

## OBLICZENIA ELEKTROMECHANICZNYCH WARTOŚCI WŁASNYCH NA PODSTAWIE PRZEBIEGÓW MOCY CHWILOWEJ ZAREJESTROWANYCH W ELEKTROWNI – REFERAT KONFERENCYJNY

Piotr PRUSKI<sup>1</sup>, Stefan PASZEK<sup>1</sup>

1. Politechnika Śląska

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki obliczeń wartości własnych (związanych ze zjawiskami elektromechanicznymi) macierzy stanu modelu Krajowego Systemu Elektroenergetycznego na podstawie analizy symulacyjnych i pomiarowych przebiegów mocy chwilowej zespołów wytwórczych w elektrowni Łaziska. Wykorzystana w artykule metoda obliczeń wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów odchyłek mocy chwilowej za pomocą przebiegów stanowiących superpozycję składowych modalnych związanych z poszukiwanymi wartościami własnymi i ich czynnikami udziału. Do obliczeń wykorzystano hybrydowy algorytm optymalizacyjny, stanowiący szeregowo połączenie algorytmu genetycznego i gradientowego.

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

### 1. WSTĘP

Zachowanie stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego (SEE) jest jednym z najważniejszych warunków jego poprawnej pracy. Utrata stabilności kątowej SEE może skutkować wystąpieniem poważnej awarii systemowej, której konsekwencją może być brak zasilania ogromnej liczby odbiorców. Ocena stabilności kątowej SEE można przeprowadzić z wykorzystaniem wskaźników stabilności [1], obliczanych na podstawie wartości własnych macierzy stanu SEE związanych ze zjawiskami elektromechanicznymi. Wartości własne można obliczyć na podstawie równań stanu SEE, jednak wyniki obliczeń zależą wówczas od wartości elementów macierzy stanu SEE, a pośrednio od przyjętych modeli elementów SEE i ich niepewnych parametrów. Wartości własne można również obliczyć z dobrą dokładnością na podstawie analizy rzeczywistych przebiegów zakłócenio- wych, pojawiających się w SEE po różnych zakłóceniach [2].

Celem niniejszej pracy jest analiza dokładności obliczeń wartości własnych (związanych ze zjawiskami elektromechanicznymi) macierzy stanu modelu Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) ingerujących w przebiegach mocy chwilowej zespołów wytwórczych pracujących w elektrowni Łaziska. Obliczenia te przeprowadzono na podstawie analizy symulacyjnych i pomiarowych przebie-

gów zakłócenio- wych kołysań mocy chwilowej w blokach nr 9 (KOP113) i nr 10 (KOP123) w Elektrowni Łaziska.

### 2. ZLINEARYZOWANY MODEL SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

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

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

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

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

Przebiegi wielkości wyjściowych zlinearyzowanego modelu SEE można obliczyć bezpośrednio, całkując równanie stanu (1), lub na podstawie wartości własnych i wektorów własnych macierzy stanu  $A$  [3]. Przebieg  $i$ -tej wielkości wyjściowej (przy  $D = 0$  i założeniu tylko jednokrotnych wartości własnych) ma postać:

– przy zakłóceniu w postaci impulsu Diraca w chwili  $t_0$  w przebiegu  $j$ -tej wielkości wymuszającej  $\Delta U_j(t) = \Delta U \delta(t-t_0)$  [4, 5]:

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

– przy zakłóceniu w postaci skokowej zmiany w chwili  $t_0$  w przebiegu  $j$ -tej wielkości wymuszającej  $\Delta U_j(t) = \Delta U I(t-t_0)$  [5]:

$$\Delta y_i(t) = \sum_{h=1}^n K_{ih} (e^{\lambda_h(t-t_0)} - 1) \Delta U, \quad t \geq t_0 \quad (4)$$

przy czym:

$$F_{ih} = C_i V_h W_h^T B_j, \quad K_{ih} = F_{ih} \lambda_h^{-1} \quad (5)$$

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,  $C_i$  –  $i$ -ty wiersz macierzy  $C$ ,  $V_h$ ,  $W_h$  –  $h$ -ty prawostronny i lewostronny wektor własny macierzy stanu,  $B_j$  –  $j$ -ta kolumna macierzy  $B$ ,  $n$  – wymiar macierzy stanu  $A$ . Wartości  $\lambda_h$  oraz  $F_{ih}$  mogą być rzeczywiste lub zespolone.

W przypadku przebiegów kołysań mocy chwilowej w SEE decydujące znaczenie mają wartości własne, związane z ruchem wirników zespołów wytwórczych, zwane w artykule *elektromechanicznymi wartościami własnymi*. Elektromechaniczne wartości własne w różny sposób ingerują w przebiegach mocy chwilowej poszczególnych zespołów wytwórczych, co jest związane z różnymi wartościami ich czynników udziału [5].

### 3. METODA OBLICZEŃ ELEKTROMECHANICZNYCH WARTOŚCI WŁASNYCH

W obliczeniach wykorzystano przebiegi zakłócenia odchyłek mocy chwilowej zespołów wytwórczych, które pojawiają się po celowym wprowadzeniu małego zakłócenia do SEE. Przyjęto zakłócenie w postaci impulsu prostokątnego lub skokowej zmiany w przebiegu napięcia zadanego regulatora napięcia  $V_{ref}$  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 [4, 6].

Wykorzystana w badaniach metoda obliczeń elektromechanicznych wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów odchyłek mocy chwilowej w poszczególnych zespołach wytwórczych za pomocą wyrażenia (3) w przypadku zakłócenia impulsowego lub (4) w przypadku zakłócenia skokowego. 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 [4, 6]:

$$\varepsilon_w(\lambda, \mathbf{F}) = \sum_{i=1}^N \left( \Delta P_{i(m)} - \Delta P_{i(a)}(\lambda, \mathbf{F}) \right)^2 \quad (6)$$

gdzie:  $\lambda$  – wektor elektromechanicznych wartości własnych,  $\mathbf{F}$  – wektor czynników udziału,  $N$  – liczba próbek przebiegów, indeks  $m$  oznacza przebieg aproksymowany odchyłką mocy chwilowej  $\Delta P$ , a indeks  $a$  – przebieg aproksymujący odchyłką mocy chwilowej, obliczony na podstawie wartości własnych i czynników udziału według wzoru (3) lub (4).

Do minimalizacji funkcji celu (6) wykorzystano hybrydowy algorytm optymalizacyjny, stanowiący szeregowe połączenie algorytmów genetycznego i gradientowego [4, 6].

Z powodu występowania minimów lokalnych funkcji celu, w których algorytm optymalizacyjny może utknąć, proces aproksymacji przeprowadzono wielokrotnie na podstawie tego samego przebiegu mocy chwilowej. Odrzucano wyniki o wartościach funkcji celu większych, niż pewna przyjęta wartość graniczna. Jako wynik końcowy obliczeń części rzeczywistych i części urojonych poszczególnych wartości własnych przyjęto średnie arytmetyczne z wyników nieodrzuconych w kolejnych obliczeniach [4, 6].

## 4. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

### 4.1. Obliczenia na podstawie symulacyjnych przebiegów mocy chwilowej

W celu analizy dokładności zastosowanej metody obliczeń elektromechanicznych wartości własnych w pierwszej kolejności przeprowadzono obliczenia na podstawie przebiegów odchyłek mocy chwilowej uzyskanych z symulacji przy użyciu modelu matematycznego KSE.

W modelu tym uwzględniono 49 wybranych zespołów wytwórczych, pracujących w sieciach wysokich i najwyższych napięć, oraz 8 zastępczych zespołów wytwórczych, które reprezentują oddziaływanie SEE sąsiednich państw. Model KSE opracowano w środowisku programu Matlab-Simulink. Składa się on z 57 modeli zespołów wytwórczych oraz modelu sieci i odbiorów mocy [4]. Uwzględnione w modelu zespoły wytwórcze przedstawiono na rys. 1.

