

## **UTICAJ INDUSTRIJSKIH INDUKCIONIH PEĆI NA PROSTIRANJE VIŠIH HARMONIKA U SREDNJENAPONSKOJ I VISOKONAPONSKOJ ELEKTROENERGETSKOJ MREŽI**

A. Jović, PD „Jugoistok“ Niš, , Srbija<sup>1</sup>  
D. Stojanović, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija  
N. Krečković, PD „Elektrokosmet“ Kosovska Mitrovica, Srbija

### **UVOD**

Pri radu nelinearnih uređaja-pogona velike snage u industrijskim električnim mrežama, javljaju se viši harmonici napona i struje. Izobličenja napona i struja mogu se preneti u mreže višeg naponskog nivoa. Tako, viši harmonici snažnih nelinearnih prijemnika na niskom naponu mogu se preneti u napojne mreže viših naponskih nivoa, kao što su 10 kV, 20 kV, pa i 35 kV. Viši harmonici napona u mrežama srednjeg i visokog napona, mogu izazvati neregularan rad ostalih potrošača koje napajaju. Takođe, prisustvo viših harmonika u struji opterećenja izaziva povećane gubitke električne energije u mrežama svih naponskih nivoa. Osim toga, promene režima rada industrijskih pogona su uglavnom česte i brze i u skladu su sa potrebama proizvodnog procesa. Kod pojedinih procesa, struja opterećenja električnog pogona poraste i do nekoliko desetina (ili stotine) puta u trajanju od samo nekoliko sekundi. Nagle promene struje opterećenja pogona, mogu izazvati povremene padove napona iznad dozvoljenih granica.

U našoj distributivnoj mreži nalazi se nekoliko proizvodnih pogona sa snažnim nelinearnim uređajima. Za svaki od takvih pogona, postavlja se pitanje koliki je njegov uticaj na kvalitet napona u mreži, odnosno u kojoj meri se prenose viši harmonici u mrežu višeg napona i koliki je doseg eventualnih poremećaja napona i struje [1, 2, 3]. U ovom radu prezentiraju se rezultati istraživanja koji su sprovedeni na primeru industrijskog kompleksa „Livnica“ iz Leskovca. Istovremeno, izvršena su jednonedeljna merenja parametara kvaliteta električne energije u tri različite tačke elektroenergetskog sistema, različitih naponskih nivoa 0,4 kV, 10 kV i 110 kV. U svakoj tački instaliran je po jedan mrežni analizator snage, sa podešnim periodom usrednjavanja od 10 minuta, što je u skladu sa preporukom iz EN 50160. Korišćeni mrežni analizator snima napone i struje, a u željenom trenutku može da snimi talasni oblik svih napona i struja, kao i spektar njihovih harmonika.

### **OPIS MERNOG MESTA**

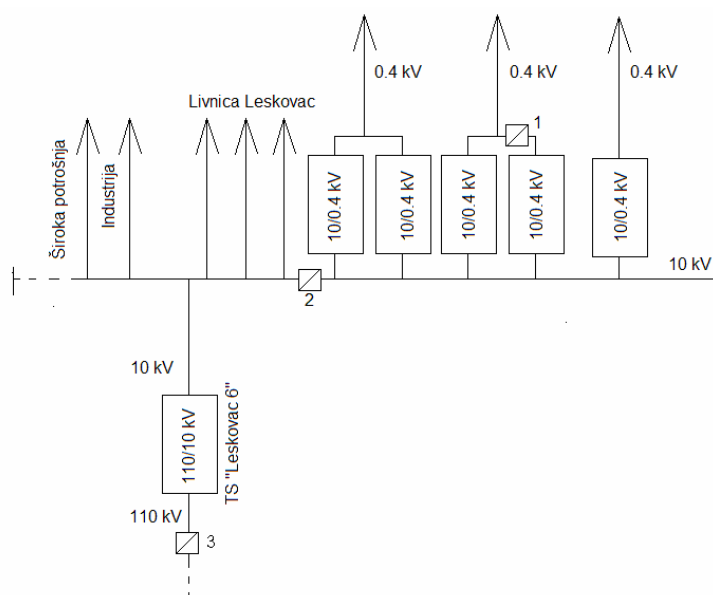
Industrijska TS 10/0,4 kV „Livnica“ iz Leskovca, ima četiri transformatora naznačenih snaga 1000 kVA, sprege Dy5, pri čemu po dva transformatora u paralelnom radu napajaju trofazne mostne tiristorske pretvarače za dve srednjefrekventne indukcione peći (400-600 Hz) za topljenje metala. Istovremena merenja parametara kvaliteta električne energije su obavljena u tri tačke elektroenergetske mreže na

