NESIMETRIČNOSTI OPTEREĆENJA, TE POTREBU ZA KOMPENZACIJOM JALOVE SNAGE“

SAŽETAK

Za potrebe HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o., djelatnici Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek izradili su „Studiju novih tehnoloških rješenja za niskonaponske (NN) mreže obzirom na problematiku nelinearnosti i nesimetričnosti opterećenja, te potrebu za kompenzacijom jalove snage“. U radu je prikazan dio vezan za mjerenja i analizu kvalitete električne energije u različitim niskonaponskim izvodima.

Ključne riječi: mjerenja kvalitete električne energije, urbani i ruralni NN izvodi, poslovni korisnici, kućanstva, analiza mjerenja

POWER QUALITY IN "STUDY OF NEW TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR LOW-VOLTAGE (LV) NETWORKS WITH REGARD TO THE PROBLEM OF NONLINEARITY AND LOAD ASYMMETRY, AND THE NEED FOR REACTIVE POWER COMPENSATION"

SUMMARY

For the needs of HEP Distribution System Operator d.o.o., the employees of the Faculty of Electrical Engineering, Computing and Information Technologies Osijek prepared a "Study of new technological solutions for low-voltage (LV) networks with regard to the problem of nonlinearity and load asymmetry, and the need for reactive power compensation". The paper presents the part related to measurements and analysis of the power quality in different low-voltage feeders.

Key words: Power Quality Measurements, urban and rural LV feeders, business users, households, measurement analysis

1. UVOD

1.1. Općenito o Studiji

U „Studiji novih tehnoloških rješenja za niskonaponske (NN) mreže obzirom na problematiku nelinearnosti i nesimetričnosti opterećenja, te potrebu za kompenzacijom jalove snage“ [1] obrađena su tehnička rješenja izvedbi NN mreža, što uključuje mjerenja, proračune i procjene negativnog utjecaja nelinearnog opterećenja višim strujnim harmonicima uslijed povećanja udjela nelinearnih tereta te nesimetričnog opterećenja na pogonske uvjete u NN mrežama, s analizom mogućnosti povećanja presjeka povratnog vodiča NN mreže ili drugim odgovarajućim zahvatima, sve u smislu smanjenja ovih negativnih utjecaja.

Također, u dijelu koji govori o tehnološkim rješenjima primjenjivim u NN mreži, razmotrene su mogućnosti regulacije tokova jalove snage u NN mrežama, s ugradnjom kompenzacije jalove snage u dubini NN mreže bliže mjestu potrošnje jalove energije, napredne mogućnosti automatske regulacije kompenzacije jalove snage, mogućnosti sudjelovanja obnovljivih izvora [2] u NN mreži u regulaciji kompenzacije jalove snage u dubini NN mreže te provjera i mjere za sprječavanje negativnih učinaka kompenzacije jalove snage u NN mreži.

U radu je prikazan dio vezan za mjerenja i analizu kvalitete električne energije u različitim niskonaponskim izvodima s obzirom na karakteristike NN izvoda (podzemni urbani i nadzemni ruralni) te s obzirom na karakteristike priključenih korisnika mreže (pretežno poslovni korisnici mreže i pretežno kućanstva).

1.2. Niskonaponski izvodi

U cilju utvrđivanja postojećeg stanja u niskonaponskoj (NN) distribucijskoj mreži kao početni korak Studije dogovorena su mjerenja u NN izvodima. Sukladno tvrdnjama Naručitelja da su tipska rješenja NN izvoda i karakteristike trošila i proizvodnih jedinica kod korisnika mreže praktično iste na području cijele RH, dogovoreno je da će se planirana mjerenja izvesti u NN izvodima DP Elektroslavonija Osijek.

Načelni prijedlozi Naručitelja za mjerenja su bili sljedeći:

- A. karakteristike NN izvoda:
 - 1. podzemni urbani (poželjno kabel Al 4×150 mm² i više)
 - 2. nadzemni ruralni (poželjno SKS 4×70 mm²)
- B. karakteristike priključenih korisnika mreže:
 - 1. pretežno poslovni korisnici mreže
 - 2. pretežno kućanstva

S obzirom na stvarno stanje u distribucijskoj mreži, prema prijedlogu Naručitelja, mjerenja su izvedena na 4 NN izvoda:

- 1. KTS 4 Nemetin - podzemni urbani, pretežno poslovni korisnici mreže (A1B1)
- 2. KTS 156 Uske njive - podzemni urbani, pretežno kućanstva (A1B2)
- 3. KTS 16 Tenja - nadzemni ruralni, pretežno kućanstva (A2B2)
- 4. KTS 187 - Izvod koji napaja punionicu električnih vozila – za potrebe simulacija i analiza

Na početku NN izvoda u TS SN/NN mjerene su sve naponske i strujne karakteristike (kvaliteta napona, nelinearnost napona i struja, nesimetričnost opterećenja – tokovi snaga kroz fazne i povratni vodič, opterećenja jalovom snagom), dok se na kraju NN izvoda mjerila kvaliteta napona.

Rezultati se analiziraju s obzirom na Mrežna pravila distribucijskog sustava, NN 74/2018 [3], Izmjene i dopune mrežnih pravila distribucijskog sustava, NN 52/2020 [4] te HRN EN 50160:2012, Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava (EN 50160:2010), [5].

