

doi:10.15199/48.2021.03.09

## Określenie zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących określenia zespołów wytwórczych mających największy wpływ na stabilność kątową rozległego systemu elektroenergetycznego (SEE). Zespoły te określono, wykorzystując wartości własne macierzy stanu SEE związane ze zjawiskami elektromechanicznymi (elektromechaniczne wartości własne). Wartości własne obliczono na podstawie analizy przebiegów zakłóceńowych mocy chwilowej zespołów wytwórczych pracujących w SEE.

**Abstract.** The paper presents the results of investigations on the determination of generating units most affecting the angular stability of an extensive power system (PS). These units were determined using the eigenvalues of the PS state matrix associated with electromechanical phenomena (electromechanical eigenvalues). The eigenvalues were calculated based on the analysis of the instantaneous power disturbance waveforms of the generating units working in the PS. (**Determination of generating units critical for the power system angular stability**).

**Słowa kluczowe:** system elektroenergetyczny, elektromechaniczne wartości własne, stany nieustalone, stabilność kątowa.

**Keywords:** power system, electromechanical eigenvalues, transient states, angular stability.

### Wstęp

System elektroenergetyczny (SEE) jest wielkim nieliniowym układem dynamicznym służącym do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Ze stanami nieustalonymi i procesami regulacyjnymi zachodzącymi w SEE związana jest jego stabilność. Ogólnie stabilność SEE jest rozumiana jako jego zdolność do utrzymania określonego stanu pracy po wystąpieniu zakłócenia. Ze względu na wielkości elektryczne istotne dla stanu SEE rozróżnia się stabilność kątową, stabilność częstotliwościową i stabilność napięciową [1, 2, 3]. Stabilność kątowa jest związana z zachowaniem synchronizmu wszystkich generatorów synchronicznych pracujących w zespołach wytwórczych SEE. Utrata synchronizmu generatorów synchronicznych jest utożsamiana z utratą stabilności kątowej SEE.

Stabilność kątowa wiąże się bezpośrednio ze zjawiskami elektromechanicznymi. Zakłócenia występujące podczas eksploatacji SEE powodują pojawianie się wolnozmiennych, oscylacyjnych zmian prędkości wirowania generatorów synchronicznych, czyli kołysań elektromechanicznych. Kołysania te ujawniają się również w przebiegach kątów mocy i mocy chwilowej generatorów synchronicznych w różnych miejscach systemu, m.in. w zespołach wytwórczych. W niektórych zespołach wytwórczych kołysania elektromechaniczne mogą być słabo tłumione, a nawet narastać, co może prowadzić do utraty stabilności kątowej SEE, a tym samym do wystąpienia braku zasilania odbiorów na dużym obszarze.

W związku z powyższym konieczna jest lokalizacja zespołów wytwórczych, które są najbardziej zagrożone. Można je nazwać krytycznymi zespołami wytwórczymi, z punktu widzenia ewentualnej utraty stabilności kątowej SEE. Zespoły te mają zarazem największy wpływ na stabilność kątową SEE. W tych zespołach trzeba szczególnie zadbać o prawidłowe działanie różnych środków poprawy stabilności kątowej, m.in. poprzez dobrze wykonaną optymalizację lub polioptymalizację parametrów stabilizatorów systemowych pracujących w układach regulacji napięcia generatorów synchronicznych. Inne możliwości działania w tym zakresie dają: stabilizatory działające w układach regulacji turbin, odpowiednie urządzenia FACTS [1, 4, 5, 6] umiejscowione blisko tych krytycznych zespołów oraz wykorzystanie nowoczesnej automatyki przeciwkołysaniowej.

W niniejszym artykule przedstawiono metodę określenia lokalizacji tych krytycznych zespołów wytwórczych na

podstawie analizy przebiegów nieustalonych mocy chwilowej generatorów synchronicznych.

Badania prowadzące do lokalizacji zespołów wytwórczych w SEE najbardziej wpływających na stabilność kątową przeprowadzono przy założeniu występowania małych zakłóceń stanu ustalonego, dla których obowiązuje zlinearyzowana postać równań stanu układu.

### Zlinearyzowany model SEE

Model matematyczny SEE otrzymuje się poprzez połączenie modeli matematycznych zespołów wytwórczych z modelem matematycznym sieci elektroenergetycznej. W skład modelu matematycznego zespołu wytwórczego wchodzi model następujących jego elementów: generatora (najczęściej generatora synchronicznego, wraz z jego układem wzbudzenia i stabilizatorem systemowym) oraz turbiny z układem regulacji prędkości kątowej.

