

Prof.dr.sc. Zvonimir Klaić
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
zvonimir.klaic@ferit.hr

Matija Babić
HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o., Elektra
Vinkovci
matija.babic@hep.hr

Heidi Adrić, mag.ing.el.
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
heidi.margus@ferit.hr

Izv.prof.dr.sc. Krešimir Fekete
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
kresimir.fekete@ferit.hr

Mario Primorac, mag.ing.el.
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
mario.primorac@ferit.hr

UTJECAJ INDUSTRIJSKOG POTROŠAČA NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE U NISKONAPONSKOJ DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI HEP ODS-A DP ELEKTRA VINKOVCI

SAŽETAK

Zbog učestalih pritužbi na kvalitetu električne energije u dijelu elektrodistribucijske niskonaponske mreže HEP Operatora distribucijskog sustava d.o.o. Elektra Vinkovci, a koja se napaja iz transformatorske stanice 10/0,4 kV ŽSTS, izvedena su mjerenja i analiza kvalitete električne energije. Mjerenja su provedena u razdoblju od 14 dana, a rezultati mjerenja kvalitete električne energije analizirani su skladu s ograničenjima „Mrežnih pravila distribucijskog sustava,” NN 74/2018., „Izmjena i dopuna mrežnih pravila distribucijskog sustava,” NN 52/2020, norme HRN EN 50160:2012, Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava (EN 50160:2010) te norme HRN EN 61000-2-2:2008 (Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) – Dio 2-2: Okoliš – Razine kompatibilnosti za niskofrekvencijske vodene smetnje) i dojavu u javnim niskonaponskim energetske sustavima (IEC 61000-2-2:2002; EN 61000-2-2:2002)).

Ključne riječi: kvaliteta električne energije, harmonici, ukupno harmoničko izobličenje (THD), HRN EN 61000-2-2:2008

SUMMARY

Due to frequent complaints about power quality at specific part of low-voltage power distribution network of HEP Distribution system operator Elektra Vinkovci, which is powered from transformer station 10/0,4 kV ŽSTS, measurements and analysis of power quality are done. Measurements are collected in period of 14 days and results are analyzed in accordance with „Distribution system grid code” NN 74/2018., „Amendments of distribution system grid code,” NN 52/2020, standard HRN EN 50160:2012, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks (EN 50160:2010), and standard HRN EN 61000-2-2:2008 (Electromagnetic compatibility (EMC) -- Environment -- Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems (IEC 61000-2-2:2002; EN 61000-2-2:2002)).

Key words: power quality, harmonics, total harmonic distortion (THD), HRN EN 61000-2-2:2008

1. UVOD

U poslovnoj zoni u izgradnji koja trenutno ima dva potrošača, provedena su mjerenja i analiza kvalitete električne energije zbog većeg broja pritužbi na kvalitetu električne energije. Mjerenja su provedena u dijelu elektrodistribucijske niskonaponske mreže HEP Operatora distribucijskog sustava d.o.o. Elektra Vinkovci napajanog iz transformatorske stanice 10/0,4 kV ŽSTS.

Industrijski potrošač vrši obradu metala CNC strojevima. Zbog prigovora na kvalitetu električne energije od strane ostalih potrošača, djelatnici HEP Operatora distribucijskog sustava d.o.o. Elektra Vinkovci su spomenutog industrijskog potrošača odspojili sa ŽSTS i priključili na mobilnu transformatorsku stanicu koja je dopremljena neposredno pored postojeće ŽSTS. Na mobilnu transformatorsku stanicu je priključen samo predmetni industrijski potrošač. Uređaj za mjerenje kvalitete električne energije spojen je na samostojeći priključni mjerni ormarić (SPMO) industrijskog potrošača kako bi se izmjerio povratni utjecaj na kvalitetu električne energije.

Mjerenje kvalitete električne energije izvedeno je suvremenim trofaznim mrežnim analizatorom a-eberle PQ-Box 200, u razdoblju od 14 dana, a rezultati mjerenja kvalitete električne energije analizirani su skladu s ograničenjima „Mrežnih pravila distribucijskog sustava,” NN 74/2018., „Izmjena i dopuna mrežnih pravila distribucijskog sustava,” NN 52/2020, norme HRN EN 50160:2012, Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava (EN 50160:2010) te norme HRN EN 61000-2-2:2008 (Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) – Dio 2-2: Okoliš – Razine kompatibilnosti za niskofrekvencijske vođene smetnje i dojavu u javnim niskonaponskim energetske sustavima (IEC 61000-2-2:2002; EN 61000-2-2:2002)).