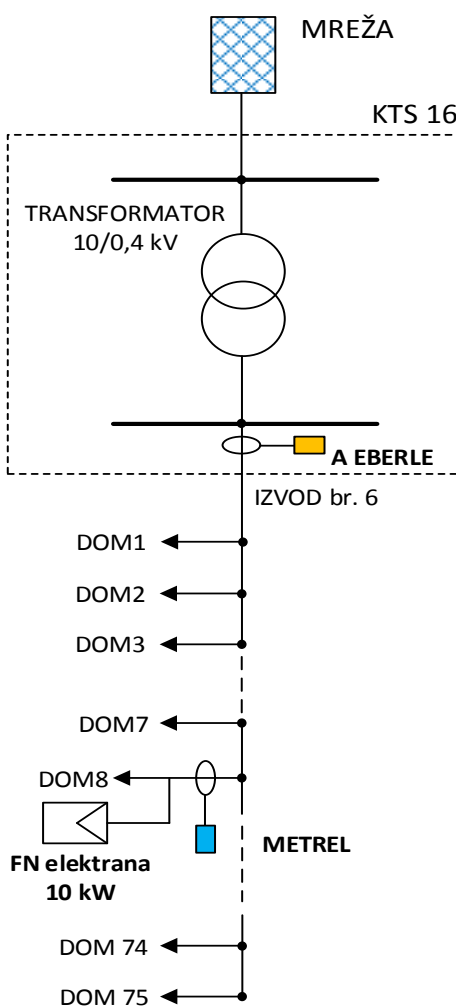
U tablici I prikazane su osnovne karakteristike NN izvoda na kojima su izvedena mjerenja.

Tablica I. Niskonaponski izvodi obuhvaćeni mjerenjima.

Trafostanica	Snaga (kVA)	Izvod	Dionica	Karakt. NN izvoda	Dužina izvoda (m)	Potrošača na izvodu
KTS – 4 Nemetin	400	INSPECTO	KTS → SPMO	XPOO - A 4x150mm ²	545	1
KTS – 156 Uske njive	630	ODLAZ U KO DELNIČKA 16	KTS → KO	PP 00A 4x150 mm ²	250	35
KTS - 16 Tenja	630	ODLAZ U KO I. MAŽURANIĆA - STUP BR. 20	KTS → KO	PP 00A 4x120 mm ²	170	75
			KO →	FR-N1XD9-AR 3x70+70+2x16 mm ²	700	
KTS - 187	400	KO Punionica	KTS → KO	NKBA 3x70+35mm ²	142	3

Mjerenja u KTS – 187 i u KO brze punionice električnih vozila izvedeno je za potrebe simulacija na ostalim niskonaponskim izvodima.

Na slici 1. prikazana je skica NN izvoda iz KTS 16. Na skici su označena mjerna mjesta s mrežnim analizatorima te ukupan broj potrošača na izvodu.



Slika 1. Skica niskonaponskog izvoda broj 6 iz KTS-16.

1.3. Mjerni uređaji

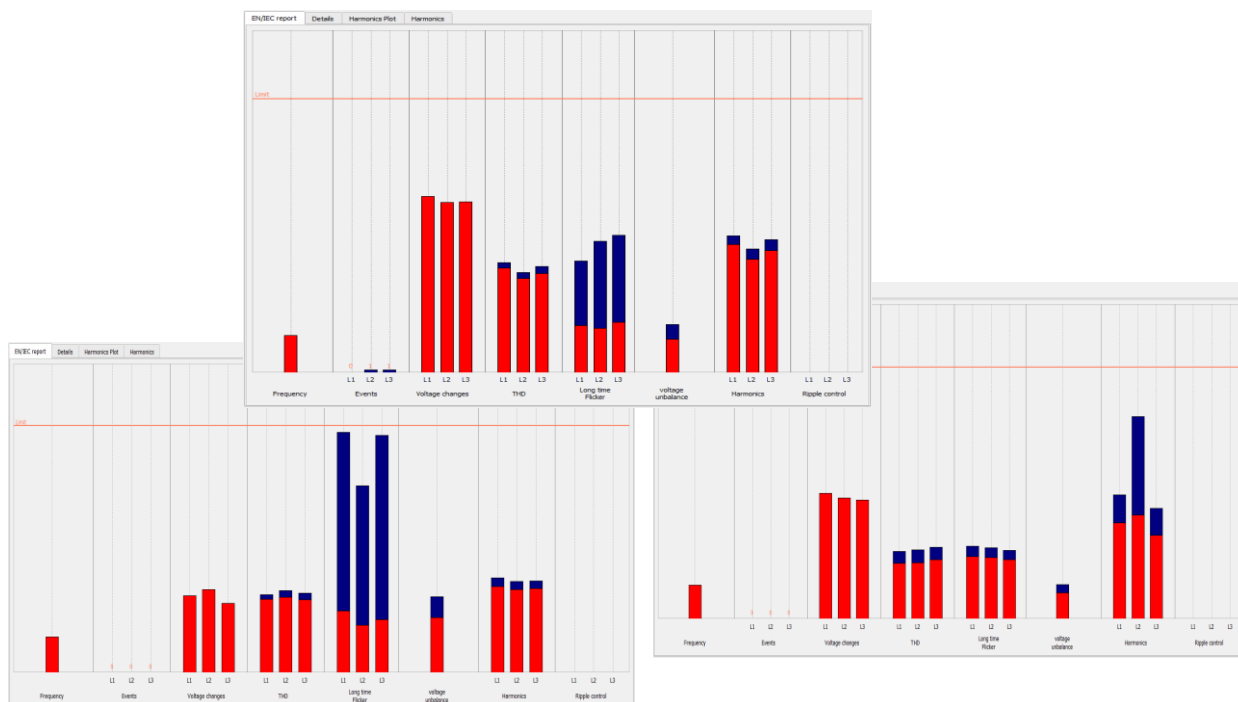
Mjerenje kvalitete električne energije i opterećenja u transformatorskim stanicama izvedeno je suvremenim trofaznim mrežnim analizatorom **a-eberle PQ-Box 200**, a mjerenja kvalitete električne energije i opterećenja u dubini NN izvoda izvedeno je trofaznim mrežnim analizatorom **Metrel MI 2792 Power Q4 Plus** (Slika 2). Spomenuti analizatori mjere kvalitetu električne energije prema zahtjevima norme IEC 61000-4-30, u klasi točnosti A, dok se rezultati obrađuju prema normi normi HRN EN 50160:2012, Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava (EN 50160:2010), [5].