Zakładając, że system elektroenergetyczny jest rozbudowanym układem o stałych skupionych, jego równania stanu i równania wyjścia można przedstawić ogólnymi zależnościami [1, 2, 7]:

$$(1) \quad \frac{dx}{dt} = f(x, u, t), \quad y = g(x, u, t),$$

gdzie:  $x$ ,  $u$ ,  $y$  – odpowiednio  $m$ ,  $p$  oraz  $n$ -wymiarowe wektory stanu, wejścia (sterowania) i wyjścia,  $f$ ,  $g$  – odpowiednio  $m$  oraz  $n$ -wymiarowe funkcje wielu zmiennych,  $t$  – czas.

W wektorze stanu  $x$  występują strumienie, prądy, prędkości kątowe wirników i kąty mocy generatorów, wielkości związane z modelami turbin oraz różnymi układami regulacji w zespołach wytwórczych.

Do równań (1) trzeba dopisać nierówności opisujące działania ograniczników występujących w układach regulacji zespołów wytwórczych pracujących w SEE [8].

Zakładając dodatkowo, że w analizowanym przedziale czasu (około kilkunastu minut) system nie zmienia swoich właściwości w czasie, czyli jest układem stacjonarnym, zlinearyzowany w ustalonym punkcie pracy model SEE można przedstawić w postaci następujących równań stanu i równań wyjścia [2, 7, 9, 10]:

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

gdzie:  $\Delta$  oznacza odchyłkę od wartości ustalonych odpowiednich wielkości,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  i  $D$  – macierz stanu i pozostałe macierze o określonych wymiarach i stałych

współczynnikach zależnych od modeli i parametrów elementów SEE [2, 9, 10].

Zlinearyzowany model SEE, określony zależnościami (2), jest dobrym przybliżeniem rzeczywistości w przypadku analizy układu przy stosunkowo niewielkich wymuszeniach lub zakłóceniach (np. przy kilkuprocentowych zmianach wartości napięcia zadanego regulatora napięcia w jednym z zespołów wytwórczych, zwarciach małoprądowych i odłączeniach w liniach przesyłowych).

Przebiegi czasowe wielkości wyjściowych w SEE można obliczyć, rozwiązując numerycznie równania (1) lub (2). Rozwiązanie można również uzyskać na podstawie obliczenia wartości własnych i wektorów własnych macierzy stanu  $A$ . Przebieg każdej wielkości wyjściowej stanowi superpozycję składowych modalnych zależnych od wartości własnych i wektorów własnych macierzy  $A$  [2, 9, 10].

W przypadku wymuszenia w postaci impulsu Diraca  $j$ -tej wielkości wejściowej  $\Delta u_j(t) = \Delta U \delta(t)$ , przy założeniu  $D = 0$  i występowania tylko jednokrotnych wartości własnych, przebieg  $i$ -tej wielkości wyjściowej dla  $t \geq t_0$  można przedstawić w postaci [2, 9, 10]:

$$(3) \quad \Delta y_i(t) = \sum_{h=1}^m F_{ih} e^{\lambda_h(t-t_0)},$$

gdzie:  $\lambda_h$  –  $h$ -ta wartość własna macierzy  $A$ ,  $m$  – liczba wartości własnych macierzy  $A$ ,  $t_0$  – chwila wystąpienia wymuszenia,  $F_{ih}$  – czynnik udziału  $h$ -tej wartości własnej w przebiegu  $i$ -tej wielkości wyjściowej:

$$(4) \quad F_{ih} = C_i V_h^T W_h^T B_j \Delta U,$$

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 szerokości, jest zbliżona do odpowiedzi tego układu na wymuszenie w postaci impulsu Diraca określonej równaniem (3) [2, 9, 10].

Wartość czynnika udziału (4) jest zależna od miejsca wprowadzenia wymuszenia (lub zakłócenia) w SEE ( $j$ -tej zmiennej wejściowej odpowiada  $j$ -ta kolumna macierzy  $B$ ). Im większy jest moduł czynnika udziału  $|F_{ih}|$ , tym występuje większy wpływ składowej modalnej, związanej z  $h$ -tą wartością własną, na przebieg  $i$ -tej wielkości wyjściowej.

