

Stefan Paszek, Piotr Pruski  
Politechnika Śląska, Gliwice

## PORÓWNANIE PRZEBIEGÓW NIEUSTALONYCH W NIELINIOWYM I ZLINEARYZOWANYM MODELU ZESPOŁU WYTWÓRCZEGO PRACUJĄCEGO W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

### COMPARISON OF TRANSIENTS FOR THE NONLINEAR AND LINEARIZED MODEL OF A GENERATING UNIT WORKING IN A POWER SYSTEM

**Abstract:** The paper presents the investigation results dealing with reconstruction of output waveforms of the nonlinear generating unit model on a basis of the state matrix eigenvalues of the model linearized at the determined working point. There were considered the waveforms of the terminal voltage, the instantaneous power and the field current of a synchronous generator in the case of step and impulse change of the regulator reference voltage. Linearization of the system model allows obtaining the results in analytical form. The exemplary calculations were carried out in Matlab - Simulink environment for the generating unit model consisting of “Configurable Subsystems” blocks enabling the choice of a generator, an excitation system, a turbine and a power system stabilizer model. The waveforms obtained from simulations on the nonlinear model were compared with those reconstructed from the eigenvalues dependently on the model complexity and nonlinearity level. There was also compared the waveform reconstruction accuracy obtained when using the all eigenvalues and when neglecting the eigenvalues of small participation factor absolute values. From the calculations it follows that the influence of the waveform reconstruction accuracy on nonlinearity of the generator magnetization characteristic is dominant, especially for loads close to the rated one. Neglecting in the waveforms reconstructed the eigenvalues of small participation factor absolute values does not result in significant deterioration of the reconstructed waveform quality, while it allows simplifying the system transmittance.

#### 1. Wstęp

Analizę stanu pracy systemu elektroenergetycznego można przeprowadzić w oparciu o znajomość równań stanu i równań wyjścia jego modelu, które w ogólnym przypadku są nieliniowe. Przebiegi wielkości wyjściowych, występujących w nieliniowym modelu systemu można odtworzyć na podstawie wartości własnych macierzy stanu modelu systemu zlinearyzowanego w punkcie pracy, co pozwala na uzyskanie wyników w postaci analitycznej [1, 2]. Celem niniejszego artykułu jest ocena dokładności odtworzenia przebiegów wyjściowych w układzie jednomaszynowym typu zespół wytwórczy – sieć sztywna w zależności od złożoności modelu tego układu oraz stopnia jego nieliniowości.

#### 2. Zlinearyzowany model systemu elektroenergetycznego

Zlinearyzowany w punkcie pracy model systemu elektroenergetycznego opisany jest równaniem stanu i równaniem wyjścia [1]:

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U, \quad (1)$$

$$\Delta Y = C \Delta X + D \Delta U, \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta X$ ,  $\Delta U$ ,  $\Delta Y$  - odchyłki wektora zmiennych stanu, wektora wymuszeń i wektora zmiennych wyjściowych. Współczynniki macierzy  $A$ ,  $B$ ,  $C$  i  $D$  równań stanu i wyjścia systemu są obliczane dla ustalonego punktu jego pracy.

#### 3. Obliczanie przebiegów wielkości wyjściowych zlinearyzowanego modelu systemu

Przebiegi wielkości wyjściowych zlinearyzowanego modelu systemu można obliczyć bezpośrednio, całkując równanie stanu, lub przy wykorzystaniu wartości i wektorów własnych macierzy stanu  $A$  [1]. Przebieg  $i$ -tej wielkości wyjściowej (przy  $D = 0$ ) ma postać:

– dla zakłócenia w postaci skokowej zmiany wymuszenia  $\Delta U(t) = \Delta U \mathbf{1}(t)$ :

$$\Delta Y_i = \sum_{h=1}^n A_{ih} \frac{e^{\lambda_h t} - 1}{\lambda_h} \Delta U, \quad (3)$$