---

<sup>1</sup> Aleksandar Jović, [aleksandar.jovic@jugoistok.com](mailto:aleksandar.jovic@jugoistok.com)

pravcu napajanja indukcionih peći, pri čemu su dve tačke merenja u industrijskoj transformatorskoj stanici TS 10/0,4kV. Prva merna tačka su sabirnice niskog napona u TS 10/0,4kV sa kojih se napaja indukciona peć preko pretvarača. Druga merna tačka su 10 kV sabirnice transformatora. Napajanje ovih sabirnica izvedeno je kablovima (IPO 13A 3x150 mm<sup>2</sup>) direktno iz transformatorskog postrojenja 110/10 kV/kV, TS „Leskovac 6“ (2x31.5 MVA). Mrežni analizator snage je priključen na sekundarne strane postojećih mernih naponskih i strujnih transformatora, preko kojih se meri zbirna potrošnja pomenutih transformatora 10/0.4 kV/kV. Tokom merenja, prati se ukupno opterećenje u svim radnim režimima, od punog opterećenja indukcionih peći do rada transformatora u praznom hodu za vreme vikenda. Treća tačka merenja je visokonaponska strana transformatora u TS 110/10 kV/kV „Leskovac 6“. Transformatorska stanica poseduje dva transformatora pojedinačne snage 31.5 MVA, ali je u vremenu kada su vršena merenja radio samo jedan. Ova transformatorska stanica se napaja iz postrojenja 220/110 kV/kV „Leskovac 2“. Najznačajniji pojedinačni potrošač po preuzetoj energiji i snazi u TS „Leskovac 6“ je preduzeće „Livnica“ čije vršno opterećenje na mesečnom nivou iznosi oko 2,5 MW. Ka ovom potrošaču polazi osam 10 kV izvoda (obično su dva u vrućoj rezervi). Osim toga, sa istih sabirnica polazi još 16 aktivnih 10 kV izvoda. Najveći udeo u preostalom delu opterećenja imaju potrošači iz kategorije „široka potrošnja“, iako dva izvoda napajaju druge manje industrijske potrošače.

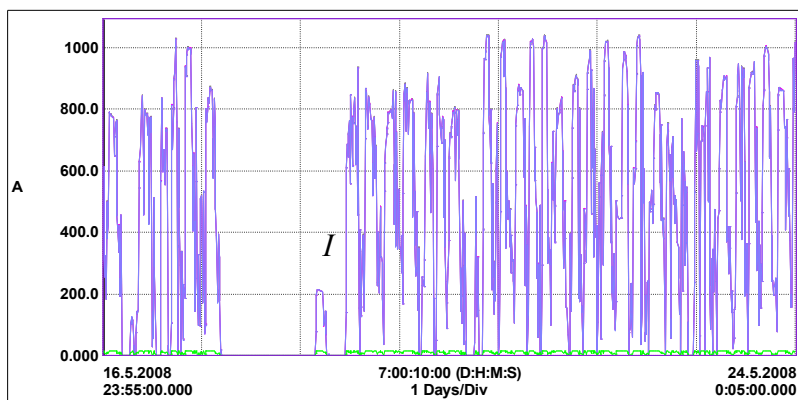
Na slici 1. je prikazana jednopolna šema analizirane distributivne mreže. Na slici su posebno obeležene merne tačke (kvadratić sa dijagonalom) u kojima je vršeno merenje i snimanje parametara kvaliteta električne energije, odnosno viši harmonici napona i struje.