Czynniki udziału można także określić w przybliżony sposób za pomocą analizy wrażliwości wartości własnych na zmianę elementów macierzy stanu systemu, wywołaną przez niewielkie zakłócenie w SEE [1]. Można tę zmianę uwzględnić w macierzy stanu  $A$ , zamiast w wektorze wymuszeń  $\Delta u$ . Wrażliwość wartości własnej  $\lambda_h$  na zmianę dowolnego parametru  $q$  wyraża równanie [1]:

$$(5) \quad \frac{\partial \lambda_h}{\partial q} = \frac{\partial}{\partial q} (W_h^T A V_h) = W_h^T \frac{\partial A}{\partial q} V_h.$$

Jeśli zmiana parametru  $q$  powoduje zmianę jednego tylko elementu  $a_{ii}$  macierzy stanu  $A$ , otrzymuje się:

$$(6) \quad \frac{\partial \lambda_h}{\partial q} = (W_{ih}^T V_{ih}) \frac{\partial a_{ii}}{\partial q} = p_{ih} \frac{\partial a_{ii}}{\partial q},$$

gdzie:

$$(7) \quad p_{ih} = W_{ih}^T V_{ih}$$

określa wpływ  $i$ -tej zmiennej stanu w  $h$ -tej składowej modalnej.

W odróżnieniu od czynnika udziału (4), współczynnik (7) będzie nazywany w dalszej części artykułu *współczynnikiem korelacji*.

Odpowiedzi na niektóre małe zakłócenia samoczynnie pojawiające się w SEE (bez wprowadzenia zakłócenia), po pewnym czasie od wystąpienia zakłócenia, są zbliżone co do kształtu do odpowiedzi na impuls Diraca i mogą być obliczone z zadawalającą dokładnością na podstawie wzoru (3). W przypadku takich zakłóceń zamiast czynników udziału we wzorze (3) występują amplitudy poszczególnych składowych modalnych, które są w przybliżeniu proporcjonalne do współczynników korelacji  $p_{ih}$ . Ta przybliżona proporcjonalność pomiędzy odpowiednimi czynnikami udziału i współczynnikami korelacji obowiązuje również w przypadku wprowadzenia celowego zakłócenia do SEE.

W modelu SEE często prędkości kąto- we zespołów wytwórczych są zmiennymi stanu, a moce chwilowe tych zespołów są zmiennymi wyjściowymi. Te elektromechaniczne wielkości w obrębie tego samego zespołu wytwórczego są ze sobą silnie związane. Wynika to z faktu, że na prędkość kątową generatora mają wpływ przede wszystkim moment napędowy pochodzący z turbiny i moment obciążenia proporcjonalny do mocy chwilowej, wydawanej przez generator.

W przypadku badania stabilności kątowej SEE i analizowania przebiegów wielkości elektromechanicznych określa się współczynniki korelacji  $p_{ih}$  pomiędzy prędkościami kątowymi generatorów pracujących w kolejnych zespołach wytwórczych ( $i$ -ta zmienna w wektorze stanu) i poszczególnymi ( $h$ -tymi) elektromechanicznymi wartościami własnymi. W związku z tym w zależności (7) występuje zwykle iloczyn  $i$ -tych składowych lewostronnego i prawostronnego wektora własnego  $h$ -tej elektromechanicznej wartości własnej.

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

### Określenie zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątowej SEE

Część rzeczywista wartości własnej jest związana z tłumieniem lub brakiem tłumienia odpowiadającej jej składowej modalnej. Składowa modalna jest tłumiona, gdy część rzeczywista wartości własnej jest ujemna (im większy jest moduł, tym większe tłumienie). W przypadku dodatniej części rzeczywistej składowa modalna jest narastająca, co oznacza utratę stabilności układu. Część urojona wartości własnej jest równa pulsacji oscylacji związanej z nią składowej modalnej.

W przebiegach wielkości elektromechanicznych poszczególnych zespołów wytwórczych pracujących w SEE (mocy chwilowej  $P$ , prędkości kątowej wirników  $\omega$ , oraz kątów mocy  $\delta$  generatorów) dominują składowe modalne związane z elektromechanicznymi wartościami własnymi. Są to zespolone, parami sprzężone wartości własne o częściach urojonych z przedziału  $(0,63 \div 12,6)$  rad/s, co odpowiada zakresowi częstotliwości oscylacji z przedziału  $(0,1 \div 2)$  Hz. Można orientacyjnie ocenić, że zadowalająco szybkie zanikanie kołysań elektromechanicznych w systemie uzyskuje się, jeśli części rzeczywiste wszystkich wartości własnych są mniejsze od  $-0,3$  (jest to wielkość umowna, szacunkowa).

