

WPLYW NIEPEWNOŚCI SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO NA POLIOPTYMALNE PARAMETRY STABILIZATORÓW SYSTEMOWYCH

Adrian NOCON¹, Stefan PASZEK²

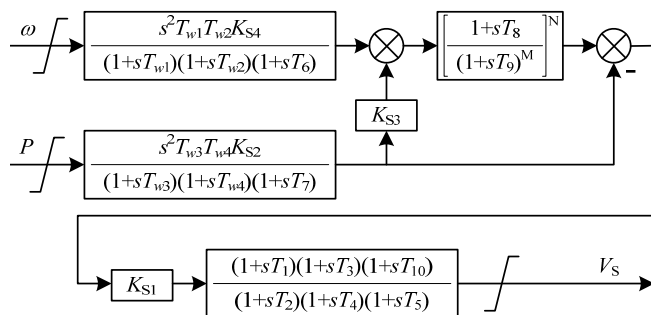
1. Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki
tel.: 32 237 1746; e-mail: adrian.nocon@polsl.pl
2. Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki
tel.: 32 237 1229; e-mail: stefan.paszek@polsl.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę wpływu niepewności parametrów modelu matematycznego systemu elektroenergetycznego na polioptymalne parametry stabilizatorów systemowych typu PSS2A. Kryteria optymalizacyjne określono dla zakłóceń występujących w siedmiomaszynowym systemie elektroenergetycznym, biorąc pod uwagę przebiegi przejściowe mocy chwilowych, prędkości kątowych (przebiegi związane z kołysaniami elektromechanicznymi) oraz napięcia zaciskowego generatorów. Do optymalizacji wielokryterialnej wykorzystano zmodyfikowany algorytm genetyczny. Ocenę wpływu niepewności na jakość pracy stabilizatorów systemowych o zoptymalizowanych parametrach przeprowadzono z wykorzystaniem statystycznych wskaźników deformacji.

Słowa kluczowe: System elektroenergetyczny, stabilizatory systemowe, polioptymalizacja, niepewność parametrów.

1. WSTĘP

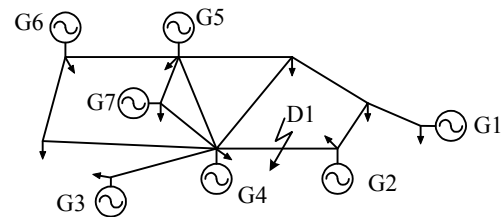
Stabilizatory systemowe mają za zadanie wytlumienie kołysań elektromechanicznych [1–3]. Stabilizatory oddziałują tłumiąco na kołysania poprzez odpowiednie sterowanie napięciem wzbudzenia i pośrednio momentem elektromagnetycznym generatora synchronicznego [1, 3]. W artykule analizowano dwuwęściowe stabilizatory systemowe PSS2A, rekomendowany przez komitet IEEE. Strukturę i właściwości tych stabilizatorów szerzej omówiono w pracy [3], a schemat strukturalny stabilizatora przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat strukturalny dwuwęściowego stabilizatora systemowego PSS2A

Badania przeprowadzono dla 7-maszynowego systemu elektroenergetycznego CIGRE przedstawionego na rysunku 2. Przyjęto, że w analizowanym SEE wszystkie układy wzbudzenia generatorów synchronicznych (pracujących blisko stanu znamionowego) są układami statycznymi ste-

rowanymi za pośrednictwem szybkich regulatorów napięcia o dużym wzmacnieniu. Taka struktura układów wzbudzenia, przy przyjętych parametrach modeli matematycznych powoduje m.in. niestabilność kątową systemu. W związku z tym założono, że w każdym zespole wytwórczym zainstalowany jest stabilizator systemowy.



Rys. 2. Schemat 7-maszynowego SEE CIGRE

Dla uproszczenia analizy optymalizacji wielokryterialnej [2–4] poddano jedynie wzmacnienia K_{S1} wszystkich stabilizatorów. Pozostałe parametry przyjęto arbitralnie na podstawie wyników badań zawartych w pracach [2, 3]. Do polioptymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny z kodowaniem zmiennoprzecinkowym, selekcją turniejową, zmodyfikowanym krzyżowaniem prostym i mutacją nierównomierną [3, 4]. Ponadto przeprowadzono analizę wpływu niepewności parametrów modelu matematycznego systemu na jakość pracy stabilizatorów. Ocenę wpływu niepewności badano dla wybranych parametrów modeli matematycznych dla wszystkich rozwiązań optymalnych, wykorzystując wskaźniki deformacji zbioru kompromisów [4].

2. MODEL MATEMATYCZNY

Model matematyczny analizowanego SEE (rys. 2) opracowano w środowisku Matlab. W obliczeniach założono, że we wszystkich węzłach wytwórczych generatory synchroniczne są odwzorowane za pomocą nieliniowego modelu GENROU (z uwzględnieniem nasycenia obwodu magnetycznego) [3]. Założono, że układy wzbudzenia są reprezentowane przez nieliniowy model polskiego, krajowego statycznego układu wzbudzenia [3]. Założono ponadto, że turbiny są reprezentowane przez model IEEE1 turbiny parowej [3]. Powiązanie równań stanu poszczególnych zespołów wytwórczych i równań napięciowo-prądowych sieci elektroenergetycznej otrzymano stosując sieciowe wielkości względne dla równań stanu generatorów oraz poprzez transformację prądów i napięć stojana generatorów do wspólnego

układu współrzędnych wirującego z prędkością kątową, równą średniej elektrycznej prędkości kątowej wszystkich maszyn synchronicznych, w warunkach stanu ustalonego. Wielkości względne sieciowe są określone przy przyjęciu wspólnej mocy odniesienia (mocy bazowej) [3].

3. POLIOPTYMALIZACJA STABILIZATORÓW

Ze względu na złożoność zjawisk występujących w SEE, proces optymalizacji parametrów stabilizatorów systemowych powinien uwzględniać wiele, czasem sprzecznych kryteriów, związanych z tłumieniem kołysań elektromechanicznych oraz z ograniczeniem zmian napięcia w poszczególnych zespołach wytwórczych, w czasie różnych zakłóceń stanu ustalonego [2, 3]. Rozwiązaniem tak postawionego problemu może być zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej [3, 4]. W polioptymalizacji występuje kryterium wektorowe (zamiast jednej funkcji celu), w którym można uwzględnić nie tylko różne wielkości kryterialne dla jednego wybranego stanu przejściowego (np. odchyłki mocy czy napięcia zaciskowego generatorów), ale również dodatkowe wielkości kryterialne dla różnych stanów przejściowych (np. przebiegi napięcia zaciskowego dla różnych miejsc zwarcia). Jednakże rozbudowywanie kryterium wektorowego zwiększa jego wymiar, a wynik staje się mniej czytelny. W związku z tym w niniejszym artykule ograniczono wymiar optymalizowanego wektora do 3 i analizowano stan przejściowy związany z jednym symetrycznym, przemijającym zwarcie o czasie trwania równym 0,25 s, występującym w punkcie D1 (rys. 2), przyjmując wektorowe kryterium optymalizacji w następującej postaci:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_\omega \\ Q_V \\ Q_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \sum_j \frac{n_i S_{Ni}}{S_{\max}} |\Delta \omega_{ij}| \\ \sum_{i=1}^n \sum_j \frac{n_i S_{Ni}}{S_{\max}} |\Delta V_{Tij}| \\ \sum_{i=1}^n \sum_j \frac{n_i S_{Ni}}{S_{\max}} |\Delta P_{ij}| \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie: $\Delta \omega_{ij}$, ΔV_{Tij} , ΔP_{ij} – odchyłki prędkości kątowej, napięcia generatora oraz mocy czynnej (chwilowej) dla i -tego zespołu wytwórczego przy zwarcie D1 (rys. 2) w j -tych chwilach czasowych,

n_i – liczba generatorów pracujących w i -tym zespole wytwórczym,

S_{Ni} – znamionowa moc pozorna pojedynczego generatora synchronicznego, pracującego w i -tym zespole wytwórczym,

S_{\max} – znamionowa moc pozorna zespołu wytwórczego, który generuje największą moc pozorną w SEE,

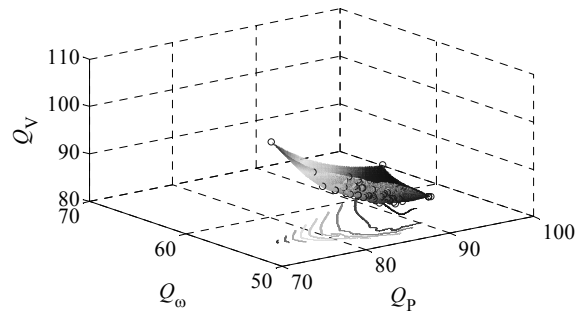
n – liczba zespołów wytwórczych w SEE ($n = 7$).

Do optymalizacji funkcji celu (1) wykorzystano zmodyfikowany na potrzeby badań algorytm genetyczny z kodowaniem zmiennoprzecinkowym, wielokryterialną selekcją turniejową, zmodyfikowanym krzyżowaniem prostym i mutacją nierównomierną [2].

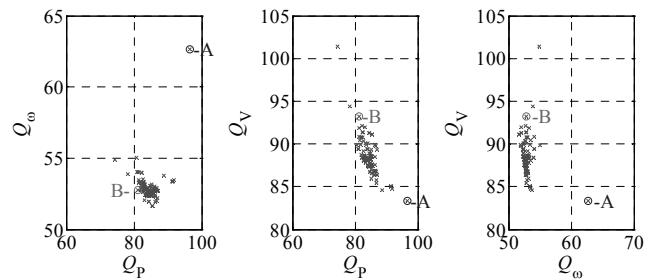
W optymalizacji przyjęto trzy składniki wektorowego wskaźnika jakości, w związku z tym wyniki optymalizacji przedstawiono w postaci wykresu 3D (rys. 3) oraz w postaci rzutów punktów uzyskanego zbioru kompromisów na układy współrzędnych odpowiadające poszczególnym parom kryteriów (rys. 4).

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi mocy chwilowej, odchyłki prędkości kątowej i napięcia zaciskowego w zespole G6 (rys. 1), przy zwarcie w punkcie D1. Przebiegi

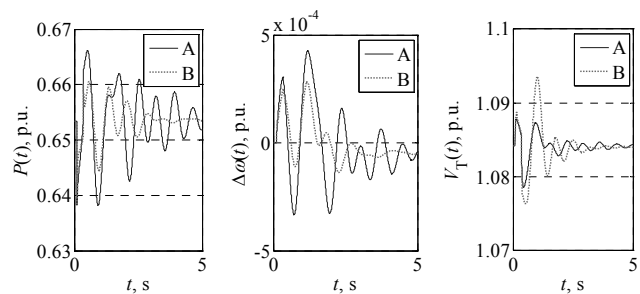
te odnoszą się do wybranych punktów zbioru kompromisów, tj. punktów A i B zaznaczonych na rysunku 4.



Rys. 3. Trójwymiarowy zbiór kompromisów



Rys. 4. Rzuty punktów zbioru kompromisów na płaszczyzny poszczególnych kryteriów



Rys. 5. Przebiegi mocy chwilowej, odchyłki prędkości kątowej I napięcia zaciskowego zespołu wytwórczego G6 dla punktu A (linia ciągła) i punktu B (linia przerywana) zbioru kompromisów

4. ANALIZA NIEPEWNOŚCI PARAMETRÓW

System elektroenergetyczny jest obiektem dynamicznym i niestacjonarnym, przy czym zmiany parametrów często mają charakter stochastyczny. W związku z tym analiza pracy SEE wiąże się z koniecznością uwzględnienia różnych źródeł niepewności występujących w systemie [5]. Jednym z takich źródeł jest brak wiarygodnych parametrów modeli matematycznych elementów systemu. W trakcie badań symulacyjnych SEE, także przy polioptymalizacji, ważne jest określenie, w jaki sposób niepewność ta wpływa na stabilizatory systemowe o zoptymalizowanych parametrach, a ściślej na przyjęte kryterium jakości [3, 5].

W ogólnym przypadku, każda zmiana parametrów modelu matematycznego powoduje zmianę wartości przyjętego kryterium (zwiększa lub zmniejsza jego wartość). Na potrzeby dalszej analizy wprowadzono pojęcie deformacji zbioru kompromisów pod wpływem występującej niepewności [4]. Deformacja zbioru kompromisów jest miarą wpływu zmian parametrów modelu (niepewności parametrów) na przyjęte kryterium jakości. W celu wyznaczenia deformacji zbioru kompromisów przeprowadzono wielokrotne symulacje badanego SEE przy niezmiennych paramet-

trach stabilizatorów systemowych i zmieniających się innych parametrach systemu. Dla uproszczenia analizy przyjęto, że zmianom (niepewności) podlegają jedynie stałe czasowe modeli generatorów (wyboru parametrów dokonano na podstawie analizy wrażliwości zawartej w pracy [4]) na poziomie $\pm 25\%$ w stosunku do wartości, dla której przeprowadzono optymalizację. Przy czym przyjęto nieskorelowany rozkład prawdopodobieństwa zmian parametrów.

Do ilościowej oceny deformacji zbioru kompromisów pod wpływem niepewności parametrów przyjęto cztery wskaźniki dla każdego i -tego punktu zbioru kompromisów. Wskaźniki (2) do (5) są wskaźnikami statystycznymi opisującymi zmianę pojedynczego kryterium, przy czym wskaźniki (2) i (3) są miarą dysypacji a (4) i (5) są miarą tendencji centralnej. Wszystkie analizowane wskaźniki poprzez znak uwzględniają czy deformacja jest poprawą czy pogorszeniem jakości stabilizacji przy czy wartość ujemna to poprawa jakości przy danej zmianie parametrów.

$$D_{1i} = \begin{bmatrix} D_{1(p)i} \\ D_{1(\omega)i} \\ D_{1(v)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11i} \\ D_{12i} \\ D_{13i} \end{bmatrix}, \quad D_{1ki} = \text{std}(\Delta Q_i) \quad (2)$$

$$D_{2i} = \begin{bmatrix} D_{2(p)i} \\ D_{2(\omega)i} \\ D_{2(v)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{21i} \\ D_{22i} \\ D_{23i} \end{bmatrix}, \quad D_{2ki} = \text{iqr}(\Delta Q_i) \quad (3)$$

$$D_{3i} = \begin{bmatrix} D_{3(p)i} \\ D_{3(\omega)i} \\ D_{3(v)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{31i} \\ D_{32i} \\ D_{33i} \end{bmatrix}, \quad D_{3ki} = \text{mean}(\Delta Q_i) \quad (4)$$

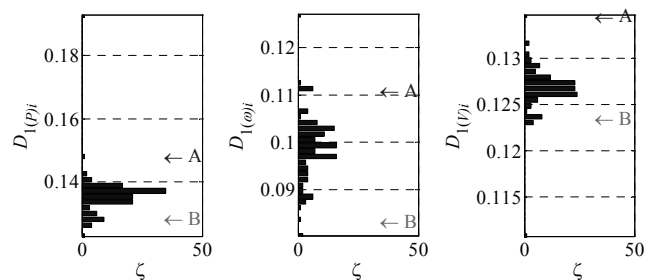
$$D_{4i} = \begin{bmatrix} D_{4(p)i} \\ D_{4(\omega)i} \\ D_{4(v)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{41i} \\ D_{42i} \\ D_{43i} \end{bmatrix}, \quad D_{4ki} = \text{median}(\Delta Q_i) \quad (5)$$

przy czym:

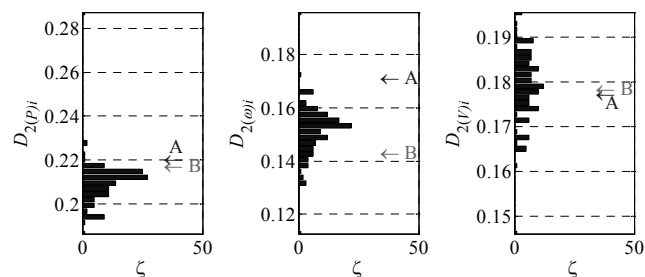
$$\Delta Q_i = \frac{Q_{Dk}^{(j)} - Q_{ZKk}^{(i)}}{Q_{ZKk}^{(i)}} \quad (6)$$

gdzie: std – odchylenie standardowe,
iqr – odchylenie ćwiartkowe, mean – średnia arytmetyczna, median – wartość mediany,
 $Q_{ZKk}^{(i)}$ – wartość k -tego kryterium ($k=1 \dots 3$) dla i -tego punktu zbioru kompromisów,
 $Q_{Dk}^{(j)}$ – wartość k -tego kryterium dla j -tego punktu deformacji ($j=1 \dots m$),
 m – ilość punktów deformacji (ilość losowanych zmian parametrów modeli generatorów, $m=125$).

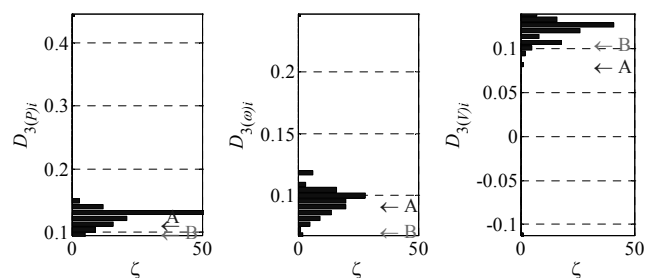
Ze względu na statystyczny charakter deformacji można było przedstawić wartości poszczególnych wskaźników (2–5) w postaci histogramów zależnych od częstość ζ występowania danej wartości wskaźnika w próbie statystycznej o liczebności 125 (rysunki od 6 do 9). Na histogramach zaznaczono również wartości, które przyjmują poszczególne wskaźniki dla wybranych punktów A i B zbioru kompromisów.



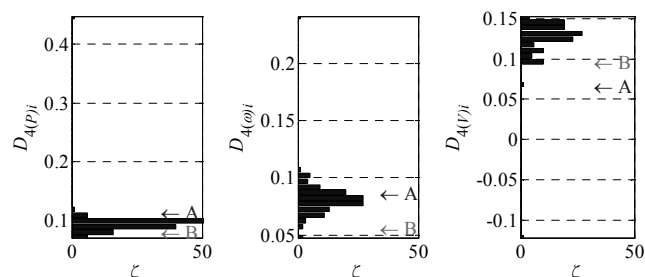
Rys. 6. Histogramy wartości wskaźnika (1)



Rys. 7. Histogramy wartości wskaźnika (2)



Rys. 8. Histogramy wartości wskaźnika (3)



Rys. 9. Histogramy wartości wskaźnika (4)

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych analiz można wyciągnąć następujące wnioski ogólne:

- Poprzez polioptymalizację parametrów stabilizatorów PSS2A można dobrze tłumić kołysania elektromechaniczne, bez znacznego pogorszenia przebiegów napięcia zaciskowego generatorów.
- Kryteria związane z kołysaniami elektromechanicznymi poszczególnych generatorów, mają podobne właściwości. W układzie, w którym występuje duże tłumienie mocy chwilowej również prędkość kątowna generatorów jest dobrze tłumiona (wartości kryteriów dla punktów A i B na rys. 4 oraz przebiegi na rys. 5).
- Kryteria związane z odchyłkami napięcia zaciskowego generatorów są zwykle sprzeczne z kryteriami związanymi z kołysaniami elektromechanicznymi. W przypadku, gdy dobrze tłumione są kołysania elektromechaniczne

ne, to zwykle występują znaczne odchyłki napięcia zaciłskowego generatorów i odwrotnie (rys. 4 i 5, dla punktów A i B).

- Mimo sprzeczności poszczególnych kryteriów, w zbiorach kompromisów można znaleźć przedziały, dla których występują duże zmiany wartości kryteriów Q_p i Q_{ω} , przy tylko niewielkich zmianach kryterium Q_v . Czyli można znaleźć takie wartości parametrów PSS, przy których znacznie zwiększane jest tłumienie kołysań elektromechanicznych, przy tylko niewielkim pogorszeniu przebiegów regulacyjnych napięć generatorów.
- Istnieje możliwość doboru parametrów stabilizatorów systemowych w taki sposób, aby zmniejszyć jego podatność na zmiany parametrów SEE. W tym celu należy wziąć pod uwagę takie wartości parametrów stabilizatorów, którym odpowiadają najmniejsze wartości wskaźników deformacji.
- W analizowanym przypadku wartości wskaźniki prawie zawsze przyjmują wartości dodatnie dla wszystkich punktów zbioru kompromisów. Wyjątkiem są pojedyncze rozwiązania optymalne, dla których wskaźniki $D_{3(v)}$, $D_{4(v)}$ przyjmują wartości ujemne (rys. 8 i 9). Wynika to z faktu, że parametry stabilizatorów w każdym z punktów zbioru kompromisów są optymalne i jakkolwiek zmiana parametrów SEE powoduje pogorszenie wskaźników jakości co wyraża się w dodatniej wartości wskaźnika deformacji.
- Przedstawione wskaźniki deformacji różnicującą w różny sposób rozwiązania optymalne, co wynika z odmiennego opisu statystycznych zmian deformacji. Natomiast wszystkie wskaźniki przydatne są do oceny wpływu niepewności mającej swe źródło w zjawiskach stochastycznych (np. niepewności parametrów modelu matematycznego, stanu obciążenia SEE, idp. [5]).

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki analizy wpływu niepewności parametrów modelu matematycznego SEE na rozwiązania optymalne mogą stać się podstawą do opracowania metody doboru parametrów stabilizatorów systemowych (klasycznych takich jak PSS2A i stabilizatorów odpornych [6]) zwiększających skuteczność działania stabilizatorów w układzie rzeczywistym. Wymaga to jednak dalszych badań odnoszących się m.in. do wyboru odpowiednich zakłóceń (np. takich, które szczególnie mogą zagrozić stabilności systemu) i uwzględnieniu ich w wektorowej funkcji celu, opracowania metod analizy rozwiązań optymalnych o rozmiarze większym niż 3 oraz wyboru najbardziej miarodajnego (różnicującego rozwiązania) wskaźnika deformacji.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Machowski J., Bialek J., Bumby D. J.: Power System Dynamics: Stability and Control, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2009.
2. Paszek S., Nocoń A.: Parameter polyoptimization of PSS2A power system stabilizers operating in a multi-machine power system including the uncertainty of model parameters, Applied Mathematics and Computation, 2014, DOI: 10.1016/j.amc.2014.12.013.
3. Paszek S., Nocoń A.: Optimisation and Polyoptimisation of Power System Stabilizer Parameters. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany 2014.
4. Nocoń A., Paszek S.: Polioptymalizacja regulatorów napięcia zespołów prądowców z generatorami synchronicznymi. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2008.
5. Robak S.: Źródła niepewności w analizie systemów elektroenergetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, 84(1), 2008, s. 54–57.
6. Robak S.: Dobór struktury, typu oraz parametrów odpornego stabilizatora systemowego urządzenia FACTS, Przegląd Elektrotechniczny, 85(8), 2009, s. 76–79.

THE IMPACT OF THE POWER SYSTEM UNCERTAINTY ON POLYOPTIMAL PARAMETERS OF POWER SYSTEM STABILIZERS

In the paper there is presented the analysis of the impact of different uncertainty sources of a power system on polyoptimal parameters of PSS2A power system stabilizers. For parameter optimization of power system stabilizers there was used polyoptimization (multi-criteria optimization). The optimization criteria were determined for disturbances occurring in a multi-machine power system. There were taken into account the transient waveforms associated with electromechanical swings (the instantaneous power and angular speed) as well as the waveforms of the terminal voltage of generators. A genetic algorithm with floating point encoding, tournament selection, averaging crossover and non-uniform mutation, modified for research, was used for the optimization. Assessment of the impact of the uncertainty on the quality of operation of the power system stabilizers with optimized parameters was made with the use of deformation factors.

Keywords: Power system, power system stabilizers, polyoptimization, uncertainty parameters