

DOI 10.21008/j.1897-0737.2020.103.0006

Piotr PRUSKI*, Stefan PASZEK*

LOKALIZACJA ZESPOŁÓW WYTWÓRCZYCH KRYTYCZNYCH DLA STABILNOŚCI KĄTOWEJ SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

W artykule przedstawiono wyniki analiz mających na celu lokalizację zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątowej Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Lokalizację przeprowadzono w oparciu o wartości własne macierzy stanu modelu KSE związane ze zjawiskami elektromechanicznymi (czyli elektromechaniczne wartości własne). Wartości własne obliczono na podstawie analizy przebiegów zakłóceńowych mocy chwilowej poszczególnych zespołów wytwórczych KSE. Wykorzystana w artykule metoda obliczeń wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów mocy chwilowej zespołów wytwórczych przebiegami stanowiącymi superpozycję składowych modalnych, których parametry zależą od poszukiwanych wartości własnych i ich czynników udziału. W przebiegach mocy chwilowej zespołów krytycznych dla stabilności kątowej KSE dominują najsłabiej tłumione lub nietłumione składowe modalne związane z wartościami własnymi o największych wartościach części rzeczywistych.

SŁOWA KLUCZOWE: system elektroenergetyczny, stabilność kątowa, analiza modalna, elektromechaniczne wartości własne, stany nieustalone.

1. WSTĘP

System elektroenergetyczny (SEE) jest rozległym nieliniowym układem dynamicznym przeznaczonym do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Stabilność kątowa SEE oznacza zachowanie synchronizmu wszystkich generatorów synchronicznych pracujących w zespołach wytwórczych SEE, wiąże się więc bezpośrednio ze zjawiskami elektromechanicznymi. Zakłócenia występujące podczas pracy SEE powodują pojawianie się kołysań elektromechanicznych, czyli wolnozmiennych, oscylacyjnych zmian prędkości wirników generatorów synchronicznych. Kołysania te występują również w przebiegach mocy chwilowych i kątów mocy generatorów synchronicznych. W niektórych zespołach wytwórczych kołysania elektromechaniczne mogą być słabo tłumione, a nawet narastające, co może doprowadzić do utraty stabilności kątowej SEE [1, 2].

Konieczna jest więc lokalizacja zespołów wytwórczych najbardziej zagrożonych utratą stabilności kątowej, które można nazwać zespołami krytycznymi dla

* Politechnika Śląska

stabilności kątovej SEE. W tych zespołach należy szczególnie zadbać o prawidłowe działanie różnych środków poprawy stabilności kątovej, m. in. przez odpowiedni dobór parametrów stabilizatorów systemowych, pracujących w układach regulacji tych zespołów.

W niniejszym artykule zaprezentowano metodę lokalizacji zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątovej SEE na podstawie analizy przebiegów zakłóceńowych mocy chwilowej zespołów wytwórczych.

Lokalizację tych zespołów przeprowadzono przy założeniu występowania małych zakłóceń stanu ustalonego SEE. Małe zakłócenia to takie zakłócenia, po wystąpieniu których na stan pracy SEE nie mają znaczącego wpływu nieliniowości występujące w SEE. Można w tym przypadku analizować pracę SEE przy wykorzystaniu modelu zlinearyzowanego.

2. ZLINEARYZOWANY MODEL SEE

Zlinearyzowany w ustalonym punkcie pracy model SEE można przedstawić w postaci następujących równań stanu i równań wyjścia [1, 2, 3]:

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

$$\Delta \mathbf{y} = \mathbf{C}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}\Delta \mathbf{u}, \quad (1b)$$

gdzie: \mathbf{x} , \mathbf{u} , \mathbf{y} – odpowiednio m , p oraz n -wymiarowe wektory stanu, wielkości wejściowych i wielkości wyjściowych; Δ oznacza odchyłkę od wartości ustalonych odpowiednich wielkości; \mathbf{A} – macierz stanu o wymiarach $m \times m$; \mathbf{B} , \mathbf{C} i \mathbf{D} – pozostałe macierze o określonych wymiarach i stałych współczynnikach zależnych od modeli i parametrów elementów SEE [1, 3].

Przebiegi czasowe wielkości wyjściowych w SEE można obliczyć, rozwiązując numerycznie równania (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} [1, 3].

W przypadku wymuszenia (zakłócenia) w postaci impulsu Diraca j -tej wielkości wejściowej $\Delta u_j(t) = \Delta U \delta(t)$, przy założeniu $\mathbf{D} = \mathbf{0}$ i występowania tylko jednokrotnych wartości własnych macierzy \mathbf{A} , przebieg i -tej wielkości wyjściowej dla $t \geq t_0$ można przedstawić w postaci [1, 2, 3]:

$$\Delta y_i(t) = \sum_{h=1}^m F_{ih} e^{\lambda_h(t-t_0)}, \quad (2)$$

przy czym λ_h – h -ta wartość własna macierzy \mathbf{A} , m – liczba wartości własnych macierzy \mathbf{A} równa jej wymiarowi, t_0 – chwila wystąpienia wymuszenia, F_{ih} – czynnik udziału h -tej wartości własnej w przebiegu i -tej wielkości wyjściowej:

$$F_{ih} = \mathbf{C}_i \mathbf{V}_h \mathbf{W}_h^T \mathbf{B}_j \Delta U, \quad (3)$$

gdzie: B_j – j -ta kolumna macierzy B ; C_i – i -ty wiersz macierzy C ; V_h , W_h – h -ty prawostronny i lewostronny wektor własny macierzy A (odpowiadający h -tej wartości własnej).

Odpowiedź układu na wymuszenie w postaci krótkotrwałego impulsu prostokątnego, o odpowiednio dobranej wysokości i czasie trwania, jest zbliżona do odpowiedzi tego układu na wymuszenie w postaci impulsu Diraca [1, 3].

3. OKREŚLENIE ZESPOŁÓW WYTWÓRCZYCH KRYTYCZNYCH DLA STABILNOŚCI KĄTOWEJ SEE

Część rzeczywista wartości własnej jest miarą tłumienia lub braku tłumienia odpowiadającej jej składowej modalnej. Tłumienie występuje, gdy część rzeczywista wartości własnej jest ujemna (im większy jej moduł, tym większe tłumienie). W przypadku dodatniej części rzeczywistej składowa modalna jest narastająca, co oznacza niestabilność układu [1, 3].

W przebiegach wielkości elektromechanicznych zespołów wytwórczych pracujących w SEE (mocy chwilowej P , prędkości kątovej ω , oraz kątów mocy δ) dominują składowe modalne związane z elektromechanicznymi wartościami własnymi. Są to zespolone, parami sprzężone wartości własne o częściach urojonych z przedziału (0.63÷12.6) rad/s. Można orientacyjnie ocenić, że zadowalająco szybkie tłumienie kołysań elektromechanicznych w systemie uzyskuje się, jeśli części rzeczywiste wszystkich wartości własnych są mniejsze od $-0,3$ (jest to wielkość umowna, szacunkowa). Wielkości tej odpowiada umowny czas przejścia układu do stanu ustalonego $t_{ust} < 13$ s [1, 3].

Wartość czynnika udziału (3) zależy od miejsca wprowadzenia wymuszenia (zakłócenia) w SEE. Im większy moduł czynnika udziału $|F_{ih}|$, tym większy wpływ składowej modalnej, odpowiadającej z h -tej wartości własnej, na przebieg i -tej wielkości wyjściowej.

W przypadku wielkości będących zmiennymi stanu układu czynniki udziału F_{ih} są w przybliżeniu proporcjonalne do i -tych elementów h -tych prawostronnych wektorów własnych macierzy stanu V_{ih} .

W modelu SEE zazwyczaj prędkości kątovej zespołów wytwórczych są zmiennymi stanu, a moce chwilowe tych zespołów są zmiennymi wyjściowymi. Te wielkości są ze sobą silnie związane w obrębie tego samego zespołu wytwórczego. Dzieje się tak, ponieważ na prędkość kątovej generatora mają wpływ głównie moment napędowy pochodzący z turbiny i moment obciążenia proporcjonalny do mocy chwilowej, wydawanej przez generator.