Znając elektromechaniczne wartości własne macierzy stanu SEE, a także ich czynniki udziału, współczynniki korelacji lub elementy prawostronnych wektorów własnych, można określić, które składowe modalne mają największy wpływ na poszczególne przebiegi wielkości elektromechanicznych w zespołach wytwórczych SEE. Można też określić zespoły wytwórcze, w których występują przebiegi wielkości elektromechanicznych zawierające dominujące (o dużych amplitudach), słabo tłumione (lub nietłumione) składowe modalne związane z wartościami własnymi o największych częściach rzeczywistych (m.in. większych od  $-0,3$ ). Te zespoły wytwórcze mają największy wpływ na stabilność kątową SEE.

### Metoda obliczeń wartości własnych

Elektromechaniczne wartości własne i ich czynniki udziału można obliczyć na podstawie analizy odchyłek od wartości ustalonej przebiegów wielkości elektromechanicznych pojawiających się w SEE po małych zakłóceniach.

W przedstawionych badaniach obliczenia przeprowadzono na podstawie przebiegów zakłóceń mocy chwilowej zespołów wytwórczych pojawiających się po wprowadzeniu krótkotrwałego zakłócenia impulsowego w układzie regulacji napięcia jednego z zespołów.

Wykorzystana metoda obliczeń polega na aproksymacji przebiegów mocy chwilowej poszczególnych zespołów przebiegami obliczonymi na podstawie zależności (3), stanowiącymi superpozycję składowych modalnych określonych przez poszukiwane wartości własne i ich czynniki udziału. Przy użyciu tych wartości własnych i ich czynników udziału można zdefiniować bezpośrednio parametry funkcji celu (8). Parametry te dobierane są iteracyjnie, aby zminimalizować wartość funkcji celu  $\varepsilon$  zdefiniowanej, jako błąd średniokwadratowy między przebiegiem aproksymowanym, a aproksymującym [2, 9, 10]:

$$(8) \quad \varepsilon(\lambda, F) = \sum_{l=1}^N \left( \Delta P_{m,l} - \Delta P_{a,l} \left( \operatorname{Re}\{\lambda\}, \operatorname{Im}\{\lambda\}, |F|, \arg(F) \right) \right)^2,$$

gdzie:  $\lambda$  – wektor wartości własnych,  $F$  – wektor czynników udziału,  $\Delta P$  – analizowany przebieg odchyłki mocy chwilowej,  $l$  – numer próbki przebiegu,  $N$  – ilość próbek przebiegu, indeks „m” oznacza przebieg aproksymowany, a indeks „a” – przebieg aproksymujący. W obliczeniach przebiegu aproksymującego uwzględnia się tylko kilka dominujących składowych modalnych (o największych amplitudach). Wektory będące argumentami funkcji celu są rzeczywiste. Składają się one z części rzeczywistych i urojonych wartości własnych, oraz modułów i argumentów czynników udziału.

Funkcja celu  $\varepsilon$  ma liczne minima lokalne. Utknięcie w minimum lokalnym powoduje uzyskanie nieprawidłowych wyników obliczeń.

Do minimalizacji funkcji celu w badaniach wykorzystano hybrydowy algorytm optymalizacyjny, będący połączeniem algorytmów genetycznego oraz gradientowego Newtona [2, 6, 9, 10, 11, 12]. Wyniki obliczeń  $\lambda$  oraz  $F$  za pomocą algorytmu genetycznego stanowią punkt startowy dla algorytmu gradientowego. Dla algorytmu genetycznego nie jest wymagane określenie punktu startowego, a jedynie zakresów poszukiwań poszczególnych parametrów funkcji  $\varepsilon$ . Algorytm ten wykorzystywany jest w pierwszym etapie do przybliżonego określenia minimum globalnego funkcji celu. W drugim etapie wykorzystywany jest algorytm gradientowy, który jest szybciej zbieżny i pozwala na znalezienie minimum globalnego funkcji celu z większą dokładnością.

Do wstępnego określenia, które wartości własne ingerują znacząco w przebiegu mocy chwilowej

analizowanego zespołu, oraz wyznaczenia zakresów poszukiwań parametrów funkcji celu można wykorzystać model SEE opracowany na podstawie znanych w przybliżeniu parametrów zespołów wytwórczych. Model SEE zawsze jest modelem uproszczonym i nie uwzględnia wszystkich zachodzących w nim zjawisk, często też zawiera tylko wybrane zespoły wytwórcze o stosunkowo dużym wpływie na pracę SEE.

Przy obliczeniach wartości własnych z zależności (8) w celu eliminacji wpływu szybko zanikających składowych modalnych (nie związanych ze zjawiskami elektromechanicznymi), przebiegi mocy chwilowej analizowane są po pewnym czasie  $t_p$ , od chwili wystąpienia zakłócenia  $t_0$ , przy czym czas  $t_p$  dobierany jest doświadczalnie w celu osiągnięcia zadowalającej dokładności obliczeń [2, 9, 10].

Aby dodatkowo zmniejszyć ryzyko utknięcia algorytmu optymalizacyjnego w minimum lokalnym funkcji celu, obliczenia na podstawie każdego przebiegu mocy chwilowej wykonywane są wielokrotnie. Wyniki o wartościach funkcji celu wyższych, niż określona 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 [2, 9, 10].

Ponieważ dokładność obliczeń jest większa, gdy liczba optymalizowanych jednocześnie parametrów jest mniejsza, obliczenia wartości własnych przeprowadzane są wieloetapowo. Na początku obliczane są wartości własne związane z najstabilniej tłumionymi składowymi modalnymi. Pozostałe wartości własne nie wpływają na obliczenia, ponieważ związane z nimi składowe modalne zostają dostatecznie silnie wytłumione przed upływem odpowiednio dobranego czasu początku analizy przebiegów  $t_0 + t_p$ . W kolejnych etapach obliczane są wartości własne związane z silniej tłumionymi składowymi modalnymi, przy uwzględnieniu znajomości wcześniej obliczonych wartości własnych. Czynniki udziału są obliczane dla wszystkich wartości własnych i poszczególnych przebiegów mocy chwilowej zespołów wytwórczych [2, 9, 10].

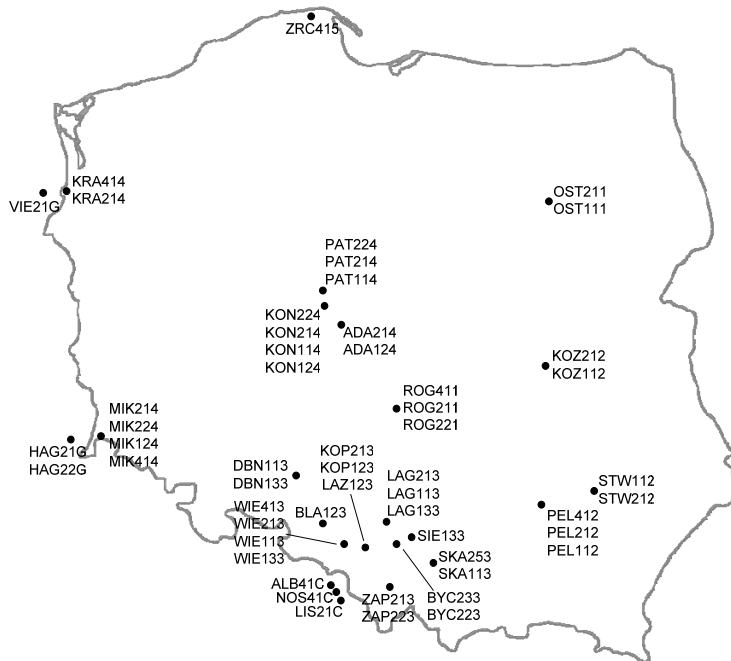
### Przykładowe obliczenia

Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla modelu Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Jest to nieliniowy model opracowany w środowisku programu Matlab-Simulink, uwzględniający 49 wybranych zespołów wytwórczych pracujących w sieciach wysokich i najwyższych napięć oraz 8 zastępczych zespołów wytwórczych reprezentujących oddziaływanie SEE sąsiednich państw (rys. 1).

W modelu KSE uwzględniono następujące modele elementów zespołu wytwórczego: generatora synchronicznego GENROU [8, 13], statycznego [8] lub elektromaszynowego [8, 13] układu wzbudzenia pracującego w KSE, turbiny parowej IEEEG1 [8, 13] lub turbiny wodnej HYGOW [8, 13] oraz stabilizatora systemowego PSS3B [8, 13]. Zastępcze zespoły wytwórcze zostały opisane przez uproszczony model generatora synchronicznego GENCLS [13], pomijając oddziaływanie układu wzbudzenia, turbiny i stabilizatora systemowego.