W przeprowadzonych obliczeniach przyjęto następujące modele elementów zespołów wytwórczych KSE: model generatora synchronicznego GENROU [7], model statycznego [6] lub elektromaszynowego [7] układu wzbudzenia, model turbiny parowej IEEE1 [7] lub wodnej HYG0V [7] i opcjonalnie model stabilizatora systemowego PSS3B [7]. Dla zastępczych zespołów wytwórczych, które reprezentują oddziaływanie SEE sąsiednich państw, zastosowano tylko uproszczony model generatora synchronicznego [4].

Wartości własne (w tym elektromechaniczne wartości własne) macierzy stanu systemu można obliczyć bezpośrednio na podstawie struktury i parametrów modelu SEE w programie Matlab-Simulink. W dalszej części artykułu te elektromechaniczne wartości własne są nazywane *oryginalnymi wartościami własnymi*. Porównanie wartości własnych obliczonych na podstawie minimalizacji funkcji celu (6) i oryginalnych wartości własnych jest miarą dokładności obliczeń [4].

Macierz stanu analizowanego modelu KSE ma 56 zespolonych elektromechanicznych wartości własnych. Zostały one posortowane rosnąco względem części rzeczywistych i ponumerowane od  $\lambda_1$  do  $\lambda_{56}$ .

W zaprezentowanych przykładowych obliczeniach wzięto pod uwagę przebiegi odchyłek mocy chwilowej w bloku nr 10 w Elektrowni Łaziska (KOP123 na rysunku 1) występujące po wprowadzeniu zakłócenia w przebiegu napięcia zadanego regulatora napięcia w tym bloku. W przebiegu mocy chwilowej w bloku nr 10 ingeruje w znaczący sposób tylko jedna elektromechaniczna wartość własna  $\lambda_{15} = -1,0477 \pm j10,0241$  1/s.

W tabelicy 1 zestawiono błędy bezwzględne  $\Delta\lambda_{15}$  obliczeń wartości własnej  $\lambda_{15}$  wykonanych na podstawie symulacyjnych przebiegów odchyłek mocy chwilowej bloku nr 10. Wzięto pod uwagę przebiegi występujące po wprowadzeniu w tym bloku zakłóceń impulsowych i skokowych o różnych amplitudach ( $V_{ref0}$  oznacza wartość ustaloną /początkową przed zakłóceniem/ napięcia zadanego regulatora napięcia).

Z tabelicy 1 wynika, że błąd obliczeń części rzeczywistej wartości własnej  $\lambda_{15}$  jest dużo większy w przypadkach zakłóceń o dodatniej amplitudzie, niż w przypadkach zakłóceń o ujemnej amplitudzie. Jest to spowodowane silniejszym wpływem nieliniowości i ograniczeń, występujących w SEE, na przebiegi mocy chwilowej w przypadkach wprowadzenia zakłócenia o dodatniej amplitudzie. Dokładność obliczeń części rzeczywistej i części urojonej tej wartości własnej jest porównywalna w przypadkach zakłócenia impulsowego i skokowego o ujemnej amplitudzie.



Rys. 1. Węzły wytwórcze uwzględnione w modelu KSE [4]

Tablica 1. Błędy bezwzględne obliczeń wartości własnej  $\lambda_{15}$  na podstawie symulacyjnych przebiegów mocy chwilowej bloku nr 10 w Elektrowni Łaziska

| Rodzaj zakłócenia | $\Delta V_{ref}$ | $t_{imp}$ | $\Delta \lambda_{15}$ |
|-------------------|------------------|-----------|-----------------------|
|                   | % $V_{ref0}$     | s         | 1/s                   |
| impuls            | -5               | 200       | 0,0182±j0,1013        |
| impuls            | 5                | 200       | -0,2309±j0,0572       |
| skok              | -5               | -         | -0,0374±j0,2137       |
| skok              | 5                | -         | -0,1179±j0,5611       |

#### 4.2. Obliczenia na podstawie pomiarowych przebiegów mocy chwilowej

W niniejszym podrozdziale przedstawiono porównanie wyników obliczeń elektromechanicznych wartości własnych w zależności od znaku amplitudy  $\Delta V_{ref}$  zakłócenia skokowego napięcia zadanego regulatora napięcia. Wzięto pod uwagę pomiarowe przebiegi mocy chwilowej bloków nr 9 (KOP113) i 10 (KOP123) w Elektrowni Łaziska.