2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

2.1. Harmonici

Harmonici su sinusni naponi ili struje s frekvencijama koje su višekratnici nazivne frekvencije. Količina izobličenja u naponskom ili strujnom valnom obliku definira se pomoću pokazatelja koji se naziva ukupno harmonijsko izobličenje THD (engl. Total Harmonic Distortion). Ukupno harmonijsko izobličenje THD definirano je kao odnos srednje vrijednosti kvadrata harmonijskog sadržaja i srednje vrijednosti kvadrata temeljne veličine i izražen kao postotak osnovne vrijednosti [1,2].

$$THD_U = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{U_h^2}{U_1^2}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

gdje su:

THD_U – ukupno harmonijsko izobličenje (napona)

U_h – srednja vrijednost harmonijskog sadržaja

U_1 – srednja vrijednost temeljne veličine.

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Gdje su:

THD_I – ukupno harmonijsko izobličenje (struje)

I_h – srednja vrijednost harmonijskog sadržaja

I_1 – srednja vrijednost temeljne veličine.

THD, dakle, daje zbroj efektivnih vrijednosti napona svih harmoničkih frekvencija, a prikazuje se relativno u odnosu na osnovni harmonik.

Ukupni učinak izobličenja u trenutnom valnom obliku struje mjeri se pokazateljem koji se naziva ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju TDD (engl. Total Demand Distortion). Za razliku od THD, u kojem se sadržaj harmonika prikazuje u odnosu na osnovnu frekvenciju vrijednosti nazivne struje, TDD je omjer izmjerene harmonijske struje i struje pri maksimalnom opterećenju. Struja maksimalnog opterećenja je ukupna količina neharmonične struje koju troše sva opterećenja na sustavu kada je sustav u vršnom opterećenju. Dakle, TDD je THD struje normalizirano na maksimalnu struju opterećenja. TDD je jednak THD_i samo pri punom opterećenju [1,2]. _____

$$TDD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{I_h^2}{I_L^2}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

gdje je:

TDD – ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na potražnju

I_h – izmjerena harmonijska struja

I_L – struja pri maksimalnom opterećenju.

Strujni harmonici na impedanciji mreže uzrokuju naponske harmonike koji mogu ometati rad ostalih trošila priključenih u istu točku. Zbog toga je važan frekvencijski odziv mreže koji može imati važnu ulogu u ograničavanju naponskog izobličenja.

Najčešći izvori harmonika: industrijske instalacije - trošila s energetsom elektronikom, s električnim lukom, rasvjeta te uzbuda energetskih transformatora; velike instalacije računalne opreme u uslužnom sektoru; oprema u kućanstvima - trošila s pretvaračima ili sklopnim napajanjima čiji kumulativni efekt emisije harmonika nije zanemariv. Izvori najčešće generiraju neparne harmonike, a uzbuda energetskog transformatora, polarizirana trošila (poluvalni ispravljači) i lučne peći, uz neparne harmonike, proizvode i parne [2].

Sve posljedice harmonika imaju utjecaj na dodatne troškove i to zbog opadanja energetske učinkovitosti instalacija (energetski gubici), predimenzioniranja opreme te zbog gubitaka (ubrzano starenje opreme, neželjeno isklapanje).

2.2. Norma HRN EN 61000-2-2:2008

Pravilnici i norme prema kojima se definira i analizira kvaliteta električne energije su: Mrežna pravila distribucijskog sustava, NN 74/2018. [3], „Izmjena i dopuna mrežnih pravila distribucijskog sustava,“ NN 52/2020 [4], norma HRN EN 50160:2012, Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava (EN 50160:2010) [5] te norma HRN EN 61000-2-2:2008 (Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) – Dio 2-2: Okoliš – Razine kompatibilnosti za niskofrekvencijske vodene smetnje i dojavu u javnim niskonaponskim energetskim sustavima (IEC 61000-2-2:2002; EN 61000-2-2:2002). [6]. Poseban naglasak u ovom referatu je na normu HRN EN 61000-2-2:2008.