W badaniach stabilności kątovej SEE można określić wpływ poszczególnych (h -tych) elektromechanicznych wartości własnych na prędkości kątovej generatorów pracujących w kolejnych zespołach wytwórczych (i -ta zmienna w wektorze stanu). Można w tym celu wykorzystać i -te składowe h -tego prawostronnego wektora własnego (odpowiadającego h -tej elektromechanicznej wartości własnej).

Na podstawie elektromechanicznych wartości własnych macierzy stanu SEE, a także ich czynników udziału i/lub prawostronnych wektorów własnych, można określić, które składowe modalne najbardziej wpływają na przebiegi wielkości elektromechanicznych poszczególnych zespołów wytwórczych SEE. Można także wskazać zespoły wytwórcze, w przebiegach których dominują słabo tłumione albo nietłumione składowe modalne związane z wartościami własnymi o największych częściach rzeczywistych. Te zespoły wytwórcze są krytyczne dla stabilności kątowej SEE.

4. METODA OBLICZEŃ WARTOŚCI WŁASNYCH

Elektromechaniczne wartości własne i ich czynniki udziału można obliczyć na podstawie analizy przebiegów wielkości elektromechanicznych występujących w SEE po małych zakłóceniach.

W przedstawionych badaniach wykorzystano przebiegi mocy chwilowej zespołów wytwórczych pojawiające się po wprowadzeniu zakłócenia w postaci krótkotrwałego impulsu prostokątnego w układzie regulacji napięcia jednego z generatorów.

Zastosowana metoda obliczeń polega na aproksymacji przebiegów mocy chwilowej zespołów wytwórczych przebiegami obliczonymi na podstawie zależności (2), będącymi superpozycją składowych modalnych określonych przez poszukiwane wartości własne i ich czynniki udziału. Na podstawie tych wartości własnych i ich czynników udziału zdefiniowano parametry funkcji celu (4). Parametry te dobierane są iteracyjnie, aby zminimalizować wartość funkcji celu stanowiącej błąd średniokwadratowy między przebiegiem aproksymowanym, a aproksymującym [1, 3]:

$$\varepsilon(\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{F}) = \sum_{l=1}^N \left(\Delta P_{l,m} - \Delta P_{l,a} \left(\operatorname{Re}\{\boldsymbol{\lambda}\}, \operatorname{Im}\{\boldsymbol{\lambda}\}, |\mathbf{F}|, \arg(\mathbf{F}) \right) \right)^2, \quad (4)$$

gdzie: $\boldsymbol{\lambda}$ – wektor wartości własnych, \mathbf{F} – wektor czynników udziału, ΔP – analizowany przebieg odchyłki mocy chwilowej, l , N – odpowiednio numer próbek i ilość próbek przebiegu, indeks “m” oznacza przebieg aproksymowany, a indeks “a” oznacza przebieg aproksymujący, obliczony na podstawie (2). W obliczeniach przebiegu aproksymującego uwzględnia się tylko kilka składowych modalnych o największych amplitudach.

Funkcja celu ε ma liczne minima lokalne. Utknięcie algorytmu w minimum lokalnym skutkuje uzyskaniem nieprawidłowych wyników obliczeń.

Do minimalizacji funkcji celu wykorzystano hybrydowy algorytm optymalizacyjny, będący połączeniem algorytmów genetycznego oraz gradientowego Newtona [1, 3, 4, 5]. Wyniki obliczeń $\boldsymbol{\lambda}$ oraz \mathbf{F} za pomocą algorytmu genetycznego są przyjmowane jako punkt startowy dla algorytmu gradientowego. Połączenie tych algorytmów eliminuje ich podstawowe wady. Algorytm genetyczny zalicza się do algorytmów optymalizacji globalnej i wykazuje dużą odporność na utknięcia

w minimach lokalnych funkcji celu. Nie wymaga on określenia punktu startowego, a jedynie zakresów poszukiwań parametrów funkcji celu. Jest on wykorzystywany w pierwszym etapie obliczeń do przybliżonego określenia minimum globalnego funkcji celu. W drugim etapie stosowany jest szybciej zbieżny algorytm gradientowy, pozwalający na znalezienie minimum globalnego z większą dokładnością.

