



ZAVISNOSTI HARMONIKA STRUJE NEKIH SVETILJKI ZA JAVNU RASVETU OD NAPOJNOG NAPONA

DEPENDENCIES OF CURRENT HARMONICS OF SOME LAMPS FOR PUBLIC LIGHTING ON SUPPLY VOLTAGE

Ivan ANASTASIJEVIĆ, Elektronski fakultet u Nišu, Univerzitet u Nišu, Srbija
Lidija KORUNOVIĆ, Elektronski fakultet u Nišu, Univerzitet u Nišu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Za potrebe analize kvaliteta električne energije putem simulacija, neophodni su odgovarajući harmonijski modeli pojedinih niskonaponskih uređaja i/ili zbirne potrošnje u čvorovima mreže. Ovaj rad se bavi određivanjem, analizom i međusobnim poređenjem zavisnosti harmonika struje nekih svetiljki koje se koriste za javnu rasvetu, od efektivne vrednosti napojnog napona.

U malobrojnoj do sada objavljenoj literaturi koja se bavi sličnom problematikom istaknut je uticaj izobličenja napona na pojavu izobličenja struje potrošnje niskonaponskih potrošača. Takođe su analizirane vrednosti viših harmonika struje u zavisnosti od promene napojnog napona. Novinu ovog rada predstavlja analiza ne samo efektivnih vrednosti viših harmonika struje, već i njihovih uglova, u zavisnosti od efektivne vrednosti napona.

U radu su prikazani rezultati laboratorijskih eksperimenata izvršenih na različitim vrstama svetiljki, koje se koriste za javnu rasvetu: živine, natrijumske i LED svetiljke. Napojni napon svetiljki je menjan u granicama normalnih radnih uslova ($\pm 10\%$ od naznačenog napona), a zatim je analiziran uticaj njegove promene na injektiranje viših harmonika struje u mrežu, od strane svetiljki. Rezultati koji su dobijeni za pojedine svetiljke su međusobno upoređeni. Prikazane su i matematičke funkcije kojima se sa dovoljnom tačnošću mogu modelovati zavisnosti struja dominantnih viših harmonika i njihovih uglova od promene efektivne vrednosti napojnog napona. Zaključak je da promena napona značajno utiče na injektiranje viših harmonika struje u mrežu i da se ta činjenica treba uzeti u obzir u harmonijskim modelima svetiljki.

Ključne reči: kvalitet napona, javna rasveta, harmonici struje, harmonijski modeli, napojni napon

ABSTRACT

For the purposes of analysis of power quality through simulation, appropriate harmonic models of individual low-voltage devices and/or aggregate load of network buses are necessary. This paper deals with the determination, analysis and comparison of models that represent the dependences of the current harmonics of some lamps applied for public lighting on the rms value of supply voltage.

In the few literatures published so far that deals with similar issues, the influence of voltage distortion on the occurrence of current distortion of the consumption of low-voltage consumers has been pointed out. The values of current harmonics depending on the change of supply voltage were also analyzed. The novelty of this paper is the analysis not only of the rms values of current harmonics, but also of their angles, depending on the rms values of voltage.

The paper presents the results of laboratory experiments performed on different types of lamps, which are used for public lighting: mercury, sodium and LED lamp. The supply voltage of the lamps was changed within the limits of normal operating conditions ($\pm 10\%$ of the rated voltage), and then the influence of its change on the injection of current harmonics into the network by the lamps was analyzed. The results obtained for individual lamps were mutually compared. Mathematical functions are also presented, which can be used to model the dependences of the currents of the dominant harmonic components and their angles on the change in the rms value of supply voltage with sufficient accuracy. The conclusion is that the change in voltage significantly affects the injection of current harmonics into the network and that this fact should be taken into account in the harmonic models of lamps.

Key words: power quality, public lighting, current harmonics, harmonic models, supply voltage

1. UVOD

Od poslednjih decenija XX veka pojam kvaliteta električne energije je postao veoma značajan. Definisanjem određenih činilaca kvaliteta električne energije i njihovim standardizovanjem, električna energija je počela da se posmatra kao roba koja se kupuje i od koje se očekuje da zadovolji određene standarde kvaliteta. Neki od značajnijih činilaca kvaliteta električne energije su: varijacija napona, varijacija frekvencije, propad napona, prekid napajanja, harmonici itd. [1]. Uređaji koji najviše utiču na stvaranje harmonika napona, tj. izobličenje talasnog oblika napona u mreži, su nelinearni prijemnici električne energije.