Przebiegi pomiarowe mocy chwilowej zarejestrowane w elektrowni były silnie zakłócone. Obecność zakłóceń w sygnałach pomiarowych wynikała z charakterystyki środowiska pomiarowego.

Filtrację przebiegów pomiarowych przeprowadzono przy wykorzystaniu cyfrowego filtra Butterwortha 3-go rzędu o częstotliwości odcięcia 10 Hz [8]. Zastosowano metodę filtracji z zerowym opóźnieniem fazowym [8]. Pozwoliło to na eliminację wprowadzanych przez filtr opóźnień i zniekształceń fazowych sygnałów.

W przypadku obliczeń elektromechanicznych wartości własnych KSE na podstawie pomiarowych przebiegów mocy chwilowej ocena dokładności tych obliczeń nie była możliwa. Spowodowane było to brakiem dostępu do wystarczająco dokładnych i wiarygodnych wyników obliczeń tych wartości własnych przy użyciu innych metod. W niniejszym podrozdziale przedstawione zostaną więc tylko wyniki obliczeń, bez oceny ich dokładności.

Przebiegi mocy chwilowej zarejestrowane w blokach nr 9 (KOP113) i nr 10 (KOP123) Elektrowni Łaziska zawierają tylko jedną, znaczącą składową modalną związaną z elektromechanicznymi wartościami własnymi. Na podstawie analizy modelu KSE stwierdzono, że w przebiegu mocy chwilowej bloku nr 10 ingeruje w sposób znaczący składowa modalna odpowiadająca wartości własnej  $\lambda_{15}$ . Ta wartość własna, obliczone na podstawie struktury i parametrów modelu KSE, wynosi  $\lambda_{15} = -1,0477 \pm j10,0241$  1/s. Blok nr 9 nie został uwzględniony w modelu KSE. Wartość własną ingerującą w sposób znaczący w przebiegu mocy chwilowej tego bloku oznaczono  $\lambda_x$  (nie jest możliwe obliczenie tej wartości własnej na podstawie struktury i parametrów modelu KSE).

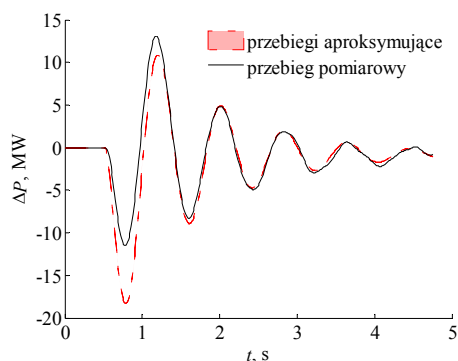
W tablicy 2 zestawiono wyniki obliczeń wartości własnych na podstawie pomiarowych przebiegów odchyłek mocy chwilowej, występujących po wprowadzeniu zakłóceń skokowych o różnych amplitudach.

Tablica 2. Wyniki obliczeń wartości własnych na podstawie pomiarowych przebiegów mocy chwilowej bloków nr 9 i 10 w Elektrowni Łaziska

| Blok nr     | $\Delta V_{ref}$ | $\lambda$      |                 |
|-------------|------------------|----------------|-----------------|
|             | % $V_{ref0}$     |                | 1/s             |
| 9 (KOP123)  | -5               | $\lambda_x$    | 0,8823±j7,7264  |
| 9 (KOP123)  | 5                | $\lambda_x$    | -1,0176±j8,0020 |
| 10 (KOP123) | -5               | $\lambda_{15}$ | -1,2011±j7,6645 |
| 10 (KOP123) | 5                | $\lambda_{15}$ | -1,0695±j7,7341 |

Z tablicy 2 wynika, że wyniki obliczeń części rzeczywistych wartości własnych różnią się znacznie w zależności od znaku amplitudy wprowadzonego zakłócenia. Różnica wyników obliczeń części urojonych tych wartości własnych w zależności od znaku amplitudy wprowadzonego zakłócenia jest stosunkowo niewielka.

Przykładowo na rysunku 2 przedstawiono przebiegi odchyłki mocy chwilowej w przypadku zakłócenia skokowego o amplitudzie:  $\Delta V_{ref} = -3\% V_{ref0}$  w bloku nr 9 w Elektrowni Łaziska.