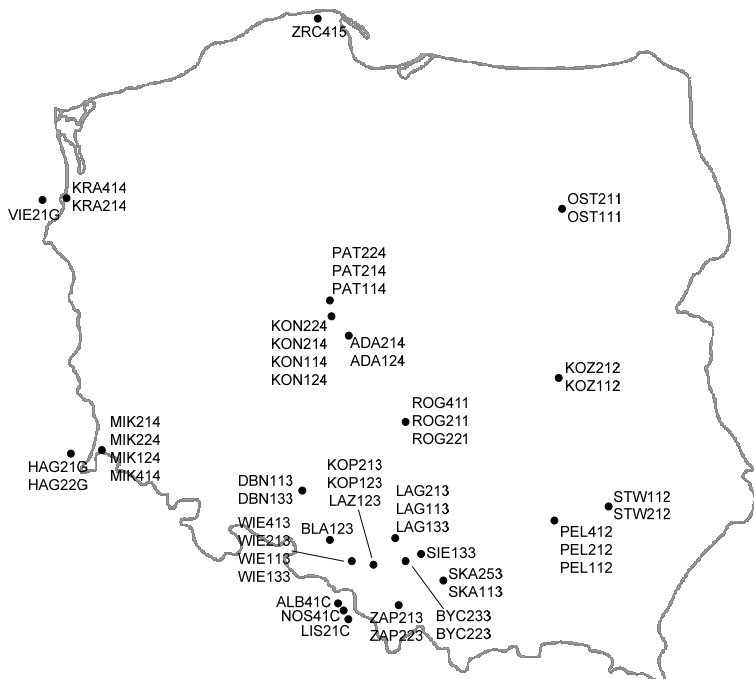
W celu dodatkowego zmniejszenia ryzyka utknięcia algorytmu optymalizacyjnego w minimum lokalnym funkcji celu, obliczenia na podstawie każdego przebiegu wykonywane są wielokrotnie. Wyniki o wartościach funkcji celu wyższych, niż pewna określona doświadczalnie wartość graniczna, są odrzucane. Jako wynik końcowy obliczeń poszczególnych parametrów funkcji celu na podstawie analizowanego przebiegu, przyjmowane są wartości średnie nieodrzuconych wyników obliczeń odpowiednich parametrów [1, 3].

W celu eliminacji wpływu szybko zanikających składowych modalnych nie związanych z elektromechanicznymi wartościami własnymi, przebiegi mocy chwilowej analizowane są po dobieranym doświadczalnie czasie t_p , od chwili wystąpienia zakłócenia t_0 [1, 3].

Dokładność obliczeń jest większa, gdy liczba jednocześnie optymalizowanych parametrów jest mniejsza, dlatego obliczenia wartości własnych przeprowadzane są wieloetapowo. Na początku obliczane są wartości własne odpowiadające naj słabiej tłumionym składowym modalnym. Pozostałe wartości własne nie mają wpływu na obliczenia, ponieważ odpowiadające im składowe modalne zostają wystarczająco silnie wytłumione w czasie przed odpowiednio dobraną chwilą początku analizy przebiegów $t_0 + t_p$. W następnych etapach obliczane są wartości własne związane z silniej tłumionymi składowymi modalnymi, wykorzystując znajomość wcześniej obliczonych wartości własnych. Czynniki udziału wszystkich wartości własnych są obliczane za każdym razem na nowo dla poszczególnych analizowanych przebiegów [1, 3].

5. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla modelu Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Jest to model nieliniowy, opracowany w środowisku Matlab-Simulink. Uwzględnia on 49 wybranych zespołów wytwórczych pracujących w sieciach wysokich i najwyższych napięć oraz 8 zastępczych zespołów wytwórczych reprezentujących oddziaływanie SEE sąsiednich państw (rys. 1). Składa się on z 57 modeli zespołów wytwórczych oraz modelu sieci przesyłowej i odbiorów mocy.



