

przez Urząd Regulacji Energetyki (URE) i unormowane szczegółowo w regulaminie rynku bilansującego [3, 4]. W Polsce operatorem systemu przesyłowego do niedawna były Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. (PSE), a obecnie PSE Operator. Model systemu OSP przedstawiono na rys. 1, przy czym przyjęto następujące oznaczenia, a mianowicie:

(1) Opis wejść:

uft – strumień dochodu finansowego z tytułu sprzedaży energii elektrycznej do TPA [tys. zł];

ufp – strumień dochodu finansowego z tytułu sprzedaży energii elektrycznej do PO [tys. zł];

ufr – strumień dochodu finansowego z tytułu sprzedaży energii elektrycznej do OSR [tys. zł];

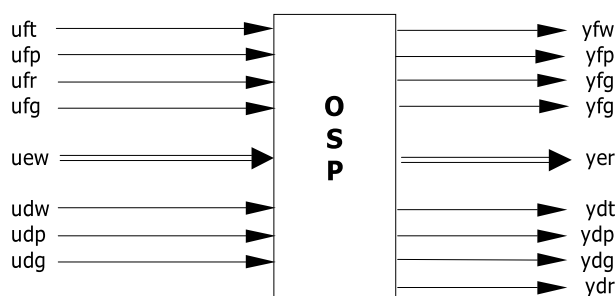
ufg – strumień dochodu finansowego z tytułu sprzedaży energii elektrycznej na GE [tys. zł];

uew – strumień energii elektrycznej fizycznie przesłanej z SWE [GWh];

udw – strumień decyzyjny dotyczący zakupu energii elektrycznej od SWE [GWh];

udp – strumień decyzyjny dotyczący zakupu energii elektrycznej od PO [GWh];

udg – strumień decyzyjny dotyczący zakupu energii elektrycznej na GE [GWh].



Rys. 1. Model systemu OSP. Oznaczenia w tekście.

(2) Opis wyjść:

yfw – strumień nakładu finansowego poniesionego na zakup energii elektrycznej od SWE [tys. zł];

yfp – strumień nakładu finansowego poniesionego na zakup energii elektrycznej od PO [tys. zł];

yfg – strumień nakładu finansowego poniesionego na zakup energii elektrycznej na GE [tys. zł];

yer – strumień energii elektrycznej fizycznie przesłanej do OSR [GWh];

ydt – strumień decyzyjny dotyczący sprzedaży energii elektrycznej do TPA [GWh];

ydp – strumień decyzyjny dotyczący sprzedaży energii elektrycznej do PO [GWh];

ydg – strumień decyzyjny dotyczący sprzedaży energii elektrycznej na GE [GWh];

ydr – strumień decyzyjny dotyczący sprzedaży energii elektrycznej do OSR [GWh].

Celem identyfikacji tak określonego systemu OSP jest m.in. ustalenie zależności pomiędzy określonymi wielkościami obiektu w stanie ustalonym lub w czasie trwania procesów przejściowych i wówczas można mówić o identyfikacji odpowiednio charakterystyk statycznych lub własności dynamicznych procesu [2, 5-9]. Często takie rozumienie identyfikacji jest zbyt wąskie, a zwłaszcza, gdy pragnie się zbudować model obiektu podlegającego rozwojowi. **Wówczas identyfikację przeprowadzić należy w czasie długim przy uwzględnieniu oprócz zmian parametrycznych także zmian strukturalnych.** System, dla którego ustalane są zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi oraz wielkościami wyjściowymi nazywany jest często obiektem identyfikacji. A zatem dla rozważanego przypadku system elektroenergetycznej sieci przesyłowej jest obiektem identyfikacji, a strumienie wejściowe oraz wyjściowe są odpowiednio skonstruowanymi wektorami danych pomiarowych, w rozważanym przypadku – danych statystycznych zaczerpniętych m.in. z roczników Statystyki Elektroenergetyki Polskiej. Celem tak sformowanej identyfikacji jest wybór najlepszego modelu z określonej klasy, czyli wyznaczenie takiego wektora parametrów, aby funkcja jakości przyjęła wartość minimalną. Zależność wektora parametrów od wyników pomiarów nazywa się algorytmem identyfikacji.

2. Identyfikacja ESP w system identification toolbox

Wśród wielu ważnych problemów związanych z poszukiwaniem modelu rynku energii elektrycznej [3-9] do najistotniejszych należy problematyka identyfikacji rozwoju rynku, w tym identyfikacja rozwoju elektroenergetycznej sieci przesyłowej (ESP). Pozyskanie modelu systemu rozwoju rynku energii elektrycznej i jego podsystemów jest w praktyce zadaniem bardzo złożonym i nie do końca precyzyjnym, stąd poszukuje się takich modeli przeprowadzając identyfikację systemu rynku i jego podsystemów. **Przy identyfikacji operatora systemu przesyłowego (OSP) można wyróżnić podsystem sterowania przesyłem oraz system wykonawczy**, w tym techniczny, jakim jest elektroenergetyczna sieć przesyłowa (ESP).

2.1. Dobór danych do identyfikacji

Dla przeprowadzenia identyfikacji systemu ESP dobrano odpowiednie dane statystyczne takie jak np. długość linii elektroenergetycznych, liczba stacji elektroenergetycznych, liczba transformatorów sieciowych, strumień energii elektrycznej oddanej do sieci z odpowiednich elektrowni itp. Przykłady danych wejściowych zamieszczono w pracach [5-9].

System Identification Toolbox jest wyposażony w interfejs graficzny GUI znacznie ułatwiający analizę identyfikacyjną badanego systemu elektroener-

getycznej sieci przesyłowej (ESP). Można skonstruować tak program, aby parametry wywołanych funkcji wybierać poprzez menu lub ikony w okienkach interfejsu graficznego. Także pliki danych pomiarowych i modele badanego procesu mogą być dostępne przez odpowiednie ikony.

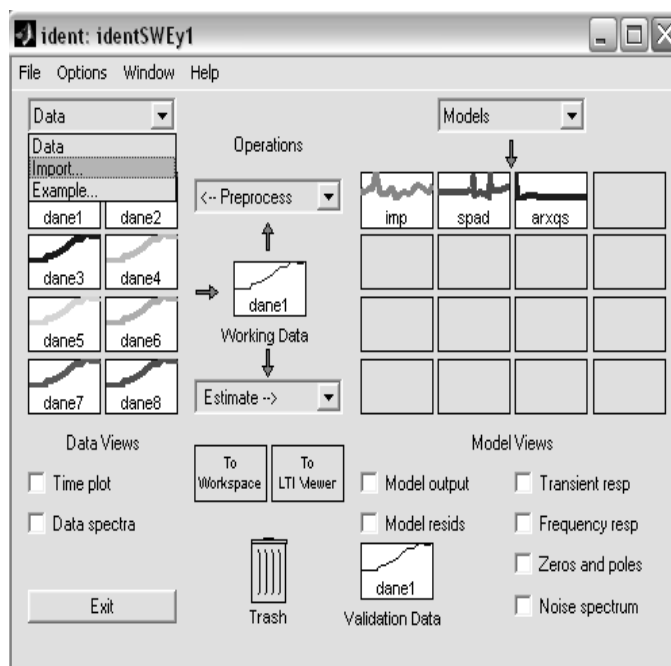
Mając przygotowane dane do identyfikacji można je dalej zaimportować do katalogu roboczego i poddać pod identyfikację. W ten sposób ostatecznie otrzymuje się odpowiednie charakterystyki systemu ESP w postaci np. macierzy th , a w dalszej kolejności w innych postaciach takich jak transmitancyjnej (tf), tzw. zpk ., przestrzeni stanów (ss), itp.

2.2. Identyfikacja systemu ESP w System Identification Toolbox'ie

W okienku GUI z menu rozwijanego można wybrać opcję Import, aby zaimportować dane wejściowe u i wyjściowe y , jak to zostało zilustrowane na rys. 1.

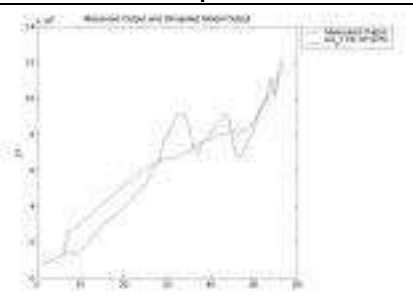
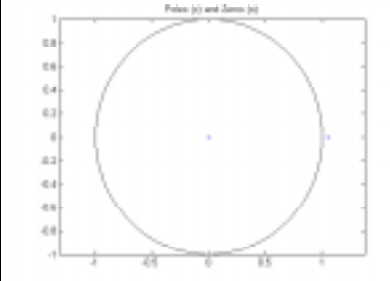
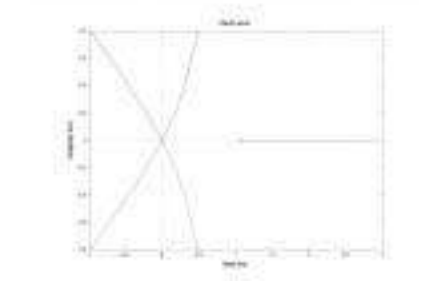
Wykorzystując dane dotyczące ESP szczegółowo przedstawione w pracach [5-9] uzyskano odpowiednie wyniki identyfikacji, których przykłady zamieszczono na rys. 2.

Ze zestawienia wykresów zamieszczonych na rys. 2 wynika, że najlepszym modelem jest charakterystyka wyjścia y_1 (output y_1) i y_2 (output y_2), które mają 72% dopasowania.



Rys. 2. Interfejs graficzny *ident* systemu System Identification Toolbox z przykładami charakterystyk dla systemu Operatora Systemu Przesyłowego (OSP) w zakresie elektroenergetycznej sieci przesyłowej (ESP).

Tabela 1. OSP – model dla wyjścia y1

yfw - strumień nakładu finansowego poniesionego na zakup e. e. od SWE [tys. zł]			
arx			
A(q)	$1 - 1.058 q^{-1}$	B5(q)	$38.03 q^{-5}$
B1(q)	$-6.089e-014 q^{-5}$	B6(q)	$-72.11 q^{-5}$
B2(q)	$-6.086e-015 q^{-5}$	B7(q)	0
B3(q)	$0.1972 q^{-5}$	B8(q)	0
B4(q)	0		
zpk			
From u1 to y1	$\frac{-6.0893e-014}{z^4 (z-1.058)}$	From u5 to y1	$\frac{38.0255}{z^4 (z-1.058)}$
From u2 to y1	$\frac{-6.086e-015}{z^4 (z-1.058)}$	From u6 to y1	$\frac{-72.1062}{z^4 (z-1.058)}$
From u3 to y1	$\frac{0.19717}{z^4 (z-1.058)}$	From u7 to y1	$\frac{2.2204e-016}{z^{10} (z-1.058)}$
From u4 to y1	$\frac{2.2204e-016}{z^{10} (z-1.058)}$	From u8 to y1	$\frac{2.2204e-016}{z^{10} (z-1.058)}$
num/den		From v@y1 to y1	$\frac{586318.2868 z}{(z-1.058)}$
$\frac{-6.0893e-014}{z^5 - 1.0578 z^4}$			
[a,b,c,d]		Compare	
a1 = $\begin{bmatrix} 1.0578 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ b1 = $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0000 & -0.0000 & 0.1972 & 0 & 38.0255 \\ -72.1062 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ c1 = $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ d1 = $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$			
Pole/zero		Rlocus	
			

Identyfikowany system OSP posiada 8 wejść oraz 8 wyjść. Dla celów eksperymentu podzielono macierz wyjściową na 8 wektorów, aby w sposób niebudzący wątpliwości określić odpowiednie charakterystyki poszczególnych podsystemów. Dla każdego z tak wyróżnionych podsystemów przeprowadzono identyfikację **modelu arx** otrzymując 8 modeli, które następnie przekształcono na postać transmitancyjną, zero-biegunową oraz w przestrzeni stanów.

W tabeli 1 przedstawiono wybrane wyniki badań [5]. Uzyskana struktura modelu OSP posiada następujące parametry:

$$n_a=1, n_b=[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1], n_k=[5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5], \quad (1)$$

a dopasowanie modelu do danych rzeczywistych wynosi 68%. Z wykresu **pzmap** można wnioskować dla rozpatrywanego modelu, że system OSP nie jest stabilny, gdyż nie wszystkie jego bieguny leżą wewnątrz koła jednostkowego. Z kolei wykres **locus** pokazuje występowanie pięciu **linii pierwiastkowych Evansa**, przy czym jedna z nich bierze początek w punkcie 1.058 i zmierza do $+\infty$, a cztery pozostałe wychodzą z początku płaszczyzny zmiennej zespolonej s i zmierzają odpowiednio do $+\infty$.

Dążąc do poprawy stabilności należałoby spowodować, aby wszystkie linie znalazły się w lewej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej s , co jest możliwe do uzyskania na drodze zmian strukturalnych, a nie parametrycznych.

Zatem projektowanie rozwoju OSP powinno dotyczyć zmiany charakteru linii pierwiastkowej leżącej w prawej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej s . W tym celu należy w dalszej kolejności przeprowadzić odpowiednie badania wrażliwościowe, zwłaszcza w zakresie zmian podyktowanych tą linią pierwiastkową.

3. Systemowy algorytm ewolucyjny SAE

Do wygenerowania populacji początkowej został wykorzystany **sztuczny kod genetyczny** wyprowadzony z modelu OSP zapisanego w postaci transmitancyjnej. Kod zawiera informację o modelach jednowyjściowych, przy czym dopuszczono pewną granicę tolerancji na zmiany poszczególnych parametrów przy tworzeniu populacji początkowej. Każdy chromosom można rozpatrywać na trzech poziomach szczegółowości. **Na najwyższym poziomie geny przyjmują wartości współczynników licznika i mianownika pobrane z transmitancji dyskretnej. Na drugim poziomie genami są liczniki i mianowniki transmitancji poszczególnych modeli jednowyjściowych, a na trzecim poziomie genami są jednowyjściowe modele** [5].

Do wyselekcjonowania puli rodzicielskiej wykorzystano **zmodyfikowaną metodę turniejową**, przyjmując, że każdy osobnik rywalizuje w sposób losowy z innym, ale wygrywa ten, któremu odpowiada większa wartość funkcji przystosowania. **Modyfikacja metody selekcji** polega na wprowadzenie czterech cech mających wpływ na przystosowanie, a mianowicie: stopień licznika,

stopień mianownika, znak parametrów licznika oraz wartość parametrów mianownika. Przy porównywaniu liczone są cechy dobre i ten wygrywa, który ma więcej cech dobrych, chociaż nie wszystkie cechy mają jednakowy wpływ na jego przystosowanie (określono różne wagi cech). Takie rozwiązanie jest podyktowane koniecznością zapewnienia zbieżności algorytmu. W praktycznym rozwiązaniu w pierwszej kolejności jako lepszy jest uznawany osobnik, który posiada mniejszy stopień licznika oraz więcej dodatnich parametrów mianownika. Natomiast mniejszy wpływ mają większy stopień mianownika oraz większa wartość przy największej potędze mianownika. Przy tym właściwa selekcja dokonuje się na drugim poziomie szczegółowości.

Krzyżowanie jako operator występuje na wszystkich trzech poziomach szczegółowości chromosomów, przy czym prawdopodobieństwa każdej z faz jest ustalane oddzielnie. Na najwyższym poziomie genami są poszczególne wartości liczników i mianowników modeli jednowejściowych postaci transmitancyjnej. **A więc krzyżowanie zachodzi wewnątrz liczników oraz mianowników traktowanych jako chromosomy**. Na poziomie drugim krzyżowanie dotyczy zamiany całych liczników oraz mianowników modelu transmitancyjnego, a na trzecim poziomie krzyżowanie dotyczy zamiany całych modeli. **Natomiast mutacja występuje tylko na najwyższym poziomie i dotyczy jedynie zmiany znaku genu na znak przeciwny** z ustalonym przez użytkownika prawdopodobieństwem przed uruchomieniem algorytmu.

Systemowy algorytm ewolucyjny SAE [6] został zaimplementowany w j. Matlab przy wykorzystaniu GUI Buildera [5]. Pierwszym krokiem było utworzenie interfejsu graficznego programu, którego parametry są przechowywane w pliku z rozszerzeniem *.fig. drugi etap dotyczył już czystej implementacji algorytmu SAE, którego kod źródłowy jest zapisany w pliku *.m.

Po identyfikacji modelu OSP dane dotyczące postaci transmitancyjnej modelu wyeksportowano z przestrzeni roboczej w postaci pliku OSP.mat. Program SAE wczytuje następnie dane z plików *.mat, z których następnie jest generowana populacja początkowa. Zostaje ona poddana działaniu algorytmu SAE, a po spełnieniu warunku zatrzymania algorytmu (osiągnięcie ustalonej liczby generacji) wyniki zostają zapisane w pliku wyniki.mat. Uzyskuje się w ten sposób zdekodowany do modeli jednowejściowych teoretycznie najlepszy chromosom. W dalszej kolejności możliwe jest przeprowadzenie szeregu badań takich jak np. za pomocą funkcji rlocus.

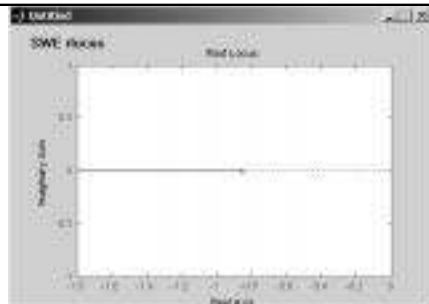
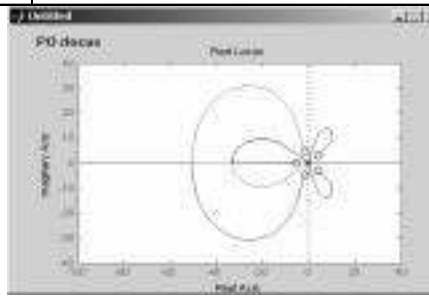
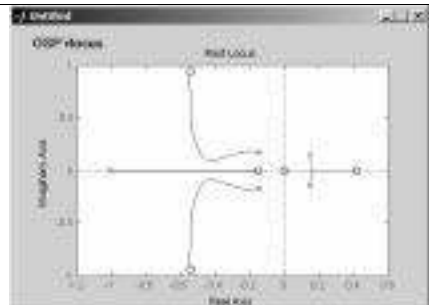
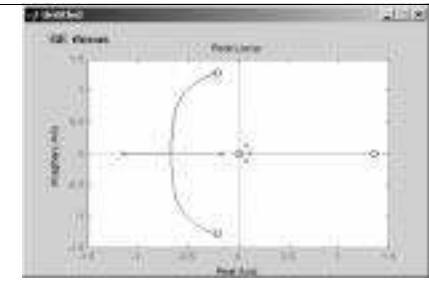
W celach badawczych przeprowadzono szereg eksperymentów uzyskując bardzo interesujące wyniki. Przykład eksperymentu, przy uwzględnieniu stosunkowo dużego prawdopodobieństwa krzyżowania na wszystkich trzech poziomach szczegółowości chromosomu zamieszczono w tabeli 2.

4. Uwagi końcowe i kierunki dalszych badań

Systemowy algorytm ewolucyjny SAE został opracowany na bazie teorii sterowania i systemów, stąd **populacja początkowa tworzona jest wprost z modelu systemu**. W rozważanym przypadku opracowano model transmita-

cyjny, który dotyczył systemu elektroenergetycznej sieci przesyłowej jako podsystemu technicznego w systemie OSP. Implementacje algorytmu SAE przeprowadzono przy wykorzystaniu języka Matlab, a badania wrażliwościowe uzyskanych wyników przeprowadzono w środowisku MATLAB-a i Simulinka przy wykorzystaniu m.in. System Identification Toolboxa oraz Control System Toolboxa.

Tabela 2. Wyniki eksperymentu funkcjonowania SAE dla systemu OSP

Parametry algorytmu			
Liczność populacji	30	Pr. krzyżowania poziom 1	0,6
Liczba generacji	100	Pr. krzyżowania poziom 2	0,6
Pr. mutacji	0,02	Pr. krzyżowania poziom 3	0,6
SWE - wykres rlocus		PO - wykres rlocus	
			
OSP - wykres rlocus		GE - wykres rlocus	
			

Literatura

1. Arabas J.: Wykłady z algorytmów ewolucyjnych. WNT. Warszawa 2001.
2. Bubnicki Z.: *Identyfikacja obiektów sterowania*. PWN, Warszawa, 1974.
3. Malko J., Weron A.: *Rynek energii elektrycznej. Mechanizmy funkcjonowania*. CIRE. Warszawa, 1999.

4. Sobierajski M., Wikosz K.: *Sieci elektroenergetyczne a rynki energii elektrycznej*. Problemy i perspektywy. Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej. OW PW. Wrocław, 2000.
5. Ruciński A.: Model i implementacja systemowego algorytmu genetycznego z rozproszoną populacją początkową. Praca magisterska pod kierunkiem dr inż. Jerzego Tchórzewskiego. Instytut Informatyki. Wydział Nauk Ścisłych. AP. Siedlce 2004
6. Tchórzewski J.: *Systemowe wspomaganie procesu badania prawidłowości rozwoju systemu sterowania na przykładzie elektroenergetycznej sieci przesyłowej*. Rozprawa naukowa nr. 58. AP. Siedlce, 1999.
7. Tchórzewski J., Zarzycki I., Soćko M.: *Simulation of Electric Power Transmission Network Using Self-Organizing Neural Network*. [in:] Current Issues in Data and Knowledge Engineering.[ed.: De Baets B., a. others]. AOW EXIT. Warsaw 2004, (533-540).
8. Tchórzewski J., Skwierczyński P.: *Symulacja rynku energii elektrycznej w środowisku MATLAB-a i Simulink-ka*. [w:] Systems, 2004, Vol. 9.Special Issue 2/2. (1026-1036).
9. Tchórzewski J.: *Inżynieria rozwoju rynku energii elektrycznej*. Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej. Instytut Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Komitet Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Wyd. PP. Poznań 2005. (173-174).