

OCENA STABILNOŚCI KĄTOWEJ SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO NA PODSTAWIE ANALIZY WYBRANYCH STANÓW ZAKŁÓCENIOWYCH

dr hab. inż. Stefan Paszek, prof. nadzw. Politechniki Śląskiej / Politechnika Śląska
mgr inż. Piotr Pruski / Politechnika Śląska

1. WSTĘP

Kwestią podstawową w działaniach zmierzających do poprawy stabilności kątovej systemu elektroenergetycznego (SEE) jest opracowanie metody oceny tej stabilności. Do oceny stabilności kątovej można wykorzystać wiele metod analitycznych, opartych na modelowaniu matematycznym SEE i analizie wartości własnych macierzy stanu SEE. Wartości własne, obliczane z równań stanu, zależą od wartości elementów macierzy stanu systemu, a pośrednio od przyjętych modeli elementów systemu i ich niepewnych parametrów. Wartości własne można również obliczyć z dobrą dokładnością na podstawie analizy rzeczywistych przebiegów zakłóceńowych pojawiających się w SEE po różnych zakłóceńach. W tym przypadku na wyniki obliczeń nie oddziałuje przyjęty model SEE i jego parametry, tylko aktualny stan pracy układu. Znajomość wartości własnych macierzy stanu SEE pozwala na wyznaczenie wskaźników stabilności SEE [1] oraz zapasu stabilności SEE. Celem niniejszego artykułu jest ocena dokładności obliczeń elektromechanicznych wartości własnych macierzy stanu SEE, na podstawie przebiegów zakłóceńowych mocy chwilowej (często nazywanych przebiegami mocy czynnej) w zespołach wytwórczych, w zależności od złożoności analizowanego SEE oraz stopnia tłumienia przebiegów mocy chwilowej.

2. ZLINEARYZOWANY MODEL SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Zlinearyzowany w punkcie pracy model SEE opisany jest równaniem stanu i równaniem wyjścia [2]:

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U \quad (1)$$

$$\Delta Y = C \Delta X + D \Delta U \quad (2)$$

gdzie: ΔX , ΔU , ΔY , – odchyłki wektora zmiennych stanu, wektora wymuszeń i wektora zmiennych wyjściowych. Współczynniki macierzy A , B , C i D równań stanu i wyjścia SEE są obliczane dla ustalonego punktu pracy.

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę oceny stabilności kątovej wielomaszynowego systemu elektroenergetycznego, na podstawie analizy wybranych stanów zakłóceńowych. Do oceny stabilności kątovej wykorzystano elektromechaniczne wartości własne, obliczone na podstawie przebiegów zakłóceńowych mocy chwilowej w poszczególnych zespołach wytwórczych, po wystąpieniu zakłócenia w postaci prostokątnego impulsu o określonej długości, wprowadzonego do układu regulacji napięcia jednego z zespołów wytwórczych. Przeanalizowano wpływ czasu trwania impulsu na dokładność obliczeń wartości

własnych oraz na amplitudę kołysań mocy chwilowej. Analizę przeprowadzono dla różnych wartości współczynników wzmocnienia stabilizatorów systemowych w poszczególnych zespołach wytwórczych, czemu odpowiada różne tłumienie kołysań mocy chwilowej w systemie elektroenergetycznym. Wartości własne zostały obliczone przy użyciu algorytmu hybrydowego, stanowiącego połączenie algorytmów genetycznego i gradientowego. Dla wybranych przypadków przeprowadzono analizę statystyczną dokładności obliczeń elektromechanicznych wartości własnych.



Przebiegi wielkości wyjściowych zlinearyzowanego modelu systemu można obliczyć bezpośrednio, całując równanie stanu, lub z wykorzystaniem wartości i wektorów własnych macierzy stanu A [2]. Przebieg danej wielkości wyjściowej stanowi superpozycję składowych modalnych zależnych od wartości własnych i wektorów własnych macierzy stanu. Przykładowo, dla zakłócenia w postaci impulsu Diraca wielkości wejściowej $\Delta U(t) = \Delta U \delta(t)$ przebieg i -tej wielkości wyjściowej (przy $D = 0$) ma postać [2]:

$$\Delta Y_i = \sum_{h=1}^n F_{ih} e^{\lambda_h t} \Delta U \quad (3)$$

gdzie: λ_h – h -ta wartość własna macierzy stanu, F_{ih} – czynnik udziału h -tej wartości własnej w przebiegu i wielkości wyjściowej.