Slika 2. Mjerni uređaji a-eberle PQ-Box 200 (lijevo) i Metrel MI 2792 Power Q4 Plus (desno)

2. ANALIZA MJERENJA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

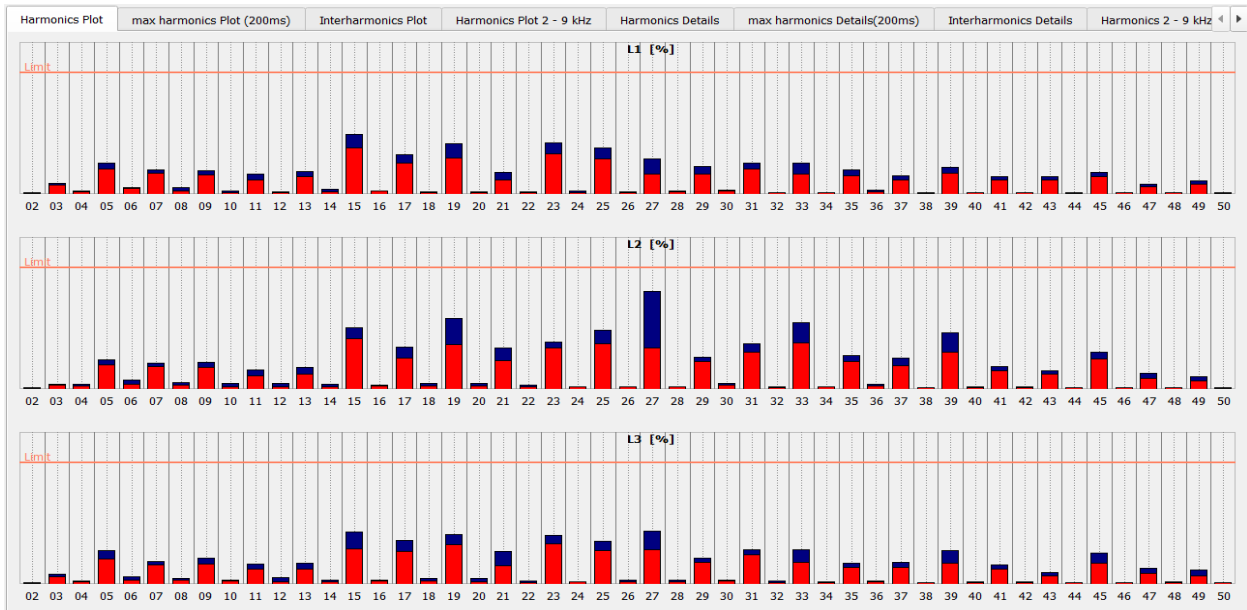
Općenito se može zaključiti da su rezultati zadovoljavajući u smislu kvalitete električne energije – na svim mjernim mjestima izmjerene vrijednosti su unutar ograničenja spomenute norme, Slika 3.



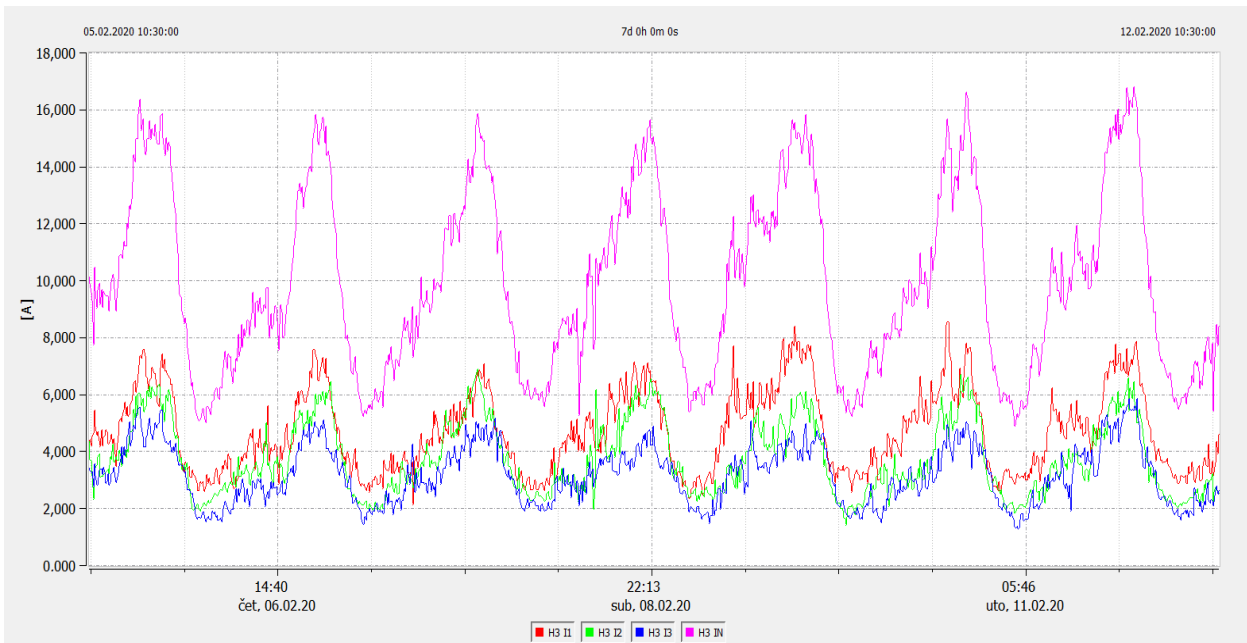
Slika 3. Sumarni prikaz pokazatelja kvalitete – KTS 16 Tenja, KTS 156 Uske njive i KTS 4 Nemetin.

2.1. Nelinearnost

S aspekta nelinearnosti opterećenja, mjerenja su pokazala različite rezultate ovisno o NN izvodima. Na izvodu koji se napaja iz **KTS 4**, (jedini potrošač je tvrtka Inspecto – industrijski potrošač), ističu se neparni naponski harmonici viših redova (15., 17., 19., 25., 27., 33., i 39.), Slika 4. Premda se od strujnih harmonika ističu 5. i 7., veći problem bi mogli predstavljati snimljeni harmonici redova čiji je višekratnik broj 3 u neutralnom vodiču (3., 9. i 15. redovi). U ostala dva izvoda, **KTS 156** i **KTS 16** (pretežno se napajaju kućanstva), naponski harmonici imali su niske iznose, ali su se istaknule vrijednosti 3. i 9. harmonika u faznim vodičima – dok su vrijednosti još više u neutralnim vodičima. Ovakav rezultat je izraženiji na izvodu koji se napaja iz KTS 16 (pretežno nadzemni vod), Slika 5.