Norma HRN EN 61000-2-2:2008 se odnosi na vodene smetnje u frekvencijskom rasponu od 0 kHz do 9 kHz, s proširenjem do 148,5 kHz posebno za mrežne signalizacijske sustave [3]. Daje razine kompatibilnosti za javne niskonaponske izmjenične distribucijske sustave nazivnog napona do 420 V jednofazno ili 690 V trofazno i nazivne frekvencije 50 Hz ili 60 Hz.

Razine kompatibilnosti navedene u ovoj normi primjenjuju se na mjestu zajedničke priključne točke (engl. point of common coupling).

Prema [6], razmatraju se sljedeće smetnje:

- kolebanja napona i treperenje;
- harmonici do i uključujući 40. red;
- međuharmonici do 40. harmonika;
- izobličenja napona na višim frekvencijama (iznad 40. harmonika do 150 Hz);
- naponski propadi i kratki prekidi napajanja;
- nesimetrija napona;
- prijelazni prenaponi;
- promjene mrežne frekvencije;
- istosmjerna komponenta;
- signali iz mrežnih komunikacijskih sustava (MCS).

Granične vrijednosti navedene norme za više harmonike napona proračunate su i prikazane su u idućoj tablici (Tablica I.).

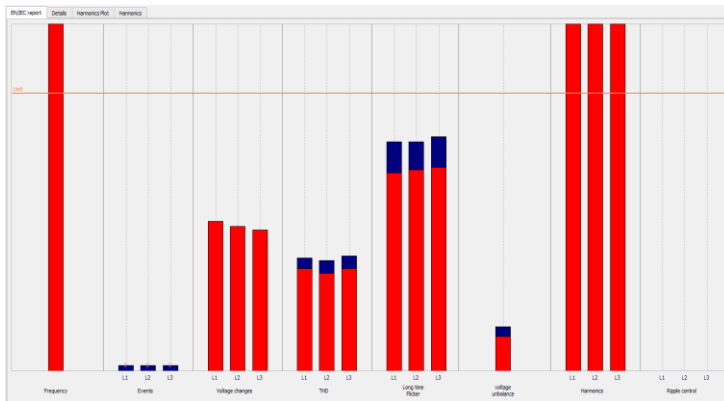
Tablica I. Razine kompatibilnosti za više redove harmonika [6].

<i>Neparni harmonici koji nisu višekratnici trećeg harmonika</i>		<i>Neparni harmonici koji su višekratnici trećeg harmonika</i>		<i>Parni harmonici</i>	
Red harmonika h	U_h (%)	Red harmonika h	U_h (%)	Red harmonika h	U_h (%)
17	2,00	27	0,20	10	0,50
19	1,76	33	0,20	12	0,46
23	1,41	39	0,20	14	0,43
25	1,27			16	0,41
29	1,06			18	0,39
31	0,97			20	0,38
35	0,83			22	0,36
37	0,77			24	0,35
				26	0,35
				28	0,34
				30	0,33
				32	0,33
				34	0,32
				36	0,32
				38	0,32
				40	0,31

3. REZULTATI MJERENJA I ANALIZA PODATAKA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Mjerenje kvalitete električne energije izvedeno je prema normi HRN EN 50160:2012, *Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava* (EN 50160:2010), i to u dva mjerna tjedna: od 15.09.2021. u 11.30 sati do 22.09.2021. u 11.30 sati te od 27.09.2021. u 11.40 sati do 04.10.2021. u 11.40 sati.

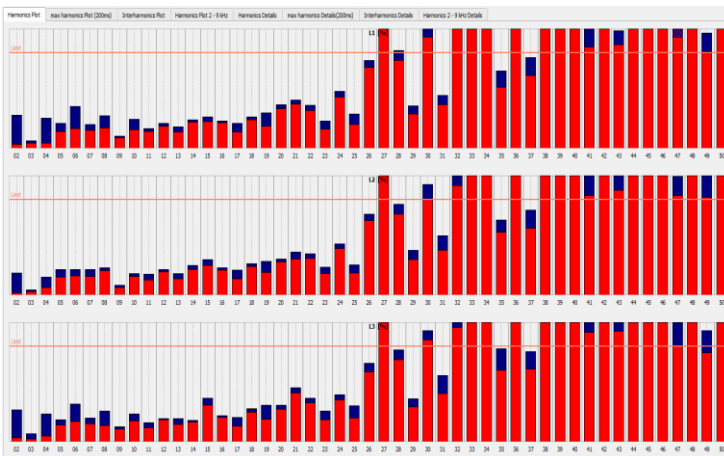
Statističke vrijednosti pokazatelja kvalitete električne energije za prvi mjerni tjedan prikazane su na slici 1. S obzirom na vrlo slične rezultate mjerenja tijekom cijelog mjernog razdoblja, analizirat će se samo prvi mjerni tjedan, od 15.09.2021. do 22.09.2021.