W przypadku przebiegów kotłosań mocy chwilowej w SEE decydujące znaczenie mają tzw. elektromechaniczne wartości własne, które związane są z ruchem wirników zespołów wytwórczych. Są to zespolone sprzężone wartości własne o częściach urojonych, odpowiadających zakresowi częstotliwości $(0,1 \div 2 \text{ Hz})$, a więc ich części urojone mieszczą się w zakresie $(0,63 \div 12,6 \text{ rad/s})$. Elektromechaniczne wartości własne w różny sposób interweniują w przebiegach mocy chwilowej poszczególnych zespołów wytwórczych, co jest związane z różnymi wartościami ich czynników udziału.

3. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

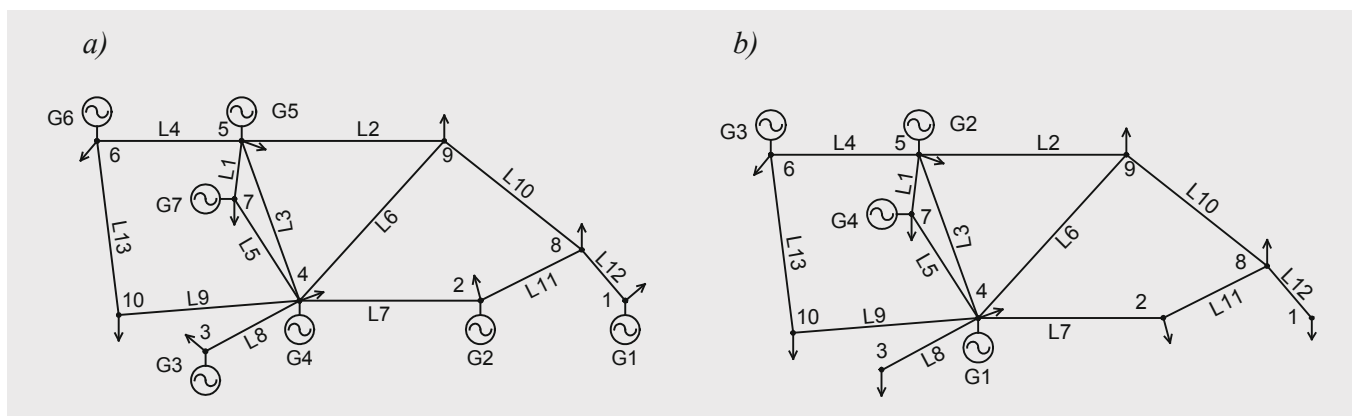
Wykorzystana w badaniach metoda obliczeń elektromechanicznych wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów mocy chwilowej w poszczególnych zespołach wytwórczych za pomocą wyrażenia (3). Elektromechaniczne wartości własne i czynniki udziału poszczególnych składowych modalnych są nieznanymi parametrami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

$$\varepsilon_w(\lambda, F) = \sum_{i=1}^n \left(|P_{i(m)} - P_{i(a)}(\lambda, F)| \right)^2 \quad (4)$$

gdzie: λ – wektor elektromechanicznych wartości własnych, F – wektor czynników udziału, 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 (4) wykorzystano algorytm hybrydowy, stanowiący szeregowe połączenie algorytmów genetycznego i gradientowego. Wyniki algorytmu genetycznego stanowią punkt startowy dla algorytmu gradientowego. Algorytm genetyczny poszukuje minimum globalnego funkcji celu w zadanym przedziale wyznaczanych parametrów. Punkt startowy wybierany jest losowo z przedziału poszukiwań, nie ma więc konieczności jego dokładnego określania. Algorytm ten jest jednak wolnozbieżny. Algorytm gradientowy jest szybkozbieżny, ale poszukuje on minimum lokalnego funkcji celu, co powoduje, że początkowe wartości parametrów muszą być dobrane starannie, aby uzyskać poprawne wyniki. Szeregowe połączenie algorytmów genetycznego i gradientowego eliminuje ich podstawowe wady [3].

Docelowo do obliczeń, jako dane wejściowe (aproksymowane w czasie obliczeń), wykorzystywane będą przebiegi mocy chwilowej pochodzące z pomiarów, jednak w celu sprawdzenia metody obliczeń na razie wykorzystywane są przebiegi mocy chwilowej uzyskane z symulacji przy użyciu modelu SEE. Jako punkt odniesienia przyjęto wartości własne i czynniki udziału obliczane na podstawie przyjętej struktury i parametrów modelu.

Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla 7-maszynowego SEE Cigre i 4-maszynowego SEE (rys. 1). 4-maszynowy SEE uzyskano poprzez modyfikację 7-maszynowego SEE, przyjmując trzy zespoły wytwórcze jako węzły odbiorcze.