Rys. 1. Węzły wytwórcze uwzględnione w modelu KSE [3]

W modelu KSE uwzględniono następujące modele elementów zespołu wytwórczego: generatora synchronicznego GENROU [6, 7], statycznego [6] lub elektromaszynowego [6, 7] układu wzbudzenia pracującego w KSE, turbiny parowej IEEE1 [6, 7] lub turbiny wodnej HYGOV [6, 7] oraz stabilizatora systemowego PSS3B [6, 7]. Zastępcze zespoły wytwórcze zostały opisane przez uproszczony model generatora synchronicznego GENCLS [7], pomijając oddziaływanie układu wzbudzenia, turbiny i stabilizatora systemowego.

Wartości własne macierzy stanu zlinearyzowanego w ustalonym punkcie pracy modelu SEE mogą zostać obliczone bezpośrednio w środowisku Matlab-Simulink. Tak obliczone wartości własne nazwano w artykule *oryginalnymi wartościami własnymi*.

W przedstawionych w niniejszym artykule badaniach do obliczeń wartości własnych wykorzystywane są symulacyjne przebiegi mocy chwilowej, uzyskane przy użyciu przedstawionego modelu KSE.

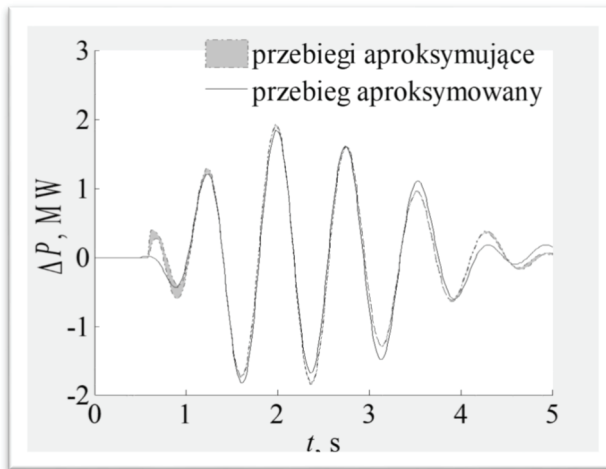
W badaniach jako miarę dokładności obliczeń przyjęto porównanie wartości własnych obliczonych na podstawie przebiegów mocy chwilowej oraz oryginalnych wartości własnych. Macierz stanu zlinearyzowanego modelu KSE ma 56 elektromechanicznych wartości własnych, które posortowano malejąco względem części rzeczywistych i ponumerowano od λ_1 to λ_{56} . W tabeli 1 przedstawiono oryginalne elektromechaniczne wartości własne λ macierzy stanu modelu KSE

związane z najmniej tłumionymi składowymi modalnymi oraz błędy bezwzględne $\Delta\lambda$ ich obliczeń na podstawie przebiegów mocy chwilowej.

Tabela 1. Oryginalne wartości własne macierzy stanu KSE oraz błędy bezwzględne ich obliczeń na podstawie przebiegów mocy chwilowej.

h	1	2	3	4
$\lambda_h, 1/s$	$-0,0835 \pm j5,6278$	$-0,1710 \pm j4,9780$	$-0,4165 \pm j8,0932$	$-0,4488 \pm j6,6540$
$\Delta\lambda_h, 1/s$	$-0,0745 \pm j0,4093$	$-0,0340 \pm j0,1444$	$0,0138 \pm j0,0976$	$-0,0277 \pm j0,0088$
h	5	6	7	8
$\lambda_h, 1/s$	$-0,4788 \pm j7,6653$	$-0,4955 \pm j7,3005$	$-0,5713 \pm j8,5011$	$-0,5910 \pm j8,5763$
$\Delta\lambda_h, 1/s$	$0,0691 \pm j0,1107$	$0,0293 \mp j0,2115$	$-0,0818 \mp j0,0409$	$-0,0595 \mp j0,8201$

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe przebiegi odchyłki mocy chwilowej oraz pasmo przebiegów aproksymujących odpowiadających nieodrzuconym wynikom obliczeń. Pasma przebiegów określa zakres zmian mocy chwilowej, w którym zawierają się wszystkie przebiegi aproksymujące odpowiadające uwzględnionym wynikom obliczeń.



