

UTVRĐIVANJE KARAKTERA I MODELOVANJE FAKTORA UKUPNE HARMONIJSKE DISTORZIJE STRUJE GRUPISANIH RAČUNARA

DETERMINATION OF CHARACTER AND MODELING OF PC CLUSTER CURRENT HARMONIC DISTORTION

Saša Mujović¹, Slobodan Đukanović¹

Sažetak: Razvoj koncepta pametnih mreža (smart grids), pojava distribuiranih izvora električne energije i sve veći stepen zastupljenosti potrošača s elementima energetske elektronike, predstavljaju realnost savremenog elektrodistributivnog sistema. U fokusu ovog rada je analiza faktora ukupne harmonijske distorzije struje (THD_I) uzrokovane jednovremenim radom proizvoljno velike grupe računara. Poznavanje ovog faktora je vrlo važno i njegovim poređenjem s relevantnim standardima dobija se informacija o potencijalu grupe računara u smislu generisanja viših harmonika i mogućnosti uticaja na naponske prilike u mreži. Na osnovu sprovedenih mjerenja na dvije mjerne lokacije i simulacija, utvrđena je zakonitost promjene ovog faktora s povećanjem broja priključenih računara u grupi. Takođe, metodom najmanjih kvadrata razvijen je matematički model faktora THD_I , koji uključuje najvažnije uticajne varijable.

Ključne riječi: harmonici, strujna distorzija, modelovanje, računari.

Abstract: Development of smart grid concepts, distributed energy sources and increasing presence of loads with power electronics elements represent reality in contemporary power distribution systems. This paper analyzes the factor of total harmonic current distortion (THD_I) due to operation of arbitrarily large PC group. Knowing that the THD_I value is of great significance, comparing it to the relevant standards can provide valuable information regarding the potential of PC group in terms of generating higher harmonics and its influence on voltage quality. Based on conducted measurements on two sites and simulation results, the dependence of the THD_I value on the size of PC group is established. Also, by using the least squares approach, the THD_I mathematical model is derived, which includes all the significant factors.

Keywords: harmonic, current harmonic distortion, modelling, PC cluster.

UVOD

Neprekidno napajanje potrošača električnom energijom adekvatnog kvaliteta je osnovni zadatak koji se nameće distributerima električne energije. Ne tako davno, sigurnost i pouzdanost su predstavljali mjeru kvalitetnog napajanja. U strukturi priključenog opterećenja dominirali su potrošači linearnog karaktera, koji napajani naponom sinusnog oblika (pri učestanosti 50 Hz) generišu sinusnu struju i kao takvi ne utiču na degradaciju naponskih prilika u mreži. S tim u vezi, naponske prilike u sistemu su bile zadovoljavajuće. Atmosferski prenaponi, ili pojave koje su i danas neizbježne: kratki spojevi, zemljospojevi i komutacione aktivnosti u sistemu su predstavljali potencijalne uzročnike narušene sigurnosti i pouzdanosti napajanja [1], [2].

U novim, deregulisanim uslovima rada elektroenergetskog sistema sa sve većim udjelom distribuiranih izvora, jedan od ključnih faktora postaje kvalitet električne energije, koji u užem smislu podrazumijeva kvalitet mrežnog, odnosno isporučenog napona. Jedna od osnovnih odlika kvaliteta napona je stepen distorzije njegovog talasnog oblika ili prisustvo viših harmonika [3].

Na kvalitet mrežnog napona značajan uticaj ima grupa nelinearnih potrošača priključenih na niskom naponu. Oni su opremljeni energetskim elektronskim pretvaračima, koji proizvode nesinusoidalne talasne oblike struje, a čija upotreba je posebno raširena kod elektronskih, mikroelektronskih i računarskih uređaja i druge opreme malih snaga ($I_n < 16A$). Kao posljedica njihovog masovnog korišćenja, a naročito u zonama kolektivnog stanovanja, poslovnim zgradama, poslovno-trgovačkim zonama i univerzitetskim kompleksima, nivo viših harmonika u mrežnom naponu se značajno povećao. Pomenuti nelinearni potrošači (računari, štampači, fluorescentne sve-

¹ Elektrotehnički fakultet Podgorica, Crna Gora
sasam@ac.me; slobdj@ac.me
Rad dostavljen: juli 2013. Rad prihvaćen: oktobar 2013.

tiljke, TV, video i audio uređaji) su izvori viših harmonika, ali i uređaji na koje distorzija u talasnom obliku napona napajanja mogu imati izrazito negativan uticaj [4], [5].

