

Sebastian Berhausen, Stefan Paszek  
Politechnika Śląska, Gliwice

## ESTYMACJA PARAMETRÓW MODELU GENERATORA SYNCHRONICZNEGO NA PODSTAWIE ZASZUMIONYCH PRZEBIEGÓW DYNAMICZNYCH PRZY WYKORZYSTANIU ZAKŁÓCEŃ PSEUDOLOSOWYCH

### ESTIMATION OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR MODEL PARAMETERS BASED ON NOISY DYNAMIC WAVEFORMS OBTAINED FOR PSEUDORANDOM DISTURBANCES

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki estymacji parametrów modelu matematycznego generatora synchronicznego pracującego w jednomaszynowym systemie elektroenergetycznym. Podstawą estymacji są zaszumione przebiegi dynamiczne wywołane wprowadzeniem do układu regulacji napięcia generatora zakłócenia w postaci sygnału pseudolosowego. Założono, że generator pracuje blisko znamionowego obciążenia. Do filtracji przebiegów wykorzystano filtry cyfrowe o zerowym przesunięciu fazowym o skończonej i nieskończonej odpowiedzi impulsowej. Do estymacji parametrów wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów, a do minimalizacji błędu średniokwadratowego metodę gradientową.

**Abstract:** In the paper, there are presented the results of parameter estimation of the mathematical model of a synchronous generator operating in a single-machine power system. Noisy dynamic waveforms caused by introducing a disturbance in the form of a pseudorandom signal to the generator voltage regulator system were the basis of estimation. It was assumed that the generator load was close to the rated one. Finite and infinite impulse response zero-phase digital filters were used for filtering the waveforms. The least squares method was used for parameter estimation, and the gradient method was applied to minimization of the mean square error.

**Słowa kluczowe:** estymacja parametrów, generator synchroniczny w systemie elektroenergetycznym, sygnały pseudolosowe PRBS, filtracja przebiegów, filtr o zerowym przesunięciu fazowym.

**Keywords:** parameter estimation, synchronous generator in power system, pseudorandom signals PRBS, filtering waveforms, zero phase digital filters.

#### 1. Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania ośrodków naukowo-badawczych metodami estymacji parametrów elektromagnetycznych generatorów synchronicznych. Spośród tych metod wyróżnia się dwie zasadnicze grupy: metody wykorzystujące wyniki pomiarów na postoju maszyny [6, 7, 10] i metody wykorzystujące wyniki pomiarów przy wirującej maszynie [2, 3, 8, 9]. Bez względu na wybraną metodę pomiarową, zasadniczym problemem występującym przy estymacji parametrów modeli matematycznych generatorów synchronicznych jest usunięcie błędnych danych i odfiltrowanie zakłóceń w przebiegach pomiarowych.

Obecność zakłóceń w sygnałach jest wynikiem charakterystyki środowiska pomiarowego, obecności maszyn i urządzeń elektrycznych (tory prądowe, napęd, transformatory) oraz

układów przekształtnikowych (diody, tyristory). Mierzone przebiegi czasowe napięć i prądów są dodatkowo zniekształcone z uwagi na obecność prostownika w obwodzie uzwojenia wzbudzenia, jawnobiegunowość wirnika oraz użłobkowanie rdzeni stojana i wirnika. Konsekwencją tego w widmie tych przebiegów w stanie ustalonym obserwuje się wyższe harmoniczne [3, 12]. Klasyczne modele matematyczne generatorów nie uwzględniają tych harmonicznych, ani ich wpływu na strumień magnetyczny.

Aby wskazane wyżej składowe zakłócenia nie powodowały dodatkowych błędów estymacji, sygnały pomiarowe trzeba poddać procesowi filtracji.

W artykule założono że, podstawą estymacji parametrów są przebiegi dynamiczne wywołane niewielkim zakłóceniem napięcia zadane regulatora napięcia w postaci sygnału pseudolosowego PRBS (*Pseudo Random Binary*

*Sequence*) [16]. Założono, że generator pracuje w jednomaszynowym systemie elektroenergetycznym (SEE) blisko znamionowego obciążenia [4, 9, 16].

