Broj rada: R3-14
DOI:10.46793/CIRED2026.R3-14_258

ONLINE ESTIMACIJA ELEKTRIČNIH PARAMETARA TRONAMOTAJNOG ENERGETSKOG TRANSFORMATORA U VREMENSKOM DOMENU

ONLINE TIME-DOMAIN ESTIMATION OF ELECTRICAL PARAMETERS OF A THREE-WINDING POWER TRANSFORMER

Ognjen ALEKSIĆ*, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija
Zoran STOJANOVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija
Miloš MILOŠEVIĆ, MINS Elektro d.o.o., Republika Srbija
Nina LJUBOJA, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Republika Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Monitoring energetskih transformatora od ključne je važnosti za pouzdan i siguran rad elektroenergetskog sistema, s obzirom na to da kvarovi dovode do velikih poremećaja u mreži i finansijskih gubitaka usled neisporučene električne energije. U ovom radu prikazana je online metoda za određivanje električnih parametara tronamotajnog energetskog transformatora u vremenskom domenu, koja se zasniva na merenju napona i struja na priključcima transformatora i primeni metode najmanjih kvadrata. Na osnovu zamenske šeme tronamotajnog energetskog transformatora izvode se diferencijalne jednačine sa nepoznatim električnim parametrima, na koje se primenjuje metoda najmanjih kvadrata. U radu se takođe ispituje uticaj greške merenja strujnih i naponskih transformatora na tačnost procene električnih parametara. Estimirani parametri obuhvataju otpornost namotaja, otpornost u grani magnećenja, kao i induktivnosti rasipanja i magnećenja. Praćenjem promena estimiranih parametara u odnosu na njihove fabričke vrednosti moguće je uočiti potencijalno opasne promene ili kvarove unutar transformatora.

Ključne reči: električni parametri, estimacija, metoda najmanjih kvadrata, online monitoring, tronamotajni energetski transformator

ABSTRACT

Monitoring of power transformers is of crucial importance for the reliable and secure operation of the power system, since faults can lead to major network disturbances and financial losses due to undelivered electrical energy. This paper presents an online method for determining the electrical parameters of a three-winding power transformer in the time domain, based on measurements of voltages and currents at the transformer terminals and the application of the least squares method. Based on the equivalent circuit of the three-winding power transformer, differential equations with unknown electrical parameters are derived, to which the least squares method is applied. The paper also investigates the influence of measurement errors of current and voltage transformers on the accuracy of electrical parameter estimation. The estimated parameters include winding resistance, magnetizing branch resistance, as well as leakage and magnetizing inductances. By monitoring changes in the estimated parameters

* Ognjen Aleksić, aleksic@etf.rs

relative to their factory values, potentially dangerous changes or faults within the transformer can be detected.

Keywords: electrical parameters, estimation, least squares method, online monitoring, three-winding power transformer

1. UVOD

Metode za monitoring energetskih transformatora mogu se podeliti na *online* i *offline* metode. *Online* metode ne zahtevaju isključenje transformatora sa mreže i one se vrše dok je transformator u pogonu, što predstavlja njihovu glavnu prednost. Sa druge strane, *offline* metode ispituju transformator van pogona, ali njihovi rezultati su zbog toga detaljniji i precizniji. One mogu ukazati i na male promene i kvarove u transformatoru, kao što su oštećenja izolacije ili namotaja, koje *online* metode ne mogu uspešno detektovati. Neke od takvih *offline* metoda su ispitivanje otpornosti i kapacitivnosti izolacije, gasno-hromatografska analiza izolacionog ulja transformatora, SFRA analiza namotaja transformatora, kao i merenje impedanse kratkog spoja i praznog hoda. Najznačajnije *online* metode koje se koriste u praksi su praćenje temperature namotaja i jezgra, merenje parcijalnih pražnjenja, monitoring vibracija i akustičkih emisija.

U ovom radu prikazana je *online* metoda za monitoring tronamotajnih energetskih transformatora. Metoda se zasniva na estimaciji električnih parametara zamenske šeme transformatora na osnovu trenutnih vrednosti napona i struja na njegovim priključcima. Parametri koji se estimiraju su otpornosti i induktivnosti rasipanja svih namotaja, kao i otpornost i induktivnost u grani magnećenja. Praćenjem promena ovih parametara u odnosu na nominalne vrednosti, kao i poređenjem parametara u različitim fazama, moguće je pravovremeno uočiti potencijalne probleme i kvarove u transformatoru, bez potrebe za isključenjem transformatora sa mreže.