U današnje vreme, nelinearni prijemnici su veoma rasprostranjeni u električnoj mreži i ima ih u raznim kategorijama potrošnje: domaćinstvima, komercijalnoj potrošnji i industriji [2]. U navedene prijemnike spadaju laptop i desktop računari, klima uređaji, televizori, veš mašine, mašine za pranje sudova, frižideri, zamrzivači, razne vrste svetiljki za unutrašnje ili spoljašnje osvetljenje, industrijski pogoni upravljani frekvencijskim pretvaračima itd. Većina navedenih uređaja nisu veliki potrošači električne energije, ali problem predstavlja njihova rasprostranjenost i velika prisutnost u mreži. Prema nekim istraživanjima nelinearni prijemnici čine trećinu svih uređaja u mreži, a takođe se pretpostavlja da će njihov broj u budućnosti biti sve veći [3].

Svi navedeni uređaji dovode do injektiranja viših harmonika struje, u većoj ili manjoj meri, u elektroenergetski sistem i utiču na izobličenje talasnih oblika struje i napona. Poznato je, takođe, da prisustvo viših harmonika može uzrokovati mnoge probleme u mreži: značajno povećanje gubitaka u mreži, samim tim i povećano zagrevanje elemenata mreže, pojavu rezonancije, vibracije kod obrtnih mašina, greške mernih instrumenata, neadekvatno reagovanje zaštitnih uređaja, interferenciju sa uređajima za telekomunikacije itd. [4], [5].

Sa povećanjem broja nelinearnih prijemnika u mreži rašće i prisustvo viših harmonika struje i napona, što će neminovno dovesti do navedenih problema, pa je neophodno izvršiti ograničavanje nivoa ovih harmonika [6], [7]. Pored merenja i kontrole prisustva harmonika u određenim čvorovima elektroenergetske mreže, neophodno je izvršiti i određene analize uticaja povećanja broja nelinearnih prijemnika na elektroenergetski sistem. Jedan od načina je korišćenje harmonijskih modela pojedinačnih prijemnika ili modela zbirne potrošnje u simulacijama u odgovarajućim programskim paketima [8], [9]. Ovakva analiza omogućava sagledavanje trenutnog stanja, ali daje i mogućnost predviđanja nivoa viših harmonika u mreži u budućnosti. Tačnost dobijenih rezultata simulacija zavisi od mnogih faktora, ali je jedan od najvažnijih tačnost korišćenih modela. Pri tome treba imati u vidu da su tačnost modela i njegova složenost u korelaciji, pa su najtačniji modeli ujedno i najsloženiji, kako za određivanje parametara modela, tako i za njegovu primenu u programima za harmonijsku analizu.

U brojnim objavljenim radovima prikazana su individualna harmonijska izobličenja struje nelinearnih prijemnika, koja se mogu koristiti za različite harmonijske analize (npr. [10] i [11]). Mnogi objavljeni radovi ne uzimaju u obzir uticaj radnih uslova u mreži na dobijene rezultate merenja, pre svega uticaj naponskih prilika, izobličenja napona itd., iako je pokazano da postoji uticaj izobličenja napona na više harmonike struje koje injektiraju nelinearni potrošači ([4], [12], [13]). Dakle, naponske prilike u mreži značajno utiču na harmonijski spektar struje potrošnje nelinearnih potrošača, pa je zbog toga neophodno i njih uzeti u obzir. Međutim, objavljeni radovi se ne bave analizom izmerenih viših harmonika struje kada se efektivna vrednost napona mreže menja u širem opsegu. Zato su u ovom radu prikazani rezultati eksperimenata urađenih na najčešće korišćenim svetiljkama za javnu rasvetu, u cilju dobijanja zavisnosti efektivnih vrednosti harmonika struje i njihovih faznih uglova od efektivne vrednosti napojnog napona. Zaključeno je da zavisnosti efektivnih vrednosti pojedinih viših harmonika struje, kao i njihovih uglova, od efektivne vrednosti napojnog napona, kod istog potrošača, nisu identične. Pomenute zavisnosti su date u obliku matematičkih funkcija koje mogu imati brojne potencijalne primene.

2. OPIS IZVRŠENIH EKSPERIMENATA

U laboratorijskim uslovima su izvršeni eksperimenti koji su omogućili željenu analizu. U eksperimentima je napajanje svetiljki izvršeno preko laboratorijskog autotransformatora priključenog na niskonaponske instalacije kojim je menjana efektivna vrednost napojnog napona svetiljki. Napon je povećavan od 90 % U_n , gde je U_n naznačeni fazni napon niskonaponske mreže (230 V), do 110 % U_n , odnosno opseg promene napona je bio od 207 V do 253 V. Navedeni opseg napona odgovara normalnim radnim uslovima u mrežama niskog i srednjeg napona, prema standardu SRPS EN 50160 [14], po kome napon u niskonaponskoj mreži u svakom trenutku u normalnim režimima rada mora biti u datom opsegu. Korak promene napona je bio 2 % od naznačenog faznog napona u niskonaponskoj mreži, odnosno 4,6 V. Snimanje merenih veličina je urađeno nekoliko minuta nakon svake promene napojnog napona svetiljki, da bi se omogućilo dostizanje stacionarnog stanja. Svetiljke za javnu

rasvetu na kojima su izvršeni eksperimenti su tipični predstavnici svetiljki koje se koriste za javnu rasvetu u našoj zemlji. Detaljne informacije o njima date su u Dodatku.

Uređaj kojim je izvršeno merenje napona i struja za vreme eksperimenata je precizni četvorokanalni analizator snage [15]. Tačnost merenja napona i struje kod ovog uređaja je veoma velika i iznosi 0,1 %. Analizator snage koristi Diskretnu Furijeovu Transformaciju (DFT) da bi se dobile efektivne vrednosti i fazni uglovi viših harmonika napona i struje. U toku eksperimenata uređaj je snimao veliki broj veličina, uključujući i ukupna harmonijska izobličenja napona i struje (*THDU* i *THDI*, respektivno) koje su računane prema izrazima:

$$THDU = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{99} (U_h)^2}}{U_1} 100\%, THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{99} (I_h)^2}}{I_1} 100\%, \quad (1)$$

gde su I_h i U_h struja i napon harmonika h -tog reda, dok su I_1 i U_1 osnovni harmonici struje i napona, respektivno. Iako mrežni analizator ima mogućnost snimanja harmonijskog spektra struja i napona do 99. reda, detaljno su analizirani samo neparni harmonici do 9. reda zbog toga što su neparni harmonici reda većeg od devetog dosta mali pa bi njihovo predstavljanje na graficima bilo nepregledno, i zbog toga što su parni harmonici struja zanemarljivo mali.

Kao što je rečeno, za napajanje svetiljki korišćen je autotransformator priključen na instalacije u laboratoriji, pa talasni oblik napojnog napona nije bio idealna sinusoida. Da bi se minimizirao uticaj viših harmonika napona na dobijene rezultate, eksperimenti su izvršeni različitih dana u određeno doba dana kada su vrednosti *THDU* bile niske i približno iste. U toku eksperimenata vrednosti *THDU* su se menjale u veoma uskom opsegu, od 2,7 % do 3,3 %, tako da se može smatrati da izobličenje napona nije značajno uticalo na dobijene rezultate.

3. REZULTATI

3.1 Živina svetiljka

Iako se svetiljke sa živinim sijalicama masovno izbacuju iz upotrebe, u mrežama javne rasvete su još uvek prisutne. Zato su izvršena merenja na tipičnom predstavniku ove vrste svetiljki, čiji su podaci, kao što je rečeno, dati u Dodatku, zajedno sa podacima za natrijumsku i LED svetiljku na kojima su takođe izvršena merenja.

