

*system elektroenergetyczny, wartości własne związane ze zjawiskami elektromechanicznymi, stany nieustalone, odtwarzanie przebiegów*

Piotr PRUSKI, Stefan PASZEK\*

## **OCENA STABILNOŚCI KĄTOWEJ KRAJOWEGO SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO NA PODSTAWIE ANALIZY PRZEBIEGÓW ZAKŁÓCENIOWYCH MOCY CHWILOWEJ**

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń wskaźników stabilności Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) określonych na podstawie wartości własnych macierzy stanu modelu KSE związanych ze zjawiskami elektromechanicznymi. Wartości własne obliczono na podstawie przebiegów zakłóceń mocy chwilowej w poszczególnych węzłach wytwórczych, występujących po wprowadzeniu, do układu regulacji napięcia jednego z zespołów wytwórczych, zakłócenia w postaci prostokątnego impulsu o określonej wysokości i długości. Wykorzystana w artykule metoda obliczeń wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów mocy chwilowej przebiegami stanowiącymi superpozycję składowych modalnych, których parametry zależą od poszukiwanych wartości własnych i ich czynników udziału. Do minimalizacji funkcji celu określonej jako błąd średniokwadratowy, występujący między przebiegami aproksymowanymi i aproksymującymi wykorzystano algorytm hybrydowy, stanowiący połączenie algorytmu genetycznego i gradientowego.

### **1. WSTĘP**

Zachowanie stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego (SEE) jest jednym z najważniejszych aspektów jego pracy. Utrata stabilności kątowej SEE może doprowadzić do poważnych awarii systemowych, skutkujących brakiem zasilania ogromnej liczby odbiorców. Do oceny stabilności kątowej SEE można wykorzystać wskaźniki stabilności [2], obliczane na podstawie 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. Wartości własne można również obliczyć z dobrą

---

\* Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice.

dokładnością na podstawie analizy rzeczywistych przebiegów zakłóceń, pojawiających się w SEE po różnych zakłóceniach [4]. W tym przypadku na wyniki obliczeń nie wpływa przyjęty model SEE i jego parametry, tylko aktualny stan pracy układu. Celem niniejszej pracy jest wyznaczenie wskaźników stabilności Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) przy wykorzystaniu wartości własnych, obliczonych na podstawie analizy przebiegów zakłóceń mocy chwilowej w zespołach wytwórczych KSE.

## 2. ZLINEARYZOWANY MODEL SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

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

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

gdzie:  $\Delta \mathbf{X}$ ,  $\Delta \mathbf{U}$ ,  $\Delta \mathbf{Y}$  – odchyłki wektora zmiennych stanu, wektora wymuszeń i wektora zmiennych wyjściowych. Elementy macierzy  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  i  $\mathbf{D}$  są obliczane dla ustalonego punktu pracy.

Przebiegi wielkości wyjściowych zlinearyzowanego modelu SEE można obliczyć bezpośrednio, całkując równanie stanu, lub na podstawie wartości własnych i wektorów własnych macierzy stanu  $\mathbf{A}$  [1]. Przebieg danej wielkości wyjściowej stanowi superpozycję składowych modalnych zależnych od wartości własnych i wektorów własnych macierzy stanu. Przy zakłóceniu w postaci impulsowej zmiany  $j$ -tej wielkości wymuszającej  $\Delta U_j(t) = \Delta U_j \delta(t)$  przebieg  $i$ -tej wielkości wyjściowej (przy  $\mathbf{D} = \mathbf{0}$  i założeniu występowania tylko jednokrotnych wartości własnych) ma postać:

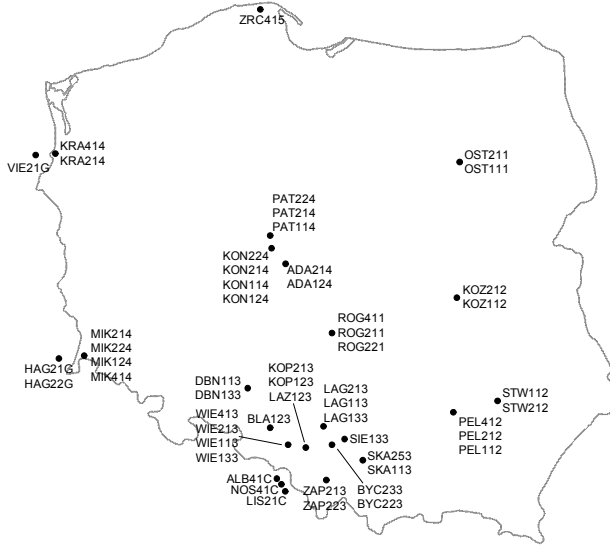
$$\Delta Y_i = \sum_{h=1}^n F_{ih} e^{\lambda_h t}, \quad \text{przy czym } F_{ih} = \mathbf{C}_i \mathbf{V}_h \mathbf{W}_h^T \mathbf{B}_j \Delta U, \quad (2)$$

gdzie:  $\lambda_h = \alpha_h + j \nu_h$  –  $h$ -ta wartość własna macierzy stanu,  $F_{ih}$  – czynnik udziału  $h$ -tej wartości własnej w przebiegu  $i$ -tej wielkości wyjściowej,  $\mathbf{C}_i$  –  $i$ -ty wiersz macierzy  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{V}_h$ ,  $\mathbf{W}_h$  –  $h$ -ty prawostronny i lewostronny wektor własny macierzy stanu,  $\mathbf{B}_j$  –  $j$ -ta kolumna macierzy  $\mathbf{B}$ ,  $n$  – wymiar macierzy stanu  $\mathbf{A}$ . Wartości  $\lambda_h$  oraz  $F_{ih}$  mogą być rzeczywiste lub zespolone.

W przypadku przebiegów kołysań mocy chwilowej w SEE decydujące znaczenie mają wartości własne, związane z ruchem wirników zespołów wytwórczych, zwane w artykule *elektromechanicznymi wartościami własnymi*. Elektromechaniczne wartości własne w różny sposób ingerują w przebiegach mocy chwilowej poszczególnych zespołów wytwórczych, co związane jest z różnymi wartościami ich czynników udziału.

## 2. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

Obliczenia wykonano dla modelu Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (rys. 1), w którym uwzględniono 49 wybranych zespołów wytwórczych, pracujących w sieciach wysokich i najwyższych napięć. Uwzględniono także 8 zastępczych zespołów wytwórczych, które reprezentują oddziaływanie SEE sąsiednich państw.



Rys. 1. Węzły wytwórcze uwzględnione w modelu KSE

Fig. 1. Generating units taken into account in the Polish National Power System model

Wykorzystana w badaniach metoda obliczeń elektromechanicznych wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów mocy chwilowej w poszczególnych zespołach wytwórczych za pomocą wyrażenia (2). 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 błąd średniokwadratowy, występujący między przebiegiem aproksymowanym a aproksymującym:

$$\varepsilon_w(\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{F}) = \sum_{i=1}^N (P_{i(m)} - P_{i(a)}(\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{F}))^2 \quad (3)$$

gdzie:  $\boldsymbol{\lambda}$  – wektor elektromechanicznych wartości własnych,  $\mathbf{F}$  – wektor czynników udziału,  $N$  – liczba próbek przebiegów, indeks  $m$  oznacza przebieg aproksymowany, a indeks  $a$  – przebieg aproksymujący mocy chwilowej, obliczony na podstawie poszukiwanych wartości własnych i ich czynników udziału według wzoru (2). Do minimali-

zacji funkcji celu (3) wykorzystano algorytm hybrydowy, stanowiący szeregowe połączenie algorytmów genetycznego i gradientowego [3].

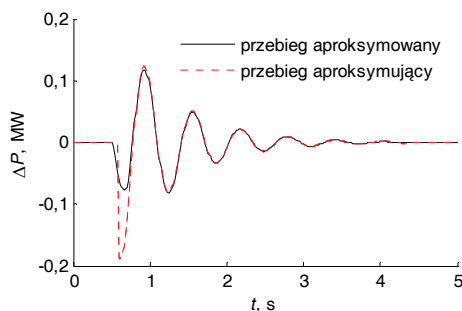
Z powodu występowania minimów lokalnych funkcji celu, w których algorytm optymalizacyjny może utknąć, proces aproksymacji przeprowadzano wielokrotnie na podstawie tego samego przebiegu mocy chwilowej. Odrzucano wyniki o wartościach funkcji celu większych, niż pewna przyjęta wartość graniczna. Jako wynik końcowy obliczeń części rzeczywistych i części urojonych poszczególnych wartości własnych przyjęto średnie arytmetyczne z wyników nie odrzuconych w kolejnych obliczeniach.

Opracowano model analizowanego SEE w środowisku programu Matlab-Simulink. Składa się on z modeli 57 zespołów wytwórczych oraz modelu sieci i odbiorów mocy.

W przeprowadzonych obliczeniach przyjęto następujące modele elementów zespołów wytwórczych KSE: model generatora synchronicznego GENROU [3], model statycznego [3] lub elektromaszynowego układu wzbudzenia, model turbiny parowej IEEEG1 [3] lub wodnej HYGOV i opcjonalnie model stabilizatora systemowego PSS3B [3]. Dla zastępczych zespołów wytwórczych, które reprezentują oddziaływanie SEE sąsiednich państw, zastosowano tylko uproszczony model generatora synchronicznego.

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.

Przykładowo na rys. 2 przedstawiono przebiegi zakłócenia mocy chwilowej generatora zespołu SKA113 (Elektrownia Skawina, napięcie znamionowe sieci 110 kV) przy zakłóceniu wprowadzonym w zespole BYC223 (Elektrownia Jaworzno, węzeł Buczyna, napięcie znamionowe sieci 220 kV).



Rys. 2. Przebiegi zakłócenia mocy chwilowej zespołu wytwórczego SKA113

Fig. 2. Instantaneous power disturbance waveforms of SKA113 generating unit

Wartości własne (w tym elektromechaniczne wartości własne) macierzy stanu systemu można obliczyć bezpośrednio na podstawie modelu i parametrów SEE w programie Matlab-Simulink. Te elektromechaniczne wartości własne są nazywane w artykule *oryginalnymi wartościami własnymi*. Porównanie wartości własnych obliczonych na pod-

stawie minimalizacji funkcji celu (3) i oryginalnych wartości własnych jest miarą dokładności obliczeń.

Macierz stanu analizowanego modelu KSE ma 56 elektromechanicznych wartości własnych. Zostały one posortowane rosnąco względem części rzeczywistych i ponumerowane od  $\lambda_1$  do  $\lambda_{56}$ . Na podstawie przebiegu z rys. 2 obliczono wartość własną  $\lambda_{17}$  (przy przyjęciu, że wartość własna  $\lambda_{19}$  została wcześniej obliczona na podstawie innego przebiegu). W tabeli 1 zestawiono wybrane oryginalne wartości własne  $\lambda$  modelu KSE oraz błędy bezwzględne  $\Delta\lambda$  obliczeń tych wartości własnych na podstawie przebiegów mocy chwilowej.

Tabela 1. Wybrane oryginalne wartości własne oraz błędy bezwzględne obliczeń tych wartości własnych  
Table 1. Selected original eigenvalues and absolute errors of calculations of these eigenvalues

$\lambda_2$	$-1,2866 \pm j11,5541$	$\Delta\lambda_2$	$0,0746 \mp j0,0033$	$\lambda_{30}$	$-0,8660 \pm j9,8514$	$\Delta\lambda_{30}$	$-0,0440 \mp j0,0883$
$\lambda_8$	$-1,1405 \pm j10,6099$	$\Delta\lambda_8$	$0,0420 \pm j0,1233$	$\lambda_{35}$	$-0,7888 \pm j8,5214$	$\Delta\lambda_{35}$	$0,0139 \mp j0,0320$
$\lambda_{13}$	$-1,0559 \pm j10,3520$	$\Delta\lambda_{13}$	$-0,0115 \pm j0,0876$	$\lambda_{40}$	$-0,6723 \pm j8,6222$	$\Delta\lambda_{40}$	$0,0731 \mp j0,0028$
$\lambda_{20}$	$-0,9937 \pm j10,3461$	$\Delta\lambda_{20}$	$0,0582 \pm j0,0746$	$\lambda_{45}$	$-0,4955 \pm j7,3005$	$\Delta\lambda_{45}$	$0,0293 \mp j0,2115$
$\lambda_{25}$	$-0,9591 \pm j10,1540$	$\Delta\lambda_{25}$	$-0,0595 \mp j0,0466$	$\lambda_{49}$	$-0,1710 \pm j4,9780$	$\Delta\lambda_{49}$	$-0,0340 \pm j0,1444$

Do oceny stabilności kątovej SEE wykorzystano następujące wskaźniki stabilności [2]:

$$W_1 = \max(\alpha_h), W_2 = \max(\xi_h) = \max\left(\frac{\alpha_h}{\sqrt{\alpha_h^2 + v_h^2}}\right), W_3 = \min(\eta_h) = \min\left(\ln\left(2\pi \frac{-\alpha_h}{v_h}\right)\right) \quad (4)$$

W tabeli 2 porównano wartości wskaźników stabilności (4) określonych na podstawie oryginalnych i obliczonych za pomocą algorytmu hybrydowego wartości własnych.

Tabela 2. Wyniki obliczeń wskaźników stabilności  
Table 2. Calculation results of stability factors

	Obl. na podstawie oryginalnych w. w.	Obl. na podstawie obliczonych w. w.	Błąd
$W_1$	-0,1710	-0,2050	-0,0340
$W_2$	-0,0343	-0,0400	-0,0057
$W_3$	-1,5335	-1,3805	0,1530

### 3. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że:

- Na podstawie analizy przebiegów mocy chwilowej w stanach zakłóceńowych można z dobrą dokładnością wyznaczyć elektromechaniczne wartości własne i na ich podstawie obliczyć wskaźniki stabilności KSE. Obliczenia wartości wła-

snych na podstawie przebiegu mocy chwilowej są tym dokładniejsze, im większy jest udział w tym przebiegu składowych modalnych związanych z obliczonymi wartościami własnymi. Im większy jest moduł czynnika udziału składowej modalnej, tym większy jest wpływ związanej z nią wartości własnej na kształt przebiegu mocy chwilowej, a co za tym idzie, na wartość funkcji celu minimalizowanej przez algorytm optymalizacyjny.

- Z przeprowadzonych badań wynika, że decydujące znaczenie dla stabilności kątowej KSE ma wartość własna  $\lambda_{49}$ . Ta wartość własna ma największą (najmniejszą co do modułu) część rzeczywistą spośród wartości własnych ingerujących w znaczący sposób w przebiegach mocy chwilowej zespołów wytwórczych pracujących w KSE. Wartość własna  $\lambda_{49}$  ma największe wartości modułów czynników udziału w przebiegach mocy chwilowych zespołów ZRC415 oraz KON124. Ma ona także duże wartości modułów czynników udziału w przebiegach mocy chwilowych m.in. zespołów PAT114, ADA214, KON214, KON224 oraz PEL412.
- Błąd obliczenia wskaźnika stabilności  $W_2$  okazał się najmniejszy (co do modułu). Nieco większy jest błąd obliczenia wskaźnika stabilności  $W_2$ . Największy okazał się błąd obliczenia wskaźnika stabilności  $W_3$ .

#### LITERATURA

- [1] KUDŁA J., PASZEK S., *Redukcja postaci transmitancji w systemach elektroenergetycznych*, XVIII Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, SPETO '95, tom 2, 1995, 299–304.
- [2] 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, 71–74.
- [3] PASZEK S., PRUSKI P., *Assesment of the power system angular stability based on analysis of selected disturbance states*. Acta Energetica, nr 2/2011, 44–53.
- [4] SAITOH H., MIURA K., ISHIOKA O., SATO H., TOYODA J., *On-line modal analysis based on synchronized measurement technology*, Power System Technology, 2002. Proceedings. International Conference on PowerCon 2002, vol. 2, 817–822.

#### ASSESSMENT OF POLISH NATIONAL POWER SYSTEM ANGULAR STABILITY BASED ON ANALYSIS OF INSTANTANEOUS POWER DISTURBANCE WAVEFORMS

The paper presents investigation results concerning the accuracy analysis of calculating the defined stability factors of the Polish National Power System on the basis of power system state matrix eigenvalues associated with electromechanical phenomena. The eigenvalues were calculated by analysis of the disturbance waveforms of the instantaneous power 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.