U ovom radu razmatrani su računari kao potrošači sa najvećim nivoom zastupljenosti u strukturi savremenog distributivnog konzuma. Iako su, pojedinačno posmatrani, male snage (100-200 W), jednovremeno zastupljeni u većem broju formiraju virtuelnu grupu (klaster), respektabilne snage i harmonijskog potencijala. Posmatrani kao grupa, računari postaju veoma interesantni sa aspekta istraživanja vezanih za kvalitet električne energije.

Kvantifikovanje harmonika generisanih pri jednovremenom radu grupe računara može se izvršiti faktorom ukupne harmonijske distorzije struje (THD_I):

$$THD_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100, \quad (1)$$

gdje je h red harmonika, dok I_1 i I_h predstavljaju efektivne vrijednosti struja osnovnog i h -tog harmonika. Poznavanjem ovog faktora i njegovim poređenjem sa limitima definisanim standardima IEEE 519 [6] i IEC 61000-3-2 [7] dobija se informacija o potencijalnom efektu grupe računara na kvalitet naponskih prilika u mreži.

Faktor THD_I se može odrediti na dva načina: direktnim mjerenjima, što je najprecizniji, ali veoma često i najsкупlji i najkomplikovaniji pristup (zbog potrebe dobijanja raznih dozvola) ili korišćenjem matematičkih modela za proračun, čiji razvoj nije jednostavan, ali kasnija upotreba jeste. Upravo je matematičko modelovanje faktora THD_I predmet interesovanja u ovom radu. Ideja je da se iskoriste prethodna istraživanja autora ovog rada, predstavljena u [8] i [9], i da se nadograde kroz razvoj uopštenog matematičkog modela. Model treba da predstavlja funkcionalnu zavisnost faktora THD_I od najvažnijih parametara, kako onih koji predstavljaju uticaj elektrodistributivne mreže, tako i onih koji se tiču strukture računara. Takođe, biće razriješena dilema o karakteru faktora THD_I . Razvijeni matematički model će biti naročito primjenjiv u inženjerskoj praksi i pogodan za brzi proračun.

Model je dobijen na bazi rezultata sprovedenih mjerenja u računarskom centru Fakulteta tehničkih nauka (FTN) u Novom Sadu i rezultata simulacija (razvijen je Matlab Simulink model). Validnost predloženog modela je verifikovana kroz dodatna mjerenja u poslovnoj zgradi NLB Montenegrobanke u Podgorici.

1. UTICAJNI PARAMETRI NA FAKTOR THD_I

Broj jednovremeno priključenih računara na mrežu (N_{PC}) utiče na vrijednost faktora THD_I , na način što faktor THD_I opada sa porastom broja N_{PC} [8]. Objašnjenje se može naći u činjenici da prekidački karakter jedinice za napajanje računara generiše struju koja je naglašeno impulsnog karaktera. Veći broj priključenih računara

eksplicitno podrazumijeva i veću efektivnu vrijednost struje, ali i veću širinu impulsa. Na ovaj način, talasni oblik struje postaje bliži sinusnom, distorzija je manja, pa je logično da i vrijednost faktora THD_I opada. Ipak, pokazće se da ovakav zaključak treba uzeti s rezervom i da je tačan samo u određenoj situaciji (za određeni broj N_{PC}).