Rys. 2. Przebiegi odchyłki mocy chwilowej w przypadku zakłócenia skokowego o amplitudzie:  $\Delta V_{ref} = -3\% V_{ref0}$  w bloku nr 9 w Elektrowni Łaziska

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania symulacyjne i pomiarowe pozwoliły stwierdzić, że:

- Badania symulacyjne wykazały, że możliwe jest wyznaczenie z dobrą dokładnością elektromechanicznych wartości własnych na podstawie analizy przebiegów mocy chwilowej w stanach zakłóceń, występujących po wprowadzeniu do napięcia zadanego regulatora napięcia impulsu prostokątnego lub skokowej zmiany o ujemnej amplitudzie. W przypadku zakłóceń o dodatniej amplitudzie uzyskano gorsze wyniki obliczeń wartości własnych, co mogło być spowodowane silniejszym wpływem nieliniowości i ograniczeń, występujących w SEE, na przebiegi mocy chwilowej.
- Dokładność obliczeń elektromechanicznej wartości własnej  $\lambda_{15}$  na podstawie symulacyjnych przebiegów mocy chwilowej bloku nr 10 w Elektrowni Łaziska w przypadku ujemnej wartości amplitudy zakłócenia była porównywalna dla przypadków zakłócenia impulsowego i skokowego. Wyniki obliczeń tej wartości własnej w przypadku dodatniej wartości amplitudy zakłócenia różnią się w zależności od przyjętego typu zakłócenia.
- Wyniki obliczeń elektromechanicznych wartości własnych na podstawie pomiarowych przebiegów mocy

chwilowej, zarejestrowanych w blokach nr 9 i 10 w Elektrowni Łaziska, różnią się w zależności od znaku amplitudy wprowadzonego zakłócenia skokowego. Bezpośrednia ocena dokładności tych obliczeń nie jest możliwa, jednak na podstawie przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych można wnioskować, że wynik uzyskany w przypadku zakłócenia o ujemnej amplitudzie jest dokładniejszy.

## 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, ISSN 1335-2237.
2. Saitoh H., Miura K., Ishioka O., Sato H., Toyoda J.: Online modal analysis based on synchronized measurement technology. Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on, vol. 2, pp. 817 – 822, ISBN 0-7803-7459-2.
3. Kudła J., Paszek S.: Redukcja postaci transmitancji w systemach elektroenergetycznych. XVIII-te Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, SPETO'95, tom 2, 1995, s. 299-304, ISBN 83-85940-17-0.
4. Pruski P., Paszek S.: Analiza modalna przebiegów zakłóceń mocy chwilowej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Elektryka”, Gliwice 2011, zeszyt 4, rok LVII, s. 83-99, ISSN 1897-8827.
5. 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, s. 181-185, ISSN 0239-3646.
6. Paszek S., Pruski P.: Ocena stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego na podstawie analizy wybranych stanów zakłóceń. Acta Energetica, nr 02/2011, s. 44-53, ISSN 2080-7570.
7. Paszek S.: Wybrane metody oceny i poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012, ISBN 978-83-7335-899-7.
8. Oppenheim A. V., Schaffer R. W., Discrete-time signal processing. 2<sup>nd</sup> Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River 1999, ISBN 0-13-754920-2.

## CALCULATIONS OF ELECTROMECHANICAL EIGENVALUES BASED ON INSTANTANEOUS POWER WAVEFORMS RECORDED IN POWER PLANT – CONFERENCE PAPER

**Key-words:** power system, eigenvalues associated with electromechanical phenomena, transient states

The paper presents the results of calculations of the eigenvalues (associated with electromechanical phenomena) of the state matrix of the Polish National Power System model on the basis of analysis of the simulated and measured instantaneous power disturbance waveforms of generating units in Łaziska Power Plant. The method for calculations of electromechanical eigenvalues used in investigations consists in approximation of instantaneous power swing waveforms in particular generating units with use of the waveforms being a superposition of the modal components associated with the searched eigenvalues and their participation factors. The hybrid optimisation algorithm consisting of the genetic and gradient algorithms was used for computations.