

Sebastian Berhausen, Stefan Paszek  
Politechnika Śląska, Gliwice

## ESTYMACJA PARAMETRÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH GENERATORA SYNCHRONICZNEGO Z ELEKTROMASZYNOWYM UKŁADEM WZBUDZENIA PRACUJĄCEGO W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

### ESTIMATION OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF SYNCHRONOUS GENERATOR WITH ELECTROMECHANICAL EXCITATION SYSTEM WORKING IN POWER SYSTEM

**Abstract:** The paper presents parameter estimation of the mathematical model of a synchronous generator with the electromechanical excitation system working in the power system. The generator mathematical model expressed by the standard parameters of X, T type and including the stator magnetic circuit saturation was used for investigations. The dynamic waveforms caused by introduction of an additional signal PRBS to the voltage regulator are the basis for estimation. The influence of the two-input stabilizer PSS3B reaction on the quality of the generator electromagnetic parameter estimation for the system with and without the stabilizer was investigated. The least square method was applied to parameter estimation, while the gradient method was used for optimization of the mean square error.

#### 1. Wstęp

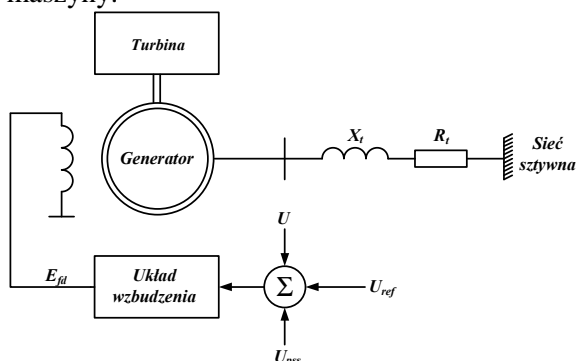
W badaniach symulacyjnych stanów dynamicznych krajowego systemu elektroenergetycznego (KSE) wykorzystywana jest baza parametrów modeli matematycznych generatorów synchronicznych, których wartości określone są na podstawie danych katalogowych i projektowych dostarczanych przez wytwórców, lub są szacowane na podstawie typowych danych publikowanych w opracowaniach naukowo-technicznych. Uzyskane w taki sposób wartości parametrów modeli matematycznych generatorów są przybliżone, obciążone w wielu przypadkach dużym błędem i nie odpowiadają aktualnym wartościom parametrów eksploatowanych maszyn. Parametry podane przez wytwórców nie uwzględniają wpływu na ich wartości warunków pracy zespołów wytwórczych oraz zmian konstrukcyjnych wprowadzonych w toku ich eksploatacji. W konsekwencji wyniki badań symulacyjnych KSE, które są podstawą planowania jego rozwoju oraz analiz zagrożeń w czasie bieżącej eksploatacji są niepewne. Parametry generatorów są również potrzebne do doboru optymalnych nastawień ich układów regulacji. Dlatego konieczne jest podjęcie prac nad pomiarowym wyznaczeniem parametrów generatorów synchronicznych zainstalowanych w KSE.

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania parametrów generatora współpracującego z systemem elektroenergetycznym, polegającą na badaniu odpowiedzi układu na zakłócenie wywołane wprowadzeniem w torze regulacji napięcia generatora sygnału pseudolosowego PRBS (*Pseudo Binary Random Sequence*) [6]. Chcąc zbadać wpływ stabilizatora systemowego na estymację parametrów maszyny wyniki estymacji porównano przy załączonym i wyłączonym stabilizatorze.

#### 2. Metodyka badań

Parametry modelu matematycznego maszyny synchronicznej można wyznaczyć (w obu osiach) na podstawie przebiegów dynamicznych wywołanych zakłóceniem ustalonej pracy generatora współpracującego z systemem elektroenergetycznym. Na rys. 1 przedstawiono schemat ideowy jednomaszynowego zespołu wytwórczego składającego się z generatora napędzanego turbiną parową, układu wzbudzenia z regulatorem napięcia i stabilizatorem systemowym połączonego poprzez linię przesyłową z siecią sztywną. Zakłócenie polega na wprowadzeniu do regulatora napięcia niewielkiej składowej napięcia zadanego  $U_{ref}$  w postaci sygnału pseudolosowego PRBS. Takie zakłócenia powodują zmiany przebiegów prądów i napięć stojana w osi podłużnej

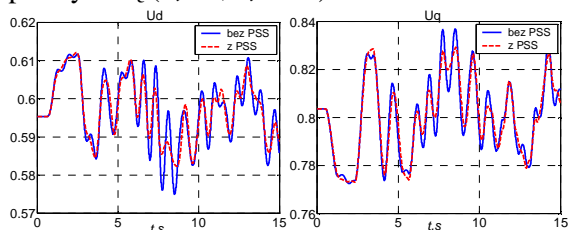
i poprzecznej, prądu wzbudzenia, prędkości kątowej wirnika oraz kąta obciążenia maszyny. Zmiany wymienionych przebiegów zależą od rodzaju układu wzbudzenia (statyczny, elektromaszynowy), struktury i parametrów regulatora napięcia oraz turbiny z jego układem regulacji. Na przebiegi dynamiczne oddziałuje również stabilizator systemowy. Ponieważ w rzeczywistych układach istnieje możliwość wyłączenia stabilizatora systemowego zbadano jego wpływ na proces estymacji parametrów maszyny.



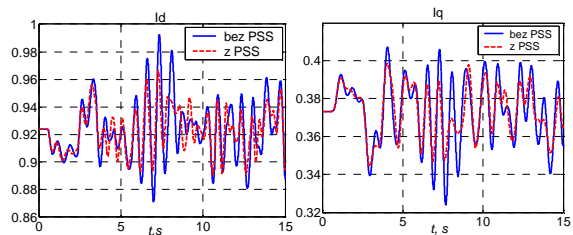
Rys. 1. Schemat ideowy jednomaszynowego zespołu wytwórczego

Do badań wykorzystano model matematyczny zespołu wytwórczego, który składa się z generatora GENROU [1, 4, 5], elektromaszynowego układu wzbudzenia KRA\_EL wraz z regulatorem napięcia [4], stabilizatora systemowego PSS3B [2, 3] oraz turbiny parowej typu IEEE1 [5].

Na rys. 2 i 3 przedstawiono przebiegi dynamiczne składowych osiowych napięć i prądów stojana generatora z uwzględnieniem i pominięciem oddziaływania na układ regulacji napięcia stabilizatora systemowego (PSS – Power System Stabilizer) w przypadku zakłócenia pracy ustalonej generatora sygnałem PRBS wprowadzonym w tor regulacji napięcia. Założono, że generator przed zakłóceniem pracował w stanie znamionowego obciążenia współpracując z siecią sztywną poprzez linię przesyłową ( $R_t = 0$ ,  $X_t = 0.3$ ).



Rys. 2. Przebiegi składowych osiowych napięć stojana generatora przy zakłóceniu pracy ustalonej maszyny sygnałem PRBS



Rys. 3. Przebiegi składowych osiowych prądów stojana generatora przy zakłóceniu pracy ustalonej maszyny sygnałem PRBS

W procesie estymacji, parametry modelu matematycznego maszyny wyznacza się w taki sposób, aby zminimalizować funkcję celu w postaci błędu średniokwadratowego pomiędzy przebiegami wzorcowymi, a przebiegami obliczonymi za pomocą modelu symulacyjnego dla poszukiwanego wektora parametrów  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{P} = [R \quad X_\sigma \quad X_{ad} \quad X'_d \quad X''_d \quad T'_{d0} \quad T''_{d0} \quad X_{aq} \quad X'_q \quad X''_q \quad T'_{q0} \quad T''_{q0}] \quad (1)$$

Do estymacji wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Błąd średniokwadratowy pomiędzy przebiegami zmierzonymi a przebiegami obliczonymi za pomocą modelu symulacyjnego dla poszukiwanego wektora parametrów  $\mathbf{P}$  określono w następujący sposób:

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

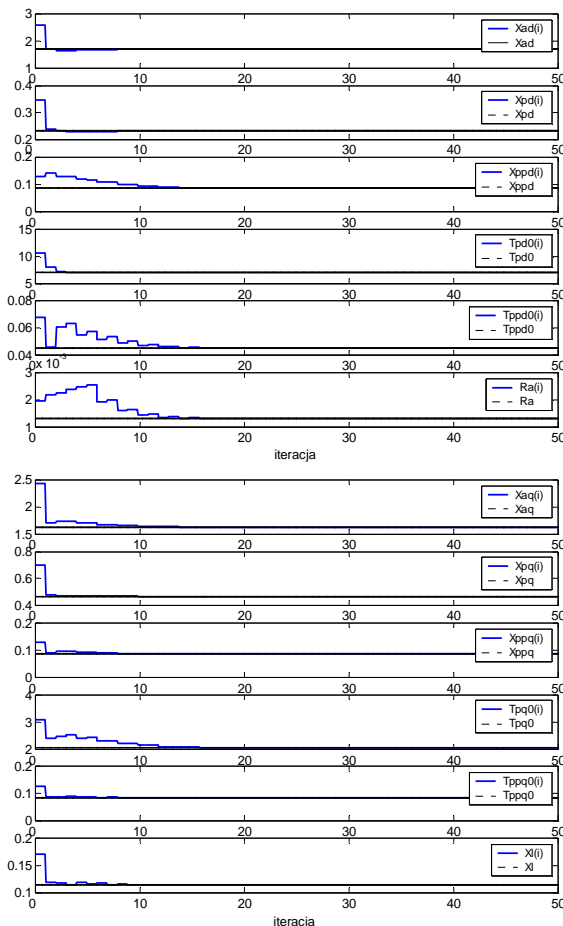
gdzie:  $I_{di}^m$ ,  $I_{qi}^m$ ,  $I_{fd}^m$ ,  $I_{di}^s(\mathbf{P})$ ,  $I_{qi}^s(\mathbf{P})$ ,  $I_{fd}^s(\mathbf{P})$  – wartości chwilowe wzorcowych sygnałów wyjściowych prądów osiowych stojana i prądu wzbudzenia ( $m$ ) oraz obliczonych dla aktualnego zbioru parametrów  $\mathbf{P}(s)$ .

Do minimalizacji błędu średniokwadratowego wykorzystano algorytm gradientowy z ograniczeniami, zawarty w Optimization Toolbox programu Matlab.

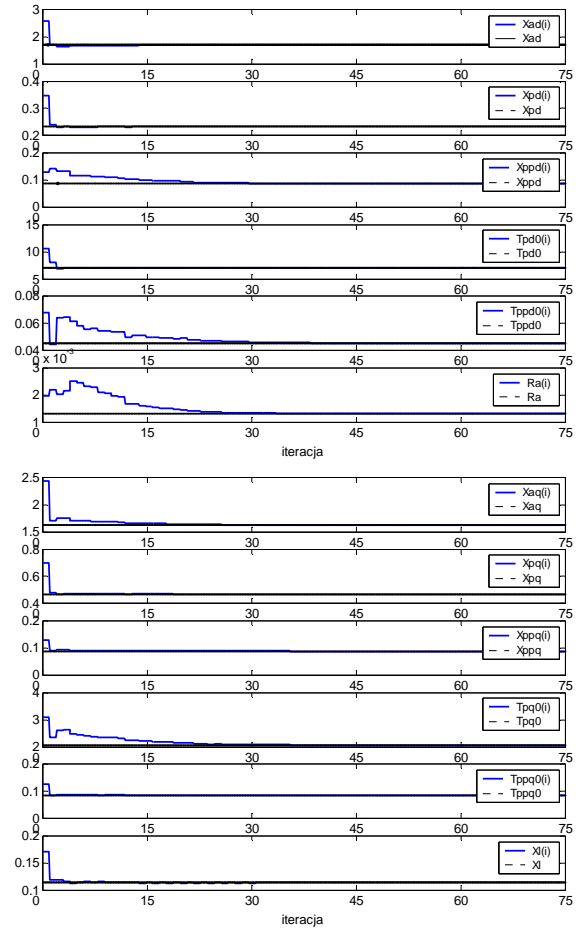
### 3. Wyniki estymacji parametrów

Estymację parametrów przeprowadzono dla turbogeneratora o danych znamionowych:  $S_N = 117.5$  MVA,  $P_N = 100$  MW,  $U_N = 13.8$  kV,  $I_N = 4915$  A,  $\cos\varphi_N = 0.85$ . Podstawą estymacji były przebiegi wzorcowe wygenerowane przez model matematyczny o znanych parametrach, które umownie nazwano parametrami

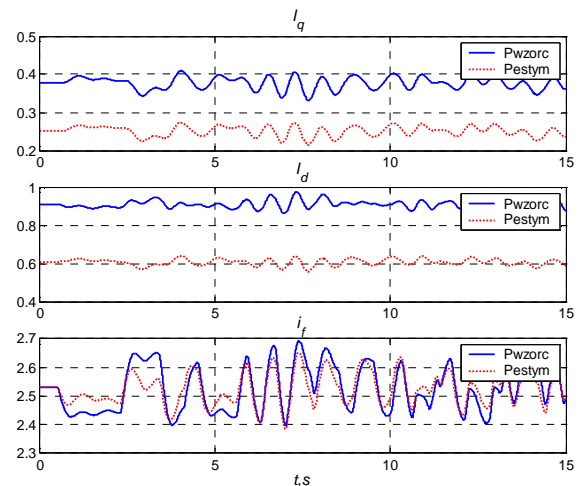
wzorcowymi. Parametry te wynikają z analizy przebiegów zakłóceń uzyskanych przy zastosowaniu innych testów pomiarowych w elektrowni (niż analizowane w niniejszym artykule) w postaci tzw. zrzutów mocy czynnej i biernej oraz skokowej zmiany napięcia zadanego regulatora napięcia generatora pracującego na biegu jałowym. Na rys. 6 przedstawiono wzorcowe przebiegi wyjściowe generatora będące podstawą estymacji obliczone dla parametrów wzorcowych (Pwzorc) oraz przebiegi symulacyjne obliczone dla wyznaczonych w pierwszej iteracji parametrów generatora (Pestym) dla przypadku wyłączanego stabilizatora systemowego. Po zakończonym procesie estymacji przebiegi wzorcowe oraz przebiegi symulacyjne obliczone dla wyznaczonych parametrów się pokrywają zarówno dla układu z jak i bez PSSu.



Rys. 4. Wykresy zmienności parametrów elektromagnetycznych generatora podczas procesu estymacji dla sygnału PRBS przy wyłączonym PSS



Rys. 5. Wykresy zmienności parametrów elektromagnetycznych generatora podczas procesu estymacji dla sygnału PRBS przy włączonym PSS



Rys. 6. Przebiegi wyjściowe wzorcowe i symulacyjne w pierwszym kroku iteracyjnym dla sygnału zakłóceńowego typu PRBS przy wyłączonym PSS

Na rys. 4 i rys. 5 przedstawiono wykresy zmienności estymowanych parametrów elektromagnetycznych w poszczególnych

iteracjach dla różnych sygnałów zakłócających normalną pracę generatora z uwzględnieniem i pominięciem wpływu stabilizatora systemowego.

W tabeli 1 zawarto wyniki końcowe estymacji parametrów oraz ich błędy względne. Wartości początkowe parametrów odchyliło od ich wartości wzorcowych o 50%.

Tabela 1. Wyniki estymacji parametrów dla sygnału PRBS

Parametr	Wartość wzorcowa	Wartość obliczona (z PSS)	Błąd [%]	Wartość obliczona (bez PSS)	Błąd [%]
$X_{ad}$	1.7006	1.7006	0.002	1.7006	0.001
$X'_d$	0.2298	0.2298	0.000	0.2298	0.000
$X''_d$	0.0842	0.0842	0.079	0.0842	0.032
$T'_{d0}$ [s]	6.9938	6.9938	0.000	6.9938	0.000
$T''_{d0}$ [s]	0.0448	0.0448	0.044	0.0448	0.021
$X_{aq}$	1.622	1.622	0.006	1.622	0.001
$X_q$	0.465	0.465	0.000	0.465	0.000
$X''_q$	0.0842	0.0846	0.454	0.0843	0.068
$T'_{q0}$ [s]	2.054	2.0537	0.016	2.0541	0.049
$T''_{q0}$ [s]	0.082	0.0821	0.100	0.082	0.015
$R$	0.0013	0.0013	0.011	0.0013	0.034
$X_\sigma$	0.113	0.113	0.000	0.113	0.002

#### 4. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że:

- Można z niewielkim błędem wyznaczyć parametry elektromagnetyczne generatora pracującego w systemie elektroenergetycznym.
- Przedstawione wyniki obliczeń świadczą o dobrej dokładności zastosowanego postępowania estymacji parametrów generatora synchronicznego przy wykorzystaniu sygnału pseudolosowego PRBS.
- Oddziaływanie PSSa nie wywiera praktycznie wpływu na proces estymacji parametrów elektromagnetycznych generatora przy zastosowaniu sygnału PRBS. Wynika to z faktu, że PSS nie jest w stanie podczas tego zakłócenia skutecznie tłumić kołysania elektromechaniczne.

W przyszłości przewiduje się wykorzystanie zaproponowanej metody do estymacji parametrów generatora na obiekcie rzeczywistym w elektrowni.

#### Literatura

- [1] De Mello F., P.Hannett L.H.: *Representation of saturation in synchronous machines*. IEEE Trans. Power Systems, Vol. PWR-1, No. 4, 1986, 8-18.
- [2] Paszek S., Pawłowski A.: *Dual input stabilizer PSS3B parameter optimisation in a single machine power system generator - infinite bus system*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1633 seria Elektryka, pp. 115-124. Gliwice 2004.
- [3] Paszek S., Pawłowski A.: *Application of power system stabilizers PSS3B to electromechanical swing damping in multi-machine power system*. Acta Technica CSAV, Academy of Sciences of the Czech Republic, Vol. 53, No. 2, 2008, 159-171.
- [4] Paszek S, Latko A., Nocoń A., Witek B., Kraszewski T.: *Planowanie rozwoju SEE z uwzględnieniem źródeł rozproszonych zapewniające bezpieczeństwo elektroenergetyczne*. Projekt badawczy zamawiany Nr PBZ-MEiN-1/2/2006, Raport z realizacji zadania 5.1.8, Politechnika Śląska, Gliwice 2008.
- [5] Power Technologies, a Division of S&W Consultants Inc.: *Program PSS/E Application Guide*.
- [6] 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.

Praca jest współfinansowana ze środków na naukę w latach 2009-2012 jako projekt badawczy NN511 352137.

#### Autorzy

Mgr inż. Sebastian Berhausen  
Dr hab. inż. Stefan Paszek, Prof. Pol. Śl.  
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny  
Instytut Elektrotechniki i Informatyki  
ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice  
E-mail: Sebastian.Berhausen@polsl.pl  
Stefan.Paszek@polsl.pl

#### Recenzent

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski