

# Novi algoritam za estimaciju parametara signala u EES-u baziran na Pronijevoj metodi

Dimitrije Rozgić, Predrag Petrović

**Apstrakt**—U radu je prikazan novi algoritam za estimaciju parametara osnovnog harmonika napona ili struje (amplitude, kružne frekvencije i faze) u elektroenergetskom sistemu, baziran na Pronijevoj metodi. Poboljšanje performansi predloženog algoritma ostvareno je primenom posebno dizajniranog DFT filtra i ZC metode. DFT filtrom se izdvajaju odbirci osnovnog harmonika procesiranog ulaznog signala, dok se ZC metodom poboljšava selektivnost DFT filtra.

**Ključne reči**— Estimacija parametara signala, Pronijeva metoda, DFT-Diskretna Furijeova transformacija, ZC-Metoda prolaska kroz nulu.

## I. UVOD

U poslednjim decenijama sistemi za relejnu zaštitu, upravljanje i nadzor u EES-u pretrpeli su krupne tehnološke i konceptijske promene. Klasični i kroz praksu potvrđeni sistemi, bazirani su na primeni elektromehaničkih i statičkih releja, analognih mernih instrumenata, tastera i niskonaponskih prekidača [1, 2]. Savremeni sistemi za zaštitu su, nasuprot njima, zasnovani na primeni mikroprocesora i digitalnoj obradi signala. Za upravljanje i nadzor se najčešće koristi SCADA sistem (*Supervisory Control and data Acquisition*) [1, 2]. Procena stanja (*State estimation*) EES-a je jedna od najvažnijih *on-line* aktivnosti koje treba sprovesti u procesu rada SCADA sistema. Zadatak estimatora stanja jeste određivanje nepoznatih vrednosti promenljivih stanja (određivanje vrednosti fazora napona) na osnovu modela mreže, uz upotrebu nekog od poznatih algoritama za procenu, npr. WLS (*Weighted Least-Squares*), Kalman-ovih filtara, proširenih Kalman-ovih filtara zasnovanih na redundantnom merenju u samom EES-u [3]. Intenzivan razvoj telekomunikacionih tehnika, informacionih tehnologija i uređaja za sinhrono merenje fazora-PMU (*Phasor Measurement Unit*), doveli su do daljeg razvoja i usavršavanja sistema za zaštitu, upravljanje i nadzor EES-a. PMU uređaji su u stanju da izvrše estimaciju parametra unapred definisanog modela signala u vremenskom domenu. Ugradnjom PMU uređaja u određene čvorove EES-a realizuju se direktna merenja fazora napona i struja grana koje su povezane sa tim čvorom. Koristeći fazorska merenja zajedno sa klasičnim SCADA merenjima, algoritmi za estimaciju stanja postaju precizniji i brži. Primenom PMU uređaja moguće je ostvariti adaptivnu relejnu zaštitu, što je svakako još jedan benefit takvog koncepta merenja. [4].

Dimitrije Rozgić – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: dimitrije.rozagic@ftn.kg.ac.rs).

Predrag Petrović – Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: predrag.petrovic@ftn.kg.ac.rs).

PMU uređaji estimiraju parametre usvojenog modela sinhrofazora i njegovu frekvenciju na osnovu nekog od algoritama. Estimacioni algoritam treba da, sa jedne strane, ponudi dovoljnu tačnost u procesu procene nepoznatih parametara, a sa druge strane mora biti i dovoljno brz. Upravo ova dva, često oprečna zahteva, nameću potrebu za razvojem novih algoritama i usavršavanjem postojećih. DFT (*Diskretna Furijeova Transformacija*) metoda se najčešće koristi u PMU uređajima i digitalnoj relejnoj zaštiti.