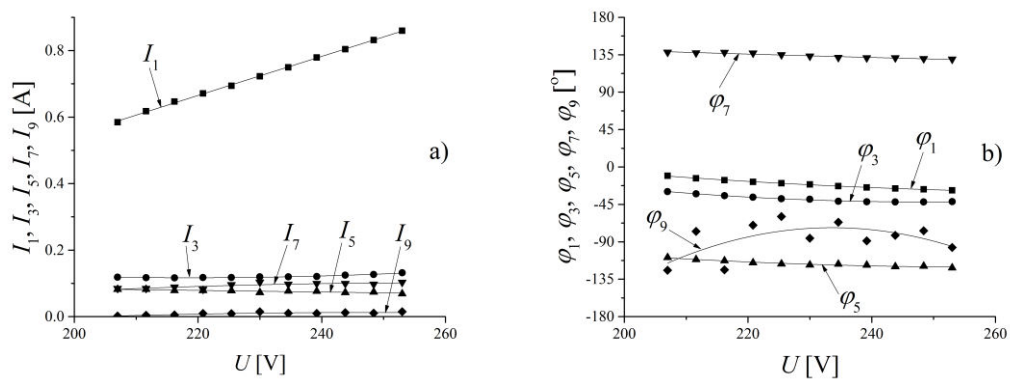
Ukupno harmonijsko izobličenje struje, *THDI*, ove svetiljke se menja u malom rasponu od 33,82 % do 27,17 %, kada napon raste od 90 % U_n do 110 % U_n (odnosno od 207 V do 253 V). Posebno su razmatrane efektivne vrednosti neparnih harmonika struje i to od prvog do devetog harmonika, tj. I_1, I_3, I_5, I_7 i I_9 , respektivno, kao i fazni uglovi ovih harmonika struje, $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_5, \varphi_7$ i φ_9 .

Slika 1a) prikazuje izmerene efektivne vrednosti harmonika struje, I_1, I_3, I_5, I_7 i I_9 , prilikom porasta napona, zajedno sa odgovarajućim krivama koje predstavljaju fitovanja promene izmernih vrednosti pojedinih harmonika struje sa naponom metodom najmanjih kvadrata, polinomima drugog reda. Generalno, polinom drugog reda se može prikazati izrazom:

$$y = b_0 + b_1 \cdot U + b_2 \cdot U^2, \quad (2)$$

gde su b_0, b_1 i b_2 odgovarajući koeficijenti polinoma. Fitovani polinomi sa Slike 1a), dobijeni su sa koeficijentom korelacije, R , koji je veći od 0,88, što prema [16] pokazuje značajnu povezanost između nezavisne (U) i zavisne promenljive (y). I ostali fitovani polinomi drugog reda koji su prikazani u radu dobijeni su sa relativno velikim koeficijentima korelacije, $R \geq 0,64$. Koeficijenti svih fitovanih polinoma dati su u Tabeli 1, u odeljku 3.4.

Na Slici 1a) može se uočiti da I_1 ima приметно veće vrednosti od ostalih harmonijskih komponenata struje, pri čemu efektivna vrednost trećeg harmonika iznosi približno petinu vrednosti osnovnog harmonika, dok ostali harmonici struje imaju još niže vrednosti. Efektivna vrednost prvog harmonika struje značajno raste sa rastom napona od 90 % U_n do 110 % U_n , efektivne vrednosti trećeg i petog harmonika struje, I_3 i I_5 , su praktično nepromenljive sa promenom efektivne vrednosti napona, dok I_7 i I_9 pokazuju međusobno veoma sličnu tendenciju blagog porasta sa povećavanjem napona od navedene minimalne do maksimalne vrednosti. Pritom I_7 ima nešto veće vrednosti od I_5 i I_9 .



Slika 1 – Izmerene vrednosti i odgovarajuće fitovane krive: a) efektivne vrednosti harmonika, I_1, I_3, I_5, I_7 i I_9 ; i b) fazni uglovi harmonika struje, $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_5, \varphi_7$ i φ_9 , živine svetiljke za javnu rasvetu

Fazni uglovi harmonika struje su prikazani na Slici 1b). Fazni uglovi prvog, trećeg, petog i sedmog harmonika struje, $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_5$ i φ_7 , respektivno, opadaju sa porastom napojnog napona svetiljke: ugao osnovnog harmonika opada od $-10,16^\circ$ do $-28,17^\circ$, ugao trećeg harmonika opada od $-29,64^\circ$ do $-41,77^\circ$, ugao petog harmonika opada od $-108,83^\circ$ do $-121,19^\circ$, dok ugao sedmog harmonika opada od $138,02^\circ$ do $129,58^\circ$. Sa druge strane, ugao devetog harmonika ima najveću vrednost za napojni napon od 225,4 V, a za vrednosti napona manje ili veće od 225,4 V ugao ovog harmonika struje opada. Na istoj slici prikazane su i krive koje predstavljaju fitovanja rezultata merenja polinomima drugog reda.

