Analiza viših harmonika u sistemu napajanja administrativnog objekta sa grupisanim nelinearnim potroša ima malih snaga

ILIJA M. DERIKU KA, MH „Elektroprivreda Republike Srpske“, Trebinje
Bosna i Hercegovina

JADRANKA S. RADOVI , Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehni ki fakultet, Podgorica, Crna Gora

Stru ni rad

UDC: 621.311.1.02

DOI: 10.5937/tehnika1601097D

U okviru ovog rada prikazani su rezultati analize viših harmonika u sistemima napajanja administrativnog objekta, dobijeni na osnovu formiranog simulacionog modela. Tako e se prikazuju i analiziraju konkretna mjerenja kvaliteta elektri ne energije na nivou distributivne trafostanice koja napaja karakteristi ni administrativni objekat. Formirani simulacioni model, kao i zaklju ci izvedeni na osnovu izvršenih mjerenja i simulacionih prora una za posmatrani administrativni objekat, mogu biti od zna aja kako pri eksploataciji tako i pri planiranju razvoja distributivnih mreža sa zna ajnim u eš em nelinearnih potroša a malih snaga u strukturi potrošnje njihovih konzuma.

Klju ne rije i: *kvalitet elektri ne energije, viši harmonici, nelinearni potroša i, administrativni objekat*

1. UVOD

Elektri na energija je komercijalni proizvod posebne vrste koji, zbog svoga zna aja u životu savremenog ovjeka, podliježe posebnim propisima u pogledu kvaliteta i za ije poštovanje je zainteresovana šira društvena zajednica. Stoga se problematika kvaliteta elektri ne energije definiše kako nacionalnim tako i me unarodnim standardima i preporukama [1], [2], [3].

Deregulacijom elektroenergetskog sektora i liberalizacijom tržišta elektri ne energije, problematika kvaliteta elektri ne energije aktuelizovana je i u našim uslovima. Ona privla i sve ve u pažnju relevantnih elektroenergetskih subjekata, od regulatornih tijela, elektrodistributivnih preduze a, pa sve do krajnjih kupaca elektri ne energije. Zakon o elektri noj energiji Republike Srpske – Pre iš eni tekst (Službeni glasnik Republike Srpske, broj 08/08 [4]), lanom 3, elektri nu energiju tretira kao robu o ijem kvalitetu prvenstveno treba da se staraju preduze a koja se bave distribucijom i snabdijevanjem potroša a elektri nom energijom.

Obezbi je ne potrebnog kvaliteta elektri ne energije je tehni ko-ekonomski zadatak, jer je uslovljeno odre enim mjerama, za iju realizaciju su potrebna od-

govaraju a investiciona ulaganja.

Kvalitet elektri ne energije u distributivnim mrežama zavisi od:

- karakteristika ure aja kupaca priklju enih na mrežu, posebno industrijskih potroša a sa pogonima u kojima dominiraju energetske pretvara i, pogona sa velikim udarnim optere enjima, ure aja koji svoju funkciju zasnivaju na dejstvu elektri nog luka, snažnih jednofaznih potroša a i sl;
- topologije i karakteristika same mreže (dužina i presjek vodova, nivo optere enja vodova i transformatora, nesimetri nost optere enja po faza ma);
- naponskih prilika na vezi sa prenosnom mrežom, kao i sa elektranama priklju enim na mrežu.

U cilju regulisanja kvaliteta snabdijevanja kupaca elektri nom energijom, distributivna preduze a moraju da vode ra una i o samim kupcima koji generišu harmonike u elektrodistributivnu mrežu, i time smanjuju kvalitet elektri ne energije.

Problem generisanja viših harmonika dolazi do izražaja zbog sve ve e zastupljenosti nelinearnih potroša a u niskonaponskoj distributivnoj mreži, kao što su ra unari i ra unarska oprema, klima ure aji, fluorescentno osvjjetljenje i dr. Oni su izvori viših harmonika iji veliki broj i jednovremeni rad mogu da izazovu zna ajne probleme u smislu sniženja kvaliteta elektri ne energije. Struktura potrošnje sa dominantnim u eš em nelinearnih potroša a i njihovim jednovremenim radom, karakteristi na je za velike administrativne

Adresa autora: Ilija Deriku ka, MH „Elektroprivreda Republike Srpske“, Trebinje, Stepe Stepanovi a bb

Rad primljen: 14.10.2015.

Rad prihva en: 24.12.2015.

objekte, ra unarske, telekomunikacione i upravlja ke centre, a u nešto manjoj zastupljenosti i za poslovno-trgova ke objekte, kao i za savremene objekte kolektivnog stanovanja.

Sve ovo uti e da elektrodistributivna preduze a u deregulisanom sistemu imaju zna ajno složeniju funkciju, jer osim redovnog snabdijevanja kupaca elektri nom energijom, moraju da vode ra una i o kvalitetu snabdijevanja kupaca elektri nom energijom, kao i dispe iranju sve ve eg broja instaliranih distribuiranih izvora elektri ne energije.

Za analizu prisustva viših harmonika u savremenim distributivnim mrežama, njihovo mjerenje u realnim sistemima ima prvorazredni zna aj. Izbor mjernog mjesta i metode mjerenja uti u kako na rezultate mjerenja, tako i na kvalitet i zna aj zaklju aka koji se mogu izvesti iz sprovedenih mjerenja, a u suštini su odre eni postavljenim istraživa kim ciljem. Osnovni cilj istraživanja koja se prezentuju u ovom radu je analiza uticaja potroša a administrativnih objekata na kvalitet elektri ne energije mrežnog napajanja. Analiza se oslanja kako na rezultatima mjerenja tako i na formiranom simulacionom modelu, pri emu se mjerni podaci koriste i za verifikaciju samog simulacionog modela.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE NAPAJANJA I OPTERE ENJA ADMINISTRATIVNOG OBJEKTA

Karakteristike savremenih administrativnih objekata, sa aspekta uticaja njihovih potroša a na kvalitet elektri ne energije mrežnog napajanja, su zna ajno prisustvo nelinearnih potroša a u strukturi potrošnje kao i visoka jednovremenost njihovog rada. Otuda i sve eš i slu ajevi narušavanja kvaliteta elektri ne energije, prvenstveno prisustva viših harmonika u sistemima njihovog napajanja i u povezanoj niskona-poskoj distributivnoj mreži [5], [6], [7]. Upravo to ih ini prioritetnom potroša kom kategorijom elektrodistributivnih konzuma za realizacije mjerenja i regulaciju kvaliteta elektri ne energije.

Mjerenja, prora uni i analiza kvaliteta elektri ne energije, prezentovani u ovom radu izvršeni su za mrežno napajanje zgrade sjedišta Elektroprivrede Republike Srpske (u daljem tekstu MH ERS), kao tipinom administrativnom objektu sa velikim brojem nelinearnih potroša a koji imaju visoku jednovremenost rada, i koji su znatno više zastupljeni u ukupnom optere enju u odnosu na linearno optere enje.

Podsticaj i motivacija za izu avanje nivoa viših harmonika u mrežnom napajanju upravo ovog objekta - MH ERS, su višestruki:

- Istraživanja i rezultati vršeni za sli ne objekte, prezentirani u [5] i [6].

- Saznanja o visokom u eš u nelinearnih potroša a u strukturi potrošnje ovog objekta i visokom nivou jednovremenosti njihovog uklju enja i rada.
- injenica i indicije da ovakva struktura potrošnje može izazvati dodatne probleme u sistemu napajanja, prvenstveno vezane za pove anje nivoa viših harmonika i optere enja nultog provodnika, a tako e i u radu potroša a, prvenstveno tzv. osjetljivih potroša a, razmatranog objekta, a i šire potroša a povezane distributivne mreže.
- Mogu nost realizacije mjerenja kao i mogu nost specifikacije strukture optere enja u razli itim – karakteristi nim periodima radnih aktivnosti u objektu, kao i raspoloživost podataka o mrežnim i energetskim karakteristikama sistema napajanja.

Konkretni doprinos u blagovremenom rješavanju mogu ih problema vezanih za sniženje kvaliteta u sistemu napajanja administrativnog objekta MH ERS. Mjerenja kvaliteta elektri ne energije vršena su na niskonaponskoj strani radnog transformatora. Za mjerenje je koriš en mjerni ure aj Power Quality Analyzer LEM Fluke 435.

Tabela 1. Nelinearni potroša i u objektu MH ERS

Nelinearni potroša	Faza L1		Faza L2		Faza L3	
	N	P [kVA]	N	P [kVA]	N	P [kVA]
Fl. sv., mag. bal. - 36 W	243	8.75	197	7.09	182	6.55
Fl. sv., mag. bal. - 18 W	70	1.26	56	1.01	20	0.36
Fl. sv., el. bal. - 26W	191	4.97	217	5.64	256	6.66
Ra unar	52	7.80	53	7.95	32	4.80
Laserski štampa	45	4.95	34	3.74	20	2.20
Skener	5	0.18	5	0.18	-	0
LCD monitor	1	0.07	2	0.14	12	0.84
TV – klasi ni	1	0.12	2	0.24	1	0.12
LCD TV	-	0	-	0	3	0.22
Toplotna pumpa	2	80.00	2	80.00	2	80.00
Drenažna pumpa	2	8.00	2	8.00	2	8.00
Požarna pumpa	2	8.00	2	8.00	2	8.00
Ukupno	-	124.09	-	121.99	-	117.75

Zgrada MH ERS ima 6 spratova. Na svakom spratu su ugra ena po 2 spratna razvodna ormara, na

koje su pored linearnih potrošača, priključeni i svi nelinearni potrošači sa pripadnog sprata. Struktura nelinearnih potrošača i njihov raspored po fazama, prikazani su u tabeli 1.

U posmatranom objektu MH ERS, u upotrebi su najsavremeniji tipovi računara kod kojih se monitor i kućište nalaze u istom uređaju, kao i savremeni računari sa LCD monitorima, a osim računara koristi se i ostala računarska oprema, od koje su najzastupljeniji laserski štampači i skeneri.

Takođe su u upotrebi i monitori, LCD TV i klasični TV uređaji. Za osvetljenje prostorija i hodnika koriste se dva tipa svjetiljki: fluorescentne svjetiljke sa magnetskim balastom i fluorescentne svjetiljke sa elektronskim balastom – štedne. Grijanje i hlađenje objekta je izvedeno preko dvije toplotne pumpe, tako da u objektu ne postoje klasični klima uređaji.

3. MJERENJE KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Ukupna godišnja potrošnja električne energije zgrade MH ERS je 656.325 kWh, dok je reaktivna potrošnja 9.433 kVarh, uz $\cos \phi = 0.99$. Instalirana snaga svih potrošača električne energije (osvetljenje i NN priključnice) u objektu MH ERS iznosi $P_i = 459$ kW, a jednovremena snaga je $P_j = 232$ kW.

Mjerenje kvaliteta električne energije za odabrani administrativni objekat (zgrada MH ERS) vršeno je u periodu od 16.06. do 23.06.2014. godine. Nakon mjerenja, korištenjem programa Power Quality Analyzer, izvršena je obrada podataka o mjenim veličinama, gdje su referentne vrijednosti utvrđene normom EN 50160 [1].

Slika 1 – Grafički sumarni prikaz rezultata mjerenja

Na osnovu slike 1 koja daje grafički sumarni prikaz rezultata mjerenja, zaključuje se da kvalitet električne energije u tački priključka objekta u pogledu amplitude napona i harmonika u potpunosti zadovoljava normu EN 50160. Zaključak se izvodi na osnovu grafičkih prikaza stubaca koji su označeni sa različitim bojama (zeleno ukoliko su mjerene veličine ispod limita i crvena boja ukoliko veličina prelazi limit).

Grafički prikazi prate legendu označenu ispod stubaca, tako da prva tri stupca označavaju amplitudu napona, druga tri harmonike napona, zatim flikere, propade napona i nesimetriju. U ovom konkretnom slučaju se zaključuje da su sve veličine u okviru dozvoljenih limita osim flikera i propada napona.

Tokom posmatranog perioda od sedam dana, koliko je trajalo mjerenje, napajanje električnom energijom je bilo uredno, nije bilo prekida napajanja, dok su zabilježeni flikeri vidljivi za ljudsko oko, kao i tri propada napona. Detaljnija analiza flikera i propada napona nije predmet ovog rada, jer se u radu analiziraju harmonijske izobličenja koja su u distributivnu mrežu generisana od strane potrošača.

Na slici 2 su prikazane promjene, tokom mjernog perioda, efektivnih vrijednosti faznih napona, a na slici 3. promjene efektivnih vrijednosti faznih struja i struje nultog provodnika.

Slika 2 - Efektivne vrijednosti faznih napona

Uočava se da su srednje efektivne vrijednosti napona, za sve tri faze, u granicama propisanih normom EN 50160.

Slika 3 - Efektivne vrijednosti faznih i nulte struje

Grafici struja ilustruju određenu nesimetriju u opterećenjima faza. Međutim, nesimetrije nisu takvog nivoa da bi se moglo govoriti o narušenom kvalitetu električne energije sa tog aspekta. To potvrđuje i tok i vrijednosti struje nultog provodnika.

Na slici 4 su dati grafici THD napona i struja za sve tri faze i za nulti provodnik, kao i njihovi pojedinačni harmonici, sa uporednim podacima po standardima EN 50160 [1] i IEEE 519-1992 [2].

Slika 4 - Prikaz THD napona i struja

Maksimalne vrijednosti THD napona i struje dogodile su se u različitim vremenima mjernog perioda. Stoga su posebno analizirani harmonijski spektri za ta dva slučaja.

Harmonijski spektri napona i struja za sve tri faze, pri maksimalnoj vrijednosti THDI, prikazani su na slici 5 i slici 6, respektivno.

Na osnovu grafika na slici 5, zaključuje se da su u spektru individualnih harmonika napona izraženi neparni harmonici, prvenstveno 7-mi, 5-ti i 3- i, a tako i 13-ti i 11-ti. Za sve tri faze, oni su ispod limita definisanih standardima IEEE i EN. Takođe, ni THD napona faza ne prelaze granice definisane ovim standardima.

U spektru individualnih harmonika struja (slika 6), tako i su izraženi neparni harmonici, prvenstveno 7-mi, 5-ti i 3- i, kao 13-ti i 11-ti. Pri tome, 7-mi harmonik struja sve tri faze premašuje IEEE limit.

Takođe, THD struja u sve tri faze prelaze limit definisan IEEE standardom [2].

Slika 5 - Harmonijski spektar napona, pri $THDI_{max}$

Slika 6 - Harmonijski spektar struja, pri $THDI_{max}$

Slika 6 prikazuje podaci i zaključci, dobijaju se i za harmonijske spektre pri maksimalnoj vrijednosti THDU i za druge analizirane harmonijske spektre napona i struja. U svim slučajevima individualni harmonici napona i vrijednosti THDU su u dozvoljenim granicama, dok vrijednosti THDI premašuju definisane limite, kao i neki od neparnih harmonika, prvenstveno 7-mi harmonik.

S obzirom na lokaciju mjernog mjesta (objekat TS 10/0.4 kV), očekivano je da kvalitet po pitanju odstupanja napona bude zadovoljavajući.

4. SIMULACIONI MODEL I PRORAČUNI

Simulacioni model za analizu nivoa viših harmonika u sistemima napajanja administrativnih objekata sa grupisanim nelinearnim potrošačima malih snaga, realizovan je u programskom paketu Matlab Simulink.

Formirani model linearnog opterećenja (kombinacija modela linearnih potrošača i modela grupisanih nelinearnih potrošača) i model NN mreže (napojni priključni i instalacioni vodovi).

Na slici 7 je prikazan model strujnog izvora, gdje ukupno opterećenje priključeno na NN (ili SN) sabirnice čini kombinaciju linearnog i nelinearnog opterećenja, a što je u praksi najčešći slučaj.

Slika 7 - Model strujnog injektiranja (izvora)

Model opterećenja nelinearnih potrošača bazira se na modelu strujnog izvora [8]. Ovaj model se najčešće koristi prilikom modelovanja potrošnje na NN i SN nivou, prvenstveno za modelovanje velikog broja malih nelinearnih potrošača priključenih na NN mrežu.

Linearni potrošači se modeluju preko paralelnog RL kola, s tim da se ovim modelom obuhvataju potrošači koji predstavljaju kombinaciju linearnog potrošača sa električnim motorom. Parametri kola su određeni izrazima [9]:

$$R = \frac{U^2}{k \cdot P}, \quad L = \frac{U^2}{2ff \cdot k \cdot Q}, \quad k = 0,1 \cdot h + 0,9 \quad (1)$$

$$R = R_{50Hz} \cdot h^{1/2} \quad (2)$$

gdje su: P i Q aktivna i reaktivna snaga ekvivalentnog potrošača, U napon u tački priključenja, h red harmonika, a k korekcionni faktor koji predstavlja uticaj električnog motora. Ekvivalentna otpornost se koriguje zbog uvažavanja skin efekta u skladu sa izrazom (2), s tim da je u literaturi [9] osim ove korekcije otpora predložena i korekcija u razmjeri od $h^{1,15}$, ali treba imati na umu da je modelovanje potrošača još uvijek aktuelna tema istraživanja i da su ekvivalentni modeli samo aproksimacija kojom se jedan potrošač može dovoljno uspješno modelovati. Ova konstatacija proizilazi iz činjenice da se nikada ne zna procentualno učešće svakog pojedinačnog potrošača u grupi potrošača koja se prikazuje preko ekvivalentnog modela, a tako je bitna i činjenica da se opterećenje grupe potrošača koja se modeluje može samo pretpostaviti.