Slika 1. Jednopolna šema distributivne mreže sa označenim mestima merenja viših harmonika

## REZULTATI MERENJA

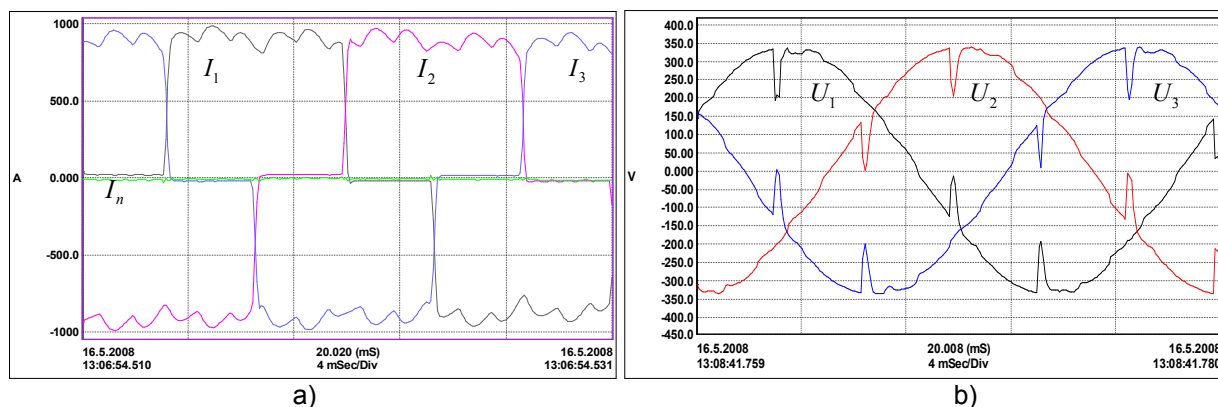
Na slici 2 prikazan je dijagram struje opterećenja jednog transformatora 10/0,4 kV, koji napaja indukcionu peć. Struja opterećenja drugog transformatora je ista, s obzirom na to da su transformatori istih karakteristika i da rade paralelno. Pod karakteristikama transformatora se podrazumevaju: napon kratkog spoja, sprega transformatora, naznačeni naponi, naznačena snaga i prenosni odnos transformatora.



Slika 2. Struja opterećenja transformatora na 0,4 kV u vremenu

Snimanje je započeto u subotu u 00h i trajalo je ravno nedelju dana, do petka u 24h. Nedelja je neredni dan pa je opterećenje indukcijske peći jednako nuli, tačnije u periodu od 04h 45min u nedelji do 03h 25min u ponedjeljak. Struje opterećenja  $I$  su gotovo iste u svim fazama transformatora. Maksimalne zabeležene vrednosti struje opterećenja po fazama su 1039A, 1036A i 1036A, dok su prosečne vrednosti za ceo period merenja (uključujući i nedelju kao neradni dan) iznosile 426,1A, 425,4A i 425,1A, respektivno. Visoka simetrija struje opterećenja transformatora ogleda se i kroz nisku vrednost faktora nesimetrije  $I_{unb}(\%)$ . Najveća vrednost faktora nesimetrije struje opterećenja na niskom naponu, za sve vreme merenja iznosila je tek 1,2%. Indukcijske peći su tipični nelinearni potrošači čija je struja opterećenja značajno deformisana. Nivo deformisanosti struje opterećenja iskazuje se parametrom THDI, odnosno totalnom harmonijskom distorzijom struje opterećenja, u procentima. U periodu merenja, parametar THDI u svim fazama se kretao u granicama od 16,1% do 44%. Najizraženiji viši harmonici u struji opterećenja su peti, sedmi, jedanaesti, trinaesti, sedamnaesti, devetnaesti, dvadeset treći, dvadeset peti itd. Prosečne procentualne vrednosti ovih viših harmonika struje opterećenja u odnosu na osnovni harmonik, u svim fazama iznosile su: 22,4%, 11,3%, 8,7%, 6,6%, 5,1%, 4,5%, 3,6%, 2,5%, respektivno.

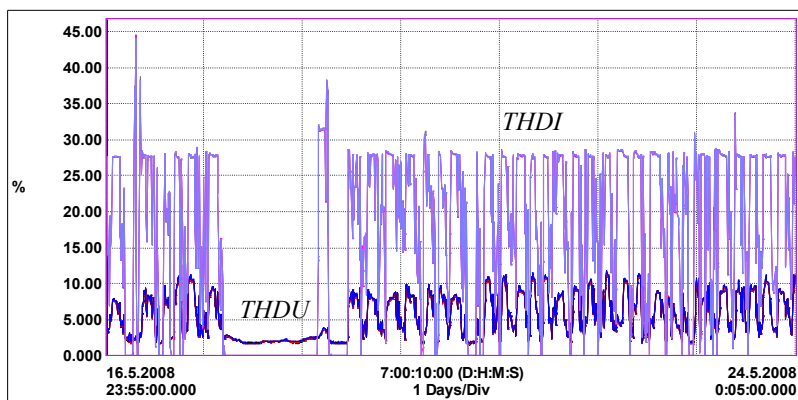
Na slici 3.a) i 3.b) prikazani su talasni oblici struje opterećenja i napona snimljeni u jednom (istom) trenutku.