Faktor THD_I izrazito zavisi od snage trolnog kratkog spoja elektrodistributivne mreže – krutosti mreže (S_{SC}) i ovaj parametar mora biti sadržan u THD_I modelu. Analizom sprovedenom u [8], konstatovano je da varijacije parametra S_{SC} u opsegu od 2000 do 6000 kVA (karakteristične vrijednosti krutosti mreže koje se mogu očekivati na niskonaponskim sabirnicama koje napajaju grupe računara), rezultiraju velikim odstupanjima faktora THD_I . Pri konstantnom broju N_{PC} , ova odstupanja mogu biti i do 40%. Ostali parametri preko kojih mreža može uticati na THD_I faktor, kao što su: varijacije učestanosti, efektivnih vrijednosti napona (u opsegu dozvoljenih varijacija $\pm 10\%$, prema EN 50160 standardu [10]) aktivnih i reaktivnih snaga, kao i prisustvo određenog nivoa harmonika u naponu napajanja grupe računara (pre-existing THD_U – za opseg karakterističnih vrijednosti od 1.5-2.5%, koje se najčešće susreću u realnim sistemima), nemaju značajniji uticaj i praktično se mogu zanemariti.

Uticaj strukture računara na vrijednost faktora THD_I razmatran je u [9]. Utvrđeno je da kapacitivnost kondenzatora (C) jedinice za napajanje računara ima bitan uticaj, koji se mora uvažiti pri modelovanju. Uobičajno je da se u savremenim računarima koriste paralelno vezani kondenzatori pojedinačne kapacitivnosti 235 μ F, 340 μ F, 410 μ F i 500 μ F, pri čemu važi da veća snaga jedinice za napajanje računara podrazumijeva i veću kapacitivnost u strukturi. Uticaj raznih otpornosti i induktiviteta računara je minoran sa aspekta THD_I modelovanja. Dakle, adekvatan THD_I model podrazumijeva definisanje funkcionalne zavisnosti $THD_I = f(N_{PC}, S_{SC}, C)$.

U cilju kompletnosti analize, treba napomenuti i to da različiti instrumenti korišteni pri mjerenjima, različiti radni režimi u kojima se potencijalno nalaze računari, a naročito prisustvo dodatnog neračunarskog opterećenja (svetiljke, grijači, itd.), može rezultirati dobijanjem različitih THD_I vrijednosti za isti broj priključenih računara u grupi.

2. PREGLED MATEMATIČKIH THD_I MODELA DATIH U LITERATURI

Dobiti matematički model koji je jednostavan, primjenjiv i tačan nije lako, pa je to jedan od glavnih razloga da ova problematika nije naročito eksplotisana.

U [11] su predložena dva modela za proračun faktora THD_I . Ipak, ovo nisu modeli primjenjivi isključivo za grupe računara, nego su razvijeni za proračun razmatranog faktora na niskonaponskim sabirnicama sa kojih se napajaju razni linearni i nelinearni potrošači. Linearna zavisnost $THD_I = f(N_{PC})$ je predstavljena u [12].

Model je jednostavan, ali primjenjiv samo za manje grupe računara (do 25). Za $N_{PC} > 25$, dobijaju se nerealne vrijednosti faktora THD_1 (čak i negativne vrijednosti).

Značajan iskorak u modelovanju THD_1 faktora grupe računara postignut je u [8]. Razvijen je model $THD_1 = f(N_{PC}, S_{SC})$, koji je primjenjiv za proizvoljnu veličinu klastera. Nedostatak modela je neuvažavanje uticaja parametara vezanih za strukturu računara (kapacitivnosti jedinice za napajanje). Model je razvijen za fiksnu vrijednost kapacitivnosti $C = 235 \mu F$.

Slično ovom modelu, u [9] je dat model koji uzima u obzir uticaj prethodno pomenute kapacitivnosti, ali izostavlja parametar S_{SC} , što utiče na tačnost modela. Model je razvijen za fiksnu vrijednost krutosti mreže $S_{SC} = 4000 \text{ kVA}$.

Dakle, potpuno je jasno da postojeći modeli imaju nedostatke i da je potrebno sprovesti dalja istraživanja u cilju dobijanja kvalitetnijeg, po mogućnosti uopštenog rješenja.

3. REZULTATI MJERENJA I SIMULACIJA

U ovom poglavlju su predstavljeni samo ključni rezultati mjerenja sprovedenih u računarskom centru FTN-a u Novom Sadu i poslovnoj zgradi NLB Montenegrobanke u Podgorici, koja su poslužila za razvoj THD_1 modela i verifikaciju njegove tačnosti. Takođe, pomenut je i korišteni simulacioni model.