Sve veća integracija obnovljivih izvora energije u EES, čija je snaga često nekontrolabilna (vetroelektrane, protočne hidroelektrane, fotonaponska postrojenja), otežava održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje. Ovaj disbalans direktno se odražava na frekvenciju na kojoj sistem radi. Zbog odstupanja frekvencije od nazivne vrednosti, dolazi do pojave greške u obračunu efektivne vrednosti DFT metodom. Naime, DFT zahteva da količnik periode merenog signala i periode odabiranja bude ceo broj, kako bi obračun bio tačan, što je nemoguće obezbediti u uslovima kada noseća frekvencija procesiranog signala varira. Ova pojava je poznata kao efekat spektralnog curenja (*leakage*). Iz ovog razloga potrebno je ostvariti što tačnije merenje frekvencije procesiranog signala i po mogućstvu prilagođavanje periode odabiranja stvarnoj frekvenciji procesiranog signala-metoda merenja mora biti adaptivna.

U uslovima kratkog spoja u EES-u, struja kvara pored osnovog harmonika sadrži i više harmonike, kao i opadajuću jednosmernu komponentu. Pored toga, dolazi i do promene frekvencije, što sve zajedno dovodi do akumulacije značajne greške u uslovima primene DFT metode.

Pored napred navedenog, sve veće prisustvo nelinearnih potrošača u sistemu dovodi do dodatnog izbličenja talasnog oblika napona u EES-u, generišući više harmonijske komponente procesiranog signala. Na taj način, povećava se red modela signala kojim se opisuje estimirani signal. Ukoliko i frekvencija takvog signala nije poznata, problem koji u procesu estimacije treba rešiti postaje nelinearan, vrlo zahtevan za rešavanje i vremenski dugotrajan.

U radu [5] je prikazan algoritam za merenje frekvencije baziran na digitalnom DFT filtru i Pronijevoj (*Prony*) metodi. Zbog odstupanja frekvencije od pretpostavljene vrednosti, DFT filtar daje izobličen signal, što dovodi do neslaganja sa pretpostavljenim modelom (koji je zasnovan na samo jednoj sinusnoj komponenti), a time i značajne greške Pronijeve metode. Da bi se umanjio *leakage* efekat, autori su koristili dodatne prozorske funkcije (*window functions*).

U [6] je predložen algoritam merenja frekvencije koji pored digitalnog DFT filtra, za merenje noseće frekvencije koristi tehniku ZC (*zero-crossing*) uz linearizaciju signala u okolini prolaska kroz nulu. ZC tehnika se pri tome primenjuje na filtrirane odbirke.

U [7, 8] je predstavljen algoritam za merenje frekvencije zasnovan na digitalnom DFT filtru, Njutn-Rapsonovoj metodi

i estimaciji frekvencije na osnovu određivanja trenutka u kome procesirani signal prolazi kroz nulu. ZC se primenjuje na odbirke signala, kako bi se što tačnije odredila početna procena za Njutn-Rapsonovu metodu i umanjio *leakage* efekat kod primene DFT filtra. Njutn- Rapsonova metoda se primenjuje na inicijalno filtrirane odbirke.

U ovom radu prikazan je algoritam za estimaciju frekvencije, amplitude i početne faze osnovnog harmonika signala napona (struje). Polazeći od pretpostavke da je noseća frekvencija unapred nepoznata, posmatran esimacioni problem je nelinearan, a upravo je Pronijeva metoda efikasna u takvim radnim uslovima. Za filtriranje odmeraka procesiranih signala korišćen je digitalni DFT filtar, a inicijalna estimacija frekvencije je izvršena ZC tehnikom. Zbog boljeg razumevanja predloženog koncepta, u radu je na koncizan način prikazana i sama Pronijeva metoda. Rezultati su upoređeni sa rezultatima u radovima [7, 8].

## II. PRONIJEVA METODA

Pretpostavićemo da je naponski signala, koji je predmet obrade, oblika:

$$v(t) = \sum_{i=1}^M V_i \cos(i\omega t + \varphi_i) \quad (1)$$

Pri čemu je:

$v(t)$  - trenutna vrednost napona

$M$  - najviši red harmonika u signalu napona (red modela signala)