Slika 3. Talasni oblici struje opterećenja i napona na niskonaponskoj strani transformatora

Talasne oblike napona, koji su prikazani na slici 3.b) karakteriše prisustvo ureza usled komutacije mostnih pretvarača frekvencije. U talasnim oblicima napona imaju se isti viši harmonici, kao kod talasnog oblika struje. Prosečne procentualne vrednosti karakterističnih viših harmonika napona u odnosu na osnovni harmonik, u svim fazama iznosile su: 2%, 2,6%, 1,6%, 2,7%, 2,5%, 2%, 1,5%, 1,3%, itd. Prosečna vrednost parametara THDU za sve vreme merenja je iznosila oko 5,2%.

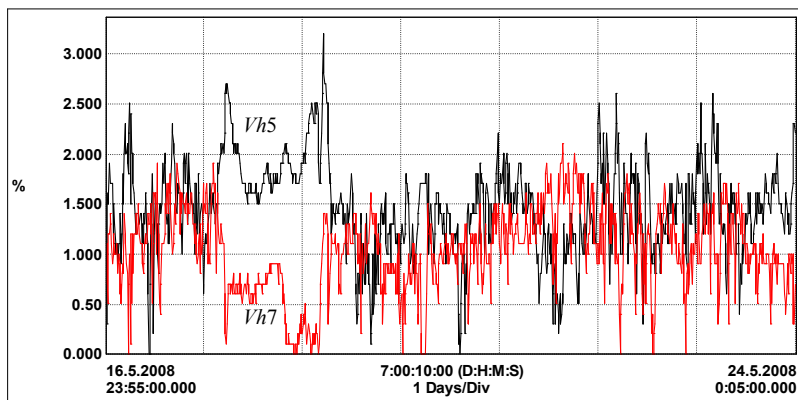
Promene parametara THDI i THDU na niskonaponskoj strani transformatora u Livnici prikazane su na slici 4.



Slika 4. Promena THDI i THDU na niskonaponskoj strani transformatora u Livnici

Rezultati merenja na sabirnicama 10 kV, gde su priključeni transformatori koji napajaju indukcione peći, pokazuju da su viši harmonici prisutni i na tom naponskom nivou, kako u struji tako i u naponu. I pored toga što se sa tih sabirnica napajaju drugi potrošači značajni po snazi (osvetljenje hala i napajanje sistema za vodeno hlađenje), procentualno učešće viših harmonika struje opterećenja u odnosu na osnovni harmonik je značajno i približno isto kao i na niskom naponu. Prosečne procentualne vrednosti karakterističnih (peti, sedmi, jedanaesti, trinaesti, sedamnaesti, devetnaesti, dvadeset treći, dvadeset peti) viših harmonika struje opterećenja u odnosu na osnovni harmonik, u svim fazama iznosile su: 20,2%, 10,4%, 8,7%, 5,8%, 4,7%, 4,1%, 3,2%, 2,1%, respektivno. U vreme kada su indukcione peći radile prosečna vrednost parametara THDI u svim fazama je oko 28%.

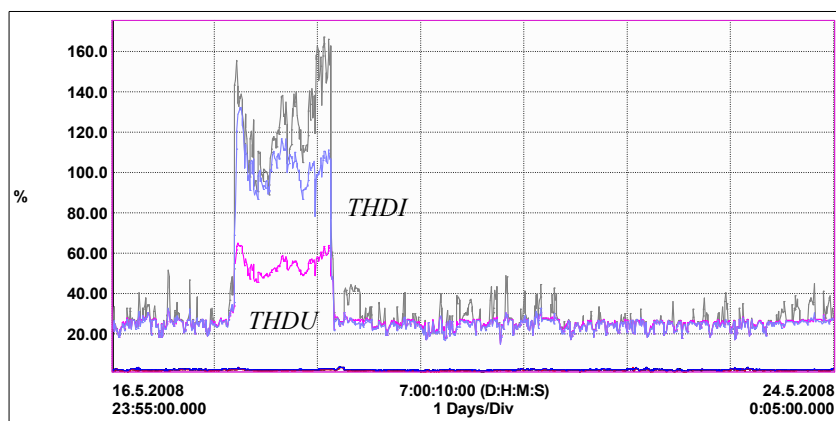
Prisustvo viših harmonika u talasnom obliku napona na 10 kV strani je znatno manje u odnosu na niski napon. Naime, registrovano je prisustvo samo petog i sedmog harmonika. Promena petog i sedmog harmonika u periodu merenja prikazana je na slici 5. Vrednost petog harmonika varira u opsegu od 0 do 3,2%. Istovremeno, sedmi harmonik varira u opsegu od 0 do 2,1%. Njihove prosečne procentualne vrednosti u odnosu na osnovni harmonik bile su 1,2% i 0,8%.