3.1 Mjerenja u računarskom centru FTN-a Novi Sad

Monitoring kvaliteta električne energije u računarskom centru FTN-a, se sprovodi kontinuirano od 2003. godine. U pomenutom centru se nalazi grupa od 163 računara (57, 50, 56 računara po fazama 1, 2, 3, respektivno) i detaljan opis mjerenja, sprovedih u skladu sa IEC 61000-4-7 standardom [13], mogu se naći u [8]. Za potrebe ovog rada treba posebno izdvojiti sljedeće rezultate:

- Izračunata vrijednost krutosti mreže (S_{SC}), na priključnim sabirnicama sa kojih se napaja grupa računara Centra, iznosi 4000 kVA. Navedena vrijednost je dobijena kao količnik nominalne snage transformatora (S_n) i relativnog napona kratkog spoja transformatora ($uk\%$). Oba podatka se mogu naći na pločici transformatora.
- Izmjerene vrijednosti aktivne, reaktivne i prividne snage jednog računara su: 95 W, -115 VAR i 135.8 VA, respektivno. Maksimalne registrovane vrijednosti pomenutih veličina za grupu računara (56 računara priključenih na fazu T – jedinu fazu sa „čistim“ računarskim opterećenjem) su iznosile: 5.98 kW, -3.8 kVAR i 7.03 kVA.
- Pojedinačne kapacitivnosti jedinica za napajanje svih računara u Centru su 235 μF .
- Maksimalne registrovane vrijednosti faktora THD_1 pri punom faznom opterećenju su: 55.8%, 61.2% i 61.3%, po fazama 1, 2, 3, respektivno.

U Matlab Simulink-u je razvijen i simulacioni model računarskog centra FTN-a, detaljno opisan u [8].

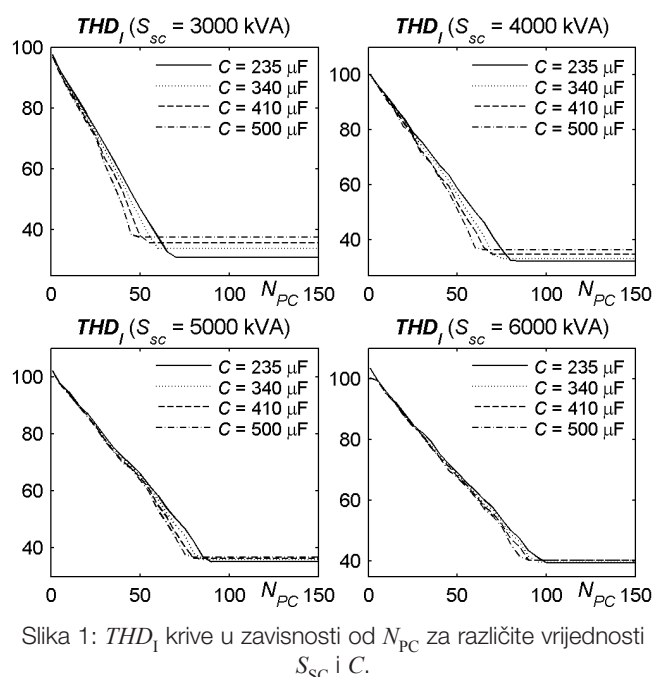
3.2 Mjerenja u poslovnoj zgradi NLB Montenegrobanke u Podgorici

Poslovna zgrada NLB Montenegrobanke u Podgorici je opremljena sa 244 računara (83, 80, 81 računara po fazama 1, 2, 3, respektivno). Važno je istaći sljedeće rezultate:

- Izračunata vrijednost S_{SC} , na priključnim sabirnicama sa kojih se napaja grupa računara u banci, iznosi 5800 kVA.
- Izmjerene vrijednosti aktivne, reaktivne i prividne snage jednog računara su: 104 W, -121 VAR i 148.4 VA, respektivno. Maksimalne registrovane vrijednosti pomenutih veličina za grupu računara (83 računara priključenih na fazu R) su iznosile: 8.12 kW, -5.7 kVAR i 9.88 kVA.
- 222 računara imaju pojedinačne kapacitivnosti jedinica za napajanje 235 μF , dok 22 računara imaju kapacitivnosti od 500 μF .
- Maksimalne registrovane vrijednosti faktora THD_1 pri punom faznom opterećenju su: 47.9%, 52.4% i 49.2%, po fazama 1, 2, 3, respektivno.
- U periodu mjerenja, računari nisu bili jedino priključeno opterećenje. Naime, protočni bojleri i fluorescentne svjetiljke, ukupne aktivne snage 1350 W, su bili uključeni, što će imati određenog uticaja na izmjerene THD_1 vrijednosti.