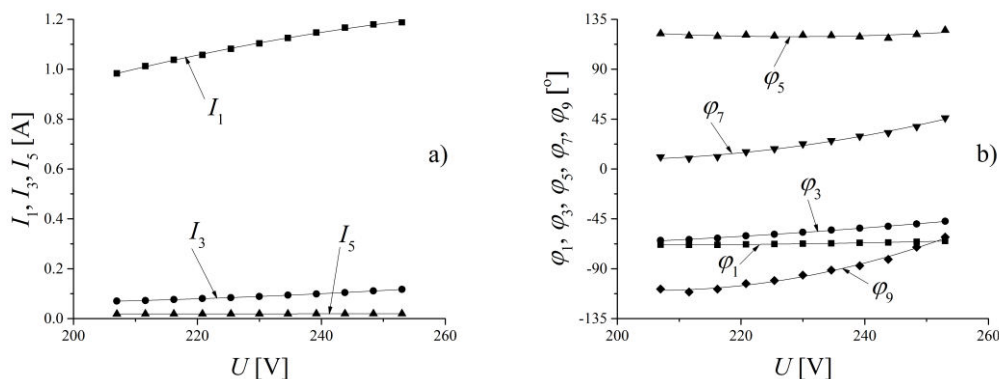
3.2 Natrijumska svetiljka

Svetiljke sa natrijumskim sijalicama u mrežama javne rasvete su još uvek široko rasprostranjene, iako je u poslednje vreme trend da se menjaju odgovarajućim LED svetiljkama. Za eksperiment je izabrana jedna tipična natrijumska svetiljka visokog pritiska.

Talasni oblik struje ispitivane natrijumske svetiljke je značajno manje izobličen u odnosu na živinu svetiljku, na šta ukazuju i vrednosti ukupnog harmonijskog izobličenja struje, $THDI$, koje se kreću u uskom opsegu od 7,61 % do 10,21 %, za promenu napojnog napona svetiljke od 207 V do 253 V. Izmerene efektivne vrednosti harmonika struje i odgovarajući fazni uglovi prikazani su na Slici 2.

Na Slici 2a) date su izmerene efektivne vrednosti osnovnog, trećeg i petog harmonika struje, I_1, I_3 i I_5 , pri promeni napona u ispitivanom opsegu, sa odgovarajućim krivama koje predstavljaju fitovanja rezultata merenja odgovarajućim polinomima drugog reda. Sa slike su izostavljene efektivne vrednosti sedmog i devetog harmonika struje zbog toga što su im vrednosti skoro jednake pojedinim efektivnim vrednostima petog harmonika. Efektivna vrednost osnovnog harmonika struje raste sa porastom napona napajanja natrijumske svetiljke i to za 21 % u opsegu promene napojnog napona od 90 % U_n do 110 % U_n . Za razliku od I_1 , efektivna vrednost trećeg harmonika struje, ima blagi porast sa promenom napona u navedenom opsegu, dok su efektivne vrednosti petog, sedmog i devetog harmonika struje približno konstantne. Takođe, može se uočiti da viši harmonici struje imaju male vrednosti u odnosu na osnovni harmonik, što se moglo i pretpostaviti na osnovu navedenih relativno malih vrednosti $THDI$. Na primer, I_3 je samo 7 % vrednosti osnovnog harmonika, dok efektivne vrednosti ostalih viših harmonika struje imaju još niže vrednosti.

Slika 2b) prikazuje izmerene fazne uglove harmonika struje pri promeni napojnog napona natrijumske svetiljke, zajedno sa odgovarajućim fitovanjima polinomima drugog reda. Izmereni fazni ugao osnovnog harmonika struje, φ_1 , se vrlo malo menja sa promenom napojnog napona svetiljke. Vrednosti uglova su od $-68,36^\circ$ do $-64,91^\circ$ za porast napona od minimalne do maksimalne vrednosti. Sličnu tendenciju pokazuje i ugao petog harmonika struje, φ_5 , čija je vrednost približno konstantna i iznosi oko 121° . Ostali fazni uglovi harmonika struje imaju tendenciju rasta sa promenom napona u datom opsegu. Nešto blaži porast ima fazni ugao trećeg harmonika struje, φ_3 , čija se vrednost menja od $-64,41^\circ$ do $-47,22^\circ$, dok se veći porast vrednosti faznih uglova ima kod sedmog, φ_7 , i devetog, φ_9 , harmonika struje. Sa promenom napojnog napona od 207 V do 253 V, vrednost φ_7 raste od početnih $10,86^\circ$ do $45,99^\circ$, dok se vrednost φ_9 nalazi u granicama od $-108,31^\circ$ do $-61,42^\circ$.