$\omega$  - kružna učestanost osnovnog harmonika

$V_i$  - amplituda  $i$ -tog harmonika

$\varphi_i$  - početna faza  $i$ -tog harmonika

Koristeći Ojlerovu formulu

$$\cos x = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2} \quad (2)$$

model signala (1) se može zapisati u sledeće obliku:

$$v(t) = \sum_{i=1}^{2M} B_i e^{j\omega_i t} \quad (3)$$

Označimo ulazni-stvarni signal sa  $y(t)$ , i izvršimo njegovo odmeravanje-semplovanje u ekvidistantnim vremenskim trenucima  $T, 2T, \dots, NT$ , pri čemu je  $T$  perioda odabiranja. Na taj način dolazi se do vektora odbiraka  $Y = (y[1], y[2], \dots, y[N])$  gde je  $y[k]$ -odbirak signala u trenutku  $k \cdot T$ , tj.  $y[k] = y(kT)$ .

Analogno gore uvedenom načinu zapisivanja, vrednosti modela signala u ekvidistantnim vremenskim trenucima su definisane kao:

$$v(kT) = \sum_{i=1}^{2M} B_i e^{j\omega_i kT} = \sum_{i=1}^{2M} B_i z_i^k \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

Cilj estimacije je određivanje vrednosti nepoznatih parametara  $B_i, z_i$ , kako bi greška između stvarnog signala i modela signala bila što je moguće manja, tj. minimizacija sledeće funkcije:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sqrt{(y(kT) - v(kT))^2} \quad (5)$$

Sušтина Pronijeve metode je u transformaciji ovog nelinearnog problema u linearan. Pronijeva metoda može biti optimizaciona i neoptimizaciona. Kod neoptimizacione

metode broj odbiraka je tačno jednak broju nepoznatih u predpostavljenom modelu signala.

U ovom radu se predlaže primena optimizacione metode, kojom se dobija optimalnana procena nepoznatih parametara procesiranog signala. Da bi se mogao izvršiti proračun, potrebno je da broj odbiraka signala bude veći od broja nepoznatih u predpostavljenom modelu signala. Na taj način, optimalna procena se dobija iz preodređenog sistema jednačina:

$$\begin{aligned} \underline{B}_1 z_1 + \underline{B}_2 z_2 + \dots + \underline{B}_{2M} z_{2M} &= y[1] \\ \underline{B}_1 z_1^2 + \underline{B}_2 z_2^2 + \dots + \underline{B}_{2M} z_{2M}^2 &= y[2] \\ &\vdots \\ \underline{B}_1 z_1^N + \underline{B}_2 z_2^N + \dots + \underline{B}_{2M} z_{2M}^N &= y[N] \end{aligned} \quad (6)$$

U ovako preodređenom sistemu poznat je samo vektor odbiraka ulaznog signala  $Y$ , a nepoznate su  $\underline{B}_i, z_i, i=1, 2, \dots, 2M$ .

Sistem (6) se može zapisati u matricnom obliku kao:

$$\underline{B} \cdot \underline{Z} = Y \quad (7)$$

Osnovna ideja Pronijeve metode je formiranje polinoma reda  $2M$  čiji su koreni  $z_1, z_2, \dots, z_{2M}$

$$P(z) = (z - z_1) \cdot (z - z_2) + \dots + (z - z_{2M}) \quad (8)$$

Koristeći osnovni stav algebre polinom  $P(z)$  se može zapisati na sledeći način:

$$P(z) = z^{2M} + a_{2M} z^{2M-1} + a_{2M-1} z^{2M-2} + \dots + a_1 \quad (9)$$

Sledeći korak u ovde predloženom algoritmu je formiranje vektora  $H_k$  oblika:

$$\begin{aligned} H_1 &= (a_1, a_2, \dots, a_{2M-1}, a_{2M}, 1, 0, 0, \dots, 0)_{1 \times N} \\ H_2 &= (0, a_1, a_2, \dots, a_{2M-1}, a_{2M}, 1, 0, \dots, 0)_{1 \times N} \\ &\vdots \\ H_{N-2M} &= (0, 0, \dots, a_1, a_2, \dots, a_{2M-1}, a_{2M}, 1)_{1 \times N} \end{aligned} \quad (10)$$