Na osnovu predhodnog, formiran je simulacioni model linearnog potrošača, za učešće u h -tom harmoniku (slika 8a). Kompletan simulacioni model linearnog potrošača predstavlja paralelnu vezu simulacionih modela svih relevantnih harmonika (slika 8.b), sa parametrima računatim po izrazu (1).

Distributivna mreža, odnosno priključni vodovi se modeluju preko redne veze podužne otpornosti i podužne induktivnosti. Konkretno, priključni vodovi su realizovani kablovima tipa PP00-YAS 4x150 mm², dok su za instalacione vodove korišćeni kablovi PP-Y 5x6 mm², u skladu sa važećim propisima za izgradnju električnih instalacija. Pri realizovanom simulacionom

modelu mreže, računato je sa sljedećim parametrima priključnog kablova: podužna otpornost 0,202 Ω/km i podužna reaktansa 0,259 Ω/km i sa parametrima instalacionih kablova: podužna otpornost 3,09 Ω/km i podužna reaktansa 0,107 Ω/km, [10]. Za prosječnu dužinu instalacionih kablova usvojena je vrijednost 1m, a za prosječnu dužinu priključnog voda vrijednost 50 m. Ovi podaci su preuzeti iz [3], gdje je propisano da prosječna dužina priključnog voda u gradskom području iznosi 50 m.

Slika 8 - Simulacioni model linearnog potrošača a)

Nelinearno opterećenje linearni nelinearni potrošači, koji su osnovni izvori viših harmonika struja i napona u elektrodistributivnim mrežama.

Nelinearno opterećenje, odnosno grupisani nelinearni potrošači se modeluju kao kombinacija strujnih izvora priključenih paralelno na NN mrežu. Svaki strujni izvor predstavlja injektiranu struju određene ureaja ili grupe ureaja, baziranu na poznatim vrijednostima preuzetim iz literature, odakle su uzeti i amplituda i fazni uglovi za pojedine nelinearne potrošače [11], [12], [13], [14], [15]. Primjer jednostavnog modela grupe nelinearnih potrošača je prikazan na slici 9.

Slika 9 - Model grupe nelinearnih potrošača a)

Jedan od ograničavajućih faktora ovog modela je što se za model određene nelinearne potrošača mogu koristiti karakteristike samo jednog tipa tog ureaja. Na primjer, fluorescentnih svjetiljki sa elektronskim balastom ima mnoštvo tipova sa njihovim mjernim podacima, a u modelu se mogu koristiti podaci samo jednog tipa [13], [16].

Primjer simulacionog modela jednog nelinearnog potrošača modelovanog strujnim izvorima, realizovan u programskom paketu Matlab Simulink, dat je na slici 10.

Slika 10 - Simulacioni model nelinearnog potrošača

Polazeći od prikazanog simulacionog modela nelinearnog potrošača, formira se simulacioni model grupe potrošača. Potrošači se grupišu po tipovima, tako da jednu grupu potrošača čine radni, drugu fluorescentne svjetiljke sa elektronskim balastom, treću fluorescentne svjetiljke sa magnetskim balastom, itd. U okviru jedne grupe potrošača, pojedinačni potrošači su paralelno vezani na zajedničku sabirnicu preko modela instalacionih vodova, predstavljenih preko podužne otpornosti i reaktanse.

Na slici 11 je prikazan formirani simulacioni model grupe nelinearnih potrošača priključenih na jednu fazu sistema napajanja razmatranog administrativnog objekta – zgrade MH ERS.

Simulacioni modeli su formirani za sve tri faze, sa realnom strukturom i u svakom pojedinačnom nelinearnom potrošaču po fazama (tabela 1).

Na osnovu formiranih faznih simulacionih modela grupisanih nelinearnih potrošača, realizovan je trofazni simulacioni model nelinearnog opterećenja administrativnog objekta – zgrade MH ERS. Modelovani su priključni i instalacioni vodovi sa nelinearnim potrošačima koji su u upotrebi u ovoj zgradi, u skladu sa njihovim stvarnim priključnim i karakteristikama.

Pomoću formiranog simulacionog modela izvršeni su proračuni i analize strujne i naponske harmonijske distorzije u sistemu napajanja objekta MH ERS, pri različitim režimima opterećenja i sa promjenljivim u svakom nelinearnom opterećenju.

U tabeli 2 je prikazan harmonijski spektar i THD struja za sve tri faze napojnog voda, pri maksimalnom opterećenju.

Tabela 2. Harmonijski spektar i THD struja, pri max. opterećenju bez ušes a linearnog opterećenja

Struja	IL1 [%]	IL2 [%]	IL3 [%]
3.	12,80	10,41	3,97
5.	12,20	12,04	16,16
7.	30,35	25,24	37,38
9.	4,02	1,25	2,82
11.	5,38	11,05	7,00
13.	12,22	20,25	9,50
15.	5,06	2,46	0,83
17.	1,50	4,12	1,40
19.	0,73	2,46	1,11
THD	45,63	40,69	42,90

Prisustvo harmonika i vrijednost faktora THDI izrazito zavisi od strukture nelinearnog opterećenja, odnosno tipa, broja i karakteristika priključenih nelinearnih potrošača, njihovog grupisanja i jednovremenog rada. Zbog velikog broja priključenih fluorescentnih svjetiljki sa magnetskim balastom, evidentno je smanjenje THDI faktora.