Slika 4. Spektar viših harmonika napona u KTS 4.



Slika 5. Vrijednosti 3. strujnog harmonika za sve tri faze i neutralni vodič u KTS 16.

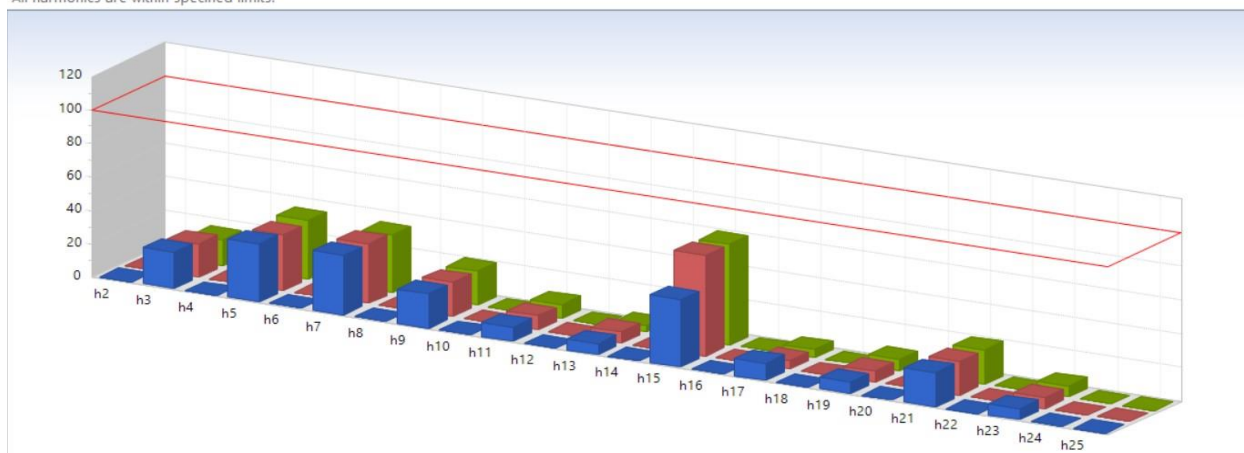
2.1.1. Nelinearnost u KO, A Šenoe 3, Tenja

Na obiteljskoj kući na adresi A. Šenoe 3 nalazi se FN elektrana snage 10 kW. Svi pokazatelji kvalitete električne energije tijekom mjerenja bili su u skladu s ograničenjima u normi EN 50160.

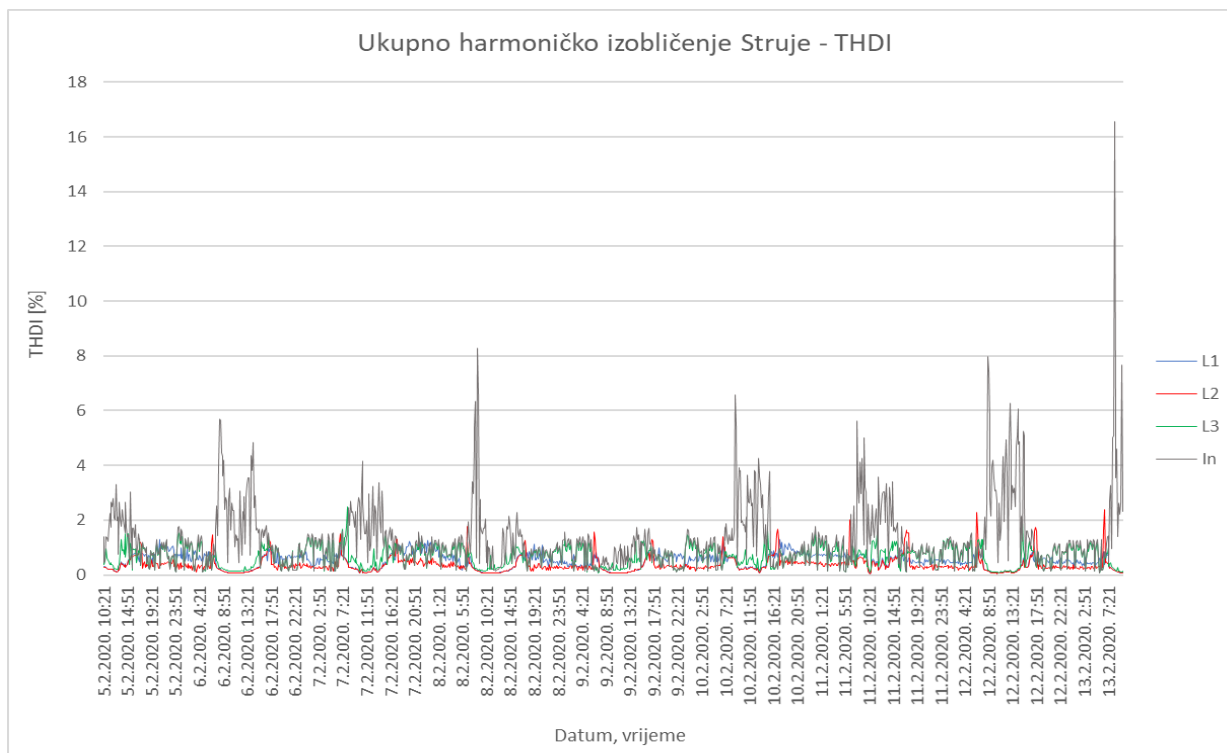
Vrijednosti viših harmonika napona u mjernom tjednu su, kao i u KTS 16, bile prilično niske u odnosu na granične vrijednosti norme EN 50160, Slika 6. Iznosi harmonika su prikazani u odnosu na svoje granične vrijednosti u EN 50160. Najviše se ističu 5., 7. i 15. harmonik napona.