Slika 1. Sumarni prikaz pokazatelja kvalitete – 1. mjerni tjedan

Uočeno je da je većina pokazatelja kvalitete napona u skladu s ograničenjima spomenute norme. Pogonska frekvencija i harmonici prekoračuju zadana ograničenja, dok su naponski događaji, kolebanje napona, THD_U – ukupno harmonijsko izobličenje napona, dugotrajno treperenje napona (flikeri) te naponska nesimetrija unutar ograničenja Mrežnih pravila, norme EN 50160 te norme HRN EN 61000-2-2.

Prikazom vrijednosti viših harmonika u prvom mjernom tjednu (slika 2), može se vidjeti kako većina viših redova harmonika (počevši od 27.reda) ima previsoke vrijednosti u odnosu na granične vrijednosti norme HRN EN 61000-2-2:2008. Spomenuta norma daje ograničenja za redove harmonika do 40. (uključujući 40. red), redovi od 41. do 50. se neće analizirati.



Slika 2. Spektar viših harmonika napona u prvom mjernom tjednu

Slika 3 prikazuje 95 %-tne i maksimalne vrijednosti harmonika u prvom mjernom tjednu. Može se vidjeti da su zabilježene previsoke vrijednosti harmonika 27., 30., 32., 33., 34., 36., 38., 39. i 40. reda.

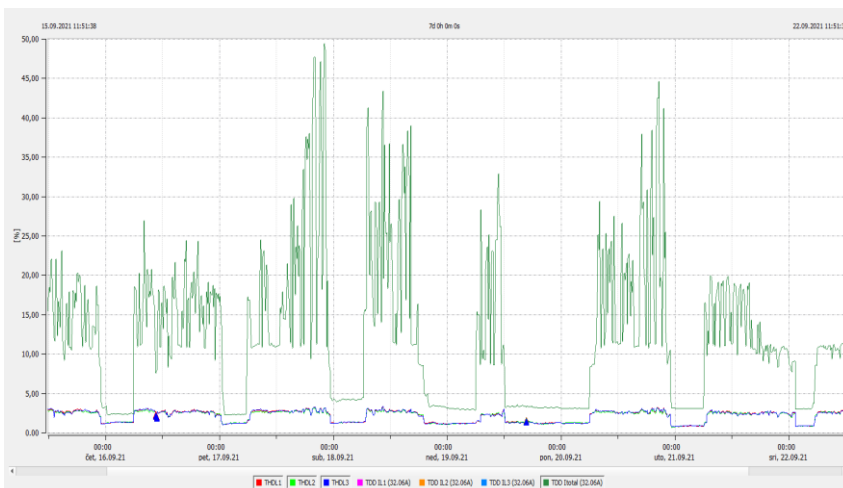
Harmonics Plot	max Harmonics Plot (200ms)	Interharmonics Plot	Harmonics Plot 2 - 9 kHz	Harmonics Details	max Harmonics Details(200ms)	Interharmonics Details	Harmonics 2 - 9 kHz Details
	L1- 95% [%]	L1- Max [%]	L2- 95% [%]	L2- Max [%]	L3- 95% [%]	L3- Max [%]	
07	0.03	0.06	0.03	0.05	0.04	0.05	
08	0.11	0.17	0.13	0.14	0.09	0.16	
09	0.16	0.19	0.12	0.16	0.20	0.23	
10	0.10	0.15	0.10	0.11	0.11	0.15	
11	0.42	0.75	0.36	0.77	0.52	0.71	
12	0.12	0.19	0.12	0.13	0.12	0.12	
13	0.31	0.68	0.32	0.68	0.55	0.74	
14	0.14	0.15	0.14	0.16	0.10	0.11	
15	0.14	0.16	0.15	0.18	0.19	0.22	
16	0.13	0.14	0.13	0.14	0.13	0.14	
17	0.34	0.52	0.34	0.55	0.34	0.52	
18	0.15	0.16	0.15	0.17	0.16	0.18	
19	0.34	0.56	0.36	0.53	0.35	0.58	
20	0.21	0.23	0.17	0.19	0.17	0.19	
21	0.23	0.25	0.19	0.20	0.26	0.28	
22	0.28	0.22	0.19	0.22	0.21	0.23	
23	0.30	0.43	0.34	0.44	0.35	0.48	
24	0.27	0.30	0.24	0.27	0.22	0.25	
25	0.38	0.54	0.35	0.47	0.37	0.56	
26	0.38	0.52	0.37	0.50	0.38	0.52	
27	0.30	0.34	0.31	0.36	0.32	0.35	
28	0.31	0.35	0.29	0.32	0.29	0.33	
29	0.38	0.47	0.38	0.50	0.39	0.48	
30	0.39	0.43	0.33	0.38	0.35	0.38	
31	0.48	0.54	0.46	0.48	0.46	0.47	
32	0.42	0.47	0.35	0.42	0.39	0.43	
33	0.42	0.45	0.42	0.47	0.46	0.48	
34	0.43	0.47	0.42	0.45	0.45	0.49	
35	0.53	0.67	0.55	0.65	0.52	0.61	
36	0.47	0.54	0.48	0.54	0.47	0.48	
37	0.59	0.73	0.54	0.68	0.59	0.73	
38	0.58	0.65	0.54	0.61	0.59	0.67	
39	0.61	0.66	0.59	0.66	0.67	0.72	
40	0.59	0.65	0.59	0.65	0.64	0.68	
41	0.71	0.87	0.70	0.86	0.77	0.82	
42	0.62	0.68	0.61	0.68	0.64	0.67	
43	0.68	0.77	0.69	0.80	0.75	0.87	
44	0.41	0.48	0.44	0.79	0.43	0.73	