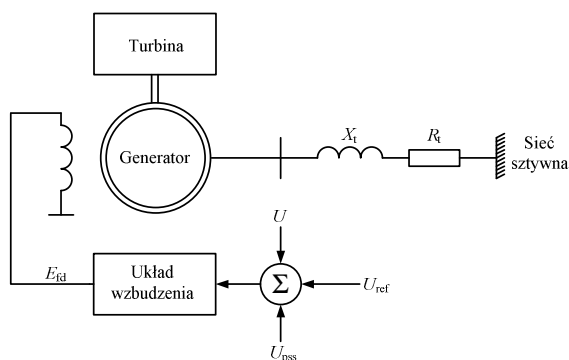
Zbadano wpływ rodzaju zastosowanego filtra i jego parametrów na wyniki estymacji parametrów elektromagnetycznych modelu generatora. Wzięto pod uwagę model GENROU (typu XT), w którym występują odpowiednie reakcje i stałe czasowe generatora [5, 15].

Do filtracji zakłóconych przebiegów wykorzystano filtry cyfrowe o zerowym opóźnieniu fazowym o skończonej i nieskończonej odpowiedzi impulsowej.

## 2. Metoda przeprowadzania badań

Parametry modelu matematycznego generatora synchronicznego można wyznaczyć (w osiach  $d$  oraz  $q$ ) na podstawie przebiegów dynamicznych wywołanych zakłóceniami ustalonej pracy generatora współpracującego z systemem elektroenergetycznym. Założono, że zakłócenie polega na wprowadzeniu dodatkowej niewielkiej składowej napięcia zadanego regulatora napięcia  $U_{ref}$  w postaci sygnału pseudolosowego PRBS.

Na rys. 1 przedstawiono schemat ideowy zespołu wytwórczego, pracującego w jednomaszynowym SEE. W skład zespołu wytwórczego wchodzi: generator napędzany turbiną, układ wzbudzenia z regulatorem napięcia i stabilizatorem systemowym. Zespół wytwórczy połączony jest poprzez linię przesyłową z siecią sztywną.

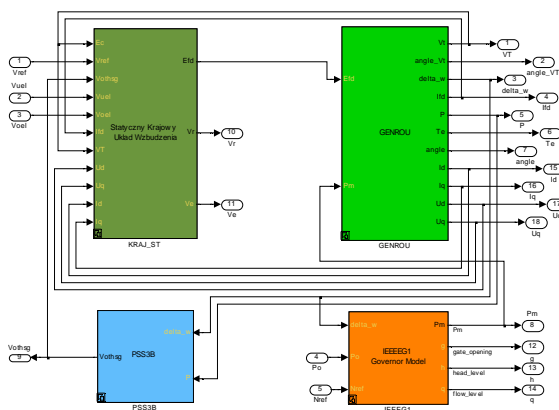


Rys. 1. Schemat ideowy zespołu wytwórczego pracującego w jednomaszynowym SEE

Wprowadzone zakłócenie powoduje zmiany przebiegów prądów i napięć stojana w osi podłużnej i poprzecznej, prądu wzbudzenia, prędkości kątowej wirnika oraz kąta obciążenia maszyny. Na przebiegi te oddziałuje układ wzu-

budzenia (wraz z regulatorem napięcia i stabilizatorem systemowym) oraz turbina z jej układem regulacji.

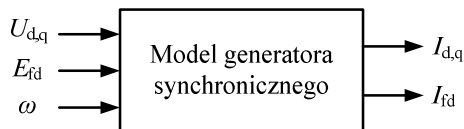
Do badań wykorzystano model matematyczny zespołu wytwórczego opracowany w środowisku programu Matlab/Simulink przedstawiony na rys. 2. W skład modelu zespołu wytwórczego wchodzi: nieliniowy model generatora synchronicznego GENROU, model statycznego układu wzbudzenia wraz z regulatorem napięcia [4], model dwuwęściowego stabilizatora systemowego PSS3B [14] oraz model turbiny parowej z przegrzewaczem międzystopniowym IEEEG1 [4, 15] wraz z jej układem regulacji. W modelu generatora synchronicznego uwzględniono w przybliżony sposób zjawisko nasycenia rdzenia magnetycznego od pola głównego maszyny za pomocą poprawki, będącej funkcją modułu strumienia sprzężonego stojana [5].