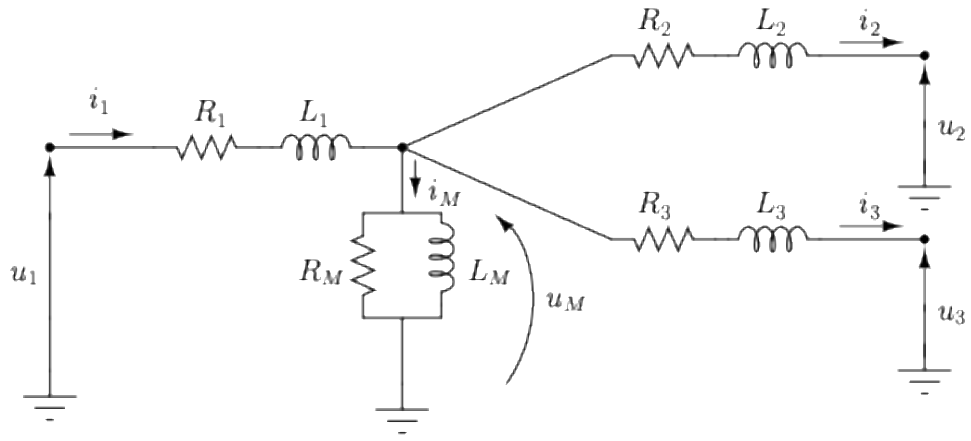
Promene električnih parametara transformatora mogu biti indikatori različitih vrsta kvarova. Prema Fofana i Hadjadj [1], odstupanje otpornosti namotaja veće od 5% od nominalne vrednosti ukazuje na prisustvo kvara. Povećanje otpornosti dovodi se u vezu sa prekidom ili oštećenjem provodnika, odnosno sa neispravnim kontaktima, dok njeno smanjenje može biti posledica kratkih spojeva između navojaka unutar transformatora [1-4]. Praćenjem induktivnosti rasipanja moguće je pratiti stanje geometrije namotaja, koja može biti narušena usled mehaničkih deformacija, starenja transformatora ili kratkih spojeva. Promena induktivnosti rasipanja ukazuje na aksijalna ili radijalna pomeranja namotaja, pri čemu odstupanje već od 2% u odnosu na nominalnu vrednost zahteva sprovođenje dodatne dijagnostike [1]. Struja magnećenja transformatora, koja je vezana za električne parametre otočne grane zamenske šeme, predstavlja indikator stanja magnetskog kola. Ona ukazuje na različite kvarove u jezgru, kao što su topljenje limova ili izolacije, njihovo međusobno kratko spajanje, promena magnetskih osobina materijala, kao i povećanje gubitaka usled vihornih struja [1-4].

Procena električnih parametara transformatora razmatrana je u više radova. Dirik i Gezegin [5] određuju parametre transformatora na osnovu trenutnih vrednosti napona i struje, formirajući odgovarajuće fazore i izračunavajući parametre u kompleksnom domenu. Soliman i saradnici [6] estimiraju parametre jednofaznog transformatora primenom metode najmanjih kvadrata na talasnim oblicima napona i struja, generisanim unapred iz poznatih parametara transformatora i opterećenja. Jin i saradnici [7] predlažu modifikovanu metodu najmanjih kvadrata zasnovanu

na ortogonalnoj dekompoziciji, prikladnu za uslove brzih dinamičkih promena napona i struje. Krishan i saradnici [8] određuju parametre transformatora primenom diferencijalnog modela u vremenskom domenu, pri čemu se naponi i struje prethodno filtriraju izdvajanjem osnovnog harmonika brzom Furijeovom transformacijom, nakon čega se rešavanjem diferencijalnih jednačina procenjuju redni parametri. Otočni parametri određuju se iz odnosa napona i struje u grani magnećenja, uz uvažavanje nelinearnosti magnetskog kola na osnovu podataka dobijenih iz merenja pri različitim opterećenjima transformatora.

2. ALGORITAM

Za izvođenje algoritma korišćena je T-zamenska šema tronamotajnog transformatora, prikazana na slici 1. Kako se estimacija vrši u svakoj fazi pojedinačno, prikazana je jednofazna šema koja pretpostavlja da je transformator simetričan i opterećen jednakim opterećenjem u sve tri faze.