Slika 3. 95 %-tne i maksimalne vrijednosti harmonika u prvom mjernom tjednu

Dalje su na slici 4 prikazane vrijednosti ukupnog harmonijskog izobličenja napona – THDu (donje linije – crvena, zelena i plava, za svaku fazu) te zbrojene vrijednosti za sve tri faze ukupnog harmonijskog izobličenja struja u odnosu na potražnju – TDD (zeleno linija). Premda su snimljene vrijednosti THDu tijekom cijelog tjedna niže od granične vrijednosti Mrežnih pravila i normi EN 50160 te IEC 61000-2-2, THDu = 8%, jasno se vidi da vrijednosti TDD, koje predstavljaju zbrojene struje viših harmonika industrijskog potrošača, izazivaju porast vrijednosti ukupnog harmonijskog izobličenja napona – THDu. Drugim riječima, struje viših harmonika industrijskog potrošača izazivaju napone viših harmonika na priključnom mjestu u niskonaponskoj mreži.

Commented [ATT1]: Možda bi bilo bolje i TDD staviti po fazama.

Commented [zk2R1]: Ovo sada ne mogu promijeniti jer nemam file ovdje. Međutim, nije toliko ni ključno, važno je da se vidi istovremenost, odnosno utjecaj TDD-a na THD.

