

An Analysis of the Accuracy of Electromechanical Eigenvalue Calculations Based on Instantaneous Power Waveforms Recorded in a Power Plant

Authors

Piotr Pruski
Stefan Paszek

Keywords

power system, eigenvalues associated with electromechanical phenomena, transient states

Abstract

The paper presents the results of calculating the eigenvalues (associated with electromechanical phenomena) of the state matrix of the Polish Power System model on the basis of analysis of simulated and measured instantaneous power disturbance waveforms of generating units in Łaziska Power Plant. The method for electromechanical eigenvalue calculations used in investigations consists in approximation of the instantaneous power swing waveforms in particular generating units with the 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.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2013410

1. Introduction

Maintenance of the power system (PS) angular stability is one of the most important conditions for its proper performance. Loss of the power system angular stability can result in a serious system failure, the consequence of which may be a vast number of customers deprived of electricity supply. Angular stability of a power system may be assessed using stability factors [1] calculated on the basis of the system state matrix eigenvalues associated with electromechanical phenomena. The eigenvalues may be calculated based on the system state equations, but then the calculation results depend on the elements of the system state matrix, and indirectly on the assumed models of the power system components and their uncertain parameters. The eigenvalues can also be calculated with good accuracy on the basis of analysis of actual disturbance waveforms appearing in the system after various disturbances [2]. In this case, calculation results are not affected by the adopted power system model and its parameters, but only by the current system performance.

The purpose of this study is to analyse the calculation accuracy of the eigenvalues (related to electromechanical phenomena) of the Polish Power System (PPS) model state matrix, which interfere with instantaneous power waveforms of generating units in Łaziska Power Plant. The eigenvalues were calculated on the basis of analysis of simulated and measured instantaneous power disturbance waveforms in units no. 9 (KOP113) and no. 10 (KOP123) in Łaziska Power Plant.

2. Linearised power system model

The power system model linearised at the operating working is described by the state equation and output equation [3, 4]:

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

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

where: ΔX , ΔU , ΔY – deviations of the state variable vector, the input vector and the output variable vector. The elements of A , B , C and D matrices are calculated for the steady operating point of the PS.

The waveforms of the output variables of the linearised PS model can be calculated directly by integrating the state equation (1), or on the basis of eigenvalues and eigenvectors of the state matrix A [3]. Assuming only single eigenvalues of the state matrix, the state variable vector and the output variable vector can be expressed by the formulas [5]:

$$\Delta X(t) = \int_0^t V e^{A(t-\tau)} W^T B u(\tau) d\tau = \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y(t) &= \int_0^t C V e^{A(t-\tau)} W^T B u(\tau) d\tau + D u(t) = \\ &= \int_0^t C e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau + D u(t) \end{aligned} \quad (4)$$

where: V , W – right-side and left-side modal matrices, the columns of which are, respectively, subsequent right-side and left-side normalised ($W_h^T V_h = I$) state matrix eigenvectors, A – diagonal matrix, whose main diagonal consists of subsequent state matrix eigenvalues.

The output quantity waveform is the superposition of modal components dependent on the state matrix eigenvalues and eigenvectors. The waveform of the i -th output quantity (at $D = 0$ and under the assumption of single eigenvalues only) takes the following form:

– for a disturbance in the form of a Dirac impulse at time t_0 in the waveform of the j -th input quantity $\Delta U_j(t) = \Delta U \delta(t-t_0)$ [4, 6]:

$$\Delta y_i(t) = \sum_{h=1}^n F_{ih} e^{\lambda_h(t-t_0)} \Delta U, \quad t \geq t_0 \quad (5)$$

where:

$$F_{ih} = C_i V_h W_h^T B_j \quad (6)$$

– for a disturbance in the form of a step change at time t_0 in the waveform of the j -th input quantity $\Delta U_j(t) = \Delta U I(t-t_0)$ [6]:

$$\Delta y_i(t) = \sum_{h=1}^n K_{ih} (e^{\lambda_h(t-t_0)} - 1) \Delta U, \quad t \geq t_0 \quad (7)$$

where:

$$K_{ih} = F_{ih} \lambda_h^{-1} \quad (8)$$

where: $\lambda_h = \alpha_h + jv_h$ – h -th eigenvalue of the state matrix, F_{ih} – participation factor of the h -th eigenvalue in the waveform of the i -th output quantity, C_i – i -th row of matrix C , V_h , W_h – h -th right-side and left-side eigenvector of the state matrix, B_j – j -th column of matrix B , n – dimension of state matrix A . Values λ_h and F_{ih} may be real or complex.

In the case of the waveforms of instantaneous power swings in a power system, the eigenvalues associated with motion of generating unit rotors, hereinafter referred to as “electromechanical eigenvalues”, are critical. They are complex conjugate eigenvalues, the imaginary parts of which usually correspond to frequency range (0.1–2) Hz. Imaginary parts of these eigenvalues are therefore in range of $\pm(0.63\text{--}12.6)$ rad/s. Depending on the real parts of the eigenvalues, their corresponding modal components can decay over time at different rates (for negative values of the real parts), or increase over time (for positive values of the real parts), which means a loss of the system local (static) stability for small disturbances. The electromechanical eigenvalues intervene in different ways in the instantaneous power waveforms of particular generating units, which is associated with different values of their participation factors [6].

3. The method for calculations of electromechanical eigenvalues

For calculations there were used the disturbance waveforms of generating unit instantaneous power deviations which occurred

after purposeful introducing a small disturbance to the PS. The disturbance was a rectangular pulse or a step change in the waveform of the voltage regulator reference voltage V_{ref} in a generating unit. The system response to a short rectangular pulse (with properly selected height and width) is similar to the response to a Dirac impulse [4, 7].

The amplitude of instantaneous power swings must be large enough to enable their extraction from the waveforms of phase currents and voltages recorded in each node of the system [4, 7]. In the case of a rectangular pulse, the amplitude of power swings is approximately proportional to the surface area of the pulse. The pulse height, however, must be limited to avoid a significant effect of nonlinearity and limits occurring in the power system on the instantaneous power waveforms. Also the rectangular pulse duration must be limited, because its significant extension causes increasingly growing differences in the system response to a rectangular pulse and to a Dirac impulse, which can deteriorate the electromechanical eigenvalue calculation accuracy [4, 7]. Based on the performed investigations, it has been established that the eigenvalue calculation accuracy is still satisfactory, if the pulse duration does not exceed 300 ms [7].

As regards a step change, the amplitude of power swings is approximately proportional to the step height. The step height, however, must also be limited to avoid a significant influence of nonlinearity and limits occurring in the power system on the instantaneous power waveforms.

For safety reasons, the height of a disturbance introduced to the voltage regulation system of a generator operating at a power plant should rather not exceed ca. 3–5% of the steady-state value of the voltage regulator reference voltage. The higher power of the generating unit disturbed, the larger amplitudes of the power swings in particular generating units. These amplitudes are also influenced by interactions (links) between these units and the unit disturbed. [4].

Since the instantaneous power waveform of a single generating unit usually contains a few modal components with significant amplitudes, in order to calculate all electromechanical eigenvalues of the power system, the instantaneous power waveforms in different generating units need to be analysed for various disturbance locations [4].

The method for electromechanical eigenvalue calculations used in the investigations consists in the approximation of instantaneous power deviation waveforms in individual units by formula (5) or (7) for an impulse or step disturbance, respectively. Electromechanical eigenvalues and participation factors of individual modal components are unknown parameters of the approximation. In the approximation process these parameters are selected iteratively in such a way as to minimize the objective function defined as the mean square error that occurs between the approximated and approximating waveforms [4, 7]:

$$\varepsilon_w(\lambda, F) = \sum_{i=1}^N (\Delta P_{i(m)} - \Delta P_{i(a)}(\lambda, F))^2 \quad (9)$$

where: λ – vector of electromechanical eigenvalues, F – vector of

participation factors, N – number of waveform samples, index m denotes the approximated instantaneous power deviation waveform ΔP , and index a – the approximating instantaneous power deviation waveform, calculated on the basis of the eigenvalues and their participation factors according to formula (5) or (7).

In relationship (5) or (7), when calculating the instantaneous power deviation approximating waveforms, there are neglected the modal components associated with the electromechanical eigenvalues whose absolute values of the participation factors are small. The fast decaying modal components unrelated to electromechanical eigenvalues are also neglected.

To eliminate the effect of the fast decaying modal components originated from the real and complex eigenvalues, which are not electromechanical eigenvalues, it is convenient to start the waveform analysis after a certain time t_p after the disturbance occurrence [4, 7]. In the calculations presented there was assumed $t_p = 0.6$ s, or $t_p = 0.7$ s, for pulse and step disturbances, respectively. For the objective function (9) minimisation a hybrid optimisation algorithm consisting of serially connected genetic and gradient algorithms was used. The results obtained from the genetic algorithm are the starting point of the gradient algorithm. The use of a genetic algorithm in the first stage of the search for the objective function minimum eliminates the problem of precise determination of the starting point, whereas the gradient algorithm used in the second stage converges faster and allows finding the searched extremum more accurately [4, 7]. For the genetic algorithm 50 generations, a population of 20 individuals,

and chromosome length of 6 bits were adopted. Selection was performed by the elite method [8], which ensures that the fittest individuals of a given generation will proceed to the next generation. The maximum number of iterations adopted for the gradient algorithm was 1000.

Due to the existence of the objective function local minima, where the optimisation algorithm can get stuck, the approximation process was carried out repeatedly based on the same instantaneous power waveform. Calculation results with the objective functions larger than a certain assumed limit were rejected. As the final calculation results of the real and imaginary parts of particular eigenvalues, there were assumed the arithmetic means of the results not rejected in subsequent calculations [4, 7].

In many cases the eigenvalues are calculated on the basis of instantaneous power waveform in two stages. In the first stage, based on a particular instantaneous power waveform, there are calculated the eigenvalues that have relatively large values of the real parts (i.e. small moduli of the real parts), corresponding to the weakly damped modal components. At the time there are neglected the eigenvalues of smaller values of the real parts corresponding to the stronger damped modal components. In the second stage, based on the same waveform, there are calculated the eigenvalues with the smaller values of the real parts, when taking into account the eigenvalues calculated in the first stage. Additionally, in the first and second stage of the calculations the eigenvalues calculated earlier based on other instantaneous power waveforms are often assumed as known eigenvalues [4, 7].

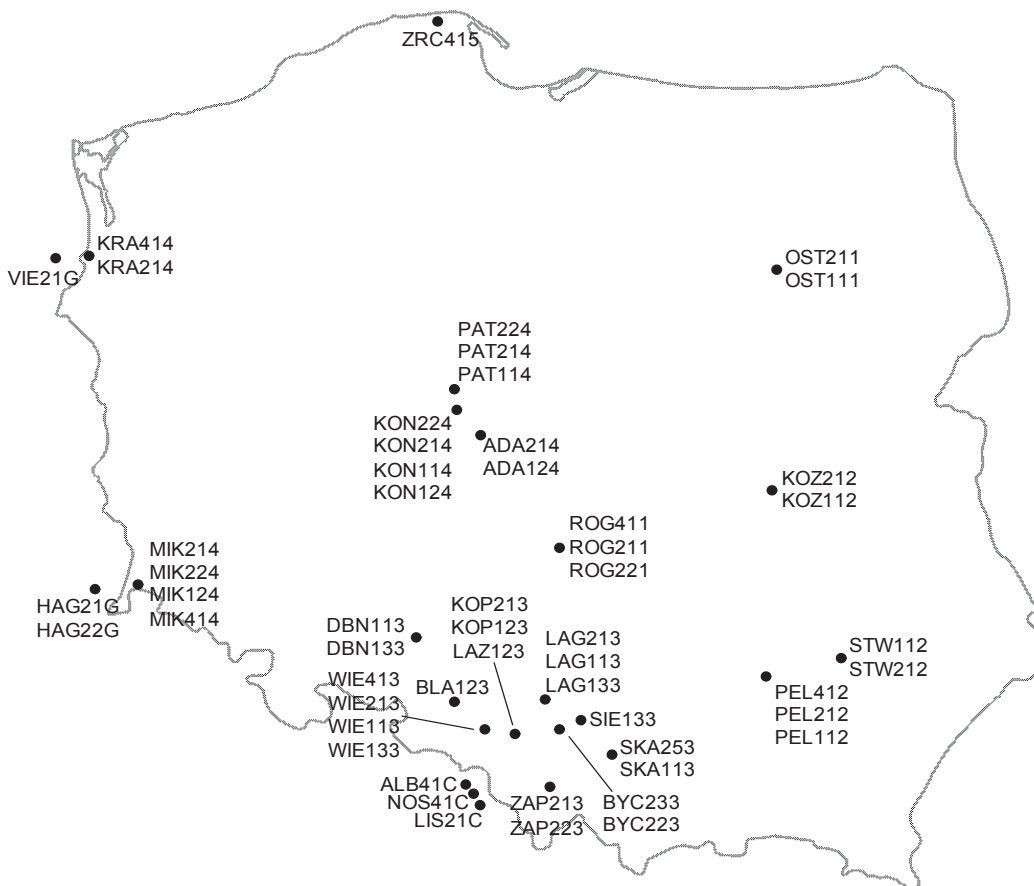


Fig. 1. Generation nodes included in the Polish Power System model [4]

4. Example calculations

4.1. Calculations based on instantaneous power waveform simulation

In order to analyse the accuracy of the adopted method of electromechanical eigenvalue calculations, in the first place the calculations were carried out on the basis of the instantaneous power deviation waveforms obtained from the simulations with use of the Polish Power System mathematical model.

In this model there were taken into account 49 selected generating units supplying high and very high voltage grids, and 8 equivalent generating units that represented the impact of power systems of the neighbouring countries. The model was developed in a Matlab-Simulink environment. It consists of 57 models of generating units and a model of the power grid and loads [4]. The generating units included in the model are shown in Fig. 1.

The developed generating unit model includes blocks of Configurable Subsystems type that allow selecting the models of particular components of the generating unit: generator, excitation system, turbine, and power system stabiliser (PSS). The following component models of the Polish Power System generating units were assumed for the calculations: the synchronous generator GENROU model [5], the static [7] or electromachine [5] model of the excitation system, the steam turbine IEEE1 model [5] or the water turbine HYGOV model [5], and optionally the PSS3B stabiliser model [5]. For the equivalent generating units that represent the impact of the power systems of the neighbouring countries a simplified synchronous generator model was used. In this case the effects of excitation system, turbine, and system stabiliser were neglected [4].

Eigenvalues (including electromechanical eigenvalues) of the system state matrix can be calculated directly on the basis of the structure and parameters of the power system model in the Matlab-Simulink environment. These electromechanical eigenvalues are hereinafter called “original eigenvalues”. Comparison of the eigenvalues calculated based on minimisation of the objective function (9) and the original eigenvalues is a measure of the calculation accuracy [4].

The state matrix of the analysed Polish Power System model has 56 complex electromechanical eigenvalues. They were sorted in ascending order according to their real parts, and numbered from λ_1 to λ_{56} .

In this subsection there is presented a comparison of the calculation results of the eigenvalues depending on the type and amplitude ΔV_{ref} sign of the disturbance introduced. The presented example calculations based on the waveforms of instantaneous power deviations in unit 10 of Łaziska Power Plant (KOP123 in Fig. 1), following the introduction of a disturbance in the reference voltage waveform of the voltage regulator in that unit. Only one electromechanical eigenvalue $\lambda_{15} = -1.0477 \pm j10.0241$ 1/s interferes significantly in the instantaneous power waveform in unit 10. In Tab. 1 there are listed the absolute errors $\Delta\lambda_{15}$ of eigenvalue λ_{15} calculations carried out on the basis of the simulated waveforms of the instantaneous power deviations in unit 10. There were taken into account the waveforms occurring after introducing

pulse and step disturbances of different amplitudes (V_{ref0} denotes the steady value /the initial value before the disturbance/ of the voltage regulator reference voltage).

Disturbance type	ΔV_{ref}	t_{imp}	$\Delta\lambda_{15}$
	% V_{ref0}	s	1/s
pulse	-5	200	0.0182±j0.1013
pulse	5	200	-0.2309±j0.0572
step	-5	-	-0.0374±j0.2137
step	5	-	-0.1179±j0.5611

Tab. 1. Absolute errors of eigenvalue λ_{15} calculation based on simulated instantaneous power waveform in unit 10 of Łaziska Power Plant

From Tab. 1 it follows that the calculation error of the real part of eigenvalue λ_{15} is much larger in the case of disturbances with positive amplitude, than in the case of disturbances with negative amplitude. This is due to the stronger impact of nonlinearities and limits occurring in the power system on the instantaneous power waveforms during introducing a disturbance with positive amplitude. The calculation accuracy of the real and imaginary parts of this eigenvalue is comparable in the case of pulse and step disturbances with negative amplitude.

Fig. 2 shows the histograms of the calculation results of the real and imaginary parts of eigenvalue λ_{15} , based on simulation analysis of the instantaneous power swings in unit 10 following a step disturbance with amplitude $\Delta V_{ref} = 5\% V_{ref0}$. Due to the stochastic nature of the genetic algorithm, individual calculations were initiated for different starting points, each time selected randomly from the given search ranges [8]. The red bars represent the results included in the further analysis, and the green bars represent the results rejected. The vertical thin lines in the middle of the histograms correspond to the original eigenvalues. The ranges of the real and imaginary parts of eigenvalue λ_{15} correspond to the assumed ranges of their searches. Fig. 2 shows that in this case 17 out of 50 calculation results were rejected. In the other disturbance cases none of the calculation results was rejected. Furthermore, in each of these cases all calculation results were practically identical.

In Fig. 3–5 there are presented the simulation waveforms of the instantaneous power deviation in the disturbances analysed and the bands of the approximating waveforms corresponding to the non-rejected calculation results. The band of the approximating waveforms determines the range of the instantaneous power changes in which “there are” all approximating waveforms corresponding to particular calculation results.

From Fig. 3–5 it follows that in each of the analysed cases the quality of the instantaneous power deviation waveform approximation with the hybrid algorithm is lower in a certain period of time after the disturbance occurrence. As regards instantaneous power waveforms following a step disturbance, the instantaneous power value in the steady state after the disturbance differs slightly from that in the steady state before the disturbance,

which results from changes in the operating point of the generation unit. In almost all the cases the bands of approximating waveforms were very narrow, due to the fact that in these cases individual calculation results hardly differed from each other.

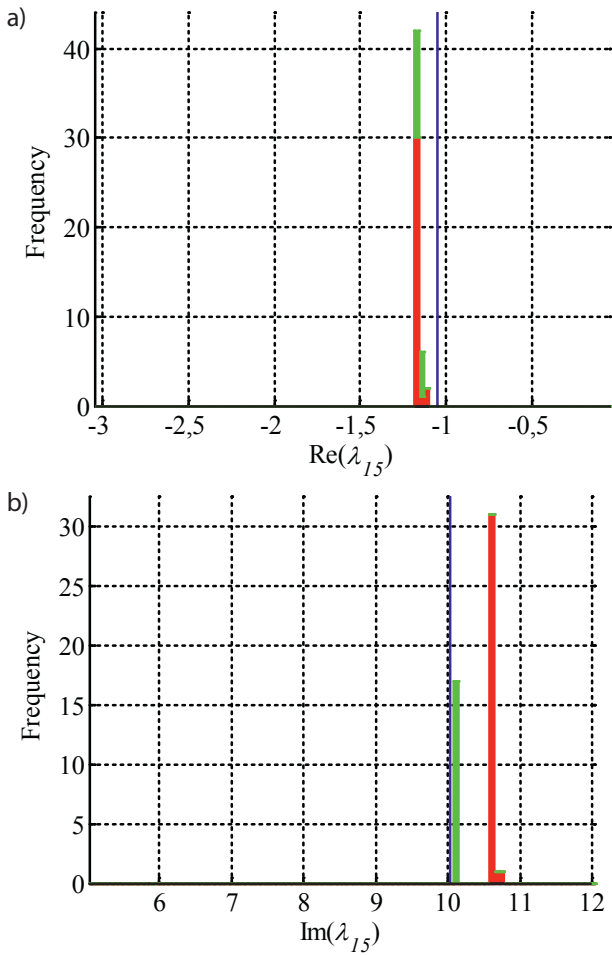


Fig. 2. Histograms of the real part (a) and the imaginary part (b) of eigenvalue λ_{15} for a step disturbance with amplitude $\Delta V_{ref} = 5\% V_{ref0}$

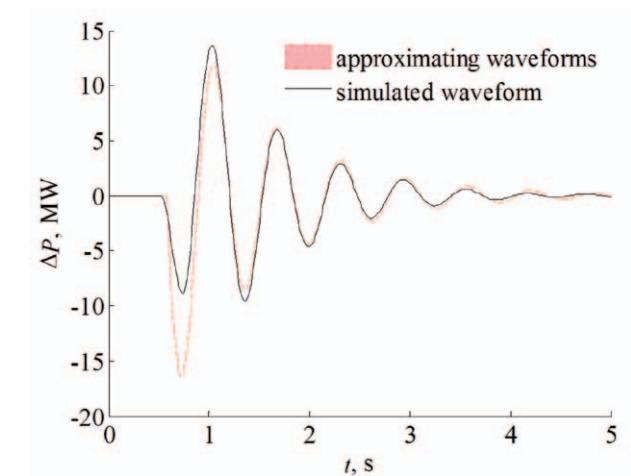


Fig. 3. Instantaneous power deviation waveforms for a pulse disturbance with amplitude $\Delta V_{ref} = -5\% V_{ref0}$ and duration $t_{imp} = 200$ ms

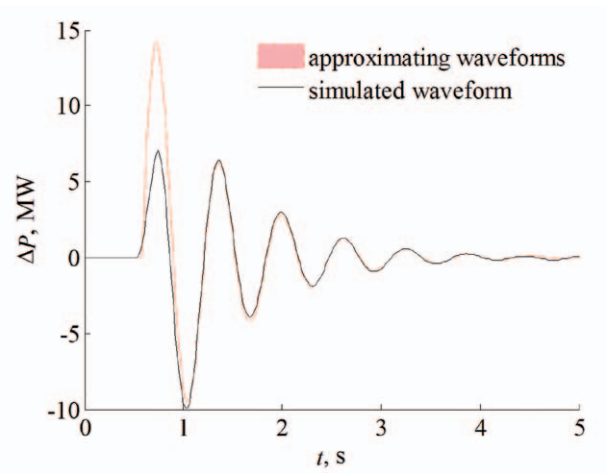


Fig. 4. Instantaneous power deviation waveforms for a pulse disturbance with amplitude $\Delta V_{ref} = 5\% V_{ref0}$ and duration $t_{imp} = 200$ ms

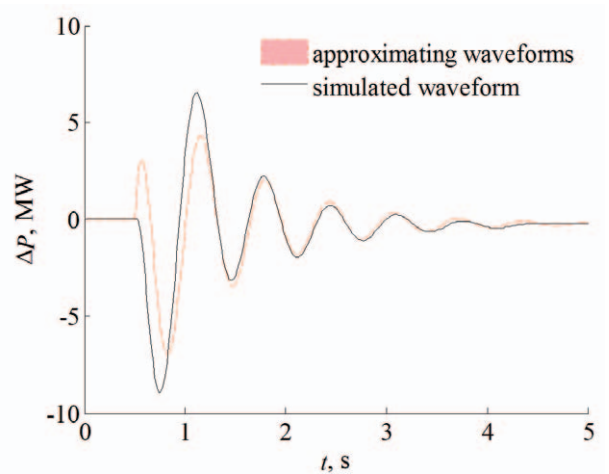


Fig. 5. Instantaneous power deviation waveforms for a step disturbance with amplitude $\Delta V_{ref} = -5\% V_{ref0}$

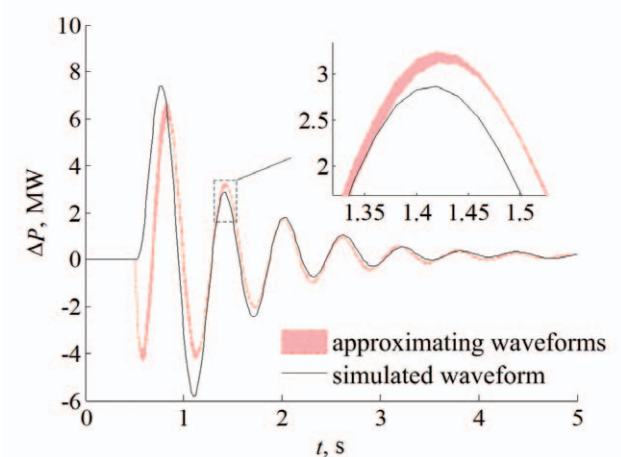


Fig. 6. Instantaneous power deviation waveforms for a step disturbance with amplitude $\Delta V_{ref} = -5\% V_{ref0}$

4.2. Calculations based on instantaneous power measurement waveforms

This subsection presents a comparison of the calculations results of electromechanical eigenvalues depending on the sign of amplitude ΔV_{ref} of a step disturbance of the voltage regulator reference voltage. The instantaneous power measurement waveforms of units no. 9 (KOP113) and no. 10 (KOP123) of Łaziska Power Plant were considered.

The instantaneous power measurement waveforms recorded at the power plant were heavily disturbed. The presence of disturbances was due to the measurement environment characteristics. One of the causes of the disturbances was the strong electromagnetic field generated by rotating machines, transformers, and electrical devices (including high-current circuits, reactors). Power electronic inverters were another cause of the disturbances.

The measured waveforms were filtered by a third order digital Butterworth filter with the cut-off frequency equal to 10 Hz [9]. The zero phase filtering method was applied. This allowed eliminating the delays and phase distortions of signals introduced by the filter [9]. The filtered waveforms were subjected to the process of reducing the sampling frequency from 2.1 kHz to 100 Hz, which allowed reducing the number of signal samples in the objective function (9). A constant value was assumed of the waveform in time before the disturbance equal to the waveform average value in the steady state before the disturbance. Fig. 7 shows a comparison of the instantaneous power waveform recorded in unit no. 10 of Łaziska Power Plant in the case of a step disturbance of 5% of the steady state value V_{ref0} before (light line) and after (dark line) filtration.

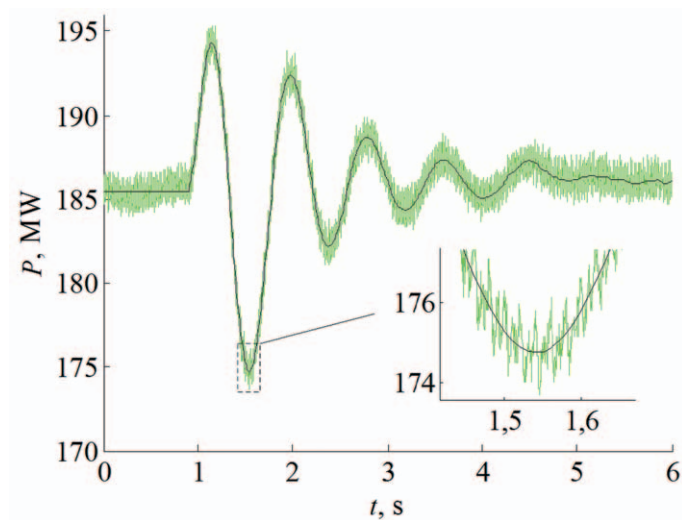


Fig. 7. Comparison of instantaneous power waveforms before and after filtration

In the case of calculating the Polish Power System electromechanical eigenvalues based on the instantaneous power measurement waveforms, estimation of the calculation accuracy was not possible. This was due to the unavailability of sufficiently

accurate and reliable results of the calculation of these eigenvalues using other methods. Therefore this subsection presents the calculation results only, without assessment of their accuracy. The instantaneous power waveforms recorded in units no. 9 (KOP113) and no. 10 (KOP123) of Łaziska Power Plant contain only one significant modal component associated with electromechanical eigenvalues. On the basis of the Polish Power System model analysis it was found that only the modal component associated with electromechanical eigenvalue λ_{15} interfered significantly in the instantaneous power waveform in unit no. 10. This eigenvalue, calculated based on the structure and parameters of the Polish Power System model, is $\lambda_{15} = -1.0477 \pm j10.0241$ 1/s. Unit no. 9 was not included in that model. The eigenvalue interfering in the instantaneous power waveform of unit no. 9 significantly was denoted by λ_x (calculation of this eigenvalue on the basis of the Polish Power System model structure and parameters was not possible). In Tab. 2 there are listed the results of eigenvalue calculations based on the instantaneous power deviation measurement waveforms following step disturbances with various amplitudes.

Unit No.	ΔV_{ref}	λ	
	% V_{ref0}		1/s
9 (KOP123)	-5	λ_x	$0.8823 \pm j7.7264$
9 (KOP123)	5	λ_x	$-1.0176 \pm j8.0020$
10 (KOP123)	-5	λ_{15}	$-1.2011 \pm j7.6645$
10 (KOP123)	5	λ_{15}	$-1.0695 \pm j7.7341$

Tab. 2. Results of eigenvalue calculations based on the instantaneous power deviation measurement waveforms in units no. 9 and 10 of Łaziska Power Plant

It follows from Tab. 2 that as regards the instantaneous power waveforms in both unit no. 9 and unit no. 10 the results of calculations of the real parts of eigenvalues vary significantly depending on the sign of the disturbance amplitude. The difference in results of calculations of the imaginary parts of these eigenvalues, depending on the sign of the disturbance amplitude is relatively small. On the basis of the simulation investigations it can be concluded that these differences might have been due to the stronger impact of nonlinearities and limits occurring in the power system on the instantaneous power waveforms following a disturbance with a positive amplitude.

Fig. 8–10 show the measurement waveforms of instantaneous power deviations following the analysed disturbances (Tab. 2), and the bands of approximating waveforms corresponding to individual calculation results.

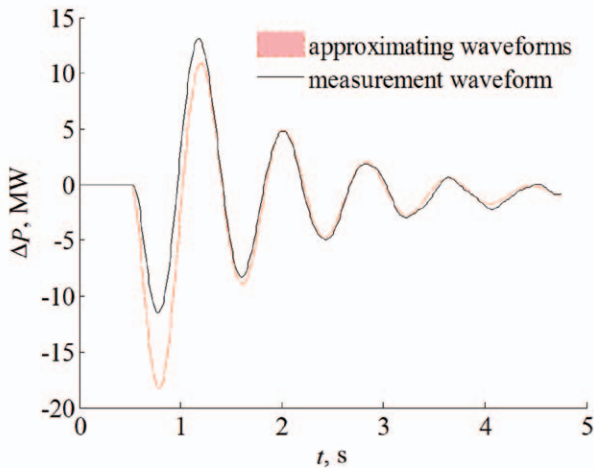


Fig. 8. Instantaneous power waveforms for a step disturbance with amplitude: $\Delta V_{ref} = -3\% V_{ref0}$ in unit no. 9 of Łaziska Power Plant

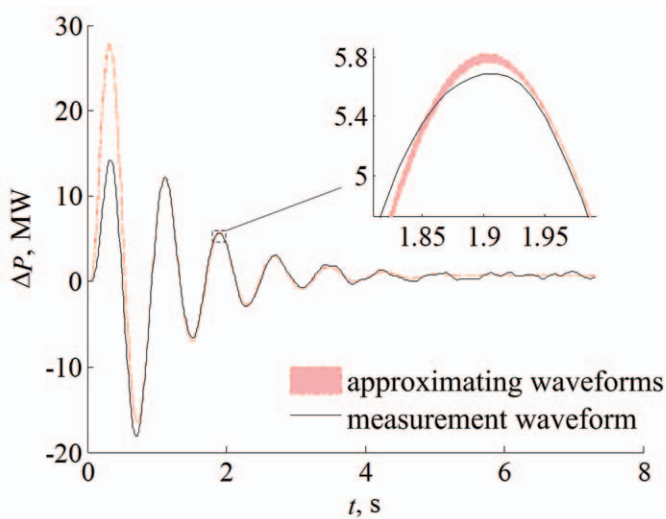


Fig. 9. Instantaneous power waveforms for a step disturbance with amplitude: $\Delta V_{ref} = 3\% V_{ref0}$ in unit no. 9 of Łaziska Power Plant

Fig. 8–10 show that the approximation quality of instantaneous power waveforms is satisfactory in the time interval after the disappearance of the fast decaying modal components that do not affect calculation results. The instantaneous power value in the steady-state after a disturbance differs slightly from that in the steady-state before the disturbance. In nearly all the analysed cases none of the calculation results was rejected, and they all were practically identical. Only as regards the instantaneous power waveform in unit no. 9 following a disturbance with positive amplitude one of the results was rejected. In this case there occurred observable small dispersion of the other, accepted results of the calculations of the real and imaginary parts of eigenvalue λ_x . For this reason the approximating waveform bandwidth was in this case small, but noticeable (Fig. 9). In the other cases the approximating waveform bands were very narrow.

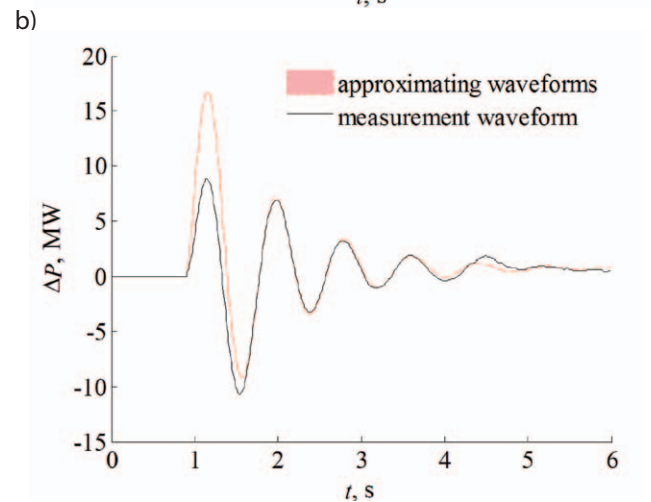
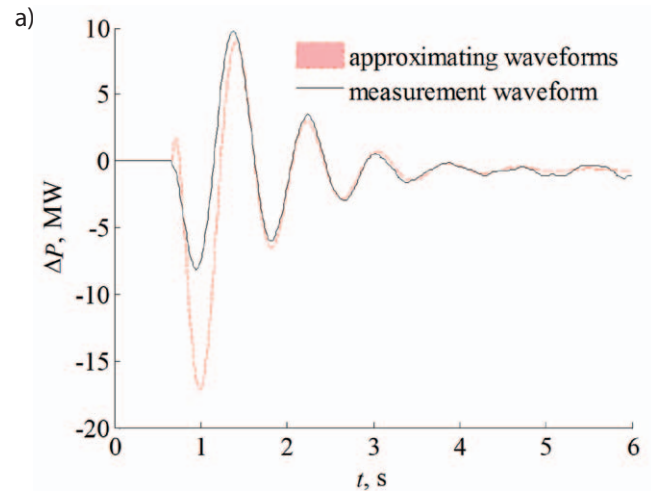


Fig. 10. Instantaneous power deviation waveforms for a step disturbance with amplitude: $\Delta V_{ref} = -3\% V_{ref0}$ (a) and $\Delta V_{ref} = 3\% V_{ref0}$ (b) in unit no. 10 of Łaziska Power Plant

5. Final conclusions

The simulation and measurement investigations performed enabled concluding that:

- The simulations showed that electromechanical eigenvalues can be determined with satisfactory accuracy on the basis of analysis of instantaneous power waveforms in the disturbance states occurring after introducing a square pulse or a step change with negative amplitude to the voltage regulator reference voltage. The eigenvalue calculation results obtained on the basis of instantaneous power waveform analysis are highly consistent with the calculation results of these eigenvalues based on the power system model structure and parameters in a Matlab-Simulink environment. The eigenvalue calculation results obtained for disturbances with positive amplitudes were worse, which might have been due to the stronger impact of nonlinearities and limits in the power system on the instantaneous power waveforms.
- In the case of a disturbance with negative amplitude the accuracy of the calculations of electromechanical eigenvalue λ_{15} on the basis of the instantaneous power simulated waveforms in unit no. 10 of Łaziska Power Plant was comparable for the cases of pulse and step disturbances. The calculation results

of this eigenvalue for a disturbance with positive amplitude differ depending on the disturbance type.

- The results of the electromechanical eigenvalue calculations based on the instantaneous power measurement waveforms recorded in units no. 9 and 10 of Łaziska Power Plant differ depending on the step disturbance amplitude sign. The accuracy of these calculations cannot be directly assessed; however it can be concluded on the basis of simulation calculations that the result obtained for the disturbance with negative amplitude is more accurate.
- The applied method enabled calculation of the eigenvalue interfering with the instantaneous power waveforms in unit no. 9 of Łaziska Power Plant despite the fact that the unit was not included in the analysed Polish Power System model. This method enables calculation of eigenvalues and assessment of power system angular stability.
- Repeating calculations of electromechanical eigenvalues using the hybrid algorithm on the basis of analysis of the same instantaneous power deviation waveform for different starting points, each time randomly selected from the search range, prevents the optimisation algorithm from getting stuck in numerous local minima of the objective function. In the calculations discussed here, based on simulated and measured instantaneous power deviation waveforms this happened very rarely.
- The zero phase filtering method with the use of a digital Butterworth filter applied to the instantaneous power measurement waveforms allowed for satisfactory damping of the disturbance components in these waveforms without delaying and significantly distorting them.
- The accuracy of approximation of the simulated and measured instantaneous power deviation waveforms by the hybrid algorithm was comparable in all the analysed cases.

REFERENCES

1. Paszek S., Nocoń A., The method for determining angular stability factors based on power waveforms, *AT&P Journal Plus2, Power System Modelling and Control*, Bratislava, Slovak Republic 2008, pp. 71–74.
2. Saitoh H. et al., On-line modal analysis based on synchronized measurement technology, *Power System Technology 2002, Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on*, Vol. 2, pp. 817–822.
3. Kudła J., Paszek S., Reduced-order transfer function in Power System (in Polish), XVIII Seminar of Electrical Engineering Fundamentals and Circuit Theory, SPETO '95, Vol. 2, 1995, pp. 299–304.
4. Pruski P., Paszek S., Modal analysis of instantaneous power disturbance waveforms in the Polish National Power System (in Polish), *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Elektryka”* 2011, Vol. 4, year LVII, pp. 83–99.
5. Paszek S., Selected methods for assessment and improvement of power system angular stability (in Polish), Gliwice 2012.
6. Paszek S., Pruski P., Comparison of transients for the nonlinear and linearized model of a generating unit working in a power system (in Polish), *Inter. Symp. on Electrical Machines. SME 2010, Gliwice – Ustroń 2010*, pp. 181–185.
7. Paszek S., Pruski P., Assessment of the electrical power system angular stability based on an analysis of selected disturbance states (in Polish), *Acta Energetica* 2011, issue 2, pp. 44–53.
8. Nocoń A., Paszek S., Polyoptimisation of synchronous generator voltage regulator (in Polish), monography, Gliwice 2008.
9. Oppenheim A.V., Schafer R.W., *Discrete-time signal processing*, 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River 1999.

Piotr Pruski

Silesian University of Technology

e-mail: piotr.pruski@polsl.pl

Assistant at the Electrical Faculty of the Silesian University of Technology. The area of his research interests includes the issues of power system performance analyses. Author or co-author of 37 papers published home and abroad on the angle stability assessment in power system, and estimation of parameters of mathematical models of generating units in power system. In 2011 awarded a collective II-grade prize of the Silesian University of Technology Rector for scientific achievements.

Stefan Paszek

Silesian University of Technology

e-mail: stefan.paszek@polsl.pl

Author or co-author of 160 publications, incl. four monographies. Co-author of three academic textbooks. Research interests: power system analysis in transient states, power system's angle stability, optimisation and polyoptimisation of system stabilisers and voltage regulators of synchronous generators, estimation of parameters of generating units models in power system, new models of synchronous generators using the artificial neuron network technology, application of fuzzy controllers for electric machines.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 118–125. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Obliczenia elektromechanicznych wartości własnych na podstawie przebiegów mocy chwilowej zarejestrowanych w elektrowni

Autorzy
Piotr Pruski
Stefan Paszek

Słowa kluczowe

system elektroenergetyczny, wartości własne związane ze zjawiskami elektromechanicznymi, stany nieustalone

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 szeregowe połączenie algorytmu genetycznego i gradientowego.

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 zakłóceń, pojawiających się w SEE po różnych zakłóceniach [2]. W tym przypadku na wyniki obliczeń nie wpływa przyjęty model SEE i jego parametry, tylko aktualny stan pracy układu.

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 przebiegów zakłóceń, 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]:

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

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

gdzie:

ΔX , ΔU , ΔY – odchyłki wektora zmiennych stanu, wektora wymuszeń i wektora zmiennych wyjściowych

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]. Zakładając tylko pojedyncze wartości własne macierzy stanu, wektor zmiennych stanu oraz wektor wielkości wyjściowych można określić zależnościami [5]:

$$\Delta X(t) = \int_0^t V e^{A(t-\tau)} W^T B u(\tau) d\tau = \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$\Delta Y(t) = \int_0^t C V e^{A(t-\tau)} W^T B u(\tau) d\tau + D u(t) = \int_0^t C e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau + D u(t) \quad (4)$$

gdzie:

V , W – macierze modalne prawostronne i lewostronne, których kolumnami są odpowiednio kolejne prawostronne i lewostronne unormowane ($W_h^T V_h = I$) wektory własne macierzy stanu,

A – macierz diagonalna, w której na przekątnej głównej umieszczone są kolejne wartości własne macierzy stanu.

Przebieg danej wielkości wyjściowej stanowi superpozycję składowych modalnych zależnych od wartości własnych i wektorów własnych macierzy stanu. 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, 6]:

$$\Delta y_i(t) = \sum_{h=1}^n F_{ih} e^{\lambda_h(t-t_0)} \Delta U, \quad t \geq t_0 \quad (5)$$

przy czym:

$$F_{ih} = C_i V_h W_h^T B_j \quad (6)$$

• przy zakłóceniu w postaci skokowej zmiany w chwili t_0 w przebiegu j -tej wielkości wymuszającej $\Delta U_j(t) = \Delta U I(t-t_0)$ [6]:

$$\Delta y_i(t) = \sum_{h=1}^n K_{ih} (e^{\lambda_h(t-t_0)} - 1) \Delta U, \quad t \geq t_0 \quad (7)$$

przy czym:

$$K_{ih} = F_{ih} \lambda_h^{-1} \quad (8)$$

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 λ_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”. Są to zespolone, sprzężone wartości własne, których części urojone odpowiadają zwykle zakresowi częstotliwości (0,1–2) Hz. Części urojone tych wartości własnych mieszczą się więc w przedziale $\pm(0,63-12,6)$ rad/s. W zależności od wartości części rzeczywistych wartości własnych,

odpowiadające im składowe modalne mogą zanikać w czasie z różną szybkością (dla ujemnych wartości części rzeczywistych) lub narastać w czasie (dla dodatnich wartości części rzeczywistych), co oznacza utratę stabilności lokalnej (statycznej) systemu dla małych zakłóceń. Elektromechaniczne wartości własne w różny sposób ingerują w przebiegach mocy chwilowej poszczególnych zespołów wytórczych, co jest związane z różnymi wartościami ich czynników udziału [6].

3. Metoda obliczeń elektromechanicznych wartości własnych

W obliczeniach wykorzystano przebiegi zakłóceniami odchyłek mocy chwilowej zespołów wytórczych, 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 wytórczych. 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, 7].

Amplituda kołysań mocy chwilowej musi być odpowiednio duża, aby można było wyodrębnić te kołysania z zarejestrowanych przebiegów fazowych prądów i napięć w poszczególnych węzłach systemu [4, 7].

W przypadku zakłócenia w postaci impulsu prostokątnego amplituda kołysań mocy jest w przybliżeniu proporcjonalna do pola powierzchni tego impulsu. Wysokość impulsu musi być jednak ograniczona, aby uniknąć znaczącego wpływu nieliniowości i ograniczeń występujących w SEE na przebiegi mocy chwilowej. Czas trwania impulsu prostokątnego również musi być ograniczony, gdyż jego znaczenie wydłużanie powoduje coraz większe różnice odpowiedzi systemu na impuls prostokątny i na impuls Diraca, co może spowodować zmniejszenie dokładności obliczeń elektromechanicznych wartości własnych [4, 7]. Z przeprowadzonych badań wynika, że dokładność obliczeń wartości własnych jest jeszcze zadowalająca, gdy czas trwania impulsu nie przekracza 300 ms [7].

W przypadku zakłócenia skokowego amplitudakołysańmocyjestwprzybliżeniu proporcjonalna do wysokości skoku. Wysokość skoku musi być jednak również ograniczona, aby uniknąć znaczącego wpływu nieliniowości i ograniczeń występujących w SEE na przebiegi mocy chwilowej.

Ze względów bezpieczeństwa wysokość zakłócenia wprowadzonego do układu regulacji napięcia generatora pracującego w elektrowni i wydającego moc do SEE raczej nie powinna przekraczać ok. 3–5% wartości ustalonej napięcia zadanego regulatora napięcia.

Amplitudy kołysań mocy w poszczególnych zespołach są tym większe, im większa jest moc zespołu, w którym wprowadzono zakłócenie. Na amplitudy kołysań mocy w poszczególnych zespołach mają wpływ także wzajemne oddziaływania (powiązania), występujące między tymi zespołami a zespołem, w którym wprowadzono zakłócenie [4].

Ponieważ w przebiegu mocy chwilowej pojedynczego zespołu wytórczego występuje zwykle kilka składowych modalnych o znaczącej amplitudzie, w celu obliczenia

wszystkich elektromechanicznych wartości własnych SEE konieczna jest analiza przebiegów mocy chwilowej różnych zespołów wytórczych, występujących przy różnych miejscach wprowadzania zakłócenia [4].

Wykorzystana w badaniach metoda obliczeń elektromechanicznych wartości własnych polega na aproksymacji przebiegów odchyłek mocy chwilowej w poszczególnych zespołach wytórczych za pomocą wyrażenia (5) w przypadku zakłócenia impulsowego lub (7) 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, 7]:

$$\varepsilon_w(\lambda, F) = \sum_{i=1}^N (\Delta P_{i(m)} - \Delta P_{i(a)}(\lambda, F))^2 \quad (9)$$

gdzie:

λ – wektor elektromechanicznych wartości własnych

F – wektor czynników udziału

N – liczba próbek przebiegów, indeks m oznacza przebieg aproksymowany odchyłką mocy chwilowej ΔP , a indeks a – przebieg aproksymujący odchyłką mocy chwilowej, obliczony na podstawie wartości własnych i czynników udziału według wzoru (5) lub (7).

W wyrażeniu (5) lub (7) przy obliczaniu przebiegów aproksymujących odchyłkę mocy chwilowej pomijają się składowe modalne związane z elektromechanicznymi wartościami własnymi, których moduły czynników udziału są małe. Pomijane są także szybko ustajające się składowe modalne niezwiązane z elektromechanicznymi wartościami własnymi.

Aby wyeliminować wpływ szybko zanikających składowych modalnych, pochodzących od rzeczywistych oraz zespolonych wartości własnych, niebędących elektromechanicznymi wartościami własnymi, analizę przebiegów wygodnie jest rozpocząć po pewnym czasie t_p od chwili wystąpienia zakłócenia [4, 7]. W obliczeniach zaprezentowanych w niniejszym artykule przyjęto wartość czasu $t_p = 0,6$ s w przypadku zakłócenia impulsowego oraz $t_p = 0,7$ s w przypadku zakłócenia skokowego.

Do minimalizacji funkcji celu (9) wykorzystano hybrydowy algorytm optymalizacyjny, stanowiący szeregowe połączenie algorytmów genetycznego i gradientowego. Wyniki uzyskane za pomocą algorytmu genetycznego stanowią punkt startowy dla algorytmu gradientowego. Zastosowanie algorytmu genetycznego w pierwszym etapie poszukiwania minimum funkcji celu eliminuje problem precyzyjnego określenia punktu startowego. Z kolei zastosowany w drugim etapie algorytm gradientowy jest szybciej zbieżny i pozwala na odnalezienie poszukiwanego ekstremum z większą dokładnością [4, 7]. Dla algorytmu genetycznego przyjęto maksymalną liczbę pokoleń równą 50, wielkość populacji równą 20 osobników i długość chromosomu wynoszącą 6 bitów. Selekcję

przeprowadzono metodą elitarną [8], która gwarantuje, że najlepiej przystosowane osobniki z danego pokolenia znajdują się w następnym pokoleniu. Dla algorytmu gradientowego przyjęto maksymalną liczbę iteracji równą 1000.

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, 7].

Obliczenie wartości własnych na podstawie przebiegów mocy chwilowej w wielu przypadkach przeprowadzane jest dwuetapowo. W trakcie analizy konkretnego przebiegu, w pierwszym etapie, obliczane są wartości własne o stosunkowo dużych wartościach części rzeczywistych (małych modułach części rzeczywistych), odpowiadające składowym modalnym słabo tłumionym. Pomijane są wówczas wartości własne o mniejszych wartościach części rzeczywistych, odpowiadające składowym modalnym silnie tłumionym. W drugim etapie, na podstawie tego samego przebiegu, obliczane są wartości własne o mniejszych wartościach części rzeczywistych, przy uwzględnieniu znajomości wartości własnych obliczonych w pierwszym etapie. Dodatkowo w pierwszym i drugim etapie obliczeń często przyjmowane są jako znane wartości własne obliczone wcześniej na podstawie innych przebiegów mocy chwilowej [4, 7].

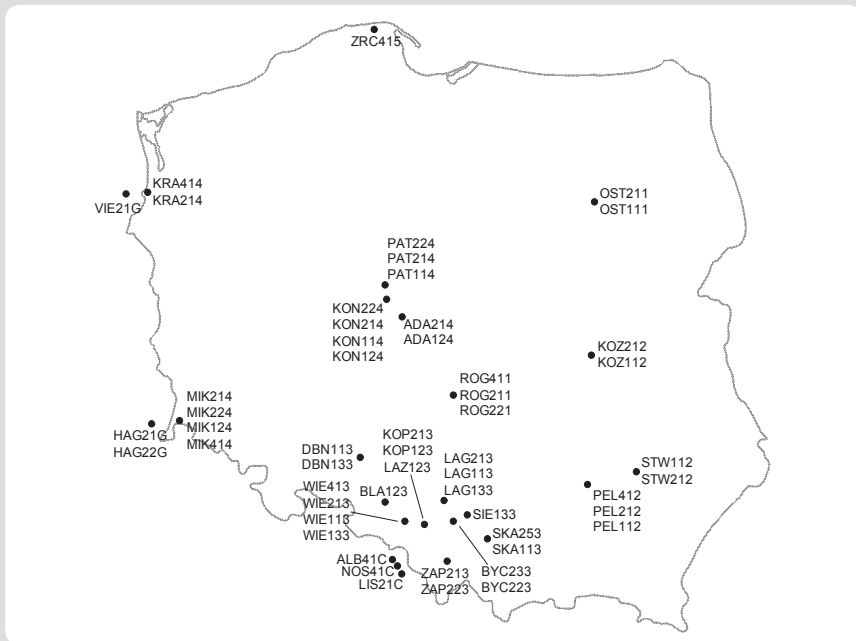
4. Przykładowe obliczenia

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

Opracowany model zespołu wytórczego zawiera bloki typu Configurable Subsystems, które pozwalają na wybór modeli poszczególnych elementów zespołu wytórczego: generatora, układu wzbudzenia, turbiny oraz stabilizatora systemowego. W przeprowadzonych obliczeniach przyjęto następujące modele elementów zespołów wytórczych KSE: model generatora synchronicznego GENROU [5], model statycznego [7] lub elektromaszynowego [5] układu wzbudzenia, model turbiny parowej IEEE1 [5] lub wodnej HYGOV [5] i opcjonalnie model stabilizatora systemowego PSS3B [5]. Dla zastępczych zespołów



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

wytwórczych, które reprezentują oddziaływanie SEE sąsiednich państw, zastosowano uproszczony model generatora synchronicznego. Pominięto w tym przypadku oddziaływanie układu wzbudzenia, turbiny oraz stabilizatora systemowego [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 (9) 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 λ_1 do λ_{56} . W niniejszym podrozdziale przedstawiono porównanie wyników obliczeń wartości własnych w zależności od rodzaju i znaku amplitudy ΔV_{ref} wprowadzonego zakłócenia. W zaprezentowanych przykładowych obliczeniach wzięto pod uwagę przebiegi odchyłek mocy chwilowej w bloku nr 10 w Elektrowni Łaziska (KOP123 na rys. 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 tab. 1 zestawiono błędy bezwzględne $\Delta \lambda_{15}$ obliczeń wartości własnej λ_{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).

Rodzaj zakłócenia	ΔV_{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

Tab. 1. Błędy bezwzględne obliczeń wartości własnej λ_{15} na podstawie symulacyjnych przebiegów mocy chwilowej bloku nr 10 w Elektrowni Łaziska

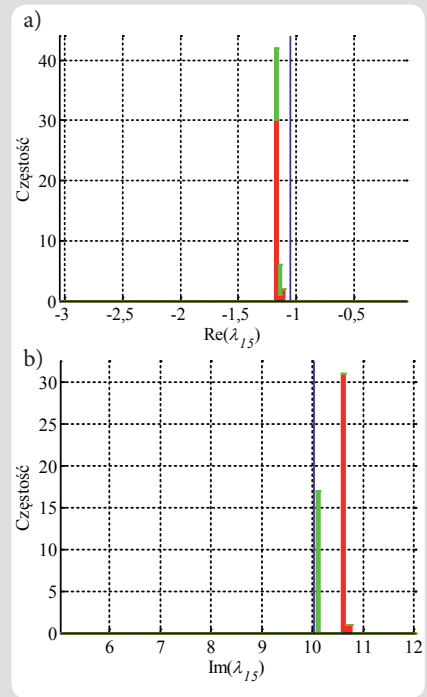
Z tab. 1 wynika, że błąd obliczeń części rzeczywistej wartości własnej λ_{15} jest dużo większy w przypadkach zakłóceń o dodatniej amplitudzie niż w przypadkach zakłóceń o ujemnej amplitudzie. Jest to spowodowane silniejszym wpływem nieliniowości i ograniczeń, występujących w SEE, na przebiegi mocy chwilowej podczas wprowadzania 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.

Na rys. 2 przedstawiono histogramy wyników obliczeń części rzeczywistej i części urojonej wartości własnej λ_{15} , na podstawie analizy symulacyjnego przebiegu kołysań mocy chwilowej bloku nr 10 w przypadku zakłócenia skokowego o amplitudzie $\Delta V_{ref} = 5\% V_{ref0}$. Ze względu na stochastyczny charakter algorytmu genetycznego poszczególne obliczenia rozpoczynano dla różnych punktów startowych, wybieranych za każdym razem losowo z zadanego przedziału poszukiwań [8]. Czerwone słupki oznaczają wyniki uwzględnione w dalszej analizie, a zielone słupki oznaczają wyniki odrzucone. Pionowe cienkie linie, znajdujące się pośrodku histogramów, odpowiadają oryginalnym wartościom własnym. Zakresy części rzeczywistej i części urojonej wartości własnej λ_{15} odpowiadają przyjętym przedziałom ich

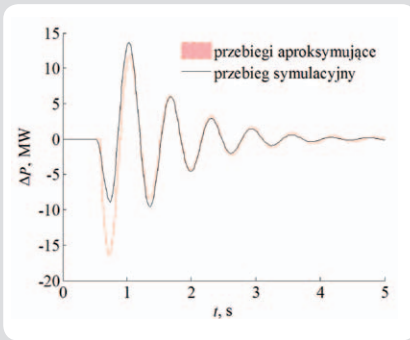
poszukiwań.

Z rys. 2 wynika, że w tym przypadku 17 z 50 wyników obliczeń zostało odrzuconych. W pozostałych przypadkach wprowadzonych zakłóceń żaden z wyników obliczeń nie został odrzucony. Ponadto w każdym z tych przypadków wszystkie uzyskane wyniki obliczeń były praktycznie identyczne. Na rys. 3–6 przedstawiono przebiegi symulacyjne odchyłki mocy chwilowej w analizowanych zakłóceniach oraz pasma przebiegów aproksymujących, odpowiadających nieodrzuconym wynikom obliczeń. Pasma przebiegów aproksymujących określa zakres zmian mocy chwilowej, w którym „znajdują się” wszystkie przebiegi aproksymujące odpowiadające poszczególnym wynikom obliczeń.

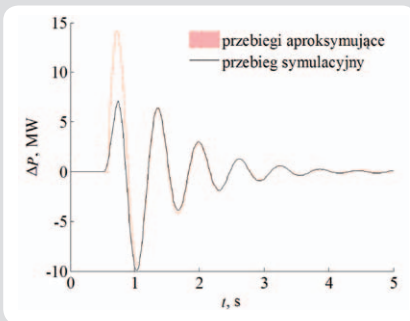
Z rys. 3–6 wynika, że jakość aproksymacji przebiegu odchyłki mocy chwilowej za pomocą algorytmu hybrydowego, w każdym z analizowanych przypadków, jest gorsza w pewnym przedziale czasu po wystąpieniu zakłócenia. W przypadku aproksymujących wartości własnych, wartość mocy chwilowej w stanie ustalonym po zakłóceniu różni się nieznacznie od wartości mocy chwilowej w stanie ustalonym przed zakłóceniem, co wynika ze zmiany punktu pracy zespołu wytwórczego. Prawie we wszystkich przypadkach pasma przebiegów aproksymujących były bardzo wąskie, co wynikało z tego, że w tych przypadkach poszczególne wyniki obliczeń prawie nie różniły się od siebie.



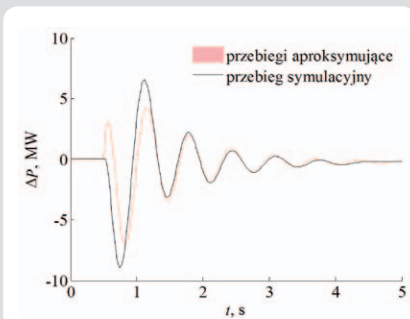
Rys. 2. Histogramy części rzeczywistej (a) i części urojonej (b) wartości własnej λ_{15} w przypadku zakłócenia skokowego o amplitudzie $\Delta V_{ref} = 5\% V_{ref0}$



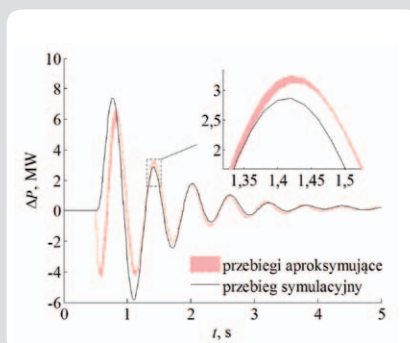
Rys. 3. Przebiegi odchyłki mocy chwilowej w przypadku zakłócenia impulsowego o amplitudzie $\Delta V_{ref} = -5\% V_{ref0}$ i o czasie trwania $t_{imp} = 200$ ms



Rys. 4. Przebiegi odchyłki mocy chwilowej w przypadku zakłócenia impulsowego o amplitudzie $\Delta V_{ref} = 5\% V_{ref0}$ i o czasie trwania $t_{imp} = 200$ ms



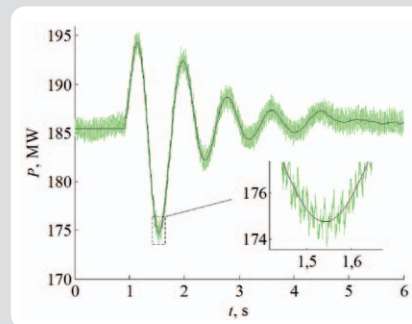
Rys. 5. Przebiegi odchyłki mocy chwilowej w przypadku zakłócenia skokowego o amplitudzie $\Delta V_{ref} = -5\% V_{ref0}$ (a) i $\Delta V_{ref} = 5\% V_{ref0}$ (b)



Rys. 6. Przebiegi odchyłki mocy chwilowej w przypadku zakłócenia skokowego o amplitudzie $\Delta V_{ref} = 5\% V_{ref0}$

4.2. Obliczenia na podstawie pomiarowych przebiegów mocy chwilowej

W niniejszym podrozdziale przedstawiono porównanie wyników obliczeń elektromechanicznych wartości własnych w zależności od znaku amplitudy ΔV_{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. Jedną z przyczyn występowania zakłóceń było silne pole elektromagnetyczne, wytwarzane przez maszyny wirujące i transformatory oraz urządzenia elektryczne (m.in. tory wieloprądowe, dławiki). Inną przyczyną zakłóceń były energoelektroniczne układy przekształtnikowe. Filtrację przebiegów pomiarowych przeprowadzono przy wykorzystaniu cyfrowego filtra Butterwortha trzeciego rzędu o częstotliwości odcięcia 10 Hz [9]. Zastosowano metodę filtracji z zerowym opóźnieniem fazowym. Pozwoliło to na eliminację wprowadzanych przez filtr opóźnień i zmniejszałcen fazowych sygnałów [9]. Prześfiltrowane przebiegi poddano procesowi zmniejszania częstotliwości próbkowania z 2,1 kHz do 100 Hz, co pozwoliło na zmniejszenie liczby próbek sygnału w funkcji celu (9). Przyjęto wartość stałą przebiegu w czasie przed zakłóceniem, równą wartości średniej tego przebiegu w stanie ustalonym przed zakłóceniem. Na rys. 7 przedstawiono porównanie przebiegu mocy chwilowej zarejestrowanego w bloku nr 10 Elektrowni Łaziska, w przypadku zakłócenia skokowego o wartości 5% wartości ustalonej V_{ref0} przed filtracją (jasna linia) i po filtracji (ciemna linia).



Rys. 7. Porównanie przebiegu mocy chwilowej przed filtracją i po filtracji

W przypadku obliczeń elektromechanicznych wartości własnych KSE na podstawie pomiarowych przebiegów mocy chwilowej ocena dokładności tych obliczeń nie była możliwa. Spowodowane to było 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

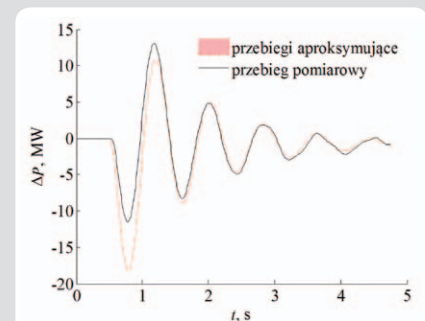
KSE stwierdzono, że w przebiegu mocy chwilowej bloku nr 10 ingeruje w sposób znaczący składowa modalna odpowiadająca wartości własnej λ_{15} . Ta wartość własna, obliczona na podstawie struktury i parametrów modelu KSE, wynosi $\lambda_{15} = -1,0477 \pm j10,0241$ 1/s. Blok nr 9 nie został uwzględniony w modelu KSE. Wartość własną ingerującą w sposób znaczący w przebiegu mocy chwilowej tego bloku oznaczono λ_x (nie jest możliwe obliczenie tej wartości własnej na podstawie struktury i parametrów modelu KSE).

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

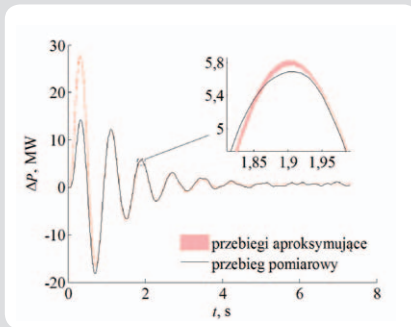
Blok nr	ΔV_{ref}	λ	
	% V_{ref0}		1/s
9 (KOP123)	-5	λ_x	$0,8823 \pm j7,7264$
9 (KOP123)	5	λ_x	$-1,0176 \pm j8,0020$
10 (KOP123)	-5	λ_{15}	$-1,2011 \pm j7,6645$
10 (KOP123)	5	λ_{15}	$-1,0695 \pm j7,7341$

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

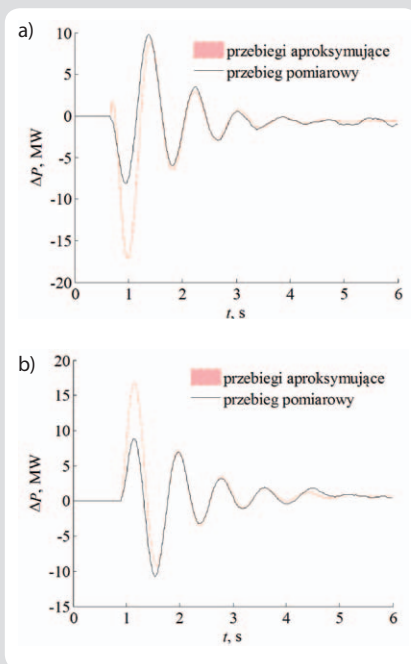
Z tab. 2 wynika, że w przypadku przebiegów mocy chwilowej zarówno bloku nr 9, jak i bloku nr 10 wyniki obliczeń części rzeczywistych wartości własnych różnią się znacznie w zależności od znaku amplitudy wprowadzonego zakłócenia. Różnica wyników obliczeń części urojonych tych wartości własnych, w zależności od znaku amplitudy wprowadzonego zakłócenia, jest stosunkowo niewielka. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można wnioskować, że różnice te mogą być spowodowane silniejszym wpływem nieliniowości i ograniczeń, występujących w SEE, na przebiegi mocy chwilowej w przypadku dodatniej amplitudy wprowadzonego zakłócenia. Na rys. 8-10 przedstawiono przebiegi pomiarowe odchyłki mocy chwilowej, występujące w analizowanych zakłóceniach (tab. 2), oraz pasma przebiegów aproksymujących, odpowiadających poszczególnym wynikom obliczeń.



Rys. 8. Przebiegi odchyłki mocy chwilowej w przypadku zakłócenia skokowego o amplitudzie: $\Delta V_{ref} = -3\% V_{ref0}$ w bloku nr 9 w Elektrowni Łaziska



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



Rys. 10. Przebiegi odchyłki mocy chwilowej w przypadku zakłócenia skokowego o amplitudzie: $\Delta V_{ref} = -3\% V_{ref0}$ (a) i $\Delta V_{ref} = 3\% V_{ref0}$ (b) w bloku nr 10 w Elektrowni Łaziska

Z rys. 8–10 wynika, że jakość aproksymacji przebiegów pomiarowych mocy chwilowej jest zadowalająca w przedziale czasu po przeminięciu szybko zanikających składowych modalnych, które nie wpływają na wyniki obliczeń. Wartość mocy chwilowej w stanie ustalonym po zakłóceniu różni się nieznacznie od wartości mocy chwilowej w stanie ustalonym przed zakłóceniem. W prawie wszystkich analizowanych przypadkach żaden z wyników obliczeń nie został odrzucony i wszystkie uzyskane wyniki obliczeń były praktycznie identyczne. Tylko w przypadku przebiegu mocy chwilowej bloku nr 9, występującego po wprowadzeniu zakłócenia o dodatniej amplitudzie, został odrzucony jeden z wyników obliczeń. Wystąpiły w tym przypadku zauważalne drobne rozstępy pozostałych, nieodrzuconych wyników obliczeń części rzeczywiście

i części urojonej wartości własnej λ_x . Z tego powodu pasmo przebiegów aproksymujących miało w tym przypadku małą, ale zauważalną szerokość (rys. 8). W pozostałych przypadkach pasma przebiegów aproksymujących były bardzo wąskie.

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. Wyniki obliczeń wartości własnych uzyskane na podstawie analizy przebiegów mocy chwilowej wykazują dużą zgodność z wynikami obliczeń tych wartości własnych na podstawie struktury i parametrów modelu SEE w programie Matlab-Simulink. 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 λ_{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.
- Zastosowana metoda pozwoliła na obliczenie wartości własnej ingerującej w przebiegach mocy chwilowej bloku nr 9 w Elektrowni Łaziska pomimo, że blok ten nie został uwzględniony w wykorzystanym modelu KSE. Metoda ta pozwalała na obliczanie wartości własnych i dokonywanie oceny stabilności kątowej SEE.
- Wielokrotne przeprowadzanie obliczeń elektromechanicznych wartości własnych przy użyciu algorytmu hybrydowego na podstawie analizy tego samego przebiegu odchyłki mocy chwilowej, przy różnych punktach startowych, dobieranych za każdym razem losowo z zakresu poszukiwań, eliminuje problem utknięcia algorytmu optymalizacyjnego

wlicznych minimach lokalnych funkcji celu. W przypadku przedstawionych w artykule obliczeń na podstawie symulacyjnych i pomiarowych przebiegów odchyłki mocy chwilowej, takie utknięcia algorytmu zdarzały się bardzo rzadko.

- Zastosowana dla przebiegów pomiarowych mocy chwilowej metoda filtracji z zerowym opóźnieniem fazowym przy wykorzystaniu cyfrowego filtra Butterwortha pozwoliła na wytlumienie w zadowalającym stopniu składowych zakłóceń, występujących w tych przebiegach, bez wprowadzania do nich opóźnień ani znaczących zniekształceń.
- Dokładność aproksymacji symulacyjnych oraz pomiarowych przebiegów odchyłki mocy chwilowej za pomocą algorytmu hybrydowego była porównywalna we wszystkich analizowanych przypadkach.

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. Saitoh H. i in., On-line modal analysis based on synchronized measurement technology, Power System Technology 2002, Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on, Vol. 2, s. 817–822.
3. Kudła J., Paszek S., Redukcja postaci transmitancji w systemach elektroenergetycznych, XVIII Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, SPETO '95, tom 2, 1995, s. 299–304.
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.
5. Paszek S., Wybrane metody oceny i poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego, Gliwice 2012.
6. 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.
7. Paszek S., Pruski P., Ocena stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego na podstawie analizy wybranych stanów zakłóceń, Acta Energetica 2011, nr 2, s. 44–53.
8. Nocoń A., Paszek S., Polioptymalizacja regulatorów napięcia zespołów prądotwórczych z generatorami synchronicznymi, monografia, Gliwice 2008.
9. Oppenheim A.V., Schaffer R.W., Discrete-time signal processing, 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River 1999.

Piotr Pruski

mgr inż.

Politechnika Śląska

e-mail: piotr.pruski@polsl.pl

Doktorant na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Obszarem jego zainteresowań badawczych są zagadnienia związane z analizą pracy systemu elektroenergetycznego. Autor i współautor 37 artykułów i referatów, opublikowanych w kraju i za granicą, dotyczących oceny stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego oraz estymacji parametrów modeli matematycznych elementów zespołów wytwórczych systemu elektroenergetycznego. W 2011 roku otrzymał zespołową nagrodę rektora II stopnia za osiągnięcia naukowe.

Stefan Paszek

prof. dr hab. inż.

Politechnika Śląska

e-mail: stefan.paszek@polsl.pl

Autor i współautor 160 publikacji, w tym czterech monografii. Współautor trzech podręczników akademickich. Zainteresowania naukowe: analiza systemu elektroenergetycznego (SEE) w stanach niustalonych, stabilność kątowa SEE, optymalizacja i polioptymalizacja stabilizatorów systemowych oraz regulatorów napięcia generatorów synchronicznych, estymacja parametrów modeli zespołów wytwórczych SEE, nowe modele generatorów synchronicznych przy zastosowaniu techniki sztucznych sieci neuronowej, zastosowanie regulatorów rozmytych w układach regulacji maszyn elektrycznych.