

OBLICZENIA ELEKTROMECHANICZNYCH WARTOŚCI WŁASNYCH NA PODSTAWIE PRZEBIEGÓW MOCY CHWILOWEJ I PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ ZESPOŁÓW WYTWÓRCZYCH PRZY ZAKŁÓCENIU SKOKOWYM

Piotr PRUSKI, Stefan PASZEK

Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki
tel.: 32 237 1229; e-mail: piotr.pruski@polsl.pl, stefan.paszek@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki obliczeń wartości własnych (związanych ze zjawiskami elektromechanicznymi) macierzy stanu modelu systemu elektroenergetycznego (SEE) na podstawie analizy przebiegów zakłóceń mocy chwilowej i prędkości kątowej zespołów wytwórczych SEE. Wzięto pod uwagę przebiegi występujące po wprowadzeniu zakłócenia w postaci skokowej zmiany napięcia zadanego regulatora napięcia w jednym z zespołów wytwórczych SEE. W modelu SEE uwzględniono oddziaływanie centralnego regulatora częstotliwości. Wykorzystana w artykule metoda obliczeń wartości własnych polega na aproksymacji analizowanych przebiegów zakłóceń za pomocą przebiegów stanowiących superpozycję składowych modalnych związanych z poszukiwanymi wartościami własnymi. Uzyskano zadowalającą dokładność obliczeń wszystkich elektromechanicznych wartości własnych.

Słowa kluczowe: system elektroenergetyczny, stabilność kątowa, wartości własne związane ze zjawiskami elektromechanicznymi, stany nieustalone.

1. WSTĘP

Aby system elektroenergetyczny (SEE) mógł pracować prawidłowo, zapewniając dostawę energii elektrycznej do odbiorców, konieczne jest zachowanie jego stabilności kątowej. Utrata stabilności kątowej SEE może spowodować wystąpienie poważnej awarii systemowej, której skutkiem może być pozbawienie zasilania bardzo dużej liczby odbiorców. Stabilność kątową SEE można określić przy wykorzystaniu wskaźników stabilności kątowej [1], które są obliczane na podstawie wartości własnych macierzy stanu SEE związanych ze zjawiskami elektromechanicznymi, zwanych w artykule *elektromechanicznymi wartościami własnymi*. Te wartości własne można obliczyć na podstawie macierzy stanu zlinearyzowanego w ustalonym punkcie pracy modelu matematycznego SEE, jednak w tym przypadku wyniki obliczeń zależą pośrednio od przyjętych modeli poszczególnych elementów SEE i wartości ich parametrów. Wykorzystywane w obliczeniach wartości parametrów tych modeli często nie są dostatecznie dokładne i wiarygodne [2]. Elektromechaniczne wartości własne można także obliczyć z dobrą dokładnością na podstawie analizy rzeczywistych przebiegów nieustalonych, które pojawiają się w SEE po różnych zakłóceniach [3, 4, 5]. Wtedy na wyniki obliczeń nie wpływa przyjęty model SEE i jego parametry, tylko rzeczywisty, aktualny stan pracy SEE [4].

2. ZLINEARYZOWANY MODEL SEE

Zlinearyzowany w ustalonym punkcie pracy model SEE opisany jest równaniem stanu i równaniem wyjścia [3, 4, 6]:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u}, \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{u}, \quad (2)$$

gdzie: $\Delta \mathbf{x}$, $\Delta \mathbf{u}$, $\Delta \mathbf{y}$ – wektory odchyłek od wartości ustalonych odpowiednio: zmiennych stanu, zmiennych wejściowych (wymuszeń) i zmiennych wyjściowych,

\mathbf{A} – macierz stanu.

Elementy macierzy \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} i \mathbf{D} z równania stanu (1) i równania wyjścia (2) SEE są obliczane dla ustalonego stanu pracy [3, 4].