Slika 1 – Zamenska šema tronamotajnog energetskog transformatora

Standardna T-zamenska šema transformatora podrazumeva da se parametri grane magnećenja, otpornost i induktivnost magnećenja, nalaze u paralelnoj vezi. Radi lakšeg matematičkog izvođenja algoritma, ovi parametri su najpre estimirani u ekvivalentnoj rednoj vezi, a zatim su ti ekvivalentni parametri redne veze preračunati u odgovarajuće parametre paralelne veze.

Na slici 1 oznake u_1, u_2 i u_3 predstavljaju napon primara, napon sekundara sveden na primarnu stranu i napon tercijera sveden na primarnu stranu, i_1, i_2 i i_3 predstavljaju struju primara, struju sekundara svedenu na primarnu stranu i struju tercijera svedenu na primarnu stranu, a u_M i i_M predstavljaju napon i struju u grani magnećenja. Nepoznati parametri koji se estimiraju su R_1, L_1, R_2, L_2, R_3, L_3, R_M i L_M, odnosno otpornosti namotaja, induktivnosti rasipanja, kao i otpornost i induktivnost u grani magnećenja.

Za električno kolo na slici 1 (uz ekvivalentiranje grane magnećenja rednom vezom) mogu se napisati sledeće jednačine:

$$u_1 = u_M + R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \tag{1}$$

$$u_2 = u_M - R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} \tag{2}$$

$$u_3 = u_M - R_3 i_3 - L_3 \frac{di_3}{dt} \tag{3}$$

$$u_M = L_M^* \frac{di_M}{dt} + R_M^* i_M \tag{4}$$

$$i_1 = i_2 + i_3 + i_M \tag{5}$$

Kombinujući prethodne jednačine, dobija se:

$$u_1 - u_2 = R_{12}(i_1 + i_2) + L_{12} \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} \tag{6}$$

$$u_1 - u_3 = R_{13}(i_1 + i_3) + L_{13} \frac{d(i_1 + i_3)}{dt} \tag{7}$$

$$u_2 - u_3 = R_{23}(i_3 - i_2) + L_{23} \frac{d(i_3 - i_2)}{dt} \tag{8}$$

U jednačinama (6), (7) i (8) potrebno je izračunati izvode struja. Ovi izvodi su izračunati pomoću sledeće aproksimacije:

$$\frac{di_n}{dt} = i_n' = \frac{i_{n+1} - i_{n-1}}{2T_{od}}, \tag{9}$$

gde je T_{od} period odabiranja, a i_{n+1} i i_{n-1} predstavljaju $(n+1)$-vi i $(n-1)$-vi odbirak struje.

Prilikom merenja i obrade signala, u sistem se unosi određena greška. Ona se u jednačinama (6), (7) i (8) uvažava dodavanjem signala greške:

$$u_1 - u_2 + e_{12} = R_{12}(i_1 + i_2) + L_{12} \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} \tag{10}$$

$$u_1 - u_3 + e_{13} = R_{13}(i_1 + i_3) + L_{13} \frac{d(i_1 + i_3)}{dt} \tag{11}$$

$$u_2 - u_3 + e_{23} = R_{23}(i_3 - i_2) + L_{23} \frac{d(i_3 - i_2)}{dt} \tag{12}$$

Jednačine (10), (11) i (12) mogu se zapisati u matričnom obliku:

$$[\Delta u_{12}] + [e_{12}] = [i_{12} \quad i_{12}'] \begin{bmatrix} R_{12} \\ L_{12} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$[\Delta u_{13}] + [e_{13}] = [i_{13} \quad i_{13}'] \begin{bmatrix} R_{13} \\ L_{13} \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$[\Delta u_{23}] + [e_{23}] = [i_{23} \quad i_{23}'] \begin{bmatrix} R_{23} \\ L_{23} \end{bmatrix} \tag{15}$$

gde su $\Delta u_{ij} = u_i - u_j$, $i_{ij} = i_i + i_j$ i $i_{ij}' = i_i' + i_j'$.

Minimizacijom sume kvadrata grešaka dobijaju se odgovarajući parametri:

$$[e] = [\Delta u] - [i] \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$F = [e]^T [e] = [\Delta u]^T [\Delta u] - 2 \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix}^T [i]^T [\Delta u] + \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix}^T [i]^T [i] \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\frac{dF}{d\begin{bmatrix}R\\L\end{bmatrix}^T} = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix}R\\L\end{bmatrix} = \{[i]^T[i]\}^{-1}[i]^T[\Delta u] \tag{18}$$

gde je $\{[i]^T[i]\}^{-1}[i]^T$ leva pseudoinverzna matrica matrice $[i] = \begin{bmatrix} i_{ij} & i'_{ij} \end{bmatrix}$.