Vrijednosti ukupnog harmoničkog izobličenja struja – THDI (Slika 7) odražavaju većinom utjecaj pretvarača FN elektrane – vrijednosti THD-a su više pri uključenju i isključenju elektrane te pri promjenama osunčanosti. S obzirom da se radi o relativnim vrijednostima THD-a (u odnosu na temeljni harmonik struje, koji ima nizak iznos pri uključenju-ujutro i isključenju-uvečer) snimljene više vrijednosti THD-a u stvarnosti nisu visoke. Također, važno je primijetiti da THD struje neutralnog vodiča tijekom cijelog mjernog tjedna ima viši iznos od faznih struja – što pokazuje prisutnost struja neparanih harmonika 3. reda (3., 9., 15. itd.).

All harmonics are within specified limits.



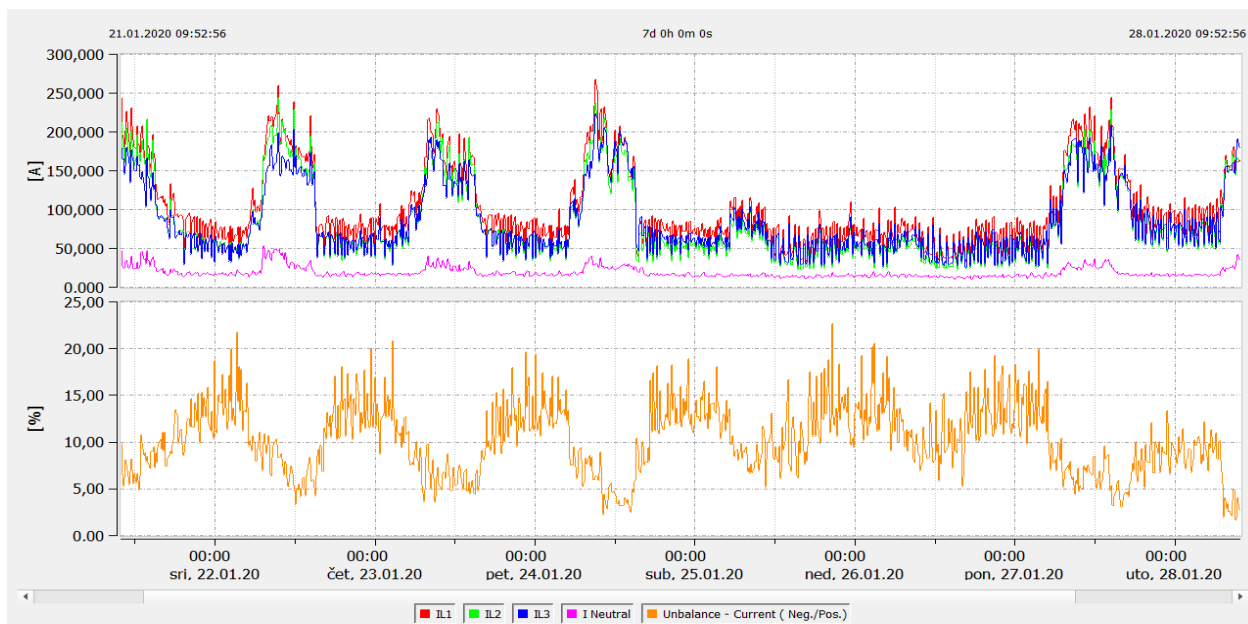
Slika 6. Spektar harmonika napona – A. Šenoe 3, Tenja.



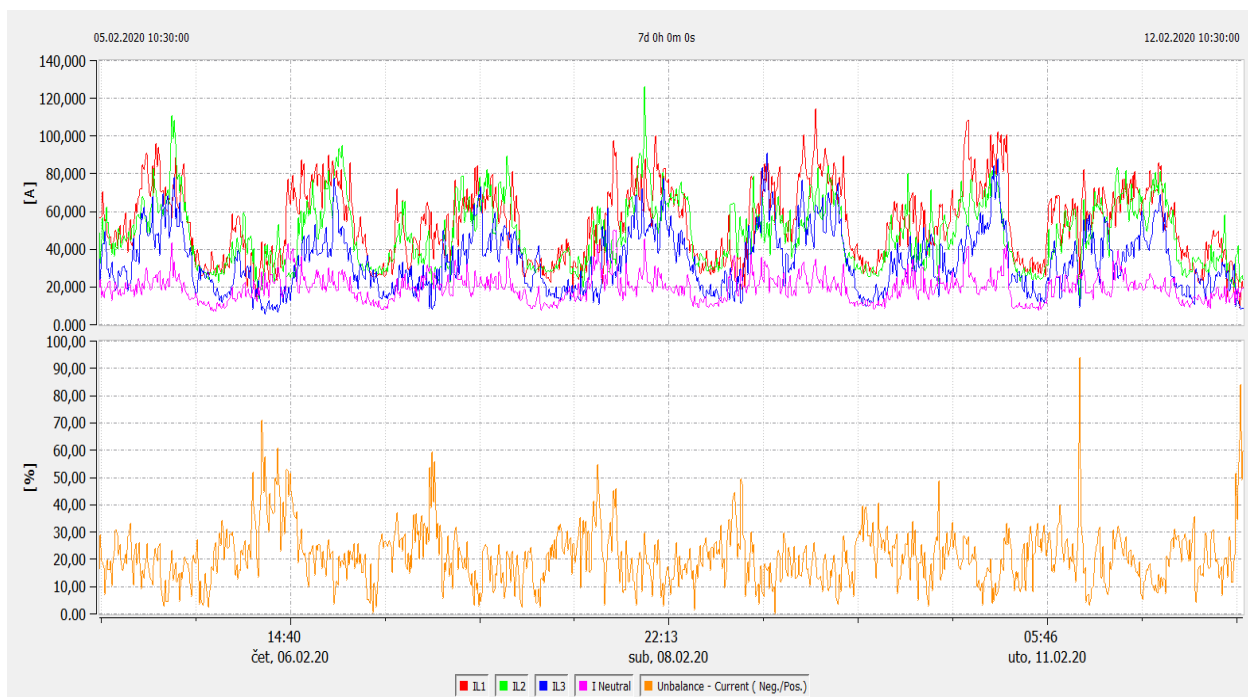
Slika 7. Ukupno harmoničko izobličenje struja – THDI - A. Šenoe 3, Tenja.