Slika 5. Promena petog (Vh5) i sedmog (Vh7) harmonika na 10 kV sabirnicama u Livnici u vremenu

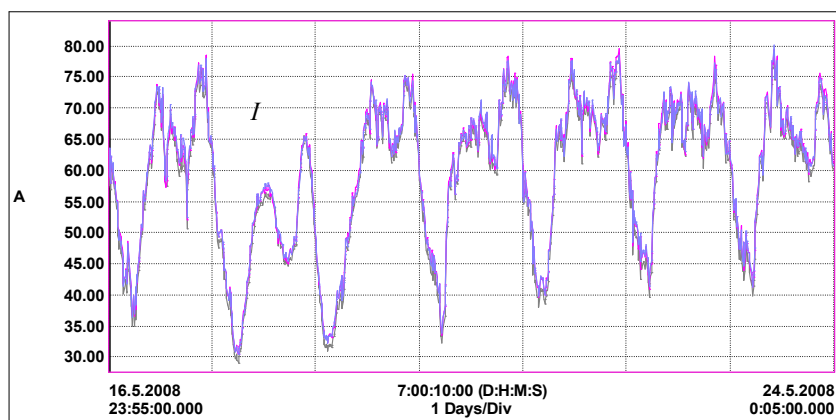
Totalna harmonijska distorzija napona THDU varira u opsegu od 0,9 do 3,5%, a njena prosečna vrednost je u granicama od 1,7 do 2%, zavisno od faze. Slična merenja realizovana su kod istraživanja uticaja jedne elektrolučne peći na kvalitet napona u napojnoj distributivnoj mreži [2], gde su izmerene nešto niže vrednosti THDU i petog harmonika napona. Uticaj industrijskih (elektrolučnih ili indukcioni) peći na harmonike u distributivnoj mreži zavisi od jačine napojne mreže, odnosno od mesta priključenja, što je posebno istaknuto u [2].

Na slici 6 su prikazane promene parametra THDI i THDU na 10 kV sabirnicama na kojima su priključeni transformatori za napajanje indukcioni peći u Livnici. Velike vrednosti parametra THDI u svim fazama na 10 kV sabirnicama, koje se imaju u periodu kada indukcione peći nisu bile aktivne (nedelja) posledica su struje praznog hoda transformatora za indukcione peći i transformatora koji napaja osvetljenje u halama.



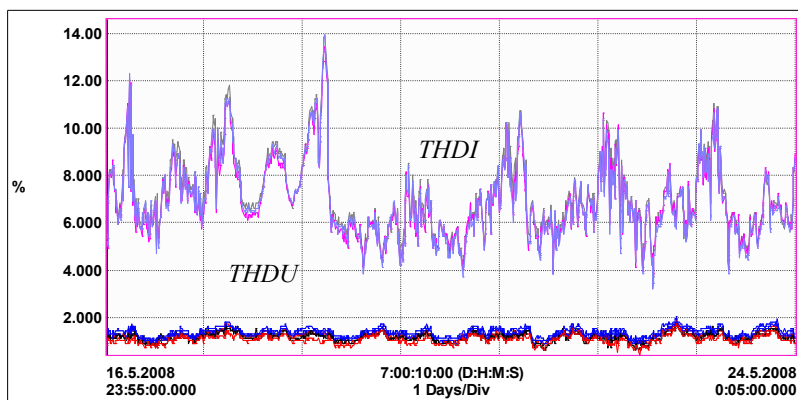
Slika 6. Promena parametra THDI i THDU na 10 kV sabirnicama u Livnici u vremenu