Rys. 1. Analizowane SEE: 7-maszynowy (a) i 4-maszynowy (b)

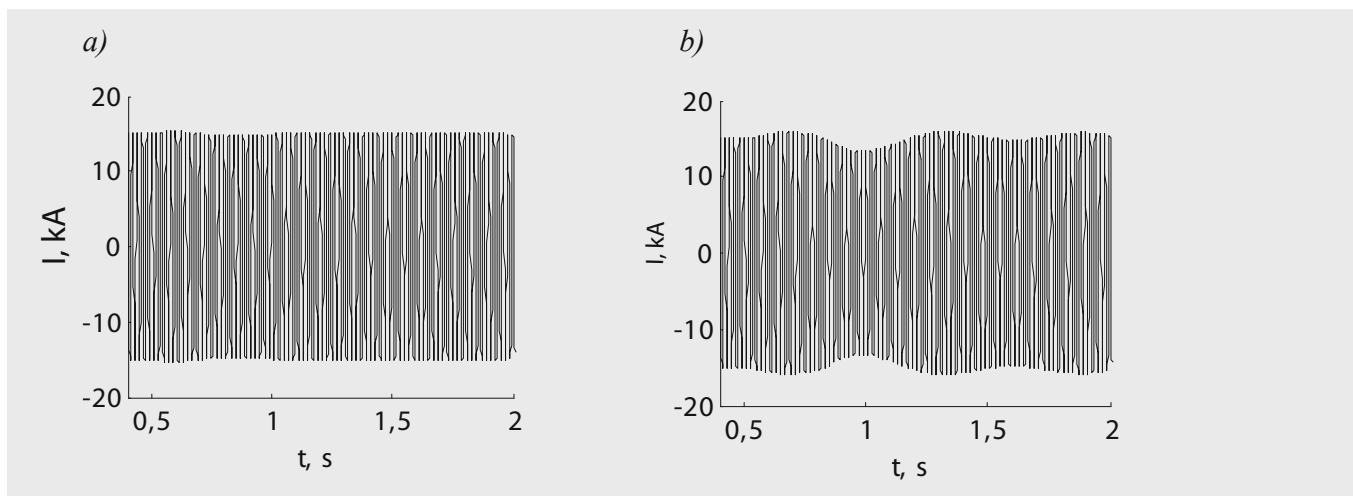
Opracowano model analizowanych SEE w środowisku programu Matlab-Simulink. Każdy zespół wytwórczy, wchodzący w skład modelowanego systemu, składa się z bloków typu Configurable Subsystems, pozwalających na wybór modelu generatora, układu wzbudzenia, turbiny oraz stabilizatora systemowego (PSSu). W obliczeniach dotyczących niniejszego artykułu wzięto pod uwagę modele: generatora synchronicznego GEN-ROU z nieliniową charakterystyką magnesowania [4, 5], statycznego układu wzbudzenia, pracującego w polskim SEE [4], turbiny parowej IEEE1 [4, 6] 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.

3.1. Analiza wpływu szerokości impulsu prostokątnego na amplitudę kotyśń mocy chwilowej oraz na dokładność obliczania wartości własnych

Odpowiedni dobór wysokości i szerokości impulsu prostokątnego napięcia zadanego regulatora napięcia jest ważnym czynnikiem, decydującym o dokładności obliczeń. Amplituda kotyśń mocy chwilowej musi być odpowiednio duża, aby można było wyodrębnić te kotysania z zarejestrowanych przebiegów fazowych prądów i napięć w poszczególnych węzłach systemu. Amplituda ta jest tym większa, im większe jest pole powierzchni impulsu przebiegu napięcia zadanego regulatora napięcia. Wysokość impulsu musi być jednak ograniczona, aby uniknąć znaczącego wpływu nieliniowości i ograniczeń na przebiegi mocy chwilowej. W obliczeniach przyjęto impuls prostokątny o wysokości równej 5% wartości ustalonej napięcia zadanego regulatora napięcia. Czas trwania impulsu prostokątnego również musi być ograniczony, gdyż jego znaczne wydłużenie powoduje coraz większe różnice odpowiedzi systemu na impuls prostokątny i na impuls Diraca, co może spowodować zmniejszenie dokładności wyznaczania elektromechanicznych wartości własnych.

Na rys. 2 przedstawiono przebiegi prądów fazowych twornika generatora w zespole wytwórczym G4 4-maszynowego SEE po wystąpieniu zakłócenia w tym zespole wytwórczym, w postaci impulsu prostokątnego o czasie trwania 50 ms oraz 300 ms. Współczynnik wzmocnienia wszystkich stabilizatorów systemowych wynosi $K_{SI} = 0,1$ [4], czemu odpowiada stosunkowo małe tłumienie kotyśń elektromechanicznych.