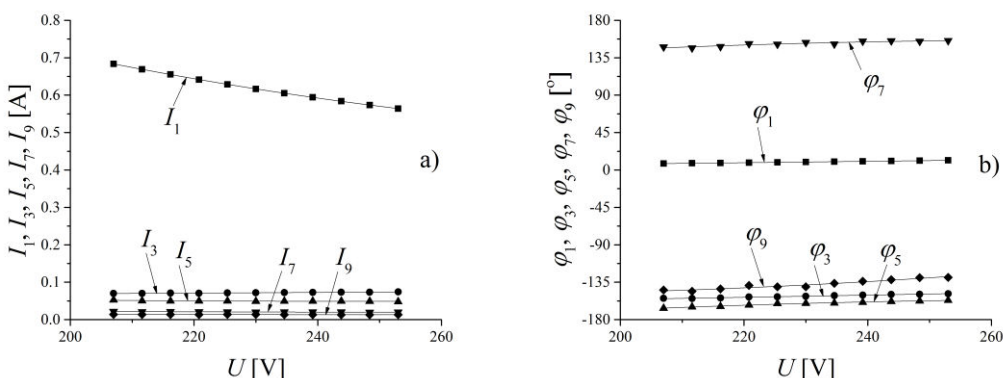
Slika 2 – Izmerene vrednosti i odgovarajuće fitovane krive: a) efektivne vrednosti harmonika, I_1, I_3, I_5, I_7 i I_9 ; i b) fazni uglovi harmonika struje, $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_5, \varphi_7$ i φ_9 , natrijumske svetiljke za javnu rasvetu

3.3 LED svetiljka

U današnje vreme, LED svetiljke su u sve većoj upotrebi, kako u domaćinstvima, tako i u mrežama za javnu rasvetu u kojima se postojeće svetiljke intenzivno zamenjuju LED svetiljkama. Njihova glavna prednost u odnosu na živine i natrijumske svetiljke je veća energetska efikasnost, a samim tim i značajno niža potrošnja električne energije. Međutim, LED svetiljke predstavljaju nelinearne prijemnike, koji injektiraju više harmonika struje u energetska mrežu [17].

Ukupno harmonijsko izobličenje struje, *THDI*, ispitivane LED svetiljke se u toku eksperimenta nije značajno menjala i imala je vrednost od 13,45 % do 16,4 % za promenu napojnog napona od 207 V do 253 V. Na Slici 3a) su prikazane efektivne vrednosti harmonika struje, I_1, I_3, I_5, I_7 i I_9 , sa odgovarajućim krivama koje predstavljaju fitovanja polinomima drugog reda. Za razliku od prethodnih svetiljki, kod ispitivane LED svetiljke se efektivna vrednost osnovnog harmonika smanjuje sa porastom napona od 90 % U_n do 110 % U_n . Efektivne vrednosti ostalih analiziranih harmonika su značajno niže i gotovo se ne menjaju sa promenom napojnog napona.

Slika 3b) prikazuje zavisnosti uglova harmonika struje od promene napojnog napona svetiljke, sa odgovarajućim fitovanim krivama polinomima drugog reda. Svi fazni uglovi harmonika struja rastu sa porastom napojnog napona od 90 % U_n do 110 % U_n . Najveći relativni porast je zabeležen kod ugla prvog (φ_1) i devetog (φ_9) harmonika struje i iznosi 50 % i 10 %, respektivno. Kod uglova ostalih harmonika struje, φ_3, φ_5 i φ_7 , relativno povećanje ugla sa porastom napojnog napona je osetno manje. Ugao prvog harmonika struje se povećava od vrednosti $7,68^\circ$ do $11,55^\circ$, ugao devetog harmonika struje od $-144,39^\circ$ do $-129,21^\circ$, dok npr. ugao trećeg harmonika φ_3 blago raste sa povećavanjem napojnog napona, od vrednosti $-154,38^\circ$ do $-148,89^\circ$.