TS 110/10 kV "Leskovac 6" napaja, pored Livnice sa indukcionim pećima, još šesnaest 10 kV izvoda. Vršna snaga potrošača na tim izvodima je nekoliko puta veća od vršne snage Livnice. To znači da na parametre kvaliteta napona i struje na visokom naponu (110 kV) pored razmatranog industrijskog potrošača značajnu ulogu imaju i ostali potrošači, koji pripadaju različitim kategorijama potrošnje, kao što su: industrijska, široka potrošnja, stambena gradska potrošnja sa i bez daljinskog grejanja, mešovita potrošnja, itd. Dijagram promene efektivnih vrednosti struje opterećenja na 110 kV nivou je prikazan na slici 7.

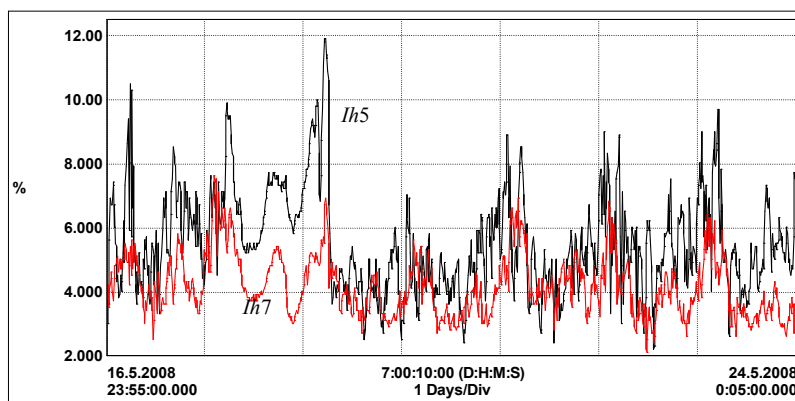


Slika 7. Dijagram promene struje opterećenja na 110 kV nivou u TS "Leskovac 6"

Na slici 8 su prikazane promene THDU na 110 kV sabirnicama i THDI transformatora u TS "Leskovac 6". Prisustvo viših harmonika u struji opterećenja na 110 kV nivou nije zanemarljivo. Totalna harmonijska distorzija struje THDI se menja u granicama od 3,2 do 14%, dok je prosečna vrednost bila oko 7%, u svim fazama. Dominantan uticaj na izobličenje struje opterećenja imaju peti i sedmi harmonik, čija je promena u vremenu prikazana je na slici 9. Vrednost petog harmonika struje opterećenja varira u opsegu od 2,2 do 11,9%. Istovremeno, sedmi harmonik varira u opsegu od 1,8 do 7,2%. Prosečne vrednosti struje petog i sedmog harmonika bile su 5,5% i 3,7%, respektivno. Istovremeno, totalna harmonijska distorzija struje THDI se menja u granicama od 3,2 do 14%, dok je prosečna vrednost bila oko 7%, u svim fazama.

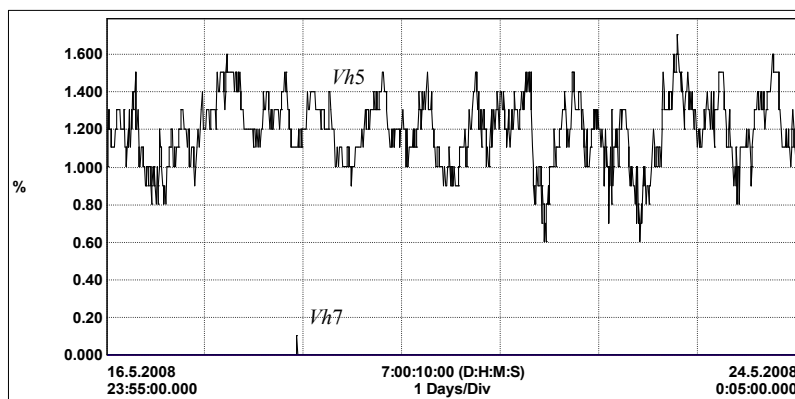


Slika 8. Promena parametra THDI i THDU na 110 kV sabirnicama u TS "Leskovac 6"



Slika 9. Promena petog ( $I_{h5}$ ) i sedmog ( $I_{h7}$ ) harmonika struje opterećenja transformatora na 110 kV u TS "Leskovac 6"

Što se tiče viših harmonika u talasnom obliku napona na 110 kV nivou, registrovano je dominantno prisustvo petog harmonika, dok se sedmi harmonik javlja samo povremeno i to u zanemarljivom iznosu. Vrednost petog harmonika kretala se u granicama od 0,6 do 1,8%, njegova prosečna vrednost je oko 1,2%, za sva tri fazna napona.