Wartości własne macierzy stanu zlinearyzowanego w punkcie pracy modelu SEE można obliczyć bezpośrednio w środowisku programu Matlab-Simulink. Obliczone w ten sposób wartości własne nazwano w artykule *oryginalnymi wartościami własnymi*.

W obliczeniach przedstawionych w niniejszym artykule jako dane wejściowe, aproksymowane w czasie obliczeń optymalizacyjnych, wykorzystywane są przebiegi mocy chwilowej, uzyskane z symulacji przy użyciu nieliniowego modelu SEE.



Rys.1. Zespoły wytwórcze uwzględnione w modelu KSE [9]

Porównanie wartości własnych obliczonych na podstawie przebiegów mocy chwilowej oraz oryginalnych wartości własnych przyjęto jako miarę dokładności obliczeń. Macierz stanu modelu SEE ma 56 elektromechanicznych wartości własnych, które zostały posortowane malejąco względem części rzeczywistych i ponumerowane od  $\lambda_1$  to  $\lambda_{56}$ . W tabeli 1 zestawiono oryginalne elektromechaniczne wartości własne  $\lambda$  macierzy stanu KSE związane z najmniej tłumionymi składowymi modalnymi oraz błędy bezwzględne  $\Delta\lambda$  obliczeń tych wartości własnych na podstawie przebiegów mocy chwilowej.

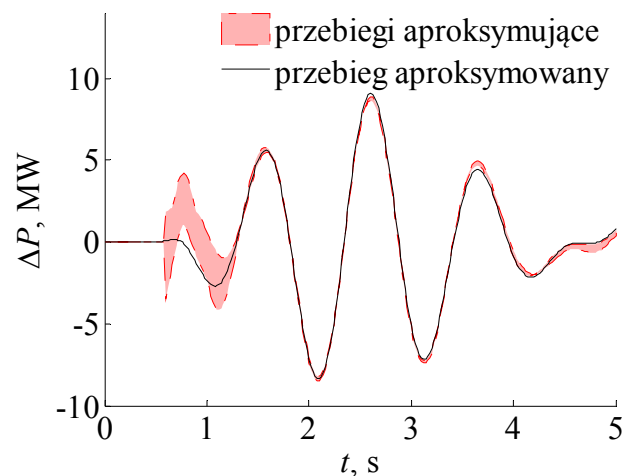
Tabela 1. Oryginalne wartości własne macierzy stanu KSE oraz błędy bezwzględne ich obliczeń na podstawie przebiegów mocy chwilowej

$h$	1	2	3
$\lambda_{h_s}$ , 1/s	-0,0835±j5,6278	-0,1710±j4,9780	-0,4165±j8,0932
$\Delta\lambda_{h_s}$ , 1/s	-0,0745±j0,4093	-0,0340±j0,1444	0,0138±j0,0976
$h$	4	5	6
$\lambda_{h_s}$ , 1/s	-0,4488±j6,6540	-0,4788±j7,6653	-0,4955±j7,3005
$\Delta\lambda_{h_s}$ , 1/s	-0,0277±j0,0088	0,0691±j0,1107	0,0293±j0,2115

Przykładowo na rysunku 2 przedstawiono przebiegi odchyłki mocy chwilowej oraz pasma przebiegów aproksymujących odpowiadające nieodrzuconym wynikom obliczeń. Pasma to określa zakres zmian mocy chwilowej, w którym zawierają się wszystkie przebiegi aproksymujące odpowiadające poszczególnym wynikom obliczeń.

W celu znalezienia zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątowej SEE przeanalizowano czynniki udziału, współczynniki korelacji i prawostronne wektory własne wartości własnych o częściach rzeczywistych większych od -0.3 i mających znaczący wpływ na przebiegi zespołów wytwórczych fizycznie występujących w KSE. Są to wartości własne  $\lambda_1$  oraz  $\lambda_2$ . Analizując czynniki udziału wartości własnych  $\lambda_1$  oraz  $\lambda_2$  wybrano przebiegi, w których dominowały składowe modalne związane z tymi wartościami własnymi. Przyjęto jako dominujące te składowe, których moduły czynników udziału wynosiły co najmniej 70% największego modułu czynnika udziału elektromechanicznej wartości własnej w analizowanym przebiegu. W badaniach pominięto zastępcze zespoły wytwórcze.