Slika 3 – Izmerene vrednosti i odgovarajuće fitovane krive: a) efektivne vrednosti harmonika, I_1, I_3, I_5, I_7 i I_9 ; i b) fazni uglovi harmonika struje, $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_5, \varphi_7$ i φ_9 , LED svetiljke za javnu rasvetu

3.4 Pregled koeficijenata fitovanih krivih

Radi preglednosti, u Tabeli 1 prikazani su koeficijenti svih polinoma drugog stepena koji su dobijeni fitovanjem rezultata eksperimenta na živinoj, natrijumskoj i LED svetiljci, a koji su predstavljeni u odeljcima 3.1, 3.2 i 3.3, respektivno. Na taj način, svaka funkcija zavisnosti efektivne vrednosti i ugla harmonika struje od promene napojnog napona od 90 % U_n do 110 % U_n je jednoznačno određena. Ove funkcije se mogu primenjivati za određivanje harmonijskog modela zbirne potrošnje sastavljene od ispitivanih svetiljki ako je harmonijsko izobličenje napojnog napona približno isto onome koje je bilo tokom izvršenih eksperimenata.

Tabela 1 – Koeficijenti funkcija zavisnosti promene efektivnih vrednosti i uglova harmonika struje od promene napojnog napona svetiljki

Vrsta svetiljke	I_h	Koeficijenti fitovanih polinoma, efektivnih vrednosti I_h			Koeficijenti fitovanih polinoma, uglova I_h		
		b_0 [A]	b_1 [$10^{-4} \cdot A/V$]	b_2 [$10^{-6} \cdot A/V^2$]	$b_{0\phi}$ [°]	$b_{1\phi}$ [°/V]	$b_{2\phi}$ [°/V ²]
Živina svetiljka	I_1	-0.68584	63.8	-1.0928	252.83949	-2.01357	0.00357
	I_3	0.67875	-51.4	11.763	406.58696	-3.61112	0.00727
	I_5	0.12725	-1.98298	-0.0971618	160.15455	-2.17179	0.0042
	I_7	-0.42319	40.9	-7.98798	204.41301	-0.41067	0.000448
	I_9	-0.37704	31.5	-6.35534	-3355.1771	28.09987	-0.06014
Natrijumska svetiljka	I_1	-1.69861	299.3	-33.1887	-8.84611	-0.58556	0.00144
	I_3	0.32238	-30.6	8.87004	-27.0593	-0.64093	0.00222
	I_5	0.01123	0.477547	-0.053428	436.53881	-2.78082	0.0061
	I_7	0.08185	-7.2074	1.90672	445.01402	-4.45812	0.01137
	I_9	0.02993	-2.34761	0.570941	783.4527	-8.68148	0.0211
LED svetiljka	I_1	1.92321	-87.7	13.4126	-6.67471	0.05731	0.0000581
	I_3	0.05833	0.288627	0.129659	-175.75259	0.07631	0.0001206
	I_5	0.14395	-7.61379	1.52336	-314.36441	1.13717	-0.00203
	I_7	0.14395	-2.90745	0.545957	-9.34196	1.21846	-0.00224
	I_9	0.01178	0.316095	-0.104212	-72.35126	-0.94774	0.00287

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je na osnovu rezultata laboratorijskih eksperimenata analiziran uticaj promene napojnog napona nekih tipičnih svetiljki za javnu rasvetu, živine, natrijumske i LED svetiljke, na harmonijski spektar struje. Pokazano je da promena napojnog napona utiče na harmonijske komponente struje ispitivanih svetiljki, i to kako na efektivne vrednosti harmonika struje, tako i na fazne uglove ovih harmonika. Promene efektivnih vrednosti harmonika struje i njihovih uglova od promene napojnog napona fitovane su odgovarajućim polinoma drugog reda koje su predstavljene u radu. Zaključeno je da se odgovarajuće promene efektivnih vrednosti harmonika struje i njihovih uglova, za različite svetiljke međusobno značajno razlikuju. Takođe je nađeno da je za svaku svetiljku različit trend promene njenih harmonijskih komponentata struje sa promenom napona. Zato je kod harmonijskih modela svetiljki za javnu rasvetu neophodno uzeti u obzir promenu harmonijskog spektra struje sa promenom napojnog napona. Dalja istraživanja uključuju vršenje sličnih eksperimenata na različitim svetiljkama za javnu rasvetu, kao i na drugim nelinearnim prijemnicima, ali uz pomoć programabilnog izvora napajanja. Time bi mogao biti ispitan uticaj izobličenja napona na harmonijski spektar struje nelinearnih potrošača, a rezultati bi se mogli implementirati u algoritme za regulaciju napona, sa ciljem da se ostvari upravljanje i kontrola viših harmonika u distributivnim mrežama.