U harmonijskom spektru struje dominiraju treći, peti, sedmi, jedanaesti i trinaesti harmonik. Na izrazito visokom trećem i harmoniku znatan uticaj imaju radni i radna oprema, kao i fluorescentne svjetiljke sa elektronskim balastom. Međutim, na znatno smanjenje petog, sedmog i devetog harmonika uticaj imaju fluorescentne svjetiljke sa magnetskim balastom.

Takođe, toplotne pumpe i drenažna i požarne pumpe, koje su u upotrebi u zgradi MH ERS, znatno utiču na smanjenje trećeg i devetog harmonika, dok utiču na povećanje petog, sedmog, jedanaestog i trinaestog.

Realno, opterećenje faza čine linearni i nelinearni potrošači. Ako se u simulacioni model uključe i linearna opterećenja, shodno njihovom stvarnom u svakom u opterećenjima faza, za harmonijski spektar i THD struja faza dobijaju se vrijednosti prikazane u tabeli 3.

Tabela 3. Harmonijski spektar i THD struja, pri max. opterećenju i sa u svakom linearnog opterećenja

Struja	IL1 [%]	IL2 [%]	IL3 [%]
3.	5,50	3,60	1,53
5.	4,71	4,64	6,24
7.	11,72	9,75	14,43
9.	1,73	0,43	1,09
11.	2,31	3,82	2,70
13.	5,25	7,00	3,67
15.	2,18	0,85	0,32
17.	0,65	1,42	0,54
19.	0,32	0,85	0,43
THD	15,77	14,06	15,22

Prikazani rezultati odgovaraju režimu maksimalnog opterećenja (Max). Simulacioni proračuni su izvršeni i za niz drugih režima opterećenja posmatranog objekta: minimalno opterećenje (Min), radni dan u 18 h (RD 18h), kao i radni dani i dani vikenda u drugim karakteristiknim periodima dana. Prisustvo linearnog opterećenja značajno smanjuje u svakom i viših harmonika u harmonijskom spektru struja, kao i vrijednosti THDI. Pri tome je to smanjenje direktno zavisno od odnosa u svakom a linearnog i nelinearnog opterećenja.

U tabeli 4. su prikazani rezultati simulacionih proračuna dominantnih strujnih harmonika pri maksimalnom opterećenju po fazama (treći, peti, sedmi) za različito u svakom i nelinearnog opterećenja, uz njegovu nepromjenjenu strukturu.

Sa smanjenjem u eš a nelinearnog optere enja, dolazi do smanjenja nivoa injektiranih harmonika u

sistem napajanja. Pri tome je procentualno to smanjenje nešto manje od smanjenja u eš a nelinearnog optere enja.

Slika 11 – Jednofazni simulacioni model nelinearnog optere enja administrativnog objekta - zgrada MH ERS

Tabela 4. Harmonici struja pri promjeni u eš a nelinearnog optere enja po fazama

Struja harmonika	Faza	Nelinearno optere enje (100 %)	Nelinearno optere enje (50 %)	Nelinearno optere enje (25 %)	Nelinearno optere enje (20 %)	Nelinearno optere enje (10 %)
I3 [%]	L1	12,80	4,96	2,22	1,92	0,90
I3 [%]	L2	10,41	3,88	1,77	1,58	0,78
I3 [%]	L3	3,97	1,56	0,73	0,66	0,33
I5 [%]	L1	12,20	4,81	2,12	1,88	0,83
I5 [%]	L2	12,04	4,47	2,03	1,82	0,91
I5 [%]	L3	16,16	6,45	2,94	2,77	1,31
I7 [%]	L1	30,35	11,85	5,29	4,64	2,16
I7 [%]	L2	25,24	9,34	4,27	3,77	1,86
I7 [%]	L3	37,38	14,99	6,76	6,49	3,02

5. ANALIZA REZULTATA

5.1. Uporedna analiza rezultata mjerenja i simulacionih prora una

Na slici 12 uporedno su dati rezultati mjerenja i rezultati simulacionog prora una strujnog harmonijskog spektra napojnog voda posmatranog administrativnog objekta – zgrada MH ERS.

Slika 12 - Uporedni prikaz strujnog harmonijskog spektra, pri max. optere enju: simulacija i mjerenje

Na slici 13 su prikazane uporedne vrijednosti za THDI faktor, a koje se odnose na režim max. optere enja. Sli ni odnosi dobijaju se i za druge razmatrane režime optere enja.

Podudarnost rezultata je zadovoljavaju a, što je u osnovu poslužilo za verifikaciju formiranog simulacionog modela. Dalje se formirani simulacioni model koristi za dodatne prora une i analize, kakva je i prikazana analiza uticaja promjene u eš a nelinearnog optere enja na strujnu harmonijsku distorziju.

Slika 13 - Uporedni prikaz vrijednosti THDI, pri max. optere enju: simulacija i mjerenje

Sa predhodnih dijagrama se uo a va potpuna podudarnost toka vrijednosti strujnih harmonika i faktora THDI dobijenih mjerenjem i simulacionim prora unima.

Istovremeno se uo a va da su vrijednosti strujnih harmonika i faktora THDI dobijene simulacionim prora unima nešto ve e od vrijednosti dobijenih mjerenjem.

Prema rezultatima mjerenja, u vrijeme maksimalnog optere enja vrijednost THDI faktora varira od 12,3% do 15,9% , zavisno od faze, dok se u ostalim slu ajevima optere enja ta vrijednost kre e u intervalu od 10,0% do 14,6%.

Na osnovu simulacionih prora una, za režim maksimalnog optere enja su dobijene vrijednost THDI faktora po fazama od 14,6% do 15,7%. Za ostale razmatrane režime optere enja dobijene su vrijednosti u intervalu od 7,1% do 10,6%.