2.2. Nesimetrija

Vezano za **nesimetriju**, zanimljivo je da je strujna nesimetrija industrijskog postrojenja, koje se napaja iz **KTS 4**, niža radnim danima i tijekom radnog vremena, a vikendom i izvan radnog vremena ima više vrijednosti, Slika 8. To se djelomično odražava i na naponsku nesimetriju, čije su vrijednosti tijekom mjernog tjedna bile vrlo niske. Nešto više vrijednosti naponske nesimetrije snimljene su na izvodu koji se napaja iz **KTS 156** (podzemni, urbani). Uzrok ovim vrijednostima (koje su još uvijek znatno ispod granične vrijednosti norme EN 50160) su vidljivo veći iznosi struje u fazi L1 nego u ostale dvije faze – nesimetričnost opterećenja po fazama. Vrlo slična situacija zabilježena je i na izvodu koji se napaja iz **KTS 16** (nadzemni, ruralni). Ovdje je nesimetrija općenito najviša u odnosu na ostala dva spomenuta izvoda, ali se većina vrijednosti kreće do 0,5 %, što je još uvijek daleko ispod granične vrijednosti EN 50160 od 2 %. Kao i na prethodnom izvodu, zabilježeno je nejednoliko opterećenje faznih vodiča, Slika 9.



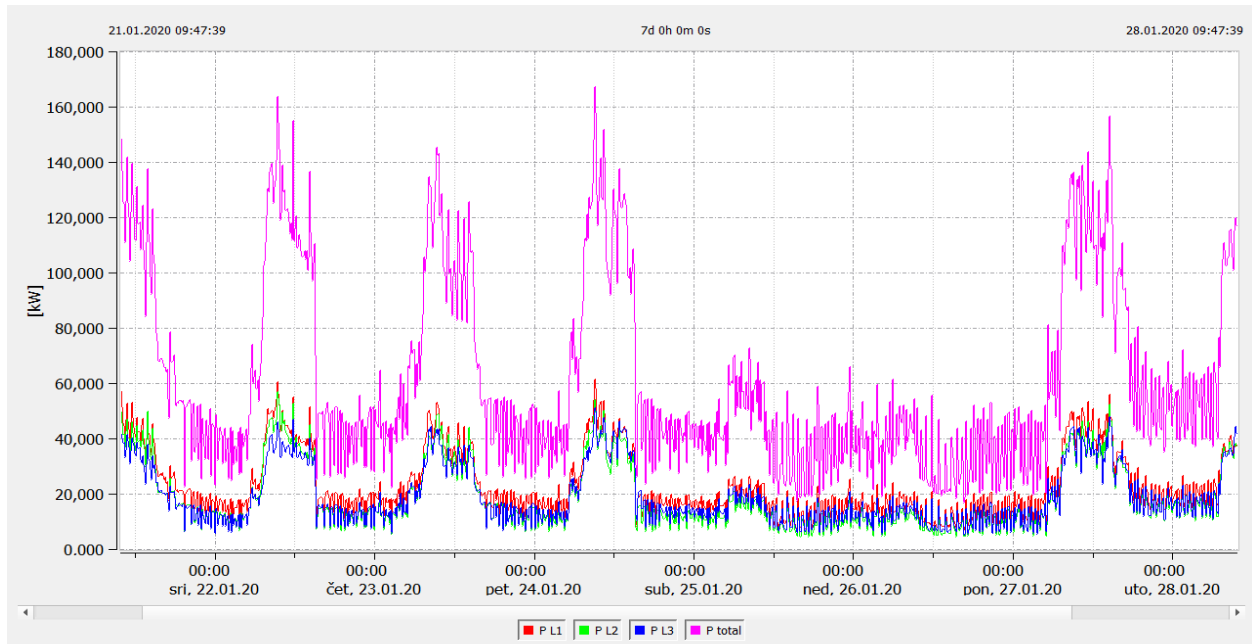
Slika 8. Usrednjene 10-minutne efektivne vrijednosti struja te strujna nesimetrija – KTS 4.



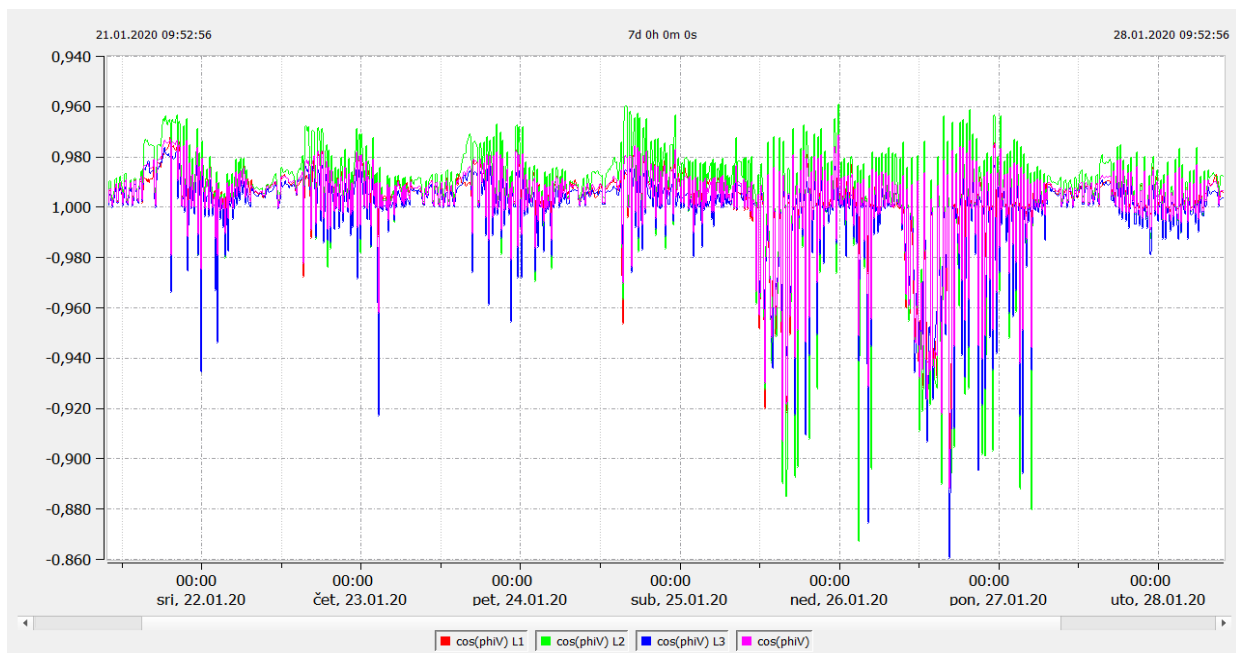
Slika 9. Usrednjene 10-minutne efektivne vrijednosti struja te strujna nesimetrija – KTS 16.