Množeći sistem (7) sa vektorima  $H_k$  dolazimo do sistema jednačina, koji se može zapisati na sledeći način:

$$H_k \cdot \underline{B} \cdot \underline{Z} = H_k \cdot Y \quad (11)$$

pri čemu je  $k=1, 2, \dots, N-2M$ . Kako je pri tome  $P(z_i) = 0$  za  $i=1, 2, \dots, 2M$ , dobija se preodređen sistem linearnih jednačina po nepoznatim  $a_{2M}, a_{2M-1}, \dots, a_1$ :

$$\begin{aligned} -y[2M+1] &= a_1 \cdot y[1] + a_2 \cdot y[2] + \dots + a_{2M} \cdot y[2M] \\ -y[2M+2] &= a_1 \cdot y[2] + a_2 \cdot y[3] + \dots + a_{2M} \cdot y[2M+1] \\ &\vdots \\ -y[N] &= a_1 \cdot y[N-2M] + a_2 \cdot y[N-2M+1] + \dots + a_{2M} \cdot y[N-1] \end{aligned} \quad (12)$$

Sistem (12) se može rešiti metodom najmanjih kvadrata. Na osnovu svega izloženog u ovoj sekciji rada, algoritam u predloženoj Pronijevoj metodi se može svesti na sledeće korake:

- Rešavanje sistema jednačina (12) metodom najmanjih kvadrata, čime se dolazi do koeficijenata polinoma (9)  $a_{2M}, a_{2M-1}, \dots, a_1$ ;
- Određivanje korena polinoma (9)  $z_1, z_2, \dots, z_{2M}$ , kako bi se izračunale frekvencije osnovnog i viših harmonika  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$  ulaznog, procesiranog signala
- Rešavanje sistema jednačina (7) metodom najmanjih kvadrata, na osnovu čega se određuju

amplituda i početna faza osnovnog i viših harmonika  $A_1, \varphi_1; A_2, \varphi_2; \dots A_M, \varphi_M$ .

### III. DIGITALNO FILTRIRANJE

Preciznost i brzina algoritma baziranog na Pronijevoj metodi zavisi od reda modela signala, učestanosti odabiranja i dužine prozora podataka. Ukoliko red modela nije dobro odabran metoda neće dati tačne rezultate. Povećanjem reda modela, učestanosti odabiranja i dužine prozora podataka, produžava se potrebno procesorsko vreme za izvršenje algoritma.

Filtriranjem ulaznog signala eliminišu se neželjeni harmonici i umanjuje uticaj slučajnog šuma, iz kog razloga se u predloženoj metodi obrade koristi DFT filtar. U prvom koraku, koeficijenti filtra su izračunati predpostavljajući nazivnu frekvenciju ulaznog signala. Ukoliko bi pretpostavka bila tačna, filtrirani odbirci bi pripadali samo prostoperiodičnom signalu. Zbog odstupanja frekvencije od nazivne, filtrirani odbirci pripadaju složenoperiodičnom signalu (izobličen signal), gde stepen izobličenja direktno zavisi od odstupanja frekvencije. Važna osobina DFT filtra je da zadržava frekvenciju ulaznog, procesiranog signala, što praktično znači da ako frekvencija ulaznog signala  $f$  odstupa od nazivne, filtriranjem se dobija složenoperiodični signal frekvencije  $f$ . Da bi se povećala preciznost opisanog algoritma koristi se i ZC metoda. Njenom primenom prati se znak filtriranih odbiraka da bi se odredio broj odbiraka koji pripadaju periodi filtriranog signala. Sa tako određenim brojem filtriranih odbiraka, ulazni signal se još jednom filtrira. Matematički model primenjenog DFT filtra je:

$$y_{fil}[l] = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y[k+l] \cos\left(k \frac{2\pi}{N}\right) \quad l=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

gde je:

$y_{fil}[l]$  -  $l$ -ti filtrirani odbirak signala napona ili struje

$y[k+l]$  - odbirak ulaznog signala u vremenskom

trenutku  $(k+l)T$

$T$  -perioda odabiranja

$N$  - broj odbiraka signala u (predpostavljenoj) periodi signala

### IV. PREDLOŽENI ALGORITAM

Filtrirani odbirci ulaznog signala se mogu prikazati kao:

$$v(t) = V \cos(\omega t + \varphi) \quad (14)$$

Koristeći model definisan sa (3) na filtrirane odbirke ulaznog signala, dovodi nas do zapisa oblika:

$$v(t) = \sum_{i=1}^2 \underline{B}_i e^{j\omega_i t} \quad (15)$$

Sistem (6) u ovom slučaju postaje oblika:

$$\begin{aligned} \underline{B}_1 \underline{z}_1 + \underline{B}_2 \underline{z}_2 &= y_{fil}[1] \\ \underline{B}_1 \underline{z}_1^2 + \underline{B}_2 \underline{z}_2^2 &= y_{fil}[2] \\ &\vdots \\ \underline{B}_1 \underline{z}_1^N + \underline{B}_2 \underline{z}_2^N &= y_{fil}[N] \end{aligned} \quad (16)$$

dok je odgovarajući polinom  $P(z)$  (8) drugog reda:

$$P(z) = (z - \underline{z}_1) \cdot (z - \underline{z}_2) = z^2 + a_2 z + a_1 \quad (17)$$

Na osnovu Vijetovih pravila, zaključujemo da je:

$$\begin{aligned} a_1 &= \underline{z}_1 \underline{z}_2 = e^{j\omega T} e^{-j\omega T} = 1 \\ a_2 &= a = -(\underline{z}_1 + \underline{z}_2) = -(e^{j\omega T} + e^{-j\omega T}) \\ a &= -2 \cos \omega T \end{aligned} \quad (18)$$

Iz (18) je jasno da za estimaciju frekvencije treba odrediti samo jedan koeficijent polinoma (17).

Vektori  $H_k$  (10) su u ovoj situaciji oblika:

$$\begin{aligned} H_1 &= (1, a, 1, 0, 0, \dots, 0)_{1 \times N} \\ H_2 &= (0, 1, a, 1, 0, \dots, 0)_{1 \times N} \\ &\vdots \\ H_{N-2} &= (0, 0, \dots, 1, a, 1)_{1 \times N} \end{aligned} \quad (19)$$

pri čemu je  $k=1, 2, \dots, N-2$ . Kako je  $P(\underline{z}_i) = 0, i=1, 2$ , dobija se preodređen sistem linearnih jednačina sa nepoznatom  $a$ .

$$\begin{aligned} y_{fil}[1] + y_{fil}[3] &= -a \cdot y_{fil}[2] \\ y_{fil}[2] + y_{fil}[4] &= -a \cdot y_{fil}[3] \\ &\vdots \\ y_{fil}[N-2] + y_{fil}[N] &= -a \cdot y_{fil}[N-1] \end{aligned} \quad (20)$$

Rešenje sistema (20) je oblika:

$$-a = \frac{\sum_{i=2}^{N-1} (y_{fil}[i-1] + y_{fil}[i+1])^2}{\sum_{i=2}^{N-1} y_{fil}[i] \cdot (y_{fil}[i-1] + y_{fil}[i+1])} \quad (21)$$

ili

$$-a = \frac{\sum_{i=2}^{N-1} y_{fil}[i] \cdot (y_{fil}[i-1] + y_{fil}[i+1])}{\sum_{i=2}^{N-1} y_{fil}[i]^2} \quad (22)$$

Na osnovu (21) ili (22) i (18) dobija se kružna frekvencija osnovnog harmonika:

$$\omega = \frac{1}{T} \arccos \frac{\sum_{i=2}^{N-1} (y_{fil}[i-1] + y_{fil}[i+1])^2}{2 \cdot \sum_{i=2}^{N-1} y_{fil}[i] \cdot (y_{fil}[i-1] + y_{fil}[i+1])} \quad (23)$$

Kako bi se izvršila estimacija nepoznate amplitude i početne faze u [9] se za rešavanje sistema opisanog sa (16), predlaže metoda najmanjih kvadrata. Kako je sistem kompleksan, njegovo rešavanje je samo po sebi procesorski zahtevno. Sistem (16) je formiran na osnovu (15), a kako su izrazi (14) i (15) međusobno ekvivalentni, pogodnije je i računski jednostavnije, rešavati sledeći sistem jednačina:

$$\begin{aligned} V_C \cos \omega T + V_S \sin \omega T &= y_{fil}[T] \\ V_C \cos 2\omega T + V_S \sin 2\omega T &= y_{fil}[2T] \\ &\vdots \\ V_C \cos N\omega T + V_S \sin N\omega T &= y_{fil}[NT] \end{aligned} \quad (24)$$

Ovako definisan preodređen sistem jednačina (24), rešava se metodom najmanjih kvadrata.

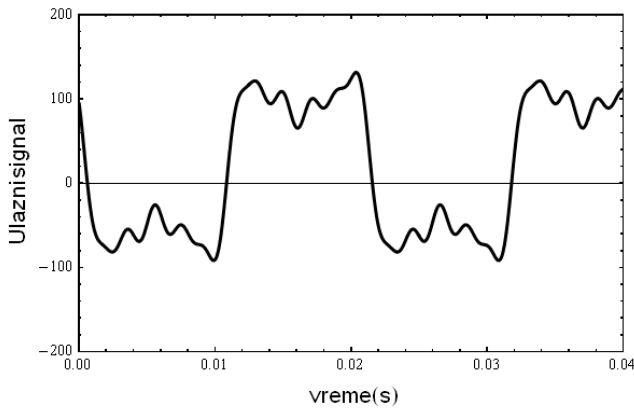
Ovde predložen algoritam za estimaciju je testiran na ulaznom signalu oblika, Slika 1:

$$y(t) = 100 \cos(300t + \frac{4\pi}{9}) + 50 \cos(900t + \frac{\pi}{3}) + 20 \cos(1500t + \frac{\pi}{4}) + 15 \cos(2100t + \frac{\pi}{5}) + 10 \cos(3300t + \frac{\pi}{6}) + 20 + e(t) \quad (25)$$

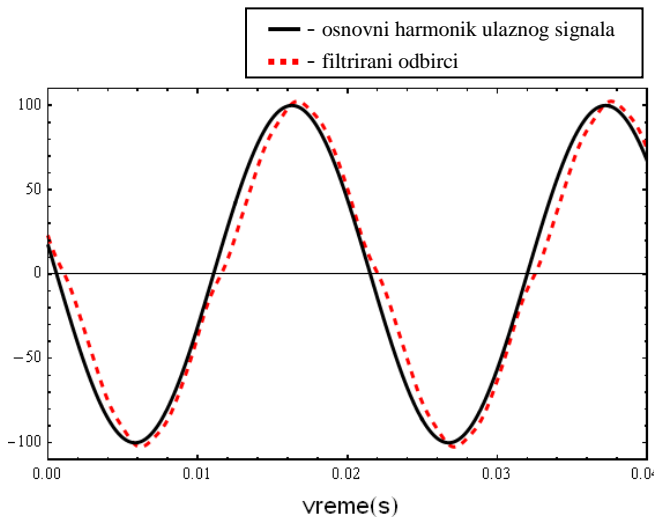
gde je  $e(t)$  aditivni signal šuma (beli šum). Nivo šuma u odnosu na korisni signal određen je kao odnos signal-šum (*signal to noise ratio*), i meri se u dB (decibelima):

$$SNR = 20 \log \frac{A}{\sqrt{2}\sigma} \quad (26)$$

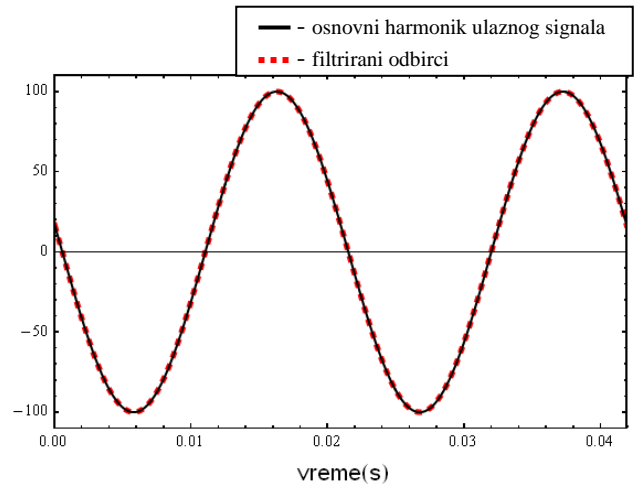
gde je: SNR - odnos signal-šum,  $A$  - amplituda osnovnog harmonika procesiranog signala,  $\sigma$  - standardno odstupanje šuma [10]. Frekvencija odabiranja posmatranog signala je setovana na vrednost od  $f_s = 40 \text{ kHz}$ .



Sl. 1. Vremenski oblik ulaznog signala definisanog sa (25)



Sl. 2 Vremenski oblici osnovnog harmonika ulaznog signala (25) i signala čiji je oblik rekonstruisan na osnovu odbiraka ulaznog signala nakon filtriranja. Koeficijenti DFT filtra su izračunati pretpostavljajući nazivnu frekvenciju 50Hz



Sl. 3. Vremenski oblici osnovnog harmonika ulaznog signala (25) i signala čiji je oblik rekonstruisan na osnovu odbiraka ulaznog signala nakon drugog filtriranja. Koeficijenti DFT filtra su korigovani pomoću ZC metode.

Predloženi algoritam je testiran na uzorku od dvadeset generisanih signala. Rezultati su upoređeni sa rezultatima algoritama baziranih na primeni Njutn-Rapsonove metode [7, 8]. Računate su srednje vrednosti i standardno odstupanje: kružne frekvencije  $\bar{\omega}_1$ ,  $\sigma_{\omega_1}$ , amplitude  $\bar{A}_1$ ,  $\sigma_{A_1}$  i početne faze  $\bar{\varphi}_1$ ,  $\sigma_{\varphi_1}$  osnovnog harmonika na datom uzorku od 20 signala. Rezultati komparacije su prikazani u Tabelama I - III.

TABELA I  
SREDNJA VREDNOST I STANDARDNO ODSTUPANJE MERENJA KRUŽNE FREKVENCIJJE NA UZORKU OD 20 MERENJA. TAČNA VREDNOST JE  $\omega_1 = 300 \text{ rad / s}$

SNR	Predloženi algoritam		Algoritam baziran na Njutn-Rapsonovoj metodi [7, 8]	
	$\bar{\omega}_1$	$\sigma_{\omega_1}$	$\bar{\omega}_1$	$\sigma_{\omega_1}$
60	299,999	0,00554	299,978	0,00281
50	299,996	0,01266	299,975	0,00668
40	300,006	0,03920	299,979	0,00710
30	300,032	0,12380	299,958	0,06940

TABELA II  
SREDNJA VREDNOST I STANDARDNO ODSTUPANJE MERENJA AMPLITUDE NA UZORKU OD 20 MERENJA. TAČNA VREDNOST JE  $A_1 = 100$

SNR	Predloženi algoritam		Algoritam baziran na Njutn-Rapsonovoj metodi [7, 8]	
	$\bar{A}_1$	$\sigma_{A_1}$	$\bar{A}_1$	$\sigma_{A_1}$
60	100,011	0,00216	100,01012	0,00337
50	100,010	0,01069	100,00821	0,00733
40	100,000	0,02513	100,01242	0,00928
30	100,017	0,07090	99,98293	0,09503

TABELA III  
SREDNJA VREDNOST I STANDARDNO ODSTUPANJE MERENJA KRUŽNE  
FREKVENCije NA UZORKU OD 20 MERENJA. TAČNA VREDNOST JE  
 $\varphi_1 = 1,39626 \text{ rad}$

SNR	Predloženi algoritam		Algoritam baziran na Njtn-Rapsonovoj metodi [7,8]	
	$\overline{\varphi_1}$	$\sigma_{\varphi_1}$	$\overline{\varphi_1}$	$\sigma_{\varphi_1}$
60	1,39715	0,00006	1,39739	0,00004
50	1,39718	0,00018	1,39743	0,00011
40	1,39702	0,00052	1,39736	0,00009
30	1,39682	0,00174	1,39740	0,00110