– dla zakłócenia w postaci impulsowej zmiany wymuszenia  $\Delta U(t) = \Delta U \delta(t)$ :

$$\Delta Y_i = \sum_{h=1}^n A_{ih} e^{\lambda_h t} \Delta U, \quad (4)$$

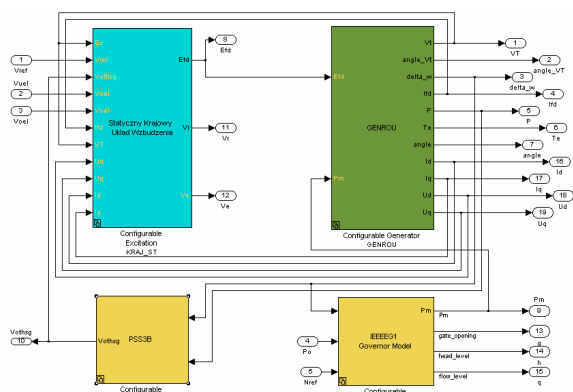
przy czym:

$$A_{ih} = C_i V_h W_h^T B, \quad (5)$$

gdzie:  $\lambda_h$  -  $h$ -ta wartość własna macierzy stanu,  $A_{ih}$  - czynnik udziału  $h$ -tej wartości własnej w przebiegu  $i$ -tej wielkości wyjściowej,  $C_i$  -  $i$ -ty wiersz macierzy  $C$ ,  $V_h$  -  $h$ -ty prawostronny wektor własny macierzy stanu,  $W_h$  -  $h$ -ty lewostronny wektor własny macierzy stanu. Wartości  $\lambda_h$  oraz  $A_{ih}$  mogą być rzeczywiste lub zespolone.

#### 4. Przykładowe obliczenia

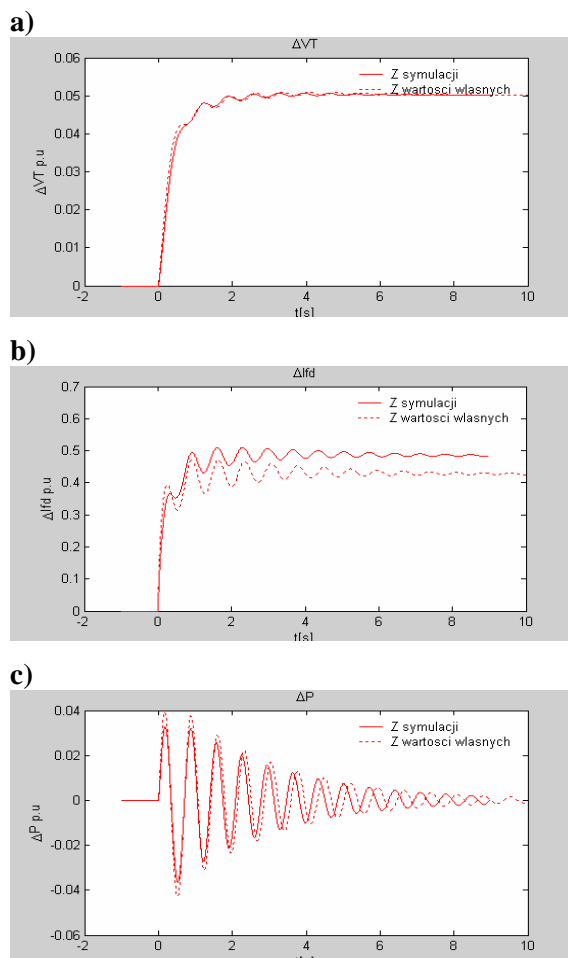
Przykładowe obliczenia przeprowadzono w środowisku Matlab – Simulink, dla modelu zespołu wytwórczego, składającego się z bloków typu „Configurable Subsystems” pozwalających na wybór modelu generatora, układu wzbudzenia, turbiny oraz stabilizatora systemowego [3]. Model ten przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Model zespołu wytwórczego w środowisku Matlab – Simulink

W pierwszej kolejności założono zakłócenie w postaci skokowej zmiany napięcia zadanego regulatora napięcia w układzie wzbudzenia generatora  $\Delta U_z(t) = \Delta U_z \mathbf{1}(t)$ ,  $\Delta U_z = 0.05 * U_{zu}$ ,  $U_{zu}$  - napięcie zadane w stanie ustalonym. Na rys. 2 przedstawiono porównanie przebiegów zmian napięcia na zaciskach  $\Delta V_T$ , prądu

wzbudzenia  $\Delta I_{fd}$  oraz mocy chwilowej  $\Delta P$  generatora dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u., uzyskanych z symulacji na modelu nieliniowym oraz obliczonych z wartości własnych, w układzie z generatorem GENROU o nieliniowej charakterystyce magnesowania [3, 4], turbiną parową IEEEG1 [3], oraz układem wzbudzenia KRAJ\_ST [3], bez stabilizatora systemowego.



Rys. 2. Porównanie przebiegów uzyskanych z symulacji i odtworzonych z wartości własnych a) napięcia  $\Delta V_T$ , b) prądu wzbudzenia  $\Delta I_{fd}$ , c) mocy chwilowej  $\Delta P$  generatora synchronicznego dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u. w układzie bez stabilizatora systemowego

W tabeli 1 przedstawiono wartości własne zlinearyzowanego modelu oraz czynniki udziału dla poszczególnych wielkości wyjściowych.

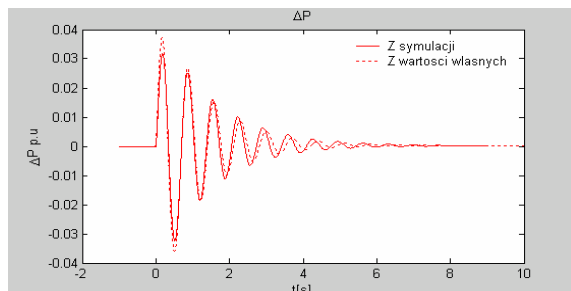
Na rys. 3 przedstawiono przebieg mocy chwilowej w układzie z generatorem GENROU o nieliniowej charakterystyce magnesowania, turbiną parową IEEEG1, układem wzbudzenia

KRAJ\_ST i stabilizatorem systemowym PSS3B [3], dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u. Zastosowanie stabilizatora systemowego powoduje szybsze ustalanie się przebiegów mocy chwilowej generatora.

Tabela 1

Wartości własne i czynniki udziału w układzie bez stabilizatora systemowego

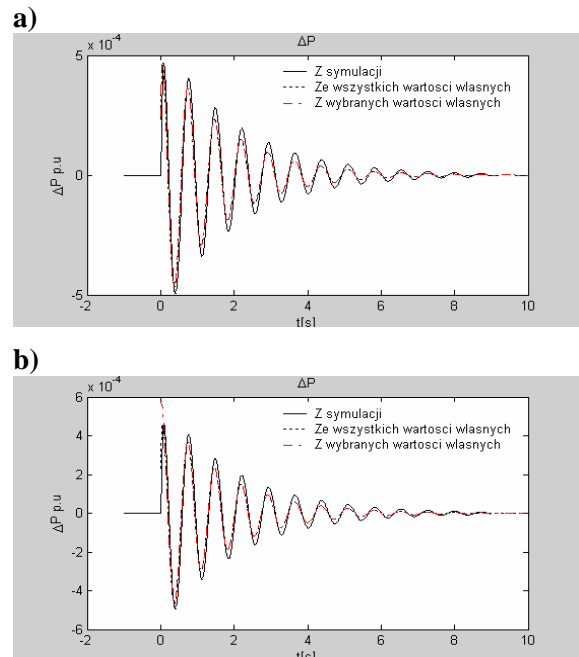
Wartości własne	Czynniki udziału $\cdot 10^{-3}$		
	$\Delta V_T$	$\Delta I_{fd}$	$\Delta P$
-0.37627 $\pm j8.7086$	-8.2701 $\mp j4.3057$	373.49 $\mp j54.211$	220.59 $\pm j38.336$
-51.128	-1.1265	177.55	-3.1403
-42.158	-0.05684	-2.1321	0.33808
-23.716	-149.41	3092	-373.25
-15.82	-10.673	188.96	40.993
-15.315	11.592	-200.35	-47.14
-4.9981	214.84	1114.7	118.55
-3.3278	-0.33016	-5.1767	-1.7822
-2.2154	0.30758	6.7851	2.6498
-0.82044	13.963	76.394	0.12609
-0.35671	-1.6314	-12.997	-0.12287
-0.24877	-0.03313	-0.94553	-0.32506



Rys. 3. Przebieg zmian mocy chwilowej generatora synchronicznego dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u. w układzie ze stabilizatorem systemowym

Na rys. 4 przedstawiono przebieg zmian mocy chwilowej dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u. w modelu zawierającym tylko generator GENROU o liniowej charakterystyce magnesowania. Pominięto oddziaływanie układu wzbudzenia i turbiny. Założono zakłócenie w postaci impulsowej zmiany napięcia wzbudzenia generatora  $\Delta E_{fd}(t) = \Delta E_{fd} \delta(t)$ ,  $\Delta E_{fd} = 0.05 \cdot E_{fd0}$ ,  $E_{fd0}$  - napięcie wzbudzenia w stanie ustalonym. Obok przebiegu uzyskanego z symulacji na modelu nieliniowym oraz odtworzonego ze wszystkich wartości własnych, przedstawiono także przebieg odtworzony z pominięciem wartości

własnych o numerach 3, 5 i 6 (rys. 4a) oraz przebieg odtworzony z pominięciem wartości własnych o numerach 3, 4, 5 i 6 (rys. 4b). Wyżej wymienione składowe modalne zostały pominięte ze względu na małe wartości modułów ich czynników udziału (wartości własne 3, 5 i 6 z tabeli 2) lub ze względu na odpowiednio szybkie zanikanie tych składowych (wartość własna 4 z tabeli 2).



Rys. 4. Przebieg zmian mocy chwilowej przy impulsowej zmianie napięcia wzbudzenia w modelu zawierającym tylko generator GENROU dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u. Pominięto wartości własne o numerach a) 3, 5 i 6, b) 3, 4, 5 i 6

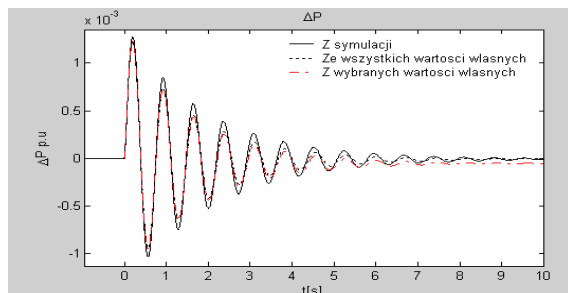
Tabela 2

Wartości własne i czynniki udziału dla przebiegu mocy chwilowej w modelu zawierającym tylko generator.

Lp.	Wart. własne	Cz. udziału $\cdot 10^{-3}$
1	$-0.6188 + j8.6502$	$2.8761 - j0.4736$
2	$-0.6188 - j8.6502$	$2.8761 + j0.4736$
3	-42.168	0.0050931
4	-28.643	-3.3077
5	-1.8167	-0.12298
6	-0.23244	0.0062242

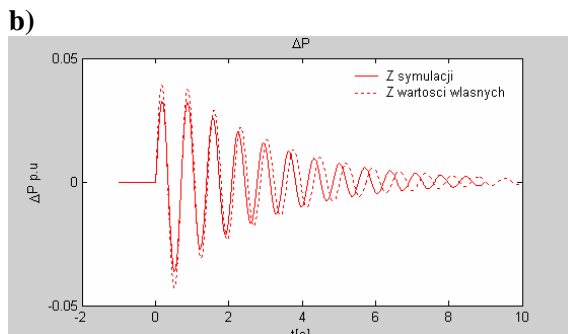
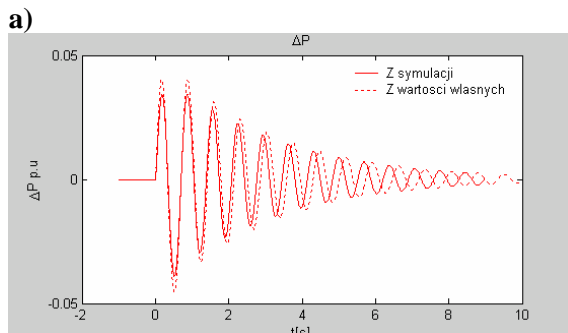
Na rys. 5 przedstawiono przebieg zmian mocy chwilowej dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u. w modelu zawierającym tylko generator GENROU o liniowej charakterystyce magnesowania, przy założeniu zakłócenia w

postaci skokowej zmiany napięcia wzbudzenia. W tym przypadku pominięto wartości własne o numerach 3 i 6 (patrz tab. 2).



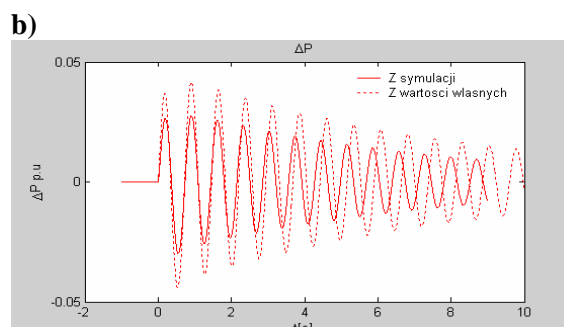
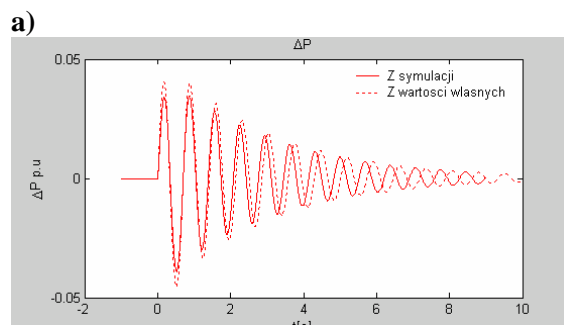
Rys. 5. Przebieg zmian mocy chwilowej przy skokowej zmianie napięcia wzbudzenia w modelu zawierającym tylko generator GENROU dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u.

Wpływ nieliniowości charakterystyki magnesowania generatora na przebiegi wielkości wyjściowych modelu rośnie wraz ze wzrostem obciążenia generatora. Wpływ ten przedstawiono na przykładzie przebiegów zmian mocy chwilowej dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u (rys. 6) oraz znamionowego punktu pracy  $P_0 = 0.8$  p.u. i  $Q_0 = 0.5$  p.u (rys. 7), w układzie z generatorem GENROU, układem wzbudzenia KRAJ\_ST, turbiną IEEEG1, bez stabilizatora systemowego.



Rys. 6. Przebiegi zmian mocy chwilowej w przypadku a) liniowej charakterystyki

magnesowania generatora, b) nieliniowej charakterystyki magnesowania generatora, dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u.



Rys. 7. Przebiegi zmian mocy chwilowej w przypadku a) liniowej charakterystyki magnesowania generatora, b) nieliniowej charakterystyki magnesowania generatora, dla punktu pracy  $P_0 = 0.8$  p.u. i  $Q_0 = 0.5$  p.u.

## 5. Podsumowanie

Z badań przedstawionych w niniejszej pracy wynika, że:

- Spośród porównywanych przebiegów wyjściowych zespołu wytwórczego najlepiej został odtworzony przebieg zmian napięcia  $\Delta V_T$ , a najgorzej przebieg zmian prądu wzbudzenia  $\Delta I_{fd}$ .
- Przebieg zmian mocy chwilowej w układzie zawierającym stabilizator systemowy jest znacznie lepiej odtwarzany, niż w układzie nie zawierającym stabilizatora systemowego, mimo, że obecność stabilizatora powoduje wzrost złożoności układu.
- Z przebiegów mocy chwilowej w złożonych modelach zespołu wytwórczego (zawierających oprócz generatora także turbinę, układ wzbudzenia oraz ewentualnie stabilizator systemowy) wynika, że jakość odtworzenia przebiegu pogarsza się wraz z upływem czasu od wystąpienia zakłócenia, co ujawnia się rosnącym przesunięciem fazowym między przebiegiem uzyskanym z symulacji, a odtworzonym z wartości własnych.

- W przypadku modelu zawierającego tylko generator, przebieg zmian mocy chwilowej, odtworzony z wartości własnych, jest bardziej zbliżony do przebiegu uzyskanego z symulacji, co jest spowodowane dużo prostszym modelem.
- Zaniedbanie wartości własnych o małych amplitudach czynników udziału nie powoduje znacznego pogorszenia jakości odtworzenia przebiegu, a pozwala na uproszczenie transmitancji układu. W przypadku wymuszenia w postaci impulsowej zmiany wielkości wejściowej przebieg mocy chwilowej w układzie zawierającym tylko generator może być poprawnie odtworzony z użyciem mniejszej liczby wartości własnych, niż w przypadku wymuszenia w postaci skokowej zmiany wielkości wejściowej.
- Pominięcie składowej modalnej związanej z wartością własną nr 4 (tabela 2) powoduje tylko nieznaczne pogorszenie odtworzenia przebiegów mocy chwilowej generatora przy wymuszeniu impulsowym. Ta składowa modalna mimo stosunkowo dużej amplitudy szybko zanika w czasie – jest pomijalnie mała już po około 0.2 s.
- Dokładność odtworzenia przebiegów wyjściowych modelu zespołu wytwórczego na podstawie wartości własnych macierzy stanu modelu zlinearyzowanego w ustalonym punkcie pracy zależy przede wszystkim od stopnia nieliniowości tego modelu.
- Dla znamionowego punktu pracy  $P_0 = 0.8$  p.u. i  $Q_0 = 0.5$  p.u., w przypadku nieliniowej charakterystyki magnesowania generatora, przebieg mocy chwilowej jest znacznie gorzej odtwarzany, niż w przypadku liniowej charakterystyki magnesowania. Dla punktu pracy  $P_0 = 0.5$  p.u. i  $Q_0 = 0.2$  p.u. nieliniowość

charakterystyki magnesowania nie ma istotnego wpływu na jakość odtworzenia tego przebiegu.

W przyszłości planowane są badania nad układem wielomaszynowym oraz oceną stabilności systemu w oparciu o przebiegi mocy chwilowej zarejestrowane przez urządzenia WAMS.

## Literatura

- [1] Kudła J., Paszek S.: *Redukcja postaci transmitancji w systemach elektroenergetycznych*. 18-te Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, SPETO'95, tom 2, ss. 299-304.
- [2] Paszek S.: *Optymalizacja stabilizatorów systemowych w systemie elektroenergetycznym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej w Gliwicach, nr 1388, Gliwice 1998.
- [3] Paszek S., Pawłowski A.: *Optymalizacja parametrów dwuwejściowego stabilizatora systemowego PSS3B w jednomaszynowym systemie elektroenergetycznym generator – sieć sztywna*. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej nr 1633 seria Elektryka, ss. 115 – 124. Gliwice 2004.
- [4] F. De Mello, P. Hannett L. H.: *Representation of Saturation in Synchronous Machines*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 4, pp. 8-18, 1986.

## Autorzy

dr hab. inż. Stefan Paszek, prof. Pol. Śl.  
 e-mail: stefan.paszek@polsl.pl  
 mgr inż. Piotr Pruski  
 e-mail: piotr.pruski@polsl.pl  
 Wydział Elektryczny  
 Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Informatyki  
 ul. Akademicka 10  
 44-100 Gliwice

## Recenzent

*Prof. dr hab. inż. Jan Zawilak*