Nakon estimacije parametara redne grane u zamenskoj šemi, estimiraju se parametri otočne grane korišćenjem već estimiranih parametara redne grane.

Napon grane magnećenja može se izračunati sa svake strane transformatora:

$$u_{M1} = u_1 - R_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} \tag{19}$$

$$u_{M2} = u_2 + R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \tag{20}$$

$$u_{M3} = u_3 + R_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} \tag{21}$$

Struja grane magnećenja određuje se iz prvog Kirhofovog zakona:

$$i_M = i_1 - i_2 - i_3. \tag{22}$$

Za svaku od tri vrednosti napona grane magnećenja važi:

$$u_{Mi} = R_M^* i_M + L_M^* \frac{di_M}{dt}, i = 1, 2, 3. \tag{23}$$

Primenom metode najmanjih kvadrata određuju se parametri:

$$\begin{bmatrix}R_M^*\\L_M^*\end{bmatrix} = \{[i]^T[i]\}^{-1}[i]^T[u_{Mi}], \tag{24}$$

pri čemu je $\{[i]^T[i]\}^{-1}[i]^T$ leva pseudoinverzna matrica matrice $[i] = [i_M \quad i'_M]$.

Na ovaj način dobijaju se tri estimacije parametara grane magnećenja, koje se zatim usrednjavaju radi smanjenja uticaja numeričkih i mernih grešaka.

Sledeći korak predstavlja preračunavanje redne veze u paralelnu:

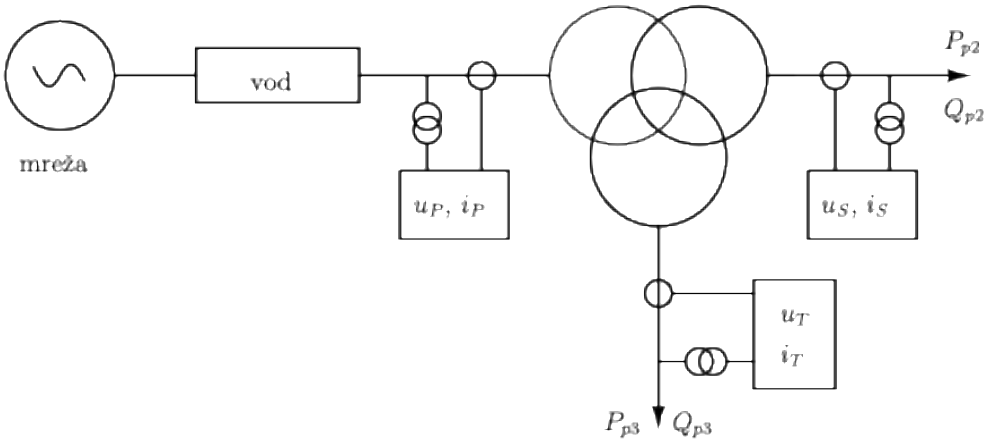
$$R_M = \frac{R_M^{*2} + (\omega L_M^*)^2}{R_M^*} \tag{25}$$

$$L_M = \frac{R_M^{*2} + (\omega L_M^*)^2}{\omega^2 L_M^*} \tag{26}$$

čime se dobijaju konačni parametri grane magnećenja.

3. SIMULACIJA

Algoritam je testiran na modelu čija je šema prikazana na slici 2. Model je realizovan u softverskom paketu MATLAB/Simulink i sastoji se od mreže naponskog nivoa 110 kV, dalekovoda dužine 20 km modelovanog pomoću π-ekvivalentne šeme, tronamotajnog energetskog transformatora i simetričnog opterećenja podesive snage na sekundaru i tercijeru transformatora. Nazivni podaci transformatora su: $U_n = 110/36.75/10.5$ kV, $S_n = 31.5/31.5/10.5$ MVA, sprega YNyn0d1, $u_k = 20.35/6.77/6.77$ %, $P_k = 146.1/16.2/16.2$ kW, $I_n = 165.3/494.9/577.4\ A$, $P_0 = 67.0$ kW i $i_0 = 0.345\%$.