Rys.2. Model strukturalny zespołu wytwórczego w środowisku Matlab – Simulink

Podstawą estymacji były przebiegi wygenerowane przez model matematyczny zespołu wytwórczego o znanych parametrach, które umownie nazwano parametrami wzorcowymi. Obliczone przez model matematyczny zespołu wytwórczego przebiegi zakłócono szumem gaussowskim o zerowej wartości średniej. Przebiegi te w przybliżeniu odwzorowują rzeczywiste sygnały pomiarowe. Przed przystąpieniem do procesu estymacji powinno się odfiltrować przebiegi z przypadkowych danych i szumu. Nawet niewielki szum zawarty w przebiegach przy obliczaniu pochodnych jest silnie wzmacniany. Wykorzystując odfiltrowane przebiegi składowych osiowych prądów i napięć stojana i wirnika oraz przebieg prędkości obrotowej generatora, w procesie estymacji można rozpatrywać tylko model generatora i

pominąć pozostałe elementy zespołu wytwórczego. Na rys. 3 przedstawiono sygnały wejściowe i wyjściowe uwzględniane w procesie estymacji parametrów modelu generatora synchronicznego.



Rys. 3. Sygnały uwzględniane w procesie estymacji parametrów modelu generatora synchronicznego

Parametry modelu matematycznego generatora wyznacza się poprzez minimalizację funkcji celu określonej w postaci błędu średniokwadratowego definiowanej dla odchylek (określonych w  $i$ -tych chwilach czasowych) pomiędzy odfiltrowanymi przebiegami odwzorowującymi przebiegi pomiarowe (oznaczone literą  $m$ ) a przebiegami obliczonymi za pomocą modelu symulacyjnego dla poszukiwanego wektora parametrów  $\mathbf{P} = [R, X_\sigma, X_{ad}, X'_d, X''_d, T''_{d0}, T'_{d0}, X_{aq}, X'_q, X''_q, T_{q0}, T'_{q0}]$  (oznaczone literą  $s$ ).

Do estymacji wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów poprzez zdefiniowanie następującej funkcji celu [9, 12]:

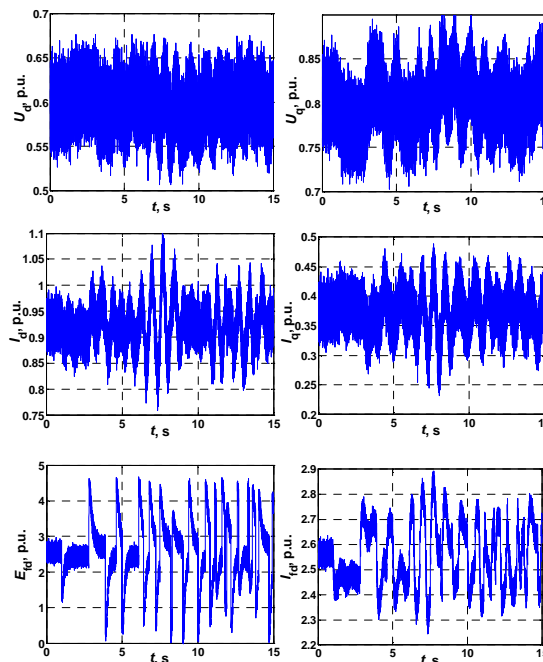
$$(1) \quad \varepsilon(\mathbf{P}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{I_{di}^m - I_{di}^s(\mathbf{P})}{I_{di}^m} \right|^2 + \left| \frac{I_{fdi}^m - I_{fdi}^s(\mathbf{P})}{I_{fdi}^m} \right|^2 + \left| \frac{I_{qi}^m - I_{qi}^s(\mathbf{P})}{I_{qi}^m} \right|^2 \right)$$

gdzie:  $I_{di}^m, I_{fdi}^m, I_{qi}^m, I_{di}^s(\mathbf{P}), I_{fdi}^s(\mathbf{P}), I_{qi}^s(\mathbf{P})$  – wartości chwilowe odpowiednich sygnałów wyjściowych.

Do minimalizacji funkcji celu wykorzystano algorytm gradientowy z ograniczeniami, zawarty w Optimization Toolbox programu Matlab.

Estymację parametrów przeprowadzono dla turbogeneratora o danych znamionowych:  $S_n = 117,5 \text{ MV}\cdot\text{A}, U_n = 13,8 \text{ kV}, I_n = 4915 \text{ A}, \cos\varphi_n = 0,85, f_n = 50 \text{ Hz}$ .