Rys. 2. Przebiegi prądów fazowych twornika generatora w zespole wytwórczym G4 przy zakłóceniu w postaci impulsu prostokątnego o czasie trwania 50 ms (a) i 300 ms (b)

Z rys. 2 wynika, że zwiększenie czasu trwania impulsu z 50 ms do 300 ms spowodowało już znaczące zmiany prądów fazowych twornika generatora, a tym samym zwiększenie amplitudy kotłusań mocy chwilowej.

Przeanalizowano wpływ wydłużania czasu trwania impulsu prostokątnego na dokładność obliczeń elektromechanicznych wartości własnych analizowanego 4-maszynowego SEE. W tab. 1 zestawiono elektromechaniczne wartości własne λ i moduły czynników udziału $|F|$ tych wartości własnych w przebiegu mocy chwilowej zespołu G4. Wielkości te zostały obliczone bezpośrednio na podstawie modelu SEE w programie Matlab-Simulink. W dalszej części artykułu te elektromechaniczne wartości własne są nazywane „oryginalnymi wartościami własnymi”. W tab. 1 podano względne moduły czynników udziału w odniesieniu do największego w danym przebiegu modułu czynnika udziału.

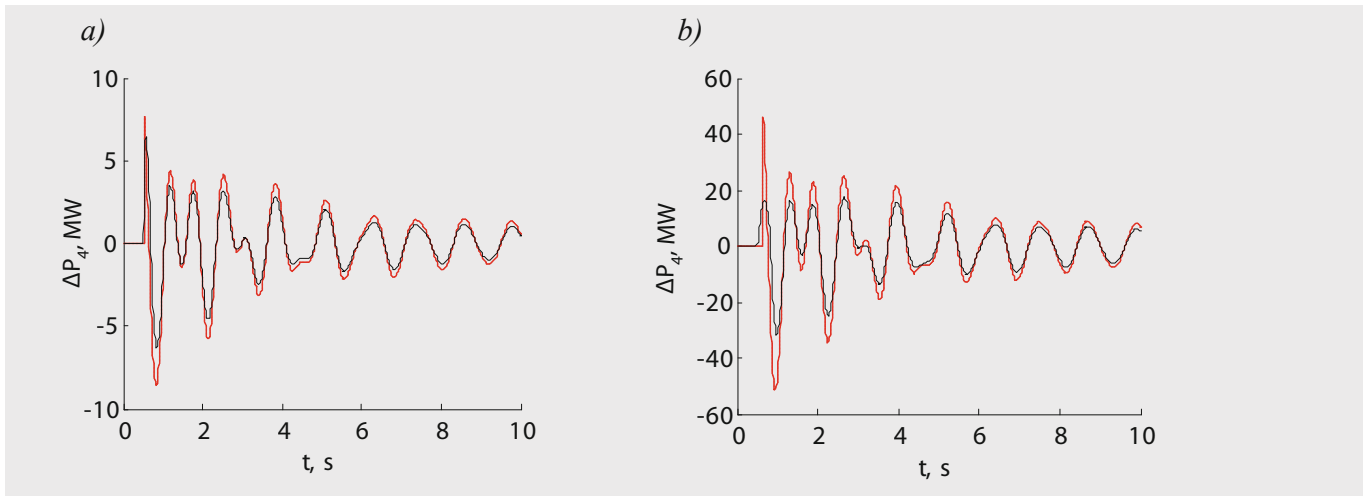
Tab. 1. Oryginalne wartości własne analizowanego 4-maszynowego SEE i ich czynniki udziału w przebiegu mocy chwilowej zespołu G4

Lp.	1	2	3	4
λ	$-0,758 \pm j10,176$	$-0,608 \pm j10,346$	$-0,478 \pm j9,435$	$-0,0985 \pm j5,311$
$ F $ p.u.	0,0094	0,0548	1	0,469

Wartość modułu czynnika udziału decyduje o amplitudzie danej składowej modalnej w przebiegu mocy chwilowej, a co za tym idzie, decyduje o wpływie tej składowej modalnej na wartość funkcji celu (4). Z powodu małych wartości modułów czynników udziału wartości własnych λ_1 i λ_2 w rozpatrywanym przebiegu mocy chwilowej, te wartości własne nie były obliczone na podstawie tego przebiegu. Z powodu występowania minimów lokalnych funkcji celu, w których algorytm optymalizacyjny może utknąć, obliczenia wartości własnych przeprowadzono wielokrotnie na podstawie tego samego przebiegu. Odrzucano wyniki o wartościach funkcji celu większych niż pewna przyjęta granica. Jako wynik końcowy obliczeń części rzeczywistych i części urojonych poszczególnych wartości własnych przyjęto średnie arytmetyczne odpowiednio części rzeczywistych i części urojonych wartości własnych, uzyskanych z wyników nieodrzuconych w kolejnych obliczeniach.

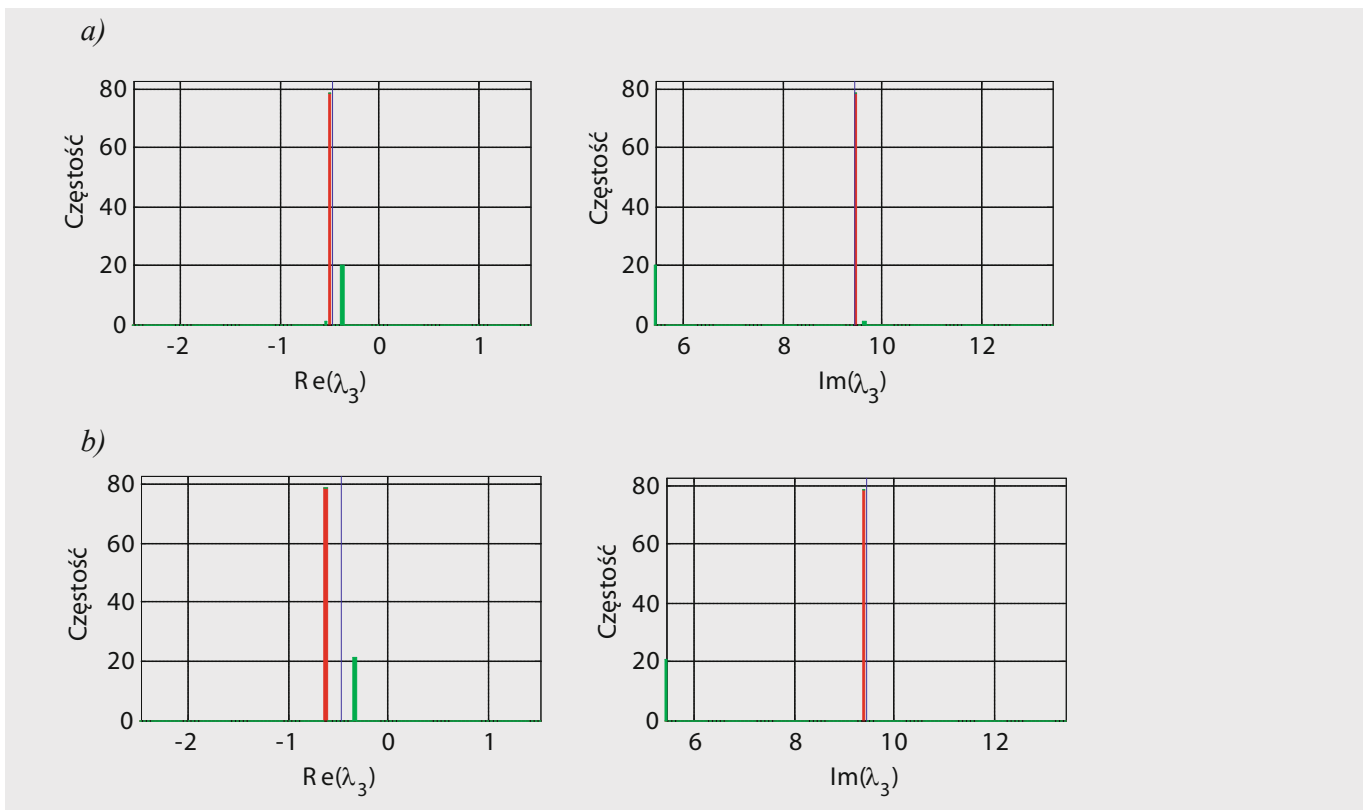
Rys. 3 przedstawia przebiegi zakłócenio- we mocy chwilowej zespołu wytwórczego G4, pochodzące z symulacji (linia czarna) i odtworzone z oryginalnych wartości własnych (linia czerwona), w przypadku czasu trwania impulsu wynoszącego 50 ms i 300 ms.

Widać, że wydłużenie czasu trwania impulsu spowodowało zwiększenie różnic między przebiegiem pochodzącym z symulacji i przebiegiem odtworzonym z oryginalnych wartości własnych.



Rys. 3. Przebiegi zakłócenia mocy chwilowej zespołu wytwórczego G4 przy zakłóceniu w postaci impulsu prostokątnego o czasie trwania 50 ms (a) i 300 ms (b)

Na rys. 4 przedstawiono histogramy części rzeczywistej i części urojonej wartości własnej λ_3 , wyznaczonych na podstawie analizy przebiegów zakłóceń dla impulsu o czasie trwania 50 ms i 300 ms. Czerwone słupki oznaczają wyniki uwzględnione w dalszej analizie, a zielone słupki oznaczają wyniki odrzucone. Pionowe cienkie linie, znajdujące się w środku histogramów, odpowiadają oryginalnym wartościom własnym.



Rys. 4. Histogramy części rzeczywistej i urojonej wartości własnej λ_3 , obliczonych na podstawie przebiegów mocy chwilowej, przy zakłóceniu impulsem prostokątnym o czasie trwania 50 ms (a) i 300 ms (b)

W tab. 2 zestawiono błędy obliczeń wartości własnych λ_3 i λ_4 dla kilku czasów trwania impulsu t_{imp} .

Tab. 2. Błędy obliczeń wartości własnych λ_3 i λ_4 dla różnych czasów trwania impulsu t_{imp}

t_{imp}	50 ms	200 ms	300 ms	400 ms	500 ms
$\Delta\lambda_3$	$(-18,3 \pm j9,9) \times 10^{-3}$	$(-3,35 \pm j1,09) \times 10^{-2}$	$(-125 \mp j6,14) \times 10^{-3}$	$-0,384 \mp j0,112$	$-1,589 \mp j0,675$
$\Delta\lambda_4$	$(-4,7 \pm j1,24) \times 10^{-3}$	$(-2,06 \pm j2,49) \times 10^{-3}$	$(-2,29 \pm j6,62) \times 10^{-3}$	$(-1,28 \pm j1,66) \times 10^{-2}$	$(-3,4 \pm j3,06) \times 10^{-2}$

Można zauważyć, że wraz ze wzrostem czasu trwania impulsu zwiększają się błędy obliczeń wartości własnych.

3.2. Obliczenia wartości własnych 7-maszynowego SEE przy małym tłumieniu kotłusań

W tab. 3, 4 i 5 zestawiono elektromechaniczne wartości własne analizowanego 7-maszynowego SEE, względne moduły ich czynników udziału oraz błędy bezwzględne obliczeń w przypadku współczynników wzmocnienia wszystkich stabilizatorów $K_{S1} = 0,1$. Pogrubiono względne moduły czynników udziału wartości własnych, które zostały obliczone na podstawie przebiegu mocy chwilowej danego zespołu wytwórczego.

Obliczenie wartości własnych przebiegało dwuetapowo. Najpierw obliczono wartości własne $\lambda_3 - \lambda_6$ o większych wartościach części rzeczywistych (mniejszych modułach części rzeczywistych), odpowiadające modom słabiej tłumionym, przy pominięciu wartości własnych o mniejszych wartościach części rzeczywistych λ_1 i λ_2 . W drugim etapie obliczono wartości własne o mniejszych wartościach części rzeczywistych, uwzględniając znajomość wartości własnych $\lambda_3 - \lambda_6$.

 Tab. 3. Elektromechaniczne oryginalne wartości własne 7-maszynowego SEE przy $K_{S1} = 0,1$

Lp.	1	2	3	4	5	6
λ	$-0,781 \pm j10,177$	$-0,602 \pm j10,507$	$-0,498 \pm j9,476$	$-0,327 \pm j8,642$	$-0,251 \pm j7,895$	$-0,0091 \pm j6,540$

 Tab. 4. Względne moduły czynników udziału wartości własnych 7-maszynowego SEE przy współczynnikach wzmocnienia wszystkich stabilizatorów $K_{S1} = 0,1$

	Zespół wytwórczy						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
$ F_1 _{p.u.}$	0,0038	0,0212	0,0194	0,1005	0,0848	0,2260	0,0084
$ F_2 _{p.u.}$	0,0041	0,2026	0,1591	1	0,0923	0,2404	0,0585
$ F_3 _{p.u.}$	0,0210	0,5278	0,2858	0,7884	1	1	1
$ F_4 _{p.u.}$	0,4289	0,5829	0,0416	0,0300	0,0068	0,00032	0,0219
$ F_5 _{p.u.}$	0,1079	0,0932	1	0,1995	0,2106	0,0996	0,3650
$ F_6 _{p.u.}$	1	1	0,1972	0,2508	0,1222	0,0921	0,1849

 Tab. 5. Błędy bezwzględne obliczeń wartości własnych 7-maszynowego SEE przy $K_{S1} = 0,1$

	Zespół wytwórczy						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
$\Delta\lambda_1$	–	–	–	–	$-0,012 \mp j0,249$	$0,058 \pm j0,258$	–
$\Delta\lambda_2$	–	$-0,618 \mp j3,402$	$-0,016 \pm j0,118$	$0,021 \mp j0,062$	$-0,087 \pm j0,184$	$0,031 \mp j1,067$	–
$\Delta\lambda_3$	–	$-0,309 \pm j0,331$	$-0,179 \pm j0,182$	$-0,003 \pm j0,088$	$0,008 \pm j0,011$	$0,032 \pm j0,004$	$-0,031 \pm j0,016$
$\Delta\lambda_4$	$-0,006 \pm j0,034$	$-0,053 \pm j0,083$	–	–	–	–	–
$\Delta\lambda_5$	$-0,013 \mp j0,078$	–	$-0,002 \pm j0,009$	–	$0,001 \mp j0,001$	–	$0,002 \mp j0,003$
$\Delta\lambda_6$	$-0,001 \mp j0,001$	$0,001 \mp j0,003$	$0,002 \mp j0,003$	–	$0,003 \pm j0,001$	–	$0,003 \pm j0,001$

3.3. Obliczenia wartości własnych 7-maszynowego SEE przy większym tłumieniu kotłosań

W tym podrozdziale analizowano 7-maszynowy SEE przy powiększonym tłumieniu kotłosań elektromechanicznych. Zwiększenie tłumienia kotłosań zrealizowano poprzez powiększenie współczynników wzmocnienia wszystkich stabilizatorów systemowych (typu PSS3B) do wartości $K_{S1} = 0,7$. W tab. 6, 7 i 8 zestawiono elektromechaniczne wartości własne analizowanego SEE, względne moduły ich czynników udziału oraz błędy obliczeń.

Tab. 6. Elektromechaniczne oryginalne wartości własne 7-maszynowego SEE przy $K_{S1} = 0,7$

Lp.	1	2	3	4	5	6
λ	$-1,393 \pm j10,075$	$-1,262 \pm j11,161$	$-1,091 \pm j10,680$	$-0,9576 \pm j8,993$	$-0,765 \pm j7,803$	$-0,571 \pm j6,536$

Tab. 7. Względne moduły czynników udziału wartości własnych 7-maszynowego SEE przy współczynnikach wzmocnienia wszystkich stabilizatorów $K_{S1} = 0,7$

	Zespół wytwórczy						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
$ F_1 _{p.u.}$	0,1398	0,8164	0,3621	1	1	1	1
$ F_2 _{p.u.}$	0,0022	0,0392	0,0226	0,1128	0,0222	0,3458	0,0081
$ F_3 _{p.u.}$	0,0189	0,3735	0,2111	0,7727	0,1842	0,3630	0,0867
$ F_4 _{p.u.}$	0,5154	0,8520	0,0275	0,0248	0,0249	0,0166	0,0235
$ F_5 _{p.u.}$	0,2792	0,1373	1	0,1329	0,1999	0,1711	0,2258
$ F_6 _{p.u.}$	1	1	0,2526	0,1410	0,0850	0,0977	0,1105

Tab. 8. Błędy bezwzględne obliczeń wartości własnych 7-maszynowego SEE przy $K_{S1} = 0,7$

	Zespół wytwórczy						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
$\Delta\lambda_1$	–	$-1,584 \pm j0,683$	$-0,379 \pm j0,168$	$-0,088 \mp j0,314$	$-0,228 \mp j0,143$	$-0,152 \pm j0,006$	$-0,070 \pm j0,089$
$\Delta\lambda_2$	–	–	–	$0,105 \mp j2,563$	–	$-0,195 \pm j0,228$	–
$\Delta\lambda_3$	–	$-1,582 \pm j4,000$	$-0,077 \pm j0,099$	$0,007 \pm j0,017$	$0,159 \mp j1,424$	–	–
$\Delta\lambda_4$	$-0,128 \mp j0,207$	$0,007 \mp j0,059$	–	–	–	–	–
$\Delta\lambda_5$	$-0,031 \mp j0,053$	–	$0,013 \pm j0,085$	$-0,077 \mp j0,159$	$-0,139 \pm j1,229$	–	$0,034 \mp j0,033$
$\Delta\lambda_6$	$-0,018 \mp j0,007$	$0,012 \mp j0,025$	$-0,002 \pm j0,119$	$0,010 \mp j0,061$	$-0,021 \mp j0,062$	–	$0,021 \pm j0,150$

3.4. Obliczenia wartości własnych 4-maszynowego SEE przy małym tłumieniu kotłosań

W celu zbadania wpływu złożoności analizowanego SEE na dokładność obliczeń wartości własnych przeprowadzono obliczenia wartości własnych 4-maszynowego SEE w przypadku wzmocnienia wszystkich stabilizatorów $K_{S1} = 0,1$ (takim, jak w p. 3.2.). W tab. 9 zestawiono błędy obliczeń elektromechanicznych wartości własnych. Wyznaczanie wartości własnych w tym przypadku również przebiegało dwuetapowo. Najpierw wyznaczono wartości własne λ_3 i λ_4 , a następnie, przy uwzględnieniu ich znajomości, wyznaczono wartości własne λ_1 i λ_2 .