2.3. Karakter opterećenja i kompenzacija jalove snage

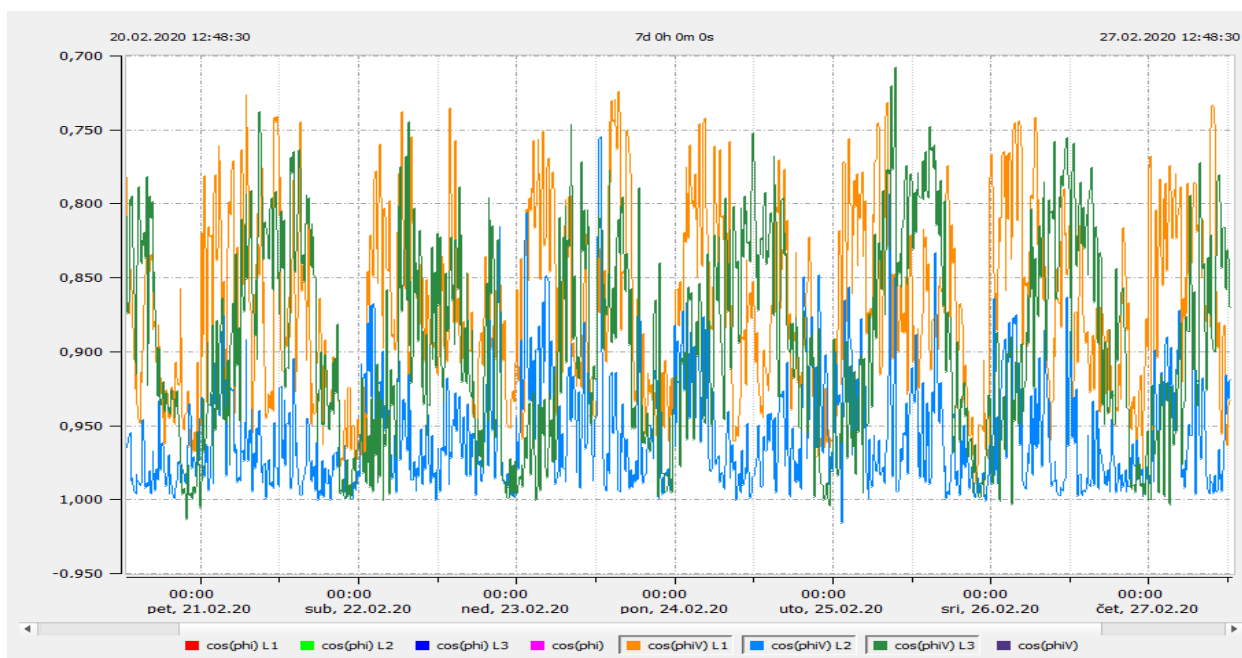
Analizirajući eventualne potrebe za kompenzacijom jalove snage na NN izvodima, slično kao i u prethodnim razmatranjima, najviše se ističe izvod koji se napaja sa KTS 4 (podzemni urbani, poslovni korisnik). Ritam opterećenja gdje se jasno razlikuju radni dani od vikenda, odnosno radno vrijeme od ostatka dana, odaje poslovni karakter potrošača priključenog na ovaj izvod, Slika 10. Opterećenje je pretežno induktivnog karaktera, radnim danima, ali i s povremenim dubljim skokovima u kapacitivne vrijednosti izvan radnog vremena i vikendom, Slika 11. Nasuprot ovome, na izvodima KTS 156 i KTS 16 mjerenja su pokazala jasni induktivni karakter potrošača ovih niskonaponskih izvoda koji je izraženiji u razdobljima veće potražnje. Također, mjerenja svih veličina vezanih za snage i faktor snage jasno odražavaju karakter potrošača ovih niskonaponskih izvoda – u kućanstvima je smanjena potražnja noću, a povećana tijekom dana, s izraženim maksimumom u večernjim satima, Slika 12.



Slika 10. Radna snaga tijekom mjernog tjedna – KTS 4.