Iz tabela I–III može se uočiti da je standardno odstupanje dobijeno predloženim algoritmom, za sva četiri nivoa šuma, u najvećem broju slučajeva, veće od odgovarajućeg standardnog odstupanja dobijenog referentnim Njtn-Rapsonovim algoritmom. Ovo ukazuje da je predloženi algoritam osetljiviji na slučajni šum od NR algoritma, ali je sa druge strane značajno manje procesorski zahtevan (iziskuje manje flopsa za realizaciju) i jednostavniji za implementaciju, odnosno može se postaviti praktično na svaku hardversku platformu.

## V. ZAKLJUČAK

Dobro je poznata činjenica da su algoritmi za određivanje parametara signala u uslovima nenominalne frekvencije (*off-nominal frequency*) dosta kompleksni i spori, vremenski zahtevni. Ovde predložena Pronijeva metoda nudi mogućnost ubrzanja i poboljšanja performansi postojećih algoritama za estimaciju, uz modifikaciju koja je bazirana na adaptivnom filtriranju procesiranog signala napona ili struje. Potvrđena je visoka preciznost predložene estimacione procedure, čime ona postaje dobar kandidat za primenu u savremenim digitalnim mernim i zaštitnim uređajima u EES-u.

## LITERATURA

- [1] Jovan Nahman, Vladica Mijailović, Razvodna postrojenja, Akademski misao, Beograd 2015
- [2] Milenko Đurić, Visokonaponska Postrojenja, Beopres, Beograd 2009
- [3] S. Sarri, M. Paolone, R. Cherkaoui, A. Borghetti, F. Napolitano and C. A. Nucci, "State estimation of Active Distribution Networks: Comparison between WLS and iterated kalman-filter algorithm integrating PMUs," 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, 2012, pp. 1-8, doi: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465871.
- [4] V. Terzija et al., "Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks," in Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 80-93, Jan. 2011, doi: 10.1109/JPROC.2010.2060450.
- [5] T. Lobos and J. Rezmer, "Real-time determination of power system frequency," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, no. 4, pp. 877-881, Aug. 1997, doi: 10.1109/19.650792
- [6] Milenko B. Djurić, Zeljko Djuric, "Frequency measurement of distorted signals using Fourier and zero crossing techniques", August 2008, Electric Power Systems Research 78(8):1407-1415, DOI: 10.1016/j.epr.2008.01.008
- [7] P. B. Petrović and D. Rozgić, "Computational effective modified Newton–Raphson algorithm for power harmonics parameters estimation," in *IET Signal Processing*, vol. 12, no. 5, pp. 590-598, 7 2018, doi: 10.1049/iet-spr.2017.0573.
- [8] P. B. Petrović and D. Rozgić, "Power Harmonics Measurements Based on Modified Newton-Raphson Procedure," IEEE EUROCON 2019 -

- 18th International Conference on Smart Technologies, Novi Sad, Serbia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/EUROCON.2019.8861625.
- [9] Claudius Orbandt, Cezary Dzienis, Robert Matussek and Horst Schulte, Parameter Estimation in Electrical Power Systems Using Prony's Method, November 2015, Journal of Physics Conference Series 659:012013, DOI: 10.1088/1742-6596/659/1/012013
- [10] Milenko Đurić i ostali: Algoritmi za digitalne relejne zaštite, ETA, Beograd 2012
- [11] J. F. Hauer, C. J. Demeure and L. L. Scharf, "Initial results in Prony analysis of power system response signals," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 80-89, Feb. 1990, doi: 10.1109/59.49090.

## ABSTRACT

The paper presents a new algorithm for estimating the parameters of the fundamental harmonic of voltage or current (amplitude, angular frequency and phase) in the power system, based on the Prony's method. Improving the performance of the proposed algorithm was achieved by applying a specially designed DFT filter and ZC method. The DFT filter extracts the fundamental harmonic samples of the processed input signal, while the ZC improves the selectivity of the DFT filter.

## New algorithm for signal parameters estimation in electric utilities based on Prony's method

Dimitrije Rozgić, Predrag Petrović