Tab. 9. Błędy bezwzględne obliczeń wartości własnych 4-maszynowego SEE przy $K_{sv} = 0,1$

	Zespół wytwórczy			
	G1	G2	G3	G4
$\Delta\lambda_1$	$0,17080 \mp j0,75264$	$-0,85943 \mp j1,41602$	$-0,16195 \pm j0,32636$	–
$\Delta\lambda_2$	$0,00072 \mp j0,02339$	$-0,19605 \pm j0,05164$	$-0,12014 \mp j0,06776$	–
$\Delta\lambda_3$	$0,01658 \pm j0,01057$	$0,01838 \mp j0,00047$	$0,02593 \pm j0,08586$	$-0,01605 \pm j0,00962$
$\Delta\lambda_4$	$0,00094 \pm j0,00135$	$-0,00061 \pm j0,00231$	$0,00850 \mp j0,01901$	$-0,00097 \pm j0,00105$

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że:

- Wydłużanie czasu trwania impulsu w przebiegu napięcia zadanego regulatora napięcia generatora spowodowało znaczne zmiany prądów fazowych twornika generatora, a tym samym zwiększenie amplitudy kołysań mocy chwilowej. Jednak im dłuższy jest czas trwania impulsu, tym większe są błędy obliczeń wartości własnych przeprowadzonych na podstawie przebiegów mocy chwilowej. Potrzebny jest odpowiedni kompromis. Można w przybliżeniu przyjąć, że dokładność obliczeń wartości własnych jest jeszcze zadowalająca, gdy czas trwania impulsu nie przekracza 300 ms.
- Wielokrotne obliczanie wartości własnych za pomocą algorytmu hybrydowego, przy różnych punktach startowych dobieranych za każdym razem losowo z zakresu poszukiwań, eliminuje problem utknięcia algorytmu w minimach lokalnych funkcji celu. Dokładność obliczeń jest zwiększana poprzez porównanie wartości własnych obliczanych z przebiegów mocy chwilowej różnych zespołów wytwórczych.
- Dwuetapowa estymacja zwiększa dokładność obliczeń wartości własnych. Algorytm optymalizacyjny działa sprawniej, gdy liczba parametrów optymalizacji jest mniejsza. Wartości własne, odpowiadające modom silniej tłumionym, mogą zostać odrzucone w pierwszym etapie estymacji, gdyż interweniują one w przebiegu mocy chwilowej tylko w krótkim czasie po wystąpieniu zakłócenia. W drugim etapie oblicza się wartości własne, odpowiadające modom silniej tłumionym.
- Wyniki obliczeń wartości własnych są dokładniejsze dla układu o mniejszym tłumieniu kołysań elektromechanicznych.
- Dokładność obliczeń wartości własnych dla mniej i bardziej rozbudowanych SEE jest porównywalna. Dla układu 4-maszynowego okazała się lepsza dla wartości własnych, odpowiadających słabo tłumionym, a dla 7-maszynowego dla wartości własnych, odpowiadających silnie tłumionym modom.

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, s. 71–74.
2. Paszek S., Pruski P., Porównanie przebiegów niestabilnych w nieliniowym i zlinearyzowanym modelu zespołu wytwórczego pracującego w systemie elektroenergetycznym, Inter. Symp. on Electrical Machines, SME 2010, Gliwice – Ustroń, 2010, Proc. sum., s. 181–185.
3. Nocoń A., Paszek S., Polioptymalizacja regulatorów napięcia zespołów prądowców z generatorami synchronicznymi, monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
4. Paszek S., Pawłowski A., Optymalizacja parametrów dwuwęściowego stabilizatora systemowego PSS3B w jednomaszynowym systemie elektroenergetycznym generator – sieć sztywna, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1633, seria „Elektryka”, Gliwice 2004, s. 115–124.
5. De Mello F., Hannett L. H., Representation of Saturation in Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWRS-1, no. 4, 1986, s. 8–18.
6. IEEE Committee Report: Dynamic models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, november (1973), no. 6, s. 1904–1915.