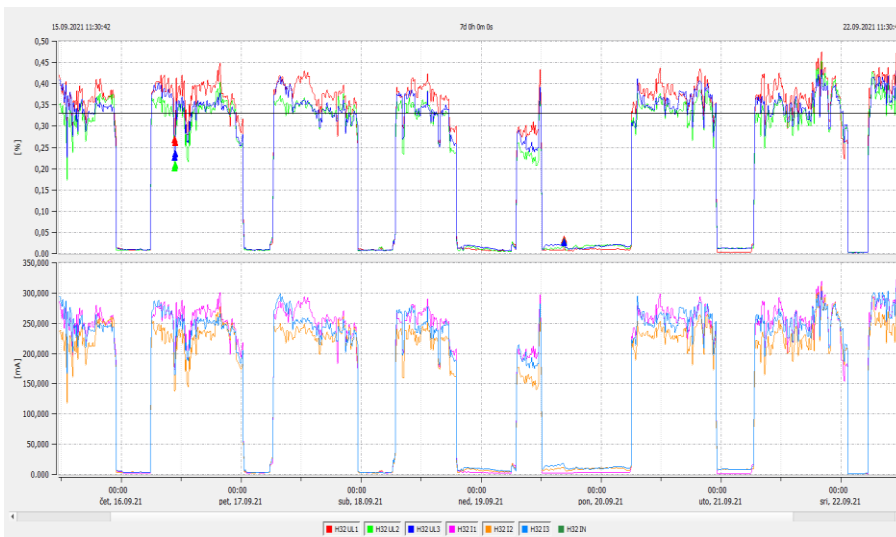


Slika 4. Vrijednosti ukupnog harmonijskog izobličenja napona – THDu (donje linije – crvena, zelena i plava, za svaku fazu) te zbrojene vrijednosti za sve tri faze ukupnog harmonijskog izobličenja u odnosu na potražnju – TDD (zeleno linija)

Kako su snimljene previsoke vrijednosti viših redova harmonika (27., 30., 32., 33., 34., 36., 38., 39. i 40. reda), na slikama 5 i 6 prikazani su naponski (gornji dijagram) i strujni (donji dijagram) harmonici 27. i 32. reda u prvom mjernom tjednu. Horizontalne crne linije kod naponskih harmonika označavaju gornje granične vrijednosti za pojedini harmonik (prema normi HRN EN 61000-2-2) i na slikama se vidi da oba prikazana harmonika većinom imaju previsoke vrijednosti tijekom pogona industrijskog potrošača. Također, na spomenutim slikama vidljivo je i veliko podudaranje vremena i oblika naponskih i strujnih harmonika, što nesumnjivo ukazuje da su struje 27. i 32. harmonika izazvale previsoke napone istih redova harmonika u niskonaponskoj mreži. Isti rezultat je za sve ostale gore nabrojane redove harmonika s previsokim vrijednostima.

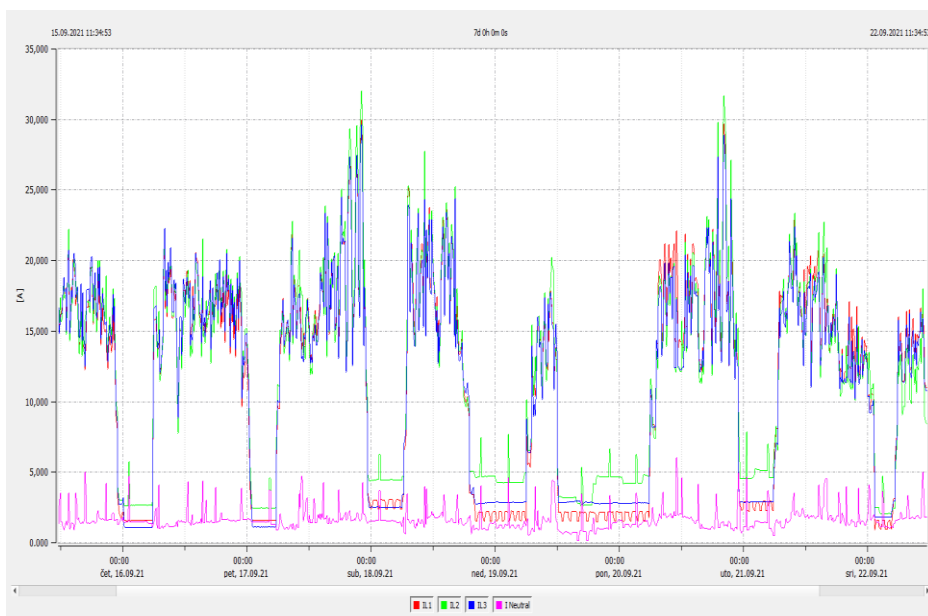


Slika 5. Naponski (gornji dijagram) i strujni (donji dijagram) harmonici 27. reda u prvom mjernom tjednu



Slika 6. Naponski (gornji dijagram) i strujni (donji dijagram) harmonici 32. reda u prvom mjernom tjednu

Na idućoj slici (Slika 7.) prikazana je struja industrijskog potrošača iz koje se vidi ritam potrošnje tog potrošača. Ritam potrošnje industrijskog potrošača odgovara ritmu previsokih vrijednosti viših harmonika 27. i 32. reda prikazanih na slikama 5 i 6. Najviša snimljena 10-minutna usrednjena efektivna vrijednost struje u 1. mjestnom tjednu iznosi 32,06 A.