Rys. 2. Przebieg odchyłki mocy chwilowej zespołu KON224 przy zakłóceniu w zespole KON124

W celu znalezienia zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątowej KSE przeanalizowano czynniki udziału i prawostronne wektory własne odpowiadające wartościom własnym o częściach rzeczywistych większych od $-0,3$ i dominujących w przebiegach co najmniej jednego z zespołów wytwórczych fizycznie występujących w KSE. Są to wartości własne λ_1 oraz λ_2 . Wybrano zespoły, w przebiegach których dominowały składowe modalne związane z tymi

wartościami własnymi. Uwzględniono jako dominujące te składowe, których moduły czynników udziału w analizowanym przebiegu wynosiły co najmniej 70% największego modułu czynnika udziału elektromechanicznej wartości własnej w tym przebiegu. W badaniach pominięto zastępcze zespoły wytwórcze.

W tabeli 2 dla wybranych w ten sposób zespołów zestawiono względne moduły elementów prawostronnych wektorów własnych $|V_{ih}|_{rel}$ w odniesieniu do największych modułów elementów prawostronnych wektorów własnych związanych z przebiegami odpowiednich zespołów.

Tabela 2. Elementy prawostronnych wektorów własnych odpowiadających wartościom własnym λ_1 oraz λ_2 .

	Zespół	$ V_{ih} _{rel}$	Zespół	$ V_{ih} _{rel}$
λ_1	ROG411	1,0000	KRA214	0,7461
λ_2	ZRC415 *	1,0000	ADA214 *	0,2193
	ROG411 *	0,6078	OST211	0,2167
	KOZ212 *	0,5397	PEL212	0,2075
	ROG221 *	0,3652	KOZ112	0,1932
	PAT214	0,2959	KON124 *	0,1391
	PEL412 *	0,2650	PAT224	0,0968
	ROG211 *	0,2357	ADA124	0,0773
	PAT114	0,2281	KON114 *	0,0385

Określono następujące kryteria w celu lokalizacji zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątownej SEE:

- Wybiera się zespoły, dla których występuje co najmniej jeden z przypadków:
 - w przebiegach mocy chwilowej tych zespołów występowała dominująca składowa modalna związana z wartością własną o dużej części rzeczywistej (np. większej od -0,3) dla co najmniej dwóch różnych miejsc wprowadzenia zakłócenia,
 - wprowadzenie zakłócenia w tym zespole spowodowało wystąpienie dominujących składowych związanych z wartością własną o dużej części rzeczywistej w przebiegach mocy chwilowej co najmniej dwóch różnych zespołów wytwórczych.
- Wybiera się zespoły mające największe moduły elementów wektorów własnych (założono, że $|V_{ih}|_{rel} > 0,5$) dla wartości własnych o dużych częściach rzeczywistych.
- Analogicznie do kryterium 2 wybiera się zespoły, dla których $|V_{ih}|_{rel} > 0,2$.
- Spełnianie przez zespół powyższych kryteriów dla więcej, niż jednej wartości własnej zwiększa jego znaczenie dla stabilności kątownej SEE.

Zespoły wytwórcze spełniające kryterium 1 zostały oznaczone gwiazdką w tabeli 2. Mają one zazwyczaj duże wartości modułów elementów wektorów własnych dla wybranych wartości własnych uwzględnionych w tej tabeli.

Na podstawie przeprowadzonych analiz ostatecznie wybrano zespoły wytwórcze spełniające co najmniej dwa z przedstawionych kryteriów. W tabeli 3 zestawiono wybrane zespoły wytwórcze oraz wartości własne, dla których te zespoły spełniają poszczególne kryteria.

Tabela 3. Zespoły wytwórcze krytyczne dla stabilności kątowej KSE.