4. RAZVOJ THD_1 MODELA

Kako je prethodno konstatovano, N_{PC} , S_{SC} i C , predstavljaju glavne uticajne parametre na faktor ukupne harmonijske distorzije struje, uzrokovane jednovremenim radom grupe računara. S tim u vezi, koristeći rezultate mjerenja u Novom Sadu i sprovođenjem simulacija (prethodno pomenutim Simulink modelom), dobijeni su rezultati predstavljeni na Slici 1.



Slika 1: THD_1 krive u zavisnosti od N_{PC} za različite vrijednosti S_{SC} i C .

Uzeti su u razmatranje sljedeći opsezi uticajnih faktora:

- N_{PC} od 0 do 200 računara priključenih po fazi (zbog konstantnosti faktora THD_I u oblasti $150 \leq N_{PC} \leq 200$ i bolje preglednosti Slike 1, na apcisi je predstavljen opseg do $N_{PC}=150$).
- S_{SC} od 3000 do 6000 kVA (3000, 4000, 5000 i 6000 kVA su karakteristične vrijednosti krutosti mreže na niskonaponskim sabirnicama).
- C od 235 do 500 μF (235, 340, 410 i 500 μF su realne kapacitivnosti u savremenim računarima).

Analizirajući Sliku 1, može se zaključiti:

- Faktor THD_I nema konstantan trend promjene, nego se jasno razlikuju dva dijela (oblasti) – linearni dio i oblast zasićenja. Tačka prelaza sa jedne na drugu oblast zove se tačka saturacije i označava se sa N_{PC}^{sat} . Linearno opadajući dio se može aproksimirati polinomijalnom funkcijom. Naravno, u obzir dolaze i složenije funkcije, ali ideja je da model bude što jednostavniji i da se složene funkcije koriste samo u slučajevima kada se prostim rješenjem ne može postići adekvatna tačnost. Detaljnije objašnjenje fenomena saturacije faktora THD_I je dato u [8].
- Promjena faktora THD_I sa promjenom broja N_{PC} , zavisi od S_{SC} i C . S povećanjem parametra S_{SC} , vrijednost faktora THD_I raste, kao i vrijednost N_{PC}^{sat} . Pri fiksnoj vrijednosti parametra S_{SC} , manje vrijednosti kapacitivnosti C imaće za posljedicu veći nagib linearno opadajućeg dijela THD_I krive. Ovaj efekat je naročito izražen pri nižim vrijednostima S_{SC} (npr. 3000 kVA).
- Pri malom broju priključenih računara u grupi, uticaj kapacitivnosti se praktično može zanemariti, pa THD_I isključivo zavisi od S_{SC} . To je razlog što za $N_{PC}=1$ sve krive (približno) polaze iz iste tačke.

Slijedeći navedene zaključke, faktor THD_I se može modelovati funkcijom:

$$THD_I(N_{PC}, S_{SC}, C) = \begin{cases} f(S_{SC}, C)N_{PC} + g(S_{SC}), & \text{za } N_{PC} < N_{PC}^{sat} \\ THD_I^{sat}(N_{PC}^{sat}, S_{SC}, C), & \text{za } N_{PC} \geq N_{PC}^{sat}. \end{cases} \quad (2)$$

THD_I faktor se, za broj priključenih računara iz opsega $0 \leq N_{PC} < N_{PC}^{sat}$, modeluje pomoću dvije funkcije, funkcije f , koja predstavlja nagib linije i zavisi od S_{SC} i C , i funkcije g , koja određuje tačku početka linearne funkcije (THD_I vrijednost za $N_{PC} = 1$) i isključivo zavisi od S_{SC} parametra.

