# Analiza dokładności obliczeń elektromechanicznych wartości własnych systemu elektroenergetycznego na podstawie analizy przebiegów kołysań mocy

# Analysis of calculation accuracy of power system electromechanical eigenvalues based on power swing waveforms

Piotr Pruski, *Politechnika Śląska* (22.02.2011, dr hab. Stefan Paszek, prof. Pol. Śl, *Politechnika Śląska*)

#### Abstract

The paper presents investigation results concerning the accuracy analysis of calculating electromechanical eigenvalues of the multimachine power system (PS) state matrix based on power swing waveforms when taking into account introduction of a disturbance to different units. There were analysed the power swing waveforms occurring after introducing the disturbance in the form of a rectangular impulse of different height to the voltage regulation system of generators in generating units of different powers. In order to increase the computation accuracy, computations were repeated many times. The computation results were averaged. The hybrid algorithm consisting of the genetic and gradient algorithms was used for computations.

Disturbance in a generating unit of large power results in stronger power swings in other generating units than a disturbance in a generating unit of small power. It allows easier separation of power swing waveforms from the recorded phase current and voltage waveforms as well as increase in the calculation accuracy of the eigenvalues.

Increase in the step value of change of the voltage regulator reference voltage results in slight increase in influence of nonlinearities occurring in the system on the instantaneous power swing waveform. However, it does not cause significant worsening of the calculation accuracy of the eigenvalues.

#### Streszczenie

Artykuł prezentuje wyniki badań, dotyczących analizy dokładności obliczeń elektromechanicznych wartości własnych macierzy stanu wielomaszynowego systemu elektroenergetycznego (SEE) na podstawie przebiegów kołysań mocy chwilowej przy uwzględnieniu zmiany miejsca wprowadzanego zakłócenia. Analizowano przebiegi kołysań mocy występujące po wprowadzeniu zakłócenia w postaci impulsu prostokątnego o różnej wysokości w układzie regulacji napięcia generatorów w zespołach wytwórczych o różnych mocach. W celu zwiększenia dokładności obliczenia powtarzano wielokrotnie. Wyniki obliczeń uśredniono. Do obliczeń wykorzystano algorytm hybrydowy, będący połączeniem algorytmu genetycznego i gradientowego.

# 1. Wstęp

Do oceny stabilności kątowej SEE można wykorzystać wskaźniki stabilności [1], obliczane na podstawie elektromechanicznych wartości własnych macierzy stanu SEE. Wartości własne można obliczyć z równań stanu SEE, jednak wyniki obliczeń zależą wówczas od wartości elementów macierzy stanu SEE, a pośrednio od przyjętych modeli elementów SEE i ich niepewnych parametrów [2]. Wartości własne można również obliczyć z dobrą dokładnością na podstawie analizy rzeczowistych przebiegów zakłóceniowych, pojawiających się w SEE po różnych zakłóceniach. W tym przypadku na wyniki obliczeń nie oddziałuje przyjęty model SEE i jego parametry, tylko aktualny stan pracy układu. Celem niniejszej pracy jest analiza dokładności obliczeń elektromechanicznych wartości własnych SEE na podstawie analizy przebiegów kołysań mocy w zespołach wytwórczych SEE w zależności od amplitudy i miejsca wprowadzenia zakłócenia.

# 2. Zlinearyzowany model systemu elektroenergetycznego

Zlinearyzowany w punkcie pracy model systemu elektroenergetycznego opisany jest równaniem stanu i wyjścia [3]:

$$\Delta X = A \Delta X + B \Delta U \tag{1}$$

$$\Delta Y = C \Delta X + D \Delta U \tag{2}$$

gdzie:  $\Delta X$ ,  $\Delta U$ ,  $\Delta Y$  - odchylki wektora zmiennych stanu, wektora wymuszeń i wektora zmiennych wyjściowych.

Przebiegi wielkości wyjściowych zlinearyzowanego modelu SEE można obliczyć bezpośrednio, całkując równanie stanu, lub przy wykorzystaniu wartości i wektorów własnych macierzy stanu A[4]. Przy zakłóceniu w postaci impulsowej zmiany *j*-tej wielkości wymuszającej  $\Delta U_j(t) = \Delta U \delta(t)$ przebieg *i*-tej wielkości wyjściowej (przy D = 0) ma postać:

$$\Delta Y_i = \sum_{h=1}^{n-1} F_{ih} e^{\lambda_h t} \tag{3}$$

przy czym:

$$F_{ih} = \boldsymbol{C}_i \boldsymbol{V}_h \boldsymbol{W}_h^T \boldsymbol{B}_j \Delta U \tag{4}$$

gdzie:  $\lambda_h = \alpha_h + j\nu_h$  - wartość własna macierzy stanu,  $F_{ih}$  - czynnik udziału *h*-tej wartości własnej w przebiegu *i*-tej wielkości wyjściowej,  $C_i$  - *i*-ty wiersz macierzy C,  $V_b$ ,  $W_b$  - *b*-ty prawostronny i lewostronny wektor własny macierzy stanu,  $B_j$  - *j*-ta kolumna macierzy B, *n* - liczba zespołów wytwórczych SEE.

#### 3. Elektromechaniczne wartości własne

W przypadku przebiegów kołysań mocy chwilowej w SEE decydujące znaczenie mają elektromechaniczne wartości własne, które są związane z ruchem wirników zespołów wytwórczych. Są to zespolone sprzężone wartości własne, których części urojone odpowiadają zwykle zakresowi częstotliwości (0,1÷2 Hz). Zatem części urojone tych wartości własnych mieszczą się w zakresie (0,63÷12,6 rad/s). W zależności od wartości części rzeczywistych wartości własnych, odpowiadające im składowe modalne mogą zanikać w czasie z różną szybkością (dla ujemnych wartości części rzeczywistych), lub narastać w czasie (dla dodatnich wartości części rzeczywistych), co oznacza utratę stabilności lokalnej (statycznej) systemu dla małych zakłóceń. Elektromechaniczne wartości własne w różny sposób interweniują w przebiegach mocy chwilowej poszczególnych zespołów wytwórczych, co jest związane z różnymi wartościami ich czynników udziału.

#### 4. Przykładowe obliczenia

Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla 7 – maszynowego SEE CIGRE (rys. 1).



Fig.1. Analysed 7 - machine PS CIGRE

Wykorzystana w badaniach metoda obliczeń elektromechanicznych wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów mocy chwilowej W poszczególnych jednostkach wytwórczych za pomocą wyrażenia (3). Elektromechaniczne wartości własne i czynniki udziału poszczególnych składowych modalnych są nieznanymi parametrami tej aproksymacji. W procesie aproksymacji parametry te dobierane są iteracyjnie w taki sposób, aby zminimalizować wartość funkcji celu, określonej jako bład średniokwadratowy, występujący miedzy przebiegiem aproksymowanym a aproksymującym:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{w}}(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{F}) = \sum_{i=1}^{N} \left( \left| P_{i(\mathrm{m})} - P_{i(\mathrm{a})}(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{F}) \right| \right)^{2}$$
(5)

gdzie:  $\lambda$  – wektor elektromechanicznych wartości własnych, F – wektor czynników udziału, N – liczba próbek przebiegów, indeks m oznacza przebieg aproksymowany, a indeks a - przebieg aproksymujący mocy chwilowej P, obliczony na podstawie poszukiwanych wartości własnych i czynników udziału. Do minimalizacji funkcji celu (3) wykorzystano algorytm hybrydowy, stanowiący szeregowe połączenie algorytmów genetycznego i gradientowego.

Jako dane wejściowe do obliczeń (przebiegi aproksymowane) docelowo wykorzystywane będą przebiegi mocy chwilowej pochodzące z pomiarów. Jednak na razie, w celu sprawdzenia metody obliczeń, wykorzystywane są przebiegi mocy chwilowej uzyskane z symulacji przy użyciu modelu SEE.

Opracowano model analizowanego SEE w środowisku programu Matlab-Simulink. Model każdego z zespołów wytwórczych, wchodzących w skład modelowanego systemu, zawiera bloki typu "*Configurable Subsystems*". Bloki te pozwalają na wybór modeli poszczególnych elementów zespołu wytwórczego: generatora, układu wzbudzenia, turbiny oraz stabilizatora systemowego. Modele tych elementów zapisane są w bibliotekach programu Matlab-Simulink. W obliczeniach dotyczących niniejszego artykułu wzięto pod uwagę modele: generatora synchronicznego GENROU z nieliniową charakterystyką magnesowania [4, 5], statycznego układu wzbudzenia, pracującego w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym [4], turbiny parowej IEEEG1 [4] i stabilizatora systemowego PSS3B [4].

Przyjęto zakłócenie W postaci impulsu prostokątnego napięcia zadanego regulatora napięcia w jednym z zespołów wytwórczych. Odpowiedź układu na wymuszenie w postaci krótkotrwałego impulsu prostokątnego (o odpowiednio dobranej wysokości i szerokości) jest zbliżona do odpowiedzi układu na wymuszenie w postaci impulsu Diraca. Wzięto pod uwagę przypadki wprowadzenia zakłócenia w zespole wytwórczym G4 (moc pozorna znamionowa generatora 588 MV·A) oraz w zespole wytwórczym G6 (moc pozorna znamionowa generatora 75 MV·A). W obu przypadkach wzięto pod uwagę impulsy o wysokości -5% i -10% wartości ustalonej napięcia zadanego regulatora napięcia. Przykładowo na rys. 2 przedstawiono przebiegi prądów fazowych twornika generatora w zespole wytwórczym G7 po wystąpieniu zakłócenia impulsowego o wysokości -5% wartości ustalonej napięcia zadanego regulatora napięcia w zespołach wytwórczych G4 i G6. We wszystkich analizowanych w artykule przypadkach czas trwania zakłócenia impulsowego wynosił 200 ms.



Rys.2. Przebiegi prądów fazowych twornika generatora w zespole wytwórczym G7 przy zakłóceniu w zespole wytwórczym G4 (a) i G6 (b)

Fig.2. Waveforms of generator armature phase currents in G7 generating unit for disturbance in G4 (a) and G6 (b) generating unit Z rys. 2 wynika, że zakłócenie w zespole G4 o dużej mocy wywołało silniejsze kołysania w zespole G7, niż zakłócenie w zespole G6 o małej mocy.

W tablicy 1 zestawiono elektromechaniczne wartości własne, obliczone bezpośrednio na podstawie modelu SEE w programie Matlab-Simulink, które są nazywane w artykule *oryginalnymi wartościami własnymi*.

	lab.1.
Oryginalne wartości własne analizowanego	SEE
Original eigenvalues of the PS analysed	

λ1	-0,881±j10,443	$\lambda_2$	$-0,826\pm10,620$	$\lambda_3$	-0,763±j9,669	
$\lambda_4$	-0,527±j8,748	$\lambda_5$	-0,417±j7,872	$\lambda_6$	-0,189±j6,542	

Przykładowo na rys. 3 przedstawiono przebiegi nieustalone mocy chwilowej zespołu wytwórczego G4 przy zakłóceniu w tym zespole, pochodzące z symulacji (linia ciagła) i odtworzone z oryginalnych wartości własnych (linia przerywana). Uwzględniono impuls o wysokości -5% i -10% wartości ustalonej napięcia zadanego regulatora napięcia.





Na rys. 3 można zauważyć, że wraz ze wzrostem wysokości impulsu nieznacznie pogorszyła się jakość odtworzenia przebiegu symulacyjnego na podstawie oryginalnych wartości własnych, co jest spowodowane silniejszym wpływem nieliniowości występujących w modelu SEE.

Obliczenia wartości własnych przeprowadzano wielokrotnie na podstawie analizy przebiegów mocy chwilowej kolejnych zespołów wytwórczych. Odrzucano wyniki o wartościach funkcji celu większych, niż pewna przyjęta wartość graniczna.

Przykładowe histogramy dla wyników obliczeń części rzeczywistej i części urojonej wartości własnej λ<sub>2</sub> na podstawie przebiegów kołysań mocy w zespole G2 przy zakłóceniu w zespole G4 przedstawia rys. 4. Ciemne słupki oznaczają wyniki przyjęte do dalszych obliczeń, a jasne słupki - wyniki odrzucone. Cienkie pionowe linie pośrodku histogramów odpowiadają części rzeczywistej i części urojonej oryginalnej wartości własnej  $\lambda_4$ .



Rys.4. Histogramy części rzeczywistej i urojonej wartości własnej  $\lambda_4$ , obliczonych na podstawie przebiegów kołysań mocy w zespole G2 przy zakłóceniu w zespole G4 Fig.4. The histograms of the real and imaginary parts of the eigenvalue  $\lambda_4$  calculated from the power swing waveforms in G2 unit for disturbance in G4 unit

Jako wynik końcowy obliczeń przyjęto średnie arytmetyczne części rzeczywistych i części urojonych wartości własnych, obliczonych na podstawie przebiegów mocy chwilowej poszczególnych zespołów wytwórczych. W tablicy 2 zestawiono błędy obliczeń wartości własnych przy rozpatrywanych zakłóceniach.