Kao mogu i uzroci ovih razlika isti u se, prije svega nemogu nost apsolutno ta nog odre ivanja strukture nelinearnog optere enja u vrijeme mjerenja, kao i injenica da se karakteristike nelinearnih potroša a koje ulaze u simulacioni prora un uzimaju iz literature i mogu se u izvjesnoj mjeri razlikovati od karakteristika stvarnih nelinearnih potroša a ramatranog optere enja.

5.2. Prora un dozvoljenog nivoa izobli enja za instalacije zgrade MH ERS

Kod grupnog priklju enja nelinearnih potroša a malih snaga, veoma zna ajan uticaj na strujnu i naponsku distorziju ima i jednovremenost njihovog uklju enja i rada. Kada su u pitanju administrativni objekti, vrlo je teško do i do faktora jednovremenosti uticaja grupe nelinearnih potroša a na parametre strujne harmonijske distorzije, pošto grupno nelinearno optere enje ine najraznovrsniji nelinearni potroša i sa razli itim režimom i nivoom uticaja jednovremenog rada. Pri tome, jedna je jednovremenost rada i njen uticaj za ra unare i ra unarske opreme, druga za osvjetljenje, tre a za naredni tip nelinearnih potroša a i td. Tako, prema literaturi ([5], [8], [11], [12], [17], [18] i [19]), pri jednovremenom radu ve eg broja ra unara (preko 81-og), vrijednost faktora THDI ulazi u zasi enje i iznosi oko 30 %. Ne postoje podaci o uticaju jednovremenog rada više potroša a razli itog tipa. Takva procjena se može izvršiti na osnovu tehni kog upustva datog u [20].

Prora un uticaja jednovremenog rada nelinearnih potroša a razli itog tipa na elektrodistributivnu mrežu, vrši se na osnovu snage kratkog spoja u TS na koju je objekat priklju en i na osnovu odobrene snage instalacija objekta za koji se vrši provjera uticaja njegovih nelinearnih potroša a na mrežu. Metod prora una se sastoji iz tri koraka:

1. provjera odnosa snaga S_{ks}/S_A ,
2. prora un harmonijske strukture optere enja instalacija korisnika mreže S_{os}/S_A ,
3. odre ivanje harmonijske strukture optere enja S_{os}/S_A .

gdje su: S_{ks} snaga kratkog spoja na mjestu priklju enja, S_A priklju na snaga i S_{os} harmonijsko optere enje ure aja koji su priklju eni na instalacionu mrežu.

1. Provjera odnosa snaga S_{ks}/S_A vrši se na osnovu sljede ih uslova:

$$\frac{S_{KS}}{S_A} \geq 150 \text{ za NN i } \frac{S_{KS}}{S_A} \geq 300 \text{ za S} \quad (3)$$

2. Kada je u pitanju prora un harmonijske strukture optere ena instalacija korisnika mreže S_{os}/S_A , prvo se utvr uje harmonijsko optere enje ure aja koji su priklju eni na instalacionu mrežu (S_{os}), na osnovu sljede eg izraza:

$$S_{OS} = 0,5 \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} \quad (4)$$

gdje je S_{Gr} snaga izvora harmonika, s tim da je ova snaga razli ita za dvije grupe izvora harmonika. U prvu grupu spadaju ure aji sa THDI koja se nalazi u opsegu 10% THDI 25% (fluorescentne svjetiljke sa magnetskim balastom), dok u drugu grupu spadaju ure aji sa THDI 25 % (fluorescentne svjetiljke sa elektronskim balastom, ra unari i ra unarska oprema, audio i TV ure aji, klima ure aji, pumpe, ventilatori, liftovi, ...). Na osnovu prora unate vrijednosti snage S_{os} izra unava se odnos S_{os}/S_A , odnosno harmonijska struktura optere enja instalacija korisnika mreže.

3. Na osnovu prora unatog odnosa S_{os}/S_A , vrši se odre ivanje harmonijske strukture optere enja po sljede em dijagramu [20].

Slika 14 – Dijagram za procjenu sadržaja harmonijskog optere enja [20]

Ako se ta ka presjeka dva odnosa S_{os}/S_A i S_{ks}/S_A nalazi ispod dozvoljene linije, tada je sadržaj harmonijskog optere enja u granicama dozvoljenog.

Suprotno tome, ukoliko je ta ka presjeka iznad dozvoljene linije tada se moraju vršiti mjerenja kako bi se utvrdio dozvoljeni nivo harmonijskog opterećenja.

Kada se izvrše provjere sva tri uslova, tada je mogu e izra unati dozvoljeni nivo THDI za instalacije na koje je priklju en objekat za koji se vrši provjera. Dozvoljeni nivo THDI faktora se ra una na osnovu sljede eg izraza:

$$THDI_A = \frac{20}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{KS}}{S_A}} \quad (5)$$

Na osnovu prethodno opisanog metoda, može utvrditi harmonijska struktura optere enja za slu aj razmatranog administrativnog objekta - zgrada MH ERS.

Zgrada MH ERS je priklju ena na TS 10/0,4 kV – “Elektroprivreda”, sa transformatorom snage 630 kVA i $u_{KT}=6\%$. Priklju na snaga zgrade iznosi $S_A = 459$ kVA, a popis i karakteristike jednovremeno priklju enih nelinearnih potroša a, u razmatranom režimu max. optere enja, dati su u tabeli 5.

Na osnovu poznatih parametara elektrodistributivne mreže na koju je priklju ena zgrada MH ERS, prora unata je snaga kratkog spoja na mjestu priklju enja, i ona iznosi $S_{KS}=9,715$ MVA. Na osnovu navedenih vrijednosti, može se provjeriti prvi uslov, odnosno:

$$1. \quad \frac{S_{KS}}{S_A} = \frac{9,715 MVA}{0,459 MVA} = 21,16 \quad (6)$$

Zaklju uje se da prvi uslov nije zadovoljen, jer je odnos snage kratkog spoja i priklju ne snage manji od 150, što implicira da je potrebno izvršiti provjeru drugog uslova.

2. Da bi se provjerio drugi uslov potrebno je prora unati snagu S_{OS} , odnosno harmonijsko optere enje ure aja koji su priklju eni na instalacionu mrežu. Ona, na osnovu izraza (4) i podataka iz tabele 5, iznosi:

$$S_{OS} = 0,5 \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} = 351,29 kVA \quad (7)$$

Sada, za odnos S_{OS}/S_A , odnosno harmonijsku strukturu optere enja, dobijamo vrijednost:

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{63,29 kVA}{459 kVA} = 0,765 \quad (8)$$

3. Kada se vrijednosti dobijene na osnovu odnosa S_{OS}/S_A i S_{KS}/S_A prenesu na garfik prikazan na slici 15. zaklju uje se da je ta ka presjeka iznad dozvoljene krive za NN, i da nije mogu e prora unati THDI nelinearnih potroša a u zgradi MH ERS bez dodatnih

mjerenja, odnosno potrebno je izvršiti mjerenja kako bi se utvrdio dozvoljeni nivo harmonijskog opterećenja.

Tabela 5. Nelinearni potroša i u jednovremenom radnom režimu

Potroša	Broj potroša a	Snaga potroša a	Grupa 1	Grupa 2
	N	VA	kVA	kVA
<i>Ra unar</i>	137	150		20,55
<i>Fl. sv., el. bal - 26W</i>	664	26		17,26
<i>Fl. sv., mag. bal. - 36 W</i>	622	36	22,39	
<i>Fl. sv., mag. bal - 18 W</i>	146	18	2,63	
<i>Laserski štampa</i>	99	110		10,89
<i>LCD monitor</i>	15	68		1,02
<i>Skener</i>	10	36		0,36
<i>TV – klasi ni</i>	4	120		0,48
<i>LCD TV</i>	3	73		0,22
<i>Toploma pumpa</i>	2	120		240,0
<i>Drenažna pumpa</i>	2	12		24,0
<i>Požarna pumpa</i>	2	12		24,0
Ukupno	1.700	-	25,02	338,78

Dozvoljeni nivo THDI za instalacije na koje su priklju eni nelinearni potroša i iznosi:

$$THDI_A = \frac{20}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{KS}}{S_A}} = 0,092 \quad (9)$$

$$THDI_{A\%} = 0,092 = 9,2\%$$

Prethodno prora unata vrijednost THDI predstavlja dozvoljeni nivo THDI za instalacije zgrade MH ERS na koje su priklju eni nelinearni potroša i (u daljem tekstu *prora un*), a služi kao podatak za uporedne analize sa podacima dobijenim na osnovu mjerenja koji treba da pokažu stvarni nivo THDI na ta ki priklju enja ovog objekta.

6. DISKUSIJA

Na slici 15. je prikazan grafik sa uporednim vrijednostima THDI pri maksimalnom optere enju za sve tri faze, gdje su posebno prikazane vrijednosti za IEEE limite, simulaciju, mjerenja i prora un.

Na osnovu slike 15. može se zaklju iti da simulacione vrijednosti THDI, kao i za vrijednosti THDI

dobijenih na osnovu mjerenja u TS na koju je priključena zgrada MH ERS, za sve tri faze prelazi limite definisane IEEE standardom, a tako e prelazi i dozvoljeni nivo THDI za instalacije zgrade MH ERS dobijen na osnovu prora una.

Slika 15 - Uporedni prikaz vrijednosti THDI, pri max. optere enju: IEEE limit, simulacija, mjerenje i prora un

Na osnovu prethodnog grafika se zaklju uje da je dobra podudarnost simulacionih rezultata i rezultata dobijenih mjerenjima, a odstupanja po fazama se u prosjeku kre u oko 1,2%. Me utim, njihovo pore e nje sa limitima po IEEE standardu i po prora unu dobijenom na osnovu karakteristika sistema napajanja i potrošnje zgrade MH ERS, pokazuje da mjerene i simulacione vrijednosti THDI zna ajno premašuju ove limite. Konkretno, u odnosu na IEEE limit, izmjerene vrijednosti su u prosjeku ve e do 5,8%, dok su vrijednosti THDI dobijene simulacijom u prosjeku ve e i do 7%. Odstupanja u odnosu na prora unati limit su nešto manja. Izmjerene vrijednosti THDI su u prosjeku ve e do 4,6%, a simulacione u prosjeku do 5,7%.

Na osnovu predhodnog, može se zaklju iti da harmonijsko optere e zgrade MH ERS, uzrokuje vrijednosti THDI iznad dozvoljenih, prvenstveno u režimu max. optere enja.

7. ZAKLJU AK

Optere enja savremenih administrativnih objekata karakteriše sve ve e prisustvo grupisanih nelinearnih potroša a malih snaga, sa zna ajnim negativnim uticajem na kvalitet elektri ne energije.

Pri tome najzna ajniji uticaj ima tzv. harmonijsko optere enje koga ine nelinearni potroša i sa izraženim harmonijskim spektrom struje potrošnje (fluorescentne svjetiljke sa elektronskim balastom, ra unari i ra unarska oprema, audio i TV ure aji, klima ure aji, pumpe, ventilatori, liftovi, fluorescentne svjetiljke sa magnetnim balastom, i dr.).

Njihov se negativni uticaj manifestuje kroz inje-ktiranje viših harmonika u sisteme napajanja posma-

tranih objekata i pripadne distributivne mreže, a samim tim i u pove anim vrijednostima faktora THD, esto iznad dozvoljenih.

Mjerenja, kao i odgovaraju i simulacioni prora uni, omogu avaju adekvatnu kontrolu, a time i blagovremena reagovanja u cilju obezbje enja potrebnog nivoa kvaliteta elektri ne energije.