Lp.	Zespół	Spełnione kryteria			
		nr 1	nr 2	nr 3	nr 4
1	ROG411	λ_2	λ_1, λ_2	λ_1, λ_2	λ_1, λ_2
2	KRA214		λ_1	λ_1	
3	ZRC415	λ_2	λ_2	λ_2	
4	KOZ212	λ_2	λ_2	λ_2	
5	ROG221	λ_2		λ_2	
6	PEL412	λ_2		λ_2	
7	ROG211	λ_2		λ_2	
8	ADA214	λ_2		λ_2	

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Możliwa jest lokalizacja zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątowej SEE polegająca na obliczeniu elektromechanicznych wartości własnych macierzy stanu SEE i określeniu na podstawie opracowanych kryteriów zespołów wytwórczych, w przebiegach których dominują najslabiej tłumione składowe modalne.
- Elektromechaniczne wartości własne oraz ich czynniki udziału można z zadowalającą dokładnością obliczyć na podstawie analizy rzeczywistych przebiegów zakłóceń mocy chwilowej zespołów wytwórczych.
- Korzystając z modelu SEE, można obliczyć elementy prawostronnych wektorów własnych macierzy stanu tego modelu, związanych z poszczególnymi wartościami własnymi i przebiegami kolejnych zespołów wytwórczych.
- Zgodność wyników lokalizacji zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątowej SEE na podstawie różnych kryteriów występuje przede wszystkim w przypadku zespołów, dla których poszczególnym analizowanym wartościom własnym odpowiadają duże moduły elementów prawostronnych wektorów własnych.

Obliczenia elektromechanicznych wartości własnych i ich czynników udziału można przeprowadzić przedstawioną metodą także na podstawie przebiegów prędkości kątowej oraz kąta mocy generatorów synchronicznych.

LITERATURA

- [1] Pruski P., Paszek S., Analiza modalna wybranych przebiegów zakłóceń w systemie elektroenergetycznym. Wyznaczanie wskaźników stabilności kątowej, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2016.
- [2] Machowski J., Lubośny Z., Stabilność Systemu Elektroenergetycznego, WNT, Warszawa, 2018.
- [3] Pruski P., Paszek S., Determination of Polish Power System model state matrix eigenvalues based on angular speed waveforms, Przegląd Elektrotechniczny, Volume 91, Number 7, 2015, 21–23.
- [4] Sekaj I., Veselý V., Robust output feedback controller design: genetic algorithm approach, IMA J Math Control Info, Volume 22, Number 3, 2005, 257–265.
- [5] Wörner L., Kulig S., Willing M., Winzer P., Genetic Algorithm Embedded into a Quality-Oriented Workflow of Methods for the Development of a Linear Drive used in Intralogistic Systems. Archives of Electrical Engineering, Volume 63, Number 4, 2014, 647–665.
- [6] Paszek S., Berhausen S., Boboń A., Majka Ł., Nocoń A., Pasko M., Pruski P., Kraszewski T., Pomiarowa estymacja parametrów dynamicznych generatorów synchronicznych i układów wzbudzenia pracujących w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [7] Power Technologies, a Division of S&W Consultants Inc., Program PSS/E Application Guide, Siemens Power Technologies Inc., 2002.

LOCATION OF GENERATING UNITS CRITICAL FOR THE POWER SYSTEM ANGULAR STABILITY

The paper presents the results of investigations on the location of generating units critical for the angular stability of a large power system (PS). The location of these units was carried out based on the eigenvalues of the PS model state matrix associated with electromechanical phenomena (electromechanical eigenvalues). The eigenvalues were calculated based on the analysis of the instantaneous power disturbance waveforms of the PS generating units. The used method of calculating eigenvalues consists in approximation of the instantaneous power disturbance waveforms by the waveforms being the superposition of modal components. The parameters of these components depend on the electromechanical eigenvalues and their participation factors. In the instantaneous power waveforms of generating units critical for the PS angular stability, the least damped or undamped modal components dominate. These components are related to the eigenvalues with the largest values of real parts.

(Received: 28.01.2020, revised: 21.03.2020)