

Jerzy Tchórzewski

**Rozwój systemu elektroenergetycznego
w ujęciu teorii sterowania i systemów**



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2013

Recenzenci

Stanisław OSOWSKI

Ryszard ZAJCZYK

Opracowanie redakcyjne i korekta

Alina KACZAK

Projekt okładki

Marcin ZAWADZKI

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-805-1

Spis treści

Ważniejsze oznaczenia i symbole	5
Wyjaśnienie podstawowych pojęć	9
1. Wprowadzenie	11
1.1. Poszukiwanie modeli rozwoju SEE	11
1.2. Uwarunkowania rozwoju systemu EE	17
1.3. Zapotrzebowanie na poszukiwanie prawidłowości rozwoju	20
1.4. Cel, zakres i treść pracy	31
2. Bezpieczeństwo i efektywność rozwoju systemów	35
2.1. Prawidłowości rozwoju KSE w latach 1946–2007	35
2.2. Bezpieczeństwo rozwoju	42
2.3. Efektywność rozwoju	53
3. Inżynieria rozwoju systemów EE	59
3.1. System EE jako system sterowania	60
3.2. Model rozwoju	66
4. Modelowanie rozwoju systemu EE	69
4.1. Modele rozwoju systemu EE	69
4.1.1. Identyfikacja rozwoju	70
4.1.2. Ocena rozwoju	72
4.2. Badanie prawidłowości rozwoju	74
4.3. Kodowanie i symulacja rozwoju	83
5. Modele rozwoju SEE na podstawie danych testowych IEEE RTS	91
5.1. Eksperyment na podstawie danych testowych IEEE RTS	94
5.2. Modele rozwoju systemu EE	96
5.3. Ocena rozwoju systemu EE	109
6. Modele rozwoju KSE	113
6.1. Identyfikacja rozwoju systemu KSE	115
6.2. Modele rozwoju KSE w przestrzeni stanów	130
6.3. Metamodel rozwoju KSE w przestrzeni stanów	139
7. Ocena rozwoju KSE	145
7.1. Analiza modeli rozwoju ze względu na bezpieczeństwo i efektywność	147
7.2. Szacowanie zapasu bezpieczeństwa rozwoju	150
7.3. Badanie prawidłowości rozwoju systemu EE	155
7.4. Kodowanie rozwoju	164
7.5. Symulacja rozwoju	166
7.6. Postępy rozwoju	170
8. Dyskusja wyników badań i wnioski końcowe	173
Literatura	177
Rozwój systemu elektroenergetycznego w ujęciu teorii sterowania i systemów. Streszczenie	187
The Development of the Power System in Terms of Control Theory and Systems. Summary	189

Ważniejsze oznaczenia i symbole

ARE S.A.	– Agencja Rynku Energii S.A.,
$A(K, q)$	– wielomian związany ze zmienną wyjściową $y_1(K, \theta)$ określający stopień wpływu sytuacji z poprzednich lat na wartość bieżącą,
$A(K, \theta)$	– macierz wewnętrznej organizacji procesu rozwoju systemu EE (inna nazwa: macierz stanu rozwoju, o wymiarze $n \times n$),
$B_i(K, q)$	– wielomian związany ze zmienną wyjściową $u_i(K, \theta)$, np. wyrażającą prognozowane zapotrzebowanie na przyrost mocy czynnej (ΔP) [kW],
$B(K, \theta)$	– macierz sterowania rozwojem (inne nazwy: macierz wymuszenia, macierz wejść) systemu EE (o wymiarze $n \times n$),
C, CN	– cenność systemu [jnu/jdo],
$C_i (i = 1, 2, \dots, n)$	– stan początkowy rozwoju struktury systemu EE,
$C(K, \theta)$	– macierz rozwoju systemu EE (inne nazwy: macierz odpowiedzi, macierz wyjść, macierz powiązań międzyokresowych, o wymiarze $q \times n$),
$D(K, \theta)$	– macierz oddziaływania otoczenia na rozwój systemu EE (inna nazwa: macierz transmisyjna, o wymiarze $q \times p$),
$F(0)$	– użyteczność początkowa systemu,
$F(K, \theta)$	– zmienna użyteczności systemu typu: nakład użyteczności $FI(K, \theta)$ lub dochód użyteczności $FD(K, \theta)$, charakteryzująca funkcję wysiłku wkładanego w rozwój systemu EE, reprezentująca stronę ekonomiczną procesu rozwoju systemu EE,
g_i	– i -ty sztuczny gen jako np. pierwiastek równania charakterystycznego lub współczynnik występujący przy odpowiedniej potędze wielomianu charakterystycznego, $i = 1, \dots, n$,
IRiESD	– Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej,
IRiESP	– Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej,
jco	– jednostka czasu operacyjnego,
jcz	– jednostka czasu zabezpieczenia,
jpo	– jednostka potencjału operacyjnego,
jnu	– jednostka nakładu użyteczności,
jpz	– jednostka potencjału zabezpieczenia,
jdo	– jednostka dochodu użyteczności,
KDT	– kontrakty długoterminowe,
KSE	– Krajowy System Elektroenergetyczny,
K_g	– kod informacyjny systemu EE,
$\overline{K^i}$	– kod informacyjny i -tego etapu rozwoju systemu EE, w którym SEE jest opisany przez $\{K^i, K^2, \dots, K^m\}$,

K_{gsi}^p	– kod genetyczny związany ze zmianami parametrycznymi i -tego pierwiastka przy zapisie pierwiastkowym,
K_{gsi}^p	– kod genetyczny związany ze zmianami strukturalnymi i -tego pierwiastka przy zapisie pierwiastkowym,
na	– liczba czynników związanych z sygnałem wyjściowym y ,
nb	– liczba czynników związanych z sygnałem wejściowym u ,
nk	– opóźnienie pomiędzy sygnałem wyjściowym y oraz wejściowym u ,
nN	– niskie napięcie,
NN	– najwyższe napięcie,
OSD	– Operator Systemu Dystrybucyjnego,
OSP	– Operator Systemu Przesyłowego,
OZE	– odnawialne źródła energii,
PO	– przedsiębiorstwo obrotu,
$PSE\ Operator\ S.A.$	– Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator S.A. (OSP),
p	– indeks górny oznaczający, że aktualny kod genetyczny opisuje zmianę parametryczną,
p_i	– i -ty pierwiastek mianownika transmitancji operatorowej (i -ty biegun),
q^i	– operator i -tego opóźnienia,
q_i	– i -ty czas etapu rozwoju w sensie długim θ , w którym pojawia się zmiana strukturalna lub zmiana parametryczna systemu,
$r(\theta)$	– wektor o informacjach technicznych, ekonomicznych oraz o wymaganiach użytkowników (wektor zakłóceń),
R	– produktywność systemu [jpo/jpz],
$R(0)$	– potencjał początkowy systemu,
$R(K, \theta)$	– zmienna potencjału typu: zabezpieczenia $RI(K, \theta)$ lub operacyjnego $RD(K, \theta)$, charakteryzująca proces rozwoju pod względem technicznym, wyznaczająca wartość techniczną (energetyczną) rozwoju systemu SEE,
SEE	– system elektroenergetyczny (lub system EE),
SD	– spółka dystrybucyjna,
SN	– średnie napięcie,
s	– indeks górny oznaczający, że aktualny kod informacyjny opisuje zmiany strukturalne,
p, z	– zmienne niezależne występujące w przekształceniach operatorowych (liczby zespolone pozwalające na operowanie przy opisach dynamiki sterowania procesem rozwoju (p – od ang. pole – bieguny, z – od ang. zero – zera),
$s(\theta)$	– wektor sterujący,
t	– czas krótki (sekundy, minuty, godziny, dni) jako zmienna niezależna dynamiki sterowania procesem rozwoju, dla $\theta = \text{const}$ czas funkcjonowania (pracy) systemu,
t	– zmienna losowa o zerowej wartości średniej i stałej wariancji,
TPA	– Third Party Access (dostęp do sieci stron trzecich),
\mathbf{th}	– macierz wyników identyfikacji systemu zapisana w formacie theta,
$UCTE$	– Union for the Coordination of Transmission of Electricity (Unia do Spraw Koordynacji Przesyłu Energii Elektrycznej),
$u(t)$	– zmienna wejściowa systemu (wejście systemu) obserwowana w dyskretnej chwili t ,
$u_i(K, \theta, t)$	– i -ta zmienna wejściowa obserwowana w czasie długim θ dla zmian w czasie krótkim t (np. u_1 – łączna istniejąca moc czynna, u_2 – prognozowane zapotrzebowanie na przyrost mocy czynnej, u_3 – łączna zainstalowana moc czynna, itp.),

$v(\theta)$	– zastępcze zakłócenie obserwowane w dyskretnej chwili θ (nieskorelowany sygnał losowy typu „biały szum” o rozkładzie normalnym, z zerową wartością średnią i stałą wariancją),
w	– indeks dolny oznaczający, że aktualny kod genetyczny dotyczy zapisu współczynnikaowego,
WN	– wysokie napięcie,
$\mathbf{W}(\theta)$	– wektor stanu (dla rozwoju systemu EE oznaczenie $K(\theta)$),
$y(t)$	– zmienna wyjściowa systemu (wyjście systemu) obserwowana w dyskretnej chwili t ,
$y_j(K, \theta, t)$	– j -ta zmienna wyjściowa obserwowana w czasie długim θ dla zmian w czasie krótkim t (np. y_1 – prognozowana moc generatorów, y_2 – prognozowane dodatkowe koszty stałe itp.),
x_i	– i -ta zmienna stanu,
x_1	– zmienna stanu wyrażająca możliwą do wyprodukowania energię elektryczną ogółem [kWh],
x_2	– zmienna stanu wyrażająca moc osiągalną generatorów ogółem [MW],
x_3	– zmienna stanu wyrażająca średnioroczną szybkość zmian mocy osiągalnej generatorów [MW/rok],
z_j	– j -ty pierwiastek licznika transmitancji operatorowe (j -te zero),
$A(K, \theta)$	– iloraz funkcji $F(K, \theta)$ i $R(K, \theta)$ określający efektywność techniczno-ekonomiczną procesu rozwoju systemu elektroenergetycznego,
$\lambda(\theta, t)$	– intensywność operacyjna systemu elektroenergetycznego [jpo/jco],
$\mu(\theta, t)$	– intensywność zabezpieczenia systemu elektroenergetycznego [jpr/jcz],
$\kappa(\theta, t)$	– cena zabezpieczenia systemu elektroenergetycznego [jnu/jpz],
$\gamma(\theta, t)$	– cena operacyjna systemu elektroenergetycznego [jpo/jdu],
θ_i	– i -ty przedział czasu długiego,
θ	– czas długi jako zmienna niezależna procesu rozwoju systemu [miesiące, kwartały, lata].

Wyjaśnienie podstawowych pojęć

Macierz formatu theta używana w środowisku MATLAB jest macierzą wyników identyfikacji modelu systemu (macierz o formacie **theta**). Zawiera ona całą informację o modelu, jego strukturze i estymatorach parametrów wraz z ich oszacowaniem za pomocą kowariancji. Macierz **theta** ma ściśle zdefiniowany wymiar. Każdy element macierzy **theta** zawiera konkretną informację. Elementy pierwszej wiersza zawierają: estymatory wariancji parametrów, przedział próbkowania T oraz parametry na , nb , nk itp. Drugi wiersz zawiera: wskaźnik FPE, rok, miesiąc, dzień, minutę i kod liczbowy polecenia, według którego wygenerowano ten model, w wierszu trzecim występują estymatory parametrów modelu w kolejności alfabetycznej: $a_1, a_2, \dots, b_0, b_1, \dots$ (przy czym pominięte są zera i jedynki występujące na początku wielomianu), wiersze od 4 do $3 + n$ zawierają oszacowanie macierzy kowariancji [116].

Pakiet System Identification Toolbox (*SIT*) ma specjalne funkcje do tworzenia modeli systemu zarówno parametrycznych, jak i nieparametrycznych na podstawie zbioru obserwacji zmiennych wyjściowych y i zmiennych wejściowych u zapisanych jako para wektorów kolumnowych tworzących wspólnie macierz z . W środowisku MATLAB istnieje ponadto możliwość tworzenia własnych rozwiązań z wykorzystaniem języka bardzo wysokiego poziomu, jakim jest język Matlab (np. m-pliki, mex-pliki) [116, 125].

Identyfikacją systemu nazywa się problem znalezienia odwzorowania macierzy danych pomiarowych $Z^N = [\text{wyjście}, \text{wejście}]$ w wektor parametrów modelu $[\Theta]$, gdzie N jest liczbą uporządkowanych obserwacji kolejnych wartości zmiennych wejściowych oraz kolejnych wartości zmiennych wyjściowych, stąd też problem identyfikacji obejmuje zarówno technikę akwizycji danych pomiarowych, jak i procedury obliczeniowe, które wykorzystywane są do przetwarzania ciągów danych liczbowych w estymatory parametrów modelu¹ [222].

Zagadnienia dotyczące bezpieczeństwa energetycznego na szczeblu Unii Europejskiej reguluje m.in. Dyrektywa 2005/89/EC z dnia 18 stycznia 2006 r. dotycząca bezpieczeństwa funkcjonowania systemu EE. Jej cele określone w art. 1 dotyczą zapewnienia m.in.:

- odpowiedniego poziomu mocy wytwórczych,
- równowagi pomiędzy produkcją i zapotrzebowaniem na energię elektryczną,
- odpowiedniego poziomu połączeń pomiędzy systemami EE krajów członkowskich.

¹ Słowo estymacja wiąże się z potrzebą przybliżenia modelu do prawdziwych (rzeczywistych) wartości (ang. *estimate* – ocena, szacowanie), co łączy się też z weryfikacją modelu (ang. *validation*).

IEEE RTS – IEEE Reliability Test System – w 1979 r. opublikowano pierwszą wersję systemu (RTS-79), którą uzupełniono w 1986 r. (RTS-79/86). Zawierała ona dane liczbowe potrzebne do obliczeń porównawczych z zakresu eksploatacji systemu EE. System testowy RTS-79/86 ma 24 węzły i 38 gałęzi oraz dwa napięcia 138 oraz 230 kV. Łączna moc zainstalowana jednostek wytwórczych wynosi 3405 MW, a obciążenie szczytowe jest równe 2850 MW. W 1996 r. opracowano nową wersję systemu o nazwie IEEE RTS-96², która składa się z trzech obszarów: 73 węzły, 120 gałęzi, 96 jednostek wytwórczych o łącznej mocy 10 215 MW i obciążeniu 8550 MW [2, 8, 10].

² IEE RTS 1996 – testowy przykład obliczeniowy afiliowany przez IEEE [95, 126].

1. Wprowadzenie

1.1. Poszukiwanie modeli rozwoju SEE

Badanie prawidłowości rozwoju systemu elektroenergetycznego³, a więc między innymi analiza relacji długookresowych w kategoriach teorii sterowania i systemów wiąże się z poszukiwaniem zmian strukturalnych oraz zmian parametrycznych, zarówno ze względu na możliwości wzrostu efektywności, jak i potrzeby wzmocnienia poziomu bezpieczeństwa systemu. Ujęcie rozwoju systemu EE jako rozwijającego się systemu sterowania sprowadza się do potrzeby uzyskania katalogu modeli w przestrzeni stanów dla różnych etapów rozwoju $\Delta\theta_i$ (z uwzględnieniem czasu długiego θ), aby w następstwie identyfikacji rozwoju, a więc identyfikacji zmian strukturalnych oraz zmian parametrycznych modeli rozwoju SEE otrzymać model rozwoju modelu systemu EE – specyficzny metamodel rozwoju SEE. Kierunek badań dotyczący poszukiwania metamodelu systemu jest rozwijany w ramach prac badawczych z zakresu metod sztucznej inteligencji, a zwłaszcza z zakresu systemów ekspertowych, gdzie przy budowie bazy wiedzy coraz częściej poszukuje się nie pojedynczego scenariusza przebiegu rozwiązania zadania, lecz bazy scenariuszy, a nawet metamodelu do generowania scenariuszy (bazy modeli).

Identyfikacją systemu nazywa się problem znalezienia odwzorowania macierzy danych pomiarowych $\mathbf{Z}^N = [\mathbf{wyjście}, \mathbf{wejście}]$ w wektor parametrów modelu $[\Theta]$, gdzie N jest liczbą uporządkowanych obserwacji kolejnych wartości zmiennych wejściowych oraz kolejnych wartości zmiennych wyjściowych, stąd też problem identyfikacji obejmuje zarówno technikę akwizycji danych pomiarowych, jak i procedury obliczeniowe, które wykorzystuje się do przetwarzania ciągów danych liczbowych w estymatory parametrów modelu⁴ [222].

³ Dalej: system EE lub SEE.

⁴ Przy czym słowo estymacja wiąże się z potrzebą przybliżenia modelu do prawdziwych (rzeczywistych) wartości (ang. *estimate* – ocena, szacowanie), co łączy się też z weryfikacją modelu (ang. *validation*).

W celu uzyskania odpowiednich modeli rozwoju systemu EE w przestrzeni stanów przeprowadzono najpierw identyfikację rozwoju SEE w środowisku MATLAB z wykorzystaniem System Identification Toolboxa⁵ dla kolejnych kroczących etapów rozwoju (z postępem jednego roku), za pomocą danych liczbowych z lat 1946–2007, co umożliwiło uzyskanie katalogu macierzy **theta**⁶ (modele arx).

Wyniki identyfikacji zostały wykorzystane do utworzenia katalogu modeli rozwoju systemu EE w przestrzeni stanów. Następnie, stosując aparat matematyczny teorii sterowania i systemów, badano zachowanie się rozwoju systemu EE z wykorzystaniem Control System Toolboxa⁷, m.in. za pomocą metody linii pierwiastkowych Evansa do wizualizacji zmian strukturalnych i parametrycznych rozwoju SEE. W efekcie końcowym związano zagadnienie rozwoju systemu EE z ruchem pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z lub s i tym samym uzyskano informację o zmianach parametrycznych oraz o zmianach strukturalnych modelu rozwoju systemu EE, które wykorzystano w procesie identyfikacji metamodelu rozwoju SEE.

Prezentowane ujęcie rozwoju systemu EE jako systemu sterowania nie jest zupełnie nowe, gdyż w elektroenergetyce od wielu już lat podejmowane są próby ujęcia natury systemu EE jako systemu sterowania, które dotyczą wykorzystania teorii sterowania i systemów w zagadnieniach budowy modeli sterowania pracą systemu EE, modeli badania niezawodności, modeli badania stabilności, modeli regulacji napięciowej, kątowej, lokalnej oraz globalnej, a nawet modeli eksploatacji itp. [8, 9, 61, 62, 65, 69, 71, 76, 78, 81–83, 92, 102, 118, 133, 147, 160, 211, 220]. Od wielu już lat prowadzone są także badania w zakresie estymacji wektora stanu dla różnych zagadnień szczegółowych z elektroenergetyki [1, 94, 96, 117, 167, 174]. Podejmowano także próby badań identyfikacyjnych, zwłaszcza na potrzeby prognozowania, planowania i programowania rozwoju systemu EE [9, 31, 69, 71, 77, 99–104].

Do pionierskich prac polskich z tego zakresu należą m.in. prace Jacka Malki dotyczące poszukiwania modeli gry systemu EE z naturą⁸ [100, 104, 106] oraz praca Barbary Bolkowskiej w zakresie planowania systemu EE w ujęciu teorii sterowania [8].

⁵ Dalej: SIT, pakiet *SIT* ma specjalne funkcje do tworzenia modeli systemu zarówno parametrycznych, jak i nieparametrycznych na podstawie zbioru obserwacji zmiennych wyjściowych (y) i zmiennych wejściowych (u) zapisanych jako dwa wektory kolumnowe, tworzące wspólnie macierz z danych pomiarowych. W środowisku MATLAB istnieje ponadto możliwość tworzenia własnych rozwiązań z wykorzystaniem języka bardzo wysokiego poziomu, jakim jest język Matlab (np. m-pliki, mex-pliki) [116, 125].

⁶ Dalej: **th**.

⁷ Dalej: CST.

⁸ Gry z naturą wykorzystywano już pod koniec XX wieku do planowania rozwoju systemu SEE. Takie podejście zawarte jest między innymi w pracy Malko J., Pospolita B., Sękowski J., Stilpnopulos D., *Metody planowania układów elektroenergetycznych w warunkach ryzyka*, IE PWR., Raport Serii Sprawozdanie Nr 258, Wrocław 1983 [106].

Ciekawą pozycją literatury przedmiotu w tym względzie jest praca Franciszka Krawca *Ewolucja planowania rozwoju elektroenergetyki w ramach deregulacji* [77], w której zasygnalizowano zmianę w sposobie planowania rozwoju elektroenergetyki podczas zmian systemowych zachodzących we wdrażaniu programów deregulacji. Na uwagę zasługują też prace R.M. Sorvey oraz D. Stilpnopulosa dotyczące rozwoju systemu EE jako systemu sterowania, gdzie przez rozwój rozumie się ciąg zmian jego stanów [149, 154].

W tym zakresie przeprowadzone badania są w pewnym stopniu kontynuacją badań nad poszukiwaniem modelu SEE jako systemu sterowania, tylko w tym przypadku w zakresie rozwoju SEE, a nie w zakresie jego pracy (funkcjonowania). Ponadto badania nad rozwojem systemu EE wpisują się w nurt badań nad poszukiwaniem modeli fabryk bezludnych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji. Dotyczy to zwłaszcza poszukiwania elementów odpowiedzialnych za poziom sterowania i stopień wewnętrznej organizacji rozwoju SEE. W tym zakresie niniejsza praca wykorzystuje teorię sterowania i systemów w ujęciu Tadeusza Kaczorka z jednej strony [62, 63] oraz teorię planowania rozwoju Jacka Malki z drugiej strony [100–106], a zwłaszcza w zakresie poszukiwania modeli natury rozwoju systemu EE, w którą jest on wyposażony jako system sterowania, czego wyrazem są zmiany jego topologii i konstrukcji.

Do tej pory uzyskiwano modele prognostyczne, planistyczne, czy programistyczne w wyniku zastosowania algorytmów jednoscenariuszowych rozwoju systemu EE i dopiero na ich podstawie poszukiwano nowych stanów systemu EE. W literaturze przedmiotu brak jest wyników badań identyfikacyjnych rozwoju modelu SEE z wykorzystaniem teorii sterowania i systemów oraz z wykorzystaniem algorytmów wieloscenariuszowych. Z tych względów niniejsza praca może być uzupełnieniem teorii i praktyki badania rozwoju systemu EE w zakresie prowadzenia prac projektowych rozwoju SEE ze względu na możliwości wzrostu efektywności systemu oraz na potrzeby wzmocnienia poziomu bezpieczeństwa z jednej strony oraz inspiracją dla badań w zakresie fabryk bezludnych pod kątem poszukiwania wzrostu stopnia wewnętrznej organizacji systemu oraz poszukiwania wyższych poziomów sterowania rozwojem systemów wielkich z drugiej strony.

Zagadnienia dotyczące bezpieczeństwa energetycznego na szczeblu Unii Europejskiej regulują dwie dyrektywy, w tym zwłaszcza Dyrektywa 2005/89/EC z dnia 18 stycznia 2006 roku dotycząca bezpieczeństwa funkcjonowania systemu EE. Jej cele określone w art. 1 dotyczą zapewnienia m.in.:

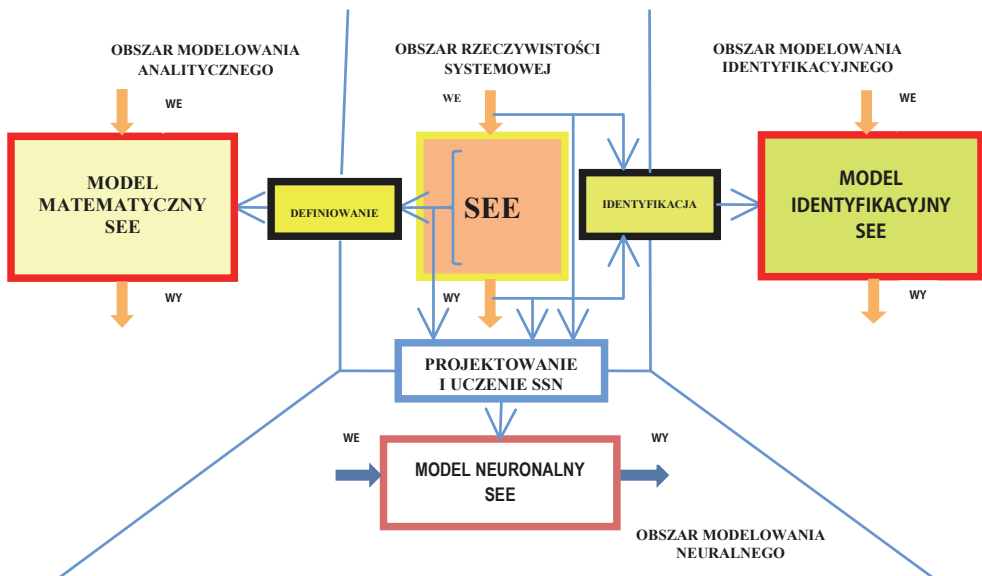
- odpowiedniego poziomu mocy wytwórczych,
- równowagi między produkcją i zapotrzebowaniem na energię elektryczną,
- odpowiedniego poziomu połączeń pomiędzy systemami EE krajów członkowskich.

W naukach technicznych coraz częściej korzysta się z modelu systemu, w tym z modelu rozwoju systemu EE, przeprowadzając na nim eksperymenty badawcze zamiast przeprowadzać je na systemie. Najczęściej wykorzystywanie modelu zamiast

systemu EE jest podyktowane potrzebą zmniejszenia kosztów bądź uzyskania wyników badań w sytuacjach, które na rzeczywistym systemie są niemożliwe do przeprowadzenia.

Do modelu systemu prowadzą różne drogi. Najczęściej korzysta się z modelowania, a więc ze sposobu przybliżonego odtwarzania najważniejszych właściwości systemu. Takie ujęcie modelowania łączy w sobie modelowanie klasyczne, a więc tworzenie modelu matematycznego na podstawie praw rządzących systemem rzeczywistym (praw fizycznych, ekonomicznych itp.) zwane modelowaniem analitycznym oraz modelowanie identyfikacyjne, najczęściej nazywane po prostu identyfikacją systemu [15, 19, 27, 57, 58, 70, 83, 102, 103, 119, 152, 200, 213, 219, 222].

W ostatnich latach wzrosło także zainteresowanie możliwością wykorzystania modelowania neuronowego do zbudowania modelu rozwoju systemu EE [124,160]. W sposób schematyczny podzielono wymienione modelowanie na trzy obszary: modelowanie analityczne, modelowanie identyfikacyjne (identyfikację systemów) oraz modelowanie neuronalne (projektowanie sztucznych sieci neuronowych jako schematów zastępczych systemów), co przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1. Sytuacja systemowa modelowania systemu EE: analitycznego (matematycznego), identyfikacyjnego (eksperymentalnego) oraz neuronalnego (projektowego).

Źródło: Opracowanie własne

Identyfikacja systemów jest gałęzią modelowania systemów, w tym systemów dynamicznych oraz systemów rozwoju, w której model systemu EE jest tworzony na podstawie danych eksperymentalnych, przy czym m.in. w pracy [148] identyfikację

systemów ujęto jako gałąź modelowania systemów dynamicznych, wyróżniając dwa sposoby konstruowania modeli systemów: modelowanie matematyczne jako podejście analityczne oraz identyfikację systemów – podejście eksperymentalne.

Identyfikację stosuje się zwłaszcza wówczas, gdzie modelowanie analityczne jest niemożliwe do jednoznacznego przeprowadzenia lub uzyskiwane modele są zbyt złożone [15, 70, 79, 222]. W przypadku poszukiwania rozwoju modelu systemu EE (modelu rozwijającego się) na potrzeby projektowania rozwoju SEE, a nawet na potrzeby prognozowania, planowania oraz programowania (w zależności od skali problemu i horyzontu czasu) skuteczną drogą uzyskania modelu rozwoju systemu EE jest droga identyfikacji. Istotną różnicą w stosunku do stosowanych dotychczas podejść jest przede wszystkim fakt przeprowadzenia identyfikacji systemu EE, a nie stosowania modelowania analitycznego rozwoju w celu uzyskania modelu rozwoju SEE.

Oryginalnym rozwiązaniem jest opracowanie katalogu modeli rozwoju SEE, a następnie na bazie modeli uzyskanie metamodelu rozwoju systemu EE możliwego do wykorzystania w prognozowaniu, planowaniu oraz programowaniu rozwoju SEE. Proces ten nazwano procesem projektowania rozwoju (projektowane są parametry i struktura modelu). Ponadto uzyskany model rozwoju w przestrzeni stanów umożliwia generowanie wektora stanu rozwoju SEE, co przekłada model rozwoju na możliwość wykorzystania bogatego dorobku teorii sterowania i systemów w prowadzonych badaniach prawidłowości rozwoju SEE jako systemu sterowania, w związku z tym umożliwia projektowanie rozwoju SEE w postaci systemu rozwijającego się.

Do istotnych i oryginalnych osiągnięć należy m.in. problematyka związania zagadnienia rozwoju SEE z ruchem pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z lub s oraz możliwość prowadzenia badań wrażliwościowych pod kątem efektywności i bezpieczeństwa rozwoju, a także wzrostu stopnia wewnętrznej organizacji rozwoju i poziomu sterowania rozwojem. Warto dodać, że uzyskany w wyniku identyfikacji model rozwoju SEE w efekcie końcowym zostaje sprowadzony do modelu w postaci sztucznego kodu genetycznego systemu EE, który umożliwia w systemowy sposób generowanie populacji początkowej dla algorytmów ewolucyjnych, a zastosowanie sztucznych sieci neuronowych SOM umożliwia systemową wizualizację wiedzy o rozwoju systemu w postaci map wiedzy⁹.

⁹ Autor rozprawy opracował metodę poszukiwania krzepkich stanów systemów oraz tak zwany Systemowy Algorytm Ewolucyjny (dalej: SAE) bazujący na populacji początkowej generowanej na kodzie informacyjnym budowanym na podstawie informacji wydobywanej z modelu systemu z wykorzystaniem tak zwanej funkcji krzepkości [46, 53, 177, 183]. Wykorzystał sztuczne sieci neuronowe samoorganizujące się (dalej: SOM) do opracowania metody tworzenia map wiedzy za pomocą systemowych sieci neuronowych, z uwzględnieniem rozwoju systemu [72, 123, 181].

W niniejszej monografii badania ograniczono do rozwoju systemu EE z wykorzystaniem teorii sterowania i systemów, a zwłaszcza do:

- identyfikacji SEE w celu uzyskania katalogu modeli SEE dla kolejnego przedziału czasu długiego,
- identyfikacji modelu SEE w celu uzyskania na tej bazie metamodelu rozwoju SEE,
- oceny rozwoju systemu SEE ze względu na efektywność i bezpieczeństwo rozwoju.

W pierwszej kolejności przeprowadzono identyfikację SEE różnych etapów rozwoju, uzyskując statyczne modele rozwoju, a na ich podstawie dynamiczny model rozwoju SEE, będący w gruncie rzeczy metamodelem rozwoju SEE. W procesie identyfikacji wykorzystano dane statystyczne dla okresu identyfikacyjnego 30 lat z krokiem jednego roku [44, 140, 151, 170–174]. Badania przeprowadzono w środowisku MATLAB i Simulink z wykorzystaniem SIT oraz CST [14, 66, 67, 146, 166–174]. W procesie analizy ocenowej wykorzystano podstawy teorii konstrukcji oraz eksploatacji systemów [4, 20, 49, 56, 125, 148, 150–152, 176–178, 206], a ocenę rozwoju przeprowadzono ze względu na efektywność i bezpieczeństwo rozwoju [4, 16, 34, 59, 92, 110, 132, 134, 156, 163, 164, 173, 174, 200, 208, 209, 217, 220, 224]. W efekcie końcowym pod kątem zmian parametrycznych oraz zmian strukturalnych pokazano możliwe kierunki rozwoju SEE na wybranych przykładach liczbowych, zwłaszcza związane ze wzrostem wewnętrznej organizacji systemu SEE oraz poziomem sterowania rozwojem.

W wyniku identyfikacji uzyskano modele w postaci macierzy **th** (modele arx) oraz w postaci równań stanu i wyjścia (modele ss) dla wybranych zmiennych wejściowych oraz wyjściowych. Identyfikację przeprowadzono dla 31 okresów rozwoju obejmujących po 30 lat (z postępowaniem jednego roku) Krajowego Systemu Elektroenergetycznego¹⁰, uzyskując ostatecznie macierze **A**, **B**, **C** i **D** występujące w równaniach stanu. Następnie zbadano zmiany zarówno stopni, jak i zmiany wartości elementów macierzy **A** odpowiedzialnej za stopień wewnętrznej organizacji rozwoju oraz macierzy **B** odpowiedzialnej za poziom sterowania. Definiując pojęcie efektywności rozwoju, zbadano efektywność rozwoju dla całego okresu rozwoju systemu EE jako systemu zagregowanego, jak też dla poszczególnych etapów rozwoju, a definiując pojęcie bezpieczeństwa rozwoju, zbadano poziomy bezpiecznego rozwoju systemu EE. Na podstawie zagadnienia dotyczącego związania rozwoju z ruchem pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej *s* lub z przeprowadzono badania ocenowe, w tym badania efektywności rozwoju, badania bezpieczeństwa rozwoju oraz wizualizację rozwoju parametrycznego oraz strukturalnego systemu EE z wykorzystaniem środowiska MATLAB, a zwłaszcza Simulink.

¹⁰ Dalej: KSE.

1.2. Uwarunkowania rozwoju systemu EE

Zapewnienie bezpiecznej i efektywnej pracy SEE wymaga od wszystkich podmiotów włączonych w eksploatację i rozwój systemu funkcjonowania zgodnie z ustawą z dnia 10 kwietnia 1997 roku *Prawo energetyczne*¹¹, a także zgodnie z ustaleniami wynikającymi z jej przepisów wykonawczych [56, 65, 137, 190]. Powołanie *Urzędu Regulacji Energetyki (URE)*, przeniesienie kompetencji Ministra Finansów w zakresie stanowienia cen energii elektrycznej na *Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki*, rozpoczęcie koncesjonowania działalności oraz zatwierdzania taryf przedsiębiorstw energetycznych, a także postępująca prywatyzacja w sektorze energetyki stanowią kluczowe wyznaczniki decydujące o przyszłości SEE [16, 22, 119, 132, 135, 179, 189].

W celu wprowadzenia rozwiązań *upe* należy stworzyć warunki do zrównoważonego rozwoju kraju, zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego, oszczędnego i racjonalnego użytkowania paliw i energii, rozwoju konkurencji, przeciwdziałania negatywnym skutkom naturalnych monopolii, uwzględniania wymogów ochrony środowiska, zobowiązań wynikających z umów międzynarodowych oraz równoważenia interesów przedsiębiorstw energetycznych i odbiorców paliw i energii na rynku hurtowym i detalicznym.

Wyróżnia się trzy podstawowe procesy związane z uczestnictwem w hurtowym rynku energii: planowanie długoterminowe, planowanie średnioterminowe, krótkoterminowe bilansowanie. Dotyczą one tego samego zagadnienia konstruowania portfela kontraktów, ale z różnej perspektywy czasu. Długoterminowa strategia na rynku hurtowym obejmuje horyzont czasu jednego roku i dłuższy. Średnioterminowa praca na rynku polega na planowaniu, optymalizacji i uzgadnianiu z partnerami handlowymi grafików na miesiąc dostaw energii elektrycznej, a także negocjacji porozumień transakcyjnych na rynku. Wykonuje się najpierw prognozę zapotrzebowania energetycznego na rozpatrywany miesiąc, a maksymalnie na kwartał do przodu.

Natomiast grafikowanie w cyklu miesięcznym w miarę zbliżania się terminów miesięcznych realizowanych dób handlowych zmieniane jest w krótkoterminowe bilansowanie zapotrzebowania (dekadowe wyprzedzenie, uzgadnianie dobowo-godzinowych grafików dostaw energii). Umiejętność budowy prognoz ma duże znaczenie zarówno dla zarządzania strategicznego, jak i dla zarządzania operacyjnego. Do celów zarządzania strategicznego szczególnie przydatne są prognozy długookresowe, o dużym wyprzedzeniu czasowym. W zarządzaniu operacyjnym większe znaczenie ma wiedza na temat najbliższej przyszłości pozwalająca podejmować decyzje dotyczące bieżącego sterowania pracą systemu EE. Natomiast bilansowanie jest wykorzystywane w działalności taktycznej, zwłaszcza w kierowaniu bieżącą pracą SEE [4, 10, 18, 19, 42, 91, 97–101, 111, 139, 215, 221].

¹¹ Dalej: *upe*, Dz.U. z 2006 r., Nr 89 z 2006 r., poz. 625, ze zm.

Cechami charakterystycznymi rozwoju strukturalnego oraz rozwoju parametrycznego sektora elektroenergetyki jest między innymi:

- dezintegracja pionowa przedsiębiorstw energetycznych,
- postępująca konsolidacja pozioma,
- zastępowanie silnej ingerencji państwa mechanizmami rynkowymi,
- głęboka prywatyzacja przedsiębiorstw elektroenergetyki,
- zmiany w systemie regulacji energetyki,
- rozwój rynków fizycznych i finansowych, oferujących nie tylko możliwość handlu energią elektryczną, w tym kontraktami fizycznymi oraz usługami energetycznymi, ale również instrumentami finansowymi, takimi jak na przykład kontrakty typu *futures*, czy też *opcje* [113, 136].

W zagadnieniach identyfikacji poszukuje się modelu systemu EE, który dla konkretnych wartości zmiennych wejściowych i zmiennych wyjściowych, w sensie przyjętej metody identyfikacji, umożliwi osiągnięcie najlepszej (optymalnej) zgodności między zmiennymi obserwowanymi (w naszym przypadku empirycznymi) oraz zmiennymi generowanymi przez model. Algorytm procesu identyfikacji jest procesem iteracyjnym, który sprowadza się do wyboru struktury modelu, wykonania eksperymentu identyfikacyjnego (w tym przypadku eksperymentu biernego), wyznaczenia parametrów modelu wybraną metodą identyfikacji i przeprowadzenia oceny zgodności właściwości dynamicznych modelu i rzeczywistego systemu przez porównanie zgodności zachowania się modelu w stosunku do systemu, przy pobudzeniu takim samym sygnałem wejściowym [15, 70, 174, 221]. Proces prowadzony jest do momentu aż osiągnięta zostanie optymalna zgodność modelu i systemu. Identyfikację systemu zarówno w eksperymencie pierwszym opartym na danych testowych IEEE RTS, jak i w eksperymencie drugim dotyczącym KSE przeprowadzono w środowisku MATLAB i Simulink, z wykorzystaniem przybornika SIT, dla umownych okresów pomiarowych 20 i 30 lat, z krokiem jednego roku.

Przyjęcie do oceny rozwoju kryteriów rozwoju tego typu jak bezpieczeństwo rozwoju¹² [3, 17, 34, 59, 65, 74, 93, 100, 109, 131, 134, 152, 171, 173, 176, 195, 208,

¹² Kryterium bezpieczeństwa rozwoju wykorzystywane w niniejszej monografii zostało po raz pierwszy sformułowane przez Autora w 1988 roku i opublikowane w pracy *Bezpieczeństwo rozwoju systemów sterowania* [Bezpieczeństwo Systemów, Kiekrz 04–07.X.1988, ITWL, 200–207], a następnie w poszerzonej wersji opublikowane w artykule *Niezawodność systemu organizacji transportu jako problem prawidłowego zabezpieczenia działania* [Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport, PW, Warszawa 1993]. Wyniki badań opublikowane przez Autora z zakresu bezpieczeństwa systemów były ponadto cytowane w pierwszej w Polsce książce z zakresu bezpieczeństwa systemów autorstwa prof. Krystyny Ważyńskiej-Fiok oraz prof. Jerzego Jadźwińskiego *Bezpieczeństwo systemów* [J. Jadźwiński, K. Ważyńska-Fiok, PWN, Warszawa 1993]. Do zagadnień bezpieczeństwa systemów Autor wrócił z chwilą pojawienia się ustawy o zarządzaniu kryzysowym w 2007 roku, a wyniki swych badań opublikował m.in. w rozdziale *Systemowy model zarządzania kryzysowego w dobrym państwie* [T. Jemioła oraz

209, 213, 218, 223], obejmujące ustawowo także ekologiczny aspekt [3, 10, 58, 127, 135, 209] oraz efektywność rozwoju [6, 65, 95, 125, 127, 141, 151, 152, 162, 170, 202, 208, 217], umożliwia ocenę rozwoju SEE w czasie długim θ i w ten sposób pozwala m.in. na wyspecyfikowanie sygnałów ostrzegawczych dla projektantów, a nawet prognostyków, planistów lub programistów, czy też strategów rozwoju SEE¹³.

Definicję bezpieczeństwa rozwoju systemu EE oraz w ślad za tym bezpieczeństwa rozwoju modelu systemu EE sformułowano na bazie nowoczesnej teorii sterowania procesem eksploatacji Roberta Staniszewskiego [153] w odniesieniu do definicji bezpieczeństwa pracy systemu EE sformułowanego m.in. przez Jacka Malkę [100–106] jako stan wystarczającej zdolności systemu EE do samostmej obrony przed zagrożeniami, a więc jego stan granicznej zdolności funkcjonowania, który dla systemów rozwoju powinien być wyznaczany możliwie z dużym prawdopodobieństwem zarówno w czasie krótkim t do celów funkcjonowania systemu EE, jak i w czasie długim θ do celów rozwoju systemu EE. A zatem stanem bezpiecznym pracy systemu EE jest taki stan, w którym w czasie eksploatacji (w czasie krótkim t) możliwe są zmiany parametryczne systemu, ale nie może dojść do zmian strukturalnych, a więc w tym ujęciu granicą bezpieczeństwa jest moment przejścia od zmian parametrycznych do zmian strukturalnych, co dotyczy zwłaszcza wielkości wejściowych oraz wyjściowych systemu. Można za Robertem Staniszewskim [153] zauważyć, że okresowi eksploatacji systemu w czasie $\Delta\theta$ towarzyszą zmiany parametryczne aż do chwili, w której możliwe są zmiany strukturalne. W czasie eksploatacji systemu do zmian strukturalnych nie można dopuścić, bo wiąże się z nimi ubytek sprawnych elementów lub nawet podzespołów, czy urządzeń, co w konsekwencji powoduje naruszenie bezpieczeństwa funkcjonowania systemu EE, dlatego też system lub wydzielona jego część (podsystem) oddawany jest wcześniej do remontu lub wymiany na nowy.

W przypadku rozwoju systemu EE na wymienionej podstawie budowany jest zapas bezpieczeństwa rozwoju systemu EE, a więc wyznaczone na podstawie punktów granicznych pasmo możliwych zmian parametrycznych i strukturalnych systemu, w granicach którego nie dojdzie do naruszenia bezpieczeństwa funkcjonowania systemu EE w przyszłości. W dużym uproszczeniu można zatem powiedzieć, że w tym rozumieniu pojęcie bezpieczeństwa rozwoju systemu EE jest

K. Rajchel, (red. nauk.), *Bezpieczeństwo narodowe i zarządzanie kryzysowe w Polsce w XXI wieku – wyzwania i dylematy*, Wydawnictwa Wyższej Szkoły Informatyki, Administracji i Zarządzania, Warszawa 2007], oraz w artykule *Development of Electric Power System from the Point of View of Safety* [Proceedings of 2008 IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, IEEE Xplore, 2008].

¹³ Zgodnie z opracowaną autorską inżynierią rozwoju systemów zamieszczoną między innymi w pracach [190, 193, 197, 199] warto podkreślić, że chodzi o kryterium oceny rozwoju, które nie jest kryterium optymalizacji rozwoju.

uogólnieniem pojęcia bezpieczeństwa dla systemu eksploatacji w sensie odnowy systemu¹⁴. Zauważono przy tym, że wielkości zmiennych stanu jako funkcje czasu długiego cechują się wiedzą o stanie dotychczasowego rozwoju, stąd na ich podstawie oraz na podstawie wiedzy zawartej w macierzy A można ustalać granice bezpiecznego rozwoju SEE.

Z kolei efektywność funkcjonowania systemu EE i efektywność rozwoju SEE została zdefiniowana na bazie pojęcia efektywności techniczno-ekonomicznej $\lambda(K, \theta)$ wykorzystywanej w teorii eksploatacji systemów jako iloraz funkcji określającej proces sterowania pod względem technicznym oraz funkcji wysiłku reprezentującej stronę ekonomiczną procesu eksploatacji [70, 153]. Podane pojęcie rozszerzono na wszystkie możliwe stany rozwoju systemu EE, definiując różne pojęcia efektywności rozwoju.

Pod kątem rozumienia efektywności rozwoju systemu EE oraz bezpieczeństwa rozwoju systemu EE najważniejszym walorem użyteczności proponowanej metody jest możliwość generowania modeli rozwoju systemu EE, a nie tylko prognozowanie nowych stanów SEE z uwzględnieniem kryterium efektywności rozwoju oraz kryterium bezpieczeństwa rozwoju. W tym celu zdefiniowano pojęcie efektywności ogólnej rozwoju oraz cztery rodzaje efektywności szczegółowych, w tym pojęcie efektywności operacyjnej. Następnie, wykorzystując zaproponowane definicje efektywności badano efektywność rozwoju SEE i odpowiednio efektywność modelu rozwoju SEE, uzyskując odpowiednie przebiegi efektywności rozwoju. Zdefiniowano także pojęcie bezpieczeństwa rozwoju SEE i odpowiednio bezpieczeństwo rozwoju modelu systemu, uzyskując odpowiednie przebiegi bezpiecznego rozwoju SEE i jego modelu.

1.3. Zapotrzebowanie na poszukiwanie prawidłowości rozwoju

Poszukiwanie modeli rozwoju systemu EE jest obecnie aktualne w związku z sygnalizowaną od dłuższego czasu potrzebą wzmocnienia poziomu bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju oraz w związku z koniecznością zwiększenia efektywności SEE, co podyktowane jest między innymi pakietem 3×20 oraz pracami nad modelem makroekonomicznym KSE [17, 58, 62, 65, 100, 126, 127, 132, 135, 213], gdzie uważa się, że *model makroekonomiczny stanowi jedno z podstawowych pojęć makro-*

¹⁴ System eksploatacji składa się z dwóch podsystemów: systemu użytkowania obiektu (w czasie jego funkcjonowania) oraz systemu odnowy obiektu (jego remontów) [70, 153].

ekonomii i oznacza uproszczone opisy zachowania i wzajemnych interakcji zachodzących w rzeczywistości gospodarczej (...) ¹⁵.

Prowadzone badania nad rozwojem systemu EE wpisują się ponadto w proces poszukiwania wewnętrznego zorganizowania systemów technicznych, funkcjonujących w coraz to większym stopniu jako systemy sterowania rozwijające się, do których zaliczany jest oprócz systemu teleinformatycznego, także system elektroenergetyczny, które traktowane są obecnie jako fabryki bezludne ¹⁶ [53, 60, 75, 138, 167, 177, 224, 225].

Poszczególne składowe pakietu 3×20 są rozpatrywane łącznie dla trzech końcowych rynków: energii elektrycznej, ciepła oraz paliw ¹⁷:

- jednostkowe zużycie energii (obniżenie energochłonności produkcji) o 20% do 2020 roku zakładano, że jest w pełni osiągalne wobec dużego tempa wzrostu PKB ¹⁸,
- sumaryczne obniżenie emisji CO₂ o 20%,
- zwiększenie udziału energii odnawialnej o 20% w strukturze wytwarzania.

Ponadto pracownie projektowe elektroenergetyki, wraz z rozwojem możliwości wykorzystywania tego typu środowisk narzędziowych, jak środowisko MATLAB i Simulink z jego toolboxami, takimi jak SIT oraz CST, oczekują na nowe metody i modele projektowania rozwoju systemu EE, a nie tylko na komputerowe wspomaganie prognozowania, planowania czy programowania rozwoju [14, 64, 66, 67, 114, 124, 142, 146, 221]. Faktem jest, iż ze względu na obecny stan rozwoju SEE ważnym i potrzebnym zagadnieniem jest uwzględnienie zwiększającego się stopnia różnorodności technologii wytwórczych, oraz nakładanych przez umowy międzynarodowe ograniczeń emisyjnych, gdzie, oprócz zmian parametrycznych wynikających między innymi z unowocześniania technologii, występują zmiany strukturalne, poza procesem transformacji systemowej, powodowane różnymi czynnikami, a między innymi zwiększającym się stopniem różnorodności technologii wytwórczych, technologii przesyłowych, rozdzielczych, a nawet odbiorczych [5, 7, 29, 30, 37, 73, 78, 80, 81, 85, 105, 108, 112, 128, 133, 147, 184, 185, 191, 201].

¹⁵ *Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju*. Projekt badawczy zamawiany Nr PBZ-MEiN-1/2/2006. Konsorcjum Politechnik: Gdańskiej, Śląskiej, Warszawskiej i Wrocławskiej. Gdańsk, Gliwice, Warszawa, Wrocław, grudzień 2008.

¹⁶ Fabryka bezludna – elastyczny proces produkcyjny funkcjonujący praktycznie bez udziału ludzi, lub gdy rola człowieka jest ograniczona do sterowania i monitorowania pracy urządzeń, elementów itp. [167, 169, 177, 178].

¹⁷ Optymistycznie zaplanowano przy tym, iż już po roku 2012 wytwórcy energii będą pokrywać 30% kosztów uprawnień do emisji CO₂ i stopień pokrycia tych kosztów przez wytwórców energii będzie zwiększony do 100% w roku 2020. W ten sposób koszty pokrywane przez odbiorcę końcowego mogą wzrosnąć aż o 55% w stosunku do roku 2007 [3, 100, 145, 207, 212, 213, 223].

¹⁸ W związku z obecnym kryzysem gospodarczym zaczyna budzić poważne wątpliwości.

Ponadto w obwieszczeniach Ministra Gospodarki¹⁹ pojawiają się wyniki prac analityczno-prognostycznych, jak też odpowiednie raporty, w zakresie realizacji celów strategicznych i osiąganych wyników w zakresie funkcjonowanie systemu EE²⁰. Także w przeprowadzonym eksperymencie pierwszym, dotyczącym modelu IEEE RTS, występują zmienne wejściowe wyrażające między innymi: łączną istniejącą moc czynną, łączną prognozę zapotrzebowania na przyrost mocy czynnej, łączną liczbę zainstalowanych generatorów, łączne istniejące koszty stałe oraz łączne koszty zmienne oraz zmienne wyjściowe, takie jak: łączna prognozowana moc generatorów, łączne prognozowane dodatkowe koszty stałe oraz zmienne, co sprawia, że zarówno w modelach rozwoju systemu EE, jak i w rozwoju samego modelu pojawiają się elementy wynikające ze wszystkich czynników jednocześnie, tylko ujęte w sposób syntetyczny.

Podobnie w eksperymencie drugim, dotyczącym identyfikacji KSE²¹, występują tego typu zmienne wejściowe oraz wyjściowe, jak: produkcja energii elektrycznej ogółem oraz ponoszone koszty ogółem, co w sposób syntetyczny ujmuje wpływ innych czynników, w tym zmian technologicznych na rozwój systemu EE. Należy dodać, że w przypadku próby wykorzystania modelu w zagadnieniach prognozowania rozwoju systemu EE ze względu na rozwój *małej energetyki*, czy z potrzeby uwzględniania wpływu różnych czynników z zakresu ochrony środowiska, w tym ograniczeń emisyjnych, należałoby uzyskać model ze zmiennymi wejściowymi i wyjściowymi bardziej szczegółowymi, co nie było celem badań prezentowanych w niniejszej monografii.

¹⁹ Por. Obwieszczenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 01 lipca 2005 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2025 r. (M.P. z dnia 22 lipca 2005 r.), Obwieszczenie Ministra Gospodarki z dnia 12 grudnia 2007 r. w sprawie raportu oceniającego postęp osiągnięty w zwiększaniu udziału energii elektrycznej wytwarzanej w wysokosprawnej kogeneracji w całkowitej krajowej produkcji energii elektrycznej (M.P. z dnia 4 stycznia 2008 r.)

²⁰ W niniejszej monografii podjęto ten kierunek badań, jednakże w prezentowanych przykładach eksperymentów badawczych wprost nie uwzględniono między innymi energetyki odnawialnej, jak też problematyki ograniczeń emisyjnych, oraz wpływu powstającego rynku energii na zagadnienia technologiczne, niemniej tego typu eksperyment możliwy jest do przeprowadzenia i związany jest jedynie z dostępem do odpowiednich danych liczbowych, przynajmniej z kilkunastu ostatnich lat w układzie kwartalnym, lub dostępem do odpowiednich danych liczbowych z kilku ostatnich lat w układzie miesięcznym. Jest to ponadto zagadnienie bardzo złożone, możliwe do rozwiązania przez większy zespół badawczy, który ponadto musiałby dysponować bardzo szczegółowymi danymi liczbowymi z zakresu prowadzonych badań.

²¹ KSE – Krajowy System Elektroenergetyczny obejmujący krajowe podsystemy wytwarzania, przesyłu, rozdzielenia i odbioru mocy i energii elektrycznej, określone w Prawie Energetycznym i aktach wykonawczych.

W dobie narastającego kryzysu²², jedną z istotnych informacji prognostycznych, jaką chciałoby się uzyskać z modeli rozwoju SEE jest informacja dotycząca kosztów związanych z kontynuacją transformacji systemowej elektroenergetyki, w tym kosztów związanych ze zmianami strukturalnymi. Jest to istotna problematyka oczekująca na rozwiązanie, zwłaszcza przez ekonomistów. W prezentowanych w pracy modelach istnieje również możliwość wprowadzenia dodatkowej zmiennej wejściowej określonej na przykład jako liczba podmiotów włączonych w proces eksploatacji systemu EE (czy też w ujęciu bardziej szczegółowym, w podziale na istniejących i potencjalnie możliwych uczestników rynku energii elektrycznej), ich zaangażowany majątek (na przykład długość linii elektroenergetycznych, liczba turbozespołów, liczba stacji elektroenergetycznych) itp. oraz wprowadzenie dodatkowej zmiennej wyjściowej dotyczącej dotychczas ponoszonych kosztów związanych z transformacją systemową elektroenergetyki²³ itp.

Przeprowadzone i zamieszczone w niniejszej pracy eksperymenty badawcze oraz zaproponowana metoda identyfikacji mogą zostać z powodzeniem wykorzystane do poszukiwania modeli uwzględniających ograniczenia emisyjne, czy też uwzględniających wzrastającą różnorodność systemu wytwórczego. Ponadto można dodać, że określenie kosztów możliwych do poniesienia w ramach transformacji systemowej jest specyficznym stanem informacji krytycznej, będącej elementem finansowego sygnału ostrzegawczego w sytuacji kryzysu polskiej gospodarki, a tym samym także kryzysu polskiej elektroenergetyki.

Dalej zauważyć można, że badanie dyskretnych systemów nieliniowych na poziomie makro wygodnie jest sprowadzić do modeli ciągłych liniowych, dzięki czemu badanie stabilności można było sprowadzić do badania położenia pierwiastków równania charakterystycznego za pomocą odpowiednich kryteriów stabilności, co pokazało, że niektóre z otrzymanych modeli w ramach prowadzonych badań, zarówno modele parametryczne arx , jak i odpowiadające im modele w przestrzeni stanów ss , charakteryzowały się niestabilnością, tzn., że niektóre

²² W latach 2009–2012, w okresie przygotowywania ostatecznej wersji niniejszej monografii naukowej Polska w ślad za Europą i światem przeżywała kryzys finansowy, który objął swym zasięgiem w różnym stopniu wszystkie sfery życia gospodarczego, w tym także sektor elektroenergetyki.

²³ Na przykład PGE Elektrownia Bełchatów na dzień 31 grudnia 2006 roku miała odpowiednio: kapitał zakładowy w wysokości 3,0 mld zł, aktywa trwałe – 4,61 mld zł, wartości niematerialne i prawne – 5,1 mld zł, rzeczowe aktywa trwałe – 4389,7 mld zł; należności długoterminowe – 0,48 mld zł; inwestycje długoterminowe – 145,36 mld zł; długoterminowe rozliczenia międzyokresowe – 75,12 mld zł; aktywa obrotowe – 518,55 mld zł; zapasy – 72,91 mld zł; należności krótkoterminowe – 296,1 mld zł; inwestycje krótkoterminowe 147,32 mld zł; krótkoterminowe rozliczenia międzyokresowe – 2,31 mld zł; aktywa razem – 5,13 mld zł.

pierwiastki równania charakterystycznego nie leżały w lewej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej²⁴.

Ze względu na to, iż w niektórych modelach, uzyskanych w ramach prowadzonych badań, nie wszystkie pierwiastki miały ujemne części rzeczywiste (bieguny mogą być na osi urojonej), stąd modele te nie były modelami niestabilnymi, co było naturalnym następstwem zmian strukturalnych i rozwoju systemu EE jako obiektu rzeczywistego na przestrzeni lat 1946–2007.

Najczęściej bada się stabilność układów zamkniętych, a nie otwartych, stąd w przeprowadzonych badaniach dokonano oceny stabilności rozwoju systemu EE jako układu zamkniętego, przy czym przyjęto pierwiastki mianownika za bieguny, a pierwiastki licznika transmitancji za zera. Następnie związano zagadnienie rozwoju systemu EE z ruchem pierwiastków, stosując metodę linii pierwiastkowych Evansa i uziemiając współczynnik wzmocnienia k . Otrzymano ruch pierwiastków po istniejących liniach pierwiastkowych przy zmianie parametrów systemu (k jako skumulowany parametr wzmocnienia) oraz obserwowano pojawianie się bądź zanikanie linii pierwiastkowych w przypadku zmian strukturalnych.

W odniesieniu do rozwoju systemu EE można mówić o niestabilności systemu rozwoju charakteryzującej się nieregularnymi i często niesterowalnymi zmianami konkretnych wielkości dynamicznych procesu sterowania rozwojem systemu. Za Robertem Staniszewskim można powiedzieć, że jednowymiarowy liniowy model rozwoju systemu EE jest stabilny wtedy, gdy wartości parametrów oraz relacje między nimi (struktura) nie będą należały do krytycznego stanu wartości elementów i relacji, co wiąże się wprost z pojęciem bezpieczeństwa rozwoju systemu EE (zmian parametrycznych oraz zmian strukturalnych systemu EE w pasmie pomiędzy górnym i dolnym ograniczeniem wynikającym z funkcjonowania systemu EE w przeszłości i zbudowanym na tym pasmie korytarza bezpiecznego rozwoju)²⁵, a mówiąc inaczej na przykład system rozwoju (SEE) jako system liniowy typu SISO lub MISO jest niesta-

²⁴ Istnieje wiele interpretacji pojęcia stabilności systemu. Uważa się, że w przypadku liniowych systemów stacjonarnych skupionych intuicyjne rozumienie stabilności jest ściśle, a więc za system stabilny uważa się taki system, którego rozwiązanie swobodne (przy niezerowych warunkach początkowych i założeniu braku wymuszenia zewnętrznego) pozostaje ograniczone w dowolnym czasie (tzn. przy ograniczonej zmiennej wejściowej, co do wartości i czasu trwania zmienna wyjściowa – jako odpowiedź na wymuszenie – jest także ograniczona [63, 150–152]. Uściśleniem pojęcia stabilności jest pojęcie stabilności asymptotycznej, co wiąże się z dążeniem rozwiązania swobodnego do zera dla czasu dążącego do nieskończoności (ograniczoność rozwiązania wymuszonego nawet przy trwającym dowolnie długo wymuszeniu ograniczonym). W przypadku badania stabilności SEE jako układu nieliniowego wygodnie jest zastosować metodę trajektorii fazowych i chociaż jest to metoda żmudna to i tak daje wyniki jednoznaczne, a więc lepsze niż wyniki dostarczane przez metody symulacji komputerowych, co nie jest przedmiotem niniejszej monografii.

²⁵ Szerzej w pracach [70, 152, 153, 162–201].

bilny, gdy system może osiągać stany krytyczne określone naturą fizyczną procesów zachodzących w SEE [153].

Interpretacja tej niestabilności może zostać przeprowadzona zatem po analizie natury rozwoju SEE. Przyczynami rozwoju niestabilnego mogą być: sama natura fizyczna rozwoju systemu (niektóre procesy fizyczne w systemie rozwoju mogą wykazywać skłonność do rozwoju niestabilnego, jak chociażby na przykład nakładane ograniczenia emisyjne), błędy natury konstrukcyjnej układów i elementów SEE jako systemu technicznego, błędy technologiczne, zwłaszcza wynikające ze współpracy nowych technologii energetyki odnawialnej z istniejącym SEE oraz wiele innych błędów natury konstrukcyjnej, zarządczej czy ekonomicznej i finansowej.

Dlatego też w celu wyeliminowania możliwości wystąpienia stanu niestabilnego rozwoju systemu EE należy przede wszystkim poznać jego przyczyny w sensie zmian parametrycznych oraz zmian strukturalnych, i na tej podstawie tak zaprojektować rozwój SEE, aby stany niestabilnego rozwoju występowały jedynie w chwili zmian strukturalnych z tendencją do szybkiego zanikania. Przed wprowadzaniem rozwiązań rozwojowych należy wcześniej badać systemy i ich modele.

W końcu należy zauważyć, że zmiany parametryczne nie powodują zmiany rozkładu biegunów i zer na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z lub s w taki sposób, aby wszystkie leżały w lewej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej (można co najwyżej tylko podejmować próby przesuwania pierwiastków wzdłuż istniejących linii pierwiastkowych). Natomiast skuteczną metodą zmiany rozkładu pierwiastków jest metoda sterowanych zmian strukturalnych, które przez wprowadzenie nowych zer i/lub biegunów (lub eliminację istniejących) wprowadzają inny rozkład istniejących zer i biegunów, a przez to także nowy rozkład linii pierwiastkowych Evansa. Wyprzedzająca eliminacja niestabilności rozwoju SEE wiąże się zatem z potrzebą wprowadzenia zmian parametrycznych, a jak one nie dają wystarczających skutków, z potrzebą wprowadzenia zmian strukturalnych, nawet z przeprowadzeniem transformacji systemowej, więc reinżynierii rozwoju SEE. W rozważanym eksperymencie drugim, dotyczącym badania rozwoju systemu KSE, przyczyną niestabilności rozwoju były zmiany strukturalne związane między innymi ze zmianami technicznymi i technologicznymi, jak na przykład wprowadzanie nowych mocy do SEE, wprowadzenie nowych linii elektroenergetycznych i transformatorów, a także zmiany ekonomiczne tego typu, jak wprowadzenie denominacji złotego²⁶.

W rozważanym w pracy przypadku mamy do czynienia ze stabilnością rozwoju SEE oraz ze stabilnością rozwoju modelu systemu EE, a za rozwój właśnie odpowiedzialne jest dodatnie, a nie ujemne sprzężenie zwrotne, stąd też chwilowe pojawianie się niestabilności rozwoju należy jedynie traktować jako odpowiedni sygnał informa-

²⁶ W latach dziewięćdziesiątych XX w. wprowadzono denominację złotego polegającą na zastąpieniu starych 10 000 zł jedną nową złotówką.

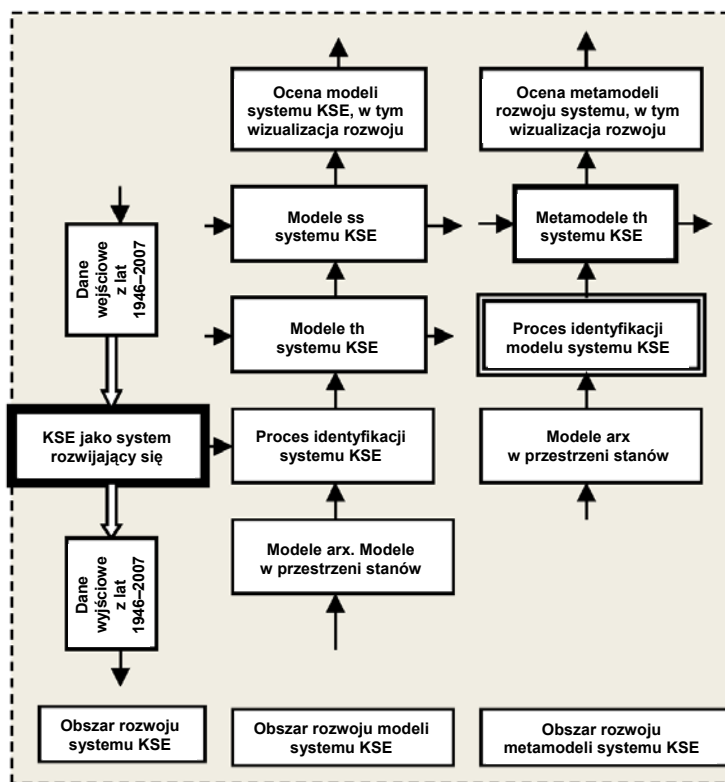
cyjny dla projektantów rozwoju. Oprócz tego, równania stanu opisują pracę SEE od jednego stanu rozwoju do następnego stanu rozwoju. Mają one najczęściej postać nieliniową, którą można sprowadzić w badanym przypadku do postaci liniowej, na przykład przez zróżniczkowanie w otoczeniu systemu konkretnych (specyficznych) punktów rozwoju systemu EE.

Identyfikatorami stabilności i miernikami jej poziomów są pierwiastki charakterystyczne SEE i ich poziom w zakresie dominowania (które z nich są dominujące). Odnoszą się one w pierwszej kolejności do powiązań jednoczesnych reprezentowanych przez macierze organizacji wewnętrznej procesu A , które uwzględniają bieżące dostosowania w obrębie danej jednostki czasu długiego θ . Poziom dominowania pierwiastków charakterystycznych SEE często wynika także z macierzy C reprezentującej powiązania międzyokresowe, które w rozważanych eksperymentach nie były silne i nie były rozważane. Mówi się, że system rozwoju zdąża wówczas do równowagi, jeżeli jest stabilny, przy czym dla równowagi dynamicznej stabilność jest podtrzymywana przez sterowanie.

Dążąc do stabilności rozwoju, należy ewentualne pierwiastki (i linie pierwiastkowe) leżące w prawej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej z lub s przesunąć do lewej półpłaszczyzny lub przynajmniej do osi rzędnych $Im(s)$, a nawet podjąć próbę ich eliminacji lub wprowadzenia nowych. Wiąże się to z przeprowadzeniem odpowiedniej analizy systemowej równowagi i stabilności rozwoju. Niestabilność rozwoju SEE badana ze względu na bezpieczeństwo rozwoju prowadzi do ustalania osiągalności przez model stanów krytycznych, co w rozważanych eksperymentach zależało głównie od popełnionych błędów technologicznych, konstrukcyjnych czy organizacyjnych i finansowych. W projektowaniu rozwoju SEE ważne jest zatem zapewnienie takiego ruchu pierwiastków, aby w trakcie rozwoju SEE nie przekraczały one osi rzędnych $Im(s)$ oraz utrzymanie odpowiednich relacji między współczynnikiem wzmocnienia a stałymi czasowymi. Źródłem informacji do oceny stabilności systemu liniowego są amplitudowe oraz fazowe charakterystyki logarytmiczne. Zmiany tych charakterystyk dają sygnały ostrzegawcze o zużyciu lub doskonaleniu SEE.

Podstawowym problemem w projektowaniu i późniejszym konstruowaniu systemów technicznych jako systemów sterowania, takich jak SEE, jest zatem sformułowanie w ogóle odpowiedniego modelu matematycznego. Jeżeli mamy do czynienia z zagadnieniem rozwoju, występuje konieczność uzyskania modelu rozwoju SEE (przez analogie do modelu eksploatacji, modelu niezawodności itp.) [126, 216]. Dla systemów niezbyt skomplikowanych model taki formułuje się w postaci układów równań na podstawie bilansu wielkości fizycznych. W przypadku systemów wielkich, wysoce złożonych, hierarchicznych itp. niemożliwe jest jednoznaczne określenie wszystkich istotnych parametrów modelu, a tym bardziej jednoznaczne określenie struktury modelu na drodze modelowania, a więc na drodze rozważań analitycznych. Stosuje się wówczas eksperymentalne wyznaczenie modelu na drodze identyfikacji i w takim przypadku poszukuje się zarówno struktury modelu, jak i wartości parametrów na drodze identyfikacji czynnej albo biernej.

W przeprowadzonych eksperymentach zastosowano identyfikację bierną, co związane było z doбором zmiennych wejściowych i wyjściowych na potrzeby przeprowadzenia eksperymentów (dla wygody rozważań przyjmowano kilkanaście zmiennych wejściowych i jedną zmienną wyjściową, a więc modele typu MISO²⁷), następnie określono horyzont czasu od kilkunastu do kilkudziesięciu lat.



Rys. 1.2. Ogólny algorytm generowania modeli i metamodeli rozwoju systemu KSE.

Źródło: Opracowanie własne

Na przykład dla KSE przyjęto empiryczne dane liczbowe z lat 1946–2007²⁸, okres identyfikacji 30 lat z postępowaniem jednego roku, co umożliwiło otrzymanie dla jednego wyjścia 31 modeli w macierzy **th** za pomocą funkcji **arx()** i w ślad za tym 31 odpo-

²⁷ MISO – skrót od Multi Input Single Output, podobnie MIMO, SIMO, SISO.

²⁸ W trakcie zamknięcia badań eksperymentalnych (styczeń 2009 r.) nieznanne jeszcze były wyniki za 2008 r., a w chwili składania pracy do procesu wydawniczego (grudzień 2009 r.) nie były jeszcze znane wyniki za 2009 r.

wiadających im modeli w przestrzeni stanów (ss), przy czym na przykład na koniec 2008 r. możliwość dysponowania źródłami wytwórczymi była ograniczona przez ubytki mocy wynikające z remontów oraz warunków eksploatacyjnych w 2007 r.

Natomiast w okresie od 2007 r. do października 2008 r. ubytki mocy zwiększały się i jednocześnie wzrosło zapotrzebowanie na energię elektryczną, co spowodowało zmniejszenie nadwyżki mocy dyspozycyjnych w stosunku do maksymalnego krajowego zapotrzebowania na tę moc, który był szczególnie widoczny na przełomie 2007 i 2008 r.

Sytuacja uległa zmianie w IV kwartale 2008 r., gdy zapotrzebowanie na moc uległo obniżeniu, przy czym w tym okresie zwiększające się ubytki mocy oraz występujące ograniczenie w dysponowaniu źródłami wytwórczymi wynikały m.in. z: rosnącego zakresu prac remontowych w elektrowniach, dużej awaryjności w przypadku uruchamiania starszych elektrowni i elektrociepłowni, przekraczania limitów na emisję zanieczyszczeń (pyły, SO₂, NO_x), braku wystarczających zapasów węgla, ograniczeń w wyprowadzeniu mocy z niektórych elektrowni w warunkach wyższej temperatury. Ponadto należy dodać, że w latach 2007–2008 występowały trudności ze zwiększeniem importu energii elektrycznej, z powodu przepływów karuzelowych (kołowych) wywołanych przez elektrownie wiatrowe zlokalizowane na terenie północnych Niemiec. W roku 2008 w skład infrastruktury sieciowej, będącej własnością spółki PSE Operator S.A., wchodziło 235 linii o łącznej długości 12 953 km, w tym: 1 linia o napięciu 750 kV i długości 114 km (wyłączona z eksploatacji), 66 linii o napięciu 400 kV i długości 4920 km, 165 linii o napięciu 220 kV i o łącznej długości 7919 km, oraz 106 stacji energetycznych najwyższych napięć i 177 transformatorów. Znaczna liczba obiektów, szczególnie o napięciu 220 kV, charakteryzowała się znacznym stopniem zużycia, przy czym KSE miało połączenia międzysystemowe ze Szwecją przez połączenie 450 kV prądu stałego, z Białorusią linią 220 kV, z Ukrainą liniami 220 kV i 750 kV, ze Słowacją dwutorową linią 400 kV, z Republiką Czeską liniami 220 kV i 400 kV oraz Niemcami liniami 220 kV i 400 kV. Pomimo dużej elastyczności systemu KSE jak na ówczesne czasy występujące ograniczenia zdolności przesyłowych stanowiły istotną barierę dla wymiany energii elektrycznej z zagranicą. Miało to szczególne znaczenie dla zaopatrzenia kraju w energię elektryczną, w przypadku wystąpienia jej deficytu na rynku krajowym. W 2008 r. nakłady inwestycyjne na sieć przesyłową wyniosły 827,0 mln zł i były większe niż w 2007 r. – wynosiły 362,3 mln zł. W zakresie rozbudowy systemu przesyłowego oraz połączeń transgranicznych prowadzone były i są nadal kontynuowane odpowiednie analizy techniczne we współpracy z UE oraz krajami trzecimi.

Za plany rozbudowy połączeń transgranicznych odpowiada PSE Operator S.A., który prowadzi w tej sprawie negocjacje z operatorami z Niemiec, Czech i Słowacji. Dotyczy to też budowy mostu energetycznego łączącego systemy elektroenergetyczne Litwy i Polski. W roku 2008 działalność gospodarczą w zakresie dystrybucji energii elektrycznej prowadziło 14 operatorów systemów dystrybucyjnych, wydzielonych od

1 lipca 2007 r. z dawnych spółek dystrybucyjnych oraz PKP Energetyka S.A., a także liczne, małe spółki lokalne, mające koncesje Prezesa URE na dystrybucję energii elektrycznej. Głównym ich zadaniem był rozdział i dostarczanie energii elektrycznej do odbiorców końcowych za pomocą sieci dystrybucyjnych wysokiego, średniego i niskiego napięcia. W roku 2008 operatorzy systemów dystrybucyjnych dysponowali: liniami napowietrznymi o napięciu 220 kV o długości 232 km, liniami napowietrznymi o napięciu 110 kV o długości 32 475 km, liniami na średnich napięciach o długości 300–511 km, liniami na niskich napięciach o długości 423–886 km, stacjami transformatorowymi o górnym napięciu 110 kV w liczbie 1372 szt. oraz stacjami transformatorowymi na średnich napięciach w liczbie 242–148 szt. Stopień zamortyzowania majątku sieci dystrybucyjnych w 2008 r. wynosił ponad 25%, lecz jego wartość księgową, w związku z restrukturyzacją sektora elektroenergetycznego, była kilka razy przeszacowywana. Modernizacji i przebudowy wymagają ciągi liniowe średniego napięcia i obwody niskiego napięcia, w których zainstalowane są przewody o małych przekrojach (25 i 35 mm²), oraz linie, na których końcach spadki napięć przekraczają dopuszczalne normy²⁹. W prezentowanym w pracy eksperymencie (wybranych jednym z wielu przeprowadzonych) uzyskano dla jednego okresu 3 modele (dla trzech wyjść) × 31 okresów = 93 modele, co w związku z określeniem dwóch typów modeli (modele typu th oraz ss)³⁰ dostarcza 186 modeli³¹.

Otrzymano w ten sposób odpowiednie katalogi modeli rozwoju SEE, co pozwoliło w dalszej kolejności na przeprowadzenie identyfikacji rozwoju modelu jako obrazu rozwoju systemu (metamodelu), przyjmując za zmienne wyjściowe na przykład w modelach arx (macierzach **th**) współczynniki wielomianu $A_i(q)$ stojące przy odpowiednich operatorach przesunięcia czasowego q^{-i} , a za zmienne wejściowe przyjmując wówczas współczynniki członów wielomianu $B_k(q)$ stojące przy odpowiednich elementach q^{-i} , k -tego wielomianu (związanego z k -tym wejściem). W ten sposób otrzymano rozwój modelu KSE, a więc model do generowania modeli rozwoju, jak na przykład w przytaczanym eksperymencie dla okresu $\theta = 32$ (lata 1979–2008), dla okresu $\theta = 33$ (lata 1980–2009), dla okresu $\theta = 34$ (lata 1981–2010).

²⁹ Obwieszczenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2009 roku w sprawie sprawozdania z wyników nadzoru nad bezpieczeństwem zaopatrzenia w energię elektryczną (M.P. z dnia 4 września 2009 r.)

³⁰ W środowisku przybornika Control System Toolbox można wykorzystać następujące funkcje do wzajemnych przekształceń modeli, a mianowicie: th2tf, tf2ss, tf2zpk itp.

³¹ Dla jednego generalnego okresu (lata 1946–2007) także przeprowadzono identyfikację i uzyskano model rozwoju systemu elektroenergetycznego. Okazało się przy tym, iż model ten był dobrym narzędziem do poszukiwania modeli wyrażających zmiany strukturalne, gdyż zwykle uzyskiwane modele kroczące (otrzymywane dla okresów kroczących) miały podobną strukturę jak model generalny, ale zdarzały się też inne struktury modeli, co pokazywało lata, w których występowały zmiany strukturalne krajowego systemu elektroenergetycznego KSE.

Z jednej strony uzyskano model ogólny rozwoju SEE w latach 1946–2007 w dwóch postaciach: model w postaci macierzy \mathbf{th} , oraz model w przestrzeni stanów ss , a z drugiej strony uzyskano grupę modeli w liczbie 31 dla okresów 30-letnich, także w dwóch postaciach, z tym że te ostatnie dostarczyły danych dla eksperymentu prowadzącego do uzyskania następnego modelu, tym razem dotyczącego rozwoju modelu, a nie systemu EE, a więc można powiedzieć, że metamodelu (specyficznego obrazu modelu rozwoju SEE). W eksperymentach identyfikacyjnych weryfikacja uzyskanych na drodze identyfikacji modeli przeprowadzana była poprzez ocenę zgodności właściwości dynamicznych uzyskanego modelu i systemu EE jako rzeczywistego obiektu (poprzez dokładność identyfikacji, którą uzyskiwano nawet ponad 99%), na przykład przez porównanie odpowiedzi czasowych modelu i systemu na taki sam sygnał wejściowy.

Zaprojektowano odpowiednie modele w środowisku Simulink. W przeprowadzanych eksperymentach wykorzystano model identyfikacji arx^{32} , który wykorzystuje metodę najmniejszych kwadratów LS^{33} polegającą na iteracyjnym poszukiwaniu zbioru współczynników transmitancji operatorowej, przy minimalizacji kwadratów różnic między odpowiedzią modelu i rzeczywistego systemu w tym czasie, dla którego zgromadzono odpowiednie dane liczbowe (lata). Dokładność identyfikacji zależała od trafności doboru struktury modelu (przeszukiwano parametry modelu na , nb , nk o wartościach 1–10) oraz od jakości zgromadzonych danych liczbowych³⁴. Wysokie rzędy macierzy uzyskiwanych w modelach dyskretnych oraz duża liczba zmiennych stanu występująca w modelach ciągłych skutkowały trudnościami interpretacyjnymi, stąd w miarę możliwości po analizie modeli proponowano stosowne ich uproszczenia. W związku z tym dane empiryczne poddane były wstępnej obróbce (usuwanie składowej stałej, dobór okresu identyfikacji itp.), a nawet podejmowano próbę ich normalizacji, co dawało polepszenie jakości modelu. Poglądowy algorytm rozwiązania zagadnienia rozwoju systemu EE zamieszczono na rys. 1.2.

Przyjęto w pracy dwa zasadnicze kryteria oceny funkcjonowania i rozwoju SEE: efektywność i bezpieczeństwo, co łącznie nazwano kryterium krzepkości pracy i rozwoju SEE³⁵. Krzepki system charakteryzować się powinien specyficzną równowagą między efektywnością oraz bezpieczną skutecznością pracy i rozwoju, a więc powinien być systemem elastycznym (wprowadzenie łączy stałoprądowych HVDC, stabilizatorów, ograniczników dynamicznych, układów rozcinających, układów tłumiących,

³² ARX – ang. *AutoRegressive with eXogenous input*.

³³ LS – ang. *Last Squares*.

³⁴ W rozważanym eksperymencie identyfikacyjnym krajowego systemu elektroenergetycznego od jakości statystyki prowadzonej zwłaszcza przed rokiem 1989.

³⁵ Henzel Z., *Sterowanie krzepkie ruchem nadążnym mobilnego robota kołowego*. Materiały VI KK Robotyki, Wrocław 1998, 22–29.

elastycznych układów sterowania FACTS, przekształcenie linii prądu przemiennego na wszystkich poziomach napięciowych w linie prądu stałego za pomocą przekształtników tyrystorowych, co wiąże się ze skokowym wzrostem zdolności przesyłowych linii itp.).

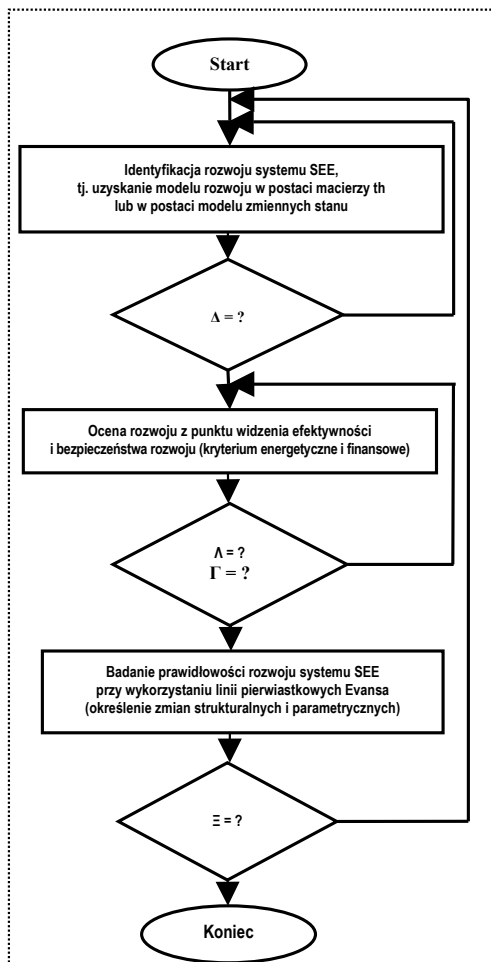
1.4. Cel, zakres i treść pracy

Jak starano się pokazać w p. 1.3, występuje zapotrzebowanie ze strony praktyki gospodarczej na nowe sposoby badania prawidłowości rozwoju systemu KSE, a z drugiej strony nauka dostarcza nowych metod do wykorzystania w procesie poszukiwania odpowiednich modeli rozwoju systemu EE m.in. na bazie teorii sterowania i systemów oraz na bazie inżynierii rozwoju i sztucznej inteligencji. Z tych też względów zasadniczym celem monografii jest przedstawienie na gruncie teorii identyfikacji oraz teorii sterowania i rozwoju systemów wybranych zagadnień dotyczących wyników badania prawidłowości rozwoju systemu EE ze względu na krzepkość rozwoju, a więc rozwoju systemu KSE z zapewnieniem równowagi między efektywnością rozwoju oraz bezpiecznym poziomem pracy i rozwoju SEE w taki sposób, aby system EE osiągnął wzrost swej wewnętrznej organizacji opisany m.in. macierzą **A** oraz wyższy poziom sterowania opisany m.in. macierzą **B** modelu zmiennych stanu.

W związku z różnorodnością dynamiki rozwoju systemu KSE na przestrzeni lat 1946–2007, który podlegał zmianom strukturalnym i zmianom parametrycznym, można podjąć zadanie badania występujących prawidłowości na potrzeby właściwego sterowania transformacją systemową i wprowadzania mechanizmów regulacyjnych. Istnieje przy tym możliwość opracowania metody badania prawidłowości rozwoju systemu EE z wykorzystaniem teorii identyfikacji, teorii sterowania i inżynierii rozwoju systemów, co wymaga między innymi:

- opracowania podstaw inżynierii rozwoju systemów na gruncie teorii sterowania i systemów oraz inżynierii systemów, umożliwiającej w sposób systemowy budowę modeli rozwoju SEE,
- przygotowania odpowiedniego eksperymentu identyfikacyjnego opartego na rzeczywistych danych liczbowych (eksperymentu 1 dla danych testowych IEEE RTS 1996 oraz eksperymentu 2 dla danych dotyczących KSE), przeprowadzenia identyfikacji i uzyskania katalogów modeli kroczących,
- przygotowania odpowiedniego eksperymentu identyfikacyjnego opartego na danych liczbowych katalogów kroczących modeli rozwoju (uzyskanych z eksperymentu 1 opartego na danych testowych IEEE RTS 1996 oraz uzyskanych z eksperymentu 2 dla danych dotyczących KSE), w celu przeprowadzenia identyfikacji i uzyskania metamodeli rozwoju, przeprowadzenia badania oceny

prawidłowości rozwoju systemu EE ze względu na efektywność i bezpieczeństwo rozwoju z uwzględnieniem zmian parametrycznych oraz zmian strukturalnych systemu wizualizowanych za pomocą linii pierwiastkowych Evansa, wykorzystania środowiska MATLAB i Simulink z takimi przybornikami jak SIT oraz CST do przeprowadzenia odpowiednich eksperymentów na danych rzeczywistych oraz przeprowadzenia interpretacji uzyskanych wyników badań (rys. 1.3).



Rys. 1.3. Schemat blokowy rozwoju sytemu EE ze względu na efektywność i bezpieczeństwo.

Oznaczenia: Λ – efektywność techniczno-ekonomiczna rozwoju systemu SEE,

Γ – bezpieczeństwo techniczno-ekonomiczne rozwoju systemu SEE,

Ξ – stabilność rozwoju systemu SEE. Pozostałe oznaczenia w tekście.

Opracowanie własne

Treść pracy ujęto w 8 rozdziałach.

Rozdział 1, w którym dokonano wprowadzenia do tematyki badania rozwoju systemów elektroenergetycznych, zaproponowano koncepcję badania prawidłowości rozwoju systemu EE, a także przedstawiono uwarunkowania rozwoju SEE oraz zapotrzebowanie na poszukiwanie prawidłowości rozwoju KSE.

Rozdział 2, w którym omówiono stan wiedzy z zakresu stosowania kryteriów oceny rozwoju tego typu jak efektywność i bezpieczeństwo rozwoju wraz z autorską definicją pojęć sformułowanych dla potrzeb przeprowadzanych eksperymentów badawczych.

Rozdział 3, w którym w syntetycznej formie przedstawiono propozycję inżynierii rozwoju systemów EE, zwracając szczególną uwagę na autorską metodę wykorzystaną w pracy, a mianowicie systemową metodę identyfikacji rozwoju KSE [187, 189, 194, 198, 200], akcentując przy tym zwłaszcza systemowe podejście do kodowania i dekodowania rozwoju Krajowego Systemu Elektroenergetycznego.

Rozdział 4, rozdział 5 i rozdział 6, w których identyfikację rozwoju systemu EE sprowadzono do identyfikacji funkcjonowania systemu w kroczących okresach wieloletnich, zarówno dla eksperymentu 1 (rozdział 5 dla danych liczbowych opartych na modelu testowym IEE RTS), jak i eksperymentu 2 (rozdział 6 na bazie danych liczbowych z lat 1946–2007 dotyczących KSE), uzyskując odpowiednie katalogi modeli rozwoju.

Rozdział 7, w którym badanie prawidłowości rozwoju oparto na analizie funkcjonowania systemu KSE z wykorzystaniem linii pierwiastkowych Evansa, pokazując przy tym kierunki możliwych zmian strukturalnych oraz kierunki zmian parametrycznych. Przy kodowaniu rozwoju systemu KSE wykorzystano dwa zasadnicze ujęcia modelowe sztucznych kodów genetycznych, a zwłaszcza pierwiastkowy sztuczny kod genetyczny oraz współczynnikowy sztuczny kod genetyczny³⁶, zarówno w stosunku do katalogu modeli rozwoju, jak i w stosunku do metamodelu rozwoju. Otrzymany w wyniku końcowym metamodel SEE zweryfikowano praktycznie, opracowując różne wrażliwościowe eksperymenty badawcze (rozdział 7), przeprowadzając w końcu także dyskusję otrzymywanych wyników badań. W rozdziale 5 i 6 zamieszczono także wybrane modele symulacyjne i wizualizację rozwoju wybranych sytuacji systemowych, a także sztuczne kody genetyczne systemu EE, które można wykorzystać do budowy populacji początkowej dla polepszenia rozwoju za pomocą algorytmów ewolucyjnych i dalszych pogłębionych badań symulacyjnych.

Ponadto monografia zawiera streszczenie oraz wnioski wraz z kierunkami dalszych badań (**rozdział 8**), a także wykaz literatury przedmiotu.

³⁶ Pojęcie sztucznego kodu genetycznego, w tym sztuczny kod genetyczny z zanurzeniami, hierarchiczny sztuczny kod genetyczny, rozproszony sztuczny kod genetyczny itp., zostało zdefiniowane i zweryfikowane w elektroenergetyce m.in. w następujących pracach [32, 43, 51, 86, 87, 115, 117, 130, 187, 188, 195, 201].

2. Bezpieczeństwo i efektywność rozwoju systemów

Utrata ciągłości pracy KSE lub jego znacznej części stanowi potencjalnie jedno z najpoważniejszych zakłóceń funkcjonowania infrastruktury technicznej kraju, z trudnymi do jednoznacznego określenia następstwami społecznymi i gospodarczymi. W takiej właśnie sytuacji występują zmiany strukturalne, charakteryzujące się wypadnięciem z pracy całej struktury krajowego SEE lub znacznej jej części, podobnie jak w przypadku przeciwnym wynikającym z rozbudowy KSE, charakteryzującym się powiększeniem struktury. Utrata ciągłości pracy wiąże się z kolei ściśle z pojęciem niezawodności funkcjonowania SEE³⁷. Na niezawodność zaś KSE, rozumianą jako zdolność systemu KSE do dostawy energii elektrycznej ze źródeł zasilania do odbiorców końcowych, z zachowaniem przyjętych standardów oraz w oczekiwanej ilości i jakości energii elektrycznej, składają się dwa atrybuty: bezpieczeństwo i efektywność SEE lub w innym ujęciu jego wystarczalność (krzepkość) [125].

2.1. Prawidłowości rozwoju KSE w latach 1946–2007

Struktura KSE na przestrzeni badanych lat, to jest w latach 1946–2007 zmieniała się od struktury bardzo prostej z lat 40. i 50. XX wieku aż do struktury bardzo złożonej i wielkiej, jaką dysponujemy na początku XXI wieku.

Uogólniając zagadnienie rozwoju KSE, można mówić o występowaniu pracy wyspowej w latach 40. i 50. ubiegłego wieku, chociaż już w 1950 roku powstały trzy

³⁷ W elektroenergetyce francuskiej rozwija się system eksploatacji zmierzający do utrzymania określonej niezawodności urządzeń elektroenergetycznych RCM (Reliability Centrem Maintenance), cyt. w pracy [125] za pracą Rivard J. i inni *The application of RCM methods to RTE overhead transmission lines*, GIGRE Sesion 2004, Paryż.

główne układy elektroenergetyczne i kilkanaście mniejszych, przy czym występował wówczas bardzo zły stan urządzeń oraz była słabo rozwinięta sieć przesyłowa. Moc zainstalowana wynosiła wówczas 2700 MW, a zapotrzebowanie 1700 MW.

W roku 1951 przeprowadzono reorganizację KSE, tworząc Główną Dyspozycję Mocy³⁸ oraz sześć okręgowych dyspozycji mocy³⁹, a w 1953 roku utworzono jednolity KSE oparty na liniach 110 kV, które ówczesnie nazywane były siecią systemową, a także zakładowe dyspozycje ruchu (tzw. ZDR-y) oraz rejonowe dyspozycje ruchu (tzw. RDR-y). Pierwsza linia 220 kV została oddana we wrześniu 1953 roku (linia Janów–Łagisza), przy czym rozwój KSE w latach 50. XX wieku był wymuszony rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną zwłaszcza ze strony energochłonnego przemysłu ciężkiego, co doprowadziło do sytuacji, iż na koniec 1960 roku moc zainstalowana wynosiła już 6316 MW, długość sieci przesyłowej o napięciu 220 kV – 1660 km, a sieci systemowej o napięciu 110 kV – 9140 km.

Pierwsze połączenie międzynarodowe liniami o napięciu 220 kV (Skawina–Liskowice, Mikołowa–Berzdorf) oddano do eksploatacji w 1960 roku, a w 1964 roku oddano pierwszą linię o napięciu 400 kV o długości 317 km (Mikołowa–Joachimów), co prowadzone było równocześnie z rozbudową systemu wytwórczego o kolejne bloki 120 MW oraz 200 MW.

W latach 70. ubiegłego wieku nastąpił bardzo szybki rozwój KSE związany z rozbudową między innymi sieci przesyłowej o napięciu 400 kV oraz sieci systemowej o napięciu 110 kV. W tym czasie wprowadzono także połączenia transformatorowe 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV, 220 kV/110 kV oraz zainstalowano kolejne bloki 200 MW, a także wprowadzono bloki 500 MW (Kozienice) oraz oddano do eksploatacji elektrownię szczytowo-pompową (Porąbka-Żar).

Prowadzone prace w ramach centralnego planowania były mało skuteczne i precyzyjne, co doprowadziło wówczas do opóźnienia rozwoju systemu sieci przesyłowej w stosunku do dynamicznego rozwoju systemu wytwarzania i powstania specyficznych *wąskich gardeł* w przesyśle energii elektrycznej skutkujących zróżnicowaniem stopni zasilania odbiorców. Pojawiły się też problemy związane z wyprowadzaniem mocy z elektrowni, jak też wiele problemów związanych z poprawnym funkcjonowaniem automatyki zabezpieczeniowej. Niemniej wybudowano wówczas kolejne połączenia międzysystemowe liniami przesyłowymi o napięciu 400 kV (Mikołowa–Kiesdorf w roku 1975, Wielopole–Liskowice w roku 1976) oraz linię o napięciu

³⁸ Główna Dyspozycja Mocy przekształciła się w Państwowy Zarząd Dyspozycji Mocy, a następnie w Państwową Dyspozycję Mocy, po czym w Krajową Dyspozycję Mocy.

³⁹ Były to okręgi: centralny, wschodni, południowy, dolnośląski, zachodni i północny. Przeprowadzono wówczas także reorganizację systemu telekomunikacyjnego z budową sieci resortowej, co było niezwykle ważnym rozwiązaniem w zakresie sterowania KSE z racji występowania jedyne go szybkiego medium komunikacji, jakim była łączność telefoniczna.

750 kV (łączyła system KSE z systemem wschodnim w roku 1979). Na koniec lat 70. XX w. zlikwidowano Dolnośląską Dyspozycję Mocy, tworząc pięć obszarowych dyspozycji mocy oraz doprowadzono do utworzenia łącznie 33 zakładowych dyspozycji mocy oraz 212 rejonowych dyspozycji mocy. W 1971 roku zakupiono system Control Data Corporation (CDC), wprowadzając w ten sposób na szeroką skalę prowadzenie analizy off-line oraz on-line pracy systemu KSE. Wobec braku gotowego oprogramowania i występującymi problemami z wdrożeniem systemu zdecydowano się na system *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), który był specyficznym systemem ekspertowym zawierającym między innymi odpowiednie narzędzia do akwizycji danych, automatycznej weryfikacji danych, wizualizacji wiedzy o połączeniach, a także sterowanie pracą elektrowni pompowych.

W związku z kryzysem społeczno-gospodarczym lat 80. XX w. nastąpiło zmniejszenie zużycia energii, co przełożyło się na rezygnację z rozbudowy sieci przesyłowej 220 kV i przejściem na rozbudowę sieci przesyłowej 400 kV oraz na budowę linii 750 kV (Rzeszów–Chmielnicka w roku 1985). Wybudowano wówczas elektrownię szczytowo-pompową (Żarnowiec w 1982 roku), elektrownie w Połańcu, Bełchatowie i Opolu. Ze względu na to, iż w latach 80. XX w. pojawiły się pierwsze mikrokomputery PC, powoli następowała decentralizacja obliczeń, co ostatecznie doprowadziło w roku 1990 do likwidacji systemu CDC 3170 (wykorzystywanego do prowadzenia analiz off-line) oraz do zastąpienia systemu CDC 1700 i 1774 systemem DYSTER (ostateczne uruchomienie systemu nastąpiło w 1996 roku). Ponadto wprowadzono nową generację telemechaniki (z możliwością telesterowania) oraz sieć światłowodową (z przepustowością 2,4 Gb/s).

W latach 90. XX w. w związku z transformacją systemową powstała grupa CENTREL (Polska, Czechy, Słowacja i Węgry) jako konsekwencja odłączenia KSE od systemu Europy Wschodniej z jednoczesnym stopniowym przyłączeniem do systemu Europy Zachodniej (UCTE). Transformacja systemowa lat 90. XX w. uruchomiła proces decentralizacji, w wyniku którego powstała firma PSE S.A. – Operator Systemu Przesyłowego oraz samodzielne jednostki wytwórcze typu elektrownie i zakłady energetyczne.

Lata transformacji systemowej oraz pierwsze lata XXI wieku to realne wprowadzenie w życie ustawy *Prawo energetyczne*, a więc utworzenie rynku energii elektrycznej, w tym powstanie Giełdy Energii Elektrycznej (GEE), spółek dystrybucyjnych (SD), przedsiębiorstw obrotu (PO), operatorów technicznych (OT), techniczno-handlowych (OT-H) itp., przy czym występują nadal problemy w zakresie prywatyzacji elektroenergetyki, co utrudnia prowadzenie prawidłowej polityki inwestycyjnej w zakresie rozwoju KSE. Zgodnie z Prawem Energetycznym docelowy model rynku energii elektrycznej bazuje na wykorzystaniu dostępu stron trzecich do sieci elektroenergetycznych (TPA).

Ponadto w polskim modelu rynku można zawierać kontrakty bilateralne, transakcje na giełdzie i rynku bilansowym, administrowanym przez Operatora Systemu Przesyłowego (OSP), którego funkcje pełni PSE S.A. Rozwiązanie to jest zgodne z dyrektywą 96/92/EC Unii Europejskiej. Obecnie KSE rozwija się i zgodnie z polityką energetyczną Polski do roku 2025 prognozowany był wzrost krajowego zużycia ener-

gii elektrycznej o 80–93%⁴⁰. Następnym dokumentem w tym zakresie był projekt *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku*.

W kolejnym projekcie *Prognozy zapotrzebowania na paliwa i energię do 2030 roku* z marca 2009 roku określono m.in. takie podstawowe kierunki polityki energetycznej Polski, uwzględniające wymagania Unii Europejskiej, jak:

- poprawa efektywności energetycznej,
- wzrost bezpieczeństwa dostaw paliw i energii,
- dywersyfikacja struktury wytwarzania energii elektrycznej poprzez wprowadzenie energetyki jądrowej,
- rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii, w tym biopaliw,
- rozwój konkurencyjnych rynków paliw i energii,
- ograniczenie oddziaływania energetyki na środowisko.

W zakresie efektywności energetycznej uwzględniono następujące, istotne dla prognozy, cele polityki energetycznej:

- dążenie do utrzymania zero-energetycznego wzrostu gospodarczego, tj. rozwoju gospodarki następującego bez wzrostu zapotrzebowania na energię pierwotną,
- konsekwentne zmniejszanie energochłonności polskiej gospodarki do poziomu UE-15.

Przewidziano zastosowanie oraz oceniono wpływ na zapotrzebowanie na energię istniejących rezerw efektywności wynikających z reformy rynkowej gospodarki oraz dodatkowych instrumentów zwiększania efektywności energetycznej, m.in.: rozszerzenia stosowania audytów energetycznych, wprowadzenia systemów zarządzania energią w przemyśle, wprowadzenia zrównoważonego zarządzania ruchem i infrastrukturą w transporcie, wprowadzenia standardów efektywności energetycznej dla budynków i urządzeń powszechnego użytku, intensyfikacji wymiany oświetlenia na energooszczędne oraz wprowadzenia systemu białych certyfikatów.

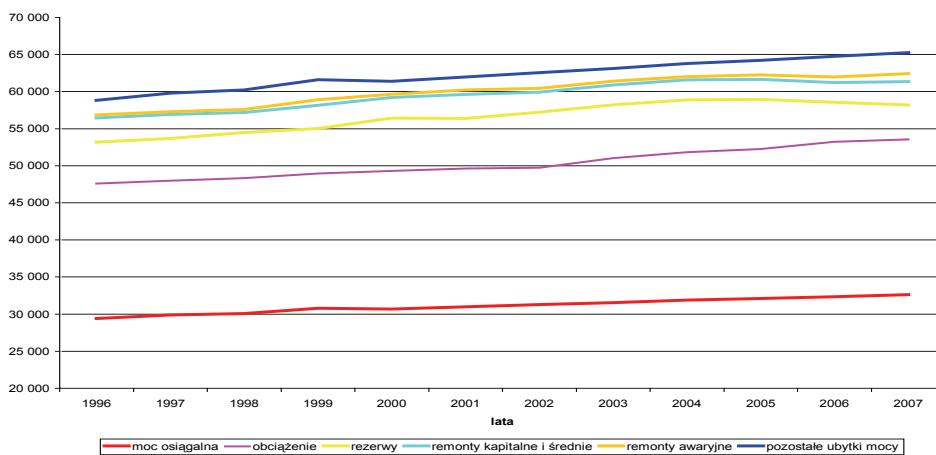
W obszarze bezpieczeństwa dostaw paliw i energii: generalnie uwzględniono realizację strategicznego kierunku, jakim jest dywersyfikacja zarówno nośników energii pierwotnej, jak i kierunków dostaw tych nośników, a także rozwój wszystkich dostępnych technologii wytwarzania energii o racjonalnych kosztach, zwłaszcza energetyki jądrowej jako istotnej technologii z zerową emisją gazów cieplarnianych i małą wrażliwością na wzrost cen paliwa jądrowego. Przyjęto, że krajowe zasoby węgla kamiennego i brunatnego pozostaną ważnymi stabilizatorami bezpieczeństwa energetycznego kraju. Założono odbudowę wycofywanych z eksploatacji węglowych źródeł energii na tym samym paliwie w okresie do 2017 r. oraz budowę części elektrociepłowni systemowych na węgiel kamienny. Jednocześnie nie nakładano ograniczeń na wzrost udziału gazu w elektroenergetyce, zarówno w jednostkach gazowych wykorzystywanych do wytwa-

⁴⁰ Obwieszczenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 1 lipca 2005 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2025 r. (M.P. z dnia 22 lipca 2005 r.).

rzania energii elektrycznej w kogeneracji z ciepłem oraz w źródłach szczytowych, jak i w rezerwie możliwej do osiągnięcia w elektrowniach wiatrowych.

Zgodnie z przewidywanymi wymaganiami Unii Europejskiej założono wzrost udziału energii odnawialnej w strukturze energii finalnej do 15% w roku 2020. Dodatkowo założono ochronę lasów przed nadmiernym pozyskiwaniem biomasy oraz zrównoważone wykorzystanie obszarów rolniczych do wytwarzania energii odnawialnej, w tym biopaliw, tak aby nie doprowadzić do konkurencji między energetyką odnawialną i rolnictwem.

Założono skuteczne funkcjonowanie rynków paliw i energii oraz systemu regulacji działalności przedsiębiorstw energetycznych, co umożliwiło zastosowanie w modelu obliczeniowym symulacji racjonalnego zachowania odbiorców przy wyborze dostawców energii. W dziedzinie ochrony środowiska przyjęto generalne założenia uwzględniające: opłaty za emisję CO₂ zgodnie z ustaleniami Rady Europejskiej i Parlamentu z grudnia 2008 r., ograniczenia emisji SO₂ i NO_x do poziomów wynikających z obecnych regulacji międzynarodowych, a także rozwój niskoemisyjnych technologii wytwarzania energii oraz źródeł skojarzonych i rozproszonych.

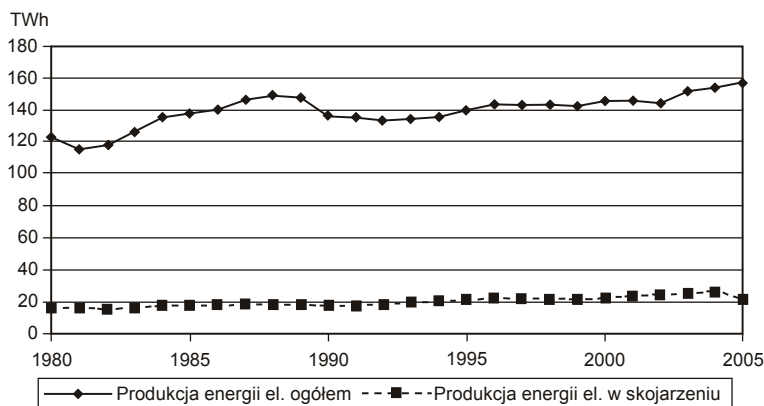


Rys. 2.1. Skumulowane przebiegi średnich wartości podstawowych wielkości mocy charakteryzujących KSE [MW] (tab. 2.1)

W każdym wariantcie prognozowana była zmiana struktury krajowego zużycia energii na korzyść gazu ziemnego i paliw ciekłych, jednakże z różnym tempem wzrostu zużycia gazu⁴¹. Przykłady przebiegów dotyczących średnich podstawowych warto-

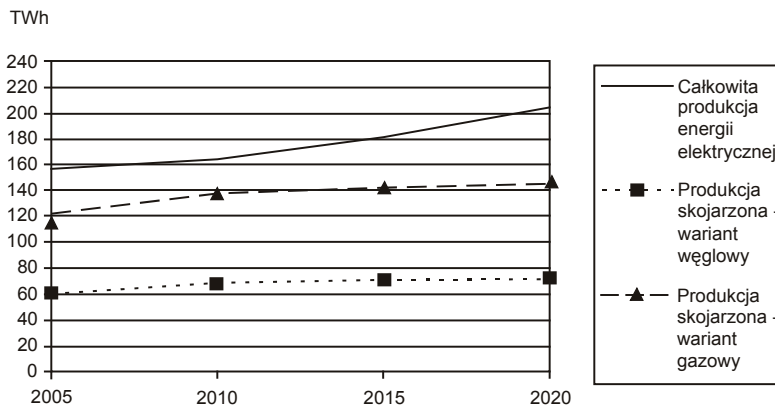
⁴¹ We wszystkich wariantach prognozy spełnione są wymagania ekologiczne, ustalone przez Protokół z Kioto, II Protokół Siarkowy, II Protokół Azotowy i KPRE. Spełnione są także wymagania udziału energii odnawialnej ustalone w Traktacie Akcesyjnym.

ści mocy charakteryzujących KSE w latach 1996–2007, a mianowicie: mocy osiągalnej, obciążenia, rezerwy mocy, ubytków mocy ze względu na remonty kapitalne i średnie, awaryjne oraz pozostałe ubytki mocy zamieszczono na rys. 2.1, a przykładowe dane liczbowe charakteryzujące system EE zamieszczono w tabeli 2.1.



Rys. 2.2. Produkcja energii elektrycznej w kraju w latach 1980–2005.

Źródło: Obwieszczenie Ministra Gospodarki z dnia 12 grudnia 2007 r. (MP. z dnia 4 stycznia 2008 r.)



Rys. 2.3. Produkcja energii elektrycznej w skojarzeniu przy pełnym wykorzystaniu potencjału ekonomicznego. Źródło: Obwieszczenie Ministra Gospodarki z dnia 12 grudnia 2007 r. (MP. z dnia 4 stycznia 2008 r.)

Ponadto wybrane wyniki charakteryzujące stan rozwoju KSE zamieszczono na rys. 2.2 oraz 2.3 oraz w tabelach 2.2–2.5 (MP z 4.01.2008 r.). Potencjał kogeneracji w porównaniu do możliwych korzyści wykorzystany jest w niedostatecznym stopniu. W 2005 r. wyprodukowano w skojarzeniu 277 PJ ciepła oraz 21,7 TWh energii elektrycznej.

Tabela 2.1. Wybrane empiryczne wartości liczbowe. Źródło: MP z 4.01.2008 r.

Lata	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	
Moc osiągalna	29 408	29 887	30 100	30 799	30 691	30 994	31 276	31 561	31 887	32 105	32 364	32 613	
Obciążenia	18 185	18 118	18 224	18 170	18 596	18 617	18 462	19 468	19 939	20 137	20 875	20 954	
Rezerwy mocy	5608	5690	6178	6063	7143	6761	7489	7174	7061	6698	5295	4615	
Ubytki mocy	remonty kapitalne i średnie	3242	3229	2692	3106	2789	3239	2671	2667	2695	2712	2684	3163
	remonty awaryjne	403	353	393	790	437	599	543	529	420	606	769	1057
	pozostałe	1970	2497	2613	2670	1726	1778	2111	1723	1772	1952	2741	2824

Tabela 2.2. Zmniejszenie emisji CO₂ w wyniku wykorzystania potencjału ekonomicznego kogeneracji [mln MG]. Źródło: MP z 4.01.2008 r.

Zmniejszenie emisji CO ₂	2005	2010	2015	2020
Technologia węglowa	14,2	16,0	16,6	17,1
Zamiana paliwa z węgla na gaz ziemny	49,5	56,0	58,0	59,6

Tabela 2.3. Uniknięte koszty zewnętrzne z tytułu potencjału ekonomicznego kogeneracji [mld zł/rok]. Źródło: MP z 4.01.2008 r.

Uniknięte koszty zewnętrzne	2005	2010	2015	2020
Technologia węglowa	3,58	4,04	4,19	4,31
Zamiana paliwa z węgla na gaz ziemny	29,92	33,79	35,02	36,01

Tabela 2.4. Emisja uniknięta CO₂ w latach 2000–2006. Źródło: MP z 4.01.2008 r.

Rok	Ilość emisji [Mg]
2000	2 331 000
2001	2 782 000
2002	2 767 000
2003	2 250 000
2004	2 893 000
2005	3 320 000
2006	3 661 000

Jednocześnie stosowane dotychczas technologie kogeneracji charakteryzują się w wielu wypadkach małym wskaźnikiem skojarzenia, tj. małym stosunkiem produkcji energii elektrycznej do produkcji ciepła. Przyczyną niedostatecznego rozwoju kogene-

racji są bariery o charakterze zwłaszcza ekonomicznym i administracyjnym. Przy aktualnym poziomie rozwoju technologii energetycznych bariery o charakterze technicznym mają znikome znaczenie⁴².

Tabela 2.5. Udział procentowy energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnych źródłach energii w całkowitym krajowym zużyciu energii elektrycznej brutto.

Źródło: MP z 4.01.2008 r.

Rok	Udział energii elektrycznej z OZE [%]
2001	1,9
2002	2,0
2003	2,2
2004	2,3
2005	2,5
2006	3,0
2007	3,9
2008	5,0
2009	6,2
2010	7,5
2011	7,5
2012	7,5
2013	7,5
2014	7,5

2.2. Bezpieczeństwo rozwoju

Bezpieczeństwem elektroenergetycznym określa się stan wystarczającej zdolności systemu EE do samoistnej obrony przed zagrożeniami, to jest do przetrwania podczas nagłych awarii, takich jak zwarcia katastroficzne lub nieprzewidziana utrata układów lub elementów systemu, włączając w to ograniczenia ruchowe oraz zdolność KSE do utrzymania pracy połączonych synchronicznie obszarów regulacyjnych i uniknięcia wystąpienia niekontrolowanego podziału obszaru synchronicznego w wyniku awarii systemowej [100].

W ustawie *Prawo energetyczne* [137] zostało zdefiniowane pojęcie bezpieczeństwa energetycznego jako: „stan gospodarki umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, przy zachowaniu wymagań ochrony środowiska”, a w przyjętym przez Radę Ministrów RP w dniu 4 stycznia 2005 roku dokumencie *Polityka energetyczna Polski do 2025 roku* bezpieczeństwo energetyczne jest zdefi-

⁴² Obwieszczenie Ministra Gospodarki z dnia 12 grudnia 2007 r (MP. z dnia 4 stycznia 2008 r.).

niowane jako *stan gospodarki umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię, w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, przy minimalizacji negatywnego oddziaływania sektora energii na środowisko i warunki życia społeczeństwa*. Pojęcie bezpieczeństwa elektroenergetycznego jest pojęciem węższym i dotyczy bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej [125, 126, 131–134]. W ustawie z dnia 15 kwietnia 2011 r. o efektywności energetycznej (Dz.U. z 2011 r. Nr 94, poz. 551, ze zm.) wprowadzono warunki w celu ograniczenia zużycia energii, strat w przesyłce i dystrybucji, zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego i redukcji zanieczyszczeń środowiska, co wynika z zapewnienia pełnego wdrożenia dyrektyw europejskich w zakresie efektywności energetycznej, w tym zmniejszenia zużycia energii o co najmniej 9% do końca 2016 r, oraz przyjętego na szczycie UE w marcu 2008 r 20% redukcji zużycia energii do 2020 r. Poprawa efektywności wiąże się z kolei ze zmniejszeniem emisji dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych, a tym samym zmniejszeniem stopnia zmian klimatycznych.

Według dokumentu *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku*⁴³ [135] oraz za pracą Jacka Malki [105] można przyjąć, że bezpieczeństwo elektroenergetyczne oznacza stan powszechnej dostępności energii elektrycznej o dopuszczalnej jakości, przy racjonalnych, uzasadnionych kosztach, co prowadzi do przyjęcia następującej definicji stanu bezpieczeństwa rozwoju systemu EE sformułowanej za Robertem Staniszewskim w kategoriach bezpieczeństwa systemu sterowania eksploatacją [153]:

$$\Gamma(K, \theta, t) = m_{see} M_{see}(K, \theta, t) - p_{oto} P_{oto}(K, \theta, t) \geq 0, \quad (2.1)$$

gdzie:

- $\Gamma(K, \theta, t)$ – stan bezpieczeństwa rozwoju systemu EE [kWh/rok], czyli stan możliwości pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną (w czasie t [h]), na każdym etapie rozwoju (w czasie θ [lata]), dzięki rezerwie mocy ponad pełne pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną w sytuacji nieprzewidzianej ubytkami mocy ze względu m.in. na remonty kapitalne i średnie oraz remonty awaryjne,
- $P_{oto}(K, \theta, t)$ – zapotrzebowanie na energię elektryczną (w czasie t), na każdym etapie rozwoju (w czasie θ), generowane przez otoczenie (*OTO*) systemu EE (założona charakterystyka wyjściowa, planowane zapotrzebowanie odbiorców energii elektrycznej) [kWh],

⁴³ „Bezpieczeństwo energetyczne oznacza zapewnienie stabilnych dostaw paliw i energii, na poziomie gwarantującym zaspokojenie potrzeb krajowych i po akceptowalnych przez gospodarkę i społeczeństwo cenach, z zachowaniem optymalnego wykorzystania krajowych zasobów surowców energetycznych oraz przez dywersyfikację źródeł i kierunków dostaw ropy naftowej, paliw ciekłych i gazowych”, Ministerstwo Gospodarki, Warszawa 2006.

- $M_{see}(K, \theta, t)$ – możliwości pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną (w czasie t), na każdym etapie rozwoju (w czasie θ), generowane przez system EE (rzeczywista charakterystyka wyjściowa, zrealizowane zapotrzebowanie) [kWh],
- p_{oto}, m_{oto} – odpowiednie współczynniki przeliczeniowe, związane z poziomem sterowania rozwojem systemu EE oraz ze stopniem wewnętrznego zorganizowania systemu [1/rok],

która dla systemu EE jako obiektu wielowymiarowego może zostać ustalona na podstawie badań statystyczno-eksploatacyjnych jako rozbieżność jakości procesu eksploatacji w poszczególnych etapach rozwoju systemu EE ($\Delta\theta$).

Po uwzględnieniu faktu, że ostatecznie system otoczenie (*OTO*) od systemu KSE potrzebuje⁴⁴ tyle energii elektrycznej na ile pozwalają mu środki finansowe oraz system KSE może wyprodukować tyle energii elektrycznej na ile go stać (ile ma potencjału operacyjnego), można za Józefem Koniecznym [70] zapisać:

$$P_{oto}(K, \theta, t) = f_{oto} F_{oto}(K, \theta, t) + r_{oto} R_{oto}(K, \theta, t), \quad (2.2)$$

oraz

$$M_{see}(K, \theta, t) = f_{see} F_{see}(K, \theta, t) + r_{see} R_{see}(K, \theta, t), \quad (2.3)$$

co prowadzi do zależności wyrażającej ilościowy wymiar jakości bezpieczeństwa rozwoju systemu EE:

$$\Gamma(K, \theta, t) = -p_{oto}[f_{oto} F_{oto}(K, \theta, t) + r_{oto} R_{oto}(K, \theta, t)] + m_{oto}[f_{see} F_{see}(K, \theta, t) + r_{see} R_{see}(K, \theta, t)] \geq 0, \quad (2.4)$$

gdzie:

- $F_{oto}(K, \theta, t)$ – możliwości wyasygnowania przez system *oto* (odbiorców) środków finansowych na zakup energii elektrycznej [tys. zł],
- $R_{oto}(K, \theta, t)$ – zapotrzebowanie na energię elektryczną ze strony systemu *oto* (odbiorców) [kWh],
- $F_{see}(K, \theta, t)$ – zapotrzebowanie SEE na pozyskanie środków finansowych z tytułu sprzedaży energii elektrycznej [tys. zł],
- $R_{see}(K, \theta, t)$ – możliwości dostarczenia energii elektrycznej do systemu *oto* (odbiorców) przez SEE [kWh],
- $p_{oto}, m_{oto}, f_{oto}, r_{oto}, f_{see}, r_{see}$ – odpowiednie wskaźniki podatności systemu SEE oraz *oto* na dokonanie transakcji produkcji i zużycia energii elektrycznej.

⁴⁴ Stefan Mynarski w pracy zbiorowej *Analiza rynku. Systemy i mechanizmy* [118], przytaczając koncepcję pięciopoziomowej hierarchii potrzeb, wyróżnia na drugim miejscu po potrzebach fizjologicznych potrzeby bezpieczeństwa.

Bezpieczeństwo elektroenergetyczne SEE zależy zatem także od wskaźników podatności systemu na zagrożenia, a mianowicie od podatności stanu i sposobu funkcjonowania źródeł energii elektrycznej, sieci przesyłowych, sieci dystrybucyjnych, systemów odbioru, a także od systemów pomocniczych, takich jak systemy pomiarowe, systemy automatyki zabezpieczeniowej, systemy przetwarzania informacji oraz system sterowania. Mogą się tutaj pojawiać zagrożenia typu terrorystycznego, zagrożenia ekologiczne, zagrożenia międzynarodowe, kataklizmy wewnętrzne, inwazje zewnętrzne itp. Efektem działania ekstremalnych zagrożeń może być utrata zasilania w energię elektryczną znacznego obszaru kraju przez okres trwający ponad jedną dobę (stan katastrofy). Zagrożenia mogą być przy tym zagrożeniami zwykłymi oraz zagrożeniami nadzwyczajnymi (bardzo rzadko występującymi), z drugiej strony mogą to być zagrożenia bezpośrednie oraz zagrożenia pośrednie [101].

Zagrożenia bezpośrednie mają podobny charakter w każdym systemie SEE, co wiąże się z koniecznością przystosowania systemu SEE do zmienności zapotrzebowania mocy, awarii elementów, zjawisk atmosferycznych, agresji zewnętrznej, błędów ludzkich itp. Natomiast zagrożenia pośrednie dla bezpieczeństwa systemu EE mogą wystąpić w trzech obszarach: polityki i ekonomii, techniki oraz eksploatacji i zarządzania [101].

Kryterium bezpieczeństwa zdefiniowane w niniejszej monografii dotyczy głównie typu zagrożeń pośrednich z obszaru techniki, a więc zagrożeń dotyczących zmian struktury i parametrów SEE (zmian liczby i wartości parametrów K), które obejmują: błędne prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną, rozwój dużych źródeł energii elektrycznej bez koordynacji z rezerwowymi źródłami rozproszonymi wykorzystującymi energię odnawialną, zbyt znaczne rozbieżności pomiędzy strukturą rozmieszczenia odbiorców oraz strukturą inwestycji w źródła energii i sieci elektroenergetyczne, zbyt daleko posunięty proces starzenia się SEE, w tym systemów automatyki pomiarowej, zabezpieczeniowej, brak jednolitego systemu zbierania, przesyłu i wykorzystania danych węzłowych – co jest bardzo istotne w przywracaniu równowagi SEE po awarii katastrofalnej itp. [101, 145].

Polityka bezpieczeństwa elektroenergetycznego wiąże się z zapobieganiem awarii katastrofalnych oraz z przeciwdziałaniem skutkom awarii, uznając je za niedopuszczalne jako powodujące stan kryzysu, do których należą m.in.: rozpad SEE wskutek utraty stabilności statycznej lub dynamicznej, pozbawienia zasilania w energię znacznego obszaru lub ograniczenie zasilania wskutek długotrwałej awarii dużego źródła energii, pozbawienie zasilania w energię elektryczną dużych aglomeracji na kilka dni, wskutek na przykład zniszczenia sieci na znacznym obszarze (występowanie szadzi, marznącego deszczu, osadzania śniegu na przewodach napowietrznych itp.). W warunkach polskich duża awaria sieci elektroenergetycznej o charakterze blackoutu wystąpiła w dniach 7/8 kwietnia 2008 roku w rejonie Szczecina, której skutki podobne były do awarii sieci RWE w 2005 roku w rejonie Münster, wskutek współdziałania wiatru i mokrego śniegu osadzonego na przewodach i konstrukcjach, a także w oto-

czeniu linii, zwłaszcza 110 kV i SN, co spowodowało znaczne zniszczenia sieci rozdzielczych i długotrwały brak zasilania w energię elektryczną wielu tysięcy osób [101]. Można za Robertem Staniszewskim przyjąć, że eksploatacja systemu EE prowadzi do zmian wartości parametrów systemu EE ze zbioru⁴⁵ [152, 153, 163, 164]:

$$\bar{K}(\theta) = \langle K_1(\theta), K_2(\theta), \dots, K_n(\theta) \rangle, \quad (2.5)$$

gdzie kreska nad zmienną oznacza uporządkowany zbiór wielkości w przestrzeni wielowymiarowej (podobnie elementy objęte znakami < oraz >).

Zmiany parametryczne, a więc zmiany wartości parametrów występujących w modelu rozwoju SEE (wynikające ze zmian parametrów elementów, urządzeń, układów, czy podsystemów) nie naruszają stanu jego bezpiecznego rozwoju. Natomiast zmiany strukturalne, a więc zmiany liczby elementów, zmiennych wejściowych i wyjściowych, zmiany konfiguracji SEE itp. wprowadzają stan niebezpieczny rozwoju, przy wystąpieniu którego może nastąpić gwałtowna zmiana charakterystyk systemu i poszczególnych podsystemów, układów, urządzeń i elementów, a więc m.in. gwałtowna zmiana liczności i wartości wielkości zmiennych stanu, zmiennych wejściowych (wymuszeń) i zmiennych wyjściowych SEE (odpowiedzi). Zmiany strukturalne charakteryzują się ubytkiem lub zwiększeniem elementów, układów, podsystemów systemu EE, jako składowych systemu. Relację rozgraniczającą stan dynamiczny zużycia lub odnowy systemu EE na ciągły oraz nieciągły można zatem dalej zapisać następująco:

$$A(\bar{K}) \frac{d\bar{K}(\theta)}{d\theta} = P(\bar{K}, \theta) - P_0(\bar{K}, \theta) \quad (2.6)$$

przy czym:

$P(\bar{K}, \theta)$ – rzeczywisty potencjał eksploatacyjny systemu EE (rzeczywiste ponoszone nakłady oraz rzeczywista dostarczana do odbiorcy energia elektryczna),

$P_0(\bar{K}, \theta)$ – planowany potencjał eksploatacyjny systemu EE według założonego programu działania (założony do poniesienia nakład użyteczności oraz założona do wyprodukowania energia elektryczna).

Stanem bezpiecznym rozwoju systemu można zatem nazwać taki stan SEE (w danym momencie eksploatacji systemu, na danym etapie rozwoju systemu), w którym w czasie rozwoju możliwe są zmiany parametryczne, ale nie są możliwe zmiany strukturalne, co można zapisać następująco:

⁴⁵ Ten kierunek badań zapoczątkował Robert Staniszewski, publikując koncepcję szacowania poziomu bezpieczeństwa systemów w pracy *Szacowanie poziomu bezpieczeństwa*, [w:] Materiały na Kolokwium Niezawodności Bezpieczeństwa, Informator, ITWL, Kiekrz 1986.

$$\begin{aligned}\bar{K}_{k_d}(\theta) &< \bar{K}(\theta) < \bar{K}_{k_g}(\theta), \\ \bar{K}_{k_d}(\theta) &= \text{const}, \\ \bar{K}_{k_g}(\theta) &= \text{const},\end{aligned}\tag{2.7}$$

gdzie indeks k oznacza wielkość krytyczną, a indeksy d oraz g odpowiednio dolną i górną wartość parametrów wyznaczających granice bezpieczeństwa.

Stanem niebezpiecznym rozwoju SEE jest taki stan, w którym nastąpiła nagle zmiana charakterystyk wartości zbiorów wielkości wejściowych oraz wielkości wyjściowych, stąd granicą bezpieczeństwa (stanem krytycznym) jest moment przejścia od zmian parametrycznych do zmian strukturalnych, których jednym ze szczególnych przypadków jest transformacja systemowa, a zwłaszcza zmiany prawa własności, co w sposób formalny za pracami [152, 166] można zapisać w sposób następujący:

$$GB = \langle k_k, m_k, l_k, n_k, x_k, u_k, y_k, \theta_k \rangle,\tag{2.8}$$

gdzie:

- k_k – zbiór wielkości charakterystycznych parametrów systemu, które mogą pojawić się w macierzy **A**,
- m_k – zbiór wielkości charakterystycznych parametrów systemu, które mogą pojawić się w macierzy **B**,
- l_k – zbiór wielkości charakterystycznych parametrów systemu, które mogą pojawić się w macierzy **C**,
- n_k – zbiór wielkości charakterystycznych parametrów systemu, które mogą pojawić się w macierzy **D**,
- x_k – zbiór nowych zmiennych stanu systemu, które mogą pojawić się w modelu systemu EE,
- u_k – zbiór nowych zmiennych wejściowych systemu, które mogą pojawić się w modelu systemu EE,
- y_k – zbiór nowych zmiennych wyjściowych systemu, które mogą pojawić się w modelu systemu EE,
- θ_k – czas w sensie długim (krytyczny).

Jakość procesu rozwoju SEE można przy tym przedstawić jako różnicę między założoną charakterystyką zmiennej wyjściowej $\Delta y_0(K, \theta, t = \text{const})$ i rzeczywistą charakterystyką zmiennej wyjściowej $\Delta y(K, \theta, t = \text{const})$ SEE⁴⁶, co dla rozważanego przypadku wielowymiarowego można zapisać następująco:

$$\overline{\Delta y}(K, \theta) = \langle |\overline{\Delta y_0} - \overline{\Delta y}| \rangle,\tag{2.9}$$

⁴⁶ Dla systemu EE charakterystyką y jest strumień możliwości wyprodukowania energii i świadczenia usług systemowych przesyłu mocy i energii elektrycznej oraz strumień możliwości wyasygnowania nakładów użyteczności (poniesienia kosztów na zakup surowców energetycznych itp.).

gdzie:

- K – zbiór parametrów rozwoju SEE,
- θ – czas długi jako zmienna niezależna procesu rozwoju systemu [miesiące, kwartały, lata],
- t – czas krótki (sekundy, minuty, godziny, dni) jako zmienna niezależna dynamiki sterowania procesem rozwoju, dla $\theta = \text{const}$, czas eksploatacji systemu.

Korzystając dalej z równania wyjścia w przestrzeni stanów dla systemu wielowymiarowego, wyrażającego jakość procesu eksploatacji systemu EE, uzyskuje się za Robertem Staniszewskim [153] następującą sytuację parametryczną:

$$\overline{\Delta y_p}(K, t, \theta) = \langle \overline{\Delta y_{p0}}(K, t, \theta) - \overline{\Delta y_p}(K, t, \theta) \rangle \quad (2.10)$$

oraz odpowiednią sytuację strukturalną:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta y_s}(K, t, \theta) &= \langle \overline{\Delta y_{s0}}(K, t, \theta) - \overline{\Delta y_s}(K, t, \theta) \rangle \\ &= \langle \overline{\Delta x_{s0}}(K, t, \theta) - \overline{\Delta x_s}(k, t, \theta); \overline{\Delta u_{s0}}(K, t, \theta) - \overline{\Delta u_{s1}}(K, t, \theta) \rangle; \end{aligned} \quad (2.11)$$

gdzie:

- Δ – przyrosty odpowiednich wielkości, oznaczają ich zmiany, przy czym pod uwagę brane są zmiany przyrostów, a więc metazmiany,
- y – zmienna wyjściowa wyrażająca dowolny zbiór wielkości wyjściowych rozwoju SEE, przy której indeks $_{p0}$ oznacza stan przed zmianami parametrycznymi, a indeks $_{p1}$ stan po zmianach parametrycznych oraz odpowiednio $_{s0}$ oznacza stan przed zmianami strukturalnymi, a indeks $_{s1}$ stan po zmianach strukturalnych,
- u – zmienna wejściowa,
- x – zmienna stanu,
- indeksy: $_{s0}$ – oznacza założoną charakterystykę, $_{s1}$ – rzeczywiste zmienne wejściowe, wyjściowe oraz stanu,

kreska nad zmienną lub zapis w notacji $\langle | \rangle$ oznaczają uporządkowane odpowiednie zbiory wielkości wyjściowych, wejściowych, stanu) systemu EE w przestrzeni wielowymiarowej.

Krzywa opisana zależnością (2.9) może zostać ustalona także w sposób szacunkowy w wyniku badań empiryczno-rozwojowych, przy czym powierzchnia pod krzywą jest proporcjonalna do potencjału rozwojowego systemu SEE, a mianowicie:

$$P(\overline{K}, \theta) = \int_{\theta_p}^{\theta_k} \Delta y(\theta) d\theta, \quad (2.12)$$

$$\overline{K} = \text{const},$$

który jako potencjał operacyjny rozwoju systemu EE wynika z wielkości wyjściowych SEE.

Z okresem rozwoju SEE od θ_p aż do θ_k , czyli z okresem $\Delta\theta$ związane są zmiany parametrów wyrażonych relacją (2.12) aż do punktu $\langle \Delta y_k, \theta_k \rangle$, w którym następują zmiany strukturalne, które związane są z ubytkiem lub pojawieniem się nowych elementów, układów, podsystemów, co w konsekwencji może prowadzić do naruszenia bezpieczeństwa funkcjonowania systemu. Do tego krytycznego stanu nie można dopuścić, dlatego też z odpowiednim wyprzedzeniem należy przeprowadzić remont systemu EE lub celowe sterowanie rozwojem. Prowadzenie kolejnych remontów (w wyniku starzenia się systemu, rozwój ujemny) lub prowadząc celowe sterowanie rozwojem SEE (rozwój dodatni) można uzyskać zbiór punktów bezpieczeństwa rozwoju SEE, a mianowicie:

$$\bar{\Delta y}_b < \Delta y_{b1}, \Delta y_{b2}, \dots, \Delta y_{bn} >, \quad (2.13)$$

gdzie w relacji do $\Delta y(\theta)$ można przedstawić wyrażenie analityczne, które w systemach elektromechanicznych o konstrukcji rozwijającej się, do których zaliczany jest też system elektroenergetyczny, zwykle przyjmuje postać równania elipsy:

$$\Delta y = \sqrt{\left(1 - \frac{\theta^2}{\theta_a^2}\right) (\Delta y_b)^2}, \quad (2.14)$$

gdzie:

- θ_a – łączny czas rozwoju systemu EE,
- Δy_b – potencjał rozwojowy SEE (początkowy dla sytuacji zużywania się systemu (rozwój ujemnego) oraz końcowy dla przypadku odnowy (rozwój dodatniego systemu).

Równanie (2.14) określa zatem teoretycznie granice bezpieczeństwa systemu, przy czym zasadniczy wpływ na jej przebieg mają parametry $\langle \theta_a, \Delta y_b \rangle$

Ciekawym pomysłem wychodzącym naprzeciw uporządkowaniu działań niezbędnych do osiągnięcia pożądanego stanu systemu EE jest tak zwana mapa drogowa bezpieczeństwa KSE, która wiąże się z potrzebą zdefiniowania stanu KSE odpowiadającego wymaganemu poziomowi bezpieczeństwa w postaci zbioru parametrów obejmujących: źródła energii elektrycznej, sieci przesyłowe i rozdzielcze, wraz z połączeniami międzynarodowymi (trasgranicznymi), odbiorniki energii elektrycznej zgodnie z prognozą zapotrzebowania na obszarze objętym KSE.

Zbiór parametrów składających się na mapę drogową powinien przy tym odpowiadać zbiorowi zagrożeń. W tabeli 2.6 za pracą [100] zamieszczono podstawowe zagrożenia i działania w obszarze bezpieczeństwa energetycznego.

KSE budowany jest w sposób ciągły, co najmniej od roku 1946, którego zasadniczym celem obok zapewnienia efektywności jest osiągnięcie możliwie wysokiego i racjonalnego poziomu bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Jednak w poszczególnych okresach w badanych latach 1946–2007 rozwój KSE uzależniony był od polityki państwa, a zwłaszcza od polityki gospodarczej, w tym energetycznej. Za pracą [100] w tabeli 2.7 zestawiono główne cele rozwoju KSE w perspektywie do 2030 r. wymienione w projekcie rządowym polityki energetycznej kraju.

Ze względu na fakt, iż bezpieczeństwo systemu EE jest stanem dynamicznym, stąd należy bezpieczeństwo systemu stale monitorować i oceniać, stale wzmacniać poziom bezpieczeństwa, zarówno w zakresie jakości energii elektrycznej, jak i warunków dostawy jej do odbiorców. Opis stanu bezpieczeństwa SEE jako stanu dynamicznego wiąże się z pojęciem zapasu bezpieczeństwa rozwoju systemu. W wyniku zmian parametrycznych oraz zmian strukturalnych zmianom ulega stan SEE oraz zapas bezpieczeństwa rozwoju, gdyż zachodzą dwa przeciwstawne procesy: proces starzenia się systemu w wyniku eksploatacji SEE oraz proces odnowy systemu w wyniku rozwoju SEE.

Obecnie nie ma wątpliwości co do potrzeby rozwoju źródeł rozproszonych, takich jak elektrownie wiatrowe (farmy wiatrowe), czy też aeroenergetyka (energetyka oparta o biomasę) i bioenergetyka. Także znajduje coraz większą akceptację społeczną koncepcja rozwoju elektrowni jądrowych oraz w ślad za tym rozwoju sieci przesyłowych, łącznie z rozbudową sieci 400 kV i połączeniami transgranicznymi.

Ponadto na oddzielną uwagę zasługuje fakt, iż KSE został ukształtowany w okresie wymagań polskiej gospodarki centralnie planowanej i zarządzanej. Obecnie polska energetyka przechodzi złożony proces dostosowywania się do zmienionych warunków gospodarki rynkowej, zmienionej struktury odbiorców energii, nowych wymagań w zakresie ochrony środowiska.

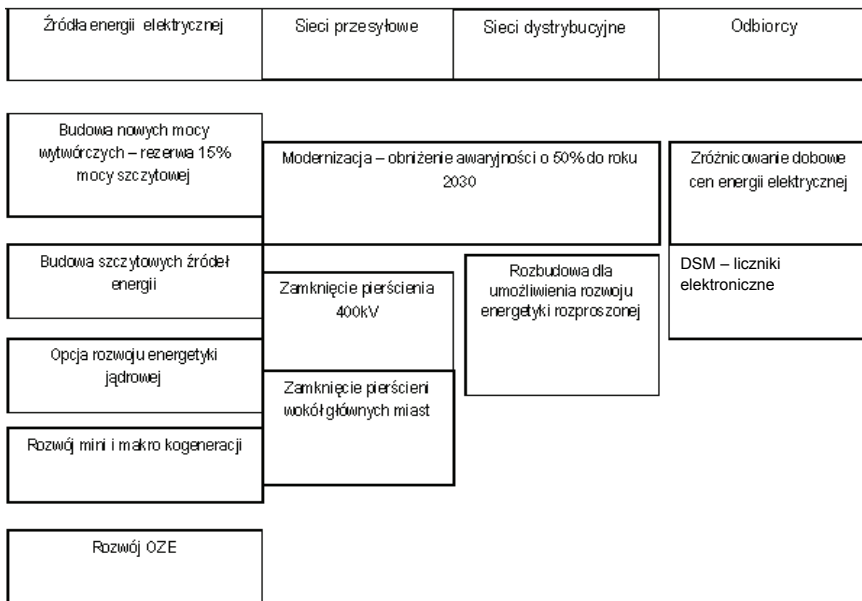
Ze względu na to, iż decentralizacja następuje, chociaż bardzo powoli, nieuchronna jest zmiana charakteru badania i stosowania definicji bezpieczeństwa rozwoju KSE. Oprócz definicji, takich jak stan ustalony, stan normalny, stan restytucji (stan poawaryjny), stan pogotowia, stan wystarczalności, należy także ściśle zdefiniować pojęcie stanu bezpieczeństwa, w tym stanu bezpieczeństwa rozwoju, tym bardziej iż większość stanów poważnego zagrożenia reprezentuje przekroczenie granic bezpieczeństwa (ang. *security*). A ponieważ, jak między innymi zauważa Z. Szczerba w pracy [156], bezpieczeństwo każdego systemu, zespołu lub urządzenia technicznego jest pojęciem rozmytym, gdyż w rzeczywistości nie ma obiektu doskonale bezpiecznego lub doskonale niebezpiecznego, stąd dla prawidłowego określenia poziomu bezpieczeństwa celowe jest zdefiniowanie określonych stanów obiektu: elementu, zespołu, systemu pozwalających w przybliżeniu określić ryzyko związane z bezpieczeństwem.

W takim ujęciu przez pojęcie *bezpieczeństwo systemu* należy rozumieć stan obiektu, jakim jest SEE (stan bezpieczeństwa) i wyróżniać je obok takich stanów, jak: stan pogotowia, stan wystarczalności, stan normalny itp.

Tabela 2.6. Podstawowe zagrożenia i działania w obszarze bezpieczeństwa energetycznego (za pracą [101])

Cel ogólny	Zagrożenie bezpieczeństwa	Działania	Horyzont czasowy
Osiągnięcie zdolności eliminowania lub racjonalnego ograniczenia zagrożeń i ich skutków	Zagrożenie wystarczalności	Polityka energetyczna Programy Planowanie Inwestycje	5 -25 lat
	Zagrożenie niezawodności	Monitoring Diagnostyka Procesy odnowy Inwestycje prewencyjne	1-5 lat
	Zagrożenie bezpośrednie ciągłości dostaw i jakości energii	Systemy pomiarów zabezpieczeń i przetwarzania danych Teleinformatyka Procedury operatorskie wspomagane komputerowo	0-1 rok
	Zagrożenie ekonomiczne	Redukcja kosztów Podnoszenie sprawności i efektywności	stale

Tabela 2.7. Zestawienie głównych celów rozwoju KSE w perspektywie 2030 r. według projektu rządowego polityki energetycznej (za pracą[101])



Warto zwrócić uwagę na definicje związane z automatyką ze względu na bezpieczeństwo, w tym wymierne pozytywne efekty działania automatyki z uwzględnieniem

bezpieczeństwa elektroenergetycznego, takie jak: utrzymanie zmiennych stanu pracy SEE w dopuszczalnych przedziałach, automatyczna optymalizacja eksploatacji SEE w sensie odnowy i użytkowania SEE, pod kątem ekonomii i bezpieczeństwa elektroenergetycznego, poprawa stabilności pracy SEE, zapewnienie odpowiedniej jakości energii elektrycznej itp. Jest to niemożliwe do uzyskania bez rozwoju układów automatyki, poprawy właściwości pracy poszczególnych elementów systemu, jak np. zapasu stabilności, czy też poprawy jakości energii elektrycznej itp., a także obrona systemu w stanach przedawaryjnych i awaryjnych (odciążanie, podział na wyspy i podsystemy, włączanie rezerw itp., przyspieszenie procesów odbudowy, (łączenie obiektów, wysp i podsystemów, zamykanie pierścieni itp.), odciążenie dyspozytorów i obsługi od działań rutynowych możliwych do zalgorytmizowania.

Ze względu na to, iż nowoczesne układy automatyki mają zdecydowany wpływ na szeroko rozumiane bezpieczeństwo, od pojedynczych urządzeń do całego systemu EE, funkcjonującego w kategoriach systemów bezludnych jako systemu sterowania, niezbędne jest nadanie tak rozumianemu SEE wysokiej pozycji umocowania prawnego w hierarchii aktów prawnych, a już w chwili obecnej niezbędne jest bieżące aktualizowanie wymagań ujętych w aktualnych aktach prawnych, aby wymusić korzystanie przez operatorów systemów, w tym zwłaszcza przez OSP i OSD z możliwości, jakie daje współczesna technika informatyczna, oraz rozbudowane inteligentne algorytmy działania [100]. Ryzyko utraty bezpieczeństwa elektroenergetycznego wiąże się przy tym z:

- problematyką wpływu rynku w horyzontach wieloletnich, co ujmowane jest nie tylko w sposób ilościowy, ale także w sposób jakościowy,
- problematyką wpływu rynku w horyzontach średnich, przejawiające się wzrostem cen energii elektrycznej głównie na rynku bilansującym, wiążące się z tak zwanym przeregulowaniem rynku (zjawisko kryzysu kalifornijskiego),
- problematyką wpływu rynku w horyzontach krótkich, sekundowych i minutowych, co wiąże się z potrzebą utrzymywania rezerwy minutowej oraz rezerwy sekundowej (tak zwane wymagania techniczne).

Rynek energii elektrycznej wymusza ekonomiczną efektywność działania podmiotów w nim uczestniczących, jednakże zagrożeniem utraty bezpieczeństwa elektroenergetycznego są jednak zasady działania rynku, które nie odzwierciedlają wszystkich kosztów energii elektrycznej: od pozyskania paliw, poprzez wytworzenie energii elektrycznej, jej przesył i dystrybucję aż do jej zużycia w urządzeniach odbiorczych, które przetwarzają energię elektryczną na energię użytkową⁴⁷.

⁴⁷ Buchta F., Kucharczyk P., *Identyfikacja i analiza różnych rodzajów ryzyka w aspekcie zagrożeń bezpieczeństwa elektroenergetycznego wynikających z makroekonomicznego otoczenia przedsiębiorstw elektroenergetycznych*. Raport z realizacji: Zadanie 4, Temat 4.1, Punkt 4.1.1 Projekt Badawczy Zamawiany Nr PBZ-MEiN-1/2/2006 *Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju*. Konsorcjum Politechnik: Gdańskiej, Śląskiej, Warszawskiej i Wrocławskiej. Wyd. Elektryczny. PŚ, Gliwice 2008.

2.3. Efektywność rozwoju

Do opisu ilościowego, a często też do opisu jakościowego rozwoju SEE przyjmowane są charakterystyki jako relacje pomiędzy wielkościami opisującymi model systemu uzyskany w wyniku identyfikacji. Charakterystyki powinny dawać informację o pracy systemu EE w zakresie czasu t oraz o rozwoju SEE w zakresie czasu θ . Podstawowymi parametrami takich charakterystyk są między innymi: ograniczenie dolne, ograniczenie górne, punkty osobliwe (np. ekstrema oraz punkty przegięcia, punkty nieciągłości) i zakresy monotoniczne. Wyróżnia się ponadto ograniczenia brzegowe oraz ograniczenia czasowe etapowe oraz ograniczenia przydatności rozwojowej.

W celu poprawnego zdefiniowania algorytmu rozwoju SEE niezbędne jest poznanie natury rozwoju, a tę można poznać na podstawie charakterystyk wejściowych $u(K, \theta)$ oraz wyjściowych $y(K, \theta)$. Istotnym dalem podziałem charakterystyk jest podział na charakterystyki statyczne i charakterystyki dynamiczne. Charakterystyki statyczne definiowane są jako zależności wielkości wyjściowych od wielkości wejściowych w stanie ustalonym, a więc przy $t = 0$ oraz $\theta = 0$ (lub w szczególnym przypadku dla $t = \text{const}$ oraz $\theta = \text{const}$)⁴⁸. Charakterystyki statyczne rozwoju SEE uzależnione są od przebiegu charakterystyk układów i elementów wchodzących w skład systemu⁴⁹. Z kolei charakterystyki dynamiczne mogą być standardowe (czyli: skokowe, częstotliwościowe oraz impulsowe) lub uniwersalne. I są to charakterystyki techniczne rozwoju SEE, związane z fizycznym przepływem strumienia energii i mocy jako potencjału zabezpieczenia oraz potencjału operacyjnego $R(K, \theta, t)$, który jako techniczna wartość układu fizycznego, jakim jest SEE, może być wyrażona za pomocą funkcji ciągłej lub dyskretnej, przy czym K oznacza zbiór parametrów rozwoju SEE. W przypadku występowania procesów sterowania opisywanych charakterystykami informa-

⁴⁸ Robert Staniszewski w pracy *Sterowanie procesem eksploatacji* [153] dokonał podziału charakterystyk na statyczne i dynamiczne: „Pierwsze są definiowane jako zależności wielkości wyjściowej od wielkości wejściowej w stanie ustalonym, a więc przy $t = 0$, $\theta = 0$ (lub czas długi stały) (...) Charakterystyki statyczne dają bardzo skromne wiadomości o procesie sterowania ze względu na brak wielkości t i θ . Mają jednak bardzo ważne znaczenie (...), gdyż zawierają informację o stopniu nieliniowości charakterystyk statycznych. Stopień nieliniowości ma zasadniczy wpływ na zakres trudności przy budowie modelu dynamiki procesu sterowania (...)”. W rozważanym w monografii przypadku rozwoju systemu SEE wykorzystano definicję, odnosząc ją do procesów rozwoju systemów sterowania. Okazała się bardzo użyteczna zwłaszcza w zakresie badania dynamiki rozwoju KSE za pomocą zmiennych stanu.

⁴⁹ Intuicyjnie zagadnienie tutaj sformułowane wygląda na trywialne. W rzeczywistości tak nie jest, gdyż SEE jako system złożony przez analogię do złożonych układach dynamicznych ma charakterystyki uzależnione od charakterystyk układów i elementów wchodzących w skład podsystemów, czy układów. Zagadnienie niniejsze jest szerzej opisane w książce Cannon R.H. jr. *Dynamika układów fizycznych*, WNT, Warszawa 1972.

cyjnymi (w procesach rozwoju charakterystykami informacji cenowej, a więc charakterystykami ekonomicznymi) można mówić o potencjale nakładu i dochodu użyteczności, co wiąże się z występowaniem charakterystyk techniczno-ekonomicznych.

Uwzględnienie czynnika ekonomicznego łącznie z czynnikiem technicznym daje możliwość utworzenia charakterystyk techniczno-ekonomicznych, stąd też oprócz parametrów technicznych można wyróżnić wskaźniki ekonomiczne oraz wielkości zagregowane techniczno-ekonomiczne. Charakterystyki techniczno-ekonomiczne nazywane są charakterystykami uogólnionymi, gdyż dają możliwość porównania wysiłku albo kosztów sterowania rozwojem w stosunku do efektu technicznego uzyskanego w systemie elektroenergetycznym. Są one związane z ekonomiczną wartością układu fizycznego jakim jest system EE, związane z przepływem środków finansowych jako strumienia użyteczności (dochodów lub nakładów) $F(K, \theta, t)$, który jako ekonomiczna wartość układu fizycznego, jakim jest system EE, może być wyrażona za pomocą funkcji ciągłej lub dyskretnej. Wielkością wiążącą obie charakterystyki jest efektywność jako sprzężenie czynników technicznych z ekonomicznymi, co można zapisać za Robertem Staniszewskim [152] w następującej postaci:

$$A(K, \theta) = \frac{R(K, \theta)}{F(K, \theta)}, \quad (2.15)$$

gdzie:

- $A(K, \theta)$ – iloraz funkcji $F(K, \theta)$ i $R(K, \theta)$ określający efektywność techniczno-ekonomiczną procesu rozwoju systemu EE [kWh/PLN],
- $F(K, \theta)$ – funkcja użyteczności typu: nakładu użyteczności $FI(K, \theta)$ lub dochodu użyteczności $FD(K, \theta)$, charakteryzująca funkcję wysiłku wkładanego w rozwój SEE, reprezentująca stronę ekonomiczną procesu rozwoju SEE (PLN),
- $R(K, \theta)$ – funkcja potencjału typu: zabezpieczenia $RI(K, \theta)$ lub operacyjnego $RD(K, \theta)$, charakteryzująca proces rozwoju pod względem technicznym, wyznaczająca wartość techniczną (energetyczną) rozwoju systemu EE [kWh].

Pojęcie efektywności rozwoju SEE, pomimo wielu definicji samego pojęcia efektywności w literaturze przedmiotu [142] nie doczekało się w elektroenergetyce jednoznacznej definicji [69, 76, 100–102, 114, 126, 127, 133, 150, 163, 164, 173, 203]. W analizach techniczno-ekonomicznych można wykorzystać następujące relacje robocze, a mianowicie [152, 153]:

$$R(K, \theta) - A(K, \theta)F(K, \theta) = 0 \quad (2.16)$$

oraz postać:

$$\frac{dR(K, \theta)}{d\theta} - F(K, \theta) \frac{dA(K, \theta)}{d\theta} - A(K, \theta) \frac{dF(K, \theta)}{d\theta} = 0. \quad (2.17)$$

Można dalej mówić o dwóch wskaźnikach efektywności systemowej SEE, a mianowicie:

1) efektywności dochodowej:

$$A_{DI}(K, \theta) = \frac{RI(K, \theta)}{FD(K, \theta)}, \quad (2.18)$$

2) efektywności nakładczej:

$$A_{ID}(K, \theta) = \frac{FI(K, \theta)}{RD(K, \theta)}, \quad (2.19)$$

a także o czterech wskaźnikach efektywności dynamicznej, a mianowicie:

3) efektywności zasilania:

$$A_I(K, \theta) = \frac{FI(K, \theta)}{RI(K, \theta)}, \quad (2.20)$$

4) efektywności operacyjnej:

$$A_D(K, \theta) = \frac{RD(K, \theta)}{FD(K, \theta)}, \quad (2.21)$$

5) efektywności finansowej:

$$A_F(K, \theta) = \frac{FI(K, \theta)}{FD(K, \theta)}, \quad (2.22)$$

6) efektywności technologicznej (energetycznej, w tym elektroenergetycznej):

$$A_R(K, \theta) = \frac{RD(K, \theta)}{RI(K, \theta)}. \quad (2.23)$$

które w konkretnych zastosowaniach należy sprowadzić do porównywalności technicznej, ekonomicznej lub techniczno-ekonomicznej.

Oznaczenia do wzorów (2.15)–(2.23):

$RD(K, \theta)$ – zmienna wyjściowa jako strumień potencjału operacyjnego, np. sprzedaży energii elektrycznej oraz usług systemowych [KWh],

$FD(K, \theta)$ – zmienna wejściowa jako strumień dochodu użyteczności, np. dochodów finansowych pozyskiwanych z tytułu sprzedaży energii elektrycznej oraz sprzedaży usług systemowych [PLN],

$RI(K, \theta)$ – zmienna wejściowa jako strumień potencjału zabezpieczenia, np. strumienie odnowy funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, w tym zużycie paliwa (węgla kamiennego, węgla brunatnego, gazu, paliw ciekłych itp.) [tona] oraz zużycie własne energii elektrycznej [kWh], liczba zatrudnionych osób, amortyzacja itp.,

$FI(K, \theta)$ – zmienna wyjściowa jako strumień nakładu użyteczności, np. kosztów ponoszonych na wynagrodzenia, utrzymanie i rozwój systemu elektroenergetycznego itp. [PLN].

Można ponadto wyróżnić inne rodzaje efektywności systemów elektroenergetycznych rozwijających się, takie jak np.: efektywność wewnętrzną, efektywność zewnętrzną, efektywność ekonomiczną⁵⁰ itp., które w niniejszej pracy nie są omawiane i wykorzystywane. Obszerne omówienie różnych rodzajów efektywności zawiera praca Piotra Sienkiewicza *Teoria efektywności systemów* [142].

Efektywność tak zdefiniowana jak w przypadkach (2.18)–(2.23) jest wykorzystywana do budowania wskaźników jakości systemu. W zależności od punktu widzenia różne są przy tym funkcje oceny jakości SEE. W przypadku systemów sterowania, do których zaliczany jest SEE, za funkcję oceny wygodnie jest przyjmować wielkości stanu (zmienne wejściowe, zmienne wyjściowe, zmienne stanu oraz zakłócenia)⁵¹.

Zwiększenie efektywności energetycznej⁵² jest jednym z kluczowych elementów zrównoważonej polityki energetycznej państwa i wymaga działań w zakresie zmniejszenia energochłonności wyrobów w trakcie ich projektowania, wytwarzania, użytkowania i utylizacji, przy zwróceniu szczególnej uwagi na fakt, iż na energochłonność wyrobów decydujący wpływ ma etap ich projektowania. Zwiększanie efektywności energetycznej procesów wytwarzania, przesyłu i użytkowania energii jest bazą prowadzenia zrównoważonej polityki energetycznej, co wymuszane jest przez odpowiednie zapisy w rozwiązaniach prawnych i podejmowanych decyzjach przez instytucje państwowe i organizacje międzynarodowe. Wymienić warto m.in. regulacje związane z efektywnością energetyczną, w tym: Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z dyrektywą 2006/32/WE z dnia 5 kwietnia 2006 r., w sprawie efektywności końcowego użytkowania energii i usług energetycznych⁵³, Odnowioną Strategią Lizbońską oraz Narodową Strategią Spójności na lata 2007–2013.

⁵⁰ Jacek Malko proponuje wykorzystywanie tak zwanego wskaźnika efektywności ekonomicznej wariantu rozbudowy systemu, który określa jednostkowy koszt produkcji w nowych obiektach jedynie w sposób przybliżony z uwagi na poczynione założenia odnośnie do podziału kosztów zmiennych i efektów między system bazowy (w roku zerowym) i przyrost mocy [100].

⁵¹ Dla układów fizycznych podstawą formułowania ocen jest charakterystyka techniczna zewnętrzna w postaci bezwzględnej lub względnej. Natomiast dla systemów fizycznych, oprócz czynnika technicznego, uwzględniany jest także czynnik ekonomiczny. W ocenie układu przeważają aspekty ilościowo-energetyczne (wartość mocy, energii, częstotliwości, napięcia itp. W ocenie systemu dominują czynniki jakościowo-informacyjne (jakość rozwoju, szybkość zmian parametrycznych i strukturalnych, dokładność pomiaru, efektywność i bezpieczeństwo rozwoju itp. [152].

⁵² Obwieszczenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 1 lipca 2005 roku w sprawie polityki energetycznej państwa do 2025 roku (M.P. z dnia 22 lipca 2005 r.). Efektywność wykorzystania energii w latach 1996–2008. Informacje i opracowania statystyczne, GUS, Warszawa 2008.

⁵³ Ang. Directive of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on energy end-use efficiency and energy services and repealing Council Directive 93/76/EEC.

Głównym celem dyrektywy 2006/32/WE jest osiągnięcie uzasadnionej ekonomicznie poprawy efektywności końcowego użytkownika paliw i energii w państwach członkowskich Unii Europejskiej m.in. przez ustalenie celów, mechanizmów i zachęty, ustalanie instytucjonalnych, finansowych i prawnych ram dla usunięcia istniejących barier rynkowych poprawy efektywności końcowego użytkownika energii, promowanie programów służących poprawie efektywności energetycznej, rozwijanie rynku wysokiej jakości usług energetycznych dla użytkowników końcowych oraz zharmonizowanie metodologii obliczania i weryfikowania oszczędności energii. Podana dyrektywa zobowiązuje kraje członkowskie do gromadzenia i przekazywania danych niezbędnych do monitorowania, oceny i planowania działań na rzecz poprawy efektywności wykorzystania energii.

Istnieją przy tym dwie metody pomiaru wzrostu efektywności energetycznej (oszczędności energii). Są to: metoda *od ogółu do szczegółu* (top-down) oraz metoda *od szczegółu do ogółu* (bottom-up). W metodzie *od ogółu do szczegółu* wykorzystuje się dane zagregowane i dlatego nazywa się ją metodą *wskaźników efektywności energetycznej*. Dzięki niej można ustalić co prawda poprawne, ale jednak tylko wskaźniki rozwoju systemu, natomiast nie daje ona dokładnych pomiarów w zakresie szczegółowych rozwiązań. Najczęściej przedmiotem obliczeń w tej metodzie są sekcje, działy, grupy gospodarki, grupy urzędów, typy środków transportu. Obliczone wartości zużycia energii lub energochłonności podlegają korektom uwzględniającym czynniki zewnętrzne takie, jak liczba stopnio-dni w sezonie grzewczym, zmiany strukturalne, profil produkcji itp.

Metoda *od szczegółu do ogółu* jest bardziej precyzyjnym sposobem obliczania oszczędności energii wynikających ze wzrostu efektywności energetycznej. Najpierw oblicza się zużycie energii dla pojedynczego odbiornika końcowego, np. lodówki, w określonym przedziale czasu przed wdrożeniem działania mającego na celu zwiększenie efektywności energetycznej, uzyskując specyficzne *wartości odniesienia*. Następnie stwierdzony poziom zużycia porównuje się ze zużyciem energii odnotowanym w takim samym przedziale czasu, ale po wdrożeniu działania zwiększającego efektywność energetyczną. Uzyskana różnica między wyznaczonymi wynikami jest miarą zwiększenia efektywności energetycznej. Jeżeli obliczenia takie wykona się dla wszystkich rodzajów odbiorników energii, a wyniki zsumuje, to otrzyma się dokładną miarę wzrostu efektywności energetycznej. Wykonywanie obliczeń wiąże się jednak z uwzględnieniem korekty na warunki klimatyczne, podobnie jak w metodzie *od ogółu do szczegółu*.

Zakłada się wdrożenie do produkcji urządzeń o najwyższych klasach efektywności energetycznej, prowadzenie kampanii informacyjnych na temat celowości i opłacalności stosowania urządzeń najbardziej efektywnych. Istotną sprawą jest również takie projektowanie wyrobów, aby po ich zużyciu można było odzyskać jak największą ilość surowca. Kluczowym zagadnieniem jest jednak problematyka poszukiwania metod zwiększania sprawności wytwarzania energii, gdyż jest ona w Polsce nadal

o wiele mniejsza niż w wysoko rozwiniętych krajach Unii Europejskiej. Z tych względów dąży się też to zwiększenia wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu z produkcją ciepła. W elektrociepłowniach wprowadza się stosowanie zasobników ciepła, co eliminuje wytwarzanie energii cieplnej w szczycie w kotłach wodnych. W elektrowniach kondensacyjnych przewiduje się z kolei stosowanie wysoko sprawnych bloków energetycznych opalanych węglem na nadkrytyczne parametry pary oraz stosowanie obiegów parowo-gazowych. Nawet u odbiorców indywidualnych, np. w budynkach mieszkalnych i obiektach użyteczności publicznej, wprowadza się wymianę nieefektywnych kotłów na wysoko sprawne.

Oddzielnym bardzo istotnym zagadnieniem jest próba zmniejszenia energochłonności procesów przemysłowych, w Polsce nadal wysoko energochłonnych. Z tych względów wprowadzane są działania prowadzące do osiągnięcia dużych efektów oszczędności energii przez modernizację procesów produkcyjnych w przemyśle i dostosowanie ich do wymagań najlepszej dostępnej techniki. Ma temu służyć dalsza restrukturyzacja polskiej gospodarki i energetyki prowadząca do ograniczenia energochłonnych gałęzi przemysłu, co dokonuje się w tempie niezadowalającym. Także próby rozwoju produkcji wyrobów zaawansowanych technologicznie i o wysokim stopniu przetworzenia nie przynoszą spodziewanych korzyści z powodu niedowładu organizacyjnego gospodarki.

W planach rozwojowych Ministerstwo Gospodarki przewiduje rozwój sektora usług oraz przebudowę technologiczną gospodarki, co może przynieść znaczne korzyści w czasie długim zarówno w zakresie ograniczenia energochłonności, jak i w zakresie ograniczenia strat energii zwłaszcza w przesyłach i dystrybucji. Z tych względów wprowadza się ograniczanie strat energii w KSE m.in. przez zwiększenie przepustowości linii elektroenergetycznych, poprawę rozdziału energii i ograniczenie przesyłu energii liniami 110 kV na dalekie odległości. Wprowadzane są ponadto programy rozbudowy połączeń z krajami sąsiednimi w celu zwiększenia zdolności przesyłu energii.

Działania związane ze zwiększeniem zdolności przesyłowych sieci elektroenergetycznych oraz zmniejszeniem strat w przesyłach wymuszane są przez rozwiązania prawne tworzonego w Polsce z dużym sukcesem konkurencyjnego rynku energii. Z tych względów w celu zwiększenia efektywności wykorzystania energii wdrażane są m.in. systemy zarządzania popytem na energię, w których zakłada się kompleksowe podejście do zarządzania popytem na energię z uwzględnieniem zachęt i rozwiązań organizacyjnych skłaniających do oszczędzania energii elektrycznej, w tym w zakresie poprawy efektywności użytkowania energii w celu zmniejszenia rozpiętości między maksymalnym i minimalnym zapotrzebowaniem na energię.

3. Inżynieria rozwoju systemów EE

Wśród wielu nierozwiązanych do końca zagadnień, których znaczenie w ostatnich latach gwałtownie rośnie, znajduje się problematyka badania rozwoju systemów technicznych oraz techniczno-ekonomicznych. Istnieją przy tym różne metody badania prawidłowości rozwoju, różne metody jego projektowania przy wykorzystaniu różnych środowisk programistycznych i metod badawczych. Od wielu lat stosuje się z powodzeniem metody badań scenariuszowych oraz ostatnio metodę SWOT⁵⁴. Są to metody badania przeszłej, bieżącej i przyszłej sytuacji systemu, jak też późniejszego określania kierunków jego rozwoju, stosowane z powodzeniem w praktyce zarządzania w elektroenergetyce. Niemniej nie zwierają one sposobu na precyzyjne określenie misji i wizji rozwoju oraz celów rozwoju, a zwłaszcza rozwoju w ujęciu technicznym oraz techniczno-ekonomicznym.

W tym względzie bardzo przydatna okazuje się inżynieria rozwoju systemów [70, 199], która odniesiona do rozwoju systemu elektroenergetycznego dobrze porządkuje problem badawczy. Pozwala też na przeprowadzenie badania prawidłowości rozwoju tak aktualnego stanu SEE, jak też jego docelowego stanu, nazywanego w literaturze przedmiotu wizją systemu. Stosowanie inżynierii rozwoju wiąże się przy tym z potrzebą przeprowadzenia identyfikacji systemu w celu uzyskania modelu systemu, wyprowadzenia na podstawie modelu sztucznego kodu genetycznego, wygenerowania nowego kodu genetycznego i na tej bazie nowego stanu systemu oraz wydobycie informacji z kodu o strukturze i parametrach nowego systemu EE.

⁵⁴ SWOT – analiza kondycji i potencjału rozwojowego systemu jako kompleksowa metoda badania otoczenia systemu i jego zasobów. Nazwa pochodzi od pierwszych liter angielskich słów *Strenghtes* (mocne strony), *Weaknesses* (słabe strony), *Oppurtunities* (szanse w otoczeniu), *Treats* (zagrożenia w otoczeniu). Jest to z drugiej strony metoda rejestracji, klasyfikacji i oceny czynników warunkujących realizację celów systemu ze względu na miejsce ich powstania oraz sposób oddziaływania, a z drugiej strony może być przeprowadzona pod kątem przekroju czasu, poziomu zarządzania, relacji międzysystemowych.

3.1. System EE jako system sterowania

Definicja 1. System, podsystem, nadsystem, otoczenie bliższe i dalsze systemu. System EE⁵⁵ zgodnie z definicją zaproponowaną w pracach [5, 23, 54, 83, 100, 120, 121, 159, 220] stanowi zbiór urządzeń przeznaczonych do wytwarzania, przesyłu, rozdziału i odbioru energii elektrycznej, połączonych ze sobą funkcjonalnie do realizacji procesu ciągłej dostawy energii elektrycznej odbiorcom. Składa się zatem z dostawców, odbiorców oraz różnego typu pośredników przesyłu energii elektrycznej. Elementy składowe wygodnie nazwać jest podsystemami, układami, elementami, a system elektroenergetyczny po zintegrowaniu podsystemów w jeden system nadsystemem⁵⁶ [70, 100]. Tak jak każdy system rzeczywisty, tak też system EE funkcjonuje w bliższym oraz w dalszym otoczeniu systemowym. W systemie EE zachodzi proces przemiany strumieni wejściowych o naturze energomaterialnej oraz finansowej (zmiennych wejściowych, wejść, wymuszeń) na strumienie wyjściowe także o naturze energomaterialnej oraz finansowej (zmiennych wyjściowych, wyjść, odpowiedzi). Strukturę systemu⁵⁷ EE określa zatem para uporządkowana zbiorów [199]:

$$ST(K, \theta, t) = \langle U(K, \theta, t), R(K, \theta, t) \rangle, \quad (3.1)$$

gdzie:

- $U(K, \theta, t)$ – zbiór urządzeń,
- $R(K, \theta, t)$ – zbiór relacji – połączeń wzajemnych urządzeń (zbiór konfiguracji),
- $ST(K, \theta, t)$ – może być funkcją czasu t i wówczas mówi się o planowaniu rozwoju systemu EE (zbiory U i R jako zbiory zmienne w czasie zawierają wszystkie elementy i konfiguracje systemu EE); występujące możliwe struktury nazywa się wariantami strategii rozwoju SEE,

⁵⁵ W pracy [100] Jacek Malko zauważa, że „specyfika systemu elektroenergetycznego zakłada możliwość dwojakiego jego traktowania: w sposób mikroanalityczny – przez rozpatrywanie poszczególnych odbiorców (lub grup odbiorców), tworzących system, lub też w sposób makroanalityczny – przez wykorzystanie prawidłowości statystycznych, opisujących stan i ewolucję systemu jako całości”.

⁵⁶ W pracy [100] przyjmuje, że „system elektroenergetyczny jest częścią składową *nadsystemu* makroekonomicznego”.

⁵⁷ Jacek Malko w pracy *Planowanie rozwoju systemów elektroenergetycznych* wśród pojęć podstawowych wykorzystywanych w zagadnieniach planowania systemu elektroenergetycznego wyróżnia pojęcie struktury systemu, przy tym „strukturę systemu reprezentuje liczba elementów i powiązań wewnętrznych (...) elementy modelu abstrakcyjnego charakteryzowane są wielkościami (parametrami), które na ogół są zmienne w czasie i przyjmują wartości z określonych przedziałów...” [100].

$ST(K, \theta, t)$ – może nie być funkcją czasu t i wówczas za strukturę uważa się podzbiór aktualnie włączonych elementów, zdeterminowany jedną określoną konfiguracją ze zbioru $R(K, \theta, t)$ – tę sytuację wykorzystuje się do obliczeń rozplywowych.

Możliwe są również różne stany pośrednie, w których $ST(K, \theta, t)$ może być zarówno funkcją θ , jak i funkcją t , zwłaszcza gdy $\theta = \text{const}$ lub $t = \text{const}$.

Możliwa jest także sytuacja, gdy $ST(K, \theta, t)$ może być funkcją czasu θ , wówczas mówi się o projektowaniu rozwoju systemu EE, gdzie zbiory U i R jako zbiory zmienne w czasie długim zawierają wszystkie elementy i konfiguracje systemu EE dla $t = \text{const}$ lub dla $t = 0$. Występujące możliwe struktury nazywa się wariantami rozwoju modelu systemu EE.

Elementy systemu EE (zbiór urządzeń) stanowią: elektrownie, a w nich zespoły blokowe (np. kocioł, turbozespół, transformator blokowy), urządzenia potrzeb własnych (np. młyny węglowe, układ wody chłodzącej, skraplacze, elektrofiltry, układ odpowielania, pompy skroplin, i inne), sieci (np. linie: napowietrzne, kablowe, stacje: transformatory, dławiki przeciwzwarciowe, dławiki gaszące, baterie kondensatorów, kompensatory synchroniczne, szyny zbiorcze, łączniki, odłączniki, rozłączniki) itp.

Parametry systemu EE stanowią: moc szczytowa odbiorców (moc odbierana netto), roczna produkcja energii elektrycznej, moc zainstalowana elektrowni, moc największej elektrowni, moc największych bloków, najwyższe napięcie znamionowe sieci przesyłowej, największa odległość przesyłu mocy, struktura mocy kształtowana przez zmienność dobową obciążeń systemu EE (sposób pokrywania obciążeń systemu z danymi o rodzajach elektrowni, o mocach bloków, o mocach elektrowni), struktura sieci (jako specyficzne połączenie elementów SEE, które określa się podając napięcie znamionowe sieci przesyłowych, napięcie znamionowe i typ sieci rozdzielczych, rodzaj linii).

Sterowanie bieżące pracą SEE odbywa się za pomocą systemu teleinformatycznego, pomiarów zdalnych i teleinformatyki. Bezpieczeństwo elementów SEE jest zapewnione przez system elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, a utrzymanie ruchu (pracy) SEE oraz rozwój SEE w sensie sterowania strategicznego wymagają sprawnie działającej administracji, służb remontowych, zaplecza projektowego, i konstrukcyjnego, zaplecza naukowo-badawczego, itp.

Definicja 2. Rozbieżności systemowe. Na wejściu SEE występuje potrzeba dopływu konkretnego strumienia, a na wyjściu systemu możliwość jego generowania. Potrzebami i możliwościami dysponują wszystkie systemy z danej sytuacji systemowej, zwłaszcza system, jego podsystemy oraz nadsystem. W sytuacji braku zbilansowania potrzeb oraz możliwości pojawiają się rozbieżności systemowe jako wielkości bezwzględnych różnic wyjść i wejść w odpowiednich przedziałach systemowych [70].

Definicja 3. Rozwój SEE poprzez likwidację rozbieżności systemowych. System EE (i w konsekwencji każdy z jego podsystemów, układów, elementów itp. wystę-

pujących w bliższym otoczeniu systemowym) podejmuje grę o wypełnienie rozbieżności systemowych konkurując z innymi systemami z jego otoczenia systemowego (sytuacji systemowej międzynarodowej). Każdą rozbieżność można przy tym zlikwidować lub zmniejszyć przez zmianę potrzeb, przez zmianę możliwości, bądź też zmianę obu stanów jednocześnie. Z pojęciem rozbieżności związane jest pojęcie jakości rozwoju SEE w sensie likwidacji pojawiających się rozbieżności systemowych. Jakość rozwoju zależy od różnicy pomiędzy wartościami założonego i faktycznego efektu technicznego z jednej strony oraz efektu ekonomicznego z drugiej strony. W ujęciu teorii sterowania wystąpi pogoń wektora stanu SEE (rzeczywistego) jako punktu w przestrzeni wielowymiarowej za oczekiwanymi (założonymi) jego zmianami (uciekający punkt w przestrzeni wielowymiarowej).

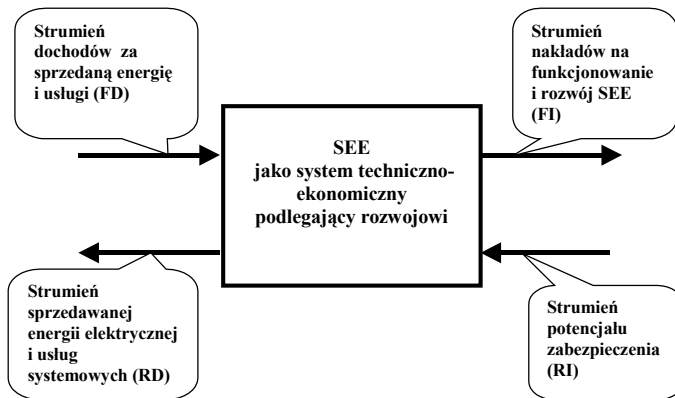
Definicja 4. System EE systemem sterowania. System EE jest systemem sterowania⁵⁸, w którym występują zmienne wejściowe (wejścia) oraz zmienne wyjściowe (wyjścia), które dla danych liczbowych są strumieniami energo-materialnymi oraz informacyjno-decyzyjnymi. Strumieniem energo-materialnym jest strumień energii elektrycznej lub świadczony usługi przesyłu, a strumieniem informacyjno-decyzyjnym odpowiednio strumień finansowy oraz strumień decyzyjny dotyczący sprzedaży energii elektrycznej, czy też zakupu surowców energetycznych. Interpretację SEE w przedziale prostym⁵⁹ przedstawiono na rys. 3.1.

Cechy charakterystyczne KSE to: rozległość i rozproszenie terytorialne, ciągły wzrost mocy odbieranych, duże koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, które zmuszają do stosowania metod wielkosystemowych (systemotechniki) do sterowania eksploatacją i rozwojem systemu EE, majątek systemu jest majątkiem nieruchomym, o podwajanej wartości co 10 lat [136], KSE pod kątem teorii sterowania i systemów jest systemem wielkim, wielowejściowo-wielowyjściowym (dalej: MIMO), względnie

⁵⁸ W pracy *Planowanie systemów elektroenergetycznych* [100] przyjmuje się, że system EE jest systemem stochastycznym, a planowanie jego rozwoju za Barbarą Bolkowską [8, 9] proponuje sprowadzać się do zagadnienia sterowania optymalnego w celu dostosowania struktury, czyli liczby elementów i powiązań wewnętrznych do warunków zewnętrznych i wewnętrznych. Stan SEE w chwili t opisany jest równaniem $P_0(t) = F[P_0(t_0), \Delta P_i(t_0, t), \xi(t_0, t)]$, gdzie: $P_0(t)$ – wektor stanu na wejściu – zbiór wszystkich możliwych wartości mocy osiągalnych $P_{ok}(t)$ tego wektora tworzy n -wymiarową przestrzeń stanów dla n procesów wytwórczych, a identyfikacja polega na znalezieniu zależności między procesami stochastycznymi na wejściu i wyjściu systemu.

⁵⁹ Pojęcie definicji przedziału systemowego wprowadził Józef Konieczny w pracy *Inżynieria systemów działania* [70], w której przedział systemowy zdefiniował jako uporządkowaną trójkę systemów: systemu podstawowego, systemu operacyjnego i systemu zabezpieczenia oraz relacji zachodzących między nimi. Model systemu w przedziale prostym dotyczy systemu, który działa na rzecz pojedynczego systemu oraz jest zabezpieczany przez pojedynczy system. W rozważanym przypadku przyjęto występowanie jednego zagregowanego odbiorcy energii elektrycznej oraz jednego zagregowanego dostawcy energii elektrycznej, zwłaszcza opisujących wieloma zmiennymi wejściowymi oraz wieloma zmiennymi wyjściowymi.

odosobnionym, dysypatywnym, w coraz to większym stopniu samonastrajalnym, sterowanym przez system hybrydowy techniczno-personalny.



Rys. 3.1. Interpretacja systemu EE w przedziale prostym.
Oznaczenia w tekście. Opracowanie własne za pracę [70]

Występujące parametry energii elektrycznej to: napięcie, częstotliwość, symetria fazowa napięcie, zawartość zniekształceń nieliniowych w krzywej napięcia, ciągłość dostawy energii, które w uzyskanym modelu SEE znajdują miejsce wśród zagregowanych parametrów systemu.

Przyjęto przy tym następujące oznaczenia:

$RD(K, \theta)$ – zmienna wyjściowa jako strumień potencjału operacyjnego, np. sprzedaży energii elektrycznej oraz usług systemowych [KWh],

$FD(K, \theta)$ – zmienna wejściowa jako strumień dochodu użyteczności, np. dochodów finansowych pozyskiwanych z tytułu sprzedaży energii elektrycznej oraz sprzedaży usług systemowych [PLN],

$RI(K, \theta)$ – zmienna wejściowa jako strumień potencjału zabezpieczenia, np. strumienie odnowy funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, w tym zużycie paliwa (węgiel kamienny, węgiel brunatny, gaz, paliwa ciekłe) [tona] oraz zużycie własne energii elektrycznej [kWh], liczba zatrudnionych osób, amortyzacja,

$FI(K, \theta)$ – zmienna wyjściowa jako strumień nakładu użyteczności, np. kosztów ponoszonych na wynagrodzenia, utrzymanie i rozwój systemu elektroenergetycznego, [PLN].

Stan SEE opisują dwa podstawowe równania systemu, a mianowicie równanie potencjału oraz równanie użyteczności [70, 200]:

$$\begin{aligned} R(K, \theta, t) &= R(0) - RD(K, \theta, t) + R \cdot RI(K, \theta, t) \quad [\text{jpo, np. kWh}] \\ F(K, \theta, t) &= F(0) - FI(K, \theta, t) + C \cdot FD(K, \theta, t) \quad [\text{jnu, np. PLN}] \end{aligned} \quad (3.2)$$

przy czym:

- R – produktywność systemu [jpo/jpz],
- C – cenność systemu [jnu/jdo],
- $R(0)$ – potencjał początkowy systemu,
- $F(0)$ – użyteczność początkowa systemu,
- jpo – jednostka potencjału operacyjnego,
- jnu – jednostka nakładu użyteczności,
- jpz – jednostka potencjału zabezpieczenia,
- jdo – jednostka dochodu użyteczności.
- θ – czas długi (miesiąc, kwartał, lata, dziesiątki lat), czas rozwoju systemu,
- t – czas krótki (sekunda, minuta, godzina, dzień), czas funkcjonowania (pracy) systemu,
- i, j – indeksy dotyczą kolejno czasu krótkiego t oraz długiego θ

W zależności od rodzaju procesu i warunków sterowania SEE równania (3.2) mają rozmaitą postać szczegółową, i tak:

1. Dla procesu ciągłego oraz warunków zdeterminowanych:

$$\begin{aligned}
 R(\theta, t) &= R(0) - \int_0^\theta \int_0^t \lambda_{ij}(\theta, t) d\theta dt + R \int_0^\theta \int_0^t \mu_{ij}(\theta, t) d\theta dt \\
 F(\theta, t) &= F(0) - \int_0^\theta \int_0^t \mu_{ij}(\theta, t) \kappa_{ij}(\theta, t) d\theta dt + C \int_0^\theta \int_0^t \lambda_{ij}(\theta, t) \gamma_{ij}(\theta, t) d\theta dt,
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

przy czym:

- $\lambda(\theta, t)$ – intensywność operacyjna [jpo/jco],
- $\mu(\theta, t)$ – intensywność zabezpieczenia [jpz/jcz],
- $\kappa(\theta, t)$ – cena zabezpieczenia [jnu/jpz],
- $\gamma(\theta, t)$ – cena operacyjna [jdu/jpo],
- jpo – jednostka potencjału operacyjnego,
- jpz – jednostka potencjału zabezpieczenia,
- jdu – jednostka dochodu użyteczności,
- jnu – jednostka nakładu użyteczności,
- jco – jednostka czasu operacyjnego,
- jcz – jednostka czasu zabezpieczenia,

2. Dla procesu dyskretnego i warunków zdeterminowanych:

$$\begin{aligned}
 R(\theta, t) &= R(0) - \sum_{j=1}^\theta \sum_{i=1}^t \lambda_{ij} + R \sum_{j=1}^\theta \sum_{i=1}^t \mu_{ij} \\
 F(\theta, t) &= F(0) - \sum_{j=1}^\theta \sum_{i=1}^t \mu_{ij} \kappa_{ij} + C \sum_{j=1}^\theta \sum_{i=1}^t \lambda_{ij} \gamma_{ij}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

i odpowiednio dla procesu ciągłego, warunków losowych oraz dla procesu dyskretnego warunków losowych. Przyjęto przy tym, że zegar czasu operacyjnego jest identyczny z zegarem czasu zabezpieczenia⁶⁰.

W przedziale złożonym równania systemu można przedstawić w kilku postaciach, a mianowicie w postaci wektorowej, postaci składnikowej, postaci skumulowanej oraz w postaci analitycznej (dla procesu ciągłego i zdeterminowanego) [70, 187, 198, 200].

Dla postaci wektorowej otrzymuje się odpowiednio:

$$\begin{aligned}\mathbf{R}(K, \theta, t) &= \mathbf{R}(0) - \mathbf{RD}(K, \theta, t) + \mathbf{RI}(K, \theta, t), \\ \mathbf{F}(K, \theta, t) &= \mathbf{F}(0) - \mathbf{FI}(K, \theta, t) + \mathbf{FD}(K, \theta, t).\end{aligned}\quad (3.5)$$

Przyjmując równania w postaci przyrostów potencjałów, otrzymuje się odpowiednio:

$$\begin{aligned}\Delta R(K, \theta, t) &= -RD(K, \theta, t) + R \cdot RI(K, \theta, t), \\ \Delta F(K, \theta, t) &= -FI(K, \theta, t) + C \cdot FD(K, \theta, t).\end{aligned}\quad (3.6)$$

Dla przedziału prostego, procesu ciągłego oraz warunków zdeterminowanych, po założeniu, że badany jest proces rozwoju, a nie tylko proces eksploatacji systemu ($t = \text{const}$), otrzymuje się odpowiednio:

$$\begin{aligned}\Delta R &= R(\theta) - R(0) = -\int_0^\theta \lambda_j(\theta) d\theta + R \int_0^\theta \mu_j(\theta) d\theta, \\ \Delta F &= F(\theta) - F(0) = -\int_0^\theta \mu_j(\theta) \kappa_j(\theta) d\theta + C \int_0^\theta \lambda_j(\theta) \gamma_j(\theta) d\theta,\end{aligned}\quad (3.7)$$

czyli dla ciągłego procesu rozwoju pochodne zmiennych stanu SEE można wyznaczyć z zależności na produktywność i odpowiednio na użyteczność:

$$\begin{aligned}\dot{R} &= -\lambda(K, \theta, t) + R \cdot \mu(K, \theta, t), \\ \dot{F} &= C \cdot \lambda(K, \theta, t) \cdot \gamma(K, \theta, t) - \mu(K, \theta, t) \cdot \kappa(K, \theta, t),\end{aligned}\quad (3.8)$$

ponieważ równanie potencjału dotyczy potencjału operacyjnego SEE, a równanie użyteczności dotyczy nakładu użyteczności SEE, dlatego dla $RD = \lambda\theta$ (co wynika z definicji intensywności operacyjnej) oraz $FI = \mu\kappa\theta$ (co wynika z definicji intensywności zabezpieczenia oraz definicji ceny zabezpieczenia), otrzymuje się następującą wygodną postać:

⁶⁰ Pojęcie zegara wynika z przyjętych jednostek: czasu operacyjnego [jco] oraz czasu zabezpieczenia [jcz] [70].

$$\begin{aligned} \frac{d(\lambda(\theta)\theta)}{d\theta} &= -\lambda(\theta) + R\mu(\theta), \\ \frac{d(\mu(\theta)\kappa(\theta)\theta)}{d\theta} &= -\mu(\theta)\kappa(\theta) + C\lambda(\theta)\gamma(\theta), \end{aligned} \quad (3.9)$$

a zatem po odpowiednich przekształceniach otrzymuje się następującą postać:

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{\theta} & \frac{R}{\theta} \\ \frac{C\gamma}{\kappa\theta} & -\left(\frac{2}{\theta} + \frac{1}{\kappa}\dot{\kappa}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda(\theta) \\ \mu(\theta) \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Gdy przyjmie się, że system rozwoju SEE podlega analizie od strony elektrowni (producenta energii elektrycznej), wówczas drugie z równań (3.10) opisuje stan systemu (łącznie z odbiorcami energii elektrycznej), a pierwsze równanie opisuje wyjście z systemu rozwoju systemu elektroenergetycznego od strony elektrowni, tzn. że $\mu(\theta) = x(\theta)$, a $\dot{\lambda} = y$, stąd dalej otrzymuje się odpowiednie równania stanu oraz równanie wyjścia:

$$\begin{aligned} \dot{x}(\theta) &= \mu(\theta) = \kappa(\theta) \cdot x(\theta) + C \cdot \gamma(\theta) \cdot \lambda(\theta), \\ y(\theta) &= \dot{\lambda}(\theta) = R \cdot x(\theta) - \lambda(\theta), \end{aligned} \quad (3.11)$$

gdzie:

$x(\theta)$ – zmienna stanu,

$\lambda(\theta)$ – zmienna wejściowa (wymuszenie) reprezentująca intensywność operacyjną systemu SEE o wymiarze [jpo/jco], przy czym potencjałem operacyjnym są zmienne wyjściowe, a więc np. produkowana moc i energia elektryczna.

3.2. Model rozwoju

Każdy system rzeczywisty może być badany przy pomocy jego modelu, przy czym w inżynierii rozwoju systemów [192, 199] wygodnie jest opracować kolejne modele-rozwoju⁶¹, a następnie metamodel rozwoju⁶², po czym wyprowadzić z modeli rozwoju

⁶¹ Identyfikacja SEE dotyczy 30-letniego okresu, który zmieniany jest w układzie krocącym o jeden rok dla danych liczbowych z lat 1946–2007, w wyniku której uzyskuje się kolejne modele rozwoju SEE.

⁶² Metamodel rozwoju systemu SEE, jak wynika z użytego przedrostka meta-, jest modelem modelu rozwoju systemu SEE, a więc modelem uzyskanym w wyniku procesu identyfikacji modeli rozwoju SEE, w którym jako zmienne wejściowe występują wielkości występujące w wielomianach $B(q)$, a jako zmienne wyjściowe wielkości występujące w wielomianie $A(q)$.

i metamodelu rozwoju odpowiednie sztuczne kody genetyczne typu kod informacyjny oraz kod rozwoju jako metakod informacyjny⁶³. Taki sposób postępowania prowadzi kolejno do możliwości badania zmian parametrycznych samego systemu lub metasytemu SEE oraz odpowiednio zmian parametrycznych oraz zmian strukturalnych jego kodu informacyjnego oraz kodu rozwoju. Przy tym kod informacyjny (oraz odpowiednio kod rozwoju) może być generowany na liczne sposoby. Wygodnym sposobem wygenerowania kodu informacyjnego jest przekształcenie modelu **th** do postaci modelu w przestrzeni stanów (ss)⁶⁴, a następnie zbudowanie kodu informacyjnego SEE na bazie np. współczynników wielomianu występującego w równaniu charakterystycznym lub na bazie pierwiastków równania charakterystycznego. Uzyskane kody informacyjne dla katalogu modeli w przestrzeni stanów w czasie długim kroczącym umożliwiają badanie zmian parametrów i struktury systemu EE. Można ponadto wy prowadzić kod rozwoju także na bazie wiedzy o zmianach kodu informacyjnego dla poszczególnych badanych okresów rozwoju.

Można np. w środowisku MATLAB i Simulink otrzymać macierz **th**, a następnie równania stanu i wyjścia w przestrzeni stanów ss (czyli macierze **A**, **B**, **C**, **D**), a więc m.in. macierz organizacji procesu **A** i wynikające z niej równanie charakterystyczne. Następnie np. na podstawie współczynników wielomianu występującego w równaniu charakterystycznym można otrzymać sztuczny kod genetyczny (kody informacyjne dla poszczególnych modeli oraz kod rozwoju dla metamodelu rozwoju), złożone np. ze współczynników wielomianu lub pierwiastków równania charakterystycznego. Otrzymane w ten sposób sztuczne kody informacyjne (kody rozwoju) zawierają w swej naturze całą historię rozwoju SEE.

W sposób formalny kodem informacyjnym SEE nazywa się wektor \mathbf{K}_g zapisany następująco:

$$\mathbf{K}_g = [g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_n], \quad (3.12)$$

gdzie:

g_i – i -ty sztuczny gen jako np. pierwiastek równania charakterystycznego lub współczynnik występujący przy odpowiedniej potędze wielomianu charakterystycznego, $i = 1, \dots, n$.

⁶³ Pojęcie kodu informacyjnego oraz kodu rozwoju zostało zdefiniowane w monografii [200], gdzie przez pojęcie kod informacyjny rozumie się model systemu zdefiniowany w postaci populacji złożonej z chromosomów reprezentujących sztuczne kody genetyczne systemu, a przez pojęcie kod rozwoju rozumie się model rozwoju systemu zdefiniowany w postaci populacji początkowej złożonej z chromosomów reprezentujących sztuczne kody genetyczne rozwoju systemu. Adekwatnie do metamodelu systemu oraz metamodelu rozwoju systemu można mówić o metakodzie informacyjnym oraz o metakodzie rozwoju systemu.

⁶⁴ W środowisku MATLAB używa się skrótu ss (od ang. *state space*).

W trakcie zmian strukturalnych mogą pojawić się nowe sztuczne geny lub zaniknąć geny istniejące, co może być spowodowane zmianą składu SEE lub zmianą relacji wewnętrznych oraz zewnętrznych (np. zmianą liczby strumieni organizacyjnych) wiążących SEE z jego otoczeniem (oraz wiążących podsystemy, układy, elementy).

Natomiast w trakcie zmian parametrycznych zmieniają wartości genów. Wobec występujących najczęściej równoległe zmian strukturalnych oraz zmian parametrycznych interesujące jest badanie ruchu wektora \mathbf{K}_g np. na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z lub s . Wygodnym instrumentem śledzenia ruchu sztucznego kodu genetycznego jest m.in. metoda linii pierwiastkowych Evansa⁶⁵ [193, 211].

Przejsie przy tym od analizy pierwiastków równania charakterystycznego do analizy wektorów zbudowanych z pierwiastków jako kodów informacyjnych rozwoju SEE jest istotną zmianą w technice badania prawidłowości rozwoju systemów tej klasy jak system elektroenergetyczny. Wprowadzenie pojęcia kodu informacyjnego w stosunku do systemów technicznych oraz techniczno-ekonomicznych jest zagadnieniem jakościowo nowym, stwarzającym bardzo duże możliwości badawcze, zwłaszcza w zakresie wykorzystania algorytmów ewolucyjnych do projektowania nowych stanów rozwoju [12, 13, 40, 43, 51, 68, 138, 192].

⁶⁵ Na płaszczyźnie zmiennej zespolonej interpretacja geometryczna rozwoju systemu elektroenergetycznego zostaje sprowadzona do wyciągnięcia wniosków z faktu, że zarówno geny wynikające np. z licznika transmitancji operatorowej, jak i geny wynikające z mianownika transmitancji operatorowej, czyli sztuczne geny jako zera licznika oraz bieguny mianownika transmitancji operatorowej są wektorami, dla dowolnych wartości z lub s .

4. Modelowanie rozwoju systemów EE

4.1. Modele rozwoju systemu EE

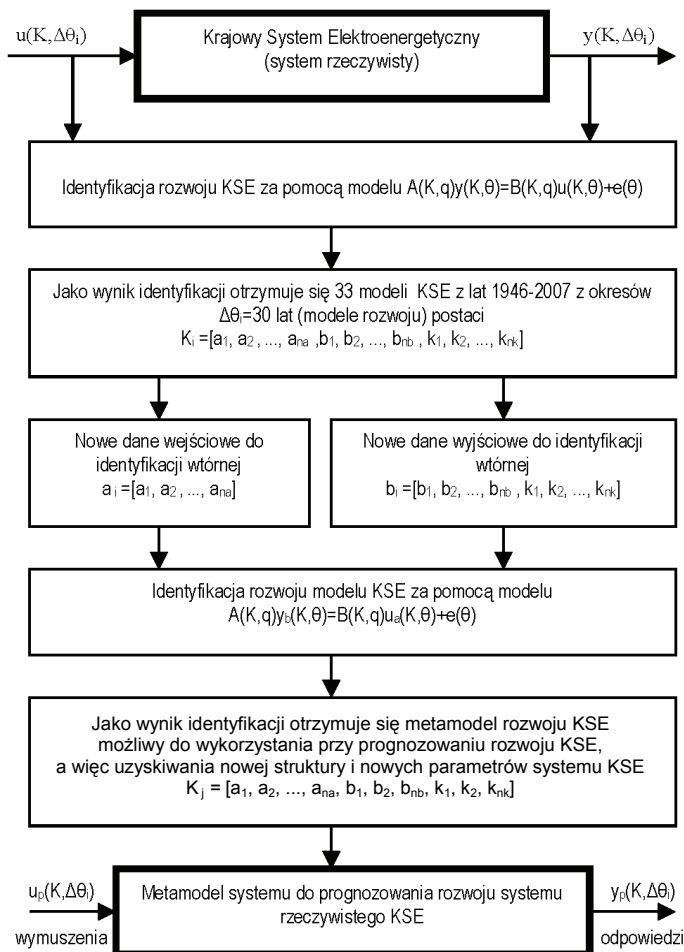
Poszukując nowego modelu systemu EE, należy przede wszystkim przeprowadzić identyfikację rozwoju KSE w wyodrębnionym okresie⁶⁶, a następnie przeprowadzić odpowiednie badania ocenowe, zgodnie z teorią inżynierii rozwoju systemów [70, 199].

W wyniku identyfikacji otrzymuje się modele rozwoju SEE dla odpowiednich okresów rozwoju ($\Delta\theta$) systemu EE, które można następnie wykorzystać do wygenerowania metamodelu rozwoju, będącego w konsekwencji specyficznym kodem informacyjnym rozwoju systemu EE (rys. 4.1).

Do otrzymania tak rozumianego kodu rozwoju, będącego w istocie specyficznym sztucznym kodem genetycznym prowadzi operacja kodowania rozwoju, a do otrzymania nowego stanu systemu EE, na podstawie otrzymanego nowego sztucznego kodu genetycznego, operacja dekodowania rozwoju systemu. W pracach [161–200] podano przykłady wykorzystania proponowanej inżynierii rozwoju systemów w odniesieniu do SEE.

Opracowana koncepcja inżynierii rozwoju systemów została poddana weryfikacji praktycznej [161–200]. Najpierw przeprowadzono wiele procesów identyfikacji systemu KSE i jego podsystemów, a następnie na otrzymanych modelach podejmowano badanie prawidłowości rozwoju przeprowadzając badania eksperymentalnych w środowisku MATLAB i Simulink z wykorzystaniem jego toolbox-ów, a zwłaszcza SIT oraz CST.

⁶⁶ Utworzenie modelu matematycznego KSE, do badania prawidłowości rozwoju, na drodze modelowania nie jest możliwe, stąd jedyną drogą uzyskania modelu matematycznego systemu EE dla wymienionych celów jest droga identyfikacji, a więc np. droga identyfikacji przedziałowej w układzie kroczącym (por. pracę [222]). W wyniku identyfikacji otrzymuje się macierze \mathbf{th} , a po ich transformacji na przestrzeń stanu w środowisku MATLAB za pomocą funkcji `th2ss()` otrzymuje się równania stanu i równania wyjścia opisujące KSE dla badanych okresów rozwoju. Stan systemu EE opisuje wektor stanu, który zmieniają swój wymiar i skład, a także wartości w poszczególnych okresach rozwoju.



Rys. 4.1. Schemat otrzymywania modeli rozwoju oraz metamodelu rozwoju KSE.

Oznaczenia: K_i, K_j – odpowiednie zbiory parametrów KSE.

Pozostałe oznaczenia w tekście. Opracowanie własne

4.1.1. Identyfikacja rozwoju

Identyfikacja systemu jest zasadniczym zagadnieniem z zakresu teorii sterowania i systemów, a zwłaszcza, gdy tworzony ma być model systemu wielkiego, jakim jest KSE. W przypadku tworzenia modelu systemu w przestrzeni stanów poszukuje się wektora stanu opisującego stan systemu. Stan systemu może zmieniać się w czasie długim θ i wówczas można mówić o stanie rozwoju systemu EE w przestrzeni stanów $x(\theta)$, którym jest wektor o najmniejszym licznie zbiorze elementów $x_i(\theta)$, określa-

jących w pełni skutki przeszłych oddziaływań na system. Znajomość stanu początkowego oraz wymuszeń w pewnym przedziale czasu długiego ($\Delta\theta$) wystarcza do określenia stanów systemu i jego wyjścia w tym przedziale czasu, przy czym stan rozwoju systemu może nie być bezpośrednio obserwowany.

Systemy rozwoju, podobnie jak systemy dynamiczne, których miarą zmiany stanu rozwoju systemu w czasie długim θ jest pochodna wektora stanu $\mathbf{x}(\theta)$, mogą być opisane za pomocą układu n równań różniczkowych pierwszego stopnia⁶⁷. Na przykład dla obiektu SISO⁶⁸ układ takich równań można przedstawić w postaci ogólnej następująco:

$$\frac{dx(K, \theta, t = \text{const})}{d\theta} = f_1(x(K, \theta, t = \text{const}), u(K, \theta, t = \text{const}), z(K, \theta, t = \text{const}), \theta) \quad (4.1)$$

i uzupełnić go o równanie wyjścia:

$$y(K, \theta, t = \text{const}) = f_2(x(K, \theta, t = \text{const}), u(K, \theta, t = \text{const}), z(K, \theta, t = \text{const}), \theta), \quad (4.2)$$

gdzie:

- $x(K, \theta)$ – stan rozwoju systemu,
- $u(K, \theta)$ – zmienne wejściowe (sygnał wejściowy, wejścia, wymuszenia),
- $z(K, \theta)$ – zakłócenia,
- K – uporządkowany zbiór wielkości charakterystycznych SEE, które w przypadku systemu rozwijającego się (rozwoju systemu) są wielkościami zależnymi od czasu długiego θ , np. $K_1(\theta), K_2(\theta), \dots, K_n(\theta)$ – występują one w postaci np. wielkości składowych wektora $K(\theta)$ jako wektora stanu rozwoju SEE, co między innymi wskazuje na dynamikę rozwoju SEE⁶⁹,

⁶⁷ Wyróżnia się dwa rodzaje opisów prawidłowości w zagadnieniach eksploatacji systemów: opis ilościowy wyrażony przez relacje algebraiczne oraz równania dynamiki i opis jakościowy. Relacje algebraiczne opisują statyczne stany systemu i są punktem wyjścia do rozważań dynamicznych (równania różniczkowe, całkowe i całkowo-różniczkowe). Opis dynamiki jest więc z oczywistych względów dokładniejszy od opisu stanów statycznych. Z tych względów w praktycznym aspekcie tworzenia modeli matematycznych najpierw tworzy się model statyczny, a następnie model dynamiczny.

⁶⁸ SISO – od słów w języku angielskim **S**ingle **I**nput **S**ingle **O**utput, a więc system sterowania opisany za pomocą jednej zmiennej wejściowej oraz jednej zmiennej wyjściowej. W przypadku systemów wielowymiarowych stosuje się model MIMO od słów a języku angielskim **M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput. W takich modelach sygnały wejściowe i wyjściowe są realnymi wielkościami fizycznymi, ale parametry modelu nie muszą zawsze odpowiadać realnym wielkościom fizycznym, przynajmniej obecnie znanym.

⁶⁹ W kolejnych okresach badanego systemu SEE zachodzą zmiany w wartościach $K_i(\theta)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) w czasie θ na skutek zewnętrznych oddziaływań spowodowanych np. napływem nowych informacji technicznych i technologicznych umożliwiających unowocześnienie systemu SEE i przez to poprawę jego bezpieczeństwa, nowych informacji ekonomicznych umożliwiających zwiększenie efektywności systemu SEE oraz o nowych wymaganiach odbiorcy energii elektrycznej, który chce otrzymywać energię na czas o odpowiednich parametrach jakościowych. Z tych względów zmiany zachodzące w SEE wygodnie jest mierzyć za pomocą pochodnej wektora stanu rozwoju systemu.

a zatem podobnie jak w systemach dynamicznych, tak też w systemach rozwoju bieżąca wartość zmiennej wyjściowej zależy nie tylko od bieżących wartości zewnętrznych sygnałów pobudzających, ale także od stanu rozwoju SEE.

Model matematyczny może być przy tym uzyskiwany na drodze modelowania analitycznego, o ile istnieje możliwość wykorzystania znajomości praw np. fizycznych, chemicznych, równań bilansowych itp.

W przypadku trudności w uzyskaniu modelu fenomenologicznego stosuje się modelowanie identyfikacyjne przeprowadzając proces identyfikacji eksperymentalnej, gdy pomiarowo dostępne są wejścia i wyjścia systemu. Identyfikacja jest działaniem iteracyjnym, obejmującym następujące podstawowe kroki algorytmu [222]:

- 1) przygotowanie danych wejściowych i wyjściowych systemu,
- 2) wstępne przetworzenie danych (np. normalizacja),
- 3) wybór klasy modeli (np. model parametryczny lub nieparametryczny),
- 4) wybór typu modelu z wybranej klasy (np. model arx),
- 5) wybór struktury modelu (ustalenie np. na , nb , nk w modelu arx),
- 6) wyznaczenie oceny parametrów (wybór odpowiedniego algorytmu estymacji),
- 7) weryfikacja (np. porównanie uzyskanego sygnału z modelem z sygnałem systemu),
- 8) interpretacja uzyskanego modelu w wyniku identyfikacji.

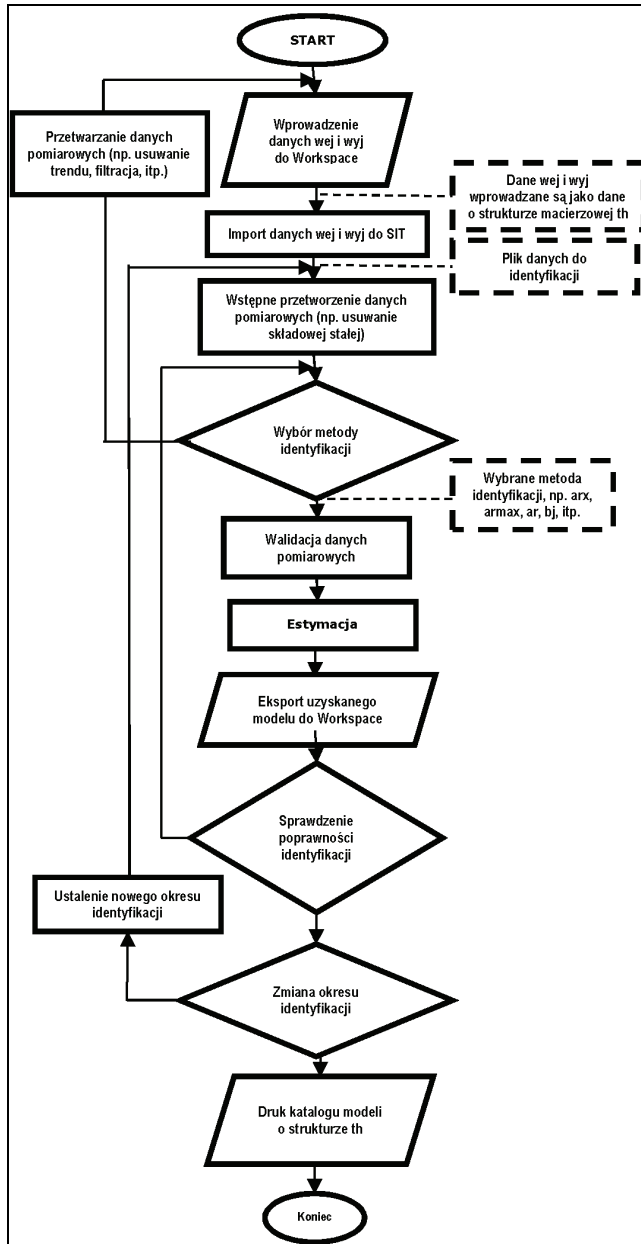
Równania różniczkowe (lub ich dyskretne odpowiedniki równania różnicowe) wykorzystywane są do opisywania zjawisk dynamicznych modelowanych układów rzeczywistych. Istnieje przy tym skończona liczba parametrów wykorzystywanych w modelach, stąd modele takie nazywane są *modelami parametrycznymi*.

4.1.2. Ocena rozwoju

Model oceny rozwoju systemu zawiera między innymi:

- informację o SEE dotyczące struktury, parametrów i charakterystyk systemu,
- kryterium lub zespół kryteriów oceny jakości rozwoju SEE, w którym występują informacje o energii i mocy jako o produkcie systemu,
- algorytm na określenie wartości kryterium, w którym występują informacje o SEE oraz o energii i mocy jako produkcie systemu.

W technice programowania rozwoju systemów występują przy tym dwie grupy problemów, a mianowicie: sformułowanie modelu rozwoju oraz ustalenie praw jego zmian w czasie długim θ (zbadanie prawidłowości rozwoju systemu). W niniejszej monografii podjęto zarówno problematykę opracowania modeli rozwoju, jak i problematykę określenia zmian parametrycznych oraz strukturalnych systemu energetycznego w czasie długim θ .



Rys. 4.2. Ogólny algorytm modelowania identyfikacyjnego KSE.
Opracowanie własne na podstawie [222] oraz możliwości SIT środowiska MATLAB

Ocenianie w teorii sterowania i systemów, a zwłaszcza w inżynierii rozwoju systemów jest działaniem polegającym na stworzeniu modelu rozwoju na podstawie od-

powiednich informacji o zmianach sytemu. Kryteria oceny, podmiot oceny, przedmiot oceny i istota oceny to elementy, które związane pewną relacją tworzą ocenianie, przy czym relację pomiędzy podmiotem oceny i przedmiotami oceny nazywa się systemem oceniania. Różne przyjmowane są kryteria oceny, przy czym zawsze kryteria te są związane ściśle z wartością systemu. Piotr Sienkiewicz w pracy [142] podkreśla, że ocena dotyczy określonych wartości ze względu na określone potrzeby systemu. W rozważanym przypadku rozwoju systemu KSE wartość systemu związana jest z zapotrzebowaniem na moc i energię elektryczną, stąd też w fazie oceny można badać różnicę pomiędzy zapotrzebowaniem na użyteczność rozwoju systemu a osiągniętymi wynikami jako możliwościami rozwoju systemu.

Można zatem ocenę rozwoju sprowadzić do oceny potrzeb oraz do oceny możliwości rozwoju, przy tym system rozwoju potrzebuje tyle strumienia zabezpieczenia rozwoju na ile go stać w zakresie nakładów finansowych oraz system rozwoju może tyle, ile ma w sobie możliwości operacyjnych w zakresie produkcji mocy i energii elektrycznej. W efekcie końcowym ocenę potrzeb rozwojowych można sprowadzić do oceny wejść systemowych (dochodu użyteczności oraz potencjału zabezpieczenia rozwoju), a ocenę możliwości rozwoju można sprowadzić do oceny wyjść systemowych (potencjału operacyjnego oraz nakładu użyteczności) – zależności (3.2)–(3.11). Uzupełnieniem oceny potrzeb i możliwości rozwoju może być ocena sił rozwoju w ujęciu teorii sterowania i systemów (ocena wielkości zespolonych zasileniowo-informacyjnych) [200]. Przyjmując, że stan SEE określony jest formułą:

$$s(K, \theta, t) = \langle Z(K, \theta, t), u(K, \theta, t) \rangle, \quad (4.3)$$

przy czym funkcję $Z(K, \theta, t)$ oraz funkcję $u(K, \theta, t)$ nazywa się wskaźnikami stanu systemu, a zmianę stanu systemu nazywa się ruchem systemu, natomiast ciąg zmian systemu dla wyróżnionych chwil nazywa się trajektorią systemu [70].

4.2. Badanie prawidłowości rozwoju

Przedmiotem rozważań jest SEE jako system techniczny bądź techniczno-ekonomiczny, w którym na przestrzeni lat zmianom ulegają parametry oraz struktura⁷⁰. Zmienną niezależną rozwoju systemu EE jest czas θ w sensie długim, mierzony

⁷⁰ Jacek Malko uważa, że oprócz złożoności samego systemu i jego powiązań z otoczeniem konieczne jest rozpatrywanie przy zagadnieniu planowania również dynamiki rozwojowej, przy czym podkreśla, iż ...w czasie występuje zjawisko zmiany struktury obiektów, związane z dynamiką wzrostu zapotrzebowania mocy (a więc i instalowania nowych jednostek wytwórczych) oraz procesem starzenia się i wycofywania obiektów eksploatowanych [100].

w miesiącach, latach, a nawet dziesiątkach lat. Przyjęto, że SEE jest systemem o strukturze rozwijającej się, która podlega ewolucji czasowej w kolejnych etapach rozwoju (1, 2, ..., N), odpowiadającym poszczególnym stanom rozwoju SEE, przy czym każdy z etapów obejmuje fazy: identyfikacji i oceny rozwoju. Kolejne stany rozwoju SEE na przestrzeni lat powinny być coraz lepsze⁷¹, ale niekoniecznie tak było w rzeczywistości [44, 139].

Do opisu systemu rozwijającego się w każdym etapie rozwoju θ przyjmuje się za Robertem Staniszewskim teorię systemów rozwijających się [150–152], przy czym w przypadku systemów tej klasy jak system EE nie dysponuje się wprost wielkościami charakterystycznymi, gdyż nie dysponuje się także modelem rozwoju możliwym do uzyskania na drodze modelowania rozwoju. Natomiast model rozwoju można otrzymać w wyniku identyfikacji rozwoju systemu EE, a z niego wydobyć sztuczny kod genetyczny i zapisać go w formie modelu (modelu ewolucyjnego), którego geny są specyficznymi skumulowanymi wielkościami charakterystycznymi opisującymi system.

W przypadku dysponowania skończonym zbiorem wartości wielkości charakterystycznych SEE wyrażonych jako zbiór $K(\theta) = \langle K_1(\theta), K_2(\theta), \dots, K_n(\theta) \rangle$, należy poszukiwać funkcji jakości systemu $J(K_1, K_2, \dots, K_n)$ jako jednolitego kryterium oceny poszczególnych etapów rozwoju SEE. Zbiór $K(\theta)$ można w przestrzeni stanów zapisać jako wielowymiarowy wektor stanu rozwoju systemu EE w postaci:

$$\mathbf{K}_i(\theta) = [K_1(\theta) \quad K_2(\theta) \quad \dots \quad K_n(\theta)]^T \quad (4.4)$$

przy czym niektóre ze składowych wektora stanu rozwoju SEE mogą stanowić rozkłady prawdopodobieństwa⁷².

Podane sformułowanie prowadzi do możliwości wykorzystania bogatego aparatu dynamiki rozwoju systemów i układów [11, 27, 28, 41, 48, 50, 89, 84, 107, 110, 152–154, 205, 211, 214–216], po założeniu, że interesują badacza nie funkcjonowanie systemu, lecz jego rozwój oraz w ślad za tym metody badania prawidłowości rozwoju. Interesujący jest zatem w tym ujęciu SEE i jego podsystemy pod kątem zachodzących w nim zmian w wartościach $K_i(\theta)$, ($i = 1 - n$) w czasie długim θ , które przebiegały na skutek celowego działania projektantów, producentów, eksploatorów, użytkowników

⁷¹ Mówiąc o kolejnych etapach rozwoju systemu w ujęciu teorii sterowania i systemów mówi się o kolejnych stanach rozwoju, które opisane są przez wektor rozwoju SEE. Natomiast używając pojęcie oceny jakościowej przez lepszy stan, należy rozumieć stan SEE o składowych wektora stanu spełniających kryteria bezpieczeństwa i efektywności rozwoju [44, 139].

⁷² Chodzi o składowe wektora stanu rozwoju systemu SEE wyrażone w postaci rozkładów prawdopodobieństwa, co występuje w przypadku bardziej skomplikowanych podsystemów (w przypadku szczegółowego opisu rozwoju systemu SEE). Takie sformułowanie wskazuje na opis systemu SEE w kategoriach teorii dynamiki, która zawiera podstawy metod badania prawidłowości rozwoju systemów technicznych, zwłaszcza o konstrukcji rozwijającej się [152, 153].

innych użytkowników systemu. Działania te podejmowane były w postaci oddziaływań sterujących $s(\theta)$ jako oddziaływań technicznych, ekonomicznych oraz oddziaływań w postaci wymagań użytkowników. Zmiany w strukturze SEE można przy tym mierzyć za pomocą pochodnej wektora stanu rozwoju⁷³ $\mathbf{K}_i(\theta)$, a więc:

$$\frac{d\mathbf{K}_i(\theta)}{d\theta} = J[(K_1, K_2, \dots, K_n), K_i(\theta) = C_i], \quad (4.5)$$

przy czym:

$C_i (i = 1, 2, \dots, n)$ określa stan początkowy struktury SEE,

θ – czas długi jako zmienna niezależna procesu rozwoju SEE⁷⁴,

$K_i(\theta)$ – wielkości składowe wektora stanu rozwoju SEE.

Rozwój systemu EE na przestrzeni lat 1946–2007 miał charakter rozwoju wieloetapowego, stąd na kolejne stany SEE wpływ miały stany przeszłe, chociażby wynikające ze strumienia informacji technicznej i ekonomicznej różnych epok. Z charakteru wieloetapowości zmian wektora stanu SEE wynika też prędkość zmian wektora⁷⁵, co zależy nie tylko od aktualnego stanu bieżącego, lecz także od postaci systemu w czasie przeszłym, co można wyrazić następująco:

$$\frac{d\mathbf{K}_i(\theta)}{d\theta} = J[(K(\theta), K_1(\theta - \theta_1), \dots, K_n(\theta - \theta_1)), K_0(\theta) = C]. \quad (4.6)$$

Dla procesów rozwoju SEE jest ważna zmiana procesu przejściowego w czasie θ , a nie przebieg procesu przejściowego, jak to się rozpatruje w dynamice funkcjonowania systemów⁷⁶. W rozwoju SEE występują dwa przeciwstawne procesy, proces eks-

⁷³ Można taki stan wyjaśnić najprościej w sposób następujący: jeżeli wektor stanu $\mathbf{K}(\theta)$ opisuje stan rozwoju systemu SEE, to zmiany wektora stanu opisują zmiany stanu rozwoju systemu, a ponieważ system w teorii sterowania i systemów opisywany jest macierzami \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} i \mathbf{D} , stąd zmiany rzędu macierzy są zmianami strukturalnymi, a zmiany wartości elementów – zmianami parametrycznymi, co wynika wprost z definicji zamieszczonych w p. 4.1.1.

⁷⁴ Wprowadzono czas długi θ do wyrażenia procesów rozwoju oraz czas krótki t do wyrażenia dynamiki funkcjonowania systemu. Rozwój przebiega etapami, podczas każdego etapu dokonują się w czasie długim θ zmiany parametryczne, a przejście do nowego etapu rozwoju związane jest ze zmianami strukturalnymi.

⁷⁵ Rozwój systemu ma charakter rozwoju wieloetapowego, a zatem zmiany wektora stanu mogą zostać wyrażone jako $d\mathbf{K}(\theta)/d\theta$, stąd należy zauważyć, że prędkość zmiany wektora stanu systemu jest prędkością zmian położenia wektora stanu systemu SEE w czasie długim θ .

⁷⁶ W teorii sterowania i systemów do oceny właściwości dynamicznych wykorzystywana jest charakterystyka procesu przejściowego, przy czym w badaniach klasycznych zwykle zwraca się uwagę na wartość wychylenia, czas trwania stanu niustalonego, liczbę pulsacji itp. Natomiast w rozwoju systemów badana jest zmiana procesu przejściowego, a mówiąc krótko, badana jest zmiana procesu związanego z czasem ustalania się procesu początkowego w czasie długim θ , co przejawia się przechodzeniem z jednej charakterystyki procesu na inną spośród rodziny charakterystyk.

ploatacji SEE i związany z nim proces starzenia się systemu oraz proces doskonalenia systemu i związany z nim proces unowocześniania systemu (proces pozytywnego rozwoju systemu, modernizacji). Jeżeli w wyniku rozwoju SEE otrzymuje się nowe stany systemu o procesach przejściowych coraz łagodniejszych, to można powiedzieć, że system jest coraz to lepszy⁷⁷. Można w następujący sposób zapisać łącznie funkcjonowanie i rozwój SEE, a mianowicie:

$$\frac{d\mathbf{K}_i(K, \theta, t)}{d\theta} = J[\mathbf{K}(K, \theta, t), \mathbf{K}_0(K, \theta, t) = C], \quad (4.7)$$

gdzie:

K – zbiór parametrów rozwoju systemu EE,

θ – czas długi rozwoju systemu EE,

t – czas krótki eksploatacji systemu EE w jednym okresie rozwoju θ .

Dlatego też wektor stanu rozwoju w zapisie (4.7) względem θ daje informację o rozwoju, a względem t daje informację o właściwościach dynamicznych eksploatacji systemu. Występuje tutaj jedna funkcja dynamiczna $\mathbf{K}(K, \theta, t)$, ujmująca łącznie dynamikę i rozwój SEE, przy czym badanie systemu sprowadzono w niniejszej pracy do stanów wyrażonych w sposób następujący:

$$\frac{dK_i(K, \theta, t = \text{const})}{d\theta} = J[K(K, \theta, t = \text{const}), K_0(K, \theta, t = \text{const}) = C], \quad (4.8)$$

przy czym interesujące są w tym przypadku zmiany jakości kolejnych stanów SEE, co wynika wprost z definicji 3. Tego właśnie przypadku rozwoju SEE dotyczy niniejsza praca, a więc zmian strukturalnych oraz parametrycznych dla widzianej z tej perspektywy sytuacji $t = 0$ lub $t = \text{const}$ ⁷⁸.

Dla pokazania wyraźnej różnicy pomiędzy zachowaniem się charakterystyk SEE w funkcji czasu eksploatacji t od zachowania się charakterystyk systemu w funkcji

⁷⁷ W teorii sterowania i systemów mówi się o łagodniejszych procesach wówczas, gdy kształty charakterystyk są coraz mniej strome i przez to oczekiwane odpowiedzi coraz bardziej przewidywalne. W przypadku eksploatacji systemu SEE wraz ze wzrostem θ jakość systemu pogarsza się, co ma swoje odzwierciedlenie w pogorszeniu kształtu charakterystyk procesu przejściowego (krótko mówiąc, zachodzi proces starzenia). Jednakże z drugiej strony system jest odnawiany (rozwijany), a kolejne wersje montowanych w nim układów są coraz to bardziej nowoczesne, co sprawia, że odpowiadające im procesy przejściowe są coraz łagodniejsze (oczywiście w wyniku przewagi procesów odnawialnych nad procesami starzenia się systemu), a więc system jest coraz lepszy w sensie przyjętego kryterium rozwoju (w niniejszej pracy bezpieczeństwa i efektywności rozwoju).

⁷⁸ Człon $K(\theta = \text{const}, t)$ w zależności (4.7) dotyczy jednego włączenia systemu lub podsystemu (układu) i opisuje jego zachowanie się po przyłożeniu do niego wymuszenia lub zakłócenia, natomiast człon $K(\theta, t = \text{const})$ ma sens w dwóch przypadkach, a mianowicie: gdy rozpatruje się proces dynamiczny dla n włączeń oraz gdy bada się zmianę jakości kolejnych N wersji struktury SEE.

czasu rozwoju θ struktury systemu można np. dokonać prostego porównania zachowania się takich charakterystyk, jak wychylenie, czas ustalenia się procesu początkowego (procesu przejściowego), czy też liczba pulsacji w procesie początkowym. Warto przy tym dodać, że wielkości charakterystyczne nie są charakterystykami eksploatacji systemu, a te nie są charakterystykami rozwoju SEE. Wielkościami charakterystycznymi układów i systemów fizycznych nazywa się wielkości, które, przyjmując odpowiednie wartości, nadają mu kształt, ciężar, wymiary, właściwości fizyczne, przydatność funkcjonalną itp.

W procesie eksploatacji (przebieg procesu fizycznego w czasie krótkim t) wielkości te zmieniają się w wyniku użytkowania systemu (jego zużycia), a także zmieniają swoje wartości. W wyniku rozwoju (czas długi θ) ulega zmianie budowa urządzeń, układów, systemów, a niekiedy w wyniku zmian unowocześnienia technologii także proces fizyczny, co powoduje, że zbiór tych wielkości zmienia się (ubywają wielkości istniejące, pojawiają się nowe, zmieniają właściwości niektóre z istniejących itp.). Zbiory tych wielkości są ograniczone od dołu i od góry, co może dotyczyć określonych charakterystyk zewnętrznych układu fizycznego (np. występujące pojemności, indukcyjności, charakterystyki energetyczne itp.) oraz określonych charakterystyk zjawisk fizycznych (np. maksymalna wartość napięcia, dopuszczalne wartości częstotliwości itp.). Oczywiście od stopnia wpływu poszczególnych wielkości charakterystycznych na wymienione charakterystyki można mówić o wielkościach charakterystycznych wrażliwych i niewrażliwych, itp. Można zaznaczać ich położenie na charakterystykach. Ale można także mówić o charakterystykach uogólnionych, takich jak charakterystyka efektywności oraz charakterystyka bezpieczeństwa rozwoju SEE. Można też mówić o charakterystykach ocenowych czy też o charakterystykach starzenia się i charakterystykach rozwoju układów i systemów elektroenergetycznych [152, 153].

Należy ponadto dodać, że SEE w takim ujęciu można traktować wyłącznie jako obiekt techniczny i wówczas rozpatrywać w nim wyłącznie procesy robocze, a więc przepływy materiałowe i energetyczne, czyli w tym przypadku proces przesyłu mocy i energii elektrycznej.

Można też rozpatrywać SEE jako obiekt zarządzania i wyróżniać w nim przepływy informacyjno-decyzyjne, czyli w rozważanym systemie funkcjonowanie m.in. Urzędu Regulacji Energetyki jako systemu regulacyjnego dla SEE. Można wreszcie rozpatrywać SEE jako system sterowania, a więc wyróżniać w nim procesy przepływu energii i przepływu usług przesyłu oraz oprócz tego wyróżniać procesy przepływu środków finansowych.

Przyjęto, że SEE obejmuje procesy sterowania, czyli uwzględnia się w nim procesy fizycznego przepływu energii i usług (system realizacji) oraz przeciwnie do nich skierowane procesy przepływu strumienia informacyjno-finansowego (system sterujący), co prowadzi do wyróżnienia w modelu rozwoju SEE procesów energomaterialnych oraz przeciwnie do nich skierowanych procesów informacyjno-finansowych. Takie

ujęcie rozwoju SEE sprowadza się do badania prawidłowości rozwoju SEE traktowanego jako system techniczno-ekonomiczny, przy czym:

$\bar{u} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ – zbiór wielkości oddziałujących na system, np. zbiór wielkości wejściowych,

$\bar{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ – zbiór wielkości zewnętrznych systemu, np. wielkości wyjściowych,

a zatem w ujęciu teorii sterowania i systemów SEE złożony jest z dwóch podsystemów: systemu sterującego oraz obiektu sterowania, przy czym w obiekcie sterowania występują procesy robocze (technologiczne), a w systemie sterującym procesy organizujące działania, a więc procesy decydujące o stopniu wykorzystania procesów roboczych (finansowe).

W badaniu prawidłowości rozwoju SEE na przestrzeni lat, a więc z uwzględnieniem danych statystycznych, istotne jest zbadanie wrażliwości poszczególnych wielkości charakterystycznych na zmiany strukturalne oraz na zmiany parametryczne. Może się okazać, że mała zmiana wartości wielkości $K_i(\theta)$ może przynieść znaczne polepszenie jakości rozwoju SEE, a w innym przypadku nawet wyraźna zmiana tych wielkości może nie przynieść w ogóle zmian, a nawet pogorszyć jakość systemu. Może wreszcie wystąpić sytuacja, że zmiana wartości określonej wielkości do pewnej granicy wpływa na polepszenie jakości systemu, a po przekroczeniu tej granicy następuje pogorszenie jakości systemu.

Ważne jest zatem ustalenie, które sztuczne geny, a więc które z wielkości $K_i(\theta)$ mają wpływ na polepszenie jakości systemu i w dodatku w jak znacznym stopniu. W problematyce rozwoju SEE występuje problem sterowania rozwojem za pomocą określonych wielkości charakterystycznych, w naszym przypadku za pomocą określonych sztucznych genów. Ważny jest matematyczny opis sterowania rozwojem SEE jako systemu techniczno-ekonomicznego zgodnie z pojawiającymi się w określonym czasie informacjami o zmianach technicznych, ekonomicznych oraz o zmianie wymagań użytkowników SEE. Stąd też dla łącznego ujęcia procesów roboczych i sterowania można przyjąć następujący model rozwoju SEE, a mianowicie:

$$\frac{d\mathbf{K}}{d\theta} = J[\mathbf{K}(\theta), \mathbf{s}(\theta), \mathbf{r}(\theta)] \quad (4.9)$$

przy czym:

$\mathbf{s}(\theta)$ – wektor sterujący,

$\mathbf{r}(\theta)$ – wektor informacji technicznych, ekonomicznych oraz o wymaganiach użytkowników (wektor zakłóceń).

Badanie zmian stanu rozwoju SEE w przestrzeni stanów wyrażone zależnością (4.9) zależy zatem od: aktualnej wartości stanu rozwoju systemu opisywanego wektorem $\mathbf{K}(\theta)$, wektora sterującego (najczęściej wymuszeń zewnętrznych) $\mathbf{s}(\theta)$ i wektora informacji technicznych, ekonomicznych i użytkowych $\mathbf{r}(\theta)$, co łącznie można zapisać następująco:

$$\frac{d\mathbf{K}(K, \theta)}{d\theta} = \mathbf{A}(K, \theta) \cdot \mathbf{K}(\theta) + \mathbf{B}(K, \theta) \cdot \mathbf{s}(\theta) + \mathbf{r}(\theta), \quad (4.10)$$

przy czym:

$\mathbf{A}(K, \theta)$ – macierz procesu rozwoju,

$\mathbf{B}(K, \theta)$ – macierz sterowania,

$\mathbf{K}(\theta)$ – wektor stanu.

W tym miejscu najpierw należy zauważyć, że występuje szczególny przypadek, gdy czas krótki $t = \text{const}$ (zależność (4.9), czyli: $\mathbf{A}(K, \theta)$ jest macierzą kwadratową $n \times n$ o stałych współczynnikach, które zapewniają liniowość (względem t – co wynika z zapisu). Można też dodać, że względem czasu t proces jest dla danego etapu rozwoju θ procesem stacjonarnym, o parametrach niezależnych od czasu krótkiego t , ale proces jest procesem niestacjonarnym w czasie długim θ (macierz procesu \mathbf{A} i macierz sterowania \mathbf{B} zależą od czasu długiego θ) lub procesem o przypadkowych parametrach, gdy macierze zależą od przypadkowych wartości parametrów procesu rozwoju⁷⁹. W przypadku gdy macierze \mathbf{A} i \mathbf{B} nie zależą od czasu θ , wówczas proces jest stacjonarny względem czasu długiego θ .

W wyniku badań eksperymentalnych przeprowadzonych w ramach niniejszej monografii otrzymano m.in. dwa podstawowe modele rozwoju systemu EE w przestrzeni stanów (wartości zaokrąglono do dwóch miejsc po przecinku):

1. Model rozwoju systemu EE otrzymany na bazie danych testowych IEEE RTS (szczegółowo opisany w rozdziale 5) postaci:

$$\begin{bmatrix} \dot{k}_1 \\ \dot{k}_2 \\ \dot{k}_3 \\ \dot{k}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,001 & 1 & 0 & 0 \\ -5,48 & 0 & 1 & 0 \\ 1,67 & 0 & 0 & 1 \\ -1,85 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -333,8 & -0,1 & 2,1 \\ 0 & 0 & -0,7 & 277,9 & -0,2 & -1,3 \\ 0 & 0 & 4,7 & -1493,8 & -0,2 & 10,2 \\ 0 & 0 & -0,7 & 274,8 & -0,3 & -0,8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,12 \\ -0,34 \\ 4,94 \\ -0,24 \end{bmatrix}, \quad (4.11)$$

⁷⁹ Warto zauważyć, że także dla czasu długiego θ , jeżeli proces jest n -tego rzędu, to macierz \mathbf{A} jest macierzą kwadratową $n \times n$ o stałych współczynnikach, a proces jest procesem liniowym i stacjonarnym, gdy natomiast macierze \mathbf{A} i sterowania \mathbf{B} zależą od czasu θ , wówczas proces jest liniowy i niestacjonarny, a w przypadku gdy macierze te zależą od przypadkowych parametrów procesu rozwoju, wówczas proces jest liniowy o przypadkowych parametrach.

gdzie:

- k_1 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako prognozowana energia elektryczna [kWh],
- k_2 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako prognozowana moc generatorów [MW],
- k_3 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako szybkość zmian prognozowanej mocy generatorów w ciągu roku [MW/rok],
- k_4 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako przyspieszenie zmian prognozowanej mocy generatorów w ciągu roku [kWh/rok²],
- s_1 – łączna istniejąca moc czynna [MW],
- s_2 – prognozowane zapotrzebowanie na przyrost mocy czynnej [MW],
- s_3 – łączna zainstalowana moc czynna [MW],
- s_4 – łączna liczba zainstalowanych generatorów,
- s_5 – łączne istniejące koszty stałe [\$],
- s_6 – jednostkowe istniejące koszty zmienne [\$/kWh],
- y_1 – prognozowana moc generatorów [MW],
- y_2 – prognozowane dodatkowe koszty stałe [\$],
- y_3 – prognozowane dodatkowe koszty zmienne [\$/kWh].

2. Model rozwoju KSE na bazie danych eksperymentalnych z lat 1946–2007 (szczegółowo opisany w rozdziale 6) postaci:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,13 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,34 & -0,2 & -5,19 & -14,51 & 0,16 & 0,01 & -0,05 & -0,003 & 0,03 & 0,09 & 0,13 & 0,16 & -0,03 & -0,02 \\ -0,05 & -0,78 & 0,37 & 9,72 & -0,05 & -0,03 & -0,28 & -0,01 & 0,1 & 0,3 & 0,06 & -0,01 & -0,13 & 0,3 \\ -0,014 & 0,33 & 29,52 & 14,17 & 0,07 & 0,01 & -0,61 & 0,03 & -0,03 & 0,15 & -0,047 & -0,01 & 0,23 & 0,03 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_{14} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,13 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.12)$$

gdzie:

- x_1 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako możliwa do wyprodukowania energia elektryczna w elektrowniach (ogółem) [kWh],
- x_2 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako moc osiągalna generatorów [MW],
- x_3 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako szybkość zmian mocy osiągalnej generatorów w ciągu roku [MW/rok].

Można zauważyć, że w obu modelach empirycznych systemu EE: modelu IEEE RTS (4.11) oraz modelu KSE (4.12) zmiennymi stanu są energia elektryczna oraz

moc generatorów, a także wynikające z nich takie wielkości, jak szybkość zmian czy przyspieszenie⁸⁰.

Rozwiązaniem w czasie równań (4.10) jest równanie:

$$x(\theta) = e^{\theta A} x(0) + \int_0^{\theta} e^{(\theta-\tau)A} B u(\tau) d\tau, \quad (4.13)$$

w którym człon pierwszy jest składową swobodną zależną od warunków początkowych, a człon drugi jest składową wymuszoną jako splot odpowiedzi impulsowej i zmiennej wyjściowej. Występująca w równaniu (5.6) macierz:

$$\varphi(\theta) = e^{A \cdot \theta} \quad (4.14)$$

jest macierzą podstawową (tranzycyjną) systemu. W rozwiązaniu (4.13) wyróżnia się dwa człony:

- zależy od wektora stanu początkowego x_0 , który występuje przy stanie początkowym niezerowym i stanowi odpowiedź układu na stan początkowy, co fizycznie oznacza, że źródłem stanu nieustalonego jest energia zmagazynowana w systemie EE;
- stanowiący odpowiedź systemu na działanie wektora wymuszeń $u(\theta)$.

Rozwiązując równania macierzowe (4.11) oraz (4.12), można przyjąć koncepcję omówioną w metodzie klasycznej, czyli rozwiązanie traktować jako sumę składowej swobodnej (przejściowej) otrzymanej w wyniku rozwiązania równania różniczkowego jednorodnego i składowej ustalonej. Rozwiązanie przedstawia się wówczas w postaci:

$$x(\theta) = x_u(\theta) + x_p(\theta) \quad (4.15)$$

Składową ustaloną $x_u(\theta)$ wyznacza się jedną z metod rozwiązywania obwodów, uwzględniając przy tym charakter wymuszenia. Składową przejściową $x_p(\theta)$ oblicza się natomiast jako rozwiązanie równania różniczkowego jednorodnego otrzymanego w wyniku założenia w równaniach (4.10), że $u(\theta) = 0$, czyli z równania:

$$\dot{x}_p(\theta) = A x_p(\theta) \quad (4.16)$$

⁸⁰ Przyjęta interpretacja zmiennych stanu nie jest interpretacją unikatową. W obu przypadkach interpretacja bierze początek w założeniu, że w równaniu wyjścia $y_1 = C \cdot \mathbf{k}_1$ oraz $y_1 = C \cdot \mathbf{x}_1$ elementy c_{11} macierzy $C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ w modelu systemu EE IEEE RTS oraz $C = [1 \ 0 \ 0]$ w modelu systemu KSE wyrażają częstotliwość [1000/h].

Rozwiązanie równania (4.16) ma postać:

$$x_p(\theta) = e^{A(\theta-\theta_0)} x_p(0), \quad (4.17)$$

przy czym: $x_p(0)$ – wektor stanu składowych przejściowych w chwili $\theta=0$.

Wektor $x_u(0)$ obliczany jest z równania (4.15) po założeniu, że $\theta=0$, czyli:

$$x(\theta) = x_u(0) + x_p(0), \quad (4.18)$$

a stąd:

$$x_p(0) = x(0) - x_u(0). \quad (4.19)$$

W szczególnym przypadku, przy stanie początkowym zerowym, tzn. gdy $x(0) = 0$, otrzymuje się:

$$x_p(0) = -x_u(0). \quad (4.20)$$

W badaniu prawidłowości rozwoju SEE nie chodzi o rozwiązanie równań (4.11) oraz (4.12) dla zadanych warunków początkowych, ale o samo określenie modelu na podstawie procesu identyfikacji systemu, a następnie o określenie zbioru parametrów (np. pierwiastków równania charakterystycznego) wynikających wprost z modelu systemu i zbadanie wrażliwości zmian jakości modelu w zależności od zmian poszczególnych parametrów oraz struktury systemu EE.

W przypadku rozwoju systemu EE jako zintegrowanego systemu zautomatyzowanego (systemu rozwijającego się jak fabryka bezludna) jakość pracy może zostać określona np. wielkością uchybu sterowania w czasie całego okresu pracy SEE, a więc w czasie długim θ . Jednakże ze względu na przypadkowy charakter zakłóceń nie jest możliwe analityczne wyznaczenie poprawnego rzeczywistego przebiegu uchybu sterowania systemu rozwoju, stąd też ocenę jakości rozwoju systemu wygodnie jest przeprowadzić na podstawie cech i parametrów procesów występujących przy pewnych typowych wymuszeniach, takich jak skok jednostkowy, funkcja sinusoidalna lub inne typowe wymuszenie. Jakość (dobroć) systemów sterowania ocenia się za pomocą odpowiednio dobranych wskaźników jakości wyrażających wymagania technologiczne, ekonomiczne i inne stawiane systemowi (w teorii sterowania i systemów są to m.in. następujące kryteria jakości regulacji: zapas stabilności, rozkład pierwiastków równania charakterystycznego, kryteria czasowe, częstotliwościowe i całkowite).

4.3. Kodowanie i symulacja rozwoju

W teorii sterowania i systemów wyróżnia się trzy źródła występowania cech geometrycznych konfiguracji zer i biegunów transmitancji operatorowej, co dotyczy

może też opisów poszczególnych przetworników i układów jako członów liniowych, które można odnieść do systemów rozwoju, a mianowicie⁸¹ [20, 63, 64, 150–152]:

- cechy geometryczne mogą wynikać z właściwości algebraicznych wielomianów licznika i mianownika transmitancji,
- cechy geometryczne mogą wynikać z wymagań regulacyjnych,
- cechy geometryczne mogą wynikać z indywidualnych cech transmitancji.

W przypadku systemów rozwoju, tak jak w przypadku rozwoju systemu EE, interesujące jest nie tylko zachowanie się poszczególnych podsystemów, lecz również utworzonych z nich schematów blokowych systemów zamkniętych oraz otwartych i wówczas transmitancję systemu otwartego $G_o(s)$ uzyskuje się stosunkowo łatwo, znając transmitancję poszczególnych podsystemów $G_1(s)$, $G_2(s)$, ..., $G_N(s)$, co np. dla połączenia kaskadowego prowadzi do zależności:

$$G_o(s) = V \frac{N_o(s)}{M_o(s)} = \prod_{i=1}^n G_i(s) \quad (4.21)$$

gdzie:

$N_o(s)$ – wielomian licznika transmitancji systemu otwartego wyrażony w postaci czynnikowej,

$M_o(s)$ – wielomian mianownika transmitancji systemu otwartego wyrażony w postaci czynnikowej,

$G_i(s)$ – i -ta transmitancja składowa dana w postaci czynnikowej (lub do niej sprowadzana).

V – stały współczynnik wynikający z tzw. wskaźnika wzmocnienia.

Do określenia właściwości dynamicznych rozwoju SEE niezbędna jest natomiast znajomość transmitancji systemu zamkniętego $G_z(s)$, a więc :

$$G_z(s) = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)} = V \frac{N_o(s)}{VN_o(s) + M_o(s)}, \quad (4.22)$$

przy czym zera transmitancji $G_z(s)$ są zerami transmitancji $G_o(s)$ (pozostają bez zmian), a zmianom ulegają bieguny transmitancji układu zamkniętego, które są pierwiastkami równania z mianownika, a zatem otrzymuje się równanie w postaci:

$$1 + G_o(s) = VN_o(s) + M_o(s) = 0, \quad (4.23)$$

⁸¹ Mówiąc o właściwościach algebraicznych wielomianów licznika i mianownika, transmitancja zagadnienie określenia cech geometrycznych na płaszczyźnie zmiennej zespolonej sprowadza się do wyznaczenia konfiguracji zer i biegunów układu otwartego, a w ślad za tym np. linii pierwiastkowych. Natomiast mówiąc o indywidualnych cechach transmitancji, zagadnienie określenia cech geometrycznych sprowadza się do wyznaczenia konfiguracji zer i biegunów układu zamkniętego (ze sprzężeniami zwrotnymi).

zwane równaniem charakterystycznym systemu rozwoju. Dlatego też przy kodowaniu rozwoju SEE pojawiają się w zasadzie trzy zadania, co na gruncie teorii sterowania i systemów można sprowadzić do:

- 1) znalezienia konfiguracji zer i biegunów otwartego systemu rozwoju,
- 2) znalezienia pierwiastków równania charakterystycznego zamkniętego systemu rozwoju, a więc biegunów transmitancji $G_Z(s)$ będących elementami zbioru charakterystycznego,
- 3) znalezienia powiązań znanej konfiguracji zer i biegunów transmitancji $G_Z(s)$ z odpowiadającą jej charakterystyką czasową, a więc znalezienia sposobu związania zagadnienia rozwoju z ruchem pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej s .

Ze względu na badania prawidłowości rozwoju SEE szczególnie ważny jest przypadek (2) dotyczący poszukiwania konfiguracji zer i biegunów systemu EE jako systemu zamkniętego, w sytuacji gdy znana jest konfiguracja zer i biegunów systemu EE jako systemu otwartego, co w ujęciu matematycznym sprowadza się do określenia pierwiastków równań algebraicznych, np. za pomocą metody linii pierwiastkowych Evansa [20]. Następnie na podstawie równania charakterystycznego można utworzyć odpowiednio:

- (1) współczynnikowy zbiór parametrów systemu EE o postaci:

$$K_s^w(v, a, b) = [v; a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_m], \quad (4.24)$$

gdzie:

- v – stały współczynnik wynikający z tzw. wskaźnika wzmocnienia v (proporcjonalnego do współczynnika wzmocnienia K);
 - a_i – i -ty współczynnik przy i -tym wyrazie wielomianu mianownika transmitancji operatorowej,
 - b_j – j -ty współczynnik przy j -tym wyrazie wielomianu licznika transmitancji operatorowej;
- (2) pierwiastkowy zbiór parametrów systemu EE o postaci:

$$K_s^s(k, z, p) = [k; z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n; p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_m], \quad (4.25)$$

gdzie:

- k – stały współczynnik wynikający z tzw. współczynnika wzmocnienia,
- z_j – j -ty pierwiastek licznika transmitancji operatorowej (j -te zero),
- p_i – i -ty pierwiastek mianownika transmitancji operatorowej (i -ty biegun).

W trakcie zmian strukturalnych i parametrycznych systemu EE zmianom ulegają elementy zbiorów (4.24) oraz (4.25), zarówno co do liczby, składu, jak i co do wartości. Podczas zmian strukturalnych pojawiają się nowe zera i bieguny (nowe linie pierwiastkowe), a podczas zmian parametrycznych zmianom ulegają wartości istniejących zer i biegunów, a więc i przebiegi istniejących linii pierwiastkowych.

Kodowanie rozwoju systemu EE jest związane przede wszystkim z uzyskaniem modeli rozwoju SEE, a następnie na tej podstawie wygenerowanie metamodelu rozwoju, z zapisaniem w efekcie końcowym, istotnych informacji o systemie w postaci zbioru parametrów rozwoju, w którym poszczególne elementy mogą być elementami poszczególnych podsystemów lub zagregowanymi wielkościami charakterystycznymi systemu, a zatem:

$$\bar{K} = [K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_n], \quad (4.26)$$

przy czym K_i – i -ty podsystem SEE ($i = 1 - n$).

Wielkości zagregowane w zbiorach parametrów rozwoju dla SEE to strumienie energomaterialne i usługowe oraz strumienie informacyjno-finansowe, natomiast wielkościami zagregowanymi może być np. cena, produktywność itp.

Można przy tym zagadnienie badania prawidłowości rozwoju systemu EE sprowadzić do badania zachowania się pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z lub s . W ogólnym przypadku zmianom ulegać będą wielkości charakterystyczne ze zbioru \bar{K} , jako funkcji zmiennej niezależnej θ . Można także przyjąć, że te wielkości, które określają proces fizyczny występujący w systemie EE zależą ponadto od czasu t . Stąd też poszczególne wielkości charakterystyczne mają wartości ograniczone od dołu i od góry. Ograniczenia mogą dotyczyć charakterystyk zewnętrznych SEE, takich jak np. ustalone charakterystyki energetyczne, liczba koncesji, ale mogą też dotyczyć natury zjawisk fizycznych, jak np. sprawność funkcjonowania systemu wytwarzania, straty przy przesyłce mocy i energii elektrycznej. Mogą to być wreszcie ograniczenia finansowe, np. wielkość możliwego zadłużenia, stan zasobów finansowych niezbędnych do zapewnienia płynności. Stąd wynika, że elementy sztucznego kodu genetycznego opisują rozwój parametryczny w zakresie możliwych zmian swych wartości:

$$K_i^d \leq K_i \leq K_i^g \quad (4.27)$$

przy czym indeks górny d oznacza kres dolny, a indeks g oznacza kres górny.

W procesie zmian parametrycznych parametry zmieniają się w granicach ustalonych zakresem (4.27), a w przypadku zmian strukturalnych zmianie ulega liczba i skład wielkości K_i , a więc w procesie zmian etapowych następuje przechodzenie do kolejnych sztucznych kodów genetycznych, co można zapisać następująco:

$$\{K^1\} \rightarrow \{K^2\}; \{K^2\} \rightarrow \{K^3\}; \dots; \{K^{n-1}\} \rightarrow \{K^n\}. \quad (4.28)$$

W konsekwencji prowadzi do wyższego (teoretycznie) stanu rozwoju SEE, a więc stanu rozwoju charakteryzującego się wyższym poziomem bezpieczeństwa rozwoju oraz większą efektywnością rozwoju.

Definicja 5. Zmiany strukturalne systemu elektroenergetycznego. W następstwie zmian strukturalnych pojawiają się (lub znikają) nowe zera (z_j) oraz nowe bieguny (p_i)

jako pierwiastki licznika i mianownika transmitancji operatorowej systemu zamkniętego [152, 153]. Jest to wynik zmian liczby elementów w systemie (składu systemu), liczby podsystemów, liczby układów czy też liczby przetworników), co z kolei może mieć wpływ na zmiany w relacjach, a więc też w zachodzących procesach, czyli także w zmianach parametrycznych. Zmiany strukturalne mogą być obserwowane w sztucznym kodzie genetycznym jako zmiany liczby i zmiany składu sztucznych genów czy też zanurzonych w sztucznym kodzie systemu sztucznych kodów podsystemów, co można zapisać następująco:

(1) zapis współczynnikowy:

$$\begin{aligned}
 K_{gw0}^s(\overline{k^i}, q_0) &= (v_0; a_1, a_2, \dots, a_n; b_1, b_2, \dots, b_m), \\
 K_{gs1}^s(\overline{k^i}, q_1) &= (v'_0; a'_1, a'_2, \dots, a'_n, a'_{n\pm 1}; b'_1, b'_2, \dots, b'_m, b'_{m\pm 1}), \\
 K_{gs2}^s(\overline{k^i}, q_2) &= (v''_0; a''_1, a''_2, \dots, a''_{n\pm 2}; b''_1, b''_2, \dots, b''_{m\pm 2}), \\
 K_m(\overline{k^i}, q_m) &= (v_0^{(k)}; a_1^{(k)}, a_2^{(k)}, \dots, a_{n\pm k}^{(k)}; b_1^{(k)}, b_2^{(k)}, \dots, b_{m\pm k}^{(k)}),
 \end{aligned}
 \tag{4.29}$$

(2) zapis pierwiastkowy:

$$\begin{aligned}
 K_{gs0}^s(\overline{k^i}, q_0) &= (k_0; z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_n; p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_m), \\
 K_{gs1}^s(\overline{k^i}, q_1) &= (k'_0; z'_1, z'_2, \dots, z'_j, \dots, z'_n, \dots, z'_{n\pm 1}; p'_1, p'_2, \dots, p'_i, \dots, p'_m, p'_{m\pm 1}), \\
 &\dots\dots\dots \\
 K_{gs2}^s(\overline{k^i}, q_j) &= (k''_0; z''_1, z''_2, \dots, z''_j, \dots, z''_n, \dots, z''_{n\pm j}; p''_1, p''_2, \dots, p''_i, \dots, p''_m, \dots, p''_{m\pm j}) \\
 &\dots\dots\dots
 \end{aligned}
 \tag{4.30}$$

$$K_{gsm}^s(\overline{k^i}, q_m) = (k_0^{(k)}, z_1^{(k)}, z_2^{(k)}, \dots, z_j^{(k)}, \dots, z_n^{(k)}, \dots, z_{n\pm 1}^{(k)}, p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_i^{(k)}, \dots, p_m^{(k)}, \dots, p_{m\pm j}^{(k)}, \dots, p_{m\pm 1}^{(k)}),$$

gdzie ponadto górny indeks dotyczy kolejnej zmiany w transmitancji, a dolny indeks dotyczy kolejnej zmiany w liczbie odpowiednich elementów (współczynników, zer, biegunów), np.: z_i – i -te zero transmitancji, $z^{(k)}$ – k -ta zmiana liczby zer w transmitancji.

Definicja 6. Zmiany parametryczne systemu EE. W trakcie zmian parametrycznych rzecz dotyczy zmian wartości istniejących zer i biegunów lub zmian w liczbie parametrów i w ich wartościach składających się na poszczególne pierwiastki, a więc zmian relacji między podsystemami, układami, elementami w systemie, przy czym liczba, skład i struktura elementów, układów i podsystemów jest stała, co można w sposób formalny zapisać następująco:

(1) zapis współczynników:

$$K_{gw0}^p(\bar{k}^i, q_0) = (v_0, v'_0, v''_0, \dots, v_0^{(n)}), K_{gw1}^p(\bar{k}^i, q_1) = (v_1, v'_1, v''_1, \dots, v_1^{(n)}), \quad (4.31)$$

$$K_{gw2}^p(\bar{k}^i, q_2) = (v_2, v'_2, v''_2, \dots, v_2^{(n)}),$$

.....

$$K_{gwm}^p(\bar{k}^i, q_m) = (v_m, v'_m, v''_m, \dots, v_m^{(n)}),$$

(2) zapis pierwiastkowy:

$$K_{gw0}^p(\bar{k}^i, q_0) = (k_0, z'_0, z''_0, \dots, z_0^{(n)}; p'_0, p''_0, \dots, p_0^{(m)}),$$

$$K_{gw1}^p(\bar{k}^i, q_1) = (k_1, z'_1, z''_1, \dots, z_1^{(n)}; p'_1, p''_1, \dots, p_1^{(m)}),$$

$$K_{gw2}^p(\bar{k}^i, q_2) = (k_2, z'_2, z''_2, \dots, z_2^{(n)}; p'_2, p''_2, \dots, p_2^{(m)}), \quad (4.32)$$

.....

$$K_{gwm}^p(\bar{k}^i, q_m) = (k_m, z'_m, z''_m, \dots, z_m^{(n)}; p'_m, p''_m, \dots, p_m^{(m)}),$$

gdzie:

q_i – i -ty etap rozwoju w czasie długim θ , w którym pojawia się zmiana strukturalna lub zmiana parametryczna systemu, przy czym:

$$q_i = \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n = \sum_{i=1}^m \theta_{i1} + \sum_{i=1}^m \theta_{i2} + \dots + \sum_{i=1}^m \theta_{in}, \quad (4.33)$$

oraz:

- θ_i – i -ty czas długi,
- θ – czas długi (mierzony w miesiącach, latach, a nawet dziesiątkach lat) jako zmienna niezależna procesu rozwoju,
- θ_n – n -ty przedział czasu długiego,
- \bar{K}^i – kod informacyjny i -tego etapu, w którym system jest opisany przez $\{K^i, K^2, \dots, K^m\}$,
- p – kod genetyczny opisujący zmianę parametryczną,
- s – symbol (u góry) oznaczający, że aktualny kod informacyjny opisuje zmiany strukturalne,

- w – symbol u dołu oznaczający, że aktualny kod genetyczny dotyczy zapisu współczynnikowego,
 z_j – j -ty pierwiastek licznika transmitancji operatorowe (j -te zero),
 p_i – i -ty pierwiastek mianownika transmitancji operatorowej (i -ty biegun),
 K_{gsi}^P – zbiór parametrów systemu EE związanych ze zmianami parametrycznymi i -tego pierwiastka w zapisie pierwiastkowym, zmiany te dokonują się w i -tym czasie długim θ , powodując przejście poszczególnych parametrów w zapisie ogólnym w następujący sposób:

$$s_i \rightarrow s'_i \rightarrow s''_i \rightarrow \dots \rightarrow \overline{s_i^{(n)}}; i = \overline{1-m}, \quad (4.34)$$

- K_{gsi}^P – zbiór parametrów związany ze zmianami strukturalnymi i -tego pierwiastka w zapisie pierwiastkowym, zmiany te dokonują się w i -tym czasie długim θ , powodując przejście poszczególnych parametrów w zapisie ogólnym w następujący sposób:

$$\begin{aligned} & (s_0, s_1, s_2, \dots, s_m) \\ & \downarrow \\ & (s_0^1, s_1^1, s_2^1, \dots, s_m^1, \dots, s_{m \pm j}^1) \\ & \downarrow \\ & (s_0^2, s_1^2, s_2^2, \dots, s_m^2, \dots, s_{m \pm k}^2) \\ & \downarrow \\ & \dots \\ & \downarrow \\ & (s_0^{(k)}, s_1^{(k)}, s_2^{(k)}, \dots, s_m^{(k)}, \dots, s_{m \pm j}^{(k)}, \dots, s_{m \pm n}^{(k)}); j = \overline{1, (m \pm n)}, \end{aligned} \quad (4.35)$$

przy czym w przypadku zmian strukturalnych rzecz dotyczy pojawienia się lub wypadnięcia elementu s_i w zbiorze parametrów, którym w szczególności może być podzbiór parametrów podsystemu, układu, przetwornika, elementu.

Istnieją różne możliwości sformułowania operacji dekodowania zbioru parametrów, jak np.: wynikające z podstaw teorii sterowania i systemów czy też wynikające z możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych samoorganizujących się SOM. W przypadku pierwszym istnieje możliwość wykorzystania procedury np. przechodzenia od równania charakterystycznego do macierzy procesu \mathbf{A} – tak jak np. w projektowaniu systemów i układów sterowania, gdy na podstawie znajomości

współczynników równania charakterystycznego można otrzymać macierz **A** lub też w szerszym ujęciu macierze **A**, **B**, **C**, **D** [20, 63, 84, 152]. W przypadku kiedy znane są stare (sprzed zmian) oraz nowe (po zmianach) charakterystyki poszczególnych podsystemów (np. w ujęciu jednowyjściowym), można zbudować odpowiednią sieć neuronową samoorganizującą się SOM, do której na wejścia będą doprowadzane wejścia i wyjścia starego oraz nowego systemu, a na wyjściu otrzymuje się mapę wiedzy wyrażającą prawidłowościach rozwoju [72, 124, 160, 161, 182].

Można też zbudować sieć neuronową z wykorzystaniem Neural Network Toolboxa, której wejściami byłyby poszczególne współczynniki lub pierwiastki równania charakterystycznego, a wyjściami elementy macierzy **A** lub nawet określone informacje o strukturze i parametrach systemów, jak np. liczba podsystemów jako systemów jednowyjściowych, parametry poszczególnych elementów systemu lub nawet wartości wejść oraz wyjść systemu rynku energii elektrycznej bądź jego podsystemów.

Symulacja rozwoju systemu SEE w środowisku MATLAB i Simulink wiąże się z uprzednim zaprojektowaniem schematów blokowych zmiennych stanu, o różnej strukturze i rozmaitych parametrach, a następnie zastosowanie ich do badania prawidłowości generowania odpowiedzi modelu systemu na wymuszenia takie same jak SEE. Do budowy modelu można stosować gotowe bloki, jak też można przy tym wykorzystać zasadę podsystemowania wzdłużno-poprzecznego [70] i sposób łącznego ujmowania podsystemów za pomocą bloku Subsystem.

Przyjęto przy tym dane wejściowe wygenerowane na podstawie danych prognozy stycznych rozwoju SEE opublikowane w programach Polska 2020 oraz Polska 2030. Badać w ten sposób można zarówno zachowanie się całego SEE, jak i poszczególnych jego podsystemów.

5. Modele rozwoju SEE na podstawie danych testowych IEEE RTS

W celu określenia zachowania się systemu EE w przyszłości stosowano różne metody prognozowania, planowania czy nawet programowania rozwoju, dla różnych horyzontów czasu [99–104]. Metody te okazują się niewystarczające, gdy w grę wchodzi coraz to większy i bardziej złożony oraz jednocześnie rozproszony SEE z różnorodnością form własności oraz z coraz to bardziej rozbudowanym rynkiem energii elektrycznej [113]. Uzupełnieniem obecnych metod stosowanych przy badaniu rozwoju systemów EE okazują się być metody projektowania rozwoju, dobrze znane przy projektowaniu systemów i układów technicznych, w tym układów mechanicznych, elektronicznych oraz elektroenergetycznych.

Duży, scentralizowany, rozległy i mało elastyczny SEE, obciążony dużym ryzykiem awarii i uszkodzeń ze względu na swoje rozmiary i scentralizowanie jest podatny na uszkodzenia i awarie, co przekłada się na pogorszenie parametrów związanych z jakością energii elektrycznej. Coraz częściej występują awarie, w wyniku których energii elektrycznej pozbawionych jest tysiące ludzi jednocześnie (blackout). Alternatywą dla scentralizowanego SEE jest energetyka rozproszona. Z pojęciem rozproszonego systemu EE łączy się również pojęcie generacji rozproszonej. Rozproszony SEE można zdefiniować jako małe jednostki wytwórcze (do 150 MW), które są przyłączone bezpośrednio do sieci rozdzielczych blisko odbiorców lub zlokalizowane w sieci elektroenergetycznej odbiorcy, często wytwarzające energię elektryczną ze źródeł odnawialnych lub niekonwencjonalnych. Do wytwarzania energii elektrycznej w sieciach rozproszonych stosowane są różne technologie. Począwszy od tradycyjnych, przez technologię wytwarzania skojarzonego energii cieplnej i elektrycznej oraz poprzez energię wiatru, słońca, wody, po ogniwa paliwowe i zasobniki energii. Rozwój energetyki rozproszonej bezpośrednio przekłada się na jakość energii elektrycznej. Zdecentralizowany i rozproszony system elektroenergetyczny jest mniej podatny na awarie i zakłócenia związane z przesyłem energii na duże odległości. Źródła energii są zainstalowane blisko odbiorców lub w sieciach odbiorców, co gwarantuje ciągłość dostaw energii elektrycznej. Minimalizowane są straty związane z przesyłem na duże odległości. Ponieważ w rozproszonym SEE pracuje wiele jednostek generacji

rozproszonej o mikromocach do 5 kW, małych mocach do 5 MW i średnich mocach do 50 MW, stąd w przypadku awarii jednego źródła zasilania, jego rolę natychmiast przejmują inne źródła. W łatwy sposób można bilansować i sterować rozplywem mocy w sieci. Ponadto możliwość stosowania nowoczesnych i efektywnych technologii, wysoki współczynnik sprawności, łatwość rozbudowy (przebudowy) systemu, to że małe jednostki nie potrzebują rozległej infrastruktury technicznej, przekłada się na poprawę jakości energii elektrycznej.

Podstawową czynnością w projektowaniu SEE rozumianego jako bardzo złożona, rozproszona i zautomatyzowana *maszyna elektroenergetyczna* jest wyznaczenie przewidywanego obciążenia, od którego zależy zarówno liczba podsystemów, podukładów i elementów, jak i rodzaj, liczba i jakość stosowanych podsystemów, podukładów elementów, a mówiąc krócej, od którego zależą struktura oraz parametry poszczególnych podsystemów, podukładów i elementów. Projektowanie rozwoju SEE związane jest jednak nie tylko z uprzednim prognozowaniem zapotrzebowania na moc i energię elektryczną, ale także z uprzednim poznaniem dotychczasowej historii zmian strukturalnych i parametrycznych oraz oczekiwanego zachowania się systemu, w ślad za zaprojektowanymi nowymi zmianami systemu SEE. Z tych względów aktualnym problemem jest przede wszystkim opracowanie metody identyfikacji modelu rozwoju SEE (metaidentyfikacji), opartej na katalogu modeli rozwoju SEE otrzymanych w wyniku identyfikacji danych statystycznych w układzie kroczącym, a więc identyfikacji modelu rozwoju SEE. Model rozwoju SEE powinien być zbadany ze względu na efektywność oraz bezpieczeństwo rozwoju (w tym kryterium ochrony środowiska). Bezpieczeństwo⁸² i efektywność zostało zdefiniowane w rozdz. 1, przy czym bezpieczeństwo rozwoju wiąże się z utrzymaniem określonego poziomu rozwoju SEE (nieprzekroczenie granicy bezpiecznego rozwoju, specyficznego stanu krytycznego),

⁸² Definicja bezpieczeństwa energetycznego jest podana w trzech dokumentach: w *Doktrynie zarządzania bezpieczeństwem energetycznym*, w *Prawie energetycznym* oraz w *Polityce Energetycznej Polski do roku 2030*. W *Doktrynie zarządzania bezpieczeństwem energetycznym* sformułowano definicję w następujący sposób: „Bezpieczeństwo energetyczne to zdolność do zaspokojenia w warunkach rynkowych popytu na energię pod względem ilościowym i jakościowym, po cenie wynikającej z równowagi popytu i podaży, przy zachowaniu warunków ochrony środowiska”. Pojęcie bezpieczeństwa energetycznego obejmuje trzy główne aspekty przedmiotowe: energetyczny, ekonomiczny (rynkowy) oraz ekologiczny. Definicja bezpieczeństwa energetycznego podana w *Prawie energetycznym* brzmi: „bezpieczeństwo energetyczne jest to stan gospodarki umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, przy zachowaniu wymagań ochrony środowiska”. W *Polityce Energetycznej Polski do roku 2030* bezpieczeństwo energetyczne zdefiniowano jako „stan gospodarki umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię, w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, przy minimalizacji negatywnego oddziaływania sektora energii na środowisko i warunki życia społecznego” [3]. Można rozważać bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej w wymiarze: krótkoterminowym, średnioterminowym i długoterminowym.

a efektywność rozwoju wiąże się z potrzebą utrzymania na przyjętym poziomie wskaźników efektywności lub nawet zwiększenie poziomu wymagań.

Metoda badania prawidłowości rozwoju ze względu na *bezpieczeństwo* omówiona została w pracy [174], w której zdefiniowano pojęcie bezpieczeństwa rozwoju oraz na przykładzie liczbowym pokazano metodę szacowania poziomu bezpieczeństwa rozwoju, otrzymując w efekcie końcowym punkty krytyczne rozwoju oraz pas bezpiecznego rozwoju.

Problematyka *efektywności rozwoju* SEE została zdefiniowana między innymi w następujących pracach [163, 164, 173], przy czym w tym podejściu nie chodzi o określenie kryterium, funkcji lub funkcjonau jakości bezpieczeństwa, czy też kryterium efektywności, funkcji czy funkcjonau rozwoju, gdyż nie mamy do czynienia z zagadnieniem optymalizacji rozwoju. Mamy natomiast do rozwiązania problem oceny rozwoju SEE na potrzeby projektowania przyszłych stanów rozwoju, tak aby było możliwe *zwiększanie efektywności rozwoju oraz podniesienie poziomu bezpieczeństwa rozwoju*.

Należy dodać, że pojęcie jakości bezpieczeństwa systemu jest związane z pojęciem jakości eksploatacji systemu, a pojęcie jakości bezpieczeństwa rozwoju systemu z pojęciem jakości rozwoju SEE. W obu przypadkach możliwe jest wyznaczenie charakterystyk jako granic (punktów krytycznych) bezpiecznego funkcjonowania i odpowiednio rozwoju SEE. Zmiany charakterystyk krytycznych (punktów krytycznych wyznaczonych z zapasem bezpieczeństwa) w funkcji czasu długiego θ mają różny przebieg dla odpowiednich systemów sterowania eksploatacją bądź rozwojem systemu. W celu zapewnienia jakości bezpieczeństwa rozwoju należy tak zmieniać parametry i strukturę systemu, aby nie przekroczyć odpowiednich punktów krytycznych wyznaczonych przez charakterystyki krytyczne. Szerzej tego typu zagadnienia opisane są m.in. w pracach [59, 153].

Modele ekonometryczne do prognozowania rozwoju SEE mogą być z powodzeniem stosowane do prognozowania przyszłych stanów rozwoju SEE w skali kilku, a czasami nawet kilkunastu lat. Jednak z powodu dłuższego horyzontu czasu (czasu długiego θ) modele tego typu, uwzględniając przecież w gruncie rzeczy jedynie zmiany parametryczne, nie są przystosowane do prognozowania zmian strukturalnych [150–152].

Tymczasem systemowa analiza danych liczbowych dotyczących rozwoju SEE, wskazuje na występowanie w procesie rozwoju SEE zauważalnych zmian strukturalnych, zarówno w zakresie zmian własności, jak i w zakresie zmian samej struktury wytwarzania, przesyłu, rozdziału i zużycia mocy oraz energii elektrycznej⁸³. Z tych

⁸³ Zmiany własnościowe nie są ujmowane w niniejszej monografii, ale są one szczególnym przypadkiem rozwoju systemu EE, podczas którego oprócz zmian parametrycznych i strukturalnych występują zmiany systemowe (transformacja systemowa), a więc zmiany w modelu rozwoju. Takim modelem rozwoju w przypadku badania systemów bezludnych może być model wyrażony w postaci sztucznego kodu genetycznego, tzw. kodu informacyjnego. Zagadnienia tego typu szerzej ujęto m.in. w następujących pracach [167, 169, 175, 178, 179, 190].

względów zarówno teoria jak i praktyka rozwoju systemów elektroenergetycznych czeka na nowe rozwiązania, którymi mogą stać się systemy rozwijające się oraz systemy bezładne.

W celu uzyskania modelu SEE jako systemu rozwijającego się (czy na dalszym etapie rozwoju modelu SEE jako systemu bezładnego) należy przeprowadzić identyfikację rozwoju SEE dla wielu (np. kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu) okresów rozwoju, w cyklu krocącym, w celu uzyskania odpowiednich modeli rozwoju, a następnie powtórnie należy przeprowadzić identyfikację, tym razem identyfikację modelu rozwoju w celu uzyskania modelu rozwijającego się, będącego obrazem rozwoju SEE, gdzie danymi do identyfikacji są informacje o kolejnych modelach rozwoju SEE. Na potrzeby takich modeli rozwoju SEE jako systemu rozwijającego się kryteria efektywności i bezpieczeństwa rozwoju zostały także przeformowane na kryteria rozwojowe.

W niniejszej monografii przykłady liczbowe ograniczono do dwóch eksperymentów badawczych⁸⁴, a mianowicie: eksperymentu prowadzącego do uzyskania katalogu modeli w wyniku procesu identyfikacji rozwoju SEE oraz metamodelu rozwoju systemu z wykorzystaniem przykładu danych testowych systemu IEEE RTS 1996⁸⁵ (eksperyment 1) oraz eksperymentu prowadzącego do uzyskania katalogu modeli w wyniku identyfikacji systemu KSE i modelu z zastosowaniem fragmentu danych liczbowych KSE (eksperyment 2).

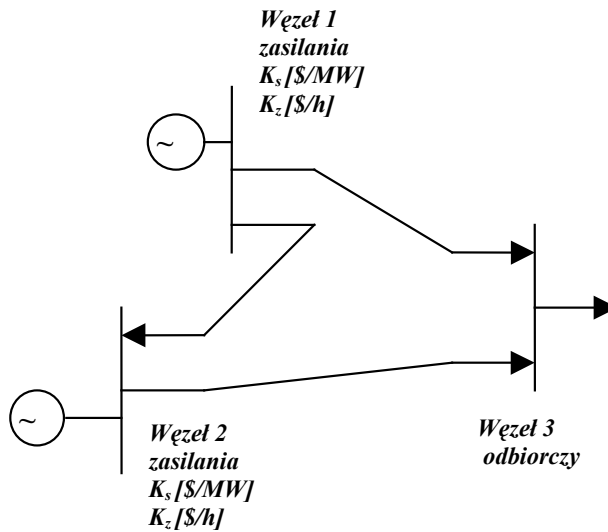
5.1. Eksperyment na podstawie danych testowych IEEE RTS

W eksperymencie 1 przyjęto dane testowe IEEE RTS 1996 [88, 95, 125], zmodyfikowane dla warunków rozwoju SEE (tabele 5.1 oraz 5.2), przy tym przykład modelu dla dwóch generatorów oraz jednego węzła odbioru zamieszczono na rys. 5.1. Za zmienne wejściowe przyjęto 6 zmiennych, a za zmienne wyjściowe 3 zmienne, a mianowicie:

⁸⁴ Autor opublikował wyniki badań z zakresu rozwoju systemu EE, w tym z zakresu wykorzystania teorii sterowania i inżynierii rozwoju. W niniejszej pracy przykłady ograniczono do niezbędnego minimum, aby nie pogłębiać nieczytelności pracy z powodu nowych proponowanych rozwiązań. Nie zamieszczono między innymi wyników badań identyfikacyjnych za pomocą sztucznych sieci neuronowych oraz badań ocenowych za pomocą algorytmów ewolucyjnych oraz badań symulacyjnych, odwołując się do licznych prac prowadzonych osobiście przez Autora monografii lub pod jego kierunkiem [13, 72, 131, 160, 161, 165, 177, 182].

⁸⁵ Dane testowe systemu EE znanego jako system testowy IEEE RTS 1996 zostały opublikowane w następujących pracach [88, 95, 126]. Dane te zostały opracowane z myślą przeprowadzania badań porównawczych w testowaniu nowych metod lub modeli.

- u_1 – łączna istniejąca moc czynna,
- u_2 – prognozowane zapotrzebowanie na przyrost mocy czynnej,
- u_3 – łączna zainstalowana moc czynna,
- u_4 – łączna liczba zainstalowanych generatorów,
- u_5 – łączne istniejące koszty stałe,
- u_6 – jednostkowe istniejące koszty zmienne,
- y_1 – prognozowana moc generatorów,
- y_2 – prognozowane dodatkowe koszty stałe
- y_3 – prognozowane dodatkowe koszty zmienne.



Rys. 5.1. Przykład sytuacji identyfikacyjnej według danych testowych IEEE RTS [95]

Tabela 5.1. Podstawowe dane wyjściowe systemu SEE – rys. 5.1 [95]

Linia przesyłowa	1	2	3
Z węzła (szyny)	1	1	2
Do węzła (szyny)	2	3	3
Długość [mila]	50	30	100
Jednostkowe koszty inwestycji K_1 [\$/mila \times MVA]	70	10	30
Reaktancja X	15	10	5

Tabela 5.2. Podstawowe dane liczbowe dotyczące źródeł i zapotrzebowania na energię elektryczną

Strona generatora $MC = a + b \cdot X$			Strona popytu (szyna 3) $MB = c + d \cdot X$		
	Generator 1	Generator 2		Okres II	Okres I
a	10	15	c	22100	12100
b	100	200	d	100	100
P_{Gi}^{\max} (MW)	80	150	P_{Di}^{\max} (MW)	221	121
P_{Gi}^{\min} (MW)	0	0	P_{Di}^{\min} (MW)	0	0

Tabela 5.3. Podstawowe dane oparte na IEEE RTS dotyczące rozwoju SEE

Lp.	Czas długi	Czas krótki	Łączna moc wykorzystywana (P_{\max})	Prognozowane zapotrzebowanie na nową moc czynną (P)	Łączna istniejąca (zainstalowana) moc czynna (P)	Łączna liczba zainstalowanych generatorów	Łączne istniejące koszty stałe	Jednostkowe istniejące koszty zmienne	Prognozowana moc generatorów	Prognozowane dodatkowe koszty stałe	Prognozowane dodatkowe koszty zmienne
	θ	t	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	y_1	y_2	y_3
	[rok]	[kwartał]	[kW]	[kW]	[kW]	[szt.]	[\$]	[\$/MWh]	[kW]	[\$]	[\$/MWh]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	49,09	0	60	1	20	0,4	40	30	0,45
2	1	2	114,96	16,78	60	1	20	0,4	40	30	0,45

56	14	4	6136,00	14,27	3305	14	198,5	3,33	350	13	0,16

Dane testowe dostosowano do badania modelu rozwoju systemu SEE, opracowując odpowiedni pełny zestaw krocących danych testowych IEEE (tab. 5.3), z uwzględnieniem zarówno czasu długiego θ [lata], jak i czasu krótkiego [dni, godziny]. Przyjęto dwie strony: stronę wytwarzania (generowania) mocy i energii elektrycznej oraz stronę odbioru. W rozważanym przykładzie stronę wytwarzania reprezentują dwa węzły zasilania (dwa generatory), a stronę odbioru (zapotrzebowania, popytu) jeden węzeł odbiorczy. Występują trzy linie przesyłowe, dwie wychodzą z węzła 1, w tym jedna dochodzi do węzła 2, a druga do węzła 3, trzecia wychodzi z węzła 2 i dochodzi do węzła 3.

5.2. Modele rozwoju systemu EE

W *System Identification Toolbox* różnice pomiędzy poszczególnymi modelami parametrycznymi wynikają ze sposobu uwzględnienia wpływu zakłóceń na funkcjonowanie systemu. Jednym z tych modeli wykorzystanym w niniejszej pracy jest model autoregresji z zewnętrznym wymuszeniem arx^{86} [222], określony równaniem:

$$A(q) \cdot y(\theta) = B(q) \cdot u(\theta - nk) + e(\theta), \quad (5.1)$$

który można zapisać w następującej postaci równania różnicowego:

$$\begin{aligned} y(\theta) = & -a_1 \cdot y(\theta - 1) - a_2 \cdot y(\theta - 2) - \dots - a_{na} \cdot y(\theta - na) \\ & + b_0 \cdot u(\theta) + b_1 \cdot u(\theta - 1) + \dots + b_{nb-nk} \cdot u(\theta - nb - nk) + e(\theta) \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$e(\theta) = \varepsilon(\theta) + a_1 \cdot \varepsilon(\theta - 1) + \dots + a_{na} \cdot \varepsilon(\theta - na),$$

gdzie:

- $u(\theta)$ – wejście systemu obserwowane w dyskretniej chwili θ ,
- $y(\theta)$ – wyjście systemu obserwowane w dyskretniej chwili θ ,
- $e(\theta)$ – zastępcze zakłócenie występujące w dyskretniej chwili θ (nieskorelowany sygnał losowy typu „biały szum” o rozkładzie normalnym, z zerową wartością średnią i stałą wariancją),
- ε – zmienna losowa o zerowej wartości średniej i stałej wariancji,
- na – liczba czynników związanych z sygnałem wyjściowym y ,
- nb – liczba czynników związanych z sygnałem wejściowym u ,
- nk – liczba czynników związanych z opóźnieniem sygnału y w stosunku do sygnału u ,

⁸⁶ arx – ang. *AutoRegressive with eXogenous input* – struktura modelu stosowana w modelowaniu obiektów technologicznych, ponieważ w praktyce stosunek szumu do sygnału jest mały. Postać wywołania funkcji jest następująca: $\text{th} = \text{arx}([\mathbf{y} \ \mathbf{u}], [na \ nb \ nk])$, gdzie: y, u – wektory kolumnowe we/wy, $[na \ nb \ nk]$ – współczynniki równania opisującego model, „ na ” określa liczbę biegunów (pierwiastków mianownika), „ $nb - 1$ ” określa liczbę zer (pierwiastków licznika), nk – liczba czynników związanych z opóźnieniem sygnału y w stosunku do sygnału u , th – macierz wyników identyfikacji o formacie THETA. Zawiera ona całą informację o modelu, jego strukturze i estymatorach parametrów wraz z ich oszacowaniem za pomocą kowariancji. Macierz ta ma ściśle zdefiniowany wymiar. Elementy pierwszego wiersza kolejno zawierają: estymatory wariancji parametrów, przedział próbkowania, a następnie wartości parametrów na, nb, nk itp. Drugi wiersz zawiera: wskaźnik FPE, rok, miesiąc, dzień, minutę i kod liczbowy polecenia, według którego wygenerowano konkretny model. W wierszu trzecim występują estymatory parametrów modelu w kolejności alfabetycznej: $a_1, a_2, \dots, b_0, b_1, \dots$ (przy czym pominięte są zera i jedyńki występujące na początku wielomianu). Wiersze od 4 do $3 + n$ zawierają oszacowania macierzy kowariancji [222].

q (lub z) – zamiennie stosowany operator przesunięcia o jedną jednostkę czasu t lub θ ⁸⁷,

$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_naq^{-na}$ – wymierne funkcje operatora opóźnienia q^{-i} wielomianu związanego z $y(\theta)$, w których występują stałe współczynniki reprezentujące parametry modelu,

$B_i(q) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{nb+nk}q^{-(nb+nk)}$ – wymierne funkcje operatora opóźnienia q^{-i} wielomianu związanego z $u(\theta)$, w których występują stałe współczynniki reprezentujące parametry modelu.

Aktualna wartość sygnału wyjściowego zależy od: pewnej liczby na poprzednim sygnale wyjściowym y (autoregresja), pewnej liczby nb kolejnych wartości sygnału wejściowego u , od czasu nk opóźnienia y w stosunku do u oraz od wartości sygnału zakłócającego (oznaczonego przez ε). Strukturę modelu określają zatem w sposób jednoznaczny trzy parametry na , nb , nk .

Model arx jest stabilny, gdy wszystkie jego bieguny leżą wewnątrz koła jednostkowego na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z oraz jest minimalnofazowy, jeżeli warunek ten spełniają również jego zera. Należy przy tym badać także pierwiastki leżące na kole jednostkowym. W pracy wykorzystano metodę parametryczną najmniejszych kwadratów⁸⁸.

W celu znalezienia modelu określającego zależności między sygnałem wyjściowym y oraz wejściowym u , na podstawie N próbek odpowiadającym kolejnym okresom kT_P (T_P – okres próbkowania, $k = 1, 2, \dots, N$), poszukuje się współczynników modelu zapisanego równaniem (5.2), które jest spełnione jedynie w przybliżeniu, gdy sygnał wejściowy, wyjściowy i zakłócenie są ze sobą skorelowane, a estymator θ dla metody najmniejszych kwadratów jest obciążony⁸⁹ [222]. Ze względu na to, że wektor współczynników $[na \ nb \ nk]$ określający rząd licznika i mianownika transmitancji oraz opóźnienie nie jest znany, poszukuje się go według kryterium minimalizacji błędu określanego podczas weryfikacji modelu. W celu stosunkowo szybkiej analizy większej liczby struktur modeli zastosowano postępowanie automatycznie generujące najlepsze wyniki

⁸⁷ Zamiennie stosowano oznaczenie operatora dyskretyzacji q z operatorem z , gdyż oznaczenie q jest stosowane w środowisku MATLAB, a z w teorii sterowania i systemów.

⁸⁸ Metoda identyfikacji parametrycznej, a więc zastosowanie w identyfikacji modelu o strukturze arx prowadzi do uzyskania macierzy \mathbf{th} jako macierzy wyników identyfikacji, którą można przekształcić dalej na postać transmitancyjną, skąd następnie można uzyskać zera jako pierwiastki licznika oraz bieguny jako pierwiastki mianownika na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z lub s .

⁸⁹ Ze względu na to, iż wartość oczekiwana estymatora różni się od wartości rzeczywistej powtarza się identyfikację wielokrotnie i obliczając średnią uzyskanych wyników otrzymuje się wartość przesuniętą w stosunku do wartości rzeczywistej parametrów. W praktyce określa się estymator jako nieobciążony, gdy stosunek szumu do sygnału jest mniejszy niż 10%. Wykorzystuje się np. funkcję arx, która realizuje identyfikację modelu metodą najmniejszych kwadratów (MNK). Jest to funkcja należąca do biblioteki SIT pakietu MATLAB [14, 64, 124, 221].

weryfikacji poszukiwane wśród wszystkich możliwych struktur o parametrach $[na, nb, nk]$ z zakresu dostępnego w SIT $\langle 1, 10 \rangle$. Spośród wszystkich struktur systemu dobierano automatycznie parametry $[na, nb, nk]$ w taki sposób, aby otrzymany model arx jak najlepiej przybliżał oczekiwany sygnał wyjściowy modelu w stosunku do sygnału rzeczywistego wyjścia⁹⁰.

W procesie identyfikacji przeprowadzono identyfikację parametryczną oraz wykorzystano model arx (dla warunków dyskretnych) postaci:

$$A(K, q) \cdot y(K, \theta) = B(K, q) \cdot u(K, \theta) + e(K, \theta), \quad (5.3)$$

otrzymując modele rozwoju testowego systemu EE, dla całego zakresu danych liczbowych u_i oraz dla wyjścia y_1 (prognozowana moc generatorów) utworzonych na bazie danych liczbowych systemu testowego IEEE RTS (tabela 5.3), otrzymując kolejno⁹¹:

1. Model parametryczny liniowy dyskretny systemu EE IEEE RTS za pomocą metody arx (model arx441):

```

Discrete-time IDPOLY model: A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)

A(q) = 1 - 0.898 (+-0.2477) q^-1 - 0.08609 (+-0.3182) q^-2 + 0.1328 (+-0.3173) q^-3 + 1.001 (+-0.3552) q^-4
B1(q) = -2.753e-005 (+-0.0001392) q^-1 + 0.0001319 (+-0.0001485) q^-2 + 1.088e-005 (+-0.0001511) q^-3 -
0.0001001 (+-0.0001571) q^-4
B2(q) = 0.000523 (+-0.002655) q^-1 + 0.001142 (+-0.002671) q^-2 - 0.0001839 (+-0.002692) q^-3 - 0.001024 (+-
0.003427) q^-4
B3(q) = 0.7106 (+-0.3746) q^-1 + 0.1022 (+-0.4221) q^-2 - 0.1868 (+-0.4122) q^-3 - 1.082 (+-0.421) q^-4
B4(q) = -207.9 (+-142.1) q^-1 - 32.28 (+-159.9) q^-2 + 50.44 (+-157.4) q^-3 + 380.5 (+-164.3) q^-4
B5(q) = -0.1237 (+-0.1104) q^-1 + 0.01909 (+-0.1062) q^-2 - 0.01962 (+-0.1079) q^-3 - 0.03311 (+-0.09203) q^-4
B6(q) = 1.602 (+-2.084) q^-1 + 0.455 (+-2.199) q^-2 - 0.3741 (+-2.231) q^-3 - 2.198 (+-2.262) q^-4

Estimated using ARX from data set mydata4
Loss function 2514.29 and FPE 7542.88
Sampling interval: 1
  
```

Rys. 5.2. Przykład otrzymania modelu liniowego dyskretnego arx441 systemu EE na bazie danych testowych IEEE RTS w środowisku MATLAB.
Oznaczenia w tekście. Źródło: Opracowanie własne

⁹⁰ Chodzi o wygenerowanie wszystkich możliwych kombinacji wartości poszczególnych parametrów $[na, nb, nk]$, np. z przedziału od 1 do 10 i następnie wyznaczenie różnic między otrzymanymi charakterystykami określonymi przez wektor $[na, nb, nk]$ oraz charakterystykami rzeczywistymi, a następnie przyjęcie tych wartości parametrów, dla których różnice są najmniejsze.

⁹¹ Funkcja `th2ss()` umożliwia zamianę modelu arx na model w przestrzeni stanów w postaci ciągłej lub dyskretny, w rozważanym przypadku dokonano przejścia końcowego z dyskretnego modelu liniowego SEE na model ciągły, korzystając z funkcji `d2c()`, która ma postać: `sysc = d2c(sysd, „metoda”)`. Parametr `metoda` służy do wyboru metody dyskretyzacji (parametr opcjonalny) spośród metod: „ZOH”, „TUSTIN”, „PREWARP”, „MATCHED”, przy czym domyślną metodą dyskretyzacji jest metoda „ZOH”. Istnieją przy tym ograniczenia funkcji `d2c`, takie jak np.: brak działania funkcji, dla metody dyskretyzacji „ZOH” w przypadku gdy model dyskretny ma bieguny zerowe oraz dla ujemnych biegunów rzeczywistych w dziedzinie zmiennej z są one przypisywane do par biegunów zespolonych w dziedzinie zmiennej s , co powoduje powstanie modeli ciągłych o większej dynamice.

2. Model parametryczny liniowy ciągły systemu EE IEEE RTS (th441) w wyniku przekształcenia modelu dyskretnego arx441 w środowisku MATLAB za pomocą funkcji d2c:

```
>> th441=d2c(arx441)
Continuous-time IDPOLY model: A(s)y(t) = B(s)u(t) + C(s)e(t)
A(s) = s^4 - 0.001032 s^3 + 5.481 s^2 - 1.679 s + 1.851
B1(s) = 1.347e-005 s^3 - 0.000214 s^2 + 0.0002739 s + 2.438e-005
B2(s) = 0.0005692 s^3 - 0.001016 s^2 + 0.004878 s + 0.000735
B3(s) = 1.039 s^3 - 0.7115 s^2 + 4.731 s - 0.7347
B4(s) = -333.8 s^3 + 277.9 s^2 - 1494 s + 274.8
B5(s) = -0.06185 s^3 - 0.2155 s^2 - 0.1954 s - 0.2533

B6(s) = 2.126 s^3 - 1.267 s^2 + 10.18 s - 0.829
C(s) = s^4 + 1.115 s^3 + 5.137 s^2 + 3.26 s + 1.61
Estimated using ARX from data set mydatad
Loss function 2514.29 and FPE 7542.88
```

Rys. 5.3. Przykład otrzymania modelu liniowego ciągłego th441 systemu EE na bazie danych testowych IEEE RTS w środowisku Matlab i Simulink. Oznaczenia w tekście.
Źródło: Opracowanie własne

3. Model liniowy ciągły zmiennych stanu systemu EE IEEE RTS (ss) z wykorzystaniem w środowisku MATLAB funkcji th2ss:

```
>> [A B C D K X0]=th2ss(th441)
A =
    0.0010    1.0000     0     0
   -5.4805     0    1.0000     0
    1.6788     0     0    1.0000
   -1.8509     0     0     0
B =
  1.0e+003 *
    0.0000    0.0000    0.0010   -0.3338   -0.0001    0.0021
   -0.0000   -0.0000   -0.0007    0.2779   -0.0002   -0.0013
    0.0000    0.0000    0.0047   -1.4938   -0.0002    0.0102
    0.0000    0.0000   -0.0007    0.2748   -0.0003   -0.0008
C = 1  0  0  0
D = 0  0  0  0  0  0
K =
    1.1157
   -0.3436
    4.9390
   -0.2412
X0 =
    0
    0
    0
    0
```

Rys. 5.4. Przykład otrzymania modelu ciągłego (ss) systemu EE na bazie zmiennych testowych IEEE RTS w przestrzeni zmiennych stanów. Oznaczenia w tekście.
Źródło: Opracowanie własne w środowisku MATLAB

Model systemu EE IEEE RTS w przestrzeni stanów można więc opisać następującymi równaniami stanu i wyjścia:

$$\begin{bmatrix} \dot{k}_1 \\ \dot{k}_2 \\ \dot{k}_3 \\ \dot{k}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,001 & 1 & 0 & 0 \\ -5,4805 & 0 & 1 & 0 \\ 1,6788 & 0 & 0 & 1 \\ -1,8509 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

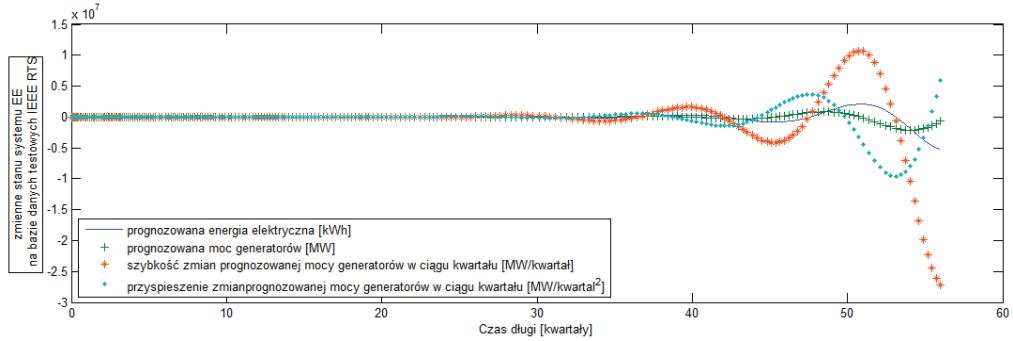
$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1,0 & -333,8 & -0,1 & 2,1 \\ 0 & 0 & -0,7 & 277,9 & -0,2 & -1,3 \\ 0 & 0 & 4,7 & -1493,8 & -0,2 & 10,2 \\ 0 & 0 & -0,7 & 274,8 & -0,3 & -0,8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,1157 \\ -0,3436 \\ 4,9390 \\ -0,2412 \end{bmatrix},$$

$$y_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

gdzie:

- k_1 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako prognozowana energia elektryczna [kWh], co wynika z pierwszego równania wyjścia po założeniu, że element c_{11} macierzy C wynosi 1 [1/h],
- k_2 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako prognozowana moc generatorów [MW], co wynika z pierwszego równania stanu,
- k_3 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako szybkość zmian prognozowanej mocy generatorów w ciągu kwartału [MW/kwartał], co wynika z drugiego równania stanu,
- k_4 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako przyspieszenie zmian prognozowanej mocy generatorów w ciągu kwartału [MW/kwartał²], co wynika z trzeciego równania stanu,
- s_1 – łączna istniejąca moc czynna [MW],
- s_2 – prognozowane zapotrzebowanie na przyrost mocy czynnej [MW],
- s_3 – łączna zainstalowana moc czynna [MW],
- s_4 – łączna liczba zainstalowanych generatorów,
- s_5 – łączne istniejące koszty stałe [\$],
- s_6 – jednostkowe istniejące koszty zmienne [\$/kWh],
- y_1 – prognozowana moc generatorów [MW],
- y_2 – prognozowane dodatkowe koszty stałe [\$],
- y_3 – prognozowane dodatkowe koszty zmienne [\$/kWh].

Rozwiązanie w czasie równań zmiennych stanu⁹² x_1 , x_2 , x_3 i x_4 w środowisku MATLAB⁹³ (rys. 5.4) zamieszczono na rys. 5.5.



Rys. 5.5. Przebiegi zmiennych stanu modelu ciągłego (ss) systemu EE opisanego równaniami zmiennych stanu jak na rys. 5.4. Oznaczenia: oś y : x_1 – zmienna stanu zinterpretowana jako prognozowana energia elektryczna [kWh], x_2 – zmienna stanu zinterpretowana jako prognozowana moc generatorów [MW], x_3 – zmienna stanu zinterpretowana jako szybkość zmian prognozowanej mocy generatorów w ciągu kwartału [MW/kwartał], x_4 – zmienna stanu zinterpretowana jako przyspieszenie zmian prognozowanej mocy generatorów w ciągu kwartału [MW/kwartał²], oś x – czas długi (θ) [kwartał].

Opracowanie własne w Matlab

Następnie przeprowadzono identyfikację kroczącą z postępowaniem jednego okresu pomiarowego dla 20 par wektorów wejściowo-wyjściowych wykorzystanych w identyfikacji uzyskując 28 modeli, jak na przykład model rozwoju typu arx365 uzyskany dla wszystkich zmiennych wejściowych i wyjścia y_1 (moc generatorów, dokładność modelu 90,75%), w którym $na = 3$, $nb = 6$, $nk = 5$, tj.:

⁹² Rozwiązywanie w czasie układu równań zmiennych stanu realizują w Matlab funkcje *ode* (ang.: *ordinary differential equations*). W zależności od zastosowanego algorytmu numerycznego rozróżnia się funkcje: *ode45* i *ode23* (metody Runge–Kutty), *ode113* (metoda Adamsa), *ode15s* (metoda Geara) itd. Sposób wywołania każdej funkcji *ode*: $[t, y] = \text{funkcja_ode}(\text{plik_ode}, \text{przedział czasu}, \text{warunek początkowy})$, gdzie: *plik_ode* – nazwa *m*-pliku z definicją wybranego układu równań różniczkowych, przedział czasu – wektor określający czas początkowy i końcowy [*t_o* *t_k*], warunek początkowy – wektor określający warunki początkowe funkcji i jej ($n - 1$) pochodnych.

⁹³ `function xprim1=see1(tsee,xsee)`

`u=[sin(tsee);sin(tsee);sin(tsee);sin(tsee);sin(tsee);sin(tsee);];`

`A=[0.001 1 0 0; -5.4805 0 1 0; 1.6788 0 0 1; -1.8509 0 0 0];`

`B=[0 0 1 -333.8 -0.1 2.1; 0 0 -0.7 277.9 -0.2 -1.3; 0 0 4.7 -1493.8 -0.2 10.2; 0 0 -0.7 274.8 -0.3 -0.8];`

`K=[1.1157; -0.3436; 4.939; -0.2412];`

`xprim1=A*xsee+B*u+K;`

`end`

`Xsee0=[0;0;0;0];tsee0=0; tksee=56;[tsee,xsee]=ode45('see1',[tsee0,tksee],Xsee0`

$$A1(q) = 1 - 0,2684 \cdot q^{-1} + 0,0681 \cdot q^{-2} - 0,09727 \cdot q^{-3}$$

$$B1(q) = -1,242 \cdot q^{-5} + 2,121 \cdot q^{-6} - 1,419 \cdot q^{-7} + 0,3434 \cdot q^{-8} \\ + 0,4248 \cdot q^{-9} + 1,003 \cdot q^{-10},$$

$$B2(q) = -0,3073 \cdot q^{-5} + 0,1444 \cdot q^{-6} + 0,4468 \cdot q^{-7} \\ - 1,203 \cdot q^{-8} - 0,9924 \cdot q^{-9} - 0,9051 \cdot q^{-10},$$

$$B3(q) = 0,3591 \cdot q^{-5} + 0,08519 \cdot q^{-6} + 0,235 \cdot q^{-7} \\ - 0,7524 \cdot q^{-8} + 0,6681 \cdot q^{-9} - 0,4691 \cdot q^{-10}, \quad (5.6)$$

$$B4(q) = -150,8 \cdot q^{-5} + 303,3 \cdot q^{-6} + 23,82 \cdot q^{-7} - 5,247 \cdot q^{-8} - 400,8 \cdot q^{-9} + 53,38 \cdot q^{-10},$$

$$B5(q) = 7,883 \cdot q^{-5} - 2,957 \cdot q^{-6} - 3,208 \cdot q^{-7} - 7,613 \cdot q^{-8} + 5,98 \cdot q^{-9} - 5,041 \cdot q^{-10},$$

$$B6(q) = 456,4 \cdot q^{-5} - 167,6 \cdot q^{-6} + 112,6 \cdot q^{-7} - 55,74 \cdot q^{-8} + 105,9 \cdot q^{-9} - 77,5 \cdot q^{-10},$$

a więc model postaci dyskretnej:

$$(1 - 0,2684 \cdot q^{-1} + 0,0681 \cdot q^{-2} - 0,09727 \cdot q^{-3}) \cdot y(K, \theta) = \\ (-1,2684 \cdot q^{-5} + 2,121 \cdot q^{-6} - 1,419 \cdot q^{-7} + 0,3434 \cdot q^{-8} + 0,4248 \cdot q^{-9} + 1,003 \cdot q^{-10}) \\ \cdot u_1(K, \theta) - (0,3073 \cdot q^{-5} + 0,1444 \cdot q^{-6} - 1,419 \cdot q^{-7} - 1,203 \cdot q^{-8} - 0,9924 \cdot q^{-9} + 0,9051 \cdot q^{-10}) \\ \cdot u_2(K, \theta) + \dots + (456,4 \cdot q^{-5} - 167,6 \cdot q^{-6} + 112,6 \cdot q^{-7} - 55,74 \cdot q^{-8} + 105,9 \cdot q^{-9} - 77,5 \cdot q^{-10}) \\ \cdot u_6(K, \theta) + e(K, \theta), \quad (5.7)$$

gdzie po zamianie operatora przesunięcia czasu q^{-i} na czas θ otrzymuje się ostatecznie:

$$y_1(K, \theta) = 0,2684 \cdot y_1(K, \theta - 1) + 0,0681 \cdot y_1(K, \theta - 2) - 0,09727 \cdot y_1(K, \theta - 3) \\ - 1,2684 \cdot u_1(K, \theta - 5) + 2,121 \cdot u_1(K, \theta - 6) - 1,419 \cdot u_1(K, \theta - 7) \\ + 0,3434 \cdot u_1(K, \theta - 8) + 0,4248 \cdot u_1(K, \theta - 9) + 1,003 \cdot u_1(K, \theta - 10) \\ - 0,3073 \cdot u_2(K, \theta - 5) + 0,1444 \cdot u_2(K, \theta - 6) - 1,419 \cdot u_2(K, \theta - 7) \\ - 1,203 \cdot u_2(K, \theta - 8) - 0,9924 \cdot u_2(K, \theta - 9) + 1,003 \cdot u_2(K, \theta - 10) \\ \dots + 456,4 \cdot u_6(K, \theta - 5) - 167,6 \cdot u_6(K, \theta - 6) + 112,6 \cdot u_6(K, \theta - 7) \\ - 55,74 \cdot u_6(K, \theta - 8) + 105,9 \cdot u_6(K, \theta - 9) - 77,5 \cdot u_6(K, \theta - 10) + e(K, \theta). \quad (5.8)$$

W rezultacie, dokonując przekształcenia z wykorzystaniem SIT oraz CST (funkcje: d2c() oraz th2ss()), otrzymano ostatecznie model w przestrzeni stanów (ss) w postaci

ciągłej, na przykład dla wyjścia y_1 (prognozowana moc generatorów) w postaci następujących równań stanu:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= 0,2684 \cdot x_1 + x_2 - 1,2419 \cdot x_{10} - 0,3073 \cdot x_{14} + 0,3591 \cdot x_{18} \\
 &\quad - 150,8208 \cdot x_{22} + 7,8831 \cdot x_{26} + 456,378 \cdot x_{30} \\
 \dot{x}_2 &= -0,0681 \cdot x_1 + x_3 + 2,1213 \cdot x_{10} + 0,1444 \cdot x_{14} \\
 &\quad + 0,0852 \cdot x_{18} + 303,3459 \cdot x_{22} - 2,9569 \cdot x_{26} - 167,5974 \cdot x_{30} \\
 \dot{x}_3 &= -0,0973 \cdot x_1 + x_4 - 1,4185 \cdot x_{10} + 0,4468 \cdot x_{14} - 0,2350 \cdot x_{18} \\
 &\quad + 23,8203 \cdot x_{22} - 3,2077 \cdot x_{26} + 112,6062 \cdot x_{30} \\
 \dot{x}_4 &= x_5 + 0,3434 \cdot x_{10} - 1,2033 \cdot x_{14} - 0,7524 \cdot x_{18} \\
 &\quad - 5,2468 \cdot x_{22} - 7,6125 \cdot x_{26} - 55,7384 \cdot x_{30} \\
 \dot{x}_5 &= x_6 - 0,2448 \cdot x_{10} - 0,9924 \cdot x_{14} + 0,6681 \cdot x_{18} \\
 &\quad - 400,7828 \cdot x_{22} + 5,9795 \cdot x_{26} + 105,8891 \cdot x_{30} \\
 \dot{x}_6 &= 1,0035 \cdot x_{10} - 0,9051 \cdot x_{14} - 0,4691 \cdot x_{18} \\
 &\quad + 53,3839 \cdot x_{22} - 5,0409 \cdot x_{26} - 77,5027 \cdot x_{30}
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

$$\dot{x}_7 = u_1, \quad \dot{x}_8 = x_7, \quad \dot{x}_9 = x_8, \quad \dot{x}_{10} = x_9, \quad \dot{x}_{11} = u_2, \quad \dot{x}_{12} = x_{11}, \quad \dot{x}_{13} = x_{12},$$

$$\dot{x}_{14} = x_{13}, \quad \dot{x}_{15} = u_3, \quad \dot{x}_{16} = x_{15}, \quad \dot{x}_{17} = x_{16}, \quad \dot{x}_{18} = x_{17}, \quad \dot{x}_{19} = u_4,$$

$$\dot{x}_{20} = x_{19}, \quad \dot{x}_{21} = x_{20}, \quad \dot{x}_{22} = x_{21}, \quad \dot{x}_{23} = u_5, \quad \dot{x}_{24} = x_{23}, \quad \dot{x}_{25} = x_{24},$$

$$\dot{x}_{26} = x_{25}, \quad \dot{x}_{27} = u_6, \quad \dot{x}_{28} = x_{27}, \quad \dot{x}_{29} = x_{28}, \quad \dot{x}_{30} = x_{29},$$

oraz równanie wyjściowe:

$$y_1 = x_1, \tag{5.10}$$

gdzie:

- x_1 – zmienna stanu wyrażająca prognozowaną moc generatorów w elektrowniach (ogółem) [MW], możliwa do interpretacji z równania wyjścia (5.10), po założeniu, że element macierzy jednowymiarowej C wynoszący c_{11} jest bezwymiarowy,
- x_2 – zmienna stanu wyrażająca $dx_1/d\theta$, możliwa do interpretacji na podstawie pierwszego równania stanu (5.9-1) jako szybkość zmian prognozowanej mocy generatorów w ciągu roku [kW/rok],

x_3 – zmienna stanu wyznaczana przez $dx_2/d\theta$, możliwa do interpretacji na podstawie drugiego równania stanu (5.9-2) jako przyspieszenie zmian prognozowanej mocy w ciągu roku [kW/rok^2] (i dalej podobnie zmienne stanu x_4, x_5, x_6),

oraz

x_7 – zmienna stanu wyrażająca łączną energię wykorzystaną [kWh], możliwa do interpretacji na podstawie trzeciego równania stanu (5.9-7), i podobnie zmienne stanu x_8 – x_{30} .

Otrzymane modele można wykorzystać w procesie projektowania rozwoju SEE dla rozwijającej się sytuacji systemowej modelu IEEE RTS 1996, po założeniu utrzymania, a nawet poprawy warunków efektywności dochodowej i efektywności nakładowej wyrażonej formułami (2.18) i (2.19) oraz (5.4).

Z analizy równań stanu (5.9) wynika, że trzy pierwsze zmienne stanu odgrywają decydującą rolę w modelu, gdyż pozostałe bazują jedynie na nich, czyniąc go modelem wyższego rzędu lub są prostą interpretacją zmiennych wejściowych, stąd równania stanu można uprościć do postaci:

$$\dot{x}_1 = 0,2684 \cdot x_1 + x_2,$$

$$\dot{x}_2 = -0,0681 \cdot x_1 + x_3,$$

$$\dot{x}_3 = -0,0973 \cdot x_1,$$

$$\dot{x}_7 = u_1,$$

$$\dot{x}_{11} = u_2, \tag{5.11}$$

$$\dot{x}_{15} = u_3,$$

$$\dot{x}_{19} = u_4,$$

$$\dot{x}_{23} = u_5,$$

$$\dot{x}_{27} = u_6,$$

a zatem ostatecznie o rozwoju systemu EE na bazie danych testowych IEEE RTS decyduje 9 następujących zmiennych stanu:

- x_1 – prognozowana moc generatorów w elektrowniach (ogółem) [MW],
- x_2 – szybkość zmian prognozowanej mocy generatorów w ciągu roku [kW/rok],
- x_3 – przyspieszenie zmian prognozowanej mocy w ciągu roku [kW/rok^2],
- x_7 – łączna wykorzystana energia elektryczna [kWh],
- x_{11} – prognozowane zapotrzebowanie na energię elektryczną [kWh],

- x_{15} – łączna możliwa do produkcji energia elektryczna w wyniku istniejącej zainstalowanej mocy czynnej [kWh],
 x_{19} – łączna roczna liczba zainstalowanych generatorów [szt. rok],
 x_{23} – łączne istniejące koszty stałe [\$ rok],
 x_{27} – jednostkowe istniejące koszty zmienne[\$ rok/kWh].

Z równań stanu wynika, że o wewnętrznej organizacji systemu EE decydują 3 elementy macierzy **A**: a_{11} , a_{21} , a_{31} oraz o poziomie sterowania 6 elementów macierzy **B**: b_{41} , b_{52} , b_{63} , b_{64} , b_{65} oraz b_{66} .

Przyjmując dalej dane testowe IEEE RTS 1996, zmodyfikowane dla warunków rozwoju SEE jak zamieszczone w pracy [126] oraz krok zmian $\Delta\theta = 1$, a następnie przeprowadzając identyfikację dla kolejnych okresów rozwoju uzyskano 28 modeli systemu EE w postaci macierzy wyników identyfikacji **th** oraz 28 odpowiadającym im modeli w przestrzeni stanów ss (tabela 5.4).

Tabela 5.4. Przykłady danych do identyfikacji modelu rozwoju SEE (IEEE RTS 1996)

θ	Model	B1(q)	B2(q)	A1(q)
1	arx414	$0,004574 q^{-4}$	$-0,567 q^{-4}$	$1 - 0,4204q^{-1} - 0,0008252q^{-2} + 0,002647q^{-3} + 1,163q^4$
2	arx414	$0,004574 q^{-4}$	$-0,567 q^{-4}$	$1 - 0,4204q^{-1} - 0,0008252q^{-2} + 0,002647q^{-3} + 1,163q^4$
...
28	arx311	$-0,07288 q^{-1}$	$-0,02269 q^{-1}$	$1 - 0,2558 q^{-1} - 0,006983 q^{-2} - 0,1034 q^{-3}$

Następnie pobrano z modeli **th** parametry a_i jako wejścia oraz parametry b_i jako wyjścia oraz przeprowadzono identyfikację modelu rozwoju systemu EE uzyskując metamodel rozwoju, który dla modelu systemu EE typu MISO ustalonego dla wyjścia y_1 oraz dla wielomianu B2(q) (związanego ze zmienną u_2) przyjętego jak wyjście modelu $y_1^m = b_2$ (tabela 5.5) oraz 4 wejść ($u_1^m = a_1$, $u_2^m = a_2$, $u_3^m = a_3$, $u_4^m = a_4$) wynikających z wielomianu A1(q) (związanego z wyjściem y_1) ma następującą postać w przestrzeni stanów:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 + 1,2 \cdot u_1^m + u_3^m - u_4^m, \\
 \dot{x}_2 &= x_3 + 3 \cdot u_1^m + 2 \cdot u_2^m + 2 \cdot u_3^m + 7 \cdot u_4^m, \\
 \dot{x}_3 &= x_4 - 3 \cdot u_1^m - 2 \cdot u_2^m - 2 \cdot u_3^m + u_4^m, \\
 \dot{x}_4 &= -0,586 \cdot x_1 + 2 \cdot u_1^m + 3 \cdot u_2^m + 3 \cdot u_3^m + 8,6434 \cdot u_4^m, \\
 y_1^m &= x_1.
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

W ten sposób uzyskano metamodel rozwoju systemu EE na bazie testowych modeli IEEE RTS systemu EE, który zawiera informację zarówno o zmianach parametrycznych, jak i o zmianach strukturalnych modelu rozwoju systemu EE.

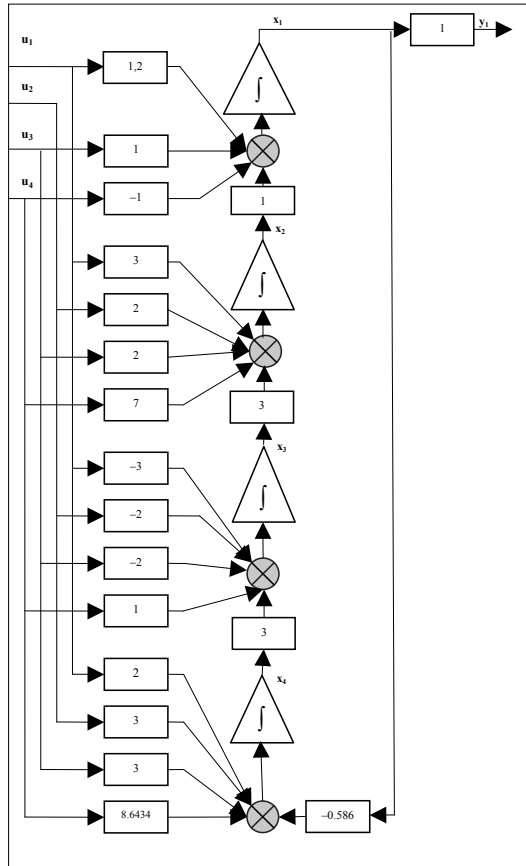
Interpretacja uzyskanych czterech zmiennych stanu: x_1, x_2, x_3, x_4 , dla ciągłego modelu liniowego w przestrzeni stanów wynika z równań stanu oraz z równania wyjścia, i tak kolejno:

- x_1 – zmienna stanu możliwa do interpretacji na podstawie równania wyjścia (5.12), po założeniu, że element c_{11} jest bezwymiarowy, wyznaczona przez współczynnik b_2 (występujący przy q^{-2}) określający stopień wpływu zmiennej wejściowej u_2 na wyjście y_1 , tj. prognozowaną mocą generatorów,
- x_2 – zmienna stanu, wyrażona pochodną zmiennej stanu x_1 (równanie 5.12-1), a więc zmienną stanu określającą szybkość zmian stopnia wpływu zmiennej u_2 na wyjście $y_1(K, \theta)$, tj. na prognozowaną mocą generatorów, a więc wyrażająca specyficzną szybkość zmian współczynnika b_2 w okresie rocznym,
- x_3 – zmienna stanu, wyrażona drugą pochodną zmiennej stanu x_1 (równanie 5.12-2), a więc zmienną stanu określającą przyspieszenie zmian stopnia wpływu zmiennej stanu u_2 na wyjście $y_1(K, \theta)$, tj. na prognozowaną mocą generatorów, a więc wyrażającą specyficzne przyspieszenie zmian elementu b_2 w okresie rocznym,
- x_4 – zmienna stanu wyrażona przez całkę ze zmiennej stanu x_1 określającej stopień wpływu zmiennej wejściowej u_2 (prognozowane zapotrzebowanie na nową moc czynną) na zmienną wyjściową $y_1(K, \theta)$, tj. prognozowaną mocą generatorów, a więc wyrażająca specyficzną średnioroczną wartość elementu b_2 ze względu na zmiany elementu a_1 .

Tabela 5.5. Wielomiany $B_i(q)$ związane z kolejnymi wejściami modelu system EE

θ		B1(q)	B2(q)	B3(q)	B4(q)	B5(q)	B6(q)
1	arx414	$0,004574 q^{-4}$	$-0,567 q^{-4}$	$-1,439 q^{-4}$	$741,3 q^{-4}$	$-0,4751 q^{-4}$	$-1011 q^{-4}$
2	arx414	$0,004574 q^{-4}$	$-0,567 q^{-4}$	$-1,439 q^{-4}$	$741,3 q^{-4}$	$-0,4751 q^{-4}$	$-1011 q^{-4}$
...
28	arx311	$-0,07288 q^{-1}$	$-0,02269 q^{-1}$	$-0,1854 q^{-1}$	$21,38 q^{-1}$	$4,414 q^{-1}$	$91,47 q^{-1}$

W podobny sposób uzyskuje się modele dla pozostałych wyjść modelu rozwoju, a więc dla pozostałych elementów członu $A(q)$, tj. w rozważanym przykładzie a_2, a_3 i a_4 .



Rys. 5.6. Schemat blokowy zmiennych stanu metamodelu rozwoju systemu SEE opartego na danych testowych IEEE RTS 1996

5.3. Ocena rozwoju systemu EE

Określając dalej efektywność rozwoju systemu EE, uzyskuje się przebieg efektywności, jak np. przedstawiony na rys. 5.7 (efektywność operacyjna), to jest efektywność wyznaczoną za pomocą formuły⁹⁴:

⁹⁴ Tylko w uproszczonym przypadku można przyjąć wyznaczenie efektywności jako wyniku dzielenia wielkości prognozowanej mocy generatorów przez wielkość przyrostu prognozowanego zapotrzebowania na przyrost mocy czynnej, gdyż zarówno $A(q)$, jak i $B2(q)$ są wielomianami, w obliczeniach należy wziąć pod uwagę wszystkie współczynniki wielomianu $A(q)$ oraz $B2(q)$.

$$A_D(K, \theta) = \frac{y_1(K, \theta)}{u_2(K, \theta)} = \frac{B2(K, q)}{A(K, q)}, \quad (5.13)$$

gdzie:

- $y_1(K, \theta)$ – prognozowana moc czynna generatorów [kW],
- $u_2(K, \theta)$ – prognozowane zapotrzebowanie na przyrost mocy czynnej (P) [kW],
- $A(K, q)$ – wielomian związany ze zmienną wyjściową $y_1(K, \theta)$ (prognozowanej mocy generatorów) określający stopień wpływu sytuacji z poprzednich lat na wartość bieżącą efektywności,
- $B2(K, q)$ – wielomian związany ze zmienną wejściową $u_2(\theta)$ wyrażającą prognozowane zapotrzebowanie na przyrost nowej mocy czynnej (P) [kW] określający stopień wpływu sytuacji z poprzednich lat na wartość bieżącą efektywności,

a zatem dalej:

$$A_D(K, \theta) = A_D(K, q-1) + A_D(K, q-2) + A_D(K, q-3) + A_D(K, q-4) + A_D(K, q-5) + A_D(K, q-6) \quad (5.14)$$

gdzie np.:

$$A_D(K, q-1) = \frac{y_1(K, q-1)}{u_2(K, q-1)} = \frac{B2(K, q-1)}{A(K, q-1)}, \quad (5.15)$$

przy czym:

- q – operator przesunięcia czasowego, który działa następująco: $y(\theta)q^{-1} = y(\theta-1)$,
- $A_D(K, q-1)$ – efektywność operacyjna SEE (o strukturze i parametrach wyrażonych przez K uzależnionych od chwili $\theta-1$).

Należy wyjaśnić, że podczas wyznaczania wartości współczynnika efektywności operacyjnej można dokonać wprost dzielenia wartości wyjściowych, np. $y_1(K, \theta)$ przez wejściowe, np. $u_2(K, \theta)$, niemniej wówczas nie uzyskuje się informacji pełnej, wyrażonej modelem rozwoju o formule (5.8).

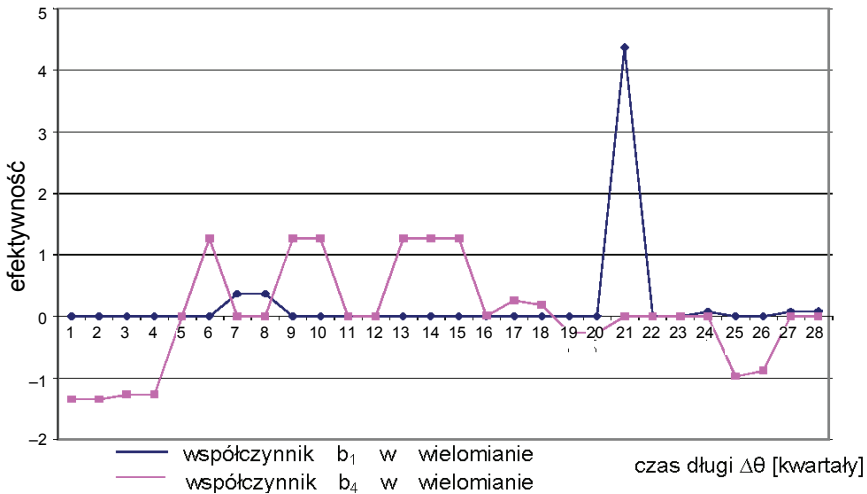
W wyniku identyfikacji rozwoju dla sześciu wejść (tab. 5.3) otrzymano model rozwoju, w którym wielomian $A(K, q)$ ⁹⁵ zawierał człony od $A(K, q-1)$ do $A(K, q-6)$, był wielomianem postaci $A(K, q) = 1 + a_1q^1 + a_2q^{-2} + a_3q^{-3} + a_4q^{-4} + a_5q^{-5} + a_6q^{-6}$ oraz wystąpiły wielomiany związane z kolejnymi wejściami, których było sześć, czyli

⁹⁵ W przypadku potrzeby podkreślenia, że występują zmiany parametryczne i strukturalne systemu EE wielomian $A(q)$ można zapisać jako $A(K, q)$ i podobnie wielomiany $B_i(q)$ jako $B_i(K, q)$.

wielomiany: $B1(K, q)$, $B2(K, q)$, $B3(K, q)$, $B4(K, q)$, $B5(K, q)$ oraz $B6(K, q)$, o odpowiednich członach $B_i(K, q - nb)$.

Wszystkie wejścia generują odpowiednie składowe wyjścia y_1 , stąd $y_1 = y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{14} + y_{15} + y_{16}$, a zatem ostatecznie np. efektywność operacyjna A_D jest wyznaczana w sposób następujący: $A_D = A_{D11} + A_{D12} + A_{D13} + A_{D14} + A_{D15} + A_{D16}$, przy czym każda z tych składowych ze względu na wielomian $A(K, q)$ o sześciu członach umożliwia wyznaczenie efektywności operacyjnej według wzoru (5.12).

Wzór (5.13) dotyczy efektywności operacyjnej wynikającej ze składowej $y_1(K, q - 1)$ generowanej przez wejście $u_2(K, q - 1)$, a więc wyznaczonej dla okresu poprzedniego, czyli dla $q^1 y_1(K, \theta) = y_1(\theta - 1)$.



Rys. 5.7. Efektywność operacyjna SEE dla danych testowych IEEE RTS dla wyjścia y_1 (prognozowana moc generatorów) oraz dla wejść związanych ze zmienną u_2 , a więc wejścia wynikającego ze współczynników b_1 oraz b_4 występujących w wielomianie $B2(q)$

Z analizy zmian składowych efektywności operacyjnej, tj. efektywności wykorzystania prognozowanego zapotrzebowania na moc czynną turbogeneratorów w prognozowaniu mocy czynnej generatorów wynika, że na przestrzeni 56 okresów pomiarowych ulegała zmianom w modelach rozwoju od wartości wynoszącej $-1,3$ w okresie obowiązywania modeli wyznaczonych dla trzech pierwszych modeli aż do wartości $4,3$ w okresie obowiązywania modelu wyznaczonego dla 21 okresu i osiągnęła wartości ujemne dla modeli w okresie od pierwszego modelu aż do modelu 18, a następnie była dodatnia aż do okresu obowiązywania modelu z okresu 24. Następnie od modeli z okresu 25 i 26 była ujemna, a dla modelu z okresu 27, 28 i 29 dodatnia. Wartości ujemne efektywności operacyjnej oznaczają, że przyrost o Δu_2 wielkości wejściowej

(prognozowanego zapotrzebowania na nową moc generatorów) wiązał się z potrzebą jednoczesnego zmniejszenia o Δy_1 prognozowanej mocy generatorów⁹⁶.

Przebiegi efektywności operacyjnej dla współczynników b_1 oraz b_2 występujących w wielomianie $B2(q)$ zamieszczono na rys. 5.7.

Z analizy przebiegu współczynników b_1 oraz b_4 występujących w wielomianie $B2(q)$ związanym ze zmienną wejściową u_2 wynika, że współczynnik b_1 był zawsze dodatni i osiągnął największą wartość 4,3 w kwartałach 20–22, a współczynnik b_4 zmieniał swą wartość w granicach od $-1,3$ (kwartały 1–5) do $1,3$ (kwartały 5–6, 8–11, 12–16). Wpływ pozytywny na poziom bieżącej wartości efektywności operacyjnej miała zmienna u_2 z poprzedniego roku w okresie od 20 do 22 kwartału oraz z okresu czterech kwartałów wstecz w okresie kwartałów 5–6, 8–11 oraz 12–16.

⁹⁶ Tzw. pozorowane planowanie.

6. Modele rozwoju KSE

Przeprowadzenie pełnej identyfikacji KSE jest zadaniem bardzo czasochłonnym, wymaga dokładnych badań statystycznych w celu zgromadzenia odpowiednich danych możliwych do wykorzystania w procesie identyfikacji dotyczących reprezentatywnego okresu, np. lat 1946–2007⁹⁷. Tak przeprowadzona identyfikacja KSE, daje szansę na uwzględnienie w modelu rozwoju zarówno zmian parametrycznych, jak i zmian strukturalnych.

Do identyfikacji KSE wykorzystano podstawy teorii sterowania i systemów oraz teorii identyfikacji rozwoju systemów, co umożliwiło wygenerowanie odpowiednich modeli rozwoju, w tym modeli matematycznych rozwoju w postaci macierzy \mathbf{th} oraz równań w przestrzeni stanów. Następnie na tej podstawie opracowano systemowy model rozwoju KSE, który zaimplementowano w Simulinku, definiując kolejne bloki w modelu jako charakterystyki poszczególnych podsystemów SEE, zidentyfikowanych w środowisku System Identification Toolbox'a. Tak zbudowany model wykorzystano do symulacji komputerowej w celu wygenerowania potencjalnych zmian parametrycznych oraz strukturalnych KSE.

Identyfikacja KSE została przeprowadzona na podstawie danych rzeczywistych (tabela 6.1 oraz 6.2) dotyczących poszczególnych wejść i wyjść systemu KSE [9, 24, 25, 36, 52, 58, 84, 221], przy czym identyfikowany KSE w każdym okresie kroczącym jest w rzeczywistości systemem wielowejściowo-wielowyjściowym (MIMO). Istnieją przy tym dwa sposoby identyfikacji tego typu systemów, a mianowicie:

- identyfikacja KSE złożonego z podsystemów wielowejściowo-jednowyjściowych (MISO), co prowadzi do uzyskania tylu modeli ile wystąpi podsystemów wyróżnionych ze względu na poszczególne wyjścia,
- identyfikacja SEE jako jednego systemu wielowejściowo-wielowyjściowego (MIMO).

⁹⁷ Dobór danych liczbowych dotyczących lat 1946–2007 wynikał z faktu, iż badania do tej monografii zamykałem w 2008 roku, gdy nie były jeszcze znane wyniki za 2008 rok, natomiast dobór roku 1946 wynikał z faktu, iż dane za wcześniejszy okres (lata wojny 1939–1945 i lata przedwojenne) nie są w pełni dostępne. Przyjęcie tych danych w liczbie 61 lat uznałem za próbkę reprezentatywną, gdyż umożliwiła ona wygenerowanie 33 modeli systemu elektroenergetycznego z dużą dokładnością (99,14%) w systemie kroczącym.

W środowisku System Identification Toolboxa można wykorzystać kilka modeli typu MISO lub jeden zintegrowany model typu MIMO [221]. Optymalnego doboru struktury modelu (jednoznacznie określonej za pomocą parametrów na , nb , nk) dokonuje się metodami iteracyjnymi, według kryterium minimalizacji błędu średniokwadratowego.

W obu przypadkach do celów identyfikacji mogą zatem zostać utworzone modele SEE albo wielowyjściowe, albo wiele modeli jednowyjściowych. W pracy zastosowano drugi sposób identyfikacji, wykorzystując do tego celu funkcję arx dostępną w *System Identification Toolboxie*⁹⁸ środowiska MATLAB i Simulink [14, 64, 66, 67, 146, 167, 221].

Identyfikacja za pomocą SIT wymaga wprowadzenie danych opisujących strumienie wejściowe i wyjściowe badanego systemu do przestrzeni roboczej MATLAB np. z użyciem narzędzia importującego dane z bazy danych dotyczących rynku energii elektrycznej utworzonej w arkuszu Excel lub bezpośredniego utworzenia w przestrzeni Workspace odpowiednich macierzy danych wejściowych oraz macierzy danych wyjściowych. Dla każdego z identyfikowanych systemów zaimportowano odpowiednie macierze \mathbf{u}_i lub macierz \mathbf{u} , reprezentującą wszystkie strumienie wejściowe oraz tyle macierzy \mathbf{y}_i , ile dany system ma wyjść. W kolejnym etapie⁹⁹ utworzono dla każdego z wyjść macierze w formacie \mathbf{th} jako wynik identyfikacji kolejnego podsystemu KSE.

⁹⁸ Obok tego ważne jest zauważenie, że równania stanu opisują tak na dobrą sprawę ruch systemu elektroenergetycznego od jednego stanu rozwoju do następnego stanu rozwoju. Mają one najczęściej postać nieliniową, którą można sprowadzić w naszym przypadku do postaci liniowej na przykład przez zróżniczkowanie w otoczeniu konkretnych punktów rozwoju SEE, jako specyficznych punktów pracy systemu EE. Wreszcie dodać należy, że identyfikatorami stabilności i miernikami jej poziomów są pierwiastki charakterystyczne SEE i ich poziom w zakresie dominowania (które z nich są dominujące).

⁹⁹ Możliwe jest też wywołanie tej funkcji jako funkcji języka Matlab, która ma następującą postać: $\mathbf{th} = \text{arx}([\mathbf{y} \ \mathbf{u}])$, $[na \ nb \ nk]$, gdzie: \mathbf{y} , \mathbf{u} – wektory kolumnowe wy/we; $[na \ nb \ nk]$ – współczynniki występujące w modelu, przy czym: na – określa liczbę biegunów (pierwiastków mianownika), nb – określa liczbę zer (pierwiastków licznika), nk – określa opóźnienie; \mathbf{th} – macierz wynikowa w formacie theta. Informację o współczynnikach licznika i mianownika otrzymanego modelu można następnie otrzymać przy wykorzystaniu Control System Toolbox lub za pomocą funkcji bibliotecznej $\text{th2tf}()$ o postaci: $[l, m] = \text{th2tf}(\text{arx}[na, nb, nk])$, gdzie: l – współczynniki licznika; m – współczynniki mianownika; \mathbf{th} – macierz w formacie theta, przy czym transmitancję dyskretną modelu można następnie wyświetlić za pomocą następującej funkcji: $\text{printsys}(l, m, 'z')$. a postać zero-biegunową za pomocą funkcji: $\text{zpk} = \text{zpk}(\mathbf{th})$. Przejście z postaci theta na postać w przestrzeni stanów wykonuje się natomiast za pomocą funkcji: $[\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}] = \text{th2ss}(\mathbf{th})$. Do graficznej prezentacji wyników identyfikacji wykorzystano następujące funkcje: compare oraz pzmap , a dla celów badania prawidłowości rozwoju systemu elektroenergetycznego funkcję rlocus kreślącą linie pierwiastkowe Evansa. Funkcja compare porównuje rzeczywiste dane z modelem i informuje o procentowym ich dopasowaniu oraz o wartości błędu średniokwadratowego. Wywołanie tej funkcji ma postać: $\text{compare}([\mathbf{y}, \mathbf{u}], \mathbf{th})$, gdzie: \mathbf{y} , \mathbf{u} – wektory kolumnowe wy/we; \mathbf{th} – macierz wynikowa modelu ARX w formacie theta. Z kolei funkcja pzmap wyświetla rozkłady zer i biegunów, którą wywołuje się następująco: $\text{pzmap}(l, m)$. Funkcja rlocus , umożliwiająca wspomnianą wizualizację systemu za pomocą linii pierwiastkowych Evansa, ma postać: $\text{rlocus}(l, m)$, gdzie: l – współczynniki licznika; m – współczynniki mianownika.

6.1. Identyfikacja rozwoju KSE

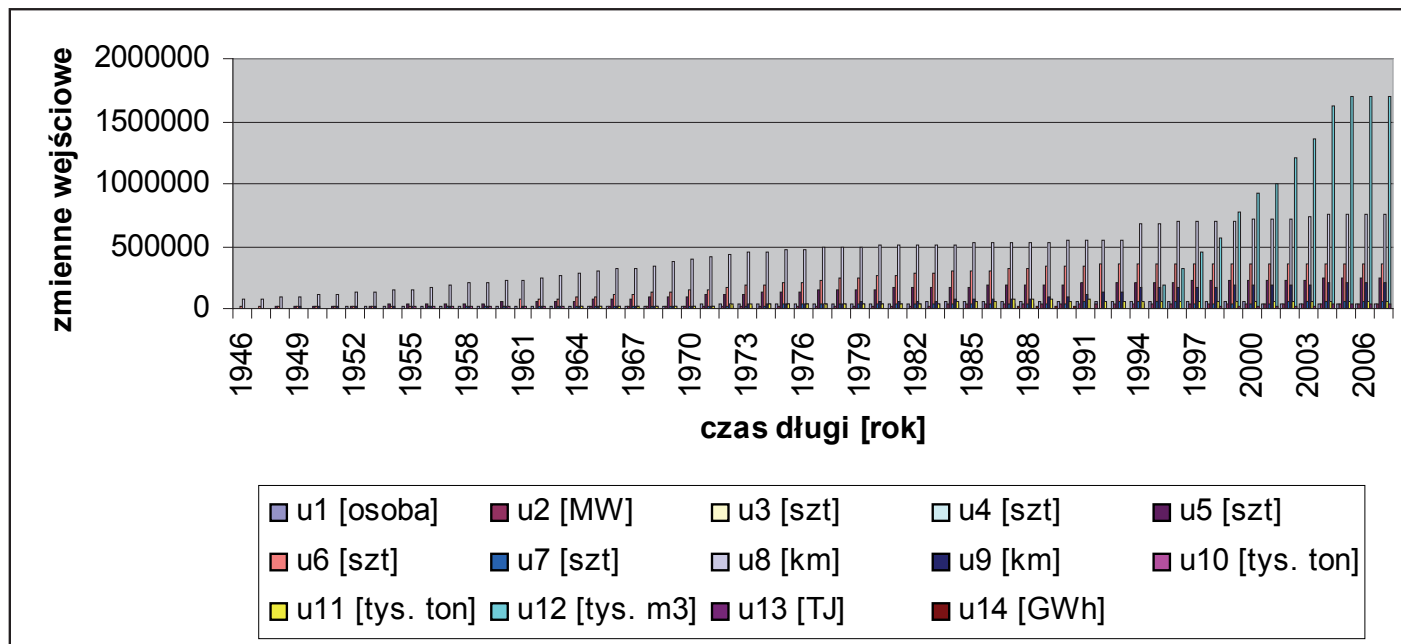
W celu przeprowadzenia identyfikacji rozwoju KSE zgromadzono odpowiednie dane liczbowe dotyczące czternastu zmiennych wejściowych (u_1-u_{14}) oraz czterech zmiennych wyjściowych (y_1-y_4) dla lat 1946–2007 o strukturze zmiennych wejściowych zamieszczonej w tabeli 6.1 oraz o strukturze zmiennych wyjściowych zamieszczonej w tabeli 6.2 [15]. W poglądowy sposób przebiegi danych wejściowych zamieszczono na rys. 6.1, a przebiegi danych wyjściowych na rys. 6.2.

Identyfikację KSE, dla umownych okresów 30-letnich z lat 1946–2007, z krokiem jednego roku przeprowadzono w środowisku MATLAB, z wykorzystaniem SIT.

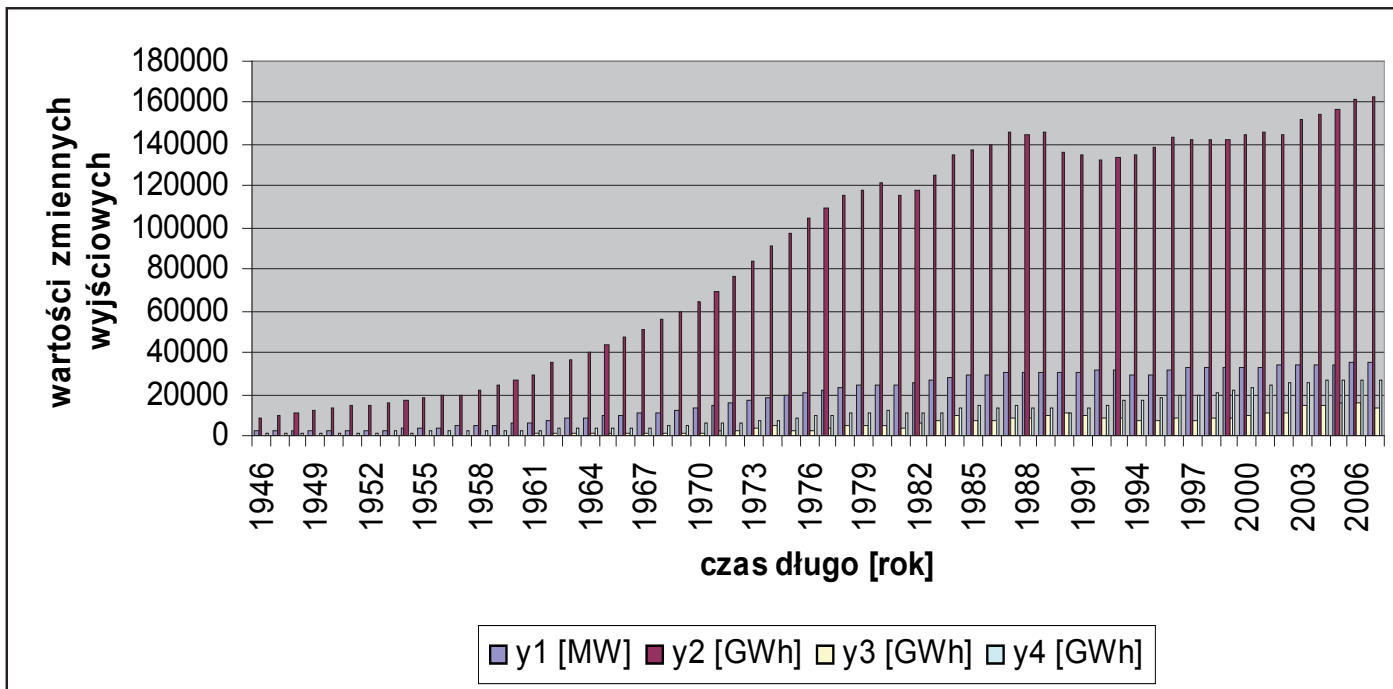
Uzyskano katalog modeli dla czterech wyjść typu MISO, jak na przykład modele dla wszystkich (czternastu) zmiennych wejściowych oraz dla pierwszego wyjścia reprezentującego moc osiągalną w elektrowniach (ogółem), które w liczbie 33 modeli zamieszczono w tabeli 6.3 (charakterystyki $A(q)$) oraz w tabeli 6.4 (charakterystyki $B(q)$). Przykład charakterystyki systemu KSE typu arx133 uzyskanej z dokładnością 99,14% dla okresu lat 1969–1998 zamieszczono na rys. 6.3.

Tabela 6.1. Struktura zmiennych wejściowych

Lata		Lata													
		Zatrudnienie w elektrowniach (ogółem) [osoby]	Moc zainstalowana w elektrowniach [MW]	Liczba turbozespołów [szt]	Liczba kotłów energetycznych (ogółem) [szt.]	Liczba transformatorów w energetyce zawodowej [szt.]	Liczba stacji elektroenergetycznych [szt.],	Liczba wylączników [szt.]	Długość linii elektroenergetycznych napowietrznych (ogółem wszystkie napięcia) [km]	Długość linii kablowych (z przyłączami kablowymi) [km],	Zużycie węgla kamiennego (ogółem) [tys. ton]	Zużycie węgla brunatnego (ogółem) [tys. ton]	Zużycie paliw gazowych (ogółem) [tys. m ³]	Zużycie innych surowców w elektrowniach zawodowych, w tym paliw ciekłych (ogółem) [TJ],	Import energii elektrycznej (ogółem) [GWh]
	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
46	3000	2553	174	333	3224	24420	882	76000	7091	3550	190	15	176	21	
...	
07	35096	35800	254	591	243000	359526	49500	759500	201500	45150	60200	1704800	35500	7752	



Rys. 6.1. Przebiegi danych wejściowych u_i SEE w latach 1946–2007 (62 lata).
Poszczególne wartości kolejnych wejść są kolejnymi słupkami wykresu, a ich znaczenie zamieszczono w tabeli 6.1



Rys. 6.2. Przebiegi danych wyjściowych SEE w latach 1946–2007 (62 lata).
 Poszczególne wartości kolejnych wyjść są kolejnymi słupkami wykresu, a ich znaczenie zamieszczono w tabeli 6.2

Tabela 6.2. Struktura zmiennych wyjściowych

Lata	Moc osiągalna w elektrowniach (ogółem) [MW]	Zużycie (rozchód) energii elektrycznej (ogółem) [GWh]	Eksport energii elektrycznej (ogółem) [GWh]	Straty energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych (ogółem) [GWh]
	y_1	y_2	y_3	y_4
1	16	17	18	19
1946	2004	8000	92	1517
...
2007	34877	162500	13110	26950

Można zauważyć występowanie pewnych prawidłowości w modelach KSE, a przede wszystkim występowanie prawidłowości w zakresie struktury modelu oraz w zakresie wartości i struktury parametrów [197, 186]. W zasadzie w przeważającej liczbie okresów występował model typu arx131, który zbliżony był do danych rzeczywistych systemu KSE w 99,03%, a co więcej modele typu arx131 dla przyjętego stopnia dokładności w zasadzie nie różniły się wartościami parametrów.

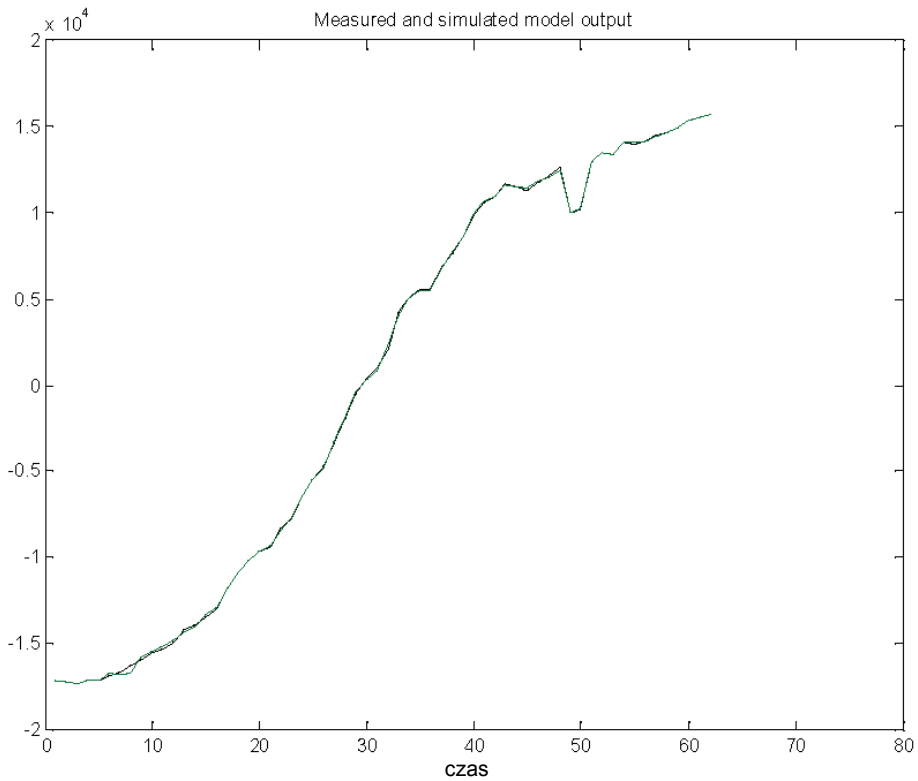
Identyfikacja przeprowadzona dla całego okresu danych eksperymentalnych z lat 1946–2007 (62 lata dla wyjścia y_1 oraz dla 14 wejść u_i) wygenerowała model dyskretny typu arx133 z dokładnością 99,14% postaci:

Discrete-time IDPOLY model: $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$

$$\begin{aligned}
 A(q) &= 1 - 0.4884 (+0.2126) q^{-1} \\
 B1(q) &= -0.05535 (+0.1809) q^{-3} - 0.1004 (+0.124) q^{-4} + 0.09545 (+0.1555) q^{-5} \\
 B2(q) &= 0.4866 (+0.3725) q^{-3} + 0.2477 (+0.2733) q^{-4} + 0.6879 (+0.2626) q^{-5} \\
 B3(q) &= 0.5838 (+8.836) q^{-3} - 44.77 (+35.07) q^{-4} + 10.26 (+30.87) q^{-5} \\
 B4(q) &= -11.98 (+6.304) q^{-3} + 12.81 (+7.835) q^{-4} + 19.69 (+6.841) q^{-5} \\
 B5(q) &= 0.01692 (+0.1067) q^{-3} - 0.05892 (+0.118) q^{-4} - 0.0274 (+0.07774) q^{-5} \\
 B6(q) &= 0.04652 (+0.03587) q^{-3} - 0.0255 (+0.02982) q^{-4} - 0.02981 (+0.01268) q^{-5} \\
 B7(q) &= 0.02357 (+0.1678) q^{-3} + 0.3572 (+0.2228) q^{-4} + 0.1703 (+0.2966) q^{-5} \\
 B8(q) &= 0.008861 (+0.006592) q^{-3} - 0.01302 (+0.008457) q^{-4} + 0.02278 (+0.00998) q^{-5} \\
 B9(q) &= -0.1416 (+0.02745) q^{-3} + 0.007803 (+0.04155) q^{-4} + 0.07822 (+0.03684) q^{-5} \\
 B10(q) &= -0.2164 (+0.07139) q^{-3} - 0.02428 (+0.1147) q^{-4} - 0.1506 (+0.1069) q^{-5} \\
 B11(q) &= -0.08433 (+0.07737) q^{-3} - 0.04146 (+0.07904) q^{-4} + 0.03406 (+0.06038) q^{-5} \\
 B12(q) &= 0.01532 (+0.007476) q^{-3} - 0.01976 (+0.01188) q^{-4} + 0.001555 (+0.006857) q^{-5} \\
 B13(q) &= 0.2199 (+0.1094) q^{-3} - 0.4983 (+0.1816) q^{-4} - 0.6753 (+0.2535) q^{-5} \\
 B14(q) &= -0.3297 (+0.2403) q^{-3} + 0.04052 (+0.2927) q^{-4} - 0.1886 (+0.2105) q^{-5}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Estimated using ARX from data set eDat
Loss function 14059 and FPE 33560.2
Sampling interval: 1

Przebieg wyjścia y_1 (moc osiągalna w elektrowniach (ogółem) [MW]) modelu dyskretnego arx133 systemu KSE został zamieszczony na rys. 6.3.



Rys. 6.3. Przebiegi zmiennej wyjściowej y_1 (moc osiągalna w elektrowniach (ogółem) [MW]) modelu arx133 i systemu rzeczywistego KSE po uwzględnieniu 14 zmiennych wejściowych (zgodność modelu z systemem EE – 99,14%).

Oznaczenia: Oś y – amplituda podsystemu generującego y_1 [MW]
oraz jego modelu, oś x (Time) – czas długi [lata]

W wyniku przekształcenia modelu arx133 z postaci dyskretniej (6.1) na model dyskretny w przestrzeni stanów¹⁰⁰ otrzymano macierze **A**, **B**, **C**, **D**, **K** i **X0** postaci:

¹⁰⁰ $[A \ B \ C \ D \ K \ X0]=th2ss(arx133)$.

$$B4(s) = 3,425 \cdot s^5 + 64,56 \cdot s^4 - 524,7 \cdot s^3 + 1325 \cdot s^2 - 1343 \cdot s + 441,2,$$

$$B5(s) = -0,03255 \cdot s^5 + 0,07618 \cdot s^4 + 0,5106 \cdot s^3 - 2,288 \cdot s^2 + 3,191 \cdot s - 1,492,$$

$$B6(s) = -0,02836 \cdot s^5 - 0,3498 \cdot s^4 + 0,9141 \cdot s^3 - 2,376 \cdot s^2 + 1,924 \cdot s - 0,1889,$$

$$B7(s) = 0,1098 \cdot s^5 - 0,2643 \cdot s^4 - 2,529 \cdot s^3 + 12,74 \cdot s^2 - 20,93 \cdot s + 11,85,$$

$$B8(s) = -0,03001 \cdot s^5 + 0,2174 \cdot s^4 - 0,6346 \cdot s^3 + 0,9894 \cdot s^2 - 0,9 \cdot s + 0,4005,$$

$$B9(s) = 0,04787 \cdot s^5 + 0,3038 \cdot s^4 - 2,821 \cdot s^3 + 5,811 \cdot s^2 - 2,933 \cdot s - 1,195,$$

$$B10(s) = 0,2302 \cdot s^5 - 1,205 \cdot s^4 + 2,753 \cdot s^3 - 6,029 \cdot s^2 + 11,2 \cdot s - 8,411,$$

$$B11(s) = 0,005917 \cdot s^5 + 0,2827 \cdot s^4 - 1,592 \cdot s^3 + 2,292 \cdot s^2 + 0,413 \cdot s - 1,972,$$

$$B12(s) = -0,02462 \cdot s^5 + 0,1107 \cdot s^4 - 0,06566 \cdot s^3 - 0,2936 \cdot s^2 + 0,389 \cdot s - 0,06206,$$

$$B13(s) = -0,02882 \cdot s^5 - 2,233 \cdot s^4 + 16,65 \cdot s^3 - 44,02 \cdot s^2 + 50 \cdot s - 20,5,$$

$$B14(s) = 0,3755 \cdot s^5 - 1,874 \cdot s^4 + 3,515 \cdot s^3 - 6,16 \cdot s^2 + 12,38 \cdot s - 10,27,$$

$$C(s) = s + 2,$$

$$D(s) = s + 0,6875$$

oraz dla poszczególnych $i = 1-14$:

$$Fi(s) = s^5 + 8,688 \cdot s^4 + 29,5 \cdot s^3 + 48,5 \cdot s^2 + 38 \cdot s + 11,$$

Estimated using ARX from data set eDat,

Loss function 14059 and FPE 33560.2.

Przekształcając dalej model ciągły th133 na model ciągły w przestrzeni stanów ss za pomocą funkcji $\text{th2ss}(\text{th133})^{101}$, otrzymano macierze o wymiarach: $\mathbf{A}(71 \times 71)$, $\mathbf{B}(71 \times 14)$, $\mathbf{C}(1 \times 71)$, $\mathbf{D}(1 \times 14)$, $\mathbf{K}(71 \times 1)$, $\mathbf{X0}(71 \times 1)$, przy czym w macierzy \mathbf{A} wartości niezerowe mają elementy znajdujące się w kolumnie pierwszej w 35 wierszach od pozycji $n = 27$ do 61, a pozostałe są równe zero lub bliskie zera:

¹⁰¹ $[\mathbf{A} \ \mathbf{B} \ \mathbf{C} \ \mathbf{D} \ \mathbf{K} \ \mathbf{X0}] = \text{th2ss}(\text{th133})$.

$$A1n = 1,0 \cdot 10^{29} \cdot \begin{bmatrix} -0,0001 \\ -0,0004 \\ -0,0010 \\ -0,0025 \\ -0,0057 \\ -0,0124 \\ -0,0252 \\ -0,0483 \\ -0,1495 \\ -0,0875 \\ -0,2410 \\ -0,3665 \\ -0,5258 \\ -0,7115 \\ -0,9078 \\ -1,0916 \\ -1,2364 \\ -1,3185 \\ -1,3228 \\ -1,2475 \\ -1,1049 \\ -0,9181 \\ -0,7148 \\ -0,5207 \\ -0,3545 \\ -0,2250 \\ -0,1330 \\ -0,0730 \\ -0,0371 \\ -0,0175 \\ -0,0076 \\ -0,0030 \\ -0,0011 \\ -0,0004 \\ -0,0001 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Z kolei w macierzy **B** elementy wierszy od 1 do 23 oraz od 60 do 71 przyjmują wartości zero, a pozostałe wynoszą odpowiednio:

$$\mathbf{K} = 1,0 \cdot 10^{29} \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.0002 \\ 0.0004 \\ 0.0011 \\ 0.0026 \\ 0.0058 \\ 0.0123 \\ 0.0246 \\ 0.0465 \\ 0.0829 \\ 0.1392 \\ 0.2206 \\ 0.3294 \\ 0.4637 \\ 0.6151 \\ 0.7686 \\ 0.9042 \\ 1.0011 \\ 1.0423 \\ 1.0196 \\ 0.9363 \\ 0.8064 \\ 0.6505 \\ 0.4909 \\ 0.3460 \\ 0.2274 \\ 0.1390 \\ 0.0790 \\ 0.0415 \\ 0.0202 \\ 0.0090 \\ 0.0037 \\ 0.0014 \\ 0.0005 \\ 0.0001 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

oraz macierz kolumnowa $\mathbf{X0}$ zawierająca 71 elementów o wartościach równych 0:

$$\mathbf{X0} = [0]. \quad (6.9)$$

Usunięcie średniej z modelu¹⁰² umożliwia wygenerowanie modelu arx131:

¹⁰² W menu *Preprocessing Data* w SIT można w tym celu skorzystać z funkcji *Remove means*.

$$\begin{aligned}
A(q) &= 1 - 0.1342 (+0.6018) q^{-1} \\
B1(q) &= 0.343 (+0.1305) q^{-1} - 0.05387 (+0.1133) q^{-2} - 0.1443 (+0.1224) q^{-3} \\
B2(q) &= -0.1965 (+0.695) q^{-1} - 0.7748 (+0.2542) q^{-2} + 0.3264 (+0.1904) q^{-3} \\
B3(q) &= -5.191 (+7.511) q^{-1} + 0.3683 (+31.46) q^{-2} + 29.52 (+26.71) q^{-3} \\
B4(q) &= -14.5 (+5.941) q^{-1} + 9.715 (+5.55) q^{-2} + 14.17 (+5.756) q^{-3} \\
B5(q) &= 0.1554 (+0.0606) q^{-1} - 0.05293 (+0.08992) q^{-2} + 0.06803 (+0.06506) q^{-3} \\
B6(q) &= 0.01335 (+0.03259) q^{-1} - 0.02755 (+0.02608) q^{-2} + 0.006739 (+0.01225) q^{-3} \\
B7(q) &= -0.05234 (+0.145) q^{-1} - 0.2766 (+0.1793) q^{-2} - 0.6104 (+0.2394) q^{-3} \\
B8(q) &= -0.002718 (+0.00676) q^{-1} - 0.007408 (+0.008278) q^{-2} + 0.02639 (+0.00851) q^{-3} \\
B9(q) &= -0.03015 (+0.02516) q^{-1} + 0.1073 (+0.03698) q^{-2} - 0.02883 (+0.03485) q^{-3} \\
B10(q) &= 0.08841 (+0.06314) q^{-1} + 0.2976 (+0.09485) q^{-2} + 0.1541 (+0.08957) q^{-3} \\
B11(q) &= 0.131 (+0.06222) q^{-1} + 0.06231 (+0.07303) q^{-2} - 0.04736 (+0.05461) q^{-3} \\
B12(q) &= 0.01546 (+0.005663) q^{-1} - 0.009961 (+0.006138) q^{-2} - 0.009608 (+0.004014) q^{-3} \\
B13(q) &= -0.02857 (+0.05633) q^{-1} - 0.1287 (+0.04998) q^{-2} + 0.2337 (+0.09492) q^{-3} \\
B14(q) &= -0.02198 (+0.2031) q^{-1} + 0.3019 (+0.2657) q^{-2} + 0.02655 (+0.1916) q^{-3}
\end{aligned} \tag{6.10}$$

gdzie q^{-1} – operator przesunięcia czasowego o jedną jednostkę (np. $u_1(\theta) q^{-1} = u_1(\theta - 1)$).

W wyniku przekształcenia modelu systemu KSE postaci dyskretnej arx131 na postać ciągłą¹⁰³ th131 z wykorzystaniem metody TUTSIN otrzymano model:

$$\begin{aligned}
B1(s) &= -0.2227 s^3 - 1.273 s^2 + 2.927 s + 1.021 \\
B2(s) &= -0.7977 s^3 + 3.439 s^2 - 1.414 s - 4.549 \\
B3(s) &= -21.13 s^3 + 164.7 s^2 - 332 s + 174.2 \\
B4(s) &= 8.861 s^3 + 83.41 s^2 - 235.4 s + 66.17 \\
B5(s) &= -0.2436 s^3 + 0.1793 s^2 + 0.01478 s + 1.202 \\
B6(s) &= -0.042 s^3 + 0.06069 s^2 + 0.07294 s - 0.0526 \\
B7(s) &= 0.3405 s^3 - 2.649 s^2 + 7.249 s - 6.625 \\
B8(s) &= -0.02741 s^3 + 0.1575 s^2 - 0.2627 s + 0.1147 \\
B9(s) &= 0.1466 s^3 - 0.2885 s^2 - 0.1798 s + 0.3408 \\
B10(s) &= 0.04858 s^3 + 0.1344 s^2 - 2.368 s + 3.809 \\
B11(s) &= -0.01881 s^3 - 0.5914 s^2 + 0.7433 s + 1.029 \\
B12(s) &= -0.01394 s^3 - 0.06053 s^2 + 0.1913 s - 0.02897 \\
B13(s) &= -0.2943 s^3 + 1.513 s^2 - 2.119 s + 0.5391 \\
B14(s) &= 0.2622 s^3 - 0.3532 s^2 - 1.423 s + 2.162 \\
C(s) &= s + 2 \\
D(s) &= s + 1.527 \\
F1(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F2(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F3(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F4(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F5(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F6(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F7(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F8(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F9(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F10(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F11(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F12(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F13(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107 \\
F14(s) &= s^3 + 5.527 s^2 + 10.11 s + 6.107
\end{aligned} \tag{6.11}$$

¹⁰³ d2c(arx131, „TUTSIN”).

oraz ostatecznie po przekształceniu na model ciągły ss w przestrzeni stanu otrzymuje się model KSE postaci (rys. 6.4):

$$\begin{aligned}
 &A_c = \begin{bmatrix} 0.1342 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &B_c = \begin{bmatrix} \text{Columns 1 through 5} \\ 0.3430 & -0.1965 & -5.1912 & -14.5048 & 0.1554 \\ -0.0539 & -0.7748 & 0.3683 & 9.7155 & -0.0529 \\ -0.1443 & 0.3264 & 29.5244 & 14.1706 & 0.0680 \\ \text{Columns 6 through 10} \\ 0.0134 & -0.0523 & -0.0027 & -0.0302 & 0.0884 \\ -0.0275 & -0.2766 & -0.0074 & 0.1073 & 0.2976 \\ 0.0067 & -0.6104 & 0.0264 & -0.0288 & 0.1541 \\ \text{Columns 11 through 14} \\ 0.1310 & 0.0155 & -0.0286 & -0.0220 \\ 0.0623 & -0.0100 & -0.1287 & 0.3019 \\ -0.0474 & -0.0096 & 0.2337 & 0.0266 \end{bmatrix} \\
 &C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &D_c = \begin{bmatrix} \text{Columns 1 through 9} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{Columns 10 through 14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &K_c = \begin{bmatrix} 0.1342 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &X_{0c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

Z równań (6.12) wynika, że model ciągły liniowy rozwoju KSE otrzymany dla lat 1946–2007 ma postać:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= 0,1342 \cdot x_1 + x_2 + 0,3430 \cdot u_1 - 0,1965 \cdot u_2 - 5,1912 \cdot u_3 - 14,5048 \cdot u_4 \\
 &+ 0,1554 \cdot u_5 + 0,0134 \cdot u_6 - 0,0523 \cdot u_7 - 0,0027 \cdot u_8 - 0,0302 \cdot u_9 + 0,0884 \cdot u_{10} \\
 &+ 0,1310 \cdot u_{11} + 0,0155 \cdot u_{12} - 0,0286 \cdot u_{13} - 0,0220 \cdot u_{14} + 0,1342 \cdot e_1, \\
 \dot{x}_2 &= x_3 - 0,0539 \cdot u_1 - 0,7748 \cdot u_2 + 0,3683 \cdot u_3 + 9,7155 \cdot u_4 \\
 &- 0,0529 \cdot u_5 - 0,0275 \cdot u_6 - 0,2766 \cdot u_7 - 0,0074 \cdot u_8 + 0,1073 \cdot u_9 + 0,2976 \cdot u_{10} \\
 &+ 0,0623 \cdot u_{11} - 0,0100 \cdot u_{12} - 0,01287 \cdot u_{13} + 0,3019 \cdot u_{14}, \\
 \dot{x}_3 &= -0,1443 \cdot u_1 + 0,3264 \cdot u_2 + 29,5244 \cdot u_3 + 14,1706 \cdot u_4 + 0,0680 \cdot u_5 \\
 &+ 0,0067 \cdot u_6 - 0,6104 \cdot u_7 + 0,0264 \cdot u_8 - 0,0288 \cdot u_9 + 0,1541 \cdot u_{10} \\
 &+ 0,0474 \cdot u_{11} - 0,0096 \cdot u_{12} + 0,0237 \cdot u_{13} + 0,0266 \cdot u_{14},
 \end{aligned} \tag{6.13}$$

$$y_1 = x_1. \tag{6.14}$$

Z analizy równania (6.13) wynika, że na aktualną wartość zmiennej wyjściowej $y_1(\theta)$ największy wpływ mają zmienne wyjściowe z poprzedniego roku oraz zmienne wejściowe z trzech ostatnich lat, w niektórych przypadkach wpływ ten jest dodatni, a w innych ujemny. Ponadto najsilniejszy wpływ sytuacji z przeszłości wykazuje zmienna u_4 (liczba kotłów energetycznych ogółem). Można zauważyć pewne prawidłowości występujące w modelach KSE, a przede wszystkim prawidłowości występujące w zakresie struktury modelu oraz w zakresie wartości występujących w nich parametrów. W zasadzie w większości okresów przeważał model typu arx131, który zbliżony jest do danych rzeczywistych KSE w 99,03%, a co więcej modele te w zasadzie nie różniły się wartościami parametrów (występowały nieznaczne zmiany parametryczne systemu).

W wyniku końcowym otrzymano następujący dyskretny model rozwoju KSE dla podsystemu mocy osiągalnej w elektrowniach (po zastąpieniu operatora przesunięcia czasowego q^{-1} zmienną θ) korzystając z zasady, że np. $y_1(\theta) q^{-1} = y_1(\theta - 1)$, a mianowicie:

$$\begin{aligned}
 y_1(\theta) = & 0,1342 \cdot y_1(\theta - 1) - 0,1342 \cdot u_1(\theta - 1) - 0,05387 \cdot u_1(\theta - 2) - 0,1443 \cdot u_1(\theta - 3) \\
 & - 0,1965 \cdot u_2(\theta - 1) - 0,7748 \cdot u_2(\theta - 2) + 0,3264 \cdot u_2(\theta - 3) - 5,191 \cdot u_3(\theta - 1) \\
 & + 0,3683 \cdot u_3(\theta - 2) + 29,52 \cdot u_3(\theta - 3) - 14,5 \cdot u_4(\theta - 1) + 9,715 \cdot u_4(\theta - 2) \\
 & + 14,17 u_4(\theta - 3) + 0,1554 \cdot u_5(\theta - 1) - 0,05293 \cdot u_5(\theta - 2) + 0,06803 \cdot u_5(\theta - 3) \\
 & + 0,01335 \cdot u_6(\theta - 1) - 0,02755 \cdot u_6(\theta - 2) + 0,006739 \cdot u_6(\theta - 3) - 0,05234 \cdot u_7(\theta - 1) \\
 & - 0,2766 \cdot u_7(\theta - 2) - 0,6104 \cdot u_7(\theta - 3) - 0,002718 u_8(\theta - 1) - 0,007408 \cdot u_8(\theta - 2) \\
 & + 0,02639 \cdot u_8(\theta - 3) - 0,03015 \cdot u_9(\theta - 1) + 0,1073 \cdot u_9(\theta - 2) - 0,02883 \cdot u_9(\theta - 3) \\
 & + 0,08841 \cdot u_{10}(\theta - 1) + 0,2976 \cdot u_{10}(\theta - 2) + 0,1541 \cdot u_{10}(\theta - 3) + 0,131 \cdot u_{11}(\theta - 1) \\
 & + 0,06231 \cdot u_{11}(\theta - 2) - 0,04736 \cdot u_{11}(\theta - 3) + 0,01546 \cdot u_{12}(\theta - 1) - 0,009961 \cdot u_{12}(\theta - 2) \\
 & - 0,009608 \cdot u_{12}(\theta - 3) + -0,02857 \cdot u_{13}(\theta - 1) - 0,1287 \cdot u_{13}(\theta - 2) + 0,2337 \cdot u_{13}(\theta - 3) \\
 & - 0,02198 \cdot u_{14}(\theta - 1) + 0,3019 \cdot u_{14}(\theta - 2) + 0,02655 \cdot u_{14}(\theta - 3) + e(\theta).
 \end{aligned} \tag{6.15}$$

Na poszukiwaną wartość mocy osiągalnej w elektrowniach (ogółem) [MW] na przykład w roku $\theta = 2010$ wpływ miały następujące wielkości: wartość mocy osiągalnej z roku poprzedniego ($\theta - 1$, tj. 2009) oraz wszystkie zmienne wejściowe w liczbie czternastu z trzech ostatnich lat ($\theta - 1$, tj. z roku 2009, $\theta - 2$, tj. z roku 2008, $\theta - 3$, tj. z roku 2007).

Z kolei dla wybranego dyskretnego modelu KSE kroczącego (arx131) w wyniku jego przekształcenia na model dyskretny th131 i następnie na model ciągły w przestrzeni stanów ss otrzymano następujące macierze równań stanu:

$$\mathbf{A20c} = \begin{bmatrix} 0,1342 & 1,0000 & 0 \\ 0 & 0 & 1,0000 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B20c} = \begin{bmatrix} 0,3430 & -0,1965 & -5,1912 & -14,5048 & 0,1554 & 0,0134 & -0,0523 & -0,0027 & -0,0302 & 0,0884 & 0,1310 & 0,0155 & -0,0286 & -0,0220 \\ -0,0539 & -0,7748 & 0,3683 & 9,7155 & -0,0529 & -0,0275 & -0,2766 & -0,0074 & 0,1073 & 0,2976 & 0,0623 & -0,0100 & -0,0187 & 0,3019 \\ -0,1443 & 0,3264 & 29,5244 & 14,1706 & 0,0680 & 0,0067 & -0,6104 & 0,0264 & -0,0288 & -1,541 & -0,0474 & -0,0096 & 0,2337 & 0,0266 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C20c} = [1 \ 0 \ 0],$$

$$\mathbf{D20c} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], \quad (6.16)$$

$$\mathbf{K20c} = \begin{bmatrix} 0,1342 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X020c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Można łatwo zauważyć, że liniowy ciągły model rozwoju KSE typu arx131 (6.16) uzyskany dla okresów 30-letnich jest podobny do modelu uzyskanego dla danych liczbowych z całego okresu pomiarowego, to jest lat 1946–2007.

6.2. Modele rozwoju KSE w przestrzeni stanów

Model rozwoju systemu KSE otrzymany na bazie danych eksperymentalnych z lat 1946–2007 dla 14 zmiennych wejściowych oraz dla jednego wyjścia y_1 reprezentującego moc osiągalną w elektrowniach ogółem [MW] (model MISO) zapisany w przestrzeni stanów równaniami stanu i wyjścia (6.12) można więc opisać w postaci macierzo-wektorowej:

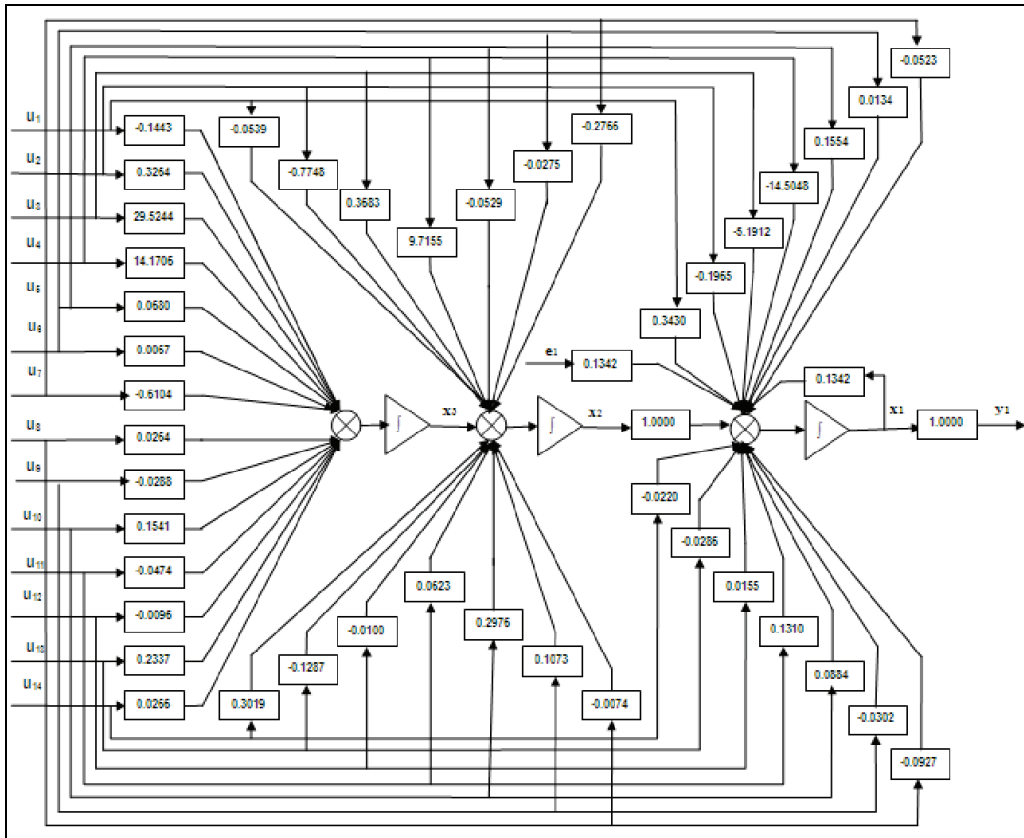
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1342 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,343 & -0,1965 & -5,1912 & -14,5048 & 0,1554 & 0,0134 & -0,0523 & -0,0027 & 0,0302 & 0,0884 & 0,1310 & 0,0155 & -0,0286 & -0,022 \\ -0,0539 & -0,7748 & 0,3683 & 9,7155 & -0,0528 & -0,0275 & -0,2766 & -0,0074 & 0,1073 & 0,2976 & 0,0623 & -0,01 & -0,1287 & 0,3019 & \dots \\ -0,1443 & 0,3264 & 29,5244 & 14,1706 & 0,068 & 0,0067 & -0,6104 & 0,0264 & -0,0288 & 0,1541 & -0,0474 & -0,0096 & 0,2337 & 0,0266 & u_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_{14} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,1342 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$y_1 = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad (6.17)$$

gdzie:

x_1 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako możliwa do wyprodukowania energia elektryczna w elektrowniach (ogółem) [kWh],

- x_2 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako moc osiągalna generatorów [MW],
- x_3 – zmienna stanu możliwa do interpretacji jako szybkość zmian mocy osiągalnej generatorów w ciągu roku [MW/rok].



Rys. 6.4. Schemat blokowy zmiennych stanu modelu rozwoju KSE dla lat 1946–2007 uzyskany dla całego 62-letniego zakresu danych eksperymentalnych oraz dla okresów 30-letnich w identyfikacji kroczącej wymienionych w tekście. Oznaczenia w tekście. Opracowanie własne

Szczegółowy schemat blokowy zmiennych stanu utworzony na podstawie równań stanu i wyjścia (6.17) zamieszczono na rys. 6.4. Rozwiązanie wymienionego układu równań zmiennych stanu wiąże się z koniecznością wyznaczenia dwóch składowych:

- składowej swobodnej zależnej od warunków początkowych:

$$x_s = e^{A\theta} x(0), \tag{6.18}$$

– składowej wymuszonej:

$$x_w = \int_0^{\theta} e^{A(\theta-\tau)} \cdot \mathbf{B} \cdot u(\tau) \cdot d\tau, \quad (6.19)$$

co wiąże się na początku z koniecznością wyznaczenia macierzy podstawowej (macierzy tranzycyjnej) przy wykorzystaniu odwrotnej transformaty Laplace'a:

$$e^{A \cdot \theta} = \mathbf{L}^{-1}([\mathbf{s} \cdot \mathbf{1} - \mathbf{A}]^{-1}), \quad (6.20)$$

przy czym:

$$[\mathbf{s} \cdot \mathbf{1} - \mathbf{A}] = \begin{bmatrix} s - 0,1342 & -1 & 0 \\ 0 & s & -1 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix}, \quad (6.21)$$

dla której wyznacznik wynosi:

$$\det(\mathbf{s1} - \mathbf{A}) = s^2 \cdot (s - 0,1342), \quad (6.22)$$

a więc

$$[\mathbf{s} \cdot \mathbf{1} - \mathbf{A}]^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{s} \cdot \mathbf{1} - \mathbf{A})} \cdot \mathbf{A}_D^T, \quad (6.23)$$

gdzie \mathbf{A}_D^T jest transponowaną macierzą dopełnień, a więc w konsekwencji otrzymamo:

$$[\mathbf{s} \cdot \mathbf{1} - \mathbf{A}]^{-1} = \frac{1}{s^2(s - 0,1342)} \cdot \begin{bmatrix} s^2 & s & 1 \\ 0 & s(s - 0,1342) & s - 0,1342 \\ 0 & 0 & s(s - 0,1342) \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

oraz

$$e^{A \cdot \theta} = \mathbf{L}^{-1}([\mathbf{s} \cdot \mathbf{1} - \mathbf{A}]^{-1}) = \begin{bmatrix} e^{0,1342 \cdot \theta} & \frac{1}{0,1342} (e^{0,1342 \cdot \theta} - 1(\theta)) & \frac{1}{0,1342} \left(\frac{1}{0,1342} e^{0,1342 \cdot \theta} - \theta \right) \\ 0 & 1(\theta) & \theta \\ 0 & 0 & 1(\theta) \end{bmatrix}, \quad (6.25)$$

a zatem:

$$\mathbf{X}_{kse} = e^{\Lambda \cdot \theta} \cdot \mathbf{B} \cdot u(\theta) = \begin{bmatrix} e^{0,1342 \cdot \theta} & \frac{1}{0,1342} (e^{0,1342 \cdot \theta} - 1(\theta)) & \frac{1}{0,1342} (\frac{1}{0,1342} e^{0,1342 \cdot \theta} - \theta) \\ 0 & 1(\theta) & \theta \\ 0 & 0 & 1(\theta) \end{bmatrix} *$$

$$* \begin{bmatrix} 0,343 & -0,1965 & -5,1912 & -14,5048 & 0,1554 & 0,0134 & -0,0523 & -0,0027 & 0,0302 & 0,0884 & 0,1310 & 0,0155 & -0,0286 & -0,022 \\ -0,0539 & -0,7748 & 0,3683 & 9,7155 & -0,0528 & -0,0275 & -0,2766 & -0,0074 & 0,1073 & 0,2976 & 0,0623 & -0,01 & -0,1287 & 0,3019 \\ -0,1443 & 0,3264 & 29,5244 & 14,1706 & 0,068 & 0,0067 & -0,6104 & 0,0264 & -0,0288 & 0,1541 & -0,0474 & -0,0096 & 0,2337 & 0,0266 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \\ u_{10} \\ u_{11} \\ u_{12} \\ u_{13} \\ u_{14} \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

oraz

$$\mathbf{Y}_{kse_1} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X}_{kse} = [1 \ 0 \ 0] \cdot \mathbf{X}_{kse}. \quad (6.27)$$

Wyniki otrzymanych w środowisku w Simulink odpowiedzi systemu KSE (zmiennej wyjściowej y_1) na wymuszenia typu: skok jednostkowy $1(\theta)$, impuls Diraca $\delta(\theta)$ oraz funkcja $\sin(\theta)$ zestawiono w tabeli 6.3, przy czym rozwiązaniem układu równań zmiennych stanu są 3 następująco wyrażone zmienne stanu:

$$\begin{aligned} x_1 = & (7,6736 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} + 1,0753 \cdot \theta - 0,4024 \cdot 1(\theta)) \cdot u_1 \\ & + (12,1333 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 2,4322 \cdot \theta + 5,7735 \cdot 1(\theta)) \cdot u_2 \\ & + (1637,7976 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} + 220,003 \cdot \theta - 2,7444 \cdot 1(\theta)) \cdot u_3 \\ & + (845,1465 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 105,5932 \cdot \theta - 72,3957 \cdot 1(\theta)) \cdot u_4 \\ & + (3,5398 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 0,5067 \cdot \theta + 0,3994 \cdot 1(\theta)) \cdot u_5 \\ & + (0,4358 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 0,0499 \cdot \theta - 0,0499 \cdot 1(\theta)) \cdot u_6 \\ & + (-36,0245 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 4,5485 \cdot \theta - 0,0523 \cdot 1(\theta)) \cdot u_7 \\ & + (0,0889 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 0,1967 \cdot \theta - 0,0551 \cdot 1(\theta)) \cdot u_8 \\ & + (2,4298 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 0,2147 \cdot \theta - 0,7996 \cdot 1(\theta)) \cdot u_9 \\ & + (10,8674 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 1,1483 \cdot \theta - 2,2179 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{10} \\ & + (-2,0381 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} + 0,3532 \cdot \theta + 0,4642 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{11} \\ & + (-0,5923 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} + 0,715 \cdot \theta - 0,0745 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{12} \\ & + (1,2001 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 0,0745 \cdot \theta + 0,0715 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{13} \\ & + (1,5974 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} + 0,1982 \cdot \theta - 0,1416 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{14} + 0,1342, \end{aligned} \quad (6.28)$$

$$\begin{aligned}
x_2 = & (-0,1443 \cdot \theta - 0,0539 \cdot 1(\theta)) \cdot u_1 + (0,3264 \cdot \theta - 0,7748 \cdot 1(\theta)) \cdot u_2 \\
& + 29,5244 \cdot \theta + 0,3683 \cdot 1(\theta) \cdot u_3 + (14,1706 \cdot \theta + 9,7155 \cdot 1(\theta)) \cdot u_4 \\
& + (0,068 \cdot \theta - 0,0528 \cdot 1(\theta)) \cdot u_5 + (0,0067 \cdot \theta - 0,0275 \cdot 1(\theta)) \cdot u_6 \\
& + (-0,6104 \cdot \theta - 0,2766 \cdot 1(\theta)) \cdot u_7 + (0,0264 \cdot \theta - 0,0074 \cdot 1(\theta)) \cdot u_8 \\
& + (-0,0288 \cdot \theta + 0,1073 \cdot 1(\theta)) \cdot u_9 + (0,1541 \cdot \theta - 0,2976 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{10} \\
& + (-0,0474 \cdot \theta + 0,0623 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{11} + (-0,0096 \cdot \theta - 0,01 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{12} \\
& + (0,2337 \cdot \theta - 0,1287 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{13} + (0,0266 \cdot \theta + 0,3011 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{14},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_3 = & 1(\theta) \cdot (-0,1443 \cdot u_1 + 0,3264 \cdot u_2 + 29,5244 \cdot u_3 + 14,1706 \cdot u_4 + 0,068 \cdot u_5 \\
& + 0,0067 \cdot u_6 - 0,6104 \cdot u_7 + 0,0264 \cdot u_8 - 0,0288 \cdot u_9 + 0,1541 \cdot u_{10} \\
& - 0,0474 \cdot u_{11} - 0,0096 \cdot u_{12} + 0,2337 \cdot u_{13} + 0,0266 \cdot u_{14}),
\end{aligned}$$

oraz zmienna wyjściowa:

$$\begin{aligned}
y_1 = c_{11} \cdot x_1 = & (7,6736 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} + 1,0753 \cdot \theta - 0,4024 \cdot 1(\theta)) \cdot u_1 \\
& + (12,1333 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 2,4322 \cdot \theta + 5,7735 \cdot 1(\theta)) \cdot u_2 \\
& + (1637,7976 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} + 220,003 \cdot \theta - 2,7444 \cdot 1(\theta)) \cdot u_3 \\
& + (845,1465 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 105,5932 \cdot \theta - 72,3957 \cdot 1(\theta)) \cdot u_4 \\
& + (3,5398 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 0,5067 \cdot \theta + 0,3994 \cdot 1(\theta)) \cdot u_5 \\
& + (0,4358 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 0,0499 \cdot \theta - 0,0499 \cdot 1(\theta)) \cdot u_6 \\
& + (-36,0245 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 4,5485 \cdot \theta - 0,0523 \cdot 1(\theta)) \cdot u_7 \\
& + (0,0889 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 0,1967 \cdot \theta - 0,0551 \cdot 1(\theta)) \cdot u_8 \\
& + (2,4298 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 0,2147 \cdot \theta - 0,7996 \cdot 1(\theta)) \cdot u_9 \\
& + (10,8674 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 1,1483 \cdot \theta - 2,2179 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{10} \\
& + (-2,0381 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} + 0,3532 \cdot \theta + 0,4642 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{11} \\
& + (-0,5923 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} + 0,715 \cdot \theta - 0,0745 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{12} \\
& + (1,2001 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} - 0,0745 \cdot \theta + 0,0715 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{13} \\
& + (1,5974 \cdot e^{0,1342 \cdot \theta} + 0,1982 \cdot \theta - 0,1416 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{14} + 0,1342.
\end{aligned} \tag{6.29}$$

W przypadku wymuszenia:

• sinusoidalnego, tzn. gdy $u_1-u_{14} = \sin\theta$ (dla $\omega = 1$) zmienne stanu można wyrazić następująco:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= (k_{11} \cdot e^{s_3 \cdot \theta} + k_{12} \cdot \theta + k_{13} \cdot 1(\theta)) \cdot \sin \theta + 0,1342, \\
 x_2 &= (k_{22} \cdot \theta + k_{23} \cdot 1(\theta)) \cdot \sin \theta, \\
 x_3 &= k_{33} \cdot 1(\theta) \cdot \sin \theta,
 \end{aligned} \tag{6.30}$$

przy czym:

$$\begin{aligned}
 s_3 &= 0,1342, \\
 k_{11} &= 2\,484,2353, \\
 k_{12} &= 107,58, \\
 k_{13} &= -72,2246, \\
 k_{22} &= k_{33} = 43,6964, \\
 k_{23} &= 8,9252,
 \end{aligned}$$

czyli zmienna stanu x_1 , a więc także zmienna wyjściowa y_1 mają przebieg wynikający z 3 składowych: składowej eksponentyjnej ($k_{11} \cdot e^{s_3 \cdot \theta}$), składowej prostoliniowej $k_{12} \cdot \theta$ oraz składowej skoku jednostkowego o wartości k_{13} (i odpowiednio zmiennie stanu x_2 oraz x_3),

- skoku jednostkowego, tzn. gdy $u_1 - u_{14} = 1(\theta)$ zmiennie stanu wynoszą:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= (k_{11} \cdot e^{s_3 \theta} + k_{12} \cdot \theta + k_{13} \cdot 1(\theta)) \cdot 1(\theta), \\
 x_2 &= (k_{22} \cdot \theta + k_{23} \cdot 1(\theta)) \cdot 1(\theta), \\
 x_3 &= (k_{33} \cdot 1(\theta)) \cdot 1(\theta),
 \end{aligned} \tag{6.31}$$

- impulsu Diraca, tzn. gdy $u_1 - u_{14} = \delta(\theta)$ zmiennie stanu wynoszą:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= (k_1 \cdot e^{s_3 \theta} + k_2 \cdot \theta + k_3 \cdot 1(\theta)) \cdot \delta(\theta), \\
 x_2 &= (k_{22} \cdot \theta + k_{23} \cdot 1(\theta)) \cdot \delta(\theta), \\
 x_3 &= (k_{33} \cdot 1(\theta)) \cdot \delta(\theta),
 \end{aligned} \tag{6.32}$$

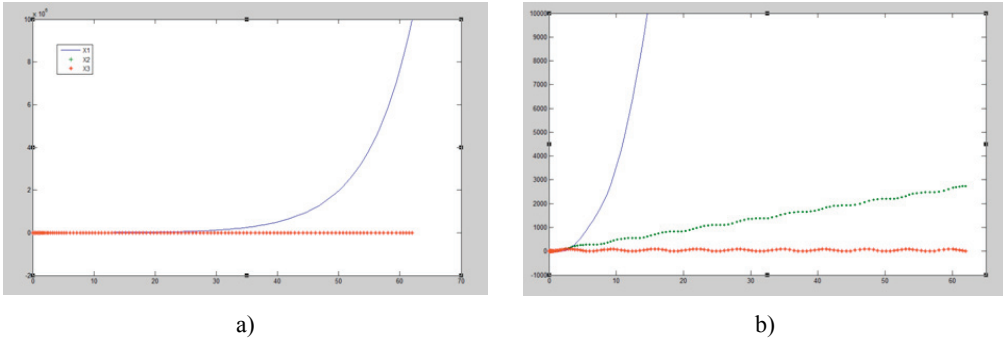
Przebiegi zmiennych stanu: x_1 , x_2 i x_3 występujących w modelu KSE (6.16) otrzymanych w środowisku MATLAB w wyniku rozwiązania układu równań zmiennych stanu w czasie θ ¹⁰⁴ zamieszczono na rys. 6.5.

¹⁰⁴ Rozwiązywanie w czasie układu równań zmiennych stanu w Matlab z wykorzystaniem funkcji ode45:

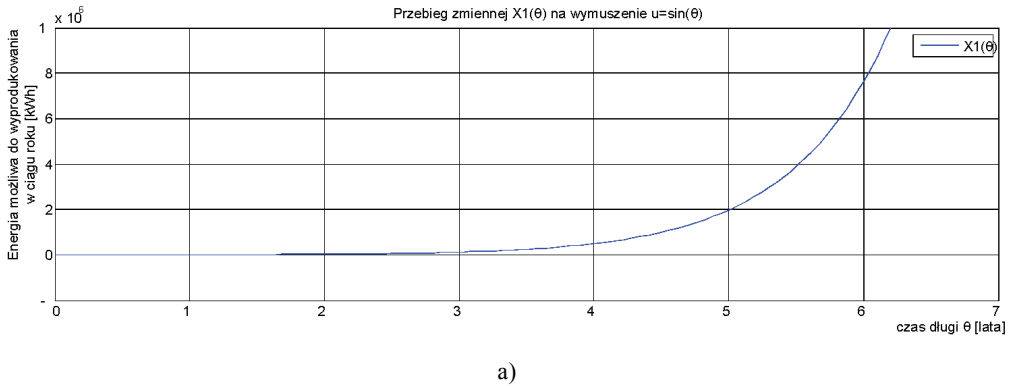
```

function xprim=kse1(tkse,xkse)
u=[sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse);sin(tkse)];
A=[0,1342 1 0; 0 0 1; 0 0 0];
B=[0,343013563367551, -0,196466073063211, -5,19121774603053, -14,5048469093668,
0,155364926402085, 0,0133508185876721, 0,0523419760633733, -0,00271779072167615,
-0,0301527090971463, 0,0884092203462071, 0,130991507592293, 0,0154625644988539,
-0,0285731557112965, -0,0219814655744797;

```



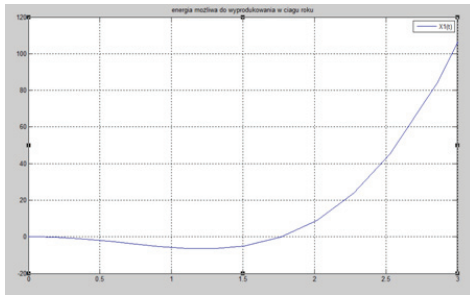
Rys. 6.5. Przebiegi zmiennych stanu modelu ciągłego (ss133) systemu KSE opisanego równaniami zmiennych stanu (6.16) na wymuszenie $\sin(t)$: a) wyniki w skali dla $\theta=0-62$ lat, b) wyniki w skali dla $\theta=0-30$ lat. Oznaczenia: oś y : x_1 – energia elektryczna możliwa do wyprodukowania w ciągu roku [kWh], x_2 – prognozowana moc osiągalna generatorów w ciągu roku [MW], x_3 – szybkość zmian prognozowanej mocy osiągalnej generatorów w ciągu roku [MW/rok], oś x – czas długi (θ) [lata]. Opracowanie własne w Matlabie



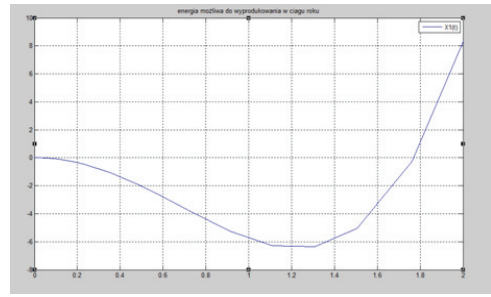
```

-0,0538712635106949, -0,774791061746606, 0,368263066405472, 9,71549145728839,
-0,0529259182073755, 0,0275476833477622, -0,276563635485946, -0,00740840299183130,
0,107301367048242, 0,297567075473233, 0,0623074556509041, -0,00996107830542531,
-0,128658322480848, 0,301927808385236;
-0,144334900395375, 0,326373209014219, 29,5243564724218, 14,1705518163727,
0,0680336110776643, 0,00673903539076534, -0,610373279646815, 0,0263927369801369,
-0,0288269565794885, 0,154056578872873, -0,0473553534880257, -0,00960802128595807,
0,233658739059553, 0,0265544975310566;];
xprim=A*xkse+B*u;
end
Xkse0=[0;0;0];tkse0=0; tksee=61; [tkse,xkse]=ode45('kse1',[tkse0,tkkse],Xkse0);
plot(tkse,xkse(:,1),'-', tkse,xkse(:,2),'-', tkse,xkse(:,3),'*'); plot(tkse,xkse(:,1));

```

b)



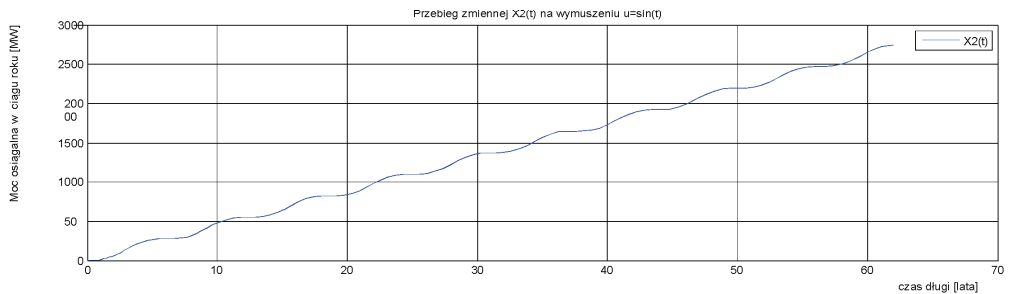
c)

Rys. 6.6. Przebieg zmiennej stanu x_1 (energia elektryczna możliwa do wyprodukowania w ciągu roku) występującej w modelu ciągłym (ss133) systemu KSE przy wymuszeniu $u = \sin(\theta)$:

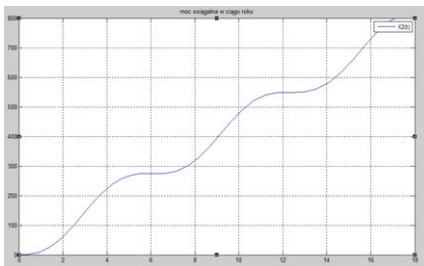
a) wyniki dla $\theta = 0-62$ lata, b) wyniki dla $\theta = 0-3$ lata, c) wyniki dla $\theta = 0-2$ lata.

Oznaczenia: oś y: x_1 – energia elektryczna możliwa do wyprodukowania w ciągu roku [kWh],
oś x – czas długi (θ) [lata]. Opracowanie własne w MATLABIE

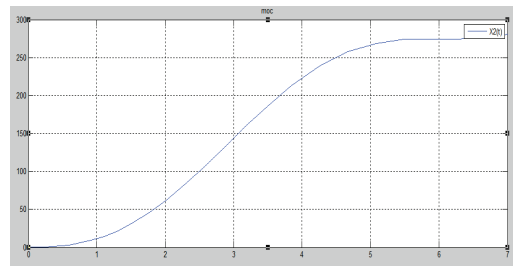
Szczegółowe przebiegi poszczególnych zmiennych stanu na wymuszenie $\sin(t)$ zamieszczono na rys. 6.6–6.8.



a)



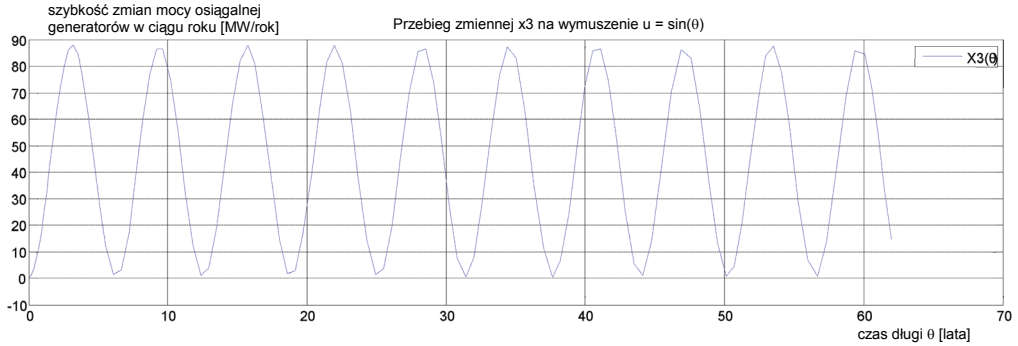
b)



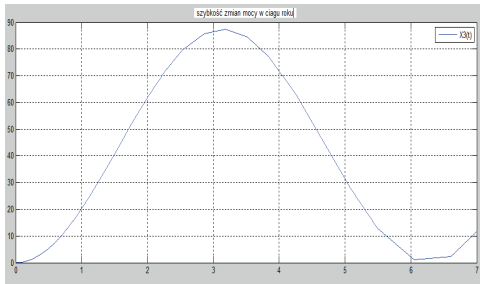
c)

Rys. 6.7. Przebieg zmiennej stanu x_2 (prognozowana moc generatorów w ciągu roku [MW]) występującej w modelu ciągłym (ss133) systemu KSE przy wymuszeniu $u = \sin(\theta)$.

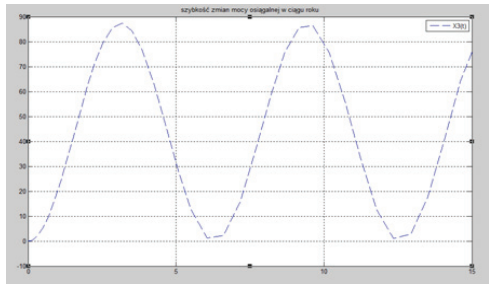
Oznaczenia: oś y: x_1 – prognozowana moc generatorów w ciągu roku [MW],
oś x – czas długi (θ) [lata]. Opracowanie własne w Matlabie



a)



b)



c)

Rys. 6.8. Przebieg zmiennej stanu x_3 (szybkość zmian prognozowanej mocy osiągalnej w ciągu roku) występującej w modelu ciągłym (ss133) systemu KSE na wymuszenie $u = \sin(\theta)$:

a) wyniki dla $\theta = 0-62$ lata, b) wyniki dla $\theta = 0-18$ lat, c) wyniki dla $\theta = 45-62$ lata.

Oznaczenia: oś y : x_3 – szybkość zmian mocy osiągalnej generatorów w ciągu roku [MW/rok], oś x – czas długi (θ) [lata]. Opracowanie własne w Matlabie

Z analizy przebiegów zmiennych stanu wynikają m.in. następujące uwagi:

- rozwój systemu KSE wynikający z przebiegu zmiennej x_1 (energia elektryczna możliwa do wyprodukowania w ciągu roku) jest na granicy stabilności, gdyż dwa pierwiastki równania charakterystycznego $s_{1,2}$ przyjmują wartość 0,
- na przebieg zmiennej stanu x_1 mają wpływ trzy składowe: przebieg eksponencjalny ($k_{11} \cdot e^{\theta/T}$), liniowy $k_{12} \cdot \theta$ oraz skokowy $k_{13} \cdot 1(\theta)$,
- stała czasowa występująca w charakterystyce wykładniczej zmiennej stanu x_1 (T_1) ma wartość ujemną i wynosi:

$$T_1 = -\frac{1}{0,1342} = -7,4516, \quad (6.33)$$

- można zauważyć, że w wyniku wymuszenia sinusoidalnego zmienna stanu:
 - a) x_1 po stosunkowo krótkim stanie przejściowym wywołanym wymuszeniem sinusoidalnym (trwającym w czasie 1,8 lat przy okresie rozwoju 61 lat

– 2,95%) wróciła do stanu równowagi eksponentyjnego wzrostu, czyli zmienna stanu x_1 (energia możliwa do wyprodukowania w ciągu roku) przy wymuszeniu sinusoidalnym posiada przebieg wynikający z drgań sinusoidalnych tłumionych eksponentjalnie ($k_{11} \cdot e^{s_3 \theta}$, szybkość tłumienia określa $s_3 = 0,1342$), drgań sinusoidalnych tłumionych wykładniczo w przedziałach zmienności sinusoidy wzdłuż linii prostej ($k_{12} \cdot \theta$) oraz drgań sinusoidalnych wzdłuż prostej równoległej do osi czasu θ o wartości k_{13} w prawej półpłaszczyźnie,

- b) x_2 w wyniku wymuszenia sinusoidalnego zachowała kierunek zmian, przy czym zmiany były oscylacyjne niezaniżające (pojawiły się drgania wynikające z przebiegu funkcji $\sin(\theta)$),
- c) x_3 w wyniku wymuszenia sinusoidalnego miała przebieg sinusoidalny o drganiach niegasnących wynikających z funkcji $\sin(\theta)$.

6.3. Metamodel rozwoju KSE w przestrzeni stanów

Przeprowadzono proces identyfikacji modelu KSE, w którym za zmienne wejściowe przyjęto wartości współczynników wielomianów $B_i(q)$, a za zmienne wyjściowe wartości współczynników wielomianu $A(q)$ (tabela 6.3 oraz 6.4). Na przykład dla wyjścia y_1 w wyniku identyfikacji na zbiorze 30 modeli rozwoju KSE uzyskano model dyskretny arx835 z dokładnością 96.04% (rys. 6.9) o następującej macierzy \mathbf{th} :

$$A1_m(q) \cdot y_m(\theta) = B_m(q) \cdot u_m(\theta) + e_m(\theta) \quad (6.34)$$

gdzie:

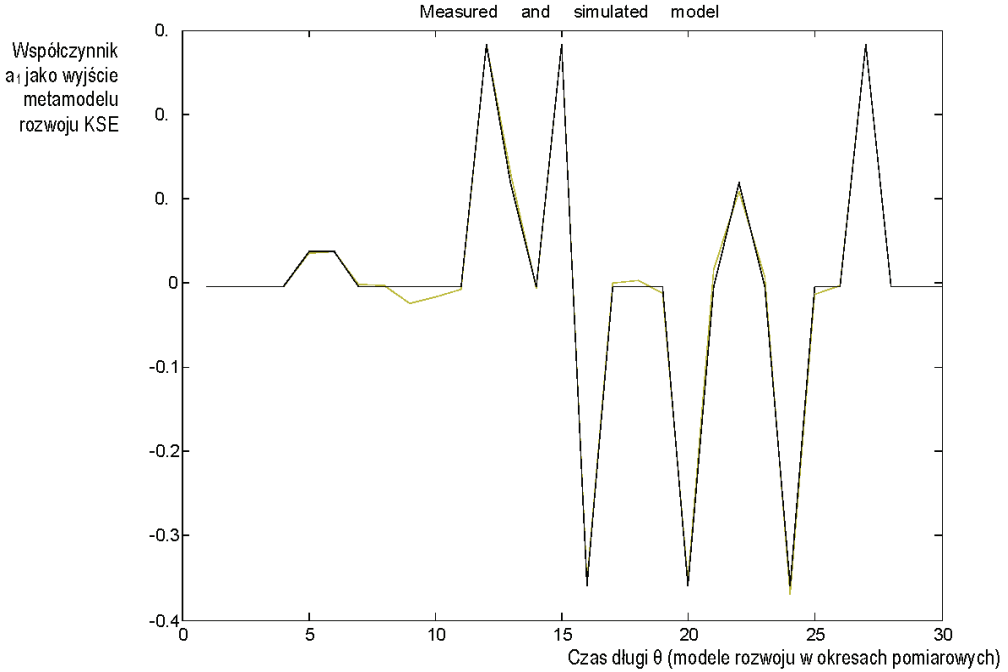
$$A1_m(q) = 1 + 0,09956 \cdot q^{-1} + 0,183 \cdot q^{-2} + 13,85 \cdot q^{-3} - 0,413 \cdot q^{-4} + 0,2743 \cdot q^{-5} + 0,06655 \cdot q^{-6} + 0,3344 \cdot q^{-7} + 0,1511 \cdot q^{-8},$$

$$B1_m(q) = 22,54 \cdot q^{-3}, \quad B2_m(q) = 15,46 \cdot q^{-3}, \quad B3_m(q) = 15,49 \cdot q^{-3},$$

$$B4_m(q) = -4,132 \cdot q^{-3}, \quad B5_m(q) = 6,182 \cdot q^{-3}, \quad B6_m(q) = 22,53 \cdot q^{-3},$$

$$B7_m(q) = 5,755 \cdot q^{-3}.$$

Następnie w wyniku transformacji metamodelu dyskretnego arx835 na metamodel dyskretny w przestrzeni stanów w środowisku MATLAB z wykorzystaniem funkcji th2ss() otrzymano metamodel rozwoju KSE o następującej postaci równań stanu:



Rys. 6.9. Metamodel dyskretny arx835 KSE w zestawieniu z modelem rozwoju KSE (zgodność metamodelu z danymi wynikającymi z modeli rozwoju KSE 94,88%) dla wyjścia a_1 – współczynnika stojącego przy q^{-1} w wielomianie $A_1(q)$ oraz dla wszystkich współczynników $B_i(q)$ modelu KSE typu MISO dla wyjścia y_1 (wartość mocy osiągalnej w elektrowniach (ogółem) [MW]).
Oznaczenia: oś X – czas długi θ (okresy pomiarowe rozwoju),
oś Y – współczynnik a_1 (stojący przy q^{-1}) jako wyjście y_{1m} modelu systemu KSE

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta \theta} = -0,0996 \cdot x_1 + x_2 + 22,5359 \cdot x_{10} + 15,4594 \cdot x_{12} + 15,4945 \cdot x_{14} - 4,1325 \cdot x_{16} \\ + 6,1824 \cdot x_{18} + 22,533 \cdot x_{20} + 5,7546 \cdot x_{22},$$

$$\frac{\Delta x_2}{\Delta \theta} = -0,183 \cdot x_1 + x_3, \quad \frac{\Delta x_3}{\Delta \theta} = -13,8464 \cdot x_1 + x_4, \quad \frac{\Delta x_4}{\Delta \theta} = 0,413 \cdot x_1 + x_5,$$

$$\frac{\Delta x_5}{\Delta \theta} = -0,2743 \cdot x_1 + x_6, \quad \frac{\Delta x_6}{\Delta \theta} = -0,0665 \cdot x_1 + x_7,$$

$$\frac{\Delta x_7}{\Delta \theta} = -0,3344 \cdot x_1 + x_8 + 22,5359 \cdot x_{10} + 15,4594 \cdot x_{12} + 15,4945 \cdot x_{14}, \quad (6.35)$$

$$\frac{\Delta x_8}{\Delta \theta} = -0,1511 \cdot x_1 + x_7, \quad \frac{\Delta x_9}{\Delta \theta} = u_1, \quad \frac{\Delta x_{10}}{\Delta \theta} = x_9, \quad \frac{\Delta x_{11}}{\Delta \theta} = u_2, \quad \frac{\Delta x_{12}}{\Delta \theta} = x_{11},$$

$$\frac{\Delta x_{13}}{\Delta \theta} = u_3, \quad \frac{\Delta x_{14}}{\Delta \theta} = x_{13}, \quad \frac{\Delta x_{15}}{\Delta \theta} = u_4, \quad \frac{\Delta x_{16}}{\Delta \theta} = x_{15}, \quad \frac{\Delta x_{17}}{\Delta \theta} = u_5,$$

$$\frac{\Delta x_{18}}{\Delta \theta} = x_{17}, \quad \frac{\Delta x_{19}}{\Delta \theta} = u_6, \quad \frac{\Delta x_{20}}{\Delta \theta} = x_{19}, \quad \frac{\Delta x_{21}}{\Delta \theta} = u_5, \quad \frac{\Delta x_{22}}{\Delta \theta} = x_{21},$$

oraz równaniu wyjścia:

$$y_1 = c_{11} x_1, \quad (6.36)$$

Otrzymano zatem w tym przypadku 22 zmiennych stanu opisujących metamodel dyskretny KSE, przy czym poszczególne zmienne stanu mają interpretację wynikającą z odpowiadającym im elementom członów wielomianów $A1_m(q)$ oraz $B1_m(q)$.

Z kolei metamodel dyskretny KSE uzyskany w wyniku identyfikacji przeprowadzonej na 33 modelach rozwoju ma postać:

$$A(q) = 1 + 0.06354 (+0.4656)q^{-1} - 0.01576 (+0.397)q^{-2} + 0.1763 (+0.4132)q^{-3} + 0.4147 (+0.5704)q^{-4} + \\ - 0.137 (+0.4714)q^{-5} + 0.3727 (+0.3694)q^{-6} + 0.1787 (+0.4451)q^{-7} - 16.13 (+24.22)q^{-8} + \\ - 0.2997 (+0.454)q^{-9} - 0.3053 (+0.5525)q^{-10}$$

$$B1(q) = -25.41 (+39.44)q^{-8}$$

$$B2(q) = -17.61 (+26.17)q^{-8}$$

$$B3(q) = -17.89 (+27.66)q^{-8}$$

$$B4(q) = 5.492 (+8.53)q^{-8}$$

$$B5(q) = -7.394 (+11.22)q^{-8}$$

$$B6(q) = -25.67 (+40)q^{-8}$$

$$B7(q) = -6.967 (+10.57)q^{-8}$$

$$B8(q) = 0$$

$$B9(q) = -0.2072 (+0.3246)q^{-8}$$

(6.37)

Dokonując następnie przekształcenia metamodelu z modelu dyskretnego arx1018 na model ciągły th1018, z wykorzystaniem funkcji TUSTIN otrzymuje się:

>> thm1018=d2c(arxm1018,'TUSTIN')

Continuous-time IDPOLY model: $y(t) = [B(s)/F(s)]u(t) + [C(s)/D(s)]e(t)$

$$\begin{aligned}
 B1(s) &= 1.735 s^{17} + 3.471 s^{16} - 55.53 s^{15} - 111.1 s^{14} + 777.5 s^{13} + 1555 s^{12} - 6220 s^{11} - 1.244e004 s^{10} + \\
 &\quad 3.11e004 s^9 + 6.22e004 s^8 - 9.952e004 s^7 - 1.99e005 s^6 + 1.99e005 s^5 + 3.981e005 s^4 - 2.275e005 s^3 - \\
 &\quad 4.549e005 s^2 + 1.137e005 s + 2.275e005 \\
 B2(s) &= 1.203 s^{17} + 2.406 s^{16} - 38.49 s^{15} - 76.98 s^{14} + 538.8 s^{13} + 1078 s^{12} - 4311 s^{11} - 8622 s^{10} + \\
 &\quad + 2.155e004 s^9 + 4.311e004 s^8 - 6.897e004 s^7 - 1.379e005 s^6 + 1.379e005 s^5 + 2.759e005 s^4 + \\
 &\quad - 1.577e005 s^3 - 3.153e005 s^2 + 7.883e004 s + 1.577e005 \\
 B3(s) &= 1.222 s^{17} + 2.444 s^{16} - 39.11 s^{15} - 78.22 s^{14} + 547.5 s^{13} + 1095 s^{12} - 4380 s^{11} - 8761 s^{10} + \\
 &\quad + 2.19e004 s^9 + 4.38e004 s^8 - 7.009e004 s^7 - 1.402e005 s^6 + 1.402e005 s^5 + 2.803e005 s^4 \\
 &\quad - 1.602e005 s^3 - 3.204e005 s^2 + 8.01e004 s + 1.602e005 \\
 B4(s) &= -0.3751 s^{17} - 0.7503 s^{16} + 12 s^{15} + 24.01 s^{14} - 168.1 s^{13} - 336.1 s^{12} + 1344 s^{11} + 2689 s^{10} - 6722 s^9 - \\
 &\quad 1.344e004 s^8 + 2.151e004 s^7 + 4.302e004 s^6 - 4.302e004 s^5 - 8.605e004 s^4 + 4.917e004 s^3 + \\
 &\quad + 9.834e004 s^2 - 2.458e004 s - 4.917e004 \\
 B5(s) &= 0.505 s^{17} + 1.01 s^{16} - 16.16 s^{15} - 32.32 s^{14} + 226.3 s^{13} + 452.5 s^{12} - 1810 s^{11} - 3620 s^{10} + 9050 s^9 + \\
 &\quad + 1.81e004 s^8 - 2.896e004 s^7 - 5.792e004 s^6 + 5.792e004 s^5 + 1.158e005 s^4 - 6.62e004 s^3 - 1.324e005 s^2 + \\
 &\quad + 3.31e004 s + 6.62e004 \quad (6.38) \\
 B6(s) &= 1.754 s^{17} + 3.507 s^{16} - 56.11 s^{15} - 112.2 s^{14} + 785.6 s^{13} + 1571 s^{12} - 6285 s^{11} - 1.257e004 s^{10} + \\
 &\quad + 3.142e004 s^9 + 6.285e004 s^8 - 1.006e005 s^7 - 2.011e005 s^6 + 2.011e005 s^5 + 4.022e005 s^4 + \\
 &\quad - 2.298e005 s^3 - 4.597e005 s^2 + 1.149e005 s + 2.298e005 \\
 B7(s) &= 0.4759 s^{17} + 0.9517 s^{16} - 15.23 s^{15} - 30.46 s^{14} + 213.2 s^{13} + 426.4 s^{12} - 1706 s^{11} - 3411 s^{10} + \\
 &\quad + 8528 s^9 + 1.706e004 s^8 - 2.729e004 s^7 - 5.458e004 s^6 + 5.458e004 s^5 + 1.092e005 s^4 - 6.237e004 s^3 + \\
 &\quad - 1.247e005 s^2 + 3.119e004 s + 6.237e004 \\
 B8(s) &= -1.517e-017 s^{17} - 1.863e-017 s^{16} + 1.061e-015 s^{15} + 9.195e-015 s^{14} + 7.702e-014 s^{13} + 6.489e-013 s^{12} + \\
 &\quad + 3.882e-012 s^{11} + 1.626e-011 s^{10} + 5.105e-011 s^9 + 1.252e-010 s^8 + 2.406e-010 s^7 + 3.581e-010 s^6 + \\
 &\quad + 4.152e-010 s^5 + 3.887e-010 s^4 + 2.968e-010 s^3 + 1.627e-010 s^2 + 4.499e-011 s + 5.443e-013 \\
 B9(s) &= 0.01415 s^{17} + 0.0283 s^{16} - 0.4529 s^{15} - 0.9057 s^{14} + 6.34 s^{13} + 12.68 s^{12} - 50.72 s^{11} - 101.4 s^{10} + \\
 &\quad + 253.6 s^9 + 507.2 s^8 - 811.5 s^7 - 1623 s^6 + 1623 s^5 + 3246 s^4 - 1855 s^3 - 3710 s^2 + 927.4 s + 1855 \\
 C(s) &= s^{10} + 20 s^9 + 180 s^8 + 960 s^7 + 3360 s^6 + 8064 s^5 + 1.344e004 s^4 + 1.536e004 s^3 + 1.152e004 s^2 + \\
 &\quad + 5120 s + 1024 \\
 D(s) &= s^{10} - 14.6 s^9 + 48.17 s^8 - 146.3 s^7 - 425.9 s^6 + 265.8 s^5 - 1561 s^4 - 2646 s^3 + 3245 s^2 - 3941 s + 1027
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F1(s) &= s^{17} - 0.6027 s^{16} - 72.27 s^{15} - 418.5 s^{14} - 1956 s^{13} - 1.2e004 s^{12} - 5.696e004 s^{11} - 1.774e005 s^{10} + \\
 &\quad - 4.076e005 s^9 - 8.146e005 s^8 - 1.428e006 s^7 - 1.874e006 s^6 - 1.644e006 s^5 - 1.124e006 s^4 + \\
 &\quad - 9.585e005 s^3 - 6.604e005 s^2 - 4.454e004 s + 1.314e005 \\
 F2(s) &= s^{17} - 0.6027 s^{16} - 72.27 s^{15} - 418.5 s^{14} - 1956 s^{13} - 1.2e004 s^{12} - 5.696e004 s^{11} - 1.774e005 s^{10} + \\
 &\quad - 4.076e005 s^9 - 8.146e005 s^8 - 1.428e006 s^7 - 1.874e006 s^6 - 1.644e006 s^5 - 1.124e006 s^4 + \\
 &\quad - 9.585e005 s^3 - 6.604e005 s^2 - 4.454e004 s + 1.314e005 \\
 F3(s) &= s^{17} - 0.6027 s^{16} - 72.27 s^{15} - 418.5 s^{14} - 1956 s^{13} - 1.2e004 s^{12} - 5.696e004 s^{11} - 1.774e005 s^{10} + \\
 &\quad - 4.076e005 s^9 - 8.146e005 s^8 - 1.428e006 s^7 - 1.874e006 s^6 - 1.644e006 s^5 - 1.124e006 s^4 + \\
 &\quad - 9.585e005 s^3 - 6.604e005 s^2 - 4.454e004 s + 1.314e005 \\
 F4(s) &= s^{17} - 0.6027 s^{16} - 72.27 s^{15} - 418.5 s^{14} - 1956 s^{13} - 1.2e004 s^{12} - 5.696e004 s^{11} - 1.774e005 s^{10} + \\
 &\quad - 4.076e005 s^9 - 8.146e005 s^8 - 1.428e006 s^7 - 1.874e006 s^6 - 1.644e006 s^5 - 1.124e006 s^4 + \\
 &\quad - 9.585e005 s^3 - 6.604e005 s^2 - 4.454e004 s + 1.314e005 \\
 F5(s) &= s^{17} - 0.6027 s^{16} - 72.27 s^{15} - 418.5 s^{14} - 1956 s^{13} - 1.2e004 s^{12} - 5.696e004 s^{11} - 1.774e005 s^{10} + \\
 &\quad - 4.076e005 s^9 - 8.146e005 s^8 - 1.428e006 s^7 - 1.874e006 s^6 - 1.644e006 s^5 - 1.124e006 s^4 + \\
 &\quad - 9.585e005 s^3 - 6.604e005 s^2 - 4.454e004 s + 1.314e005 \\
 F6(s) &= s^{17} - 0.6027 s^{16} - 72.27 s^{15} - 418.5 s^{14} - 1956 s^{13} - 1.2e004 s^{12} - 5.696e004 s^{11} - 1.774e005 s^{10} + \\
 &\quad - 4.076e005 s^9 - 8.146e005 s^8 - 1.428e006 s^7 - 1.874e006 s^6 - 1.644e006 s^5 - 1.124e006 s^4 + \\
 &\quad - 9.585e005 s^3 - 6.604e005 s^2 - 4.454e004 s + 1.314e005 \\
 F7(s) &= s^{17} - 0.6027 s^{16} - 72.27 s^{15} - 418.5 s^{14} - 1956 s^{13} - 1.2e004 s^{12} - 5.696e004 s^{11} - 1.774e005 s^{10} + \\
 &\quad - 4.076e005 s^9 - 8.146e005 s^8 - 1.428e006 s^7 - 1.874e006 s^6 - 1.644e006 s^5 - 1.124e006 s^4 + \\
 &\quad - 9.585e005 s^3 - 6.604e005 s^2 - 4.454e004 s + 1.314e005 \\
 F8(s) &= s^{17} - 0.6027 s^{16} - 72.27 s^{15} - 418.5 s^{14} - 1956 s^{13} - 1.2e004 s^{12} - 5.696e004 s^{11} - 1.774e005 s^{10} + \\
 &\quad - 4.076e005 s^9 - 8.146e005 s^8 - 1.428e006 s^7 - 1.874e006 s^6 - 1.644e006 s^5 - 1.124e006 s^4 + \\
 &\quad - 9.585e005 s^3 - 6.604e005 s^2 - 4.454e004 s + 1.314e005 \\
 F9(s) &= s^{17} - 0.6027 s^{16} - 72.27 s^{15} - 418.5 s^{14} - 1956 s^{13} - 1.2e004 s^{12} - 5.696e004 s^{11} - 1.774e005 s^{10} + \\
 &\quad - 4.076e005 s^9 - 8.146e005 s^8 - 1.428e006 s^7 - 1.874e006 s^6 - 1.644e006 s^5 - 1.124e006 s^4 + \\
 &\quad - 9.585e005 s^3 - 6.604e005 s^2 - 4.454e004 s + 1.314e005
 \end{aligned}$$

Estimated using ARX from data set eDat

Loss function 0.0090559 and FPE 0.0194839

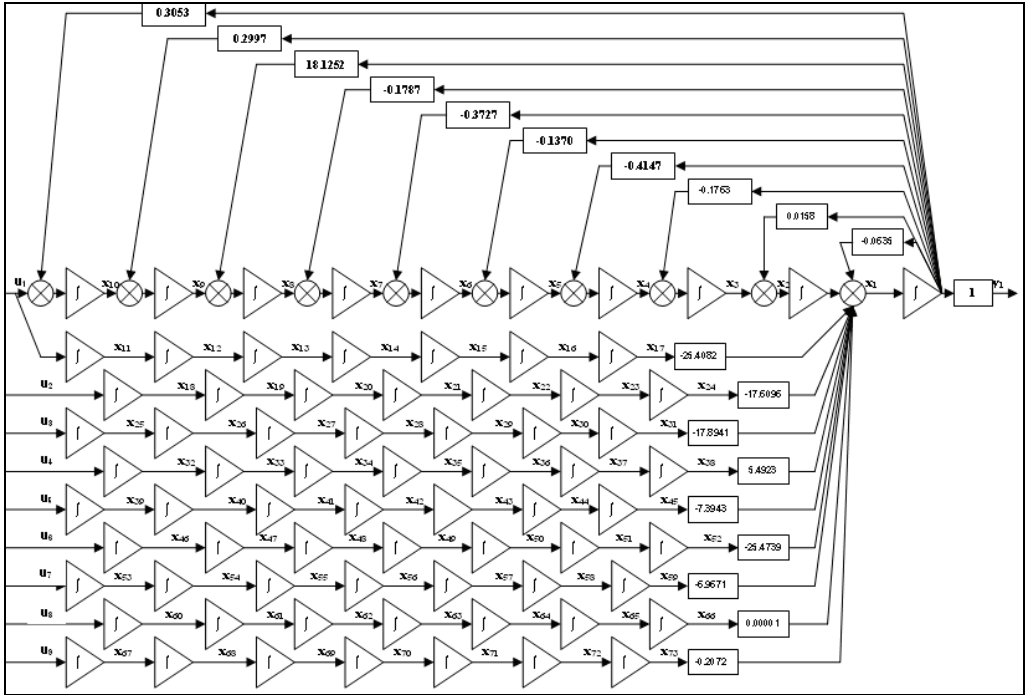
Następnie przekształcając model ciągły th1018 na model ciągły w przestrzeni stanów¹⁰⁵ otrzymuje się model postaci:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= -0,0635 \cdot x_1 + x_2 - 25,4082 \cdot x_{17} - 17,6096 \cdot x_{24} \\
 &- 17,8941 \cdot x_{31} + 5,4923 \cdot x_{38} - 7,3943 \cdot x_{45} - 25,6739 \cdot x_{52} \\
 &- 6,9671 \cdot x_{59} + 0,00001 \cdot x_{66} - 0,2072 \cdot x_{73} - 0,0635 \cdot e_1 \\
 \dot{x}_2 &= 0,0158 \cdot x_1 + x_3 + 0,0158 \cdot e_2 \\
 \dot{x}_3 &= -0,1763 \cdot x_1 + x_4 - 0,1763 \cdot e_3 \\
 \dot{x}_4 &= -0,4147 \cdot x_1 + x_5 - 0,4147 \cdot e_4 \\
 \dot{x}_5 &= 0,1370 \cdot x_1 + x_6 + 0,3727 \cdot e_5 \\
 \dot{x}_6 &= -0,3727 \cdot x_1 + x_7 - 0,3727 \cdot e_6 \\
 \dot{x}_7 &= -0,1787 \cdot x_1 + x_8 - 0,1787 \cdot e_7 \\
 \dot{x}_8 &= 18,1252 \cdot x_1 + x_9 + 16,1252 \cdot e_8 \\
 \dot{x}_9 &= 0,2997 \cdot x_1 + x_{10} + 0,2997 \cdot e_9, \\
 \dot{x}_{10} &= 0,3053 \cdot x_1 + x_{11} + 0,3053 \cdot e_{10},
 \end{aligned} \tag{6.39}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{11} &= u_1, \dot{x}_{12} = x_{11}, \dot{x}_{13} = x_{12}, \dot{x}_{14} = x_{13}, \dot{x}_{15} = x_{14}, \dot{x}_{16} = x_{15}, \dot{x}_{17} = x_{16}, \\
 \dot{x}_{18} &= u_2, \dot{x}_{19} = x_{18}, \dot{x}_{20} = x_{19}, \dot{x}_{21} = x_{20}, \dot{x}_{22} = x_{21}, \dot{x}_{23} = x_{22}, \dot{x}_{24} = x_{23}, \\
 \dot{x}_{25} &= u_3, \dot{x}_{26} = x_{25}, \dot{x}_{27} = x_{26}, \dot{x}_{28} = x_{27}, \dot{x}_{29} = x_{28}, \dot{x}_{30} = x_{29}, \dot{x}_{31} = x_{30}, \\
 \dot{x}_{32} &= u_4, \dot{x}_{33} = x_{32}, \dot{x}_{34} = x_{33}, \dot{x}_{35} = x_{34}, \dot{x}_{36} = x_{35}, \dot{x}_{37} = x_{35}, \dot{x}_{38} = x_{37}, \\
 \dot{x}_{39} &= u_5, \dot{x}_{40} = x_{39}, \dot{x}_{41} = x_{40}, \dot{x}_{42} = x_{41}, \dot{x}_{43} = x_{42}, \dot{x}_{44} = x_{43}, \dot{x}_{45} = x_{44}, \\
 \dot{x}_{46} &= u_6, \dot{x}_{47} = x_{46}, \dot{x}_{48} = x_{47}, \dot{x}_{49} = x_{48}, \dot{x}_{50} = x_{49}, \dot{x}_{51} = x_{50}, \dot{x}_{52} = x_{51}, \\
 \dot{x}_{53} &= u_7, \dot{x}_{54} = x_{53}, \dot{x}_{55} = x_{54}, \dot{x}_{56} = x_{55}, \dot{x}_{57} = x_{56}, \dot{x}_{58} = x_{57}, \dot{x}_{59} = x_{58}, \\
 \dot{x}_{60} &= u_8, \dot{x}_{61} = x_{60}, \dot{x}_{62} = x_{61}, \dot{x}_{63} = x_{62}, \dot{x}_{64} = x_{63}, \dot{x}_{65} = x_{64}, \dot{x}_{66} = x_{65}, \\
 \dot{x}_{67} &= u_9, \dot{x}_{68} = x_{67}, \dot{x}_{69} = x_{68}, \dot{x}_{70} = x_{69}, \dot{x}_{71} = x_{70}, \dot{x}_{72} = x_{71}, \dot{x}_{73} = x_{72}, \\
 \mathcal{Y}_1 &= x_1.
 \end{aligned}$$

¹⁰⁵ [Am1018c Bm1018c Cm1018c Dm1018c Km1018c X01311]=th2ss(th1018).

Z analizy równań stanu (6.8) wynika m.in., że: zasadnicze znaczenie w modelu odgrywają zmienne stanu x_1 – x_{10} wynikające z 10 pierwszych równań stanu. Pozostałe zmienne stanu wyznaczone są bezpośrednio przez kolejne zmienne wejściowe (9 zmiennych stanu: $x_{11}, x_{18}, x_{25}, x_{32}, x_{39}, x_{46}, x_{53}, x_{60}, x_{67}$) oraz za pomocą 9 zmiennych wejściowych (rys. 6.10).



Rys. 6.10. Schemat blokowy zmiennych stanu metamodelu rozwoju KSE.

Oznaczenia w tekście

Można zatem zinterpretować poszczególne zmienne stanu w relacji do współczynników identyfikowanego modelu ar_x , to jest współczynników wielomianu $A_1(q)$ związanego z wyjściem y_1 (moc osiągalna w elektrowniach ogółem [MW]) oraz wielomianów $B_i(q)$ związanych z poszczególnymi zmiennymi wejściowymi modelu rozwoju KSE. Zmienna stanu x_1 może zostać zinterpretowana w kategoriach wyjścia y_1 , które reprezentuje współczynnik wielomianu a_1 (stojący przy q^{-1} w wielomianie $A(q)$), zmienne stanu $x_{11}, x_{18}, x_{25}, x_{32}, x_{39}, x_{46}, x_{53}, x_{60}, x_{67}$ mogą zostać zinterpretowane jako współczynniki wielomianu $B_1(q)$ związanego ze zmienną wejściową u_1 (zatrudnienie w elektrowniach ogółem [osoby]).

7. Ocena rozwoju KSE

W ogólnym przypadku model oceny rozwoju systemu zawiera: informację o systemie rozwoju, czyli informację m.in. o: wejściach, wyjściach oraz zmiennych stanu, kryterium lub zespół kryteriów oceny jakości, a także algorytm na określenie wartości kryterium oceny jakości rozwoju [1, 2, 5, 6].

Jakość procesu rozwoju systemu EE można przedstawić jako różnicę między założoną $\Delta y_0(K, \theta)$ i rzeczywistą charakterystyką wyjściową $\Delta y(K, \theta)$ systemu. Dla przypadku wielowymiarowego tę rozbieżność można zapisać za Robertem Staniszewskim [153] jako różnicę dwóch wielowymiarowych wektorów¹⁰⁶:

$$\overline{\Delta y}(\theta) = |\overline{\Delta y_0} - \overline{\Delta y}|, \quad (7.1)$$

co to prowadzi do czterech wskaźników efektywności dynamicznej (rozdz. 2.3).

Badania ocenowe rozwoju systemu EE, tak jak każda ocena eksploatacji systemu EE w sensie odnawiania lub użytkowania, czy też ocena pracy SEE są naturalną konsekwencją badań identyfikacyjnych i po zweryfikowaniu modelu rozwoju przeprowadza się ocenę wyników badań, uzyskiwanych na modelu rozwoju.

Jednak dla zagadnień rozwojowych, rozumianych jako zmiany strukturalne i parametryczne systemu EE, a nie planowanie, prognozowanie czy programowanie rozwoju, przeprowadzenie odpowiednich eksperymentów ocenowych wiąże się z potrzebą wygenerowania wielu modeli rozwoju systemu EE dla konkretnego czasu długiego $\Delta\theta$, np. w wersji kroczącej z postępowaniem o jeden rok.

Ze względu na to, że KSE jest systemem sterowania, stąd można otrzymać odpowiednie modele rozwoju w przestrzeni stanów i dopiero na ich bazie przeprowadzać wiarygodne badania ocenowe np. przebiegu poszczególnych wartości własnych, elementów macierzy **A**, **B**, **C** i **D**, czy też rzędu macierzy i liczby zmiennych stanu wynikających z poszczególnych modeli rozwoju.

Przyjęcie do oceny rozwoju kryteriów rozwoju tego typu jak bezpieczeństwo rozwoju (obejmujące ustawowo także względy ekologiczne), czy efektywność rozwoju,

¹⁰⁶ Specyficzna norma.

umożliwia ocenę rozwoju systemu EE w czasie długim θ i w ten sposób pozwala między innymi na wyspecyfikowanie sygnałów ostrzegawczych dla projektantów rozwoju, planistów rozwoju, a nawet strategów rozwoju KSE¹⁰⁷.

Rozbieżność (7.1) dla systemu KSE kształtują z jednej strony rozwiązania prawno-organizacyjne, wynikające z ustawy z dnia 10 kwietnia 1997 r. *Prawo energetyczne*¹⁰⁸ a z drugiej strony naukowo-techniczne. Warto np. zauważyć, że z art. 3 pkt. 16 ww. ustawy wynika, że użyte określenie bezpieczeństwo energetyczne oznacza stan gospodarki umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, przy zachowaniu wymagań ochrony środowiska, a art. 13 ustawy ustala cel polityki energetycznej państwa jako zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju, wzrostu konkurencyjności gospodarki i jej efektywności energetycznej, a także ochrony środowiska.

Z drugiej strony widzenie systemu EE jako systemu sterowania nie jest zupełnie nowe, gdyż w literaturze przedmiotu z zakresu elektroenergetyki od wielu już lat podejmowane były próby ujęcia systemu EE jako systemu sterowania, w zasadzie od drugiej połowy XX wieku. Wystarczy przytoczyć tutaj prace następujących autorów: S. Bernasa [5], W. Bojarskiego [10], M. Ciegielskiego [21, 22], J. Kozuchowskiego [76], Z. Kremensa i M. Sobierajskiego [78], J. Kulczyckiego [81, 82], R. Kulikowskiego [84], J. Machowskiego [96–98], J. Małki [100–106], J. Marzeckiego [111], J. Paski [126, 127], R. Zajczyka [219] i wielu innych.

W literaturze przedmiotu znane są odpowiednie modele sterowania pracą SEE, modele niezawodności SEE, modele badania stabilności, modele regulacji napięciowej, kątowej, lokalnej oraz globalnej, a nawet modele eksploatacji. Jednak do tej pory nie opracowano odpowiednich modeli rozwoju SEE w ujęciu teorii sterowania i systemów, a w ślad za tym odpowiednich modeli oceny rozwoju. Niniejsza praca może być uzupełnieniem teorii i praktyki w zakresie badania prawidłowości rozwoju systemu EE oraz projektowania rozwoju SEE dla prac prognostycznych, planistycznych i programowych.

¹⁰⁷ Ważne jest podkreślenie, że chodzi o kryterium oceny rozwoju, które nie jest kryterium optymalizacji rozwoju.

¹⁰⁸ Zgodnie z art. 1 ust. 2 ustawy z dnia 10 kwietnia 1997 r. *Prawo energetyczne* celem ustawy jest tworzenie warunków do zrównoważonego rozwoju kraju, zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego, oszczędnego i racjonalnego użytkowania paliw i energii, rozwoju konkurencji, przeciwdziałania negatywnym skutkom naturalnych monopolii, uwzględniania wymagań ochrony środowiska, zobowiązań wynikających z umów międzynarodowych oraz równoważenia interesów przedsiębiorstw energetycznych i odbiorców paliw i energii, Dz.U. z 2006 r. Nr 86, poz. 625, tekst jednolity, ze zm.

7.1. Analiza modeli rozwoju ze względu na bezpieczeństwo i efektywność

Zarówno w eksperymencie pierwszym dotyczącym rozwoju systemu EE na bazie danych testowych IEEE RTS, jak i w eksperymencie drugim dotyczącym rozwoju systemu KSE uzyskano modele rozwoju dla zmiennych wejściowych oraz dla poszczególnych zmiennych wyjściowych (modele MISO). W eksperymencie pierwszym IEEE RTS otrzymano katalog 20 modeli rozwoju systemu EE, a w eksperymencie drugim otrzymano katalog 33 modeli rozwoju systemu KSE. Przykładem modeli (jednego spośród 33 modeli) uzyskanego w eksperymencie drugim z dokładnością 99,14% w stosunku do systemu rzeczywistego KSE (model optymalny) w latach 1969–1998 był model dyskretny $arx133$ (macierz **th133**), w którym stopień wielomianu $A_1(q)$ wynosił $na = 1$, stopnie wielomianów związanych z poszczególnymi wejściami wynosiły $nb = 3$ oraz czas opóźnienia wyjścia do wejścia wynosił $nk = 3$.

W obu eksperymentach zauważono występowanie prawidłowości zmian modelu systemu, m.in. w zakresie struktury modelu oraz dla wartości i struktury parametrów. W modelu drugim, w eksperymencie drugim, w przeważającej liczbie występował model typu $arx131$, który zbliżony był do danych rzeczywistych KSE w 99,03%, a co więcej modele typu $arx131$ dla przyjętego stopnia dokładności w zasadzie nie różniły się wartościami parametrów.

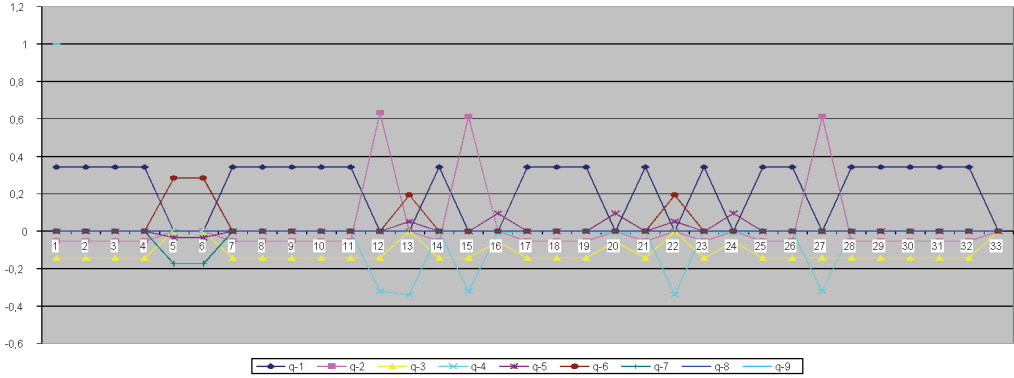
Natomiast identyfikacja przeprowadzona w eksperymencie drugim dla 62 lat (1946–2007) dla wyjścia y_1 wygenerowała model typu $arx133$ z dokładnością 99,14%. Warto zwrócić uwagę na fakt występowania tylko sześciu typów modeli dyskretnych w postaci macierzy **th**, a mianowicie modeli: $arx131$, $arx135$, $arx132$, $arx134$, $arx133$, $arx619$, co wskazuje na wystąpienie sześciu zmian strukturalnych, które pojawiły się w KSE w rozważanym czasie i rozważanym zakresie eksperymentu.

Otrzymano w każdym eksperymencie bardzo dużą dokładność modeli, przekraczającą 95%, a w wielu przypadkach przekraczającą 99%. W takim sensie uzyskane modele rozwoju nazwano modelami optymalnymi. Podstawowym kryterium w doborze modeli był minimalny uchyb między zmiennymi wyjściowymi modelu i systemu generowanymi dla tych samych zmiennych wejściowych.

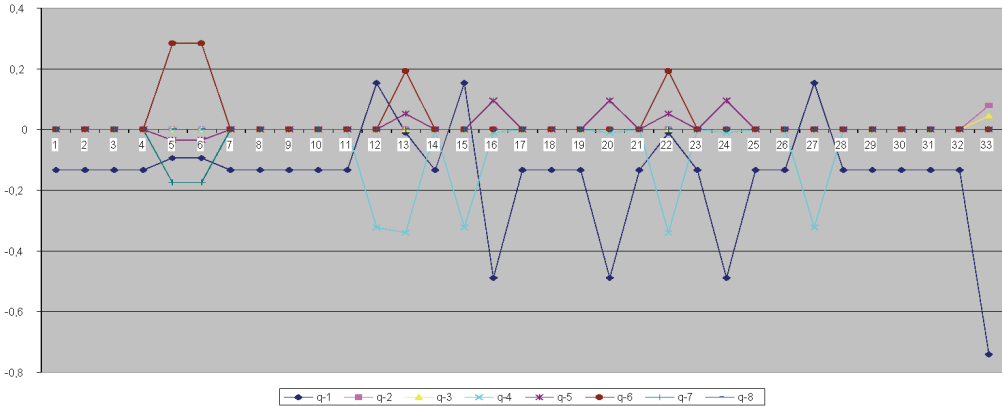
Dla systemu KSE przebiegi współczynników wielomianów 33 modeli parametrycznych dyskretnych dla wyjścia y_1 zostały zobrazowane na rys. 7.3.

Z analizy przebiegu współczynników wielomianów $A_i(q)$ oraz $B_j(q)$ w poszczególnych modelach MISO (dla wszystkich wejść oraz kolejnych czterech wyjść) wynikają prawidłowości dotyczące intensywności wpływu na projektowane wielkości wyjściowe danych dotyczących systemu KSE z lat przeszłych. Warto zauważyć, że pewne wielkości z przeszłości miały na daną wielkość wyjściową wpływ dodatni, a inne ujemny. Możliwe było przy tym określenie granicy dolnej oraz granicy górnej dla każdego współczynnika i w ten sposób określenie zakresów zmian współczynników.

Można ponadto zauważyć, że współczynniki osiągały wartości zero¹⁰⁹ oraz zmieniały swą wartość z ujemnej na dodatnią (bądź odwrotnie).

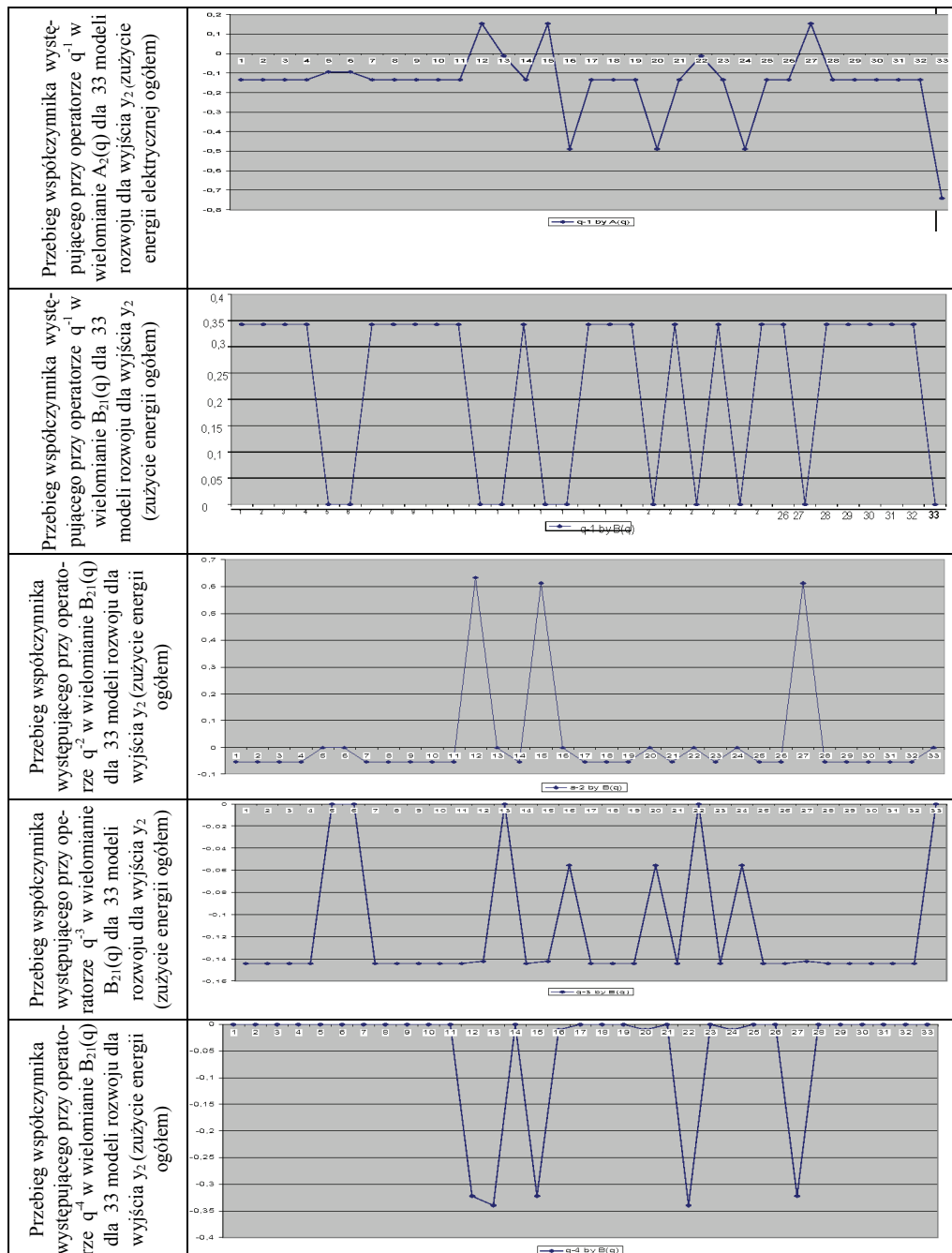


Rys. 7.1. Przebiegi współczynników wielomianu $B_1(q)$ występujących przy operatorach q^{-i} w 33 modelach rozwoju systemu KSE dla wyjścia y_1 (moc osiągalna w elektrowniach ogółem).
Oznaczenia w tekście. Opracowanie własne



Rys. 7.2. Przebiegi współczynników wielomianu $A_1(q)$ występujących przy operatorach q^{-i} w 33 modelach rozwoju systemu KSE (bez członu q^{-9}) dla wyjścia y_1 (moc osiągalna w elektrowniach ogółem). Oznaczenia w tekście. Opracowanie własne

¹⁰⁹ Osiągnięcie wartości zero przez współczynnik oznacza brak wpływu konkretnej wielkości na projektowaną wielkość wyjściową.



Rys. 7.3. Przebiegi współczynników przy operatorach q^{-i} wielomianów $A_2(q)$ oraz $B_1(q)$ dla wyjścia y_2 (ogółem) [MW]

7.2. Szacowanie zapasu bezpieczeństwa rozwoju

Określając dalej efektywność systemu EE jako rozwijającego się systemu sterowania, a więc z wykorzystaniem modelu SEE w przestrzeni stanów uzyskuje się przebieg efektywności operacyjnej zmian modelu systemu EE, jak np. przedstawiony na rys. 7.4 (efektywność operacyjna, rozdz. 3.2):

$$A_D(K, \theta) = \frac{y_1(K, \theta)}{u_2(K, \theta)} = \frac{B2(K, q)}{A(K, q)}, \quad (7.2)$$

gdzie:

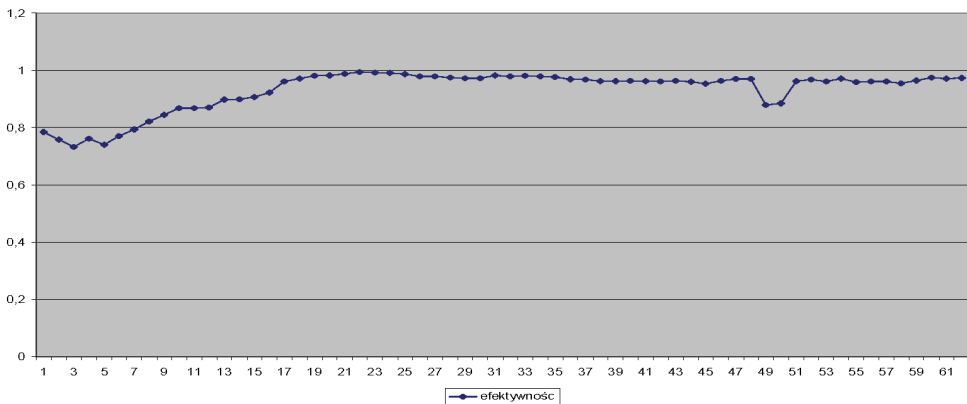
$y_1(K, \theta)$ – moc osiągalna w elektrowniach (ogółem) [MW],

$u_2(K, \theta)$ – moc zainstalowana w elektrowniach (ogółem) [MW],

$A(K, q)$ – wielomian związany z $y_1(K, \theta)$ określający stopień wpływu sytuacji z poprzednich lat na wartość bieżącą zmiennej wyjściowej,

$B2(K, q)$ – wielomian związany ze zmienną wejściową $u_2(\theta)$ wyrażającą moc zainstalowaną w elektrowniach.

Można zauważyć cztery charakterystyczne okresy przebiegu zmian efektywności operacyjnej wykorzystania mocy (rys. 7.4), a mianowicie: okresy 1–3 oraz 48–49 spadku efektywności operacyjnej, okresy 3–4 oraz 5–22 wzrostu efektywności operacyjnej, okresy 22–48 oraz 53–63 utrzymywanie się efektywności operacyjnej w zasadzie na niezmiennym poziomie oraz załamania się efektywności operacyjnej w okresie 49–52 oraz chwilowego wzrostu w okresie 4. Generalnie rzecz ujmując, można mówić o wzroście efektywności operacyjnej od wartości 0,75 do wartości bliskiej 0,99, a więc do wartości bliskiej 99%.



Rys. 7.4. Przebieg efektywności operacyjnej rozwoju wykorzystania mocy w systemie KSE w latach 1946–2007. Oznaczenia: oś y – efektywność operacyjna modelu systemu rozwoju KSE, oś x – okresy rozwoju (czas długi θ [lata]). Opracowanie własne

Szczegółowe sprecyzowanie efektywności operacyjnej możliwe jest także z poziomu uzyskanych modeli arx oraz modeli ss. W przypadku modelu arx można efektywność operacyjną dla modelu (7.2) określić dla wielomianu np. B2 następująco:

$$A_D(K, \theta) = A(A, q-1) + A(B2, q-1) + A(B2, q-2) + A(B2, q-3), \quad (7.3)$$

i wówczas efektywność operacyjna globalna systemu EE może zostać wyrażona w następujący sposób:

$$A_D(K, q-1) = \frac{y_1(K, q-1)}{u_2(K, q-1)} = \frac{B2(K, q-1)}{A1(K, q-1)}. \quad (7.4)$$

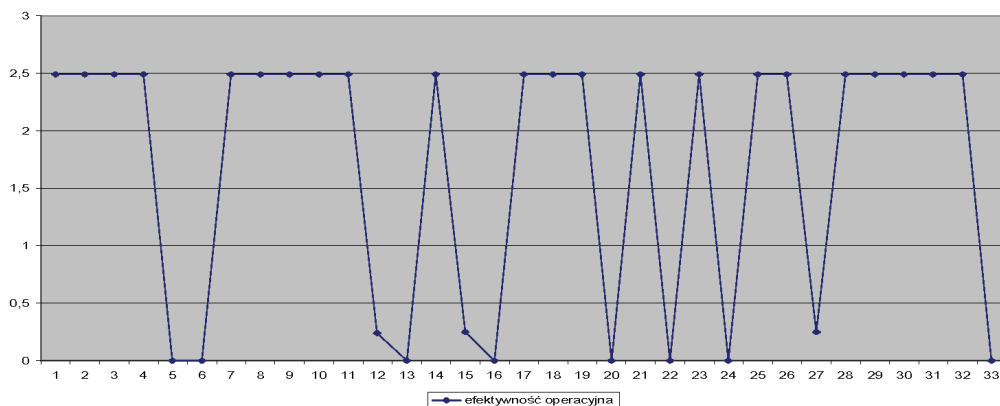
Natomiast w celu określenia efektywności modelu rozwoju systemu KSE należy wykorzystać następującą definicję:

$$A_D(K, \theta) = \frac{a_1(K, \theta)}{b_2(K, \theta)} = \frac{B2_m(K, q)}{A1_m(K, q)}, \quad (7.5)$$

gdzie:

- $b_2(K, \theta)$ – współczynnik występujący przy kolejnych operatorach q^{-i} wielomianu B2(q) modelu **th** systemu KSE,
- $a_1(K, \theta)$ – współczynnik występujący przy kolejnych operatorach q^{-i} wielomianu A1(q) modelu **th** systemu KSE,
- $A1_m(K, q)$ – człon występujący przy $a_1(K, \theta)$ określający stopień wpływu sytuacji z poprzednich lat na wartość bieżącą wskaźnika,
- $B2_m(K, q)$ – człon występujący przy $b_2(K, \theta)$ określający stopień wpływu sytuacji z poprzednich lat na wartość bieżącą wskaźnika.

Otrzymuje się wówczas przebieg efektywności modelu jak na rys. 7.5.



Rys. 7.5. Przebieg efektywności operacyjnej rozwoju modelu systemu KSE w latach 1946–2007.

Oznaczenia: oś y – efektywność operacyjna [wskaźnik bezwymiarowy],
oś x – okresy identyfikowanego rozwoju systemu KSE. Opracowanie własne

W tym kontekście interpretacja przebiegu charakterystyki z rys. 7.5, jako charakterystyki efektywności operacyjnej modelu rozwoju systemu KSE, wynika z charakteru zidentyfikowanych wielkości występujących w wielomianach $B2_m(K, q)$ oraz $A1_m(K, q)$, a więc ze struktury i parametrów tych wielomianów. A zatem, w liczniku występuje wielomian $B2_m(K, q)$, a w mianowniku występuje wielomian $A1_m(K, q)$, przy czym charakter wielomianu $B2_m(K, q)$ wynika ze zmiennej $u_2(K, q)$ [MW], a charakter $A1_m(K, q)$ wynika ze zmiennej $y_1(K, q)$ [MW], a więc w interpretacji jest to wskaźnik wiążący moc osiągalną w stosunku do mocy zainstalowanej, czyli efektywność operacyjna sprowadzona może zostać do specyficznego wskaźnika wykorzystania mocy osiągalnej w stosunku do wskaźnika wykorzystania mocy zainstalowanej.

Na tej bazie można dalej przeprowadzić szczegółową analizę przebiegu efektywności operacyjnej, przy tym z teoretycznego punktu widzenia wzrost efektywności operacyjnej wynika ze wzrostu wskaźnika wykorzystania mocy osiągalnej lub ze zmniejszenia wskaźnika mocy zainstalowanej, i podobnie można zinterpretować jego spadek i utrzymywanie się na niezmiennym poziomie. Stąd też w najbardziej ogólnej formie można dokonać wprost podzielenia wymienionych wielkości przez siebie.

Niemniej w rzeczywistości dzieleniu podlegają wielomiany o różnej strukturze i parametrach, a zatem szczegółowa analiza sprowadzona jest do strukturalnego stosunku dwóch wskaźników, wskaźnika wykorzystania mocy osiągalnej oraz wskaźnika wykorzystania mocy zainstalowanej, zależnych zarówno od zbioru parametrów K , jak i od współczynników występujących przy operatorach q^{-i} w odpowiednich wielomianach.

Warto ponadto zwrócić uwagę na skokowe zmiany efektywności operacyjnej modelu rozwoju systemu KSE w stałych granicach od wartości zero do wartości 2,5, przy czym wartość zero wskaźnika wynika albo z bliskiej zera wartości wielomianu $B_2(q)$ związanego z konkretną zmienną wejściową, albo z bardzo dużej wartości wielomianu $A(q)$ w stosunku do wartości wielomianu $B_2(q)$.

Ze względu na to, że przebieg zmian wskaźnika efektywności operacyjnej w czasie długim pokazuje tendencje i możliwości wykorzystania mocy osiągalnej w stosunku do mocy zainstalowanej, a zatem chociaż jest wskaźnikiem efektywności, zawiera w sobie wiedzę o granicach bezpiecznego rozwoju systemu elektroenergetycznego, gdyż jak wynika z definicji (3.1) granicą bezpieczeństwa jest moment przejścia od zmian parametrycznych do zmian strukturalnych (a także od zmian strukturalnych do zmian parametrycznych, jak też kolejne momenty zmian strukturalnych). Stąd też można zauważyć występowanie zmian efektywności systemu w ślad za zmianami parametrycznymi oraz zmianami strukturalnymi, a więc także granicznych punktach zmian w przebiegu efektywności operacyjnej, które zawierają wiedzę na temat bezpiecznego rozwoju (jako punkty charakterystyczne).

Należy dodać, że na przebieg wskaźnika efektywności operacyjnej zasadniczy wpływ ma stosunek między wewnętrznym uorganizowaniem systemu a jego sterownością. Zarówno nadmiar procesów organizacyjnych, a niedobór sterownia, jak i sytuacja odwrotna, są przyczynami zmniejszenia efektywności operacyjnej rozwoju systemu elektroenergetycznego (spadku wskaźnika efektywności operacyjnej).

Zasadnicza wiedza dotycząca wewnętrznego uorganizowania rozwoju systemu elektroenergetycznego zawarta jest w macierzy tranzycyjnej **A**, a wiedza dotycząca sterowania rozwojem systemu elektroenergetycznego zawarta jest w macierzy **B**. Analiza zmian elementów obu tych macierzy jest bardzo istotna ze względu na praktyczną analizę fizyczną spadku i wzrostu wskaźnika efektywności operacyjnej, co przekracza ramy niniejszej monografii.

Podobnie jak można mówić o efektywności operacyjnej systemu, tak też można mówić o efektywności operacyjnej modelu systemu, badając metamodel rozwoju systemu elektroenergetycznego. Na rysunku 7.5 pokazano przebieg efektywności operacyjnej modelu rozwoju, podobnie jak na rys 7.4 przebieg efektywności rozwoju systemu elektroenergetycznego.

W wyniku końcowym w technice programowania rozwoju poszukuje się oprócz modelu rozwoju także praw rozwoju, a więc prawidłowości zmian modelu rozwoju w czasie długim θ [150–152]. W rozpatrywanym przypadku modelem rozwoju jest np. model zmiennych stanu określony zależnościami (6.5), przy czym zmiany parametryczne związane są ze zmianami wartości elementów macierzy **A**, **B**, **C**, **D** występujących w równaniach stanu. Za wewnętrzne zorganizowanie systemu EE odpowiadają elementy macierzy **A**, za powiązania systemu SEE z otoczeniem zewnętrznym za pomocą wejść odpowiadają elementy macierzy **B**, a za powiązania systemu EE z otoczeniem zewnętrznym za pomocą wyjść odpowiadają elementy macierzy **C**.

W przypadku zmian strukturalnych zmieniają się wielkości i ich liczba, a także rzędy macierzy **A**, **B**, **C** i **D**, co wynika z uwzględnienia w modelu nowych zmiennych stanu, nowych wejść lub wyjść systemu (lub rezygnacji z istniejących), co może być na przykład wynikiem zmian technologicznych, organizacyjnych. Zmiany strukturalne systemu SEE wynikają zarówno ze zmiany liczby elementów, jak i ze zmiany relacji występujących między elementami.

Analiza zmian elementów macierzy występujących w równaniach zmiennych stanu wskazuje, że system EE, jako system rozwijający się, charakteryzuje się zmienną strukturą, zależnością od czasu długiego θ oraz wrażliwością (podatnością) na zmiany parametrów rozwoju.

Dla wprowadzenia zmian strukturalnych przyjęć można występowanie nowej zmiennej stanu $x_{32}(\theta)$, nowego wejścia systemu, np. $u_{15}(\theta)$ lub nowego wyjścia $y_1(K, \theta)$ i wówczas na przykład otrzymać następującą postać równań stanu:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0,1342 \cdot x_1 + x_2 + k_{14} \cdot x_4 + 0,3430 \cdot u_1 - 0,1965 \cdot u_2 - 5,1912 \cdot u_3 - 14,5048 \cdot u_4 \\ &+ 0,1554 \cdot u_5 + 0,0134 \cdot u_6 - 0,0523 \cdot u_7 - 0,0027 \cdot u_8 - 0,0302 \cdot u_9 + 0,0884 \cdot u_{10} \\ &+ 0,1310 \cdot u_{11} + 0,0155 \cdot u_{12} - 0,0286 \cdot u_{13} - 0,0220 \cdot u_{14} + m_{115} \cdot u_{15} + 0,1342 \cdot e_1, \\ \dot{x}_2 &= x_3 + k_{24} \cdot x_4 - 0,0539 \cdot u_1 - 0,7748 \cdot u_2 + 0,3683 \cdot u_3 + 9,7155 \cdot u_4 - 0,0529 \cdot u_5 \\ &- 0,0275 \cdot u_6 - 0,2766 \cdot u_7 - 0,0074 \cdot u_8 + 0,1073 \cdot u_9 + 0,2976 \cdot u_{10} + 0,0623 \cdot u_{11} \\ &- 0,0100 \cdot u_{12} - 0,01287 \cdot u_{13} + 0,3019 \cdot u_{14} + m_{215} \cdot u_{15}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_3 &= k_{34} \cdot x_4 - 0,1443 \cdot u_1 + 0,3264 \cdot u_2 + 29,5244 \cdot u_3 + 14,1706 \cdot u_4 \\
&+ 0,0680 \cdot u_5 + 0,0067 \cdot u_6 - 0,6104 \cdot u_7 + 0,0264 \cdot u_8 - 0,0288 \cdot u_9 \\
&+ 0,1541 \cdot u_{10} + 0,0474 \cdot u_{11} - 0,0096 \cdot u_{12} + 0,0237 \cdot u_{13} + 0,0266 \cdot u_{14} + m_{315} \cdot u_{15}, \\
\dot{x}_4 &= k_{41} \cdot x_1 + k_{42} \cdot x_2 + k_{43} \cdot x_3 + k_{44} \cdot x_4 + m_{41} \cdot u_1 + m_{42} \cdot u_2 + m_{43} \cdot u_3 \\
&+ m_{44} \cdot u_4 + m_{45} \cdot u_5 + m_{46} \cdot u_6 + m_{47} \cdot u_7 + m_{48} \cdot u_8 + m_{49} \cdot u_9 + m_{410} \cdot u_{10} \\
&+ m_{411} \cdot u_{11} + m_{412} \cdot u_{12} + m_{413} \cdot u_{13} + m_{414} \cdot u_{14} + m_{415} \cdot u_{15},
\end{aligned} \tag{7.6}$$

oraz równanie wyjścia:

$$\begin{aligned}
y_1 &= x_1 + l_{14} \cdot x_4 + n_{115} \cdot u_{15}, \\
y_2 &= l_{21} x_1 + l_{24} \cdot x_4 + n_{215} \cdot u_{15}.
\end{aligned} \tag{7.7}$$

Z równań (7.6) wynika, że w wyniku zmian strukturalnych ulegną zmianom następujące elementy macierzy **A** i **B**, a mianowicie: m_{ij} , k_{ij} w równaniu (7.6) oraz elementy macierzy **C** i **D**, a mianowicie: l_{ij} , n_{ij} w równaniu (7.7). Ustalenie wartości tych parametrów wiąże się z szacowaniem dolnej i górnej granicy bezpiecznego rozwoju modelu SEE, a więc i w ślad za tym także ustalenie bezpiecznego rozwoju systemu EE.

Parametry k_{ij} są elementami macierzy **A**, a parametry m_{ij} są elementami macierzy **B**. Natomiast parametry l_{ij} są parametrami macierzy **C**, a parametry n_{ij} macierzy **D**. Rozważany przypadek dotyczy zatem zmiany rzędu macierzy **A** i **B**. W przypadku macierzy **A** pojawia się trzy parametry wymagające szacowania wartości, a w przypadku macierzy **B** osiem parametrów wymagających szacowania, a zatem łącznie do szacowania pojawia się aż 11 parametrów niezbędnych do ustalenia równania stanu (dodatkowe pojawiają się w związku z równaniem wyjścia).

Szacowanie poziomu bezpieczeństwa rozwoju SEE można oprzeć na znajomości np. przebiegu zmian wartości elementów macierzy **A**, zwanej macierzą wewnętrzną organizacji procesu, w czasie długim θ . Jak wynika z równań stanu (7.6) macierz **A** można dla przypadku zmian strukturalnych opisać w sposób następujący:

$$\mathbf{A}20\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0,1342 & 1,0000 & 0 & k_{14} \\ 0 & 0 & 1,0000 & k_{24} \\ 0 & 0 & 0 & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \tag{7.8}$$

co prowadzi do następującej postaci równania charakterystycznego:

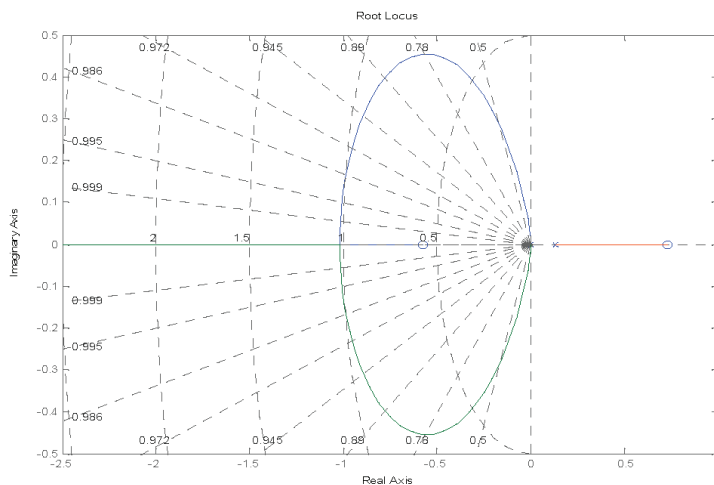
$$\begin{aligned}
C(s) &= s^4 - (0,1342 + k_{44}) \cdot s^3 + (0,1342 \cdot k_{44} - k_{24} \cdot k_{42}) \cdot s^2 \\
&+ 0,1342 \cdot k_{24} \cdot k_{42} \cdot s + k_{34} \cdot k_{41} = 0,
\end{aligned} \tag{7.9}$$

a zatem rozwój strukturalny wiąże się z potrzebą szacowania zapasu bezpieczeństwa rozwoju SEE, między innymi w zakresie określenia elementów macierzy A , a więc także współczynników występujących w równaniu charakterystycznym $C(s)$, bądź pierwiastków równania charakterystycznego. W rozważanym przypadku są to następujące wielkości współczynników: $a_4 = 1$, $a_3 = -(0,1342 + k_{44})$, $a_2 = 0,1342 \cdot k_{44} - k_{24} \cdot k_{42}$, $a_1 = 0,1342 \cdot k_{24} \cdot k_{42}$, $a_0 = k_{34} \cdot k_{41}$.

W aspekcie na użytek badania stabilności rozwoju KSE szczególnie użyteczna okazała się metoda linii pierwiastkowych Evansa, która poprawnie ilustruje, oprócz zmian parametrycznych (wędrówka pierwiastków po liniach istniejących), także zmiany strukturalne przez wypadanie lub pojawianie się nowych linii pierwiastkowych.

7.3. Badanie prawidłowości rozwoju systemu EE

Badanie prawidłowości rozwoju systemu EE wygodnie jest sprowadzić do badania zmian strukturalnych oraz zmian parametrycznych w czasie długim θ . W tym celu można na przykład związać zagadnienie rozwoju SEE z ruchem pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z lub s wykorzystując metodę linii pierwiastkowych Evansa [20].



Rys. 7.6. Przebiegi linii pierwiastkowych Evansa dla modelu arx524 rozwoju systemu KSE w latach 1946–2007. Opracowanie własne w środowisku MATLAB.

Oznaczenia: Root Locus – położenie pierwiastków, Imagine Axis – oś urojona, Real Axis – oś rzeczywista

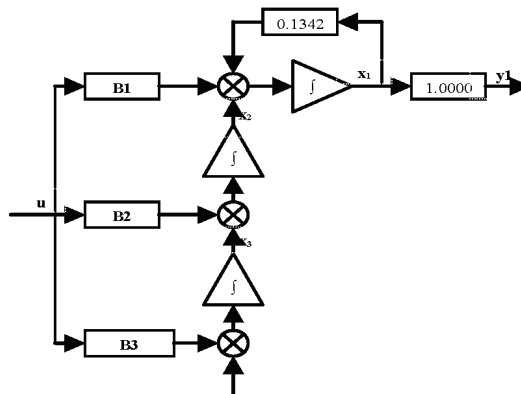
Zmiany parametryczne związane będą z ruchem pierwiastków na istniejących liniach pierwiastkowych, a zmiany strukturalne związane będą z pojawianiem się nowych linii lub zanikaniem istniejących – rys. 7.6. W przypadku równania (7.9) zmiany parametryczne wywołane będą wprowadzeniem nowych wartości współczynników (względnie pier-

wiastków), a zmiany strukturalne związane będą z pojawieniem się wyższego stopnia wielomianu lub redukcja jego stopnia, a więc na przykład pojawienie się współczynnika a_3 , a nawet pojawienie się nowego wielomianu, np. $B_3(q)$ – rys. 7.7.

Dla wprowadzenia zmian strukturalnych można przyjąć występowanie nowej zmiennej stanu $x_{32}(\theta)$, nowego wejścia systemu np. $u_{15}(\theta)$ lub nowego wyjścia $y_2(\theta)$ i wówczas otrzymać odpowiednio skorygowane równania w przestrzeni stanów określone rozbudowanymi zależnościami (7.8) i (7.9).

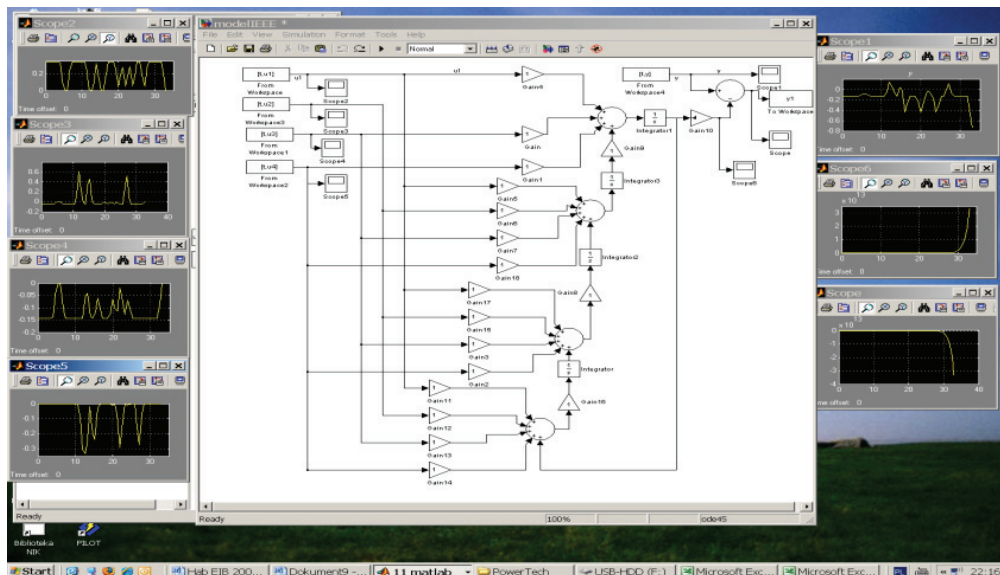
Z wprowadzonych poprawek wynika, że w wyniku zmian strukturalnych przynajmniej ulegną zmianom następujące parametry (elementy macierzy **A**), a mianowicie: k_{ij} , m_{ij} , l_{ij} , n_{ij} . Ustalenie wartości tych parametrów wiąże się z szacowaniem dolnej i górnej granicy bezpiecznego rozwoju modelu systemu EE, a więc i w ślad za tym z ustaleniem bezpiecznego rozwoju systemu EE.

Parametry k_{ij} są elementami macierzy **A**, a parametry m_{ij} są elementami macierzy **B**. Natomiast parametry l_{ij} są parametrami macierzy **C**, a parametry n_{ij} parametrami macierzy **D**. Rozważany przypadek dotyczy zatem zmiany rzędu macierzy **A** i **B**. W przypadku macierzy **A** pojawia się 21 parametrów wymagających szacowania wartości, a w przypadku macierzy **B** występuje 15 parametrów wymagających szacowania, a zatem łącznie do szacowania pojawia się aż 36 parametrów niezbędnych do ustalenia równania stanu (dodatkowych 6 parametrów pojawia się w związku z równaniem wyjścia).

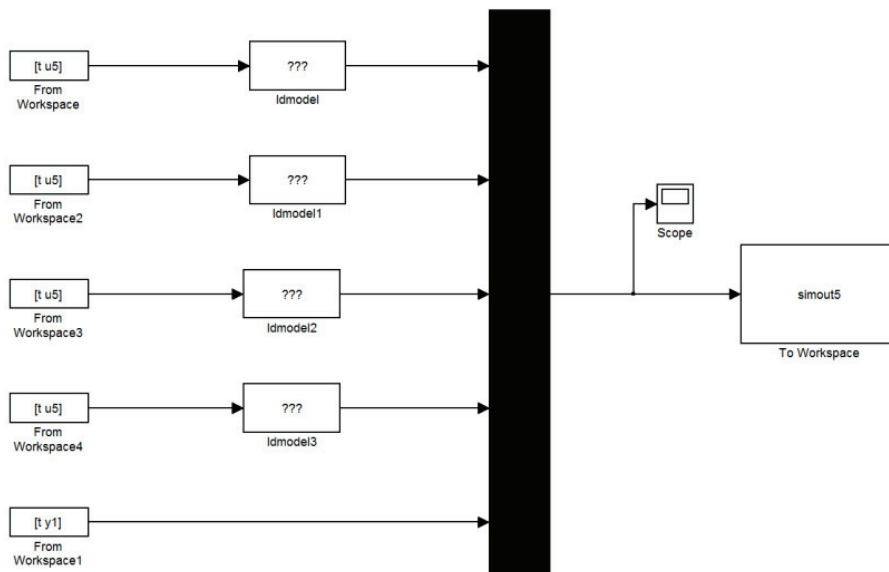


Rys. 7.7. Fragment modelu zmiennych stanu SEE dla wyjścia y_2 (moc osiągalna w elektrowniach ogółem [MW]) dla równań stanu (7.6) i równania wyjścia (7.7). Opracowanie własne

Badanie stabilności linowych układów ciągłych, jak też impulsowych sprowadza się do badania położenia pierwiastków równania charakterystycznego za pomocą odpowiednich kryteriów stabilności, co pokazało, że niektóre z otrzymanych w wyniku procesu identyfikacji modeli, zarówno arx, jak i odpowiadające im modele w przestrzeni stanów charakteryzowały się niestabilnością (niektóre pierwiastki równania charakterystycznego nie leżały w lewej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej). Istnieje wiele interpretacji pojęcia stabilności.



Rys. 7.8. Schemat blokowy zmiennych stanu zaimplementowany w środowisku Simulink dla równań przestrzeni stanów (5.10) i (5.11) modelu rozwoju systemu testowego IEEE RTS. Opracowanie własne



Rys. 7.9. Schemat blokowy w środowisku Simulink wykorzystany w poszczególnych eksperymentach.

Oznaczenia: t – czas, y_1 – dane rzeczywiste (liczba odbiorców energii elektrycznej [szt.]),
 u_1 – przychody ogółem [tys. zł], u_2 – moc zainstalowana na koniec roku [MW],
 u_3 – liczba zatrudnionych osób w systemie elektroenergetycznym [osoby],
 u_4 – import energii elektrycznej [GWh], u_5 – produkcja energii elektrycznej [GWh] [53]

Uważa się, że w przypadku liniowych układów stacjonarnych skupionych intuicyjne rozumienie stabilności jest ścisłe, a więc za układ stabilny uważa się taki układ, którego rozwiązanie swobodne (przy niezerowych warunkach początkowych) pozostaje ograniczone w dowolnym czasie (tzn. przy ograniczonej zmiennej wejściowej, co do wartości i czasu trwania zmienna wyjściowa – jako odpowiedź na wymuszenie – jest także ograniczona). Uściśleniem pojęcia stabilności jest pojęcie stabilności asymptotycznej, co wiąże się z dążeniem rozwiązania swobodnego do zera dla czasu dążącego do nieskończoności (ograniczoną rozwiązaniem wymuszonego nawet przy trwającym dowolnie długo wymuszeniu ograniczonym).

Ze względu na to, iż w uzyskanych niektórych modelach nie wszystkie wartości własne miały ujemne części rzeczywiste, stąd modele te są modelami niestabilnymi. Najczęściej bada się stabilność układów zamkniętych, a nie otwartych, stąd w pracy dokonano oceny stabilności rozwoju systemu elektroenergetycznego jako układu zamkniętego, przy czym przyjęto pierwiastki mianownika za bieguny, a pierwiastki licznika transmitancji za zera (modele o strukturze schematów blokowych jak na rys. 7.7 i 7.9 wynikający z modelu arx524 (rys. 7.9).

Następnie związane zagadnienie rozwoju systemu elektroenergetycznego z ruchem pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z i s , stosując metodę linii pierwiastkowych Evansa, „uzmienniając” współczynnik wzmocnienia. Otrzymano ruch pierwiastków po istniejących liniach pierwiastkowych przy zmianie parametrów systemu (k jako skumulowany parametr wzmocnienia) oraz obserwowano pojawianie się bądź zanikanie linii pierwiastkowych w przypadku zmian strukturalnych (tab. 7.1).

Za Robertem Staniszewskim możemy powiedzieć, że wielowymiarowy liniowy ciągle model rozwoju systemu KSE jest stabilny wtedy, kiedy wartości parametrów oraz relacje między nimi (struktura) nie będą należały do krytycznego stanu wartości elementów i relacji, co wiąże się wprost z pojęciem bezpieczeństwa rozwoju, a mówiąc inaczej, system rozwoju, jakim jest system EE jako system liniowy wielowymiarowy jest niestabilny, kiedy system może osiągać stany krytyczne określone naturą fizyczną procesów zachodzących w systemie elektroenergetycznym. Interpretacja tej niestabilności może zostać przeprowadzona zatem po analizie natury rozwoju systemu EE. Przyczynami rozwoju niestabilnego mogą zatem być sama natura fizyczna rozwoju systemu elektroenergetycznego (niektóre procesy fizyczne w systemie rozwoju mogą wykazywać skłonność do rozwoju niestabilnego jak chociażby na przykład nakładane ograniczenia emisyjne), błędy natury konstrukcyjnej układów i elementów systemu elektroenergetycznego jako systemu technicznego, błędy technologiczne, zwłaszcza wynikające ze współpracy nowych technologii energetyki odnawialnej z istniejącym systemem elektroenergetycznym itp.

W celu wyeliminowania możliwości wystąpienia stanu niestabilnego rozwoju systemu elektroenergetycznego należy przede wszystkim poznać przyczyny niestabilnego rozwoju, co umożliwi takie zaprojektowanie rozwoju SEE, aby stany niestabil-

nego rozwoju nie mogły w ogóle wystąpić w przyszłości. W przypadku pojawiających się niestabilnych systemów rozwoju i niestabilnych modeli rozwoju metodą skutecznej eliminacji takich stanów rozwoju jest zaprojektowanie takiego systemu, w którym stan nie miałby możliwości wystąpienia. Jest to następne uzasadnienie potrzeby realizacji niniejszej pracy, przed wprowadzeniem rozwiązań rozwojowych należy wcześniej badać systemy i ich modele.

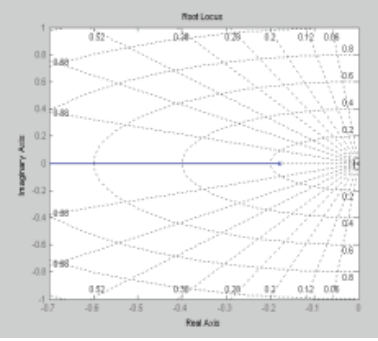
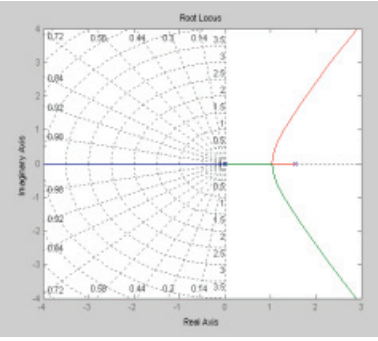
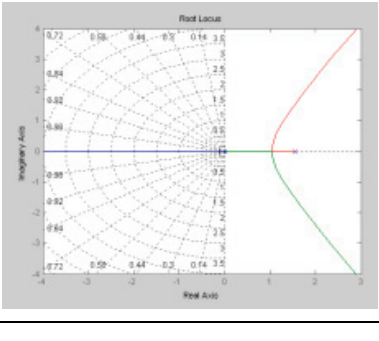
Należy wyraźnie podkreślić, że zmiany parametryczne tylko w niektórych przypadkach pozwalają na zmianę rozkładu biegunów i zer na płaszczyźnie zmiennej zespolonej w taki sposób, aby wszystkie leżały w lewej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej. Natomiast skuteczną metodą jest metoda sterowanych zmian strukturalnych, które przez wprowadzenie nowych zer i/lub biegunów wprowadzają inny rozkład istniejących zer i biegunów, a przez to także nowy rozkład linii pierwiastkowych Evansa. Eliminacja niestabilności rozwoju systemu EE wiąże się z potrzebą wprowadzenia zmian parametrycznych, a jak one nie dają wystarczających skutków, z potrzebą wprowadzenia zmian strukturalnych, a nawet z potrzebą przeprowadzenia transformacji systemowej, gdzie szczególnie ważne jest wyeliminowanie kosztów, jakie przynosi praca niestabilna systemu EE i podobnie niestabilny rozwój SEE.

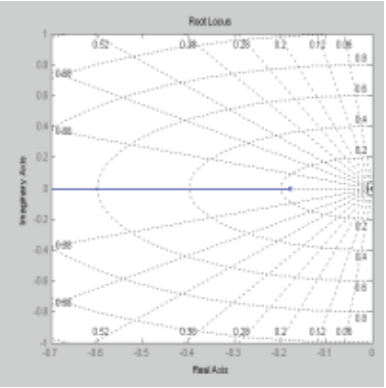
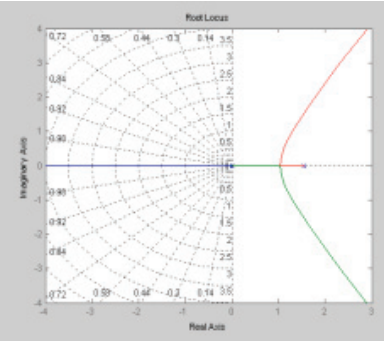
W rozważanym eksperymencie drugim przyczyną niestabilności rozwoju KSE były zmiany strukturalne związane między innymi ze zmianami technologicznymi jak na przykład wprowadzanie nowych mocy, wprowadzenie nowych linii elektroenergetycznych, a także zmiany ekonomiczne tego typu jak wprowadzenie denominacji złotego. W rozważanym w pracy przypadku mamy do czynienia z stabilnością rozwoju systemu EE oraz modelu systemu EE, a za rozwój właśnie odpowiedzialne jest dodatnie, a nie ujemne sprzężenie zwrotne, stąd też chwilowe pojawianie się niestabilności rozwoju należy jedynie traktować jako odpowiedni sygnał ostrzegawczy dla projektantów rozwoju. Równania stanu opisują ruch systemu EE od jednego stanu rozwoju do następnego stanu rozwoju. Mają one najczęściej postać nieliniową, którą można sprowadzić w naszym przypadku do postaci liniowej na przykład przez zróżniczkowanie w otoczeniu konkretnych punktów rozwoju systemu EE, jako specyficznych punktów pracy systemu EE. Wreszcie dodać należy, że identyfikatorami stabilności i miernikami jej poziomów są pierwiastki charakterystyczne SEE i ich poziom w zakresie dominowania (które z nich są dominujące).

Odnoszą się one w pierwszej kolejności do powiązań jednoczesnych reprezentowanych przez macierze organizacji procesu A , która uwzględnia bieżące dostosowania w obrębie danej jednostki czasu długiego θ , ale także nawet w większym stopniu wynikają z macierzy C reprezentującej powiązania międzyokresowe, które w rozważanych eksperymentach nie były silne. Mówi się, że system rozwoju zdąża do równowagi jeżeli jest stabilny, przy czym dla równowagi dynamicznej stabilność jest podtrzymywana przez sterowanie.

Tabela 7.1. Ilustracja związania zagadnienia rozwoju z przebiegiem linii pierwiastkowych Evansa dla wyjścia $y_1(K, \theta)$ – moc osiągalna ogółem (przy uwzględnieniu 14 wejść).

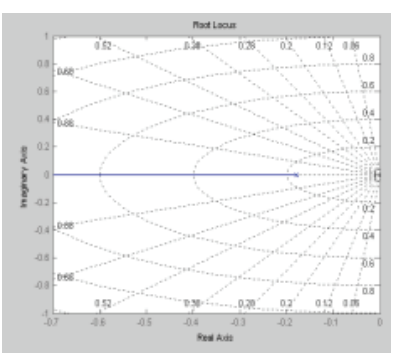
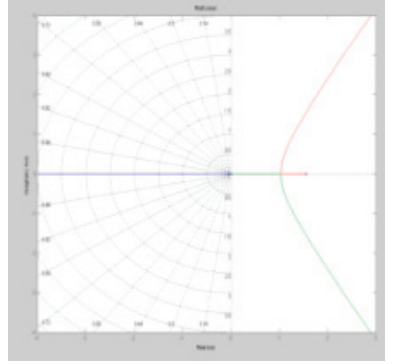
Opracowanie własne w środowisku MATLAB

Lp.	lata	Model	Charakterystyka	Linie pierwiastkowe Evansa
u1 y21	1946–1975	arx111	(90,067%)	
	<p>Rozwój KSE w latach 50. XX w. był wymuszony rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną ze strony przemysłu ciężkiego, na koniec 1960 r. moc zainstalowana wynosiła 6316 MW, długość sieci przesyłowej o napięciu 220 kV – 1660 km, a sieci systemowej o napięciu 110 kV – 9140 km. Pierwsze połączenie międzynarodowe liniami o napięciu 220 kV oddano do eksploatacji w 1960 r., a w 1964 r. oddano pierwszą linię o napięciu 400 kV, o długości 317 km, co prowadzone było równocześnie z rozbudową systemu wytwórczego o kolejne bloki 120 MW oraz 200 MW. Odzworowaniem tej zmiany jest pojawienie się linii pierwiastkowej Evansa, wzdłuż której w tym okresie przebiegają zmiany parametryczne.</p> $C_{E1} = 2,162 \frac{1}{(s + 0,1786)(s - 2,1620)}$			
u5 y25	1950–1979	arx113	98,72%	
	<p>W latach 1975–1979 wystąpiły zmiany strukturalne, o czym świadczą cztery nowe linie pierwiastkowe Evansa oraz zmiany w przebiegu dotychczas istniejącej linii. W tym okresie następują zmiany parametryczne wzdłuż pięciu linii pierwiastkowych Evansa. W latach 70. XX w. nastąpił bardzo szybki rozwój systemu KSE związany z rozbudową sieci przesyłowej 400 kV, sieci systemowej 110 kV, wprowadzono połączenia transformatorowe 400 kV/220 kV, 400 kV/110 kV, 220 kV/110 kV, zainstalowano bloki 200 MW, wprowadzono bloki 500 MW, oddano do eksploatacji elektrownię szczytowo-pompową</p> $C_{E5} = 0,0157 \frac{1}{s^2(s + 1,5545)}$			
u10 y210	1955–1984	arx111	98,62%	
	<p>W związku z kryzysem gospodarczym w okresie 1979–1985 zmniejszyło się zużycie energii, co przełożyło się na rezygnację z rozbudowy sieci przesyłowej o 220 kV i przejściem na rozbudowę sieci przesyłowej 400 kV oraz na budowę linii 750 kV (rok 1985). Wybudowano elektrownię szczytowo-pompową (1982 rok), elektrownie w Połańcu, Bełchatowie i Opolu. Zmiany parametryczne występowały wzdłuż pięciu linii pierwiastkowych Evansa.</p> $C_{E1} = 0,0354 \frac{1}{s(s + 1,7656)}$			

u15 y215	1961–1990	arx111	90,07%	
	<p>W latach 1984–1990 wystąpiły zmiany strukturalne, o czym świadczy zanik czterech linii pierwiastkowych Evansa oraz zmiany w przebiegu pozostałej jednej istniejącej linii, wzdłuż której w tym okresie występują zmiany parametryczne. W latach 80. XX w. pojawiły się pierwsze mikrokomputery, następowala decentralizacja obliczeń, w 1990 r. zlikwidowano system CDC 3170 (wykorzystywany do analiz off-line) zastępując go systemem CDC 1700 i 1774 (ostateczne uruchomienie systemu nastąpiło w 1996 r.), wprowadzono nową generację telemechaniki oraz sieć światłowodową z przepływnością 2,4 Gb/s).</p> $C_{E15} = 2,1620 \frac{1}{(s - 0,1786)}$			
u20 y220	1966–1995	arx112	98,72%	
	<p>W latach 1990–1995 wystąpiły zmiany strukturalne, pojawiły się kolejne cztery nowe linie pierwiastkowe oraz zmiany w przebiegu istniejącej linii. Zmiany parametryczne przebiegały wzdłuż pięciu linii pierwiastkowych Evansa, wprowadzono Prawo energetyczne, utworzono rynek energii elektrycznej, powstała Giełda Energii Elektrycznej, spółki dystrybucyjne, przedsiębiorstwa obrotu, operatorzy techniczni, techniczno-handlowi¹¹⁰ itp. KSE rozwijał się zgodnie z polityką energetyczną Polski do roku 2025¹¹¹, prognozowany był wzrost krajowego zużycia energii elektrycznej o 80–93%.</p> $C_{E20} = 0,0157 \frac{1}{s^2(s + 1,5545)}$			

¹¹⁰ Zgodnie z Prawem Energetycznym docelowy model rynku energii elektrycznej bazuje na wykorzystaniu dostępu stron trzecich do sieci elektroenergetycznych (TPA). Ponadto w polskim modelu rynku można zawierać kontrakty bilateralne, transakcje na giełdzie i rynku bilansowym, administrowanym przez Operatora systemu Przesyłowego (OSP), którego funkcje pełni PSE S.A. Rozwiązanie to jest zgodne z dyrektywą 96/92/EC Unii Europejskiej.

¹¹¹ Obwieszczenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 1 lipca 2005 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2025 r. (M.P. z dnia 22 lipca 2005 r.).

u25 y225	1971–2000	arx111	90,01%	<p>W latach 1995–2000 wystąpiły kolejne zmiany strukturalne, o czym świadczy zanik czterech linii pierwiastkowych Evansa oraz zmiany w przebiegu istniejących linii (powrót do sytuacji sprzed roku 1990. W tym okresie następują zmiany parametryczne wzdłuż jednej linii pierwiastkowej Evansa, przy czym występują nadal problemy w zakresie prywatyzacji elektroenergetyki, co utrudnia prowadzenie prawidłowej polityki inwestycyjnej w zakresie rozwoju systemu KSE</p> $C_{E25} = 2,1620 \frac{1}{(s - 0,1786)}$	
	1976–2005	arx111	90,01%		
u33 y233	1978–2007	arx112	98,6244%)	<p>W latach 2005–2007 wystąpiły kolejne zmiany strukturalne, o czym świadczy pojawienie się kolejnych czterech nowych linii pierwiastkowych oraz zmiany w przebiegu istniejącej linii. W tym okresie następują zmiany parametryczne wzdłuż pięciu linii pierwiastkowych Evansa. Stosowane dotychczas technologie kogeneracji charakteryzują się w wielu wypadkach małym wskaźnikiem skojarzenia, tj. małym stosunkiem produkcji energii elektrycznej do produkcji ciepła. Przyczyną niedostatecznego rozwoju kogeneracji są bariery o charakterze ekonomicznym (finansowym), prawnym, administracyjnym i społecznym. Przy aktualnym poziomie rozwoju technologii energetycznych bariery o charakterze technicznym mają znikome znaczenie</p> $C_{E33} = 0,0354 \frac{1}{s(s + 1,7656)}$	

Dążąc do stabilności rozwoju, należy pierwiastki (i linie pierwiastkowe) leżące w prawej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej s przesunąć do lewej półpłaszczyzny lub przynajmniej do początku układu współrzędnych lub wyeliminować je, albo wprowadzić nowe. Wiąże się to z przeprowadzeniem odpowiedniej analizy systemowej równowagi i stabilności rozwoju.

Niestabilność rozwoju SEE prowadzi do osiągnięcia stanów krytycznych i w rozważanych eksperymentach zależała od popełnionych błędów technologicznych, konstrukcyjnych czy organizacyjnych. W projektowaniu rozwoju SEE ważnym jest zatem zapewnienie takiego ruchu pierwiastków, aby w trakcie rozwoju SEE nie przekraczały one osi rzędnych $Im(s)$ oraz utrzymanie odpowiednich relacji między współczynnikiem wzmocnienia a stałymi czasowymi. Źródłem informacji do oceny stabilności systemu liniowego są amplitudowe oraz fazowe charakterystyki logarytmiczne. Zmiany tych charakterystyk dają sygnały ostrzegawcze o zużyciu lub doskonaleniu systemu elektroenergetycznego. Reasumując, w przypadku badania rozwoju systemu EE i jego modelu w przeprowadzonym eksperymencie liczbowym badano zarówno stabilność rozwoju, jak i zmiany stabilności rozwoju dla badanych systemów i modeli. Uzyskano w ten sposób informację o zmianach parametrów, a nawet informację o elementach macierzy występujących w równaniach stanu, co ułatwiło określenie zapasu stabilności oraz określenie zapasu bezpieczeństwa rozwoju. Studium tej informacji powinno być sygnałem ostrzegawczym dla projektantów przyszłych stanów rozwoju systemu elektroenergetycznego oraz przyszłych modeli rozwoju systemu EE, w celu eliminacji możliwości wystąpienia stanów niestabilnego rozwoju systemu elektroenergetycznego.

Obecnie trwają prace końcowe nad *Polityką energetyczną Polski do 2030 roku*. W projekcie *Prognozy zapotrzebowania na paliwa i energię do 2030 roku* z marca 2009 roku odnajdujemy między innymi następujące podstawowe kierunki polityki energetycznej Polski, uwzględniające wymagania Unii Europejskiej: poprawę efektywności energetycznej; wzrost bezpieczeństwa dostaw paliw i energii; dywersyfikacja struktury wytwarzania energii elektrycznej poprzez wprowadzenie energetyki jądrowej, rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii, w tym biopaliw; rozwój konkurencyjnych rynków paliw i energii; ograniczenie oddziaływania energetyki na środowisko. W zakresie efektywności energetycznej uwzględniono następujące, istotne dla prognozy, cele polityki energetycznej: dążenie do utrzymania zeroenergetycznego wzrostu gospodarczego, tj. rozwoju gospodarki następującego bez wzrostu zapotrzebowania na energię pierwotną; konsekwentne zmniejszanie energochłonności polskiej gospodarki do poziomu UE-15.

Przewidziano zastosowanie oraz oceniono wpływ na zapotrzebowanie na energię istniejących rezerw efektywności wynikających z reformy rynkowej gospodarki oraz dodatkowych instrumentów zwiększania efektywności energetycznej, m.in.: rozszerzenia stosowania audytów energetycznych; wprowadzenia systemów zarządzania energią w przemyśle; wprowadzenia zrównoważonego zarządzania ruchem i infrastrukturą w transporcie; wprowadzenia standardów efektywności energetycznej dla budynków i urządzeń powszechnego użytku; intensyfikacji wymiany oświetlenia na energooszczędne; wprowadzenia systemu białych certyfikatów.

W obszarze bezpieczeństwa dostaw paliw i energii: generalnie uwzględniono realizację strategicznego kierunku, jakim jest dywersyfikacja zarówno nośników

energii pierwotnej, jak i kierunków dostaw tych nośników, a także rozwój wszystkich dostępnych technologii wytwarzania energii o racjonalnych kosztach, zwłaszcza energetyki jądrowej jako istotnej technologii z zerową emisją gazów cieplarnianych i małą wrażliwością na wzrost cen paliwa jądrowego; przyjęto, że krajowe zasoby węgla kamiennego i brunatnego pozostaną ważnymi stabilizatorami bezpieczeństwa energetycznego kraju. Założono odbudowę wycofywanych z eksploatacji węglowych źródeł energii na tym samym paliwie w okresie do 2017 r. oraz budowę części elektrociepłowni systemowych na węgiel kamienny. Jednocześnie nie nakładano ograniczeń na wzrost udziału gazu w elektroenergetyce, zarówno w jednostkach gazowych do wytwarzania energii elektrycznej w kogeneracji z ciepłem oraz w źródłach szczytowych i rezerwie dla elektrowni wiatrowych. Zgodnie z przewidywanym wymaganiami Unii Europejskiej założono wzrost udziału energii odnawialnej w strukturze energii finalnej do 15% w roku 2020 oraz osiągnięcie w tym roku 10% udziału biopaliw w rynku paliw transportowych. Dodatkowo założono ochronę lasów przed nadmiernym pozyskiwaniem biomasy oraz zrównoważone wykorzystanie obszarów rolniczych do wytwarzania energii odnawialnej, w tym biopaliw, tak aby nie doprowadzić do konkurencji pomiędzy energetyką odnawialną i rolnictwem.

Założono skuteczne funkcjonowanie rynków paliw i energii oraz systemu regulacji działalności przedsiębiorstw energetycznych, co umożliwiło zastosowanie w modelu obliczeniowym symulacji racjonalnego zachowania odbiorców przy wyborze dostawców energii. W dziedzinie ochrony środowiska przyjęto generalne założenia uwzględniające: opłaty za emisję CO₂ zgodnie z ustaleniami Rady Europejskiej i Parlamentu z grudnia 2008 r., ograniczenia emisji SO₂ i NO_x do poziomów wynikających z obecnych regulacji międzynarodowych, rozwój niskoemisyjnych technologii wytwarzania energii oraz źródeł skojarzonych i rozproszonych.

7.4. Kodowanie rozwoju

Kodowanie rozwoju wiąże się z potrzebą utworzenia modeli rozwoju w postaci populacji początkowej do wykorzystania jej w algorytmie genetycznym poprawiającym model rozwoju KSE. Populacja początkowa może być zbudowana na podstawie współczynników modelu (współczynnikowy kod genetyczny) lub na bazie pierwiastków równania charakterystycznego (pierwiastkowy sztuczny kod genetyczny).

Dla modeli KSE (wyniki z tabeli 6.3 oraz 6.4) otrzymuje się zatem następujące zestawy współczynników, jak np. dla $A(q)$ – dla współczynników stojących przy odpowiednich operatorach q^{-1} :

$$\begin{aligned}
\text{zmiany } ch_1 : & -0,1342_1^I \rightarrow -0,1342_1^{II} \rightarrow -0,1342_1^{III} \rightarrow -0,1342_1^{IV} \rightarrow -0,09354_1^V \rightarrow -0,09354_1^{VI} \rightarrow \\
& \rightarrow -0,1342_1^{VII} \rightarrow -0,1342_1^{VIII} \rightarrow -0,1342_1^{IX} \rightarrow -0,1342_1^X \rightarrow -0,1342_1^{XI} \rightarrow 0,1533_1^{XII} \rightarrow \\
& \rightarrow -0,01066_1^{XIII} \rightarrow -0,1342_1^{XIV} \rightarrow 0,1533_1^{XV} \rightarrow -0,4884_1^{XVI} \rightarrow -0,1342_1^{XVII} \rightarrow \\
& \rightarrow -0,1342_1^{XVIII} \rightarrow -0,1342_1^{XIX} \rightarrow -0,4884_1^{XX} \rightarrow -0,1342_1^{XXI} \rightarrow -0,01066_1^{XXII} \rightarrow \\
& \rightarrow -0,1342_1^{XXIII} \rightarrow -0,4884_1^{XXIV} \rightarrow -0,1342_1^{XXV} \rightarrow -0,1342_1^{XXVI} \rightarrow 0,1533_1^{XXVII} \rightarrow \\
& \rightarrow -0,1342_1^{XXVIII} \rightarrow -0,1342_1^{XIX} \rightarrow -0,1342_1^{XXX} \rightarrow -0,1342_1^{XXXI} \rightarrow -0,1342_1^{XXXII} \rightarrow -0,7413_1^{XXXIII}, \\
& \hspace{15em} (7.10)
\end{aligned}$$

przy czym:

ch_1 – kod rozwoju związany ze zmianami parametrycznymi *pierwszego* współczynnika ($i = 1$) występującego w wielomianie $A(q)$ przy operatorze przesunięcia czasowego q^{-1} (zależność (6.10)), przy zapisie współczynnikiem (zmiany wartości współczynnika dokonują się w czasie długim θ i są zauważalne podczas przechodzenia z jednego okresu na inny).

Można zauważyć także występowanie zmian strukturalnych, jak np. dla tabeli 6.3 i 6.4 zbudowanej ze współczynników występujących w wielomianach $A(q)$ oraz $B_1(q)$, a mianowicie:

$$\begin{aligned}
& [(-0,1342_1^I), (0,343_1^I, -0,05387_2^I, -0,1443_3^I)] \\
& \quad \downarrow \\
& [(-0,1342_1^{II}), (0,343_1^{II}, -0,05387_2^{II}, -0,1443_3^{II})] \\
& \quad \downarrow \\
& \quad \dots\dots\dots \\
& \quad \downarrow \\
& [(-0,7413_1^{XXXIII}), (0_1^{XXXIII}, 0_2^{XXXIII}, 0_3^{XXXIII}, 0_4^{XXXIII}, 0_5^{XXXIII}, 0_6^{XXXIII}, 0_7^{XXXIII}, 0_8^{XXXIII}, -20,12_7^{XXXIII})], \\
& \hspace{15em} (7.11)
\end{aligned}$$

przy czym w przypadku zmian strukturalnych rzecz dotyczy pojawienia się lub wypadnięcia pierwiastka s_i ze zestawu pierwiastków, którym w szczególności może być wypadnięcie pierwiastka dotyczącego: podsystemu, układu, przetwornika, elementu, jak na przykład w przypadku przejścia z okresu IV do V, XII do XIII oraz XIII do XIV, czy też z okresu XXXII do okresu XXXIII. Otrzymane w ten sposób zestawy pierwiastków równania charakterystycznego lub zestawy współczynników wielomianów mogą zostać dalej wykorzystane na przykład do wygenerowania populacji początkowej dla Systemowego Algorytmu Ewolucyjnego SAE, możliwym do wykorzystania w poszukiwaniu bardziej krzepkiej populacji, a więc dla warunków rozpatrywanego zadania bardziej krzepkiego modelu systemu KSE. W wyniku zastosowania algorytmu SAE można zatem dalej otrzymać wielomian $A(q)$ oraz wielomiany $B_i(q)$, czy też elementy macierzy występujących w równaniach w przestrzeni stanów¹¹².

¹¹² Autor opracował Systemowy Algorytm Ewolucyjny SAE [166, 177, 183], którego zastosowanie wykracza poza przyjęty cel i tezę rozprawy.

Wykorzystując następnie model rozwoju arx określony za pomocą wielomianu $A(q)$ oraz $B_2(q)$ (zgodnie z zależnością (7.2)) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} & (1 - 0,1342 \cdot q^{-1}) \cdot y(\theta) \\ & = (-0,1965 \cdot q^{-1} - 0,7748 \cdot q^{-2} + 0,3264 \cdot q^{-3}) \cdot u(\theta) + e(\theta) \end{aligned} \quad (7.12)$$

skąd po wyeliminowaniu operatora przesunięcia czasowego q^{-1} i po odpowiednich przekształceniach można otrzymać następującą postać wyrażającą efektywność operacyjną w czasie θ (zależność (7.8)):

$$\begin{aligned} A_D = \frac{y(\theta)}{u(\theta)} &= 0,1342 \frac{y(\theta-1)}{u(\theta)} - 0,1965 \frac{u(\theta-1)}{u(\theta)} \\ &- 0,7748 \frac{u(\theta-2)}{u(\theta)} + 0,3264 \frac{u(\theta-3)}{u(\theta)} \end{aligned} \quad (7.13)$$

przy czym człon pierwszy wyraża efektywność operacyjną efektów okresu $\theta - 1$ przeliczonych na nakłady okresu θ , podobnie człon drugi dotyczy analogicznych efektów okresu $\theta - 2$, a człon trzeci okresu $\theta - 3$.

Ze względu na fakt, iż znane są wartości strumieni mocy osiągalnej w elektrowniach $y_1(\theta)$ oraz mocy zainstalowanej w elektrowniach $u_2(\theta)$ w poszczególnych okresach można wyznaczyć wartość liczbową efektywności operacyjnej, która dla rozważanego przykładu wynosi $-0,56$, a więc efektywność operacyjna dla roku 2007 jest ujemna i wynosi 56%, a zatem w 2007 roku 1 MW mocy zainstalowanej przekładał się na potrzebę zmniejszania mocy osiągalnej o 56%.

7.5. Symulacja rozwoju

W środowisku Simulink istnieje możliwość projektowania modeli dynamicznych rozwoju SEE na bazie predefiniowanych bloków funkcjonalnych umieszczonych w bibliotekach lub na bazie zdefiniowanych bloków w postaci m -plików. Wykorzystując ww. unikatowe możliwości Simulinka dokonano komparatystyki uzyskanych wyników identyfikacji budując modele schematów blokowych rozwoju SEE. Okazało się, że symulacja rozwoju SEE z wykorzystaniem Simulink umożliwia badanie poprawności modelu rozwoju SEE oraz badanie jego wrażliwości, co zweryfikowano na przykładzie modelu opisanego równaniami stanu (5.10) zamieszczając uzyskany schemat blokowy zmiennych stanu na rys. 7.10. Uzyskano stosunkowo poprawną zgodność uzyskiwanych wyników badań modelu SEE w stosunku do systemu (danych statystycznych), co wynika z porównania charakterystyk zilustrowanych na Scope 1 (przebieg danych wyjściowych rzeczywistych) oraz Scope (przebieg danych uzyskanych w modelu), przy czym dane modelowe nie zawierają zakłóceń i ich przebieg wynika z charakteru modelu (model ciągły). Uzyskane wyniki potwier-

dzają użyteczność metody prowadzącej do poszukiwania metamodeli rozwoju systemu EE.

W celu pokazania możliwości wykorzystania metod identyfikacji pod kierunkiem Autora monografii został opracowany schemat blokowy w Simulink zamieszczony w pracy [53] (rys. 7.12), którego celem było pokazanie, która z metod identyfikacji spośród metod arx, armax, ob, bj generuje model rozwoju SEE najbardziej zbliżony do systemu rzeczywistego.

Na bazie podanego schematu blokowego przeprowadzono łącznie osiem eksperymentów symulacyjnych celem porównania zachowania się ww. czterech modeli między sobą oraz w stosunku do SEE dla wyjścia y_1 reprezentującego liczbę odbiorców energii elektrycznej przy różnej liczbie zmiennych wejściowych (zmienianej od jednego wejścia dla eksperymentu 1 aż dla ośmiu wejść dla eksperymentu 8). Uzyskane wyniki komparatystyki wyników symulacji zamieszczono w tabeli 7.2 [53].

Eksperyment dotyczący identyfikacji SEE na przykładzie wielkości wejścia: u_1 – przychody ogółem [tys. zł] i jednej wielkości wyjść: y_1 – liczba odbiorców elektrycznych [szt.] pokazał, że najlepsze wyniki można otrzymać stosując metody: oe i bj. Podobne wyniki dał eksperyment 2, gdzie wielkością wyjścia były: u_1 – przychody ogółem [tys. zł], u_2 – moc zainstalowana na koniec roku [MW] wejście: y_1 – liczba odbiorców elektrycznych [szt.]. Okazało się w eksperymencie 3, że gdzie wejściem jest: u_1 – przychody ogółem [tys. zł], u_2 – moc zainstalowana na koniec roku [MW], u_3 – liczba zatrudnionych osób w systemach elektroenergetycznych [osoby] a wyjściem: y_1 – liczba odbiorców elektrycznych [szt.] metodą dającą najlepsze wyniki jest armax.

W eksperymencie od 4 do 8 (gdzie wejście to: u_1 – przychody ogółem [tys. zł], u_2 – moc zainstalowana na koniec roku [MW], u_3 – liczba zatrudnionych osób w systemach elektroenergetycznych [osoby], u_4 – import energii elektrycznej [GWh], u_5 – produkcja energii elektrycznej [GWh], u_6 – liczba elektrowni [szt.], u_7 – liczba turbozespołów [szt.], u_8 – liczba kotłów [szt.] a wyjściem: y_1 – liczba odbiorców elektrycznych [szt.]) metodą dającą najlepsze wyniki okazała się metoda arx.

Porównanie metod identyfikacji i otrzymanych w wyniku identyfikacji modeli wprowadzono do porównania 4 metod identyfikacji: arx (Auto-Regresive eXogenous), armax (Auto-Regresive Moving Average eXogenous), Wyjście-Error (OE), Model Box-Jenkins w dwóch wymiarach: porównania wyników identyfikacji uzyskanych w SIT oraz porównania samych modeli systemów zaprojektowanych w Simulinku.

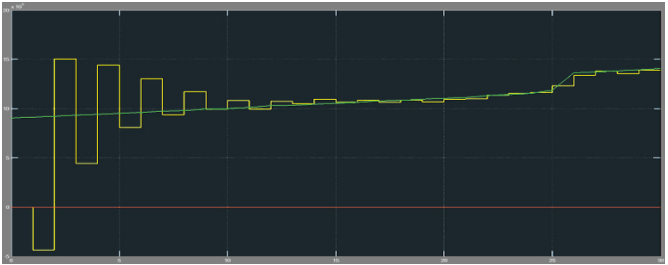
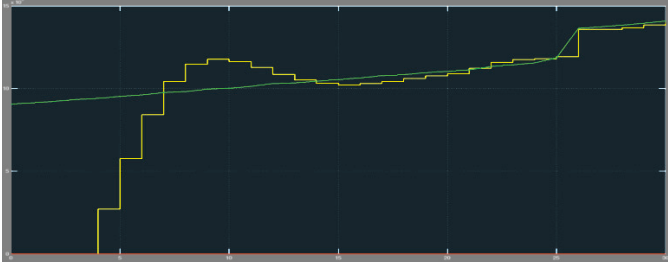
W wyniku porównania metod identyfikacji ze względu na dokładność identyfikacji w System Identification Toolboxie najlepszym okazał się dla eksperymentu¹¹³:

- E1 model ob (83,43%) oraz model bj (83,43%), a najgorszy arx (76,24%),
- E2 model ob (86,62%) oraz model bj (86,62%), a najgorszy armax (76,24%),

¹¹³ W nawiasach podano w % stopień zgodności modelu z systemem EE.

- E3 model armax (89,04%), a najgorszy ob (71,85%) oraz model bj (71,85%),
- E4 model arx (92,72%), a najgorszy ob (70,12%) oraz model bj (70,12%),
- E5 model arx (96,58%), a najgorszy ob (71,38%) oraz model bj (71,38%),
- E6 model arx (97,17%), a najgorszy ob (81,77%) oraz model bj (81,77%),
- E7 model arx (96,69%), a najgorszy ob (85%) oraz model bj (85%),
- E8 model arx (94,08%), a najgorszy ob (85,9%) oraz model bj (85,9%).

Tabela 7.2. Porównanie modeli SEE z rzeczywistym systemem EE dla wyjścia y_1 [szt.] reprezentującego liczbę odbiorców energii elektrycznej – wybrane przykłady

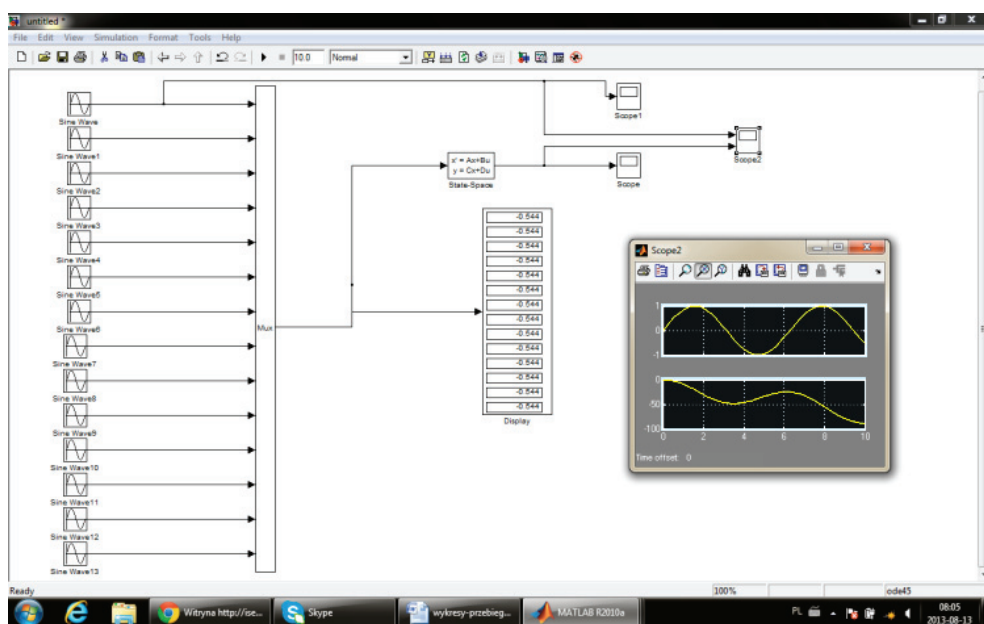
Eksperyment 3	
<p>Porównanie modelu z systemem EE dla 3 wejść: u_1, u_2 oraz u_3. Zgodność z danymi rzeczywistymi otrzymano w wyniku wykorzystania modelu armax w wysokości 89,04%. arxtrzy441 – model arx, amxtrzy2221 – model armax, bjtrzy2221 – model bj, oetrzy221 – model oe, simout3 – nazwa pliku, do którego przenoszone są wyniki w Workspace. Oznaczenia kolorów wykresów: zielony – model rzeczywisty, żółty (skokowy) – model armax.</p>	
Eksperyment 8	
<p>Porównanie modelu z systemem EE dla 8 wejść u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7 oraz u_8. Najwyższą zgodność z danymi rzeczywistymi w wysokości 94,0794 % otrzymano w wyniku zastosowania modelu arx. arxosiem514 – model arx, amxosiem2221 – model armax, bjosiem12221 – model bj, oeosiem111 – model oe, simout8 – nazwa pliku, do którego przenoszone są wyniki w Workspace. Oznaczenia kolorów: zielony – model rzeczywisty, żółty – model arx.</p>	

Źródło: [53].

Pozostałe oznaczenia: u_1 – przychody ogółem [tys. zł], u_2 – moc zainstalowana na koniec roku [MW], u_3 – liczba zatrudnionych osób w systemie elektroenergetycznym [osoby], u_4 – import energii elektrycznej [GWh], u_5 – produkcja energii elektrycznej [GWh], u_6 – liczba elektrowni [szt.], u_7 – liczba turbozespołów [szt.], u_8 – liczba kotłów elektroenergetycznych [szt.].

W wyniku porównania zachowania się wymienionych czterech modeli zaprojektowanych w Simulinku (arx, armax, bj, oe) najlepszym okazały się odpowiednio badane modele SISO oraz MISO: arx dla modeli o czterech i więcej wejściach, armax dla modeli z trzema wejściami oraz oe i bj dla modeli z jednym i dwoma wejściami. Odpowiednio najgorszymi okazały się modele ob i bj dla modeli powyżej trzech wejść oraz model arx dla jednego wejścia i model armax dla dwóch wejść. Porównanie metod identyfikacji na podanym przykładzie liczbowym potwierdziło, że najlepsze wyniki dla danych liczbowych dotyczących rozwoju systemu elektroenergetycznego wynikały z zastosowania do identyfikacji metody arx.

Na potrzeby badania zachowania się modeli systemu EE zbudowano schematy blokowe zmiennych stanu w środowisku Simulink, jak np. dla zmiennej stanu x_2 (zależność (6.13)) modelu rozwoju systemu KSE¹¹⁴ (rys. 7.10).



Rys. 7.10. Schemat blokowy badania zachowania się zmiennej stanu x_2 (moc osiągalna w elektrowniach w ciągu roku) przy wymuszeniu sinusoidalnym na wejściu modelu systemu KSE. Opracowanie własne w programie Simulink

¹¹⁴ W podobny sposób badano zachowanie się modeli rozwoju systemu KSE dla pozostałych zmiennych stanu oraz dla różnych wymuszeń, takich jak: skok jednostkowy, impuls Diraca itp.

7.6. Postępy rozwoju

Projektując model rozwoju systemu EE na bazie danych liczbowych systemu testowego IEEE RTS w kategoriach smart system (jako fabryki bezładnej), na przykład na potrzeby badania kierunku rozwoju systemu EE i jego parametrów, należy uwzględnić między innymi relacje systemu EE z otoczeniem oraz tendencje zmian struktury oraz parametrów systemu i modelu jako obiektów adaptacyjnych, z zachowaniem krzepkości i samowystarczalności [32].

Sygnaly wejściowe (wymuszające) w systemie sterowania, jakim jest system SEE badany w kategoriach fabryk bezładnych mogą być trzech rodzajów:

- materialne (paliwo i inne surowce, urządzenia wykorzystywane do produkcji i przesyłu mocy i energii elektrycznej), jak np. węgiel, ropa, oleje, turbogeneratory, kotły, transformatory, linie itp.,
- energetyczne (energia mechaniczna, cieplna, hydrauliczna, pneumatyczna, jądrowa itp.),
- informacyjne, w tym informacji cenowej (finansowe).

Na przestrzeni badanego okresu 28 lat zauważono występowanie zmian struktury macierzy **A** i struktury macierzy **B**, jak też zmiany wartości występujących w nich elementów. Największym wymiarem macierzy **A** był wymiar 45×45 dla okresu $\langle \theta_{13} - \theta_{45} \rangle$, a najmniejszym 19×19 dla okresu $\langle \theta_{28} - \theta_{55} \rangle$. Wymienione wymiary wskazują na występowanie w pierwszym przypadku 45 zmiennych stanu (najwięcej), a w drugim przypadku dziewiętnastu zmiennych stanu (najmniej).

Obserwując zmiany struktury w systemie EE, zauważono stabilizację oscylującą wokół 19 zmiennych stanu (rys. 7.11), przy czym okazało się, że największe zakłócenia w systemie SEE wystąpiły do 13. okresu pomiarowego (do 13. kwartału). Natomiast między 14 oraz 21 kwartałem stan ustabilizował się (wpływ na system miało 19 zmiennych stanu), a między 22 oraz 25 kwartałem wystąpił nagły skok, który następnie przeszedł w stan ustabilizowany.

Sygnaly będące odpowiedzią na wymuszenie kierowane do otoczenia również są trzech rodzajów, przy czym można wymienić dwa rodzaje przepływów sygnałów przeciwnie do siebie skierowanych. W przyjętym modelu identyfikacyjnym zostały przyjęte oba typy strumieni sygnałów, to jest przepływ energomaterialny oraz przepływ informacyjny, w tym informacji cenowej (finansowy), stąd też otrzymany model identyfikacyjny jest modelem pełnym uwzględniającym aspekty ekonomiczne. Z tych względów interpretacja uzyskanych wskaźników w modelach będzie interpretacją techniczną, ekonomiczną i techniczno-ekonomiczną. Te elementy mogą występować w macierzy **th** lub jako elementy występujące w modelu macierzy zmiennych stanu. W interpretacji w zakresie czynników opisujących system EE widziany w kategoriach fabryki bezładnej wykorzystane zostały elementy macierzy zmiennych stanu **A** i **B**, które odzwierciedlają strukturę i parametry modelu systemu SEE jako macie-

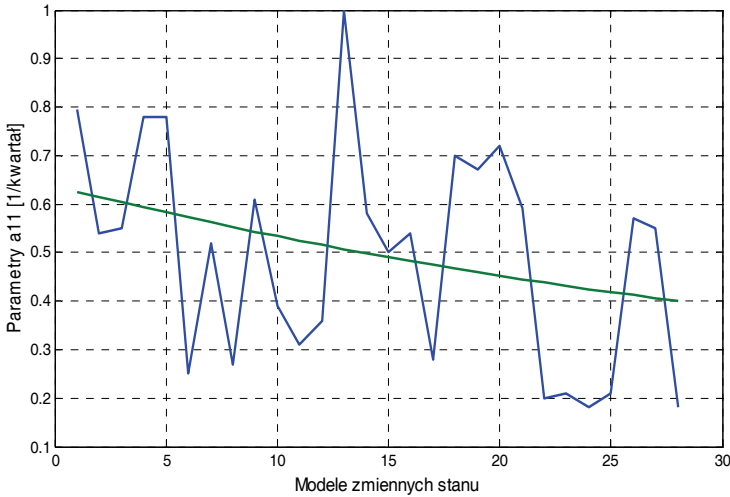
rze: stopnia wewnętrznego zorganizowania systemu EE (macierz **A**) oraz poziomu sterowania (macierz **B**). Ze względu na fakt, iż macierze **C** i **D** nie mają bezpośredniego wpływu na sterowność systemu [24, 32] nie podjęto interpretacji ich elementów. Co więcej okazało się, że w otrzymanych modelach systemu EE w każdym okresie $\Delta\theta$ macierz **D** = 0, co oznacza, że wejścia modelu systemu SEE nie oddziałują bezpośrednio na wyjścia.

Tabela 7.3. Wymiary macierzy stanu [32]

Lp.	Badane okresy	Wymiar macierzy			
		A	B	C	D
1	1–28	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0
2	2–29	44 × 44	44 × 6	6 × 1	0
3	3–30	43 × 43	43 × 6	6 × 1	0
4	4–31	20 × 20	20 × 6	6 × 1	0
5	5–32	20 × 20	20 × 6	6 × 1	0
6	6–33	43 × 43	43 × 6	6 × 1	0
7	7–34	39 × 39	39 × 6	6 × 1	0
8	8–35	43 × 43	43 × 6	6 × 1	0
9	9–36	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0
10	10–37	44 × 44	44 × 6	6 × 1	0
11	11–38	43 × 43	43 × 6	6 × 1	0
12	12–39	43 × 43	43 × 6	6 × 1	0
13	13–40	45 × 45	45 × 6	6 × 1	0
14	14–41	20 × 20	20 × 6	6 × 1	0
15	15–42	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0
16	16–43	20 × 20	20 × 6	6 × 1	0
17	17–44	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0
18	18–45	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0
19	19–46	20 × 20	20 × 6	6 × 1	0
20	20–47	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0
21	21–48	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0
22	22–49	43 × 43	43 × 6	6 × 1	0
23	23–50	43 × 43	43 × 6	6 × 1	0
24	24–51	44 × 44	44 × 6	6 × 1	0
25	25–52	44 × 44	44 × 6	6 × 1	0
26	26–53	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0
27	27–54	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0
28	28–55	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0
29	29–56	19 × 19	19 × 6	6 × 1	0

Z analizy zmian wymiarów macierzy **A** (tab. 7.3) można zauważyć niewielką tendencję spadkową, co oznacza, że średnio wraz z upływem lat modele zmiennych stanu systemu EE zawierały coraz mniej zmiennych stanu (malał wymiar wektora zmiennych stanu od stanu średniego wynoszącego w okresie początkowym 37 do poziomu 27 w okresie końcowym). Poszczególne elementy macierzy **A** zostały zinterpretowane

w postaci charakterystyk czasowych, z których wynika oscylacyjny ich przebieg z tendencją malejącą (rys. 7.17) co wiąże się z coraz dokładniejszym prognozowaniem np. zapotrzebowania na moc i energię elektryczną.



Rys. 7.11. Przebieg zmian elementu a_{11} macierzy **A** dla całej serii modeli rozwoju systemu SEE IEEE RTS [34]. Wartości współczynników w 28 kwartałach:

$$a_{11} = [0,8, 0,5, 0,6, 0,8, 0,8, 0,3, 0,5, 0,3, 0,6, 0,4, 0,3, 0,4, 1,0, 0,6, 0,5, 0,5, 0,3, 0,7, 0,7, 0,7, 0,6, 0,2, 0,2, 0,2, 0,2, 0,6, 0,6, 0,6]$$

Podobnie zauważono zmiany wymiaru i wartości macierzy **B** od maksymalnego wymiaru macierzy **B** wynoszącego 45×6 do minimalnego wynoszącego 19×6 dla identycznych okresów jak w przypadku macierzy **A**. Elementy macierzy **B** przyjmują dwie wartości, a mianowicie: zero lub jeden, co można zinterpretować, iż zero oznacza brak wymuszenia i jeden – występowanie wymuszenia.

Z przeprowadzonych badań wynikają przynajmniej dwie istotne właściwości: wzrost wewnętrznej organizacji systemu EE, co potwierdzają zmiany wartości elementów i wymiaru macierzy **A** oraz wzrost poziomu sterowania, który co prawda jeszcze w minimalnym stopniu, ale jest już widoczny w zmianach elementów i wymiarze macierzy **B**.

8. Dyskusja wyników i wnioski końcowe

Zasadniczym celem niniejszej pracy było uzyskanie modeli rozwoju systemu sterowania oraz metamodelu rozwoju na przykładzie rozwoju systemu elektroenergetycznego. Modele rozwoju systemu EE uzyskano w wyniku identyfikacji rozwoju systemu testowego IEEE RTS oraz krajowego systemu elektroenergetycznego.

Identyfikację można przeprowadzić na jednym zbiorze danych pomiarowych zmiennych wejściowo-wyjściowych i wówczas uzyskuje się model systemu, w rozważanym przypadku model SEE, np. na potrzeby uzyskiwania prognozy wielkości wyjściowych. Sam model także zmienia się i jest różny dla różnych okresów stanów rozwoju systemu EE, stąd też przeprowadzono ponadto identyfikację modelu rozwoju systemu EE otrzymując metamodely rozwoju: systemu testowego IEE RTS oraz o systemie elektroenergetycznego na potrzeby projektowania rozwoju modelu systemu.

W celu uzyskania danych do identyfikacji dla tak rozumianego celu tworzenia modelu rozwoju systemu EE uzyskano wystarczającą liczbę historycznych modeli KSE i następnie parametry modeli wykorzystano do identyfikacji metamodelu KSE. Przyjęto wówczas współczynniki występujące w wielomianach przy zmiennych wyjściowych jako zmienne wejściowe metamodelu, a współczynniki występujące w wielomianach związanych ze zmiennymi wyjściowymi jako zmienne wyjściowe metamodelu. Z wymienionych względów zaproponowany w monografii sposób identyfikacji może zostać wykorzystany w projektowaniu modeli rozwoju KSE do budowania modeli prognostycznych, które dopiero następnie mogą być wykorzystywane w prognozowaniu wielkości wyjściowych.

Poszukiwano zatem modeli systemu EE, dla bazy danych zmiennych wejściowych i zmiennych wyjściowych (testowych i rzeczywistych), w sensie przyjętej metody identyfikacji arx, co umożliwiło osiągnięcie najlepszej zgodności między zmiennymi empirycznymi oraz zmiennymi generowanymi przez model. W przeprowadzanym procesie Identyfikacji tak jak w każdym innym algorytmie iteracyjnym dokonano m.in.: wyboru struktury modelu, wykonania biernego eksperymentu identyfikacyjnego, wyznaczenia parametrów modelu metodą identyfikacji arx i przeprowadzenia oceny zgodności właściwości dynamicznych modelu systemu i rzeczywistego systemu EE poprzez porównanie zgodności zachowania się modelu w stosunku do systemu,

przy pobudzeniu takim samym sygnałem wejściowym. Proces ten prowadzony był do momentu, aż osiągnięta została optymalna zgodność modelu i systemu.

W celu przeprowadzenia identyfikacji rozwoju np. KSE zgromadzono odpowiednie dane liczbowe dotyczące 14 zmiennych wejściowych oraz 4 zmiennych wyjściowych dla lat 1946–2007 (okres 62-letni). Identyfikację KSE przeprowadzono w środowisku MATLAB z wykorzystaniem SIT dla umownych okresów pomiarowych 30-letnich z krokiem jednego roku. W ten sposób otrzymano katalog 33 modeli systemu EE, przy czym każdy z nich mógł być wykorzystany dla celów prognostycznych dla następnych okresów rozwoju systemu KSE, a ostatni z nich może być wykorzystany do poszukiwania wielkości wyjściowych dla prognozowanego nowego okresu.

Wymienione modele zostały następnie wykorzystane do budowy metamodelu rozwoju KSE, który z oczywistych względów nie jest modelem makroekonomicznym, będąc parametrycznym modelem rozwoju opisanym przez macierz \mathbf{th} i w konsekwencji modelem zmiennych stanu opisanym przez macierze \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} , \mathbf{K} i $\mathbf{X0}$, gdzie wektor stanu rozwoju jest oczekiwanym narzędziem do prognozowania przyszłych stanów rozwoju systemu EE. Uzyskany model jest modelem sterowania, nie jest natomiast modelem ekonometrycznym, czy też makroekonomicznym, przy czym wykorzystując metodę zaproponowaną w monografii, można uzyskiwać także modele makroekonomiczne, przyjmując jako zmienne wejściowe odpowiednie wielkości makroekonomiczne, takie jak PKB, podaż pieniądza, wskaźniki inflacji itp. oraz zmienne wyjściowe, takie jak: moc osiągalna w elektrowniach (ogółem) [MW], zużycie (rozchód) energii elektrycznej (ogółem) [GWh], eksport energii elektrycznej (ogółem) [GWh], straty energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych (ogółem) [GWh] itp., co nie było celem prowadzonych badań w ramach niniejszej monografii.

Otrzymanie porównywalnej bazy danych wejściowych i wyjściowych z lat 1946–2007 nie było sprawą prostą z oczywistych względów i wiązało się z przeprowadzeniem szeregu zabiegów, spośród których do najważniejszych należały zabiegi związane ze sprowadzeniem do porównywalności danych z okresu np. wymiany waluty, hiperinflacji oraz denominacji, a w niektórych przeprowadzanych eksperymentach niezbędna była ponadto normalizacja danych statystycznych.

Zarówno modele rozwoju KSE, jak i metamodel rozwoju zweryfikowano na rzeczywistych danych liczbowych, przy czym w pierwszym przypadku otrzymano katalog modeli, który został wykorzystany następnie do oceny rozwoju systemu KSE widzianego jako system sterowania w przestrzeni stanów. Z tych względów w drugim modelu – metamodelu rozwoju systemu EE w przestrzeni stanów, wraz z interpretacją uzyskanych zmiennych stanu, zaproponowano dwa zasadnicze kryteria oceny rozwoju, a mianowicie kryterium bezpieczeństwa rozwoju oraz kryterium efektywności rozwoju.

Przyjęcie do oceny rozwoju kryteriów rozwoju tego typu jak bezpieczeństwo rozwoju (obejmujące ustawowo także względy ekologiczne), czy efektywność rozwoju,

umożliwia ocenę rozwoju systemu w czasie długim θ i w ten sposób pozwala między innymi wyspecyfikować sygnały ostrzegawcze dla projektantów, a nawet prognostyków, planistów lub programistów, czy też strategów rozwoju systemu elektroenergetycznego (SEE), przy czym tutaj ważne jest podkreślenie, że chodzi o kryterium oceny rozwoju nie kryterium optymalizacji rozwoju.

Wykorzystując dane liczbowe systemu testowego IEEE RTS 96 oraz dane liczbowe empiryczne systemu KSE, opracowano katalog modeli rozwoju systemu elektroenergetycznego (SEE) w postaci macierzy \mathbf{th} (modele arx) oraz w postaci modeli w przestrzeni stanów – macierze – **A, B, C, D** (modele ss).

Wykorzystując następnie dane liczbowe z lat 1946–2007 dotyczące wybranych zmiennych charakteryzujących krajowy system EE, uzyskano modele rozwoju systemu KSE jako systemu rozwijającego się w postaci macierzy \mathbf{th} , czy też w postaci modelu w przestrzeni stanów (macierze **A, B, C, D**). Wymienione modele możliwe są do wykorzystania w poszukiwaniu przyszłościowych modeli rozwoju, a nie tylko do poszukiwania konkretnych rozwiązań prognozowanego systemu EE. Przyjęcie konkretnego kryterium efektywności rozwoju oraz kryterium bezpieczeństwa rozwoju SEE pozwoliło na systemową poprawę istniejącej sytuacji eksploatacyjnej i rozwojowej poprzez wprowadzanie poprawek parametrycznych oraz poprawek strukturalnych. Zbadano też wrażliwość rozwoju tak modelu jak też systemu elektroenergetycznego.

Zasadniczy cel pracy, którym było przeprowadzenie badania prawidłowości rozwoju systemu EE z punktu widzenia krzepkości, a więc pod względem zmian systemu EE przy zapewnieniu równowagi pomiędzy efektywnością oraz bezpiecznym poziomem eksploatacji systemu EE z wykorzystaniem teorii identyfikacji oraz teorii sterowania i systemów został osiągnięty, gdyż:

- 1) zidentyfikowano potrzebę badania prawidłowości rozwoju KSE, tj. m.in. prawidłowości zmian strukturalnych oraz parametrycznych do sterowania transformacją systemową i wprowadzania mechanizmów regulacyjnych,
- 2) opracowano metodę badania prawidłowości rozwoju systemu KSE z wykorzystaniem teorii identyfikacji, teorii sterowania i inżynierii rozwoju systemów, a więc m.in.:
 - a) zdefiniowano podstawy inżynierii rozwoju systemu EE, umożliwiające w sposób systemowy identyfikację i symulację modeli rozwoju SEE,
 - b) przygotowano dwa eksperymenty identyfikacyjne, a mianowicie: eksperyment 1 dla danych testowych IEEE RTS 1996 oraz eksperyment 2 dla danych rzeczywistych dotyczących KSE,
 - c) przeprowadzono identyfikację krocącą systemu EE (z postępowaniem jednego okresu) prowadzącą do uzyskania dwóch katalogów modeli dyskretnych rozwoju typu MISO w postaci macierzy \mathbf{th} (katalogu 20 modeli IEEE RTS w przypadku eksperymentu 1 oraz katalogu 33 modeli KSE w przypadku eksperymentu 2),

- d) przeprowadzono identyfikację kroczącą modelu systemu EE (z postępowaniem jednego okresu) prowadzącą do uzyskania dwóch katalogów metamodeli dyskretnych rozwoju typu MISO w postaci macierzy \mathbf{th} (metamodelu systemu IEEE RTS w przypadku eksperymentu 1 oraz metamodelu systemu KSE w przypadku eksperymentu 2),
 - e) dokonano transformacji modeli dyskretnych \mathbf{th} na modele ciągłe \mathbf{th} , a następnie na modele ciągłe w przestrzeni stanów (modele ss) uzyskując macierze \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} i \mathbf{D} ,
 - f) dokonano oceny prawidłowości rozwoju systemu EE z punktu widzenia efektywności i bezpieczeństwa rozwoju z uwzględnieniem zmian parametrycznych oraz zmian strukturalnych systemu wizualizowanych za pomocą linii pierwiastkowych Evansa,
 - g) związane zagadnienie rozwoju systemu KSE z ruchem pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej s oraz z ,
 - h) wykorzystano metodę linii pierwiastkowych Evansa do poszukiwania prawidłowości rozwoju i wizualizacji zmian w strukturze i w parametrach systemu KSE,
- 3) wykorzystano środowisko Matlab i Simulink wraz z językiem Matlab oraz odpowiednimi toolboxami, takimi jak np. System Identification Toolbox oraz System Control Toolbox do przeprowadzenia identyfikacji oraz do wspomagania badania prawidłowości rozwoju SEE na gruncie teorii sterowania i systemów, a w tym na gruncie inżynierii rozwoju systemów technicznych oraz techniczno-ekonomicznych.
 - 4) zbudowano modele symulacyjne w środowisku Simulink, które wykorzystano do badań wrażliwościowych i symulacyjnych,
 - 5) zinterpretowano uzyskane wyniki badań, w tym m.in. zmienne stanu modeli i metamodeli rozwoju KSE.

W dalszych badaniach można wykorzystać m.in. modele rozwoju SEE (modele IEEE RTS oraz modele KSE) uzyskane w postaci macierzy \mathbf{th} , macierzy \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} i \mathbf{D} oraz pierwiastków równania charakterystycznego do poszukiwania polepszenia systemu rzeczywistego z wykorzystaniem algorytmów genetycznych. Można też przeprowadzić badania prawidłowości rozwoju systemu EE z wykorzystaniem sieci neuronowych samoorganizujących się (SOM), czego nie obejmuje niniejsza monografia.

Literatura

- [1] Alamaniotis M., Ikonomopoulos A., Tsoukalas L.H., *Evolutionary Multiobjective Optimization of Kernel-Based Very-Short-Term Load Forecasting*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 27, No. 3, August 2012, 1477–1484.
- [2] Brown Do Coutto Filho M., Cesar Stacchini de Souza J., *Forecasting-Aided State Estimation – Part I: Panorama*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 4, Nov. 2009, 1667–1677.
- [3] Brown Do Coutto Filho M., Cesar Stacchini de Souza J., Sergio Freund R., *Forecasting-Aided State Estimation – Part II: Implementation*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 4, Nov. 2009, 1678–1685.
- [4] Bartodziej G., Tomaszewski M., *Polityka energetyczna i bezpieczeństwo energetyczne*, Wyd. FSN-T „Energetyka i Środowisko”. Warszawa 2008.
- [5] Bernas S., *Systemy elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa 1982.
- [6] Billinton R., Huang D., *Effects of Load Forecast Uncertainty on Bulk Electric System Reliability Evaluation*, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 23. No. 2, May 2008, 418–425.
- [7] Bieniek M., *Metoda oceny stabilności systemu elektroenergetycznego w systemach poawaryjnych*, Praca doktorska pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Mariana Cegielskiego, Wydział Elektryczny PWr., Wrocław 1977.
- [8] Bielewicz K., *Smart metering. Inteligentny system pomiarowy*, PWN, Warszawa 2012.
- [9] Bolkowska B., *Planowanie systemu elektroenergetycznego w ujęciu teorii sterowania*, Archiwum Energetyki, nr 4, 1974.
- [10] Bojarski W.W., *Przykładowe zastosowania analizy i inżynierii systemów*, PWN, Warszawa 1984.
- [11] Brociek S., *Metoda wyboru układów sieci przesyłowej przy średnioterminowym planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego*, Praca doktorska, Wyd. Elektryczny PW, Warszawa 1975.
- [12] Brzozowski W., *Zastosowanie algorytmu genetycznego do optymalizacji procesu eksploatacji elektrowni*. Archiwum Energetyki, t. XXVII, nr 3–4, 1998.
- [13] Brzóska M., *Algorytm ewolucyjny rozwoju systemu elektroenergetycznego na przykładzie systemu testowego IEEE*, Praca dyplomowa pod kierunkiem dr J. Tchórzewskiego, Instytut Informatyki AP, Siedlce 2001.
- [14] Brzóska J., *Ćwiczenia z automatyki w MATLABIE i Simulinku*, MIKOM, Warszawa 1977.
- [15] Bubnicki Z., *Identyfikacja obiektów sterowania*, PWN, Warszawa 1974.
- [16] Buchta F., *Optymalizacja strategii rozwoju sieci przesyłowej w warunkach rynkowych z uwzględnieniem ryzyka*, ZN PŚ., nr 1712, Gliwice 2006.
- [17] Bujko J. i in., *Potrzeba nowej doktryny w zakresie zarządzania bezpieczeństwem elektroenergetycznym kraju*, „Energetyka” – Zeszyt Tematyczny nr III, czerwiec 2004.
- [18] Bułat T., *Metoda doboru konfiguracji sieci elektroenergetycznej w warunkach ruchowych*, Praca doktorska pod kierunkiem naukowym dr hab. inż. Jana Pytela, Wydział Elektryczny PWr., Wrocław 1991.
- [19] Castillo E., Conejo A.J., Prunela R.E., Solares C., Menendez J.M., *m-k Robust Observability in State Estimation*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 2, May 2008, 296–305.

- [20] Cegielski M., Kremens Z., Soberajski M., *Systemy elektroenergetyczne – teraźniejszość i przyszłość*, Archiwum Energetyki, nr 1–2, 1997.
- [21] Cegielski M., *Sieci i systemy elektroenergetyczne*, PWN, Warszawa 1979.
- [22] Cegielski M., Sobierajski M., Wilkosz K., *Impedancyjny model węzła elektroenergetycznego. Podstawy teoretyczne. Perspektywy zastosowania do badania stabilności napięciowej*, [w:] K. Wilkosz (red.), *Problemy systemów elektroenergetycznych*, OW PWr., Wrocław 2003.
- [23] Chen J., Deng S.-J., Huo X., *Electricity Price Curve Modeling and Forecasting by Manifold Learning*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, Aug. 2008, 877–888.
- [24] Chochowski A., Obstawski P., *Model parametryczny baterii kolektorów słonecznych*, SGGW, Inżynieria Rolnicza, 14, 2005, 55–64.
- [25] Cichocki A., Osowski S., Siwek K., *MATLAB w zastosowaniu do obliczeń obwodowych i przetwarzania sygnałów*, OW PW, Warszawa 2006.
- [26] Ciok S., *Modelowanie i symulacja komputerowa stanów ustalonych i nieustalonych obwodów elektroenergetycznych*, Wyd. PW, Warszawa 1993.
- [27] Crandall J., Cummings M.L., *Identifying Predictive Metrics for Supervisory Control of Multiple Robots*, IEEE Transaction on Robotics, Vol. 23, Iss. 5, Oct. 2007, 942–951.
- [28] Dauphin D.R., *Badanie stabilności lokalnej systemu elektroenergetycznego z uwzględnieniem podatności napięciowej odbiorców*, Rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny PWr., Wrocław 1994.
- [29] Dehghani M., Nikravesh S.K.Y., *State-Space Model Parameter Identification In Large-Scale Power Systems*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, Aug. 2008, 1449–1457.
- [30] Derezic V., Radovic D., *A Framework for Dulling Intelligent Manufacturing Systems*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part C: Applications on Reviews, Vol. 29. No 3. August 1999.
- [31] Diop A.Ch., *Metoda planowania rozwoju elektroenergetycznych sieci rozdzielczych średnich napięć*, Praca doktorska pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Kazimierza Kremensa, Wydział Elektryczny PWr., Wrocław 1996.
- [32] Długosz I., *System elektroenergetyczny jako fabryka bezładna z punktu widzenia zmian strukturalnych i parametrycznych systemu sterowania*, Praca inżynierska pod kierunkiem dr inż. Jerzego Tchórzewskiego napisana w Katedrze Sztucznej Inteligencji na Wydziale Nauk Ścisłych Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach, Siedlce 2012.
- [33] Dobrzańska I. (red.), *Prognozowanie w elektroenergetyce*. Materiały konferencyjne, ZN PCz., Częstochowa 1996–2008.
- [34] Dobrzańska I. (red.), *Bezpieczeństwo systemów energetycznych*, FSNT, Warszawa 2004.
- [35] Dołęga W., *Metoda średniokresowego planowania rozwoju sieci przesyłowej*, Praca doktorska pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Kazimierza Kremensa, Wydział Elektryczny PWr., Wrocław 1997.
- [36] Drozd Z., *Metoda określania impedancji zastępczej układu elektroenergetycznego*, Praca doktorska pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Mariana Cegielskiego, Wydział Elektryczny PWr., Wrocław 1980.
- [37] Dyrzc K.P., *Estymacja zmiennych stanu i parametrów silnika indukcyjnego w układzie sterowania wektorowego z zastosowaniem filtru Kalmana*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7/8, SIGMA NOT, Warszawa 2006.
- [38] Frydryszak M., Kerner A., *Problemy wyznaczania stanów ustalonych przy planowaniu pracy sieci przesyłowej*, Energetyka, 5, 1991.
- [39] Fukuyama Y., Chiang H.-D., *A parallel genetic algorithm for generation expansion planning*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996.
- [40] Gajda J., Szyper M., *Modelowanie i badanie symulacyjne systemów pamiętających*, JARTEK, Kraków 1998.
- [41] Gawłowski S., Listowska-Gawłowska R., Pieciuch T., *Bezpieczeństwo energetyczne kraju*, Monografie Nr 177, WU PK, Koszalin 2010.

- [42] Gładys H., *Komputery w kierowaniu pracą systemu elektroenergetycznego*, WNT, Warszawa 1980.
- [43] Goldberg D.E., *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, WNT, Warszawa 1995.
- [44] *Gospodarka Paliwowo-Energetyczna*, Informacje i Opracowania Statystyczne, GUS, Warszawa 1991–2008.
- [45] Gross G., *Restructuring of the Electricity Industry in the U.S.*, MEPS '96, PWR., Wrocław 1996.
- [46] Gutkowski W., *Komputerowe metody optymalizacji konstrukcji*, IPPT PAN, Warszawa 1994.
- [47] Guzik B., Appenzell D., Jurek W., *Prognozowanie i symulacja*, AE, Poznań 2007.
- [48] Halilcevic S.S., Gubina F., Gubina A.F., *Prediction of Power system Security Levels*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 1, Feb. 2009, 368–377.
- [49] Harasimowicz L., *Wyznaczanie suboptymalnych układów pracy dużych sieci rozdzielczych dla potrzeb eksploatacji*, Energetyka, 12, 1992.
- [50] Hasan E., Galiana F.D., *Electricity Markets Cleared by Merit Order. Part II. Strategic Offers and Market Power*, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 23, No. 2, May 2008.
- [51] Helt P., Parol M., Piotrowski P., *Metody sztucznej inteligencji w elektroenergetyce*, Wyd. PW, Warszawa 2000.
- [52] Hellman W., *Regulacja częstotliwości i napięcia w systemie elektroenergetycznym*, WNT, Warszawa 1978.
- [53] Hołowieńko M., *Komparatystryka metod identyfikacji rozwoju systemu elektroenergetycznego z wykorzystaniem System Identification Toolboxa*, Praca inżynierska pod kierunkiem dr inż. Jerzego Tchórzewskiego napisana w Katedrze Sztucznej Inteligencji na Wydziale Nauk Ścisłych Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach, Siedlce 2012.
- [54] Horak J. i in., *Sieć elektroenergetyczna jako zbiór elementów*, Wyd. PCz., Częstochowa 1998.
- [55] Ignasiak E. (red.), *Optymalizacja decyzji, symulacja i prognozowanie procesów gospodarczych*, AE, Poznań 2002.
- [56] *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci przesyłowej*, PSE-Operator S.A., Wersja 1.2, Warszawa, 17 marca 2006 r. z póź. zm.
- [57] Janicki A., *Komputerowe metody w modelowaniu stochastycznym. Modele w finansach, technice i biologii. Algorytmy numeryczne i statystyczne*, Symulacja i symulacja zjawisk losowych, WNT, Warszawa 2001.
- [58] Jankowski B., *Modelowanie rozwoju krajowego systemu elektroenergetycznego z uwzględnieniem wymagań stabilizacji redukcji emisji dwutlenku węgla w Polsce*, IPPI PAN, Warszawa 1997.
- [59] Jaźwiński J., Ważyńska-Fioł K., *Bezpieczeństwo systemów*, PWN, Warszawa 1993.
- [60] Kacejko P., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 2002.
- [61] Kacejko P., *Analiza systemu elektroenergetycznego w ujęciu obiektowym*, PN PW, Elektryka, z. 104, 1998.
- [62] Kaczorek T., *Teoria sterowania i systemów*, PWN, Warszawa. 1996.
- [63] Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R., *Podstawy teorii sterowania*, WNT, Warszawa 2005.
- [64] Kasprzyk S. i in., *Najważniejsze zagadnienia dotyczące funkcjonowania sektora elektroenergetycznego w Polsce („Raport siedmiu”)*, Warszawa, luty 2008.
- [65] Kądzielowa A., *Bezpieczeństwo energetyczne*, Elektroenergetyka, nr 1, 2005 (52), 1–16.
- [66] Klempka R., *Modelowanie i symulacja układów elektrycznych w Matlabie: przykłady*, WN-D AGH, Kraków 2007.
- [67] Klempka R., Stankiewicz A., *Modelowanie i symulacja układów dynamicznych: wybrane zagadnienia z przykładami w Matlabie*, WN-D AGH, Kraków 2006.
- [68] Kłopotek M., *Techniczne zastosowania strategii ewolucyjnych*, IV KKN nt. „Sztuczna inteligencja”, SzI – 15 '2000. AP – PTC – WAT, AP, Siedlce 2000.

- [69] Kłos A., *Planowanie rozwoju systemu elektroenergetycznego. Poradnik Inżyniera Elektryka*, t. IV. *Elektroenergetyka*, Warszawa 1975.
- [70] Konieczny J., *Inżynieria systemów działania*, WNT, Warszawa. 1983.
- [71] Kocot H., *Planowanie rozwoju sieci przesyłowej i 110 kV w warunkach rynku energii elektrycznej*, Rozprawa doktorska, Gliwice 2000.
- [72] Korzeniowski M., *Model i implementacja kodowania oraz dekodowania sztucznego kodu genetycznego za pomocą sieci neuronowej samoorganizującej się*, Praca magisterska pod kierunkiem dr. inż. Jerzego Tchórzewskiego, Instytut Informatyki AP, Siedlce 2004.
- [73] Kowalik J., *Sterowanie statystycznie optymalne w ekonometrycznych modelach wzrostu*, Zeszyty Naukowe. Seria II. Prace Habilitacyjne. zeszyt 129, Poznań 2003.
- [74] Kowalski Z., *Jakość energii elektrycznej*, Wyd. PŁ., Łódź 2007.
- [75] Kozłowski K., Dutkiewicz P., Wróblewski W., *Modelowanie i sterowanie robotów*, PWN, Warszawa 2003.
- [76] Kożuchowski J., *Sterowanie systemami elektroenergetycznymi*, PWN, Warszawa 1994.
- [77] Krawiec F., *Ewolucja planowania rozwoju elektroenergetyki w ramach deregulacji*, Zeszyty Naukowe, Wyd. Adam Marszałek, Vol. 6, Toruń 1998.
- [78] Kremens Z., Sobierajski M., *Analiza układów elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 1996.
- [79] Królikowski A., *Identyfikacja obiektów sterowania*, Warszawa 2005.
- [80] Kujarczyk Sz. (red.), *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze*, t. 1 i 2, PWN, Warszawa 1991.
- [81] Kulczycki J., *Wybrane zastosowania algorytmów systemów złożonych w elektroenergetyce*, *Archiwum Energetyki*, nr 1–2, 1997.
- [82] Kulczycki J., *Optymalizacja struktur sieci elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 1990, 191.
- [83] Kusko A., *A prediction of Power System Development, 1968 to 2030*, *IEEE Spectrum*, April 1968, 75–80.
- [84] Kulikowski R., *Sterowanie w wielkich systemach*, WNT, Warszawa 1974.
- [85] Kwiatkowski M., *Proces formułowania strategii rozwoju firmy obrotu energią elektryczną*, SGH, Warszawa 2006.
- [86] Kwaśnicki W., *Ewolucyjny model rozwoju przemysłu – perspektywy badawcze i dydaktyczne*, *Ekonomista*, 4, 2000.
- [87] Lee Y., Bai X., Park Y.-M., *Optimization Method for Reactive Power Planning by Using a Modified Simple Genetic Algorithm*, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 4, Nov. 1995.
- [88] Lang B.P., Pahwa A., *Power Distribution System Reliability Planning Using a Fuzzy Knowledge – Based Approach*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, Jan. 2000.
- [89] Laframboise J.R.P.-R., Ferland G., Chikhani A.Y., Salama M.M.A., *An Expert System. Part 2: System for Reactive Power Control of a Distribution System Implementation*, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 3, August 1995.
- [90] Leśków J., *Prognozowanie i symulacje*, WSB-NLU, Nowy Sącz 2002.
- [91] Lis R., Kremens Z., *Systemy ekspertowe w kierowaniu pracą systemu elektroenergetycznego*. II KKN nt. „Inżynieria Wiedzy i Systemy Ekspertowe”, PWr., Wrocław 1993.
- [92] Lis R., *Inteligentny system do analizy bezpieczeństwa pracy systemu elektroenergetycznego*, Praca doktorska pod kierunkiem dr hab. Zdzisława Klemensa, Wydział Energoelektryki PWr., Wrocław 1996.
- [93] Lubośny Z., *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*, WNT, Warszawa 2010.
- [94] Łukomski R., Wilkosz K., *Estymacja stanu rozdzielczych sieci elektroenergetycznych*, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2005.
- [95] Macan E., *Peak-Load Transmission Pricing for the IEEE Reliability Test System*, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Copyright 1997 Edo Macan, 112.
- [96] Machowski J., *Stany nieustalone i stabilność systemu elektroenergetycznego*, WNT, Warszawa 1989.

- [97] Machowski J., *Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego*, OW PW, Warszawa 2007.
- [98] Machowski J., Białik J., *Power System Dynamics and Stability*, J. Wiley, 1996.
- [99] Maciejewski Z., *Bezpieczeństwo elektroenergetyczne – uwagi ogólne*, Polityka Energetyczna, t. 9, zeszyt specjalny, 2006, 26–35.
- [100] Malko J., *Planowanie systemów elektroenergetycznych*, PWN, Warszawa 1976.
- [101] Malko J., *Rozpad systemu elektroenergetycznego. Wylączenie źródeł. Przejście do pracy na potrzeby własne. Ocena zdolności utrzymania się źródła na potrzeby własne*, Raport z realizacji: zadanie nr 6, podzadanie nr 6.2.7. Projekt Badawczy zamawiany Nr PBZ-MEiN-1/2/2006 pt. „Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju: Konsorcjum Politechnik: Gdańskiej, Śląskiej, Warszawskiej i Wrocławskiej”. Wyd. Elektryczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław, grudzień 2008.
- [102] Malko J., *Wybrane zagadnienia prognozowania w elektroenergetyce*, OW PW, Wrocław 1995, 84.
- [103] Malko J., Otręba L., Skorupski W., *Identyfikacja modelu autoregresji – średniej ruchomej krótkoterminowej predykcji procesu zapotrzebowania mocy*, Archiwum Energetyki, nr 1–2, 1990, 101–108.
- [104] Malko J., *Systemy elektroenergetyczne – eksploatacja i rozwój*, Wyd. PWR., Wrocław 1988.
- [105] Malko J., *Aktualne problemy prognozowania na potrzeby sektora energii elektrycznej*, PE, nr 9, 2006.
- [106] Malko J., Pospolita B., Sękowski J., Stilpnopulos D., *Metody planowania układów elektroenergetycznych w warunkach ryzyka*, IE. PWR., Raport Serii Sprawozdanie Nr 258, Wrocław 1983.
- [107] Mandat T., Olejnik S., Tomczyk A., *Otwarty System Automatyki Sieciowej dla potrzeb kompleksowej obsługi sieci średnich napięć*, Energetyka, nr 12, 2000.
- [108] Marecki J., *Podstawy przemian energetycznych*, WNT, Warszawa 2007.
- [109] Markiewicz H., Wołkowiński K., *Urządzenia elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa 1985.
- [110] Markiewicz H., *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*, Warszawa 2002.
- [111] Marzecki J., *Stan obecny oraz kierunki modernizacji i rozwoju elektrociepłowni przemysłowych*, Gospodarka Paliwami i Energią, 5, 1990.
- [112] McGraw G.A., Gustafson C.L., Girls J.T., *Conditions for the equivalence of ARMAX and ARX Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 38, Iss. 4, Apr. 1993, 632–636.
- [113] Michalak P., *Wykorzystanie pakietu WASP – III do optymalizacji rozwoju krajowego systemu elektroenergetycznego*, Archiwum Energetyki, 1–2, 1990.
- [114] Mielczarski W., *Rynki energii elektrycznej. Wybrane aspekty techniczne i ekonomiczne*, ARE S.A., Warszawa 2000.
- [115] Monden Y., Yamada M., Arimoto S., *Fast algorithm for Identification of an ARX model and its order determination. Acoustics*, IEEE Transactions on Speech and Signal Processing, Vol. 30, No. 3, Jun 1982, 390–399.
- [116] Mrozek B., Mrozek Zb., *Matlab 5.x, Simulink 2.x. Poradnik użytkownika*, PLJ, Warszawa 1998.
- [117] Mulawka J.J., *Systemy ekspertowe*, WNT, Warszawa 1996.
- [118] Mynarski S., *Analiza danych: makromechanizmy*, Wyd. AE., Kraków 2000.
- [119] Nazarko J., *Estymacja stanów pracy elektroenergetycznych sieci rozdzielczych*, Rozprawy Naukowe, nr 9, PB, Białystok 1991.
- [120] Napieralski A., Poźniak T., *Nowe trendy w elektroenergetyce*, Elektronika, nr 4, 98.
- [121] Niebrzydowski J., *Problemy rozwoju systemów elektroenergetycznych*, Wyd. PB., Białystok 1989.
- [122] Niestępski S., *Systemy elektroenergetyczne*, Wyd. PW, Warszawa 1985.
- [123] Osowski S., *Modelowanie i symulacja układów i procesów dynamicznych*, OW PW, Warszawa 2007.
- [124] Osowski S., *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, WNT, Warszawa 2003.
- [125] Osowski S., *Modelowanie układów dynamicznych z zastosowaniem języka Simulink*, OW PW, Warszawa 1999.

- [126] Paska J., *Niezawodność systemów elektroenergetycznych*, OW PW, Warszawa 2005.
- [127] Paska J., Sałek M., *Przegląd podejść i kryteriów niezawodnościowych stosowanych w planowaniu systemu elektroenergetycznego*. Materiały konferencji APE '2007, t. 1, 83–90.
- [128] Passos Filho J.A., Martins N., Falcao D.M., *Identifying Power Flow Control Infeasibilities in Large-Scale Power System Models*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 1, Feb. 2009, 86–95.
- [129] Parczewski Z., Cofała J., Bojarski W.W., Umer A., *Kierunki rozwoju kompleksu paliwowo-energetycznego w Polsce i kształtowanie polityki energetycznej*, Energetyka, 1991.
- [130] Parol M., *Optymalizacja konfiguracji elektroenergetycznych sieci rozdzielczych w oparciu o systemy ewolucyjne*, Rozprawa doktorska pod kierunkiem prof. Sz. Kujszczyka, PW, Warszawa 1996.
- [131] Parol P., *Symulacja oblicza elementarnego systemu rozwoju metodą linii pierwiastkowych Evansa (na przykładzie systemu elektroenergetycznej sieci przesyłowej)*, Praca dyplomowa pod kierunkiem dr. J. Tchórzewskiego, Instytut Informatyki A.P., Siedlce 2001.
- [132] Popczyk J., Żmuda K., Siwy E., Kocot H., Korab R. (red. nauk.), *Bezpieczeństwo elektroenergetyczne w społeczeństwie postprzemysłowym na przykładzie Polski*, Wyd. PŚ., Gliwice 2009.
- [133] Popczyk J., *Innowacyjność technologiczna – najbardziej pożądana droga rozwojowa energetyki w Polsce*, Zeszyty BRE _ CASE. Energetyka – polityka – ekonomia, nr 91, 2007.
- [134] Popczyk J., *Stabilizacja bezpieczeństwa energetycznego w okresie 2008–2020*, Biuletyn URE, (2), 2008.
- [135] *Polityka energetyczna Polski do 2025 roku*, Ministerstwo Gospodarki, Zespół do Spraw Polityki Energetycznej, Warszawa 2005, 56.
- [136] *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku*, Ministerstwo Gospodarki, Projekt z września 2008.
- [137] *Prawo energetyczne*, Ustawa z dn. 10 