

# Poliptymalizacja parametrów stabilizatorów systemowych pracujących w rozbudowanym systemie elektroenergetycznym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zastosowanie polioptymalizacji parametrów stabilizatorów systemowych PSS3B do tłumienia kołysań elektromechanicznych w rozbudowanym systemie elektroenergetycznym (SEE). Obliczenia parametrów tych stabilizatorów podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie przeanalizowano układy jednomaszynowe typu zespół wytwórczy – sieć sztywna, odnoszące się do tych zespołów wytwórczych, które są krytyczne dla stabilności kątowej analizowanego SEE. W pierwszym etapie obliczono stałe czasowe i wstępne wartości współczynników wzmocnienia stabilizatorów. W drugim, głównym etapie obliczono ostateczne wartości współczynników wzmocnienia stabilizatorów PSS3B (od których w największym stopniu zależy ich efektywność działania) poprzez zastosowanie polioptymalizacji, związanej z wektorową funkcją celu określoną dla rozbudowanego SEE. Przykładowe obliczenia wykonano dla modelu Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, w którym uwzględniono 57 wybranych zespołów wytwórczych pracujących w sieciach wysokich i najwyższych napięć (220 i 400 kV).

**Abstract.** In the paper, the application of polyoptimization of the parameters of PSS3B system stabilizers to damping electromechanical swings in an extended power system (PS) is presented. The calculations of the power system stabilizer (PSS) parameters were divided into two stages. In the first stage, single-machine systems, generating unit – infinite bus, of generating units critical for the angular stability of the PS were analyzed. Time constants and preliminary values of the PSS gains were calculated. In the second stage, the main one, the main gains on which the effectiveness of operation of PSSs depends the most were calculated by polyoptimization of the extended PS. Sample calculations were made for the model of the National (Polish) Power System taking into account 57 selected generating units operating in high and extra high voltage networks (220 and 400 kV) (**Polyoptimization of the parameters of power system stabilizers operating in an extended power system**).

**Słowa kluczowe:** polioptymalizacja, stabilizatory systemowe, system elektroenergetyczny, kołysania elektromechaniczne, stabilność kątowa.

**Keywords:** polyoptimization, power system stabilizers, power system, electromechanical swings, angular stability.

## Wstęp

System elektroenergetyczny (SEE) jest wielkim nieliniowym układem dynamicznym służącym do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. W rozbudowanym SEE zakłócenia pracy poszczególnych zespołów wytwórczych mogą niekorzystnie wpływać na pracę innych zespołów. Między innymi mogą pojawiać się kołysania elektromechaniczne, czyli wolnozmiennie kołysania wirników generatorów synchronicznych, które można zaobserwować również w przebiegach mocy chwilowej w generatorach i w liniach przesyłowych [1-4]. Kołysania te w niekorzystnych przypadkach mogą spowodować utratę stabilności kątowej zespołów wytwórczych, a w konsekwencji ich awaryjne wyłączenie.

W niektórych zespołach wytwórczych kołysania elektromechaniczne mogą być słabo tłumione, a nawet narastać, co może prowadzić do utraty stabilności kątowej całego SEE. W związku z powyższym konieczna jest lokalizacja zespołów wytwórczych, które są najbardziej zagrożone (krytyczne), z punktu widzenia ewentualnej utraty stabilności kątowej SEE [5]. Zespoły te mają zarazem największy wpływ na stabilność kątową SEE. W tych zespołach trzeba szczególnie zadbać o prawidłowe działanie różnych środków poprawy stabilności kątowej.

Jednym ze sposobów tłumienia kołysań elektromechanicznych, a więc również poprawy stabilności kątowej systemu, jest zastosowanie odpowiednio dobranych stabilizatorów systemowych (po angielsku: Power System Stabilizers - w skrócie PSSs). Stabilizatory systemowe wchodzące w skład układów wzbudzenia mają za zadanie wytłumienie kołysań elektromechanicznych poprzez wytworzenie dodatkowej składowej momentu elektromagnetycznego generatorów synchronicznych, działającej tłumiąco [6, 7]. Zastosowanie stabilizatorów systemowych może jednak pogarszać inne przebiegi, przede wszystkim napięć w poszczególnych węzłach SEE [3, 7].

Problem zastosowania odpowiednio dobranych stabilizatorów systemowych do rozbudowanego SEE można sprowadzić do zagadnienia minimalizacji pewnej funkcji celu, opisującej zachowanie systemu w wybranych stanach

nieustalonych, z uwzględnieniem korzystnych i niekorzystnych skutków działania tych stabilizatorów. Analiza takiego zagadnienia wymaga jednoczesnego uwzględnienia wielu, często sprzecznych kryteriów, związanych z pracą SEE.

Problem ten można rozwiązać wykorzystując optymalizację wielokryterialną (polioptymalizację, optymalizację w sensie Pareto) [3, 7, 8], w której jednocześnie minimalizuje się kilka kryteriów, które można przedstawić w postaci wektora, stanowiącego funkcję celu. Do numerycznego rozwiązania zadania optymalizacji wielokryterialnej można wykorzystać wiele metod, w tym algorytmy genetyczne [9-11]. Zastosowanie algorytmu genetycznego do optymalizacji wielokryterialnej nie wymaga znacznych jego modyfikacji, w porównaniu do algorytmu stosowanego w zagadnieniach jednokryterialnych.

## Zastosowanie algorytmu genetycznego do optymalizacji wielokryterialnej

Przyjmując, że minimalizacji podlega funkcja celu, w której uwzględniane jest  $nq$  składników (pojedynczych kryteriów), z których każdy jest funkcją  $n$  zmiennych (w rozpatrywanym przypadku parametrów stabilizatorów systemowych pracujących w SEE), to w ogólnym przypadku, funkcja przystosowania algorytmu genetycznego (równa wektorowej funkcji celu) przyjmuje ogólną postać:

$$(1) \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ f_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ f_i(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ f_{nq}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_{nq}(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \end{bmatrix},$$

gdzie:  $\mathbf{f}$  – funkcja celu,  $f_i$  – wartość  $i$ -tej funkcji składowej,  $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_j, \dots, x_n\} \in \mathbf{X}$  – wektor zmiennych sterujących (zestaw parametrów stabilizatorów),  $\mathbf{X}$  – przestrzeń

sterowań (dziedzina funkcji celu, wyznaczona poprzez dopuszczalne wartości parametrów stabilizatorów).

Rozwiązaniem tak zdefiniowanego problemu minimalizacji nie jest jeden optymalny zestaw zmiennych niezależnych (parametrów stabilizatorów), lecz zbiór zestawów  $\tilde{x} = \{\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_j, \dots, \tilde{x}_n\} \in X$ , w którym każdy z elementów jest optymalny w sensie optymalizacji wielokryterialnej. Zbiór wartości funkcji celu odpowiadający parametrom optymalnym  $\tilde{x}$  nazywany jest zbiorem kompromisów. Do zbioru kompromisów  $A$  należą wszystkie takie punkty przestrzeni celu  $\{\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \dots, \tilde{f}_{nq}\} \in F$ , gdzie:  $F$  – przestrzeń celu, czyli obszar możliwych wartości wektorowej funkcji celu (przestosowania)  $f$ , a symbol  $\sim$  oznacza wartość optymalną w sensie optymalizacji wielokryterialnej, dla których nie istnieje kierunek jednoczesnej poprawy. Przy czym kierunkiem jednoczesnej poprawy jest taka zmiana optymalizowanych zmiennych  $x$ , która powoduje poprawę jednocześnie wszystkich składowych funkcji celu  $f_i$ . Powyższą definicję przy minimalizacji funkcji celu można zapisać następująco:

$$(2) \quad \begin{bmatrix} \tilde{f}_1(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_j, \dots, \tilde{x}_n) \\ \tilde{f}_2(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_j, \dots, \tilde{x}_n) \\ \vdots \\ \tilde{f}_i(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_j, \dots, \tilde{x}_n) \\ \vdots \\ \tilde{f}_{nq}(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_j, \dots, \tilde{x}_n) \end{bmatrix} = \tilde{f} \in A \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \neg \exists x \in X \wedge x \neq \tilde{x} \begin{cases} \tilde{f}_1(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_j, \dots, \tilde{x}_n) \geq f_1(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \\ \tilde{f}_2(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_j, \dots, \tilde{x}_n) \geq f_2(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \\ \vdots \\ \tilde{f}_i(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_j, \dots, \tilde{x}_n) \geq f_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \\ \vdots \\ \tilde{f}_{nq}(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_j, \dots, \tilde{x}_n) \geq f_{nq}(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \end{cases}$$

gdzie: symbol  $\neg \exists$  oznacza: nie istnieje,  $A$  – zbiór kompromisów,  $\tilde{f}_i$  – wartość  $i$ -tej funkcji składowej, należącej do zbioru kompromisów.

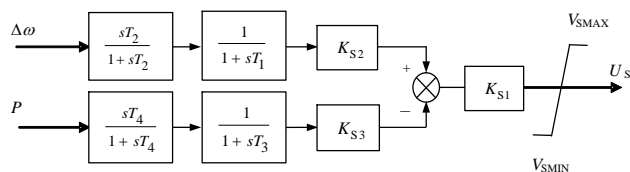
Zastosowany do minimalizacji algorytm genetyczny dostosowano do zdefiniowanego problemu wielokryterialnego. W algorytmie zastosowano kodowanie liczbami rzeczywistymi. W procesie inicjalizacji generowano losową populację początkową o  $\alpha$  osobnikach. Do selekcji zastosowano zmodyfikowaną metodę turniejową [12], w której następowało  $\alpha$ -krotne losowanie z całej populacji grupy turniejowej i wybór z niej osobnika najlepiej przystosowanego, przechodzącego do nowej populacji. Wybór najlepszego osobnika w każdej wylosowanej grupie turniejowej następował sekwencyjnie dla poszczególnych optymalizowanych funkcji  $f_i$ . W związku z tym, każda funkcja składowa  $f_i$  była kryterium  $\alpha/nq$  turniejów. Tak przyjęta metoda selekcji wymagała aby liczebność populacji  $\alpha$ , była całkowitą wielokrotnością liczby optymalizowanych kryteriów  $nq$ . Do krzyżowania zastosowano metodę arytmetyczną [13].

Wyprowadzenie wyniku działania algorytmu genetycznego, z uwagi na wielokryterialność problemu optymalizacyjnego, jest procesem złożonym. W rozważanym przypadku nie istnieje jedno rozwiązanie optymalne, konieczne jest więc sprawdzenie warunku optymalności dla każdego

osobnika ze wszystkich pokoleń. W etapie pierwszym algorytm genetyczny w przestrzeni celu poszukuje rozwiązań „podejrzanych” o przynależność do zbioru kompromisów. Następnie w etapie drugim, dla każdego osobnika sprawdzany jest warunek (2) i wyznaczany jest zbiór kompromisów  $A$ .

### Stabilizatory systemowe PSS3B

W SEE szeroko stosowane są dwuwęściowe stabilizatory systemowe PSS3B [4, 7, 14], które mają dwa sygnały wejściowe, proporcjonalne do mocy chwilowej (czynnej) i do odchyłki prędkości kątowej generatora oraz prostą strukturę, przedstawioną na rys. 1. W każdym torze regulacji występuje kolejno: człon różniczkujący służący do eliminacji składowej stałej, człon korekcyjny i współczynnik wzmocnienia. Ograniczenie sygnału wyjściowego stabilizatora stosuje się w celu wyeliminowania znacznego wpływu stabilizatora na tor regulacji napięcia.



Rys. 1. Schemat strukturalny dwuwęściowego stabilizatora systemowego PSS3B,  $\omega$ ,  $P$ ,  $U_s$  – prędkość kątowa, moc chwilowa (czynna) generatora, sygnał wyjściowy stabilizatora

Przy badaniach optymalizacyjnych stabilizatorów systemowych o jednym sygnale wejściowym oraz dwuwęściowych stabilizatorów PSS2A stałe czasowe ich członów korekcyjnych dobiera się w ten sposób, aby składowa momentu elektromagnetycznego generatora, wysterowana przez stabilizator systemowy, miała charakter momentu tłumiącego, a więc była proporcjonalna do odchyłki prędkości kątowej generatora [1, 3, 5, 7, 15-17]. Prosta struktura stabilizatora systemowego PSS3B nie pozwala na spełnienie odpowiedniego warunku kompensacji [6, 7], w związku z czym dobór parametrów stabilizatora PSS3B trzeba przeprowadzić w inny sposób. W niniejszym artykule zaproponowano wyznaczenie optymalnych (polioptymalnych) parametrów stabilizatorów systemowych PSS3B pracujących w rozbudowanym, wielomaszynowych PS w dwóch etapach obliczeń, co m.in. przedstawiono w następnym rozdziale.

### Polioptymalizacja parametrów PSS3B pracujących w rozbudowanym SEE

Ze względu na złożoność zjawisk występujących w SEE, proces optymalizacji parametrów stabilizatorów powinien uwzględniać wiele kryteriów, związanych z tłumieniem kołysań elektromechanicznych oraz z ograniczeniem zmian napięcia w poszczególnych zespołach wytwórczych, w czasie różnych zakłóceń stanu ustalonego [7].

Innym, gorszym rozwiązaniem jest optymalizacja parametrów stabilizatorów systemowych, prowadząca do minimalizacji jednej, odpowiednio określonej (np. addytywnej lub multiplikatywnej) funkcji celu, związanej z przebiegami w wielomaszynowym SEE [7]. Funkcja celu podlegająca minimalizacji w tym przypadku, musi zawierać różne składniki, związane z optymalizowanymi kryteriami. Jednym z podstawowych problemów przy określeniu takiej funkcji celu jest odpowiednie dobranie współczynników wagowych, odpowiadających poszczególnym składnikom funkcji (związanych m.in. z przebiegami mocy chwilowej i napięciami w różnych miejscach SEE). Jest wiele możliwości określenia tych współczynników [7]. Dodatkowo analizę komplikuje fakt występowania (w tak przyjętej

funkcji celu) kryteriów sprzecznych ze sobą: kryterium minimalizacji zmian mocy chwilowej i kryterium minimalizacji zmian napięcia zaciskowego poszczególnych generatorów [7]. Przy czym przyjęte wartości współczynników wagowych funkcji celu w znaczący sposób wpływają na końcowy wynik optymalizacji [7, 18].

Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej. Umożliwia ona jednocześnie uwzględnienie różnych i sprzecznych kryteriów [18]. W optymalizacji wielokryterialnej występuje ogólne kryterium wektorowe (1), które w analizowanym przypadku dla jednego stanu pracy SEE i jednego zakłócenia można przedstawić w postaci [3, 7]:

$$(3) \quad f = \begin{bmatrix} \int \Delta P(t)^{(1)} dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_{i1} \\ \vdots \\ \int \Delta P(t)^{(k)} dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_{ik} \\ \vdots \\ \int \Delta P(t)^{(N_i)} dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_{iN_i} \\ \int \Delta U(t)^{(1)} dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta U_{i1} \\ \vdots \\ \int \Delta U(t)^{(k)} dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta U_{ik} \\ \vdots \\ \int \Delta U(t)^{(N_i)} dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta U_{iN_i} \end{bmatrix},$$

gdzie:  $\Delta P_{ik}$ ,  $\Delta U_{ik}$  - odchyłki od wartości ustalonych mocy czynnej (chwilowej) i napięcia generatora  $k$ -tego zespołu wytwórczego w kolejnych  $i$ -tych chwilach czasu,  $k = 1..N_i$ ,  $N_i$  - liczba zespołów wytwórczych SEE, (do których wprowadzamy stabilizatory systemowe), wymiar funkcji  $f$ :  $nq = 2N_i$ .

W celu usprawnienia procesu obliczeń optymalnych parametrów stabilizatorów systemowych, proces obliczeń rozbito na dwa etapy. W wstępnym etapie I przeanalizowano oddzielnie każdy z zespołów wytwórczych, do których wprowadza się stabilizatory systemowe, zakładając że pracują one w układach jednomaszynowych typu zespół wytwórczy – sieć sztywna. Celem etapu jest obliczenie stałych czasowych stabilizatorów systemowych, których wartość ma mniejszy wpływ na stabilność kątową SEE, oraz wstępnych wartości podstawowych współczynników wzmocnienia ( $K_{S2}$  i  $K_{S3}$ ). W tym etapie obliczeń wykorzystano optymalizację jednokryterialną, ponieważ układ jednomaszynowy jest prostym układem, i można w łatwy sposób ocenić poprawność uzyskanych wyników optymalizacji. W głównym etapie II poprzez optymalizację wielokryterialną, odnoszącą się do układu wielomaszynowego, obliczano tylko współczynniki wzmocnienia  $K_{S2}$  i  $K_{S3}$ , od których najbardziej zależy skuteczność tłumienia kołysań elektromechanicznych. Przez takie rozbitcie obliczeń, w etapie II znacznie ograniczono wymiar przestrzeni sterowań  $X$  przy polioptymalizacji, czyli liczbę jednocześnie optymalizowanych parametrów stabilizatorów, a tym samym wyraźnie zmniejszono czas obliczeń optymalizacyjnych.

Optymalizację parametrów poszczególnych stabilizatorów systemowych pracujących w kolejnych zespołach wytwórczych w układzie jednomaszynowym w etapie I przeprowadzono poprzez minimalizację odchyłek wybranych wielkości regulacyjnych od ich wielkości ustalonych, takich jak: moc czynna generatora  $P$  i napięcie

zaciskowe generatora  $U$ , przy typowym zakłóceniu w postaci przemijającego symetrycznego zwarcia w linii przesyłowej. Co można sprowadzić do minimalizacji wskaźnika określonego w postaci [7]:

$$(4) \quad f_1(x_1) = \sum_{i=1}^n \left[ (w_P |\Delta P_i(x_1)|)^2 + (w_U |\Delta U_i(x_1)|)^2 \right],$$

gdzie:  $x_1$  – wektor optymalizowanych parametrów jednego stabilizatora systemowego,  $\Delta P_i$ ,  $\Delta U_i$  – odchyłki mocy czynnej i napięcia rozpatrywanego generatora w kolejnych  $i$ -tych chwilach czasu,  $w_P, w_U$  – współczynniki wagowe.

W obliczeniach uwzględniono następujące stany obciążenia i typowe wartości impedancji linii przesyłowej:

- stan znamionowy generatora synchronicznego, związany z początkowym obciążeniem  $P_0 = 0,85$ ,  $Q_0 = 0,5$  (w jednostkach względnych),
- $Z_e = R_e + j X_e = 0 + j 0,3$ ,
- $Z_e = R_e + j X_e = 0 + j 0,6$  (w jednostkach względnych).

Założono następujące wartości współczynników wagowych we wzorze (4):  $w_P = 1$ ,  $w_U = 4$ . Przyjęcie stosunkowo dużych wartości współczynnika  $w_U$  spowodowane jest potrzebą zapewnienia zadowalających przebiegów regulacyjnych napięcia zaciskowego generatora.

W etapie I obliczano następujące parametry stabilizatorów systemowych: stałe czasowe:  $T_1, T_2, T_3, T_4$  oraz wstępne wartości współczynników wzmocnienia  $K_{S2}$  i  $K_{S3}$ . Wstępne wartości współczynników wzmocnienia w drugim etapie obliczeń były podstawą przyjęcia przestrzeni sterowań czyli zakresów w jakich poszukiwano rozwiązań polioptymalnych. Jako stałe przyjęto typowe wartości parametrów:  $K_{S1} = 1$ ,  $V_{SMIN} = 0,2$ ,  $V_{SMIN} = -0,066$  dla wszystkich stabilizatorów pracujących w analizowanym SEE.

Obliczenia w etapie II przeprowadzono w kilku wariantach, odnoszących się do różnych postaci wielowymiarowej funkcji celu przy optymalizacji wielokryterialnej.

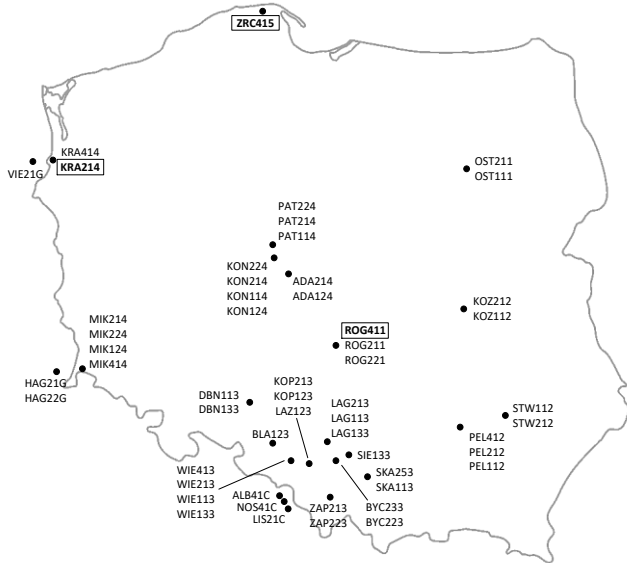
### Opis analizowanego SEE i przykładowe obliczenia optymalizacyjne

Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla modelu Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). Jest to model nieliniowy opracowany w środowisku programu Matlab/Simulink, obejmujący 49 wybranych zespołów wytwórczych pracujących w sieciach wysokich i najwyższych napięć oraz 8 zastępczych zespołów wytwórczych reprezentujących wpływ SEE sąsiadujących krajów [3] (rys. 2). W modelu KSE uwzględniono następujące modele elementów zespołu wytwórczego: model generatora synchronicznego GENROU [5, 14], model statycznego lub elektromaszynowego układu wzbudzenia pracującego w KSE [3, 7], model turbiny parowej IEEEG1 lub turbiny wodnej HYGOV [5, 14] oraz opcjonalnie model stabilizatora PSS3B. Zastępcze jednostki wytwórcze opisano uproszczonym modelem generatora synchronicznego GENCLS [14], pomijając wpływ układu wzbudzenia, turbiny i stabilizatora systemowego.

Dla badanego SEE określono zespoły wytwórcze krytyczne dla stabilności kątowej: ROG411 (6 bloków o znamionowej mocy pozornej 426 MV·A –  $S_N = 6 \cdot 426$  MV·A i napięciu znamionowym  $U_N = 400$  kV), KRA214 ( $S_N = 2 \cdot 252,8$  MV·A,  $U_N = 220$  kV) i ZRC415 ( $S_N = 4 \cdot 209$  MV·A,  $U_N = 400$  kV) na podstawie kryteriów przedstawionych w publikacji [5]. Zespoły krytyczne zaznaczono ramką na rys. 2.

W pierwszym etapie obliczeń wyznaczono stałe czasowe stabilizatorów systemowych i wstępne wartości współczynników wzmocnienia w krytycznych zespołach analizowanego SEE poprzez minimalizację pojedynczej

funkcji celu (wskaźnika jakości) (4), określonej każdorazowo dla tych zespołów. Minimalizację wskaźnika jakości przeprowadzono przy użyciu algorytmu gradientowego Newtona z Optimization Toolbox programu Matlab [19]. Wyniki obliczeń optymalizowanych parametrów stabilizatorów systemowych przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Zespoły wytwórcze uwzględnione w modelu KSE

Tabela 1. Wyniki obliczeń parametrów stabilizatorów systemowych PSS3B (etap I)

Zespół wytwórczy	$K_{S2}$ [-]	$K_{S3}$ [-]	$T_1$ [s]	$T_2$ [s]	$T_3$ [s]	$T_4$ [s]
ROG411	17,5	0,521	0,097	4,94	0,026	4,905
KRA214	20,0	0,444	0,010	5,00	0,019	5,000
ZRC415	20,0	0,334	0,100	5,00	0,100	0,147

W II etapie przeprowadzono wariantowe obliczenia parametrów stabilizatorów systemowych przy zastosowaniu optymalizacji wielokryterialnej. Pierwszym analizowanym przypadkiem była polioptymalizacja stabilizatora systemowego w zespole wytwórczym ROG411. Optymalizowana wektorowa funkcja celu miała postać:

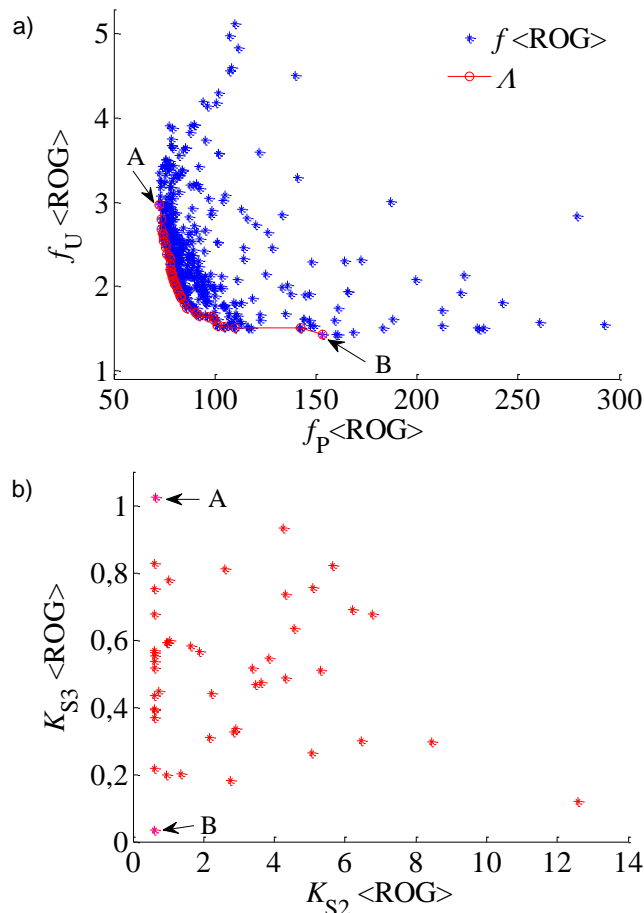
$$(5) f_{\text{ROG}} = \begin{bmatrix} f_1(K_{S2}^{(\text{ROG})}, K_{S3}^{(\text{ROG})}) \\ f_2(K_{S2}^{(\text{ROG})}, K_{S3}^{(\text{ROG})}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_P^{(\text{ROG})} \\ f_U^{(\text{ROG})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \Delta P_i^{(\text{ROG})} \\ \sum_{i=1}^n \Delta U_i^{(\text{ROG})} \end{bmatrix},$$

gdzie:  $K_{S2}^{(\text{ROG})}$ ,  $K_{S3}^{(\text{ROG})}$  - optymalizowane parametry stabilizatora systemowego,  $\Delta P_i^{(\text{ROG})}$ ,  $\Delta U_i^{(\text{ROG})}$  - odchyłki mocy czynnej (chwilowej) i napięcia generatora zespołu wytwórczego ROG411 w kolejnych  $i$ -tych chwilach czasu. Przyjęto zakłócenie w postaci symetrycznego zwarcia w linii przesyłowej, znajdującej się blisko zespołu wytwórczego ROG411, o czasie zwarcia 0,1 s. Takie zakłócenie założono również przy innych obliczeniach przedstawionych w niniejszym podrozdziale.

Wyniki optymalizacji czyli: zbiór kompromisów, wartości składowych funkcji celu wyznaczone w czasie polioptymalizacji funkcji celu (5) oraz parametry stabilizatora systemowego odpowiadające zbiorowi kompromisów przedstawiono na rys. 3. Dodatkowo na rys. 3 zaznaczono dwa skrajne punkty zbioru kompromisów, tj. punkt A, dla którego uzyskano najmniejszą wartość składowej  $f_P$  (5) oraz punkt B, dla którego uzyskano najmniejszą wartość  $f_U$ .

Podobnie obliczenia parametrów stabilizatorów systemowych przeprowadzono dla zespołów wytwórczych

KRA214 oraz ZRC415. Dla tych zespołów wyznaczono również dwa skrajne punkty zbioru kompromisów, tj. punkt A, dla którego uzyskano najmniejszą wartość składowej  $f_P$  oraz punkt B, dla którego uzyskano najmniejszą wartość  $f_U$ .



Rys. 3. Wartości składowych funkcji celu i zbiór kompromisów  $\mathcal{A}$  (a) oraz parametry optymalizowanego stabilizatora  $K_{S2}$  i  $K_{S3}$  odpowiadające zbiorowi kompromisów (b) w przypadku polioptymalizacji stabilizatora w zespole wytwórczym ROG411

Wartości optymalnych wzmożeń stabilizatorów systemowych w skrajnych punktach zbioru kompromisów A i B dla 3 zespołów wytwórczych przedstawiono w tabeli 2.

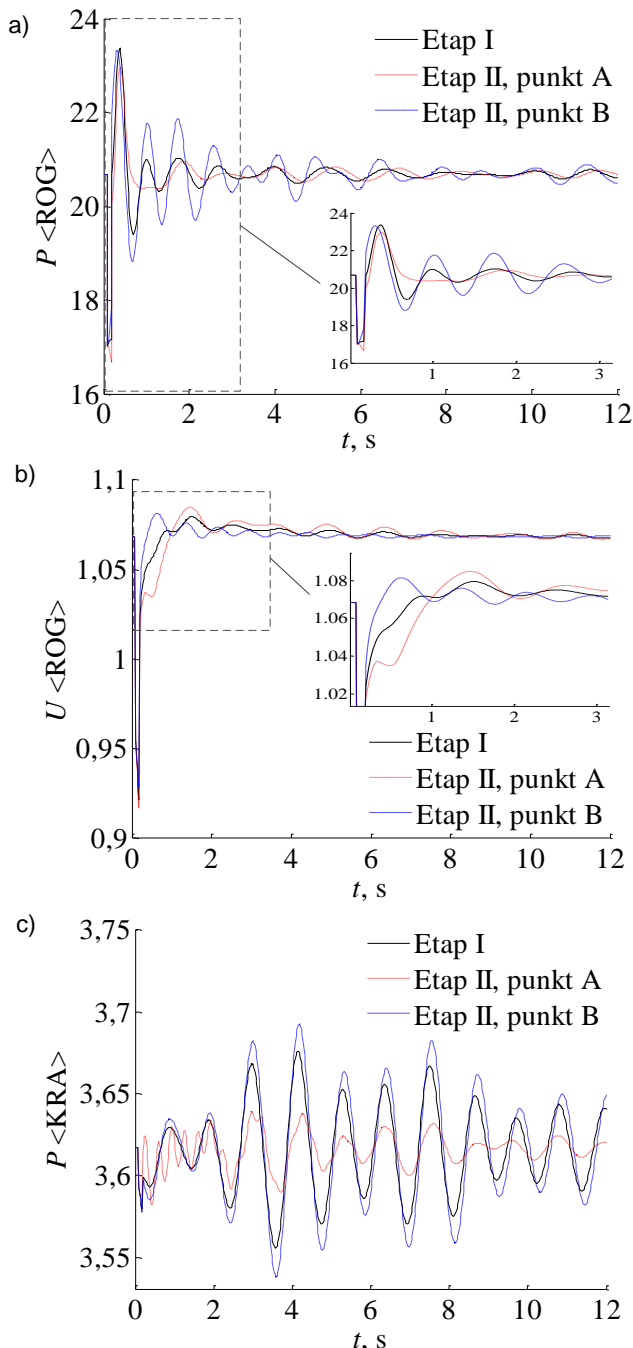
Wybrane przebiegi dla skrajnych punktów zbioru kompromisów (wg tabeli 2) przedstawiono na rys. 4.

W drugim wariantcie obliczeń polioptymalizowano jednocześnie parametry stabilizatorów systemowych w 3 zespołach wytwórczych, uwzględniając w funkcji celu przebiegi w tych zespołach. W tym przypadku przestrzeń sterowań i przestrzeń celu były sześciowymiarowe. Optymalizowana wektorowa funkcja celu miała postać:

$$(6) f = \begin{bmatrix} f_1(K_{S2}^{(\text{ROG})}, K_{S3}^{(\text{ROG})}) \\ f_2(K_{S2}^{(\text{ROG})}, K_{S3}^{(\text{ROG})}) \\ f_3(K_{S2}^{(\text{KRA})}, K_{S3}^{(\text{KRA})}) \\ f_4(K_{S2}^{(\text{KRA})}, K_{S3}^{(\text{KRA})}) \\ f_5(K_{S2}^{(\text{ZRC})}, K_{S3}^{(\text{ZRC})}) \\ f_6(K_{S2}^{(\text{ZRC})}, K_{S3}^{(\text{ZRC})}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_U^{(\text{ROG})} \\ f_U^{(\text{ROG})} \\ f_P^{(\text{KRA})} \\ f_P^{(\text{KRA})} \\ f_P^{(\text{ZRC})} \\ f_P^{(\text{ZRC})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \Delta P_i^{(\text{ROG})} \\ \sum_{i=1}^n \Delta U_i^{(\text{ROG})} \\ \sum_{i=1}^n \Delta P_i^{(\text{KRA})} \\ \sum_{i=1}^n \Delta U_i^{(\text{KRA})} \\ \sum_{i=1}^n \Delta P_i^{(\text{ZRC})} \\ \sum_{i=1}^n \Delta U_i^{(\text{ZRC})} \end{bmatrix}.$$

Tabela 2. Wyniki obliczeń współczynników wzmocnienia stabilizatorów systemowych PSS3B (polioptymalizacja dwuwymiarowej funkcji celu)

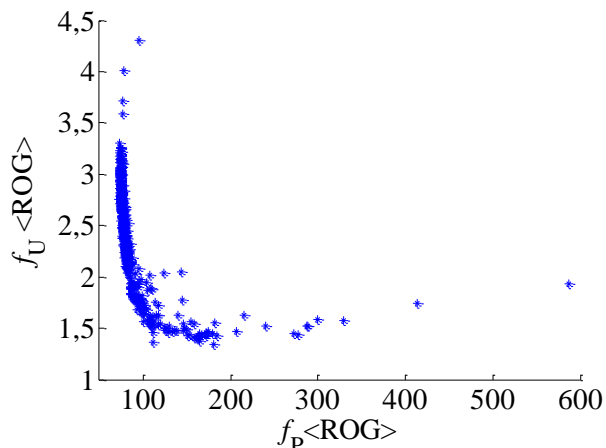
Zespół wytwórczy	$K_{S2}$ [-]		$K_{S3}$ [-]	
	punkt zbioru kompromisów			
	A	B	A	B
ROG411	0,6449	0,6	1,0257	0,033533
KRA214	0,6	3,6928	3,6566	0,03
ZRC415	3,6368	2,663	1,8248	0,03



Rys. 4. Przebiegi mocy chwilowej (a) i napięcia (b) zespołu wytwórczego ROG411 oraz mocy chwilowej zespołu wytwórczego KRA214 (c) dla parametrów stabilizatora systemowego w skrajnych punktach zbioru kompromisów A i B

Wynik polioptymalizacji funkcji celu (6), z uwagi na wymiary przestrzeni celu i sterowań, można graficznie przedstawić w postaci rzutów sześciowymiarowej przestrzeni na płaszczyzny wyznaczone przez odpowiednie pary składowych funkcji celu. Przykładowo dla zespołu

wytwórczego ROG411 jest to płaszczyzna  $f^{(ROG)}$  wyznaczona przez  $f_P^{(ROG)}$  i  $f_U^{(ROG)}$ , którą przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Rzut sześciowymiarowego zbioru kompromisów na płaszczyznę  $f^{(ROG)}$

Z punktu widzenia oceny uzyskanych wyników optymalizacji, interesujące jest porównanie zbiorów kompromisów wyznaczanych dla dwuwymiarowych funkcji celu z wynikami optymalizacji sześciowymiarowej funkcji celu. W tym celu wyznaczono dodatkowo granice rzutów

sześciowymiarowego zbioru kompromisu  $A^{(6)}$  na odpowiednie dwuwymiarowe przestrzenie celu. Wyniki porównania (dwuwymiarowe zbiory kompromisów, rzuty sześciowymiarowego zbioru kompromisów oraz ich granice) przedstawiono na rys. 6.

Wyznaczono ponadto punkty skrajne granic rzutów sześciowymiarowego zbioru kompromisów na odpowiednie przestrzenie dwuwymiarowe. Punkty te na rys. 6 oznaczono literami C i D, a zestawienie wartości współczynników wzmocnienia im odpowiadających przedstawiono w tabeli 3. Wybrane przebiegi i napięć odpowiadające tym punktom przedstawiono na rys. 7.

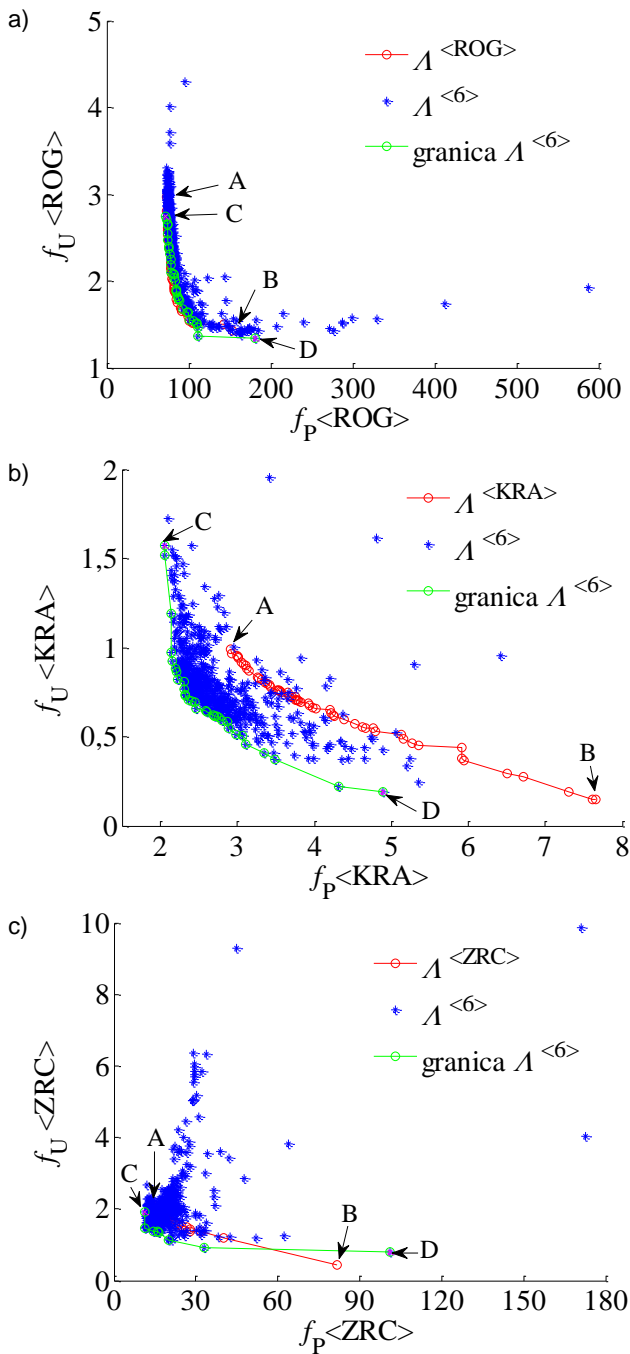
Tabela 3. Wyniki obliczeń współczynników wzmocnienia stabilizatorów systemowych PSS3B (polioptymalizacja sześciowymiarowej funkcji celu)

Powierzchnia rzutu	Zespół wytwórczy	$K_{S2}$ [-]		$K_{S3}$ [-]	
		punkt granicy zbioru kompromisów			
		C	D	C	D
$f^{(ROG)}$	ROG411	4,0438	9,0716	0,88701	0,03
	KRA214	14,663	11,4768	1,3992	1,6235
	ZRC415	6,0572	79,0956	0,29132	4
$f^{(KRA)}$	ROG411	10,3018	14,6621	0,8735	0,68841
	KRA214	80	6,4255	2,6366	0,03
	ZRC415	12,4376	1,5667	1,589	3,4812
$f^{(ZRC)}$	ROG411	28,5627	28,2247	2,0254	0,40746
	KRA214	17,186	19,8164	2,3877	1,6118
	ZRC415	18,1081	5,2259	1,931	0,03

### Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono zastosowanie wielokryterialnej optymalizacji parametrów stabilizatorów systemowych typu PSS3B do tłumienia kołysań elektromechanicznych w rozbudowanym systemie elektroenergetycznym. W celu uproszczenia obliczenia podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie oddzielnie przeanalizowano zespoły wytwórcze krytyczne dla stabilności kątowej SEE. Stałe czasowe i wartości początkowe współczynników wzmocnienia stabilizatorów obliczono analizując układy jednoma-

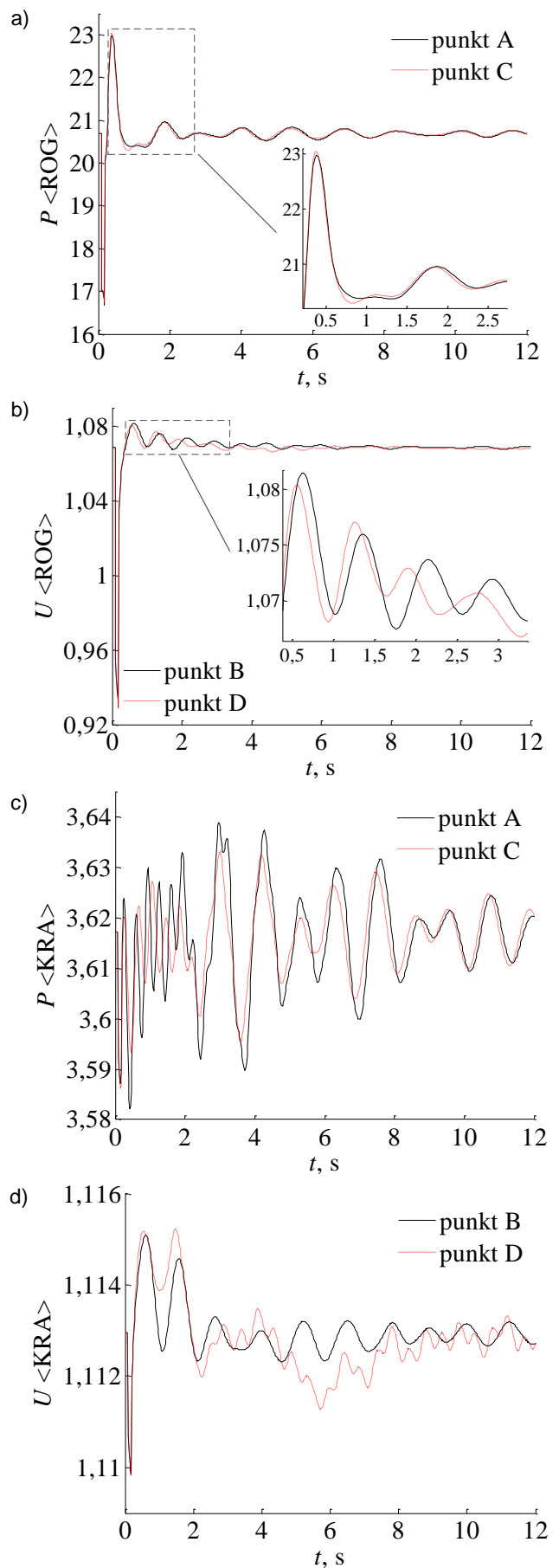
szynowe (zespół wytwórczy – sieć sztywna) minimalizując funkcję celu (4). W głównym drugim etapie, za pomocą optymalizacji wielokryterialnej, związanej z rozbudowanym SEE, obliczono jedynie wzmocnienia  $K_{S2}$  i  $K_{S3}$ , od których w największym stopniu zależy efektywność działania stabilizatorów, stąd też wielkość przestrzeni sterowań podczas polioptymalizacji została efektywnie ograniczona.



Rys. 6. Porównanie rzutów sześciowymiarowego zbioru kompromisów  $\Lambda^{(6)}$ , ich granic  $\overline{\Lambda}^{(6)}$  z dwuwymiarowymi zbiorami kompromisów na płaszczyznach  $f_{ROG}$  (a),  $f_{KRA}$  (b) i  $f_{ZRC}$  (c)

W drugim etapie obliczenia przeprowadzono w kilku wariantach: dla dwu- i sześciowymiarowych funkcji celu.

W optymalizacji wielokryterialnej rozwiązaniem nie jest pojedynczy zbiór zmiennych, czyli zestaw parametrów stabilizatorów systemowych, ale zbiór zbiorów tych param-



Rys. 7. Przebiegi mocy chwilowej (a, c) napięcia i mocy chwilowej (b, d) zespołów wytwórczych ROG411 oraz KRA214 dla parametrów stabilizatorów systemowych w skrajnych punktach zbioru kompromisów A i C oraz B i D

trów, czyli zbiór kompromisów, które zostały wyznaczone dla każdego analizowanego przypadku. W badaniach dla sześciowymiarowego zbioru kompromisów wyznaczono dodatkowo rzuty tego zbioru na płaszczyzny związane z wielkościami poszczególnych zespołów wytwórczych oraz granice tych rzutów na te płaszczyzny.

Na podstawie przeprowadzonych analiz i uzyskanych wyników obliczeń można wyciągnąć następujące wnioski:

Stabilizatory systemowe PSS3B, pomimo swojej prostej konstrukcji, potrafią dobrze tłumić kołysania elektromechaniczne w rozbudowanym SEE, bez istotnego pogarszania przebiegów napięcia w zespołach wytwórczych. Konieczne jest jednak prawidłowe określenie ich parametrów.

Analizując układy jednomaszynowe, zespół wytwórczy – sieć sztywna, można wyznaczyć zbiór parametrów stabilizatorów systemowych, dla których przebiegi mocy chwilowej i napięć węzłowych w rozbudowanym SEE są zadowalające.

Stosując wielokryterialną optymalizację parametrów stabilizatorów, można w dalszym ciągu poprawiać przebiegi mocy chwilowej i napięć w zespołach wytwórczych.

Zastosowanie optymalizacji wielokryterialnych pozwala na uwzględnienie wielu (w prezentowanych badaniach 2 lub 6 kryteriów), czasami sprzecznych wymagań, bez utraty możliwości osiągnięcia optymalnego rozwiązania.

Kryteria związane z odchyleniami napięcia są raczej sprzeczne z kryteriami związanymi z przebiegami mocy chwilowej. Gdy wahania mocy są dobrze tłumione, występują zwykle znaczne odchylenia napięcia (przebiegi dotyczące punktu A na rys. 4) i odwrotnie (przebiegi dotyczące punktu B). Może jednak zaistnieć sytuacja (jak na rys. 3), gdy w zbiorze kompromisowym znajdują się zakresy, dla których występują duże zmiany w kryterium  $f_p^{(ROG)}$  przy jedynie niewielkich zmianach w kryterium  $f_U^{(ROG)}$  i odwrotnie. Można zatem znaleźć sterowanie (wartości parametrów stabilizatorów systemowych), dla których tłumienie kołysań elektromechanicznych ulega znacznej poprawie przy jedynie niewielkim pogorszeniu przebiegów napięcia.

Dla poprawnie przeprowadzonej polioptymalizacji można wybrać rozwiązanie, dla którego wszystkie kryteria są spełnione w zadowalającym stopniu. Można także wybrać rozwiązanie, które lepiej spełnia kryteria, będące w rozpatrywanym przypadku ważniejszymi od pozostałych.

Polioptymalizacja, jeśli chodzi o stosowane metody matematyczne, jest trudniejsza niż optymalizacja. Wymaga użycia bardziej skomplikowanych narzędzi. Utrudnia też interpretację wyników. Pozwala jednak uzyskać lepsze rezultaty, czyli dobrać takie parametry stabilizatorów systemowych, które lepiej tłumią przebiegi.

Można założyć, że wzrost wymiaru funkcji celu pozwala uzyskać lepsze rezultaty. Potwierdzają to porównania dwu- i sześciowymiarowych zbiorów kompromisów (rys. 6). Z rysunków tych wynika, że niektóre punkty granicy rzutu sześciowymiarowego zbioru kompromisu znajdują się po lewej stronie i poniżej dwuwymiarowego zbioru kompromisów. Przebiegi uzyskane dla punktów krańcowych sześciowymiarowego rzutu na odpowiednie płaszczyzny dwuwymiarowe, np. przebieg mocy dla punktu C na rys. 7c jest lepiej tłumiony niż dla punktu A, a przebieg napięcia dla punktu D na rys. 7b ma mniejsze odchylenia od wartości ustalonej niż dla punktu B.

W dalszych badaniach można uwzględnić wpływ niepewności parametrów modelu matematycznego

rozbudowanego SEE na parametry polioptymalne stabilizatorów systemowych, m.in. poprzez sformułowanie odpowiednich współczynników odkształcenia [3].

## LITERATURA

- [1] Kundur P.: *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] Machowski J., Lubośny Z., Bialek J., Bumby J.: *Power System Dynamics. Stability and Control*. John Wiley & Sons, Chichester, New York, 2020.
- [3] Paszek S., Nocoń A.: *Parameter polyoptimization of PSS2A power system stabilizers operating in a multi-machine power system including the uncertainty of model parameters*. Elsevier, *Applied Mathematics and Computation*, 267 (2015), 750–757, DOI: 10.1016/j.amc.2014.12.013.
- [4] Nocoń A., Paszek S.: *A Comprehensive Review of Power System Stabilizers*, *Energies* 2023, 16, 1945. <https://doi.org/10.3390/en16041945>.
- [5] Pruski P., Paszek S.: *Określenie zespołów wytwórczych krytycznych dla stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego*, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 97, nr 3/2021, s. 51–55.
- [6] Paszek S., Pruski P., Nocoń A.: *Metody wyznaczania stałych czasowych członów korekcyjnych stabilizatorów systemowych*. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 100 nr 1/2024, s. 249–254, doi:10.15199/48.2024.01.52.
- [7] Paszek S., Nocoń A.: *Optimisation and Polyoptimisation of Power System Stabilizer Parameters*. Lambert, Saarbrücken, 2014.
- [8] Khaleghi M., Farsangi M.M., Nezamabadipour H., Lee K.Y.: *Pareto-Optimal Design of Damping Controllers Using Modified Artificial Immune Algorithm*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 41(2), (March 2011), 240–250, DOI: 10.1109/TSMCC.2010.2052241.
- [9] Khanh D., Vasant P., Elamvazuthi I., Dieu V.: *Optimization of thermo-electric coolers using hybrid genetic algorithm and simulated annealing*. *Archives of Control Sciences*, 24(2), (2014), 155–176, DOI: 10.2478/acsc-2014-0010.
- [10] Panda M., Das B., Pati B.: *Global path planning for multiple AUVs using GWO*. *Archives of Control Sciences*, 30(1), (2020), 77–100, DOI: 10.24425/acs.2020.132586.
- [11] Zhang P., Coonick A.: *Coordinated synthesis of PSS parameters in multi-machine power systems using the method of inequalities applied to genetic algorithms*. 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077), 2, (2000), 1424, DOI: 10.1109/PESW.2000.850179.
- [12] Miller B.L., Goldberg D.E.: *Genetic Algorithms, Tournament Selection, and the Effects of Noise*. *Complex Systems*, 9(3), 193–212.
- [13] Michalewicz Z., Logan T.D., Swaminathan S.: *Evolutionary Operators for Continuous Convex Parameter Spaces*. *3rd Annual Conference on Evolutionary Programming*, Sebald A.V. and Fogel L.J. (editors), World Scientific Publishing, River Edge, N.J., 1994, pp. 84–97.
- [14] Power Technologies, a Division of S&W Consultants Inc.: *Program PSS/E Application Guide*. Siemens Power Technologies Inc., 2002.
- [15] Gibbard M.J.: *Coordinated design of multimachine power system stabilisers based on damping torque concepts*. *IEE Proceedings* 135, Pt. C(4), (1988), 276–284.
- [16] IEEE Std 421.5. *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, 2016.
- [17] De Mello F.P., Concordia Ch.: *Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control*. *IEEE Trans. on Power Systems*, PAS-88(4), (1980), 316–329.
- [18] Peschel M., Riedel C.: *Polyoptimierung – eine Entscheidungshilfe für ingenieurtechnische Kompromislosungen*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1976.
- [19] Mathworks, Inc. *Optimization Toolbox Documentation*.