Slika 2 – Simulacioni model elektroenergetskog sistema u MATLAB/Simulink okruženju

Odabiranje napona i struja vrši se frekvencijom $f_{od} = 8$ kHz, a odbirci se smeštaju u registre dužine $m = 162$. Algoritmu je potrebna jedna perioda da konvergira, tj. rezultati se dobijaju nakon 20 ms od početka simulacije. Simulacije su sprovedene za različite snage opterećenja transformatora: prazan hod, $0.2\,S_n$, $0.5\,S_n$, S_n i $1.2\,S_n$, gde je S_n nominalna snaga transformatora. Za svaku estimiranu vrednost parametra izračunata je relativna greška prema formuli:

$$e[\%] = \frac{p' - p}{p} \cdot 100, \tag{27}$$

gde je p' estimirana vrednost parametra, a p njegova stvarna vrednost.

U okviru simulacije razmatran je uticaj greške mernih transformatora, pri čemu je modelovana isključivo odnosna greška ε definisana klasom tačnosti u skladu sa IEC standardom. Fazni pomeraj je zanemaren, jer su njegove vrednosti reda veličine nekoliko minuta, što pri frekvenciji uzorkovanja od 8 kHz ima zanemarljiv uticaj na rezultate. Obuhvaćene su merne klase strujnih i naponskih transformatora 0,2. Greška je implementirana skaliranjem merenih veličina faktorom $k = 1 \pm \varepsilon$, čime se simulira odstupanje realnog merenja u odnosu na idealno. Analiza je sprovedena kroz najnepovoljniji slučaj u kojem su greške prisutne na sve tri strane transformatora i imaju suprotan predznak. Ovakav pristup je u skladu sa metodama analize uticaja mernih grešaka na estimaciju parametara koje su razmatrane u literaturi [6-8].

U simulaciji je izvršeno i ispitivanje uticaja prisustva viših harmonika u mreži na tačnost estimacije. Pojedinačno je ispitan uticaj trećeg, petog i sedmog harmonika, a po potrebi korišćeno je digitalno filtriranje signala diskretnom Furijeovom transformacijom, pri čemu je za estimaciju korišćena sinusna komponenta. Viši harmonici su uneti u naponski signal do nivoa od 10% u odnosu na efektivnu vrednost osnovnog harmonika.

4. REZULTATI

Rezultati simulacija prikazani su u tabelama u nastavku.

Tabela I – Rezultati simulacije u idealnim uslovima (bez greške merenja)

opterećenje	0	0.2 S_{nom}	0.5 S_{nom}	S_{nom}	1.2 S_{nom}
R1 [Ω]	0,8656	0,8938	0,8961	0,9000	0,9016
greška [%]	**-2,858**	**0,305**	**0,560**	**1,001**	**1,178**
L1 [H]	0,1243	0,1240	0,1240	0,1240	0,1240
greška [%]	**-0,038**	**-0,311**	**-0,314**	**-0,317**	**-0,319**
R2 [Ω]	0,9166	0,8879	0,8857	0,8817	0,8802
greška [%]	**2,922**	**-0,292**	**-0,548**	**-0,990**	**-1,167**
L2 [H]	0,1245	0,1248	0,1248	0,1248	0,1248
greška [%]	**0,094**	**0,364**	**0,366**	**0,370**	**0,371**
R3 [Ω]	0,9166	0,8889	0,8867	0,8832	0,8818
greška [%]	**2,850**	**-0,251**	**-0,498**	**-0,896**	**-1,054**
L3 [H]	0,1245	0,1246	0,1246	0,1246	0,1246
greška [%]	**0,365**	**0,503**	**0,504**	**0,507**	**0,508**
Rm [Ω]	180533,6	180548,4	180570,6	180607,5	180622,2
greška [%]	**0,029**	**0,037**	**0,049**	**0,070**	**0,078**
Lm [H]	449,9956	449,9849	449,9691	449,9428	449,9323
greška [%]	**0,006**	**0,003**	**-0,000**	**-0,006**	**-0,008**