Kada broj računara u grupi postane veći od vrijednosti tačke saturacije ($N_{PC} > N_{PC}^{sat}$), vrijednost THD_I faktora ostaje konstantna i jednaka onoj koja se izračuna gornjim dijelom relacije (2), uvrštavajući umjesto N_{PC} vrijednost N_{PC}^{sat} . Dakle, cilj ovog rada je da se utvrde matematički modeli kojima će biti modelovane funkcije f , g i tačka saturacije N_{PC}^{sat} .

Pridržavajući se načela jednostavnosti modela, funkcija f će biti modelovana polinomijalnom funkcijom:

$$P(S_{SC}, C) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M a_{mn} S_{SC}^m C^n, \quad (3)$$

pri čemu je M red polinoma, dok su a_{mn} koeficijenti polinoma.

Nepoznati koeficijenti su određeni korištenjem metode najmanjih kvadrata, izjednačavanjem parcijalnih izvoda funkcije kvadratne greške E po nepoznatim koeficijentima a_{mn} sa nulom, tj.

$$\frac{\partial E(S_{SC}, C)}{\partial a_{pq}} = 0, \quad 0 \leq p, q \leq M, \quad (4)$$

$$E(S_{SC}, C) = \sum_{S_{SC}} \sum_C (f(S_{SC}, C) - P(S_{SC}, C))^2. \quad (5)$$

Kombinujući relacije (3)-(5) dobija se relacija:

$$\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M \left(\sum_{S_{SC}} \sum_C S_{SC}^{m+p} C^{n+q} \right) a_{mn} = \sum_{S_{SC}} \sum_C f(S_{SC}, C) S_{SC}^p C^q, \quad 0 \leq p, q \leq M, \quad (6)$$

koja predstavlja sistem od $(M+1)^2$ jednačina. Za očekivati je da funkcija $P(S_{SC}, C)$ većeg reda bolje aproksimira funkciju $f(S_{SC}, C)$. Ipak, zbog jednostavnosti, prednost će dobiti polinom prvog reda i biće zadržan ukoliko se njime obezbijedi adekvatna tačnost:

$$P^{(1)}(S_{SC}, C) = \sum_{m=0}^1 \sum_{n=0}^1 a_{mn} S_{SC}^m C^n = a_{00} + a_{01}C + a_{10}S_{SC} + a_{11}S_{SC}C. \quad (7)$$

Rješavajući sistem jednačina (6), dobijaju se koeficijenti polinoma P koji optimalno modeluje funkciju f :

$$\begin{aligned} a_{00} &= -0.7644 \\ a_{01} &= -1.966 \cdot 10^3 \\ a_{10} &= 1.893 \cdot 10^{-5} \\ a_{11} &= 3.124 \cdot 10^{-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Funkcija $g(S_{SC})$ će takođe biti modelovana polinomom prvog reda:

$$g(S_{SC}) = b_0 + b_1 S_{SC}. \quad (9)$$

Nepoznati koeficijenti polinoma b_0 i b_1 se mogu dobiti rješavanjem sistema linearnih jednačina:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & S_{SC}^{(1)} \\ 1 & S_{SC}^{(2)} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & S_{SC}^{(L)} \end{bmatrix}}_{\mathbf{X}} \underbrace{\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{b}} = \underbrace{\begin{bmatrix} THD_I^{(1)} - f(S_{SC}^{(1)}, C^{(1)})N_{PC}^{(1)} \\ THD_I^{(2)} - f(S_{SC}^{(2)}, C^{(2)})N_{PC}^{(2)} \\ \vdots \\ THD_I^{(L)} - f(S_{SC}^{(L)}, C^{(L)})N_{PC}^{(L)} \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}}. \quad (10)$$