Za konkretni administrativni objekat – zgrada MH ERS, sprovedena istraživanja pokazuju da dolazi do prekora enja dozvoljenog limita za faktor THDI, prvenstveno u režimu max. optere enja. Kako je na zgradi MH ERS u me uvremenu instalirana mala solarna elektrana snage 6,5 kVA, to može dodatno uticati na pove anje harmonijskog izobli enja i vrijednosti THD faktora. Sve ovo ukazuje na neophodnost preduzimanja odgovaraju ih mjera za održavanje potrebnog nivoa kvaliteta elektri ne energije, prvenstveno za smanjenje nivoa viših harmonika. Mogu e mjere su: rekonfiguracija mreže (pove anjem snage kratkog spoja, poseban vod, priklju enjem na viši naponski nivo), ugradnja kompenzacije (promjena rezonantne frekvencije sistema) ili primjena pasivnih ili aktivnih filtera.

LITERATURA

- [1] EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, Cenelec, 2010.
- [2] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standard 519-1992, IEEE, New York, 1993.
- [3] Regulatorna komisija za energetiku Republike Srpske, Opšti uslovi za isporuku i snabdijevanje elektri nom energijom, Službeni glasnik Republike Srpske br. 85/08.
- [4] Zakon o elektri noj energiji Republike Srpske – Preiš eni tekst (Službeni glasnik Republike Srpske, broj 08/08)
- [5] S. Mujovi , V. A. Kati , Z. orba, J. Radovi , Mjerenje i analiza uticaja rada ra unarskog centra na nivou viših harmonika u mreži, Elektroprivreda, Beograd, Srbija, ISSN 0013-5755, broj 4, Oktobar-Decebar, pp. 67-81, 2009.
- [6] L. Korunovi , D. Stojanovi , Indikatori kvaliteta napona nekih nelinearnih potroša a na podru ju JP „Elektrodistribucija“ Niš, Elektroprivreda, Beograd, Srbija, broj 1, pp. 46-57, 2005.
- [7] [7] Petar Mati , Vladimir Radusinovi , Analiza kvaliteta elektri ne energije objekta sa velikim brojem nelinearnih potroša a male snage, Infoteh, nau nostru ni simpozijum, Jahorina, Vol. 8, Ref. d-3, p. 297-300, mart 2009.
- [8] S. Mujovi , V. A. Kati , J. Radovi , Klasifikacija malih potroša a za analizu viših harmonika, XXIX

- Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, Knjiga II, Grupa B1-B4, Rad broj: R B4-03, 2009.
- [9] S. J. Ranade, W. Xu, An overview of harmonics modeling and simulation, Chapter 1, IEEE Power Engineering Society, Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation, TP-125-0, 1998.
- [10] D. Kaiser, Elektrotehni ki priru nik, Tehni ka knjiga, Zagreb, 1971.
- [11] J. Radovi , V. Kati , S. Mujovi , V. Radulovi , Uticaj malih nelinearnih potroša a na kvalitet napona u distributivnim mrežama, I Savjetovanje CG KO CIGRE, Budva, Crna Gora, Referat C4-08, 12-16. Oktobar, 2009.
- [12] J. Radovi , S. Mujovi : Karakteristike optere enja ra unara sa aspekta uticaja na kvalitet elektri ne energije, XII Me unarodni simpozijum Energetske elektronike, Ee 2003, Novi Sad, Srbija i Crna Gora, 5-7 Novembar, 2003.
- [13] Sean Toby Elphick, The modern domestic load and its impact on the electricity distribution network, Master of Enginerring – Research, University of Wollongong, School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering, 2011.
- [14] Alberto Dolara, Sonia Leva, Power Quality and Harmonic Analysis of End User Devices, Energies 5, 5453-5466; doi: 10.3390/en5125453, 2012.
- [15] Julian Wosik, Bogdan Miedzinski, Artur Kozlowski, Marian Kalus, Impact of non-linear small power receivers on low voltage network operation conditions, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14), Cordoba (Spain), 8th to 10th April, 2014.
- [16] Aurora Gil-De-Castro, Antonio Moreno -Munoz, J. J. G. De La Rosa, Comparative study of electromagnetic and electronic ballasts - an assessment on harmonic emission, PRZEGL D ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 2/2012.
- [17] S. Mujovi , V. Kati , J. Radovi , Uticaj grupisanja nelinearnih potroša a malih snaga na redukovanje harmonijskog spektra generisane struje, ETF Journal of Electrical Engineering, Vol. 19, No. 1, October 2011.
- [18] S. Mujovi , V. Kati , J. Radovi , Modelovanje nelinearnih potroša a malih snaga sa posebnim osvrtom na modelovanje ra unara, II Savjetovanje CG KO CIGRE, Milo er, Crna Gora, Referat C4-4, 16.-19. maj, 2011.
- [19] V. Kati , S. Mujovi , V. Radulovi , J. Radovi , The Impact of the Load Side Parameters on PC Cluster's Harmonics Emission, Advances in Electrical and Computer Engineering, Volume 11, Number 1, pp. 103-110, 2011.
- [20] VE - Verband der Elektrizitätsunternehmen sterreichs, Technical Rules for the Assessment of Network Disturbances, 2nd Edition 2007.
- [21] Kati Vladimir, Kvalitet elektri ne energije – Viši harmonici – monografija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehni kih nauka, Novi Sad, 2002.

SUMMARY

ANALYSIS OF HIGHER HARMONICS IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF THE ADMINISTRATIVE BUILDING WITH GROUPED NONLINEAR LOW-POWER LOADS

This paper presents the results of the analysis of influences of higher harmonics in the power supplying systems of administration building, obtained on the basis of formed simulation model. It also presents and analyses specific measurements of power quality at the level of distribution substations that feed the typical administration building. Formed simulation model as well as the conclusions drawn on the basis of measurements and simulation calculation for the given administration building, may be of significance both in exploitation and in the planning of distribution networks with significant participation of nonlinear low-power loads in the structure of their consumption.

Key words: power quality, higher harmonics, nonlinear consumers, administration building