Tabela II – Rezultati simulacije u slučaju greške mernih transformatora klase tačnosti 0,2

opterećenje	0	0.2 S_{nom}	0.5 S_{nom}	S_{nom}	1.2 S_{nom}
R1 [Ω]	548,6865	9,7309	4,4557	2,6854	2,3906
greška [%]	**61474,064**	**992,011**	**400,028**	**201,357**	**168,270**
L1 [H]	2,3488	0,1338	0,1281	0,1262	0,1259
greška [%]	**1788,690**	**7,554**	**2,992**	**1,479**	**1,227**
R2 [Ω]	0,9593	-0,0807	0,4931	0,6845	0,7156
greška [%]	**7,721**	**-109,059**	**-44,630**	**-23,141**	**-19,647**
L2 [H]	0,1239	0,1237	0,1244	0,1246	0,1246
greška [%]	**-0,352**	**-0,489**	**0,025**	**0,197**	**0,226**
R3 [Ω]	0,8738	1,8576	1,2793	1,0805	1,0464
greška [%]	**-1,946**	**108,440**	**43,553**	**21,240**	**17,413**
L3 [H]	0,1250	0,1257	0,1251	0,1249	0,1248
greška [%]	**0,812**	**1,357**	**0,846**	**0,680**	**0,653**
Rm [Ω]	179572,2	129320,9	91601,8	62372,7	55525,4
greška [%]	**-0,504**	**-28,347**	**-49,246**	**-65,441**	**-69,235**
Lm [H]	447,6001	405,6484	352,1303	283,5233	261,6395
greška [%]	**-0,527**	**-9,850**	**-21,744**	**-36,991**	**-41,854**

Prilikom ispitivanja uticaja viših harmonika na estimaciju parametara, dobijeni su rezultati prikazani u tabelama u nastavku.

Tabela III – Rezultati simulacije u prisustvu trećeg harmonika u mreži

opterećenje	0	0.2 S_{nom}	0.5 S_{nom}	S_{nom}	1.2 S_{nom}
R1 [Ω]	420779,9521	14,1120	6,3062	3,6259	3,1638
greška [%]	**47220184**	**1483,664**	**607,692**	**306,906**	**255,050**
L1 [H]	263,6022	0,2138	0,1579	0,1392	0,1367
greška [%]	**211867,036**	**71,895**	**26,976**	**11,908**	**9,911**
R2 [Ω]	-420778,2	-12,3302	-4,5245	-1,8442	-1,3821
greška [%]	**-47249482**	**-1484,562**	**-608,053**	**-307,083**	**-255,195**
L2 [H]	-263,3529	0,0353	0,0909	0,1096	0,1121
greška [%]	**-211877**	**-71,647**	**-26,865**	**-11,834**	**-9,842**
R3 [Ω]	-420776	-10,7581	-3,8701	-1,5237	-1,1186
greška [%]	**-47216015**	**-1307,179**	**-534,270**	**-270,977**	**-225,522**
L3 [H]	-263,1044	0,1793	0,1382	0,1245	0,1229
greška [%]	**-212249,9**	**44,581**	**11,450**	**0,399**	**-0,861**
Rm [Ω]	-145624,5	89,9200	112,0315	103,4198	45,3310
greška [%]	**-180,687**	**-99,950**	**-99,938**	**-99,943**	**-99,975**
Lm [H]	-2353,7792	0,3925	0,1571	0,7237	0,5883
greška [%]	**-623,097**	**-99,913**	**-99,965**	**-99,839**	**-99,869**

Tabela IV – Rezultati simulacije u prisustvu petog harmonika u mreži

opterećenje	0	0.2 S_{nom}	0.5 S_{nom}	S_{nom}	1.2 S_{nom}
R1 [Ω]	0,8656	0,8943	0,8971	0,9013	0,9028
greška [%]	**-2,858**	**0,364**	**0,677**	**1,143**	**1,318**
L1 [H]	0,1243	0,1242	0,1241	0,1241	0,1241
greška [%]	**-0,042**	**-0,155**	**-0,179**	**-0,223**	**-0,236**
R2 [Ω]	0,9166	0,8874	0,8846	0,8805	0,8789
greška [%]	**2,922**	**-0,351**	**-0,666**	**-1,132**	**-1,307**
L2 [H]	0,1247	0,1250	0,1250	0,1249	0,1249
greška [%]	**0,270**	**0,522**	**0,498**	**0,456**	**0,443**
R3 [Ω]	0,9166	0,8885	0,8858	0,8821	0,8807
greška [%]	**2,850**	**-0,302**	**-0,601**	**-1,021**	**-1,179**
L3 [H]	0,1247	0,1248	0,1248	0,1248	0,1247
greška [%]	**0,542**	**0,661**	**0,637**	**0,596**	**0,584**
Rm [Ω]	154132,3	155195,4	158997,2	165337,2	167152,2
greška [%]	**-14,599**	**-14,010**	**-11,904**	**-8,391**	**-7,385**
Lm [H]	443,3111	443,3927	443,8713	445,1221	445,5650
greška [%]	**-1,480**	**-1,462**	**-1,355**	**-1,077**	**-0,979**

Tabela V – Rezultati simulacije u prisustvu sedmog harmonika u mreži

opterećenje	0	0.2 S_{nom}	0.5 S_{nom}	S_{nom}	1.2 S_{nom}
R1 [Ω]	0,8656	0,8956	0,8989	0,9026	0,9039
greška [%]	**-2,858**	**0,501**	**0,875**	**1,288**	**1,440**

opterećenje	0	0.2 S_{nom}	0.5 S_{nom}	S_{nom}	1.2 S_{nom}
L1 [H]	0,1245	0,1248	0,1246	0,1244	0,1243
greška [%]	**0,121**	**0,342**	**0,216**	**0,031**	**-0,018**
R2 [Ω]	0,9166	0,8862	0,8829	0,8792	0,8778
greška [%]	**2,922**	**-0,488**	**-0,864**	**-1,277**	**-1,430**
L2 [H]	0,1254	0,1256	0,1254	0,1252	0,1251
greška [%]	**0,820**	**1,021**	**0,881**	**0,664**	**0,605**
R3 [Ω]	0,9166	0,8874	0,8843	0,8809	0,8797
greška [%]	**2,850**	**-0,424**	**-0,776**	**-1,150**	**-1,287**
L3 [H]	0,1254	0,1255	0,1253	0,1250	0,1250
greška [%]	**1,093**	**1,161**	**1,026**	**0,820**	**0,765**
Rm [Ω]	118206,3	121953,7	134024,4	150269,9	154160,5
greška [%]	**-34,505**	**-32,429**	**-25,741**	**-16,739**	**-14,584**
Lm [H]	452,1082	448,3218	441,7515	440,8024	441,3764
greška [%]	**0,475**	**-0,366**	**-1,826**	**-2,037**	**-1,910**

Na osnovu rezultata, može se zaključiti da najveći uticaj na estimaciju ima prisustvo trećeg harmonika u merenim naponima i strujama. Ovo se objašnjava činjenicom da peti i sedmi harmonik neometano prolaze kroz transformator na sekundarnu i tercijernu stranu, dok treći harmonik ostaje zarobljen u tercijeru sprege D, čime dolazi do razlike u nivoima viših harmonika sa primarne i tercijerne strane, zbog čega se javlja greška u estimaciji. Ovaj problem se može otkloniti digitalnim filtriranjem ulaznih signala diskretnom Furijeovom transformacijom, a zatim korišćenjem sinusne komponente osnovnog harmonika za estimaciju parametara. Rezultati estimacije sa filtriranjem viših harmonika prikazani su u tabeli VI.

Tabela VI – Rezultati simulacije u prisustvu viših harmonika u mreži sa digitalnim filtriranjem

opterećenje	0	0.2 S_{nom}	0.5 S_{nom}	S_{nom}	1.2 S_{nom}
R1 [Ω]	0,8663	0,8938	0,8960	0,8999	0,9014
greška [%]	**-2,789**	**0,300**	**0,550**	**0,983**	**1,157**
L1 [H]	0,1243	0,1240	0,1240	0,1240	0,1240
greška [%]	**-0,029**	**-0,302**	**-0,304**	**-0,308**	**-0,309**
R2 [Ω]	0,9159	0,8880	0,8858	0,8819	0,8803
greška [%]	**2,852**	**-0,285**	**-0,538**	**-0,972**	**-1,147**
L2 [H]	0,1245	0,1248	0,1248	0,1248	0,1248
greška [%]	**0,089**	**0,354**	**0,356**	**0,360**	**0,361**
R3 [Ω]	0,9159	0,8890	0,8868	0,8833	0,8820
greška [%]	**2,780**	**-0,246**	**-0,488**	**-0,878**	**-1,034**
L3 [H]	0,1245	0,1246	0,1246	0,1246	0,1246
greška [%]	**0,360**	**0,497**	**0,498**	**0,501**	**0,502**
Rm [Ω]	180539,6	180554,1	180575,8	180611,9	180626,5
greška [%]	**0,032**	**0,040**	**0,052**	**0,072**	**0,080**
Lm [H]	449,9992	449,9888	449,9732	449,9474	449,9371
greška [%]	**0,006**	**0,004**	**0,001**	**-0,005**	**-0,007**

Primenjena metoda digitalnog filtriranja uspešno rešava uticaj viših harmonika na tačnost estimacije parametara, tako da se predloženi algoritam može koristiti i u mrežama sa visokim prisustvom viših harmonika.

Na osnovu rezultata može se zaključiti da u uslovima bez greške mernih transformatora metoda uspešno estimira parametre transformatora sa greškom manjom od 3%. U uslovima sa greškom mernih transformatora dolazi do pogoršanja tačnosti estimacije parametara, naročito za estimaciju otpornosti namotaja.

Rezultati ukazuju na to da je određene parametre pogodnije estimirati u različitim režimima rada transformatora. Parametre u rednim granama zamenske šeme (otpornosti namotaja i rasipne induktivnosti) bolje je estimirati u režimima bliskim nominalnom opterećenju transformatora, dok se parametri grane magnećenja estimiraju sa većom tačnošću u režimima bliskim praznom hodu transformatora. Ovo se može iskoristiti za unapređenje metode, tako što bi se parametri redne grane estimirali u odgovarajućim režimima, a zatim čuvali i koristili za estimaciju parametara grane magnećenja u režimima sa manjim opterećenjem transformatora.

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana metoda za *online* estimaciju parametara tronamotajnog energetskog transformatora na osnovu merenja trenutnih vrednosti napona i struja transformatora. Estimirani parametri su poređeni sa njihovim tačnim vrednostima, na osnovu čega je izračunata relativna greška estimacije. U uslovima zanemarljive greške mernih transformatora može se zaključiti da prikazana metoda uspešno estimira parametre transformatora sa zadovoljavajućom tačnošću.

U radu je takođe ispitan uticaj greške mernih transformatora na tačnost estimacije. Analiza je sprovedena kroz najgori scenario greške mernih uređaja, u kom transformatori sa primarne strane greše na pozitivnu, a sa sekundarne i tercijerne na negativnu stranu. Rezultati pokazuju da u prisustvu greške mernih transformatora dolazi do smanjenja tačnosti estimacije električnih parametara transformatora, naročito za redne otpornosti namotaja R_1, R_2 i R_3. Rezultati takođe pokazuju da se različiti parametri uspešnije estimiraju pri različitim režimima rada transformatora, odnosno, induktivnost rasipanja se bolje estimira pri opterećenjima transformatora bližim nominalnom, dok se parametri grane magnećenja bolje estimiraju pri režimima bliskim praznom hodu.

U radu je takođe ispitan i uticaj prisustva viših harmonika u mreži na tačnost estimacije. Pokazano je da u prisustvu trećeg harmonika metoda zahteva prethodno digitalno filtriranje signala kako bi uspešno estimirala parametre transformatora.

Budući rad ogleda se u uvažavanju položaja regulacione preklopke transformatora, zasebnoj estimaciji parametara u svakoj fazi i njihovom međusobnom poređenju, uvažavanju ambijentalnih uslova u kojima radi transformator, kao i kompenzacije greške mernih transformatora.

LITERATURA

[1] Fofana I and Hadjadj Y, 2016, “Electrical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers”, “Energies”, 9, 679

[2] Li J, Tao F, Wei C, Lu Y, Wu P, Zhu M and Yu M, 2015, "A transformer winding deformation detection method based on the analysis of leakage inductance changes", "Archives of Electrical Engineering", 64, 333-346
[3] Youssef M, Abdelaziz ES, Mohamed HS and Attia M, 2025, "Condition monitoring and fault diagnosis of power transformer based on non-invasive measurement", "Scientific Reports", 15, 32123
[4] Domingo D, Kareem AB, Okwuosa CN, Custodio PM and Hur JW, 2024, "Transformer Core Fault Diagnosis via Current Signal Analysis with Pearson Correlation Feature Selection", "Electronics", 13, 926
[5] Dirik H and Gezegin C, 2022, "Parameter Identification of Equivalent T-Circuit of Three Phase Transformers Using Real Time Measurements", "JERAS", 11, 2147–2155
[6] Soliman SAS, Alammari R and Mostafa MA, 2004, "On-line estimation of transformer model parameters", "Proc. IEEE Large Engineering Systems Conference on Power Engineering (LESCOPE)", –, –
[7] Jin ES, Liu LL, Bo ZQ and Klimek A, 2008, "Parameter identification of the transformer winding based on least-squares method", "Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting", 1–6
[8] Krishan R, Mishra AK and Rajpurohit BS, 2016, "Real-time parameter estimation of single-phase transformer", "Proc. IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)", 1–6