U sistemu jednačina (10), vrijednosti faktora $THD_1^{(1)}$, $THD_1^{(2)}$, ... $THD_1^{(L)}$ se uzimaju sa krivih datih na Slici 1. Svaka od ovih THD_1 vrijednosti je određena sa tri parametra ($N_{PC}^{(l)}$, $S_{SC}^{(l)}$, $C^{(l)}$, $l=1,2,...,L$). Iako je jednačina (10) sistem sa dvije nepoznate, za čije rješavanje bi bile potrebne dvije tačke ($L=2$), radi bolje tačnosti estimacije, uzet je veći broj tačaka. U tom slučaju (za $L>2$), sistem postaje predimenzionisan i korišćenjem metode najmanjih kvadrata može biti riješen na sljedeći način:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (11)$$

U ovom radu, uzeto je $L=4$, pa izračunati koeficijenti iznose:

$$\begin{aligned} b_0 &= 94.151 \\ b_1 &= 1.539 \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (12)$$

Za estimaciju, tj. modelovanje tačke saturacije N_{PC}^{sat} , može se primijeniti identična procedura kao za slučaj modelovanja funkcije nagiba $f(S_{SC}, C)$. Zadržavajući polinom prvog reda, dobija se:

$$N_{PC}^{sat}(S_{SC}, C) \approx c_{00} + c_{01}C + c_{10}S_{SC} + c_{11}S_{SC}C. \quad (13)$$

Rješavanjem sistema jednačina (6), sa vrijednostima $N_{PC}^{sat}(S_{SC}, C)$ umjesto $f(S_{SC}, C)$, dobijaju se nepoznati koeficijenti:

$$\begin{aligned} c_{00} &= 73.606 \\ c_{01} &= -1.232 \cdot 10^5 \\ c_{10} &= 5.342 \cdot 10^{-3} \\ c_{11} &= 14.234. \end{aligned} \quad (14)$$

Finalni oblik THD_1 modela je dat relacijom:

$$\begin{aligned} THD_1(N_{PC}, S_{SC}, C) = & \begin{cases} (-0.7644 - 1.966 \cdot 10^{-3}C + 1.893 \cdot 10^{-5}S_{SC} + 3.124 \cdot 10^{-7}S_{SC}C)N_{PC} \\ + 1.539 \cdot 10^{-3}S_{SC} + 94.151, & \text{za } N_{PC} < N_{PC}^{sat}(S_{SC}, C), \\ THD_1^{sat}(N_{PC}, S_{SC}, C), & \text{za } N_{PC} \geq N_{PC}^{sat}(S_{SC}, C), \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

gdje se

$$\begin{aligned} THD_1^{sat}(N_{PC}, S_{SC}, C) = & 37.887 - 5.054 \cdot 10^{-2}C - 1.151 \cdot 10^{-3}S_{SC} - 7.175 \cdot 10^{-7}S_{SC}C \\ & + 2.422 \cdot 10^{-4}C^2 + 1.011 \cdot 10^{-7}S_{SC}^2 - 6.646 \cdot 10^{-8}S_{SC}C^2 \\ & + 1.938 \cdot 10^{-9}S_{SC}^2C + 4.446 \cdot 10^{-12}S_{SC}^2C^2. \end{aligned} \quad (16)$$

dobija uvrštavanjem tačke saturacije u jednačini (13) u dobijeni THD_1 model za linearni dio (gornja relacija u jednačini (15)). Model je primjenjiv za proizvoljnu veličinu klastera.

5. VERIFIKACIJA TAČNOSTI MODELA

U cilju provjere validnosti predloženog THD_1 modela, izračunate su srednje kvadratne greške modela (RMSE), za vrijednosti S_{SC} i C datih u Tabeli I. Maksimalna vrijednost RMSE iznosi 3.16%, što je sasvim prihvatljivo.

Tabela I: RMSE za konstantne S_{SC} i C vrijednosti

S_{SC} [kVA] \ C [μF]	235	340	410	500
3000	2.87	1.88	2.19	2.49
4000	0.94	1.79	2.11	2.77
5000	1.55	2.36	2.47	3.12
6000	1.52	1.06	1.69	3.16

Za vrijednosti S_{SC} i C utvrđenih pri mjerenjima u banci (vidjeti poglavlje 4.2), korišćenjem predloženog modela jednačina (15) dobijaju se THD_1 vrijednosti: 45.35%, 47.51% i 46.97%, po fazi, što je veoma blisko izmjerenim vrijednostima. Mala odstupanja koja postoje su posljedica prisustva dodatnog ne-računarskog opterećenja na sabirnicama u banci.