W tabeli 2 dla wybranych w ten sposób zespołów zestawiono względne moduły współczynników korelacji  $|p|_{rel}$  oraz elementów prawostronnych wektorów własnych  $|V_{ih}|_{rel}$  w odniesieniu odpowiednio do największych modułów  $|p|$  lub  $|V_{ih}|$  poszczególnych wartości własnych.



Rys.2. Przebiegi odchyłki mocy chwilowej zespołu ZRC415 przy zakłóceniu w zespole PEL412

Tabela 2. Współczynniki korelacji wartości własnych  $\lambda_1$  oraz  $\lambda_2$

	zesp.	$ p _{rel}$	$ V_{ih} _{rel}$	zesp.	$ p _{rel}$	$ V_{ih} _{rel}$
$\lambda_1$	KRA214	1	1	ROG411	0,5862	0,7461
	ZRC415 *	1	1	KOZ112	0,1641	0,1932
$\lambda_2$	KOZ212 *	0,4245	0,5397	PEL412 *	0,1586	0,2650
	ROG411 *	0,3769	0,6078	OST211	0,1536	0,2167
	ROG221 *	0,2748	0,3652	PEL212	0,1351	0,2075
	PAT214	0,2262	0,2959	KON124 *	0,0949	0,1391
	PAT114	0,1900	0,2281	PAT224	0,0719	0,0968
	ADA214 *	0,1825	0,2193	ADA124	0,0681	0,0773
	ROG211 *	0,1682	0,2357	KON114 *	0,0275	0,0385

Sformułowano następujące kryteria kwalifikacji zespołów wytwórczych jako krytycznych dla stabilności kątowej SEE:

1. Występuje co najmniej jeden z przypadków:
  - w przebiegach  $\Delta P$  tych zespołów występowała dominująca składowa modalna związana z uwzględnioną wartością własną dla co najmniej dwóch różnych miejsc wprowadzenia zakłócenia,
  - wprowadzenie zakłócenia w tym zespole spowodowało wystąpienie dominujących składowych związanych z uwzględnioną wartością w przebiegach  $\Delta P$  co najmniej dwóch różnych zespołów wytwórczych.
2. W zespole dla uwzględnionej wartości własnej  $|p_{rel}| > 0,5$  lub  $|V_{ih|rel}| > 0,5$ .
3. W zespole dla uwzględnionej wartości własnej  $|p_{rel}| > 0,2$  lub  $|V_{ih|rel}| > 0,2$ .
4. Spełnianie przez zespół powyższych kryteriów dla więcej, niż jednej wartości własnej zwiększa jego znaczenie dla stabilności kątowej SEE.

Zespoły wytwórcze spełniające kryterium 1 oznaczono gwiazdką w tabeli 2. Zazwyczaj mają one duże wartości modułów współczynników korelacji oraz elementów prawostronnych wektorów własnych dla uwzględnionych w tej tabeli wartości własnych.

Na podstawie przeprowadzonych analiz i określonych kryteriów ostatecznie wybrano i uporządkowano według znaczenia dla stabilności kątowej KSE zespoły wytwórcze, które przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zespoły wytwórcze krytyczne dla stabilności kątowej KSE

Lp.	Zespół	Spełnione kryteria nr:			
		1	2	3	4
1	ROG411	$\lambda_2$	$\lambda_1, \lambda_2$	$\lambda_1, \lambda_2$	$\lambda_1, \lambda_2$
2	KRA214		$\lambda_1$	$\lambda_1$	
3	ZRC415	$\lambda_2$	$\lambda_2$	$\lambda_2$	
4	KOZ212	$\lambda_2$	$\lambda_2$	$\lambda_2$	
5	ROG221	$\lambda_2$		$\lambda_2$	
6	PEL412	$\lambda_2$		$\lambda_2$	
7	ROG211	$\lambda_2$		$\lambda_2$	
8	ADA214	$\lambda_2$		$\lambda_2$	

## Wnioski

Przeprowadzone badania umożliwiły sformułowanie następujących wniosków:

- Możliwe jest znalezienie zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątowej SEE na podstawie obliczeń elektromechanicznych wartości własnych macierzy stanu SEE i określenia, w przebiegach których zespołów wytwórczych te wartości własne ingerują w znaczący sposób. Przedstawiono kryteria wyboru tych zespołów wytwórczych. Na te kryteria wpływają czynniki udziału, współczynniki korelacji i prawostronne wektory własne elektromechanicznych wartości własnych o największych częściach rzeczywistych.
- Na podstawie analizy rzeczywistych przebiegów mocy chwilowej zespołów wytwórczych można z zadowalającą dokładnością obliczyć elektromechaniczne wartości własne i ich czynniki udziału. Dokładność obliczeń jest zazwyczaj najlepsza dla wartości własnych o największych częściach rzeczywistych, związanych z najstłabiej tłumionymi składowymi modalnymi. Jest to korzystne dla oceny stabilności kątowej SEE.
- Dysponując modelem SEE, można na podstawie wektorów własnych macierzy stanu tego modelu obliczyć współczynniki korelacji poszczególnych wartości własnych w przebiegach kolejnych zespołów wytwórczych.
- Z przeprowadzonych badań wynika, że wyniki lokalizacji zespołów krytycznych dla stabilności kątowej SEE na podstawie analizy czynników udziału, współczynników

korelacji i prawostronnych wektorów własnych częściowo pokrywają się. Zgodność występuje przede wszystkim dla zespołów, w których szczególnie wartości własne o dużych częściach rzeczywistych mają duże wartości prawostronnych wektorów własnych i współczynników korelacji.

Lokalizacja krytycznych zespołów wytwórczych w SEE oraz obliczenia elektromechanicznych wartości własnych i ich czynników udziału może być również przeprowadzona zaprezentowaną metodą na podstawie przebiegów innych wielkości elektromechanicznych zespołów wytwórczych: prędkości kątowej oraz kąta mocy generatorów synchronicznych. Można wykorzystać przebiegi wielkości elektromechanicznych pojawiające się po celowym wprowadzeniu zakłócenia w postaci impulsu prostokątnego (jak w niniejszym artykule) lub skoku jednostkowego, ale także po wystąpieniu losowych zakłóceń takich, jak zwarcia i zmiany obciążenia węzłów odbiorczych.

**Autorzy:** dr inż. Piotr Pruski, E-mail: [Piotr.Pruski@polsl.pl](mailto:Piotr.Pruski@polsl.pl), prof. dr hab. inż. Stefan Paszek, E-mail: [Stefan.Paszek@polsl.pl](mailto:Stefan.Paszek@polsl.pl), Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice.

## LITERATURA

- [1] Machowski J., Białek J., Bumby J., *Power System Dynamics. Stability and Control*, John Wiley & Sons, Chichester, New York, 2008.
- [2] Pruski P., Paszek S., *Analiza modalna wybranych przebiegów zakłóceń w systemie elektroenergetycznym. Wyznaczenie wskaźników stabilności kątowej*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2016.
- [3] Daniar S., Shiroei M., Aazami R., Multivariable predictive control considering time delay for load-frequency control in multi-area power systems, *Archives of Control Sciences* 26, (2016), n.4., 527–549.
- [4] Kazemi A., Andami H., FACTS Devices in Deregulated Electric Power Systems: A Review. *Proceedings of the IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT 2004)*, April 2004, Hong Kong, 337-342.
- [5] Hemeida A. M., El-Saad G., Damping power system oscillations using FACTS combinations. *UPEC*, September (2004), Vol. 1, 333-337.
- [6] Belazzoug M., Boudour M., K. Sebaa, FACTS location and size for reactive power system compensation through the multi-objective optimization, *Archives of Control Sciences* 4, (2010) 473–489.
- [7] Ogata K., *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, 2010.
- [8] Paszek S., Boboń A., Berhausen S., Majka Ł., Nocoń A., Pruski P., *Synchronous generators and excitation systems operating in a power system. Measurements methods and modeling*, Monograph, series: Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 631, Springer, 2020.
- [9] Pruski P., Paszek S., Assessment of Polish Power System angular stability based on analysis of different disturbance waveforms, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 63 (2015), n.2, 435–441.
- [10] Pruski P., Paszek S., Calculations of power system electromechanical eigenvalues based on analysis of instantaneous power waveforms at different disturbances, *Applied Mathematics and Computation*, 319, (2018), 104–114.
- [11] Paszek S., Nocoń A., *Optimisation and Polyoptimisation of Power System Stabilizer Parameters*, LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, 2014.
- [12] 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* 63 (2014), n.4, 647–665.
- [13] Power Technologies, a Division of S&W Consultants Inc., *Program PSS/E Application Guide*, Siemens Power Technologies Inc., 2002.