ZAHVALNICA

Ovaj rad predstavlja deo istraživanja obavljenih na Elektronskom fakultetu Univerziteta u Nišu za čiju su realizaciju obezbeđena sredstva od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, na osnovu Ugovora o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2022. godini, evidencioni broj 451-03-68/2022-14/ 200102 od 04.02.2022. godine.

LITERATURA

- [1] Korunović L, 2014, „Kvalitet električne energije“, Elektronski fakultet u Nišu
- [2] 566 Working Group C4.605, 2014, „Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks“, Final Report, CIGRE
- [3] Department of Energy and Climate Change (DECC), 2009, „Electricity Consumption in the UK – Domestic 2008”
- [4] Bhattacharyya S, Cobben JFG, Kling WL, 2010, „Harmonic Pollution in a Low Voltage Network“, Power and Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1-9
- [5] Dugan RC, McGranaghan MM, Santoso S, Beaty HW, 2002, „Electrical Power System Quality“, McGraw-Hill
- [6] IEEE, 1993, „IEEE Standard 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems“, IEEE
- [7] IEC, 2005, „61000 3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current less than 16 A per phase)“, IEC
- [8] Chang GW, Chu S-Y, Wang H-L, 2004, „Matlab-based graphical user interface development for teaching power system harmonic studies“, International Conference on Power System Technology, PowerCon 2004, IEEE, pp. 1303 - 1308
- [9] Ulinuha A, Masoum MAS, Islam SM, 2007, „Harmonic power flow calculations for a large power system with multiple nonlinear loads using decoupled approach“, Australian Universities Power Engineering Conference, pp. 1-6
- [10] Rawa MJH, Thomas DWP, Sumner M, 2014, „Experimental Measurements and Computer Simulations of Home Appliance Loads for Harmonic Studies“, Proceedings of 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation, IEEE
- [11] Niitsoo J, Palu I, Kilter J, Taklaja P, Vainman T, 2013, „Residential Load Harmonics in Distribution Grid“, In Proceedings of 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Istanbul, IEEE, pp. 1-5
- [12] Young J, Chen L, Chen S, 2010, „Modelling of Home Appliances for Power Distribution System Harmonic Analysis“, IEEE Trans. Power Del., vol. 25, pp. 3147–3155
- [13] Blanco AM, Yanchenko S, Meyer J, Schegner P, 2015, „Impact of supply voltage distortion on the current harmonic emission of non-linear loads“, DYNA. Revista de la Facultad de Minas, vol. 82, No. 192, pp. 150-159
- [14] Institut za standardizaciju Srbije, 2012, „SRPS EN 50160 – Karakteristike napona isporučene električne energije iz javnih električnih mreža“, ISS, Beograd, II izdanje
- [15] Zes Zimmer Electronic Systems, 2006, „4 Channel Power Meter LMG450“, Zes Zimmer Electronic Systems GmbH
- [16] Gos-Sampson MA, 2019, „Statistical Analysis in JASP: A Guide for Students“, na srpskom jeziku, 2nd Edition, JASP, pp. 60
- [17] Molina J, Mesas JJ, Mesbahi N, Sainz L, 2017, „LED lamp modelling for harmonic studies in distribution systems“, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, Issue 4, pp. 1063 - 1071

DODATAK

Podaci o svetiljkama za javnu rasvetu, korišćenih u eksperimentima:

- Živina sijalica General Electric Kolorlux H125/27; 125 W; E27; balast: FEP tip Z-125 N, 220 V~, 50 Hz, 1,15 A, $\cos\phi=0,55$.
- Natrijumska sijalica visokog pritiska General Electric Lucalox LV 7Ø/9Ø/MO/T/E27; 70 W; E27; balast: MZN 70 S, 220/240 V, 50/60 Hz.
- LED svetiljka Philips Indal 68 LED; 144 W; 15500 lm; R4, 230-240 V; 50-60 Hz; $I_{max}=0,7$ A; $\cos\phi=0,98$.