6. ZAKLJUČAK

U radu je razmatran karakter faktora THD_1 usljed jednovremenog rada grupe računara i prikazan model za njegov proračun. Konstatovano je da zakonitost promjene THD_1 faktora nije uniformna u ukupnom opsegu posmatrane grupe računara, već se jasno izdvajaju dvije oblasti. Razvijeni model predstavlja znatno unaprijeđeno rješenje, u odnosu na slične modele koji postoje u literaturi i obuhvata uticaj najznačajnijih parametara, kako sa strane elektrodistributivne mreže, tako i sa strane konstrukcije izvedbe računara. Model je razvijen korištenjem metode najmanjih kvadrata. Jednostavan je za upotrebu i naročito primjenjiv u inženjerskoj praksi.

LITERATURA

- [1] V. Katić: Kvalitet električne energije – viši harmonici, Edicija: Monografije, Br.6, *Fakultet tehničkih nauka*, Novi Sad, 2002.
- [2] J. Arrillaga, N. R. Watson, S. Chen: Power System Quality Assessment, *John Wiley*, Chichester, U.K., 2000.
- [3] V. Katić: Istraživanje viših harmonika u distributivnoj mreži – kratak pregled i iskustva, *Elektroprivreda*, God.54, Br.3, Jul-Sep.2001, pp.72-79.
- [4] S. Mujović, V. A. Katić, Z. Čorba, J. Radović: Mjerenje i analiza uticaja rada računarskog centra na nivo viših harmonika u mreži, *Elektroprivreda*, Br. 4, Oktobar-Decembar 2009, pp. 67-81.
- [5] V. Katić, B. Dumnić, S. Mujović, J. Radović: Effects of Low Power Electronics & Computer Equipment on Power Quality at Distribution Grid – Measurements and Forecast, *In Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology-ICIT*, Tunis, Vol. 2, 8-10 December, 2004, pp. 585-589.
- [6] IEEE Standard 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, *IEEE Press*, New York, 1993.
- [7] IEC 61000-3-2 Standard: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A per Phase), 2002.

- [8] S. Mujović, V. A. Katić, J. Radović: Improved Analytical Expression for Calculating Total Harmonic Distortion of PC Clusters, *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1317-1324, 2011.
- [9] V. A. Katić, S. V. Mujović, V. M. Radulović, J. S. Radović: The Impact of the Load Side Parameters on PC Cluster's Harmonics Emission, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 103-110, 2011.
- [10] EN 50160 Standard: Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems, *CENELEC*, 2004.
- [11] C.-J. Wu, C.-H. Hu, C.-C. Yin, C.-C. Chiu: Application of Regression Models to Predict Harmonic Voltage and Current Growth Trend from Measurement Data at Secondary Substations, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1998, Vol.13, no. 3, pp. 793-798.
- [12] R. A. J. Khan, M. Akmal: Mathematical Modeling of Current Harmonics Caused by Personal Computers, *In Proc. of the World Academy of Science, Eng. and Technology*, 2008, 39, pp. 325-329.
- [13] IEC Standard 61000-4-7: General Guide on Harmonics and Inter-harmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Connected Equipment, *IEC*, 2002.

BIOGRAFIJA

Saša Mujović je rođen u Kotoru 1978. godine. Elektrotehnički fakultet u Podgorici je završio 2001. Magistrirao je i doktorirao na istom fakultetu, 2004. i 2010., respektivno. Trenutno se nalazi u zvanju docent na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici. Član je IEEE organizacije i crnogorskog CIGRE komiteta. Oblast njegovog istraživanja su: elektrodistributivni sistemi, kvalitet električne energije i distribuirana potrošnja.

Slobodan Đukanović je rođen u Valjevu 1976. godine. Elektrotehnički fakultet u Podgorici je završio 2001. Magistrirao je i doktorirao na istom fakultetu, 2004. i 2008. godine, respektivno. Trenutno se nalazi u zvanju docenta na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici. Oblasti njegovog istraživanja su vremensko-frekvencijska obrada signala, uklanjanje ometača, parametarska estimacija.