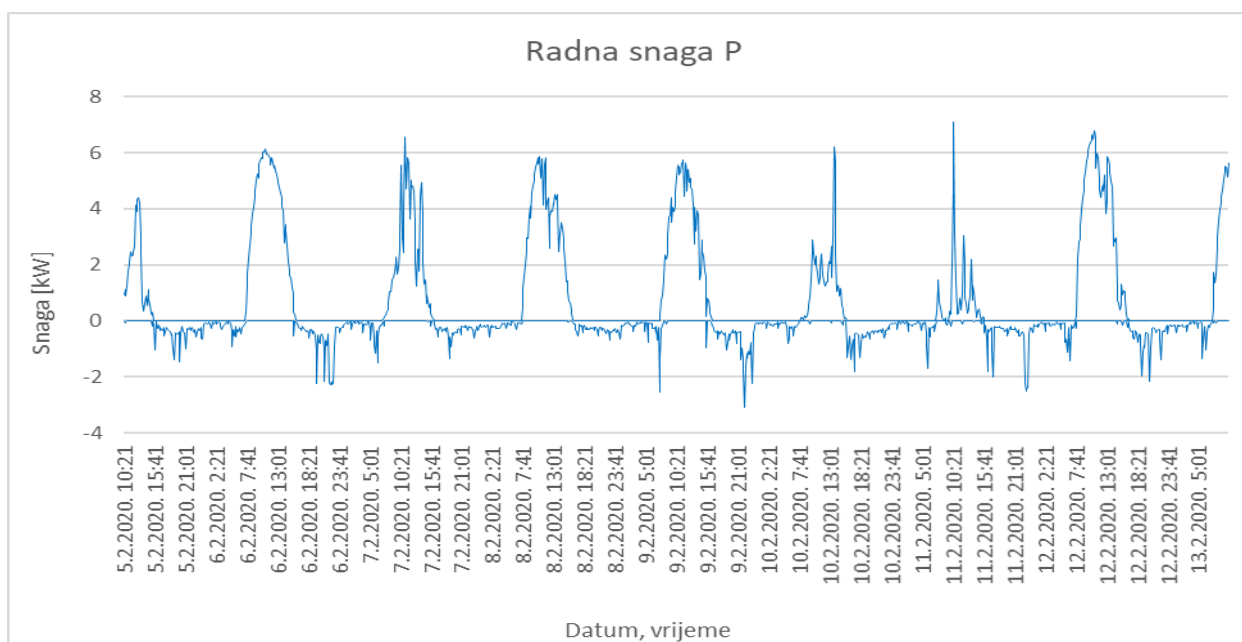
Slika 11. Vrijednosti $\cos\phi$ po fazama i ukupno – KTS 4.



Slika 12. Vrijednosti $\cos\phi$ po fazama i ukupno – KTS 156.

2.3.1. Karakter opterećenja u KO, A Šenoë 3, Tenja

Na Slici 13 prikazana je djelatna snaga izmjerena na adresi A. Šenoë 3, Tenja. Zbog činjenice da je na obiteljskoj kući FN elektrana, razlikuje se „pozitivna“ i „negativna“ snaga odnosno, kad je snaga pozitivna, energija ima smjer prema mreži (zbog proizvodnje fotonaponske elektrane), a kad snaga ima negativan predznak, energija ima smjer prema instalaciji obiteljske kuće. Može se vidjeti da je u prvom dijelu tjedna prevladavalo sunčano vrijeme, a vršne vrijednosti neto snage su se općenito kretale od 5,5 kW do 7,0 kW. Maksimalna zabilježena vrijednost snage u vremenu proizvodnje je 7,122 kW. Djelatna snaga pri potrošnji prikazuje dnevni ritam u obiteljskoj kući, gdje se vidi da je glavnina potrošnje između 16 i 24 sata.



Slika 13. Djelatna snaga obiteljske kuće - A. Šenoë 3, Tenja.

4. ZAKLJUČAK

U radu su ukratko predstavljeni najvažniji rezultati provedenih 7-dnevnih mjerenja na 3 lokacije u NN mreži HEP-ODS, Elektroslavonija Osijek i to istovremenim mjerenjem na početku izvoda i u dubini izvoda. Analizirani su dobiveni mjerni rezultati koji su prikazani u okviru "Studije novih tehnoloških rješenja za niskonaponske (NN) mreže obzirom na problematiku nelinearnosti i nesimetričnosti opterećenja, te potrebu za kompenzacijom jalove snage", a kasnije su poslužili za modeliranje modela potrebnog za opširnu analizu u spomenutoj studiji.

Prvo mjerenje načinjeno je na NN izvodu (KTS 16, Tenja, izvod broj 6: napajanje iz TS, podzemni kabelski izlaz i zračna mreža SKS, ruralni, kućanstva) na kojemu su spojene obiteljske kuće i 3 FN elektrane, svaka snage 10 kWp.

Drugo je mjerenje (izvod broj 8 u KTS 156, Uske njive, Osijek, urbani izvod, kućanstva) postavljeno radi analize NN podzemne kabelske mreže opterećene s kućanstvima.

Treće mjerenje (KTS 4 - podzemni urbani izvod, pretežno poslovni korisnici mreže) je provedeno u industrijskoj zoni s jednim velikim potrošačem na kraju podzemnog kabelskog izvoda (poduzetništvo).

U okviru studije načinjeno je i dodatno četvrto mjerenje (KTS 187 - Izvod koji napaja punionicu električnih vozila) vezano uz parametre kvalitete za punionicu električnih vozila kako bi se tijekom modeliranja u različitim scenarijima mogli primijeniti izmjereni parametri.

Općenito se može zaključiti da su rezultati zadovoljavajući u smislu kvalitete električne energije – na svim mjernim mjestima izmjerene vrijednosti su unutar ograničenja norme EN 50160.

5. LITERATURA

- [1] Z. Klaić, P. Marić, D. Šljivac, M. Stojkov, M. Žnidarec, M. Primorac, Z. Kraus "Studija novih tehnoloških rješenja za niskonaponske (NN) mreže obzirom na problematiku nelinearnosti i nesimetričnosti opterećenja, te potrebu za kompenzacijom jalove snage", Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, prosinac 2020.
- [2] FERIT Osijek, "Laboratorij za obnovljive izvore energije," 2020. [Online]. Available: <https://reslab.ferit.hr/>. [Accessed: 01-Sep-2020].
- [3] HEP Operator distribucijskog sustava (ODS), "Mrežna pravila distribucijskog sustava," NN 74/2018.
- [4] HEP Operator distribucijskog sustava (ODS), "Izmjene i dopune mrežnih pravila distribucijskog sustava," NN 52/2020.
- [5] "Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža," HRN EN 50160:2012, 2012.