Slika 10. Promena petog ( $V_{h5}$ ) i sedmog ( $V_{h7}$ ) harmonika napona faze 1 na 110 kV sabirnicama u TS "Leskovac 6"

Totalna harmonijska distorzija napona THDU na 110 kV sabirnicama varira u granicama od 0,6 do 1,8%, a njena prosečna vrednost u periodu merenja od nedelju dana je 1,2%. Slične vrednosti THDU na 110 kV ustanovljene su i u dvema transformatorskim stanicama na području grada Niša. Zabeležene vrednosti THDU su ispod limita od 6,5% prema IEC 61000 3-6, kao i od 2,5% prema IEEE Standard 519-1992.

## ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih merenja na tri naponska nivoa u elektroenergetskoj mreži u Leskovcu pokazano je da je uticaj indukcionih peći u Livnici, u pogledu kvaliteta napona, ograničen samo na naponski nivo 10 kV, odnosno na sabirnice priključenja industrijskih transformatora za napajanje indukcionih peći. Isti zaključak važi i za više harmonike u struji opterećenja. Deformacija talasnog oblika napona na 10 kV naponskom delu mreže nastaje pre svega zbog petog harmonika, mada egzistira i sedmi harmonik. Totalna harmonijska distorzija napona THDU varira u opsegu od 0,9 do 3,5%, a njena prosečna vrednost u granica od 1,7 do 2%, zavisno od faze.

Totalna harmonijska distorzija napona THDU na 110 kV sabirnicama varira u granicama od 0,6 do 1,8%, a njena prosečna vrednost u periodu merenja od nedelju dana je 1,2%. Deformacija talasnog oblika napona nastaje isključivo zbog prisustva petog harmonika napona. Zabeležene vrednosti THDU su ispod limita od 6,5% prema IEC 61000 3-6, kao i od 2,5% prema IEEE Standard 519-1992.

## LITERATURA

- 1 A. Jović, D. Stojanović, 2009, "Uticaj industrijskih indukcionih peći na kvalitet napona i povećanje gubitaka u distributivnoj mreži", 29. savetovanje CIGRE SRBIJA 2009, RC4-11.
- 2 D. Brajović, V. Katić, S. Popović: "Modelovanje i merenje viših harmonika elektrolučne peći", XXVI Savetovanje JUKO-CIGRE, Teslić-Banja Vrućica, Maj 2003, ISBN 86-82317-49-4, CD ROM i knjiga Grupa 33/36 – R36-01.
- 3 V. Strugar, V. Katić, 2007, "Uticaj industrijskih i drugih potrošača na rad distributivnih sistema", 28. savetovanje, 28. savetovanje CIGRE SRBIJA 2007, RC4-08.
- 4 N. Stevanović, M. Tišma, A. Dimitrijević, "Uticaj rada energetske pretvarača velike snage na kvalitet električne energije na niskonaponskom nivou objekta PK "Kolubara" Lazarevac", 29. savetovanje, 29. savetovanje CIGRE SRBIJA 2009, RB4-02.
- 5 J. Spirić, A. Jović, M. Dočić, 2009, "Uticaj promene namene proizvodnih prostora i tehnoloških procesa na kvalitet električne energije", ELEKTROPRIVREDA br. 2, Beograd 2009., str. 75-85.
- 6 D. Stojanović, L. Korunović, A. Jović., 2008, "Merenje i analiza nesimetrije u niskonaponskoj distributivnoj mreži", Šesto sav. CIRED SRBIJA, R-6.16.
- 7 L. Korunović, D. Stojanović, G. Kostić, 2006, "Harmonics in Medium Voltage Distribution Network of Nis", Proc. Second Regional Conference & Exhibition on Electricity Distribution, CIRED 2006,R-2.7.

**Ključne reči:** Kvalitet napona, harmonici, distributivna mreža

*Aleksandar Jović, [aleksandar.jovic@jugoistok.com](mailto:aleksandar.jovic@jugoistok.com)*