Slika 7. 10-minutne usrednjene efektivne vrijednosti struja u 1. mjestnom tjednu

4. ZAKLJUČAK

U elektrodistribucijskoj niskonaponskoj mreži HEP-Operatora distribucijskog sustava d.o.o. Elektro Vinkovci, izvedena su mjerenja kvalitete električne energije u dva razdoblja od po 7 dana (ukupno 14 dana). Mjereno je u dijelu distribucijske mreže napajane iz jedne ŽSTS. Zbog prigovora na kvalitetu električne energije od strane ostalih potrošača, djelatnici HEP Operatora distribucijskog sustava d.o.o. Elektro Vinkovci su industrijskog potrošača odspojili sa spomenute ŽSTS i priključili na mobilnu transformatorsku stanicu koja je dopremljena neposredno pored postojeće ŽSTS. Na mobilnu transformatorsku stanicu je bio priključen samo predmetni industrijski potrošač. Uređaj za mjerenje kvalitete električne energije, spojen je na samostojeći priključni mjerni ormarić (SPMO) spomenutog industrijskog potrošača kako bi se izmjerio povratni utjecaj na kvalitetu električne energije.

Mjerenje kvalitete električne energije izvedeno je suvremenim trofaznim mrežnim analizatorom a-eberle PQ-Box 200, a rezultati mjerenja kvalitete električne energije analizirani su skladu s ograničenjima „Mrežnih pravila distribucijskog sustava,” NN 74/2018., „Izmjena i dopuna mrežnih pravila distribucijskog sustava,” NN 52/2020, norme HRN EN 50160:2012, Naponske karakteristike električne energije iz javnog distribucijskog sustava (EN 50160:2010) te norme HRN EN 61000-2-2:2008 (Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) – Dio 2-2: Okoliš – Razine kompatibilnosti za niskofrekvencijske vođene smetnje i dojavu u javnim niskonaponskim energetskim sustavima (IEC 61000-2-2:2002; EN 61000-2-2:2002)).

Analiza mjerenja parametara kvalitete električne energije pokazala je da pogonska frekvencija i harmonici prekoračuju zadana ograničenja, dok su naponski događaji, kolebanje napona, THDu – ukupno harmonijsko izobličenje napona, dugotrajno treperenje napona (flikeri) te naponska nesimetrija unutar ograničenja Mrežnih pravila, norme EN 50160 te norme HRN EN 61000-2-2.

Detaljnom analizom rezultata mjerenja utvrđene su snimljene previsoke vrijednosti viših redova harmonika i to 27., 30., 32., 33., 34., 36., 38., 39. i 40. reda. S obzirom na visoku podudarnost i vremena i oblika krivulja strujnih i naponskih harmonika navedenih redova, nesumnjivo je dokazano da su struje gore navedenih redova harmonika izazvale previsoke napone istih redova harmonika u elektrodistribucijskoj niskonaponskoj mreži. Drugim riječima, strujni harmonici industrijskog potrošača izazvali su previsoke iznose naponskih harmonika, čime je utvrđeno da povratni utjecaj na mrežu prelazi razine propisane „Mrežnim pravilima distribucijskog sustava,” NN 74/2018., i „Izmjenama i dopunama mrežnih pravila distribucijskog sustava,” NN 52/2020, za pojavu viših harmonika u struji i naponu.

5. LITERATURA

- [1] Francisco C. De La Rosa: HARMONICS AND POWER SYSTEMS, Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [2] Angelo Baghini, "Handbook of power quality" John Wiley & Sons, LTD, 2008.
- [3] Mrežna pravila distribucijskog sustava," NN 74/2018
- [4] Izmjena i dopuna mrežnih pravila distribucijskog sustava," NN 52/2020
- [5] HRN EN 50160:2012 – Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža (EN 50160:2010), veljača 2012.
- [6] HRVATSKA NORMA HRN EN 61000-2-2:2008 (Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) – Dio 2-2: Okoliš – Razine kompatibilnosti za niskofrekvencijske vođene smetnje i dojavu u javnim niskonaponskim energetskim sustavima (IEC 61000-2-2:2002; EN 61000-2-2:2002))