Przebiegi czasowe wielkości wyjściowych zlinearyzowanego modelu SEE można obliczyć, całkując numerycznie równanie (1) lub na podstawie wartości własnych i wektorów własnych macierzy stanu \mathbf{A} . Przebieg każdej wielkości wyjściowej stanowi superpozycję składowych modalnych zależnych od wartości własnych i wektorów własnych macierzy \mathbf{A} [3, 4]. Przy zakłóceniu w postaci skokowej zmiany j -tej wielkości wejściowej $\Delta u_j(t) = \Delta U \mathbf{1}(t-t_0)$ przebieg i -tej wielkości wyjściowej (przy $\mathbf{D} = \mathbf{0}$ i założeniu występowania tylko jednokrotnych wartości własnych) ma postać [4]:

$$\Delta y_i(t) = \sum_{h=1}^n K_{ih} (e^{\lambda_h(t-t_0)} - 1) \Delta U, \quad t \geq t_0, \quad (3)$$

przy czym:

$$K_{ih} = F_{ih} \lambda_h^{-1}, \quad F_{ih} = \mathbf{C}_i \mathbf{V}_h \mathbf{W}_h^T \mathbf{B}_j, \quad (4)$$

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 λ_h oraz F_{ih} są rzeczywiste lub zespolone [3].

2.1. Elektromechaniczne wartości własne SEE

W przypadku przebiegów zakłóceń mocy chwilowej i prędkości kątowej zespołów wytwórczych SEE duże znaczenie mają oscylacyjne składowe modalne związane z elektromechanicznymi wartościami własnymi. Te wartości

własne są zespolone, parami sprzężone. Ingerują one w różny sposób w przebiegach zakłóceń wielkości wyjściowych poszczególnych zespołów wytwórczych, co związane jest z różnymi wartościami ich zespolonych, parami sprzężonych czynników udziału [3, 4].

3. METODA OBLICZEŃ ELEKTROMECHANICZNYCH WARTOŚCI WŁASNYCH

W obliczeniach wykorzystano przebiegi zakłóceń odchyłek mocy chwilowych ΔP oraz prędkości kątowych $\Delta\omega$ zespołów wytwórczych, występujące po celowym wprowadzeniu małego zakłócenia do układu regulacji napięcia jednego z zespołów wytwórczych SEE. Przyjęto zakłócenie w postaci skokowej zmiany w przebiegu napięcia zadanego regulatora napięcia V_{ref} [4].

Wykorzystana w badaniach metoda obliczeń elektromechanicznych wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów zakłóceń poszczególnych zespołów wytwórczych na podstawie wyrażenia (3). Wartości własne i ich czynniki udziału w analizowanym przebiegu są nieznanymi parametrami tej aproksymacji. Aproksymacja przebiegów polega na iteracyjnym doborze jej parametrów tak, aby zminimalizować wartość funkcji celu, zdefiniowanej jako błąd średniokwadratowy ε_w , występujący między przebiegiem aproksymowanym a aproksymującym [7]:

$$\varepsilon_w(\lambda, F) = \sum_{k=1}^N (\Delta W_{k(m)} - \Delta W_{k(a)}(\lambda, K))^2, \quad (5)$$

gdzie: λ – wektor wartości własnych,
 ΔW – przebieg odchyłki analizowanej wielkości,
 K – wektor współczynników K_i określonych dla poszczególnego przebiegu (zdefiniowanych w zależności 4),
 k – numery próbek przebiegów,
 N – liczba próbek przebiegów, indeks „m” oznacza przebieg aproksymowany, a indeks „a” – przebieg aproksymujący, obliczony na podstawie wartości własnych i czynników udziału według wzoru (3).

Do minimalizacji funkcji celu (5) wykorzystano hybrydowy algorytm optymalizacyjny, stanowiący połączenie algorytmów genetycznego i gradientowego. Wyniki uzyskane za pomocą algorytmu genetycznego są przyjmowane jako punkt startowy dla algorytmu gradientowego. Połączenie tych algorytmów eliminuje ich podstawowe wady [1, 3, 4, 7].

Z przeprowadzonych badań wynika, że w przebiegach odchyłek mocy chwilowej ΔP oraz prędkości kątowej $\Delta\omega$ ingerują w znaczący sposób nie tylko elektromechaniczne wartości własne, ale także inne wartości własne. W przypadku zakłócenia skokowego w celu umożliwienia poprawnej aproksymacji przebiegu ΔP należy uwzględnić jedną zastępczą aperiodyczną składową modalną, natomiast w celu umożliwienia poprawnej aproksymacji przebiegu $\Delta\omega$ należy uwzględnić dwie zastępcze aperiodyczne składowe modalne. Te zastępcze składowe modalne odwzorowują wpływ składowych modalnych nie związanych z elektromechanicznymi wartościami własnymi na te przebiegi.

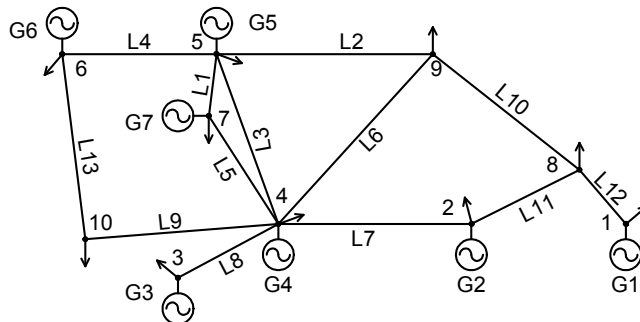
Przebiegi ΔP obliczane są na podstawie przebiegów napięć i prądów twornika generatora (fazowych lub osiowych, czyli obliczonych poprzez transformację Parka [8]). Pomiar przebiegów $\Delta\omega$ są możliwe przy użyciu aparatury opracowanej w Instytucie Elektrotechniki i Informatyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej [9].

Z powodu występowania dużej ilości minimów lokalnych funkcji celu, w których algorytm optymalizacyjny może utknąć, proces aproksymacji przeprowadzono wielo-

krotnie na podstawie tego samego przebiegu. 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 [3, 4].

4. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

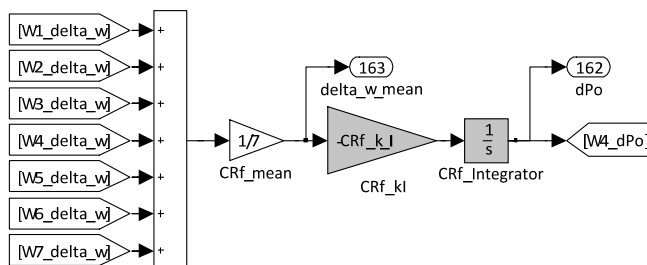
Przykładowe obliczenia wykonano dla 7-maszynowego testowego SEE CIGRE przedstawionego na rysunku 1. Wzięto pod uwagę przebiegi występujące po wprowadzeniu zakłócenia skokowego w przebiegu napięcia zadanego regulatora napięcia V_{ref} zespołu G7, o wysokości $\Delta V_{ref} = -5\% V_{ref0}$ (V_{ref0} – wartość początkowa napięcia V_{ref}).



Rys. 1. Analizowany 7-maszynowy SEE CIGRE [7]

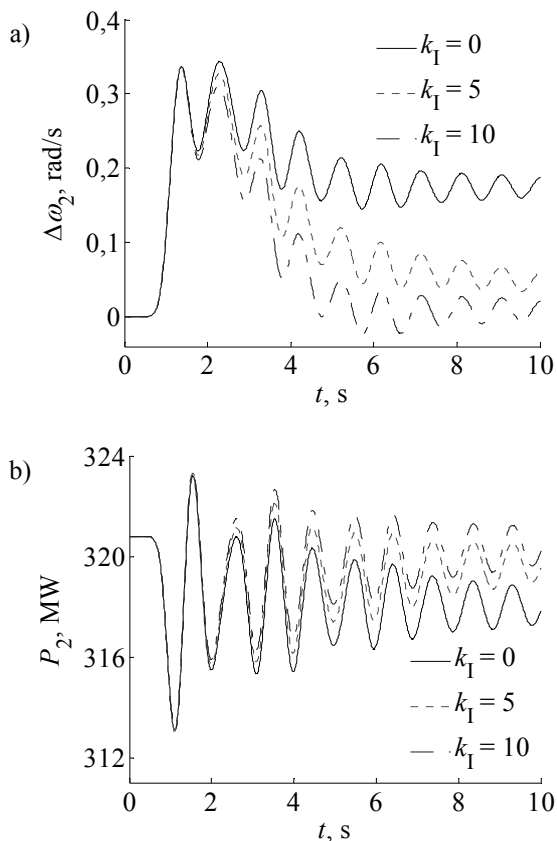
Model SEE CIGRE opracowano w środowisku Matlab-Simulink. W przeprowadzonych obliczeniach wykorzystano modele: generatora synchronicznego GENROU z nieliniową charakterystyką magnesowania [6, 10, 11], statycznego układu wzbudzenia, pracującego w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym [6], turbiny parowej IEEEG1 [11] i stabilizatora systemowego PSS3B [6, 11].

W modelu SEE uwzględniono centralny regulator częstotliwości (oznaczony w artykule skrótowo CRf) [3], którego model zaprezentowano na rysunku 2. Jako sygnał wejściowy tego modelu przyjęto średnią arytmetyczną odchyłek od wartości znamionowych prędkości kątowych wszystkich zespołów wytwórczych SEE (na wyjściu bloku „CRf_mean”). W bloku „CRf_kl” sygnał ten jest mnożony przez współczynnik wzmocnienia k_I oraz zmieniany jest jego znak. Na wyjściu bloku CRf_Integrator otrzymuje się sygnał wyjściowy, który przekazywany jest do regulatora turbiny zespołu G4 i dodawany do wartości zadanej mocy turbiny.



Rys. 2. Model centralnego regulatora częstotliwości

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe przebiegi mocy chwilowej P oraz odchyłki prędkości kątowej $\Delta\omega$ zespołu G2 dla trzech różnych wartości współczynnika k_I . Wartość $k_I = 0$ oznacza wyłączenie CRf.



Rys. 3. Przykładowe przebiegi mocy chwilowej (a) oraz odchyłki prędkości kątowej (b) zespołu G2

Z rysunku 3 wynika, że przy $k_I = 0$ wartości ustalone przebiegów P i $\Delta\omega$ po zakłóceniu różnią się od ich wartości początkowych. Dla $k_I > 0$ wraz ze wzrostem k_I maleje czas ustalania się tych przebiegów do ich wartości początkowych.

Wartości własne (w tym elektromechaniczne wartości własne) macierzy stanu SEE można obliczyć bezpośrednio na podstawie modelu i parametrów SEE w programie Matlab-Simulink. Obliczone w ten sposób elektromechaniczne wartości własne są nazywane w artykule *oryginalnymi wartościami własnymi*. Porównanie wartości własnych obliczonych na podstawie minimalizacji funkcji celu (5) i oryginalnych wartości własnych przyjęto jako miarę dokładności obliczeń [3, 4]. W tab. 1 przedstawiono oryginalne wartości własne analizowanego SEE CIGRE dla różnych wartości współczynnika k_I . Pogrubiono wartości własne odpowiadające uwzględnionej w dalszej analizie wartości współczynnika $k_I = 10$, dla której uzyskano zadowalający czas ustalania się przebiegu $\Delta\omega$. Z tab. 1 wynika, że wartość współczynnika k_I tylko nieznacznie wpływa na elektromechaniczne wartości własne.

Tablica 1. Oryginalne wartości własne SEE CIGRE dla różnych wartości współczynnika k_I

k_I	0	5	10
$\lambda_1, 1/s$	-0,8805±j10,4425	-0,8784±j10,4437	-0,8763±j10,4448
$\lambda_2, 1/s$	-0,8262±j10,6203	-0,8293±j10,6192	-0,8324±j10,6182
$\lambda_3, 1/s$	-0,7632±j9,6686	-0,7630±j9,6686	-0,7627±j9,6686
$\lambda_4, 1/s$	-0,5273±j8,7481	-0,5274±j8,7481	-0,5274±j8,7481
$\lambda_5, 1/s$	-0,4165±j7,8724	-0,4165±j7,8724	-0,4165±j7,8724
$\lambda_6, 1/s$	-0,1887±j6,5420	-0,1887±j6,5421	-0,1888±j6,5421

4.1. Obliczenia elektromechanicznych wartości własnych

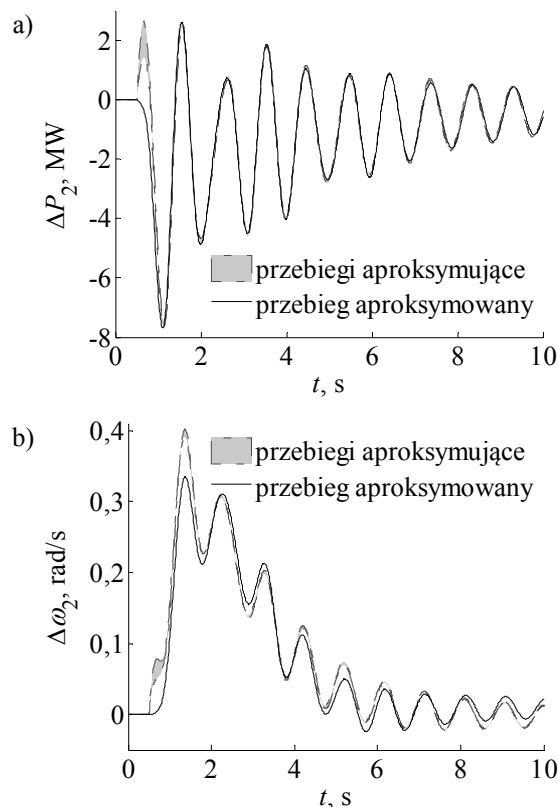
W tab. 2 przedstawiono błędy bezwzględne $\Delta\lambda$ obliczeń elektromechanicznych wartości własnych SEE CIGRE na podstawie analizy przebiegów zakłóceń odchyłek mocy chwilowych ΔP i prędkości kątowych $\Delta\omega$ poszczególnych zespołów wytwórczych. Błędy te są wynikami końcowymi obliczeń i stanowią średnie arytmetyczne błędów uzyskanych wyników obliczeń kolejnych wartości własnych na podstawie przebiegów poszczególnych zespołów. Obliczone średnie wartości własne nie uwzględniają wyników o częściach rzeczywistych lub urojonych znacznie różniących się od pozostałych wyników obliczeń.

Tablica 2. Błędy bezwzględne obliczeń wartości własnych

Przebiegi	ΔP	$\Delta\omega$
$\lambda_1, 1/s$	0,0729±j0,0248	-0,0235±j0,2009
$\lambda_2, 1/s$	-0,0471±j0,1066	-0,0639±j0,1100
$\lambda_3, 1/s$	0,0492±j0,1426	-0,0138±j0,1764
$\lambda_4, 1/s$	-0,0341±j0,0969	0,0053±j0,1767
$\lambda_5, 1/s$	0,0305±j0,0180	0,0300±j0,0972
$\lambda_6, 1/s$	0,0071±j0,0103	-0,0057±j0,0607

Z tab. 2 wynika, że we wszystkich przypadkach dokładność wyników końcowych obliczeń była zadowalająca.

Przykładowo na rysunku 4 przedstawiono przebiegi zakłóceń mocy chwilowej ΔP i prędkości kątowej $\Delta\omega$ zespołu G2 oraz pasma przebiegów aproksymujących, odpowiadających nieodrzuconym wynikom obliczeń. Pasma to określa zakres zmian prędkości kątowej, w którym zawierają się wszystkie przebiegi aproksymujące, odpowiadające poszczególnym wynikom obliczeń.



Rys. 4. Przykładowe przebiegi odchyłek mocy chwilowej (a) i prędkości kątowej (b) zespołu G2

Z rysunku 4 wynika, że dokładność aproksymacji przebiegów ΔP była lepsza, niż przebiegów $\Delta\omega$. Działo się tak również w przypadku przebiegów innych zespołów wytwórczych SEE CIGRE. Mimo to dokładność wyników końcowych obliczeń wartości własnych na ogół była większa dla przebiegów $\Delta\omega$.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Możliwe jest obliczenie z dobrą dokładnością elektromechanicznych wartości własnych na podstawie analizy przebiegów mocy chwilowej i prędkości kątowej pojawiających się po wprowadzeniu zakłócenia skokowego w układzie regulacji napięcia jednego z zespołów wytwórczych. Uzyskano dobrą dokładność obliczeń na podstawie analizy większości przebiegów, w których wartości własne miały dostatecznie duże moduły współczynników K_b .
- Przyjęcie wyników końcowych obliczeń jako średnich arytmetycznych wartości własnych wyznaczonych na podstawie analizy różnych przebiegów pozwoliło na zwiększenie dokładności obliczeń. Dokładność wyników końcowych obliczeń poszczególnych wartości własnych na ogół była większa dla przebiegów prędkości kątowej, niż dla przebiegów mocy chwilowej.
- Zastosowanie centralnego regulatora częstotliwości w modelu SEE umożliwia uzyskanie znamionowych prędkości kątowych wszystkich zespołów wytwórczych SEE w stanie ustalonym po zakłóceniu skokowym.

6. BIBLIOGRAFIA

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., Albayaci 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. Pruski P., Paszek S.: Analiza dokładności obliczeń elektromechanicznych wartości własnych na podstawie różnych przebiegów zakłóceń w systemie elektroenergetycznym, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Elektryka”, Gliwice 2013, zeszyt 3, s. 15–22.
4. Pruski P., Paszek S.: Obliczenia elektromechanicznych wartości własnych na podstawie symulacyjnych i pomiarowych przebiegów mocy chwilowej zespołów wytwórczych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Elektryka”, Gliwice 2012, zeszyt 2, s. 71–88.
5. Saitoh H., Miura K., Ishioka O., Sato H., Toyoda J.: On-line modal analysis based on synchronized measurement technology, Proc. of International Conference on Power System Technology, 2002, pp. 817–822.
6. Paszek S., Wybrane metody oceny i poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
7. Pruski P., Paszek S.: Determination of electromechanical eigenvalues based on analysis of different disturbance waveforms of a power system, Computer Applications in Electrical Engineering, Vol. 12, Poznań 2014, pp. 130–143.
8. Paszek W., Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Helion, 1998.
9. Nocoń A.: Prosta metoda pomiaru kąta obciążenia generatora synchronicznego. XXXV Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, IC-SPETO 2013, Gliwice – Ustroń 23-26.05.2013, s. 119–120.
10. de Mello F. P., Hannett L. H.: Representation of Saturation in Synchronous Machines, IEEE Transactions on Power Systems 1986, Vol. PWRS-1, November, No. 4, pp. 8–18.
11. Power Technologies, a Division of S&W Consultants Inc.: Program PSS/E Application Guide, Siemens Power Technologies Inc., 2002.

CALCULATIONS OF ELECTROMECHANICAL EIGENVALUES BASED ON THE WAVEFORMS OF INSTANTANEOUS POWER AND ANGULAR SPEED OF GENERATING UNITS AFTER A STEP DISTURBANCE

The paper presents the results of calculations of the eigenvalues (associated with electromechanical phenomena) of the state matrix of the power system (PS) model based on analysis of the instantaneous power and angular speed disturbance waveforms of the PS generating units. In calculations there were taken into account the waveforms occurring after introducing a disturbance in the form of a step change in the waveform of the voltage regulator reference voltage in one of generating units. In the PS model used there was taken into account influence of a central frequency regulator. The method for eigenvalue calculations used in the paper consists in approximation of the analysed disturbance waveforms with the waveforms being a superposition of modal components associated with the searched eigenvalues and their participation factors. The approximation consists in minimisation of the objective function defined as the mean square error that occurs between the approximated and approximating waveforms. For the minimisation of the so-defined objective function a hybrid optimisation algorithm consisting of serially connected genetic and gradient algorithms was used. This connection allows eliminating the basic weaknesses of those both algorithms. To avoid calculation errors caused by the optimisation algorithm freezing in the objective function local minimum, calculations of eigenvalues for each disturbance waveform were performed repeatedly. The calculation results with the objective function values larger than a certain assumed limit were rejected. The arithmetic means of the not rejected results were assumed to be the final calculation results of the real and imaginary parts of particular eigenvalues.

Keywords: power system, angular stability, eigenvalues associated with electromechanical phenomena, transient states