

Piotr PRUSKI*
Stefan PASZEK*

OBLICZENIA ELEKTROMECHANICZNYCH WARTOŚCI WŁASNYCH NA PODSTAWIE ANALIZY RÓŻNYCH PRZEBIEGÓW ZAKŁÓCENIOWYCH W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń wartości własnych macierzy stanu systemu elektroenergetycznego (SEE) związanych ze zjawiskami elektromechanicznymi (czyli *elektromechanicznymi wartościami własnymi*). Porównano dokładność obliczeń wartości własnych wykonanych na podstawie analizy przebiegów zakłóceń mocy chwilowej, prędkości kątowej oraz kąta obciążenia generatorów poszczególnych zespołów wytwórczych SEE. Wykorzystana w artykule metoda obliczeń wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów zakłóceń zespołów wytwórczych przebiegami stanowiącymi superpozycję składowych modalnych, których parametry zależą od poszukiwanych wartości własnych i ich czynników udziału. Do minimalizacji funkcji celu określonej jako błąd średniokwadratowy, występujący między przebiegami aproksymowanymi i aproksymującymi wykorzystano algorytm hybrydowy, stanowiący połączenie algorytmu genetycznego i gradientowego.

SŁOWA KLUCZOWE: system elektroenergetyczny, wartości własne związane ze zjawiskami elektromechanicznymi, stany nieustalone, stabilność kątowa

1. WSTĘP

Zachowanie stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego (SEE) jest jednym z najważniejszych warunków jego poprawnej pracy. Ocenę stabilności kątowej SEE można przeprowadzić z wykorzystaniem wskaźników stabilności [1], obliczanych na podstawie wartości własnych macierzy stanu SEE związanych ze zjawiskami elektromechanicznymi (zwanymi w artykule *elektromechanicznymi wartościami własnymi*). Elektromechaniczne 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 [2]. Te wartości własne można również obliczyć z dobrą dokładnością na podstawie analizy rzeczywistych przebiegów zakłóceń, pojawiających się w SEE po różnych zakłóceniach [3, 4].

* Politechnika Śląska.

Celem niniejszej pracy jest porównanie dokładności obliczeń elektromechanicznych wartości własnych na podstawie analizy przebiegów zakłóceń mocy chwilowej, prędkości kątowej oraz kąta obciążenia generatorów zespołów wytwórczych SEE.

2. ZLINEARYZOWANY MODEL SEE

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

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

$$\Delta \mathbf{Y} = \mathbf{C}\Delta \mathbf{X} + \mathbf{D}\Delta \mathbf{U}, \quad (2)$$

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

Przebiegi wielkości wyjściowych zlinearyzowanego modelu SEE można obliczyć bezpośrednio, całkując równanie stanu, lub na podstawie wartości własnych i wektorów własnych macierzy stanu \mathbf{A} [4]. Przebieg danej wielkości wyjściowej stanowi superpozycję składowych modalnych zależnych od wartości własnych i wektorów własnych macierzy stanu. Przy zakłóceniu (w chwili t_0) w postaci impulsowej zmiany j -tej wielkości wymuszającej $\Delta U_j(t) = \Delta U_j \delta(t-t_0)$ przebieg i -tej wielkości wyjściowej (przy $\mathbf{D} = \mathbf{0}$ i założeniu występowania tylko jednokrotnych wartości własnych) ma postać [4]:

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

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

gdzie: $\lambda_h = \alpha_h + j\nu_h$ – h -ta wartość własna macierzy stanu, F_{ih} – czynnik udziału h -tej wartości własnej w przebiegu i -tej wielkości wyjściowej, \mathbf{C}_i – i -ty wiersz macierzy \mathbf{C} , \mathbf{V}_h , \mathbf{W}_h – h -ty prawostronny i lewostronny wektor własny macierzy stanu, \mathbf{B}_j – j -ta kolumna macierzy \mathbf{B} , n – wymiar macierzy stanu \mathbf{A} .

W przypadku przebiegów zakłóceń mocy chwilowej, prędkości kątowej oraz kąta obciążenia generatorów zespołów wytwórczych SEE duże znaczenie mają składowe modalne związane z elektromechanicznymi wartościami własnymi. Te wartości własne w różny sposób ingerują w przebiegach zakłóceń poszczególnych zespołów wytwórczych, co związane jest z różnymi wartościami ich czynników udziału.

3. METODA OBLICZEŃ WARTOŚCI WŁASNYCH

W obliczeniach wykorzystano przebiegi zakłóceń odchyłek wielkości wyjściowych zespołów wytwórczych, które pojawiają się po celowym

wprowadzeniu małego zakłócenia do SEE. Przyjęto zakłócenie w postaci impulsu prostokątnego 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 tego układu na wymuszenie w postaci impulsu Diraca [4, 5].

Wykorzystana w badaniach metoda obliczeń elektromechanicznych wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów zakłóceń 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 ε_w , występujący między przebiegiem aproksymowanym a aproksymującym:

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

gdzie: $\boldsymbol{\lambda}$ – wektor elektromechanicznych wartości własnych, \mathbf{F} – wektor czynników udziału, ΔW – przebieg odchyłek analizowanej wielkości, k – numery próbek przebiegów, N – liczba próbek przebiegów, indeks m oznacza przebieg aproksymowany, a indeks a – przebieg aproksymujący, obliczony na podstawie wartości własnych i czynników udziału według wzoru (3).

Aby wyeliminować wpływ szybko zanikających składowych modalnych, pochodzących od rzeczywistych oraz zespolonych wartości własnych, nie związanych ze zjawiskami elektromechanicznymi, analizę przebiegów rozpoczyna się po pewnym czasie t_p od chwili wystąpienia zakłócenia [4].

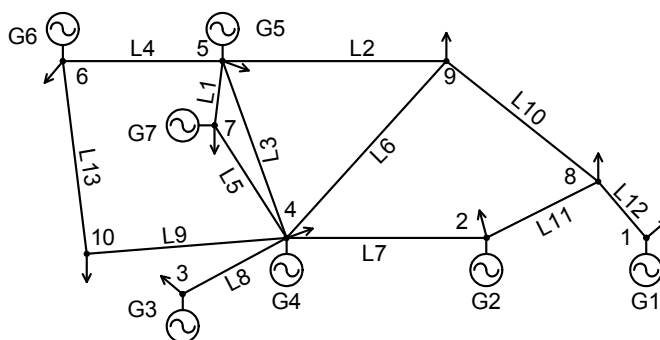
Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w przebiegach odchyłek mocy chwilowej ΔP ingerują w sposób znaczący (w czasie po zaniknięciu silnie tłumionych składowych modalnych) tylko elektromechaniczne wartości własne. W przebiegach odchyłek prędkości kątowej $\Delta \omega$ ingerują w sposób znaczący także inne wartości własne, lecz wpływ elektromechanicznych wartości własnych także jest znaczący. Wpływ elektromechanicznych wartości własnych na przebiegi odchyłek kąta mocy $\Delta \delta$ jest stosunkowo niewielki w porównaniu do innych wartości własnych. Ponadto wartości ustalone przebiegów $\Delta \delta$ po zakłóceniu różnią się od wartości początkowych tych przebiegów przed zakłóceniem. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w celu umożliwienia poprawnej aproksymacji przebiegu $\Delta \omega$ należy w przypadku zakłócenia impulsowego uwzględnić jedną zastępczą oscylacyjną składową modalną o stosunkowo małej częstotliwości, która odwzorowuje wpływ pominiętych składowych modalnych na ten przebieg. Natomiast dla przebiegu $\Delta \delta$ należy w tym przypadku uwzględnić dwie zastępcze składowe modalne: oscylacyjną (jak dla

przebiegu $\Delta\omega$) oraz aperiodyczną. Parametry zastępczych składowych modalnych również podlegają optymalizacji.

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

4. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla 7-maszynowego testowego SEE CIGRE (rys. 1). Analizowano przebiegi pojawiające się po wprowadzeniu zakłócenia impulsowego $\Delta V_{ref} = -5\% V_{ref0}$ w zespole G4 o czasie trwania $t_{imp} = 200$ ms (V_{ref0} oznacza wartość początkową napięcia zadanego regulatora napięcia).



Rys. 1. Analizowany 7-maszynowy SEE CIGRE

Wartości własne (w tym elektromechaniczne wartości własne) macierzy stanu systemu można obliczyć bezpośrednio na podstawie modelu i parametrów SEE w programie Matlab-Simulink. Te elektromechaniczne wartości własne są nazywane w artykule *oryginalnymi wartościami własnymi*. Porównanie wartości własnych obliczonych na podstawie minimalizacji funkcji celu (5) i oryginalnych wartości własnych jest miarą dokładności obliczeń [4]. W tabeli 1 zestawiono oryginalne wartości własne analizowanego SEE CIGRE.

Tabela 1. Oryginalne wartości własne analizowanego SEE CIGRE

λ_1	$-0,881 \pm j10,443$	λ_2	$-0,826 \pm j10,620$	λ_3	$-0,763 \pm j9,669$
λ_4	$-0,527 \pm j8,748$	λ_5	$-0,417 \pm j7,872$	λ_6	$-0,189 \pm j6,542$

W obliczeniach wzięto pod uwagę modele: generatora synchronicznego GENROU z nieliniową charakterystyką magnesowania [5, 6, 7], statycznego układu wzbudzenia, pracującego w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym [5], turbiny parowej IEEEG1 [6] i stabilizatora systemowego PSS3B [5, 6].

4.1. Analiza wpływu wyboru wielkości wyjściowej na czynniki udziału

Jak wynika ze wzoru (1), przy założeniu $\mathbf{D} = \mathbf{0}$, wartości wektora ΔY zależą od wartości wektora zmiennych stanu ΔX oraz macierzy \mathbf{C} . Przebieg i -tej wielkości wyjściowej otrzymuje się poprzez przemnożenie i -tego wiersza macierzy \mathbf{C} oraz wektora ΔX . Ze wzoru (4) wynika, że czynnik udziału F_{ih} zależy od wartości elementów w kolejnych wierszach macierzy \mathbf{C} . Zatem czynniki udziału wartości własnej są różne w przebiegach zakłóceńowych poszczególnych wielkości wyjściowych SEE.

Przykładowo w tabeli 2 zestawiono względne moduły czynników udziału $|F|_{\text{pu}}$ elektromechanicznych wartości własnych w przebiegach odchyłek mocy chwilowej ΔP , prędkości kątowej $\Delta\omega$ oraz kąta mocy $\Delta\delta$ zespołu G1 (w odniesieniu do największych modułów czynników udziału elektromechanicznych wartości własnych w tych przebiegach).

Tabela 2. Czynniki udziału elektromechanicznych wartości własnych w przebiegach zespołu G1

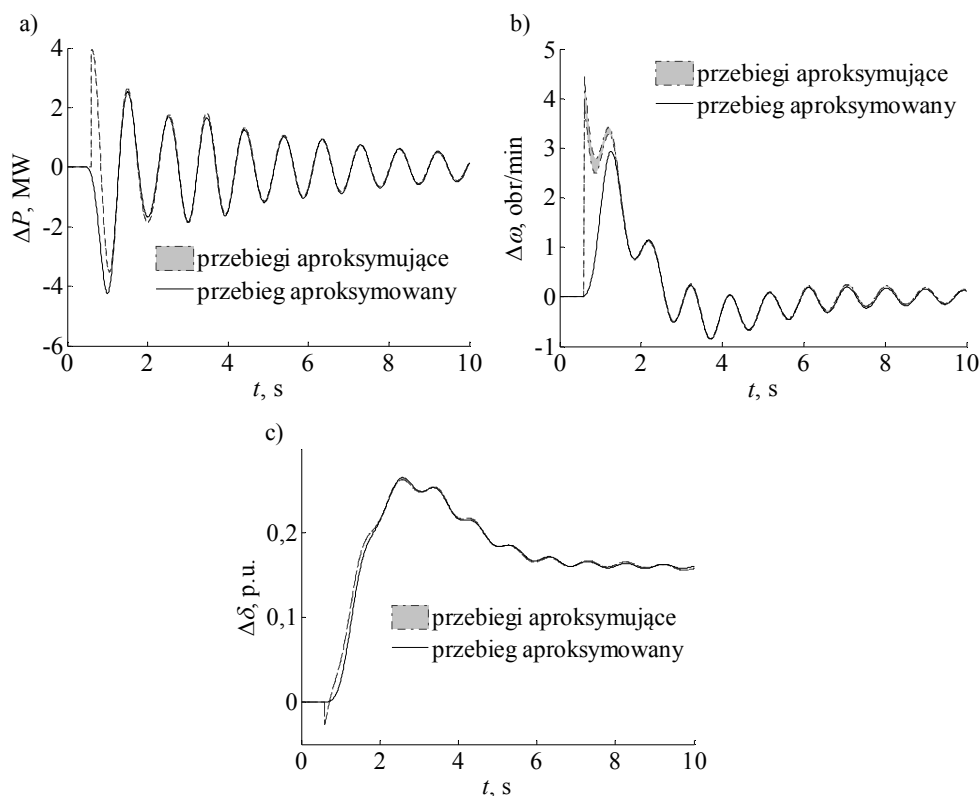
	$ F_1 _{\text{pu}}$	$ F_2 _{\text{pu}}$	$ F_3 _{\text{pu}}$	$ F_4 _{\text{pu}}$	$ F_5 _{\text{pu}}$	$ F_6 _{\text{pu}}$
Przebieg ΔP	0,0371	0,0199	0,0099	0,3044	0,0147	1
Przebieg $\Delta\omega$	0,0226	0,0119	0,0065	0,2229	0,0120	1
Przebieg $\Delta\delta$	0,0141	0,0073	0,0044	0,1665	0,01	1

Z tabeli 2 wynika, że względne moduły czynników udziału poszczególnych elektromechanicznych wartości własnych w analizowanych przebiegach zakłóceńowych wielkości wyjściowych zespołu G1 znacząco się różnią. Podobna sytuacja występuje w przypadku przebiegów pozostałych zespołów analizowanego SEE CIGRE. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wartości własne można zazwyczaj obliczyć z zadowalającą dokładnością na podstawie przebiegów, w których względne moduły czynników udziału są większe, niż 0,1. Z przebiegów zespołu G1 można więc obliczyć wartości własne λ_1 i λ_6 .

4.2. Obliczenia elektromechanicznych wartości własnych

Przykładowo na rys. 2 przedstawiono przebiegi zakłóceńowe odchyłek mocy chwilowej ΔP , prędkości kątowej $\Delta\omega$ oraz kąta mocy $\Delta\delta$ zespołu G1 oraz pasma przebiegów aproksymujących, odpowiadających nieodrzuconym wynikom

obliczeń. Pasma przebiegów aproksymujących określa zakres zmian wielkości wyjściowej, w którym „znajdują się” wszystkie przebiegi aproksymujące odpowiadające poszczególnym wynikom obliczeń.



Rys. 2. Przykładowe przebiegi zakłócenia: odchyłek: mocy chwilowej ΔP (a), prędkości kątowej $\Delta\omega$, (b) oraz kąta mocy $\Delta\delta$ (c) zespołu G1

W tabeli 3 zestawiono błędy bezwzględne $\Delta\lambda$ obliczeń elektromechanicznych wartości własnych na podstawie przebiegów zakłóceń ΔP , $\Delta\omega$ oraz $\Delta\delta$ zespołów wytwórczych SEE CIGRE. Wartości własne były na ogół obliczane na podstawie przebiegów różnych zespołów. W tabeli zestawiono średnie arytmetyczne błędów wszystkich uzyskanych wyników obliczeń tych wartości własnych.

Z tabeli 3 wynika, że wszystkie elektromechaniczne wartości własne zostały obliczone z zadowalającą dokładnością. Błędy obliczeń wartości własnych na podstawie przebiegów poszczególnych zespołów były porównywalne. Średnie arytmetyczne błędów obliczeń części rzeczywistych i części urojonych wartości własnych na podstawie przebiegów różnych zespołów wytwórczych na ogół były najmniejsze (co do modułu) w przypadku przebiegów $\Delta\omega$.

Tabela 3. Błędy bezwzględne obliczeń wartości własnych

Przebiegi zakłóceniami odchyłek mocy chwilowej ΔP					
$\Delta\lambda_1$	$-0,0357 \pm j0,2104$	$\Delta\lambda_2$	$0,0310 \mp j0,0526$	$\Delta\lambda_3$	$0,0524 \mp j0,1105$
$\Delta\lambda_4$	$-0,0275 \mp j0,0345$	$\Delta\lambda_5$	$0,0219 \mp j0,0091$	$\Delta\lambda_6$	$-0,0167 \pm j0,0191$
Przebiegi zakłóceniami odchyłek prędkości kątowej $\Delta\omega$					
$\Delta\lambda_1$	$0,0582 \pm j0,0386$	$\Delta\lambda_2$	$0,0201 \mp j0,0708$	$\Delta\lambda_3$	$0,0052 \mp j0,0920$
$\Delta\lambda_4$	$0,0070 \mp j0,0683$	$\Delta\lambda_5$	$-0,0075 \pm j0,0411$	$\Delta\lambda_6$	$0,0124 \mp j0,0200$
Przebiegi zakłóceniami odchyłek kąta mocy $\Delta\delta$					
$\Delta\lambda_1$	$-0,0921 \mp j0,3990$	$\Delta\lambda_2$	$0,0268 \pm j0,0105$	$\Delta\lambda_3$	$0,0886 \mp j0,1789$
$\Delta\lambda_4$	$0,0231 \mp j0,0129$	$\Delta\lambda_5$	$-0,0215 \pm j0,1317$	$\Delta\lambda_6$	$0,0081 \mp j0,0442$

W przypadku przebiegów odchyłek kąta mocy $\Delta\delta$ występowały liczne minima lokalne funkcji celu, odpowiadające nieprawidłowym wynikom obliczeń elektromechanicznych wartości własnych. Mogło to być spowodowane stosunkowo małymi amplitudami składowych modalnych związanych z obliczanymi wartościami własnymi. Inną przyczyną mogła być konieczność uwzględnienia w obliczeniach dwóch zastępczych składowych modalnych (por. punkt 3). Z powodu istnienia tych minimów lokalnych często nie było możliwe dokładne obliczenie wartości własnych pomimo, że miały one duże moduły czynników udziału w analizowanych przebiegach.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że:

- Badania przeprowadzone dla SEE CIGRE wykazały, że możliwe jest wyznaczenie z dobrą dokładnością elektromechanicznych wartości własnych na podstawie analizy przebiegów mocy chwilowej, prędkości kątowej oraz kąta mocy po wprowadzeniu zakłócenia impulsowego w układzie regulacji napięcia jednego z zespołów wytwórczych.
- W przypadku przebiegów mocy chwilowej i prędkości kątowej wartości własne zostały obliczone z dobrą dokładnością na podstawie analizy większości przebiegów, w których miały one dostatecznie duże moduły czynników udziału. Zastosowana metoda obliczeń wartości własnych na podstawie tych przebiegów sprawdza się także w przypadku dużych SEE takich, jak Krajowy System Elektroenergetyczny.
- Uśrednianie wyników obliczeń kolejnych wartości własnych na podstawie analizy przebiegów prędkości kątowej różnych zespołów pozwoliło na zwiększenie dokładności obliczeń.

LITERATURA

- [1] Paszek S., Nocoń A., The method for determining angular stability factors based on power waveforms, AT&P Journal Plus2, Power System Modeling and Control, Bratislava, Slovak Republic 2008, pp. 71-74.
- [2] Cetinkaya H.B., Ozturk S., Alboyaci B., Eigenvalues Obtained with Two Simulation Packages (SIMPOW and PSAT) and Effects of Machine Parameters on Eigenvalues, Electrotechnical Conference, 2004, MELECON 2004, Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean, Vol. 3, pp. 943-946.
- [3] Saitoh H., Miura K., Ishioka O., Sato H., Toyoda J., On-line modal analysis based on synchronized measurement technology, Power System Technology, 2002, Proceedings, PowerCon 2002, International Conference on, vol. 2, pp. 817 – 822.
- [4] Pruski P., Paszek S.: Obliczenia elektromechanicznych wartości własnych na podstawie przebiegów mocy chwilowej zarejestrowanych w elektrowni, Acta Energetica, Konferencja „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Systemy elektroenergetyczne, Jurata, 12-14.06.2013, s. 153-161.
- [5] Paszek S., Wybrane metody oceny i poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [6] Power Technologies, a Division of S&W Consultants Inc., Program PSS/E Application Guide, Siemens Power Technologies Inc., 2002.
- [7] de Mello F. P., Hannett L. H., Representation of Saturation in Synchronous Machines, IEEE Transactions on Power Systems 1986, Vol. PWRS-1, November, No.4, pp. 8-18.

CALCULATIONS OF ELECTROMECHANICAL EIGENVALUES BASED ON ANALYSIS OF DIFFERENT DISTURBANCE WAVEFORMS IN A POWER SYSTEM

In the paper there are presented the calculation results of the power system state matrix eigenvalues associated with electromechanical phenomena (i.e. electromechanical eigenvalues). There is compared the accuracy of eigenvalue calculations carried out on the basis of the analysis of disturbance waveforms of the instantaneous power, angular speed and power angle of generators of particular generating units of the power system. The method of eigenvalue calculations used consists in approximation of the disturbance waveforms of generating units with the waveforms being a superposition of modal components whose parameters depend on the searched eigenvalues and their participation factors. A hybrid algorithm, being a combination of genetic and gradient algorithms, is used for minimization of the objective function defined as a mean square error between the approximated and approximating waveforms.