Na rys. 4 przedstawiono zaszumione przebiegi dynamiczne napięć i prądów stojana w osiach  $d$  i  $q$  oraz napięcie i prąd wzbudzenia generatora, z uwzględnieniem oddziaływania stabilizatora systemowego, w przypadku zakłócenia pracy ustalonej generatora sygnałem PRBS wprowadzonym w tor regulacji napięcia generatora. Założono, że generator przed zakłóceniem pracował w stanie znamionowego obciążenia, współpracując z siecią sztywną poprzez linię przesyłową o parametrach  $R_e = 0, X_e = 0,3$  wyrażonych w wartościach względnych.



Rys. 4. Zakłócone przebiegi napięć i prądów stojana w osiach  $d$  i  $q$  oraz napięcia i prądu wzbudzenia generatora przy zakłóceniu pracy ustalonej maszyny sygnałem PRBS

Założono, że stosunek gęstości widmowej mocy poszczególnych sygnałów (z wyjątkiem napięcia wzbudzenia generatora) do gęstości widmowej mocy szumu (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*) wynosi 35 dB. Z uwagi na występujące w układach wzbudzenia prostowniki będące źródłem wyższych harmonicznych, w napięciu wzbudzenia uwzględniono wyższy poziom szumów (przez założenie SNR = 20 dB). Przebiegi wielkości elektrycznych stojana wyrażono w wartościach względnych generatorowych natomiast przebiegi wielkości elektrycznych wirnika w wartościach względnych regulatorowych [4].

## 2. Filtracja przebiegów

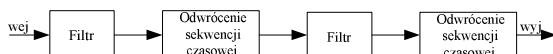
Na obiektach rzeczywistych mierzonymi przebiegami elektrycznymi generatora są trójfazowe napięcia i prądy stojana o częstotliwości 50 Hz oraz napięcie i prąd wzbudzenia. Wygodnie jest przetransformować napięcia i prądy stojana generatora do układu współrzędnych Parka  $dq0$ . Przy analizie symetrycznych stanów nieustalonych generatora, dla których punkt gwiazdowy stojana jest nieuziemiający, składowa zerowa nie występuje. Prądy i napięcia stojana w układzie współrzędnych  $dq$  oraz napięcie i prąd wzbudzenia zawierają głównie

składową stałą. Dlatego do filtracji zaszumionych przebiegów wykorzystano filtr dolnoprzepustowy.

Pośród szerokiej gamy filtrów dolnoprzepustowych można wyróżnić filtry o skończonej i nieskończonej odpowiedzi impulsowej (FIR – *Finite Impulse Response*, IIR – *Infinite Impulse Response*). Każdy filtr wprowadza niezerowe przesunięcie fazowe, które do celów estymacji parametrów jest zjawiskiem niepożądanym. Filtry FIR można zaprojektować tak, aby zachowały liniową charakterystykę fazową, co zapewnia stałe opóźnienie grupowe i w konsekwencji nie prowadzi do zmiany kształtu filtrowanego sygnału. Właściwość ta jest istotna w przypadku gdy, w systemie elektroenergetycznym w stanach przejściowych mogą występować zmiany częstotliwości. Filtr FIR zaprojektowano przy wykorzystaniu metody okien czasowych dostępny w pakiecie Matlab Filter Design Toolbox [13]. Do filtracji wykorzystano parametryczne okno Kaisera (okno o zmiennym kształcie). Zmiana długości oraz kształtu okna pozwala wpływać na stromość charakterystyki w paśmie przejściowym i tłumienie filtru w paśmie zaporowym [17].

Pośród szerokiej gamy filtrów dolnoprzepustowych IIR można wymienić filtry Butterwortha, Czebyszewa, Cauera [17]. Filtry Czebyszewa i Cauera cechuje zafalowana charakterystyka amplitudowa w paśmie przepustowym. Ta nierównomierna zmiana amplitudy może przyczynić się do powstania błędów w procesie estymacji parametrów elektromagnetycznych generatora synchronicznego. Wady tej pozbawiony jest filtr Butterwortha. Filtry te nie zapewniają stałego opóźnienia grupowego, ale jest możliwe zaprojektowanie filtru o maksymalnie płaskiej charakterystyce amplitudowej w paśmie przepustowym. Odbywa się to kosztem nachylenia charakterystyki amplitudowej w obszarze przejściowym między pasmem przepustowym a pasmem zaporowym. Zwiększenie rzędu filtru powoduje jednocześnie zwiększenie stromości w paśmie zaporowym i spłaszczenie w paśmie przepustowym charakterystyki amplitudowej [17].

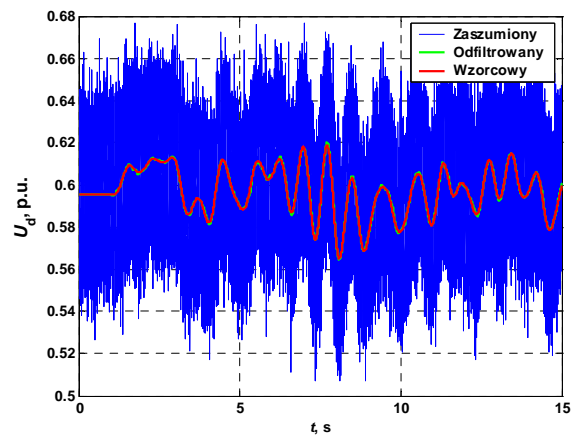
W celu eliminacji opóźnień wnoszonych przez filtr wykorzystano filtrację z zerowym opóźnieniem fazowym [11]. Schemat ideowy filtracji o zerowej fazie przedstawiono na rys. 5.



Rys.5. Schemat ideowy filtracji o zerowej fazie

Filtracja o zerowym opóźnieniu fazowym opiera się na dwukrotnej filtracji sygnału przez ten sam filtr, co powoduje dwukrotne zwiększenie wypadkowego rzędu filtru. Ponadto, w filtracji tej dwukrotnie odwraca się sekwencję czasową sygnału. Zabieg ten ma na celu przywrócenie pierwotnej kolejności próbek zgodnej z sygnałem wejściowym. Ten sposób filtracji zapewnia eliminację wpływu fazowej charakterystyki filtru na kąt fazowy sygnału niezależnie od jego typu.

Wygenerowane przez model matematyczny systemu elektroenergetycznego zaszumione przebiegi zapisano z częstotliwością próbkowania  $f_s = 10$  kHz.



Rys. 6. Przykładowy przebieg napięcia twornika w osi d przed i po filtracji

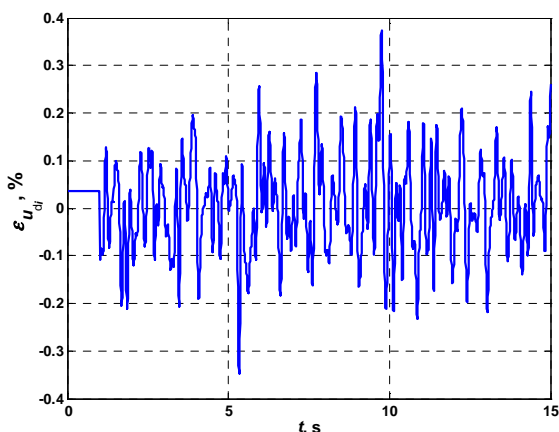
Przykładowy wynik filtracji przebiegu napięcia twornika w osi d w zaproponowanym układzie filtru przedstawiono na rys. 6. Zostały na nim porównane przebiegi napięcia wygenerowanego przez model matematyczny zespołu wytwórczego (przebieg „niezaszumiony”), przebieg napięcia zakłócony szumem gaussowskim (przebieg „zaszumiony”) oraz przebieg z odfiltrowanym szumem (przebieg „odfiltrowany”). Aby zilustrować różnice pomiędzy przebiegiem niezaszumionym i odfiltrowanym wprowadzono, procentowy przebieg błędów zdefiniowany wzorem:

$$\varepsilon_{U_{di}\%} = \left( \frac{U_{di} - U_{di}^n}{U_{di}^n} \right) \cdot 100, \quad (2)$$

gdzie:  $U_{di}$ ,  $U_{di}^n$  – wartości chwilowe odfiltrowanego i niezaszumionego (n) napięcia stojana generatora w osi d.

Odpowiadający równaniu (2) przebieg błędów przedstawiono na rys. 7. Wynika z niego, że

maksymalny błąd jest niewielki bowiem nie przekracza 0,4 %.



Rys. 7. Przykładowy przebieg błędów wynikający z filtracji szumów napięcia stojana w osi d

Odfiltrowany przebieg napięcia otrzymano przy wykorzystaniu filtra Butterwortha o następujących parametrach: częstotliwość końca pasma przepuszczania  $f_{pass} = 4$  Hz oraz częstotliwość początku pasma zaporowego  $f_{stop} = 30$  Hz.

### 3. Wyniki estymacji parametrów elektromagnetycznych

Estymację parametrów modelu generatora w osiach d i q przeprowadzono dla przebiegów przedstawionych na rys. 4 po wykorzystaniu omówionego sposobu filtracji.

Na rys. 8 przedstawiono odfiltrowane (przy wykorzystaniu filtra Butterwortha) przebiegi wyjściowe generatora, będące podstawą estymacji (Podfilt), oraz przebiegi symulacyjne obliczone dla wyznaczonych w pierwszej iteracji parametrów generatora (Pestym). Po zakończonym procesie estymacji przebiegi odfiltrowane oraz przebiegi symulacyjne praktycznie się pokrywają.

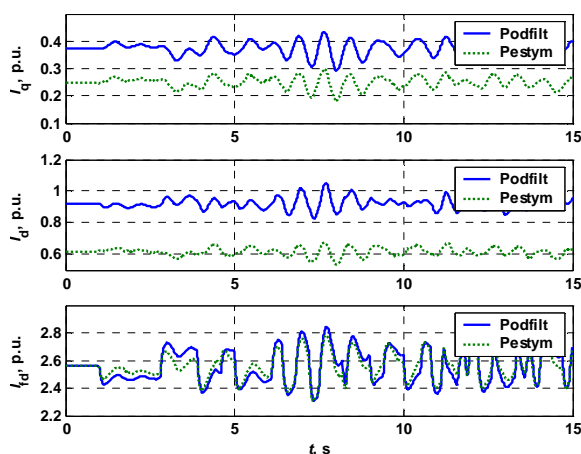
W kolejnym etapie obliczeń podstawą estymacji były przebiegi odfiltrowane przy wykorzystaniu filtra FIR zaprojektowanego metodą okien czasowych.

W tabeli 1 zawarto wyniki końcowe estymacji parametrów modelu generatora synchronicznego oraz ich błędy procentowe. Wartości początkowe parametrów algorytmu optymalizacyjnego odchyłono od ich wartości wzorcowych o 50%.

Do minimalizacji błędu średniokwadratowego, zdefiniowanego wzorem (1), wykorzystano algorytm gradientowy Levenberga-Marquardta zaimplementowany w pakiecie Matlab.

Tabela 1. Wyniki estymacji parametrów generatora dla sygnału pseudolosowego

Parametr	Wartość wzorcowa	Błąd		Błąd	
		FIR	%	IIR	%
$X_{ad}$	1,7006	1,7018	0,072	1,6937	0,406
$X'_d$	0,2298	0,2291	0,311	0,2292	0,248
$X''_d$	0,0842	0,0859	1,998	0,0884	4,994
$T'_{d0}$ , s	6,9938	6,9968	0,042	6,9897	0,058
$T''_{d0}$ , s	0,0448	0,0439	2,072	0,0456	1,763
$X_{aq}$	1,622	1,6173	0,288	1,6343	0,759
$X'_q$	0,465	0,4680	0,635	0,4653	0,073
$X''_q$	0,0842	0,1032	22,61	0,0808	4,073
$T'_{q0}$ , s	2,054	1,9913	3,051	2,0785	1,192
$T''_{q0}$ , s	0,082	0,0826	0,736	0,0792	3,413
$R$	0,0013	0,0022	72,87	0,0014	10,790
$X_\sigma$	0,113	0,1141	0,938	0,1131	0,068



Rys. 8. Przebiegi wyjściowe odfiltrowane i symulacyjne w pierwszym kroku iteracyjnym dla sygnału zakłócenia typu PRBS

### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przy wykorzystaniu filtracji o zerowym opóźnieniu fazowym większość obliczonych parametrów elektromagnetycznych generatora synchronicznego obciążonych jest niewielkim błędem. Mniejsze błędy estymacji parametrów otrzymano przy wykorzystaniu filtra Butterwortha. Niezależnie od rodzaju wykorzystanego w artykule filtra, najtrudniej wyznaczalnym parametrem jest rezystancja twornika oraz reaktancja podprzejściowa w osi q.

Podobne trudności w wyznaczaniu tych parametrów zasygnalizowano w [1, 4]. Należy zaznaczyć że, rezystancja twornika generatorów synchronicznych dużej mocy jest mała w porównaniu do reaktancji synchronicznej. W normalnych warunkach pracy generatora wartość rezystancji stojana nie wpływa w znacznym stopniu na przebiegi wielkości elektrycznych. Duży błąd estymacji rezystancji twornika można ominąć rezygnując z estymacji tego parametru na rzecz przyjęcia w modelu obliczeniowym rezystancji odczytanej z danych katalogowych dostarczanych przez wytwórców lub wyznaczonej pomiarowo metodą techniczną.

## 5. Literatura

- [1] Agrawal B., Heydt G.T., Karayaka H.B., Keyhani A., Selin D.: *Methodology Development for Estimation of Armature Circuit and Field Winding Parameters of Large Utility Generators*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4. December 1999, pp. 901-908.
- [2] Berhausen S., Boboń A., Paszek S.: *Estymacja parametrów elektromagnetycznych turbogeneratora na podstawie zweryfikowanych pomiarowo przebiegów obliczonych metodą elementów skończonych*, Przegląd Elektrotechniczny, 86 (2010), nr 8, s. 16-21.
- [3] Berhausen S., Paszek S.: *Pomiarowa estymacja parametrów modelu matematycznego generatora synchronicznego przy wykorzystaniu sygnałów pseudolosowych*. Przegląd Elektrotechniczny, R.89, Nr 9, 2013, s. 1-5
- [4] Berhausen S., Paszek S.: *Estymacja parametrów modelu generatora synchronicznego pracującego w wielomaszynowym systemie elektroenergetycznym*. Przegląd Elektrotechniczny 2011, Nr 8, s. 192-197.
- [5] de Mello F.P., Hannett L.H.: *Validation of Synchronous Machine Models and Derivation of Model Parameters from Tests*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 100, No. 2, Feb. 1981, pp. 662-672.
- [6] IEEE Guide: *Test Procedures for Synchronous Machines*, IEEE Standard 115 – 1995, Dec. 1995.
- [7] *IEEE Standard Procedures for Obtaining Synchronous Machine Parameters by Standstill Frequency Response Testing*, IEEE Standard 115A-1987, May 1987.
- [8] IEEE Std 1110-2002: *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications In Power System Stability Analyses*, 2003.
- [9] Jahromi, M.E.; Firouzi, B.; Ranjbar, A.M.: *Possibility of large synchronous generator parameters estimation via on-line field tests using genetic algorithm*. Power India Conference, 2006 IEEE, 10-12 April 2006.
- [10] Kamwa I., Viarouge P., Le-Huy H., Dickinson E.J.: *Three-transfer-function approach for building phenomenological models of synchronous machines*, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol. 141, Issue: 2, Mar 1994, pp. 89-98.
- [11] Kormylo J., Jain V.: *Two-pass recursive digital filter with zero phase shift*. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 22, Issue 5, Oct. 1974, pp. 384-387.
- [12] Kyriakides E., Heydt G.T, Vittal V.: *Online parameter estimation of round rotor synchronous generators including magnetic saturation*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 3, September 2005, pp. 529-537.
- [13] Mathworks Inc.: *MATLAB, Signal Processing Toolbox User's Guide*, 2001.
- [14] Paszek S.: *Use of Pareto optimisation for tuning power system stabilizers*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 60, No1, 2012, pp. 125-131.
- [15] Power Technologies, a Division of S&W Consultants IN\nc.: *Program PSS/E Application Guide*. Siemens Power Technologies Inc., 2002.
- [16] Vermeulen H.J., Strauss J.M., Shikoana V.: *Online estimation of synchronous generator parameters using PRBS perturbations*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, August 2002, pp. 674-700.
- [17] Zieliński T.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005.

## Autorzy

dr inż. Sebastian Berhausen  
 Sebastian.Berhausen@polsl.pl  
 prof. dr hab. inż. Stefan Paszek  
 Stefan.Paszek@polsl.pl  
 Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki  
 i Informatyki, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10A