# Błędy obliczeń wartości własnych Calculation errors of eigenvalues

Skok -5% napięcia zadanego regulatora napięcia w zespole G4  $\Delta \lambda_1 - 0,1625 \pm j0,0119 \Delta \lambda_2 0,0310 \mp j0,0526 \Delta \lambda_3 0,0524 \mp j0,1105$  $-0,0275 \pm j0,0345 \Delta \lambda_5 0,0219 \pm j0,0091 \Delta \lambda_6$ Δλ -0,0167±j0,0191 Skok -10% napięcia zadanego regulatora napięcia w zespole G4  $\Delta \lambda_1 = 0.1803 \pm j0.0084 \Delta \lambda_2 = 0.0414 \mp j0.0597 \Delta \lambda_3 = 0.0499 \mp j0.1537$ <sub>4</sub> -0,0080∓j0,0341 Δλ<sub>5</sub> 0,0196∓j0,0226 -0,0125±j0,0222 Δλ  $\Delta\lambda_6$ Skok -5% napięcia zadanego regulatora napięcia w zespole G6  $\Delta \lambda_1 = 0.0851 \pm j0.0932 \Delta \lambda_2 = 0.0263 \pm j0.0906 \Delta \lambda_3 = 0.0707 \pm j0.0915$  $\Delta \lambda_4 = 0.0371 \pm j0.1343 \Delta \lambda_5 = 0.0165 \pm j0.0569 \Delta \lambda_6$ -0,01167j0,0163 Skok -10% napięcia zadanego regulatora napięcia w zespole G6  $\Delta \lambda_1 = 0.0714 \pm j0.0890 \Delta \lambda_2 = 0.0184 \pm j0.0598 \Delta \lambda_3 = 0.0826 \pm j0.0652$  $-0.0105 \pm i0.0421 \Delta \lambda_5 - 0.0172 \pm i0.0574 \Delta \lambda_6$ -0,0115*∓*j0,0166

# 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że:

• Zakłócenie w zespole wytwórczym o dużej mocy powoduje silniejsze kołysania mocy w pozostałych zespołach wytwórczych, niż zakłócenie w zespole wytwórczym o małej mocy. Pozwala to na łatwiejsze wyodrębnienie przebiegów kołysań mocy z zarejestrowanych przebiegów napięć i prądów fazowych i zwiększenie dokładności obliczeń wartości własnych.

• Zwiększenie wartości skokowej zmiany napięcia zadanego regulatora napięcia powoduje nieznaczne zwiększenie wpływu nieliniowości występujących w systemie na przebieg kołysań mocy chwilowej. Nie spowodowało to jednak znaczącego pogorszenia dokładności obliczeń wartości własnych.

# Literatura

- 1. Paszek S., Nocoń A.: The method for determining angular stability factors based on power waveforms, AT&P Journal Plus2, Power System Modeling and Control, Bratislava, Slovak Republic 2008, pp. 71-74.
- 2. Cetinkaya, H.B., Ozturk, S., Alboyaci, B.: Eigenvalues Obtained with Two Simulation Packages (SIMPOW and PSAT) and Effects of Machine Parameters on Eigenvalues, Electrotechnical Conference, 2004. MELECON 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean, Vol. 3, pp. 943 -946.
- 3. Barros, L.S., Mota, W.S., Moura, D.F.P.: Matrix Method to Linearization and State Space Representation of Power Systems Containing Doubly Fed Induction Machines Operating as Wind Generators, Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES, pp. 1-6.
- 4. Paszek S., Pruski P.: Wyznaczanie elektromechanicznych wartości własnych macierzy stanu systemu elektroenergetycznego na podstawie przebiegów zakłóceniowych mocy chwilowej, XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa "Aktualne problemy w elektroenergetyce", Jurata 2011, tom I, s. 237-245.
- 5. F. De Mello, P. Hannett L. H.: Representation of Saturation in Synchronous Machines. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 4, 1986, pp. 8-18.

# Adres służbowy Autora:



Mgr inż. Piotr Pruski Politechnika Śląska ul. Akademicka 10 44-100 Gliwice tel. (032) 237 19 09

email: piotr.pruski@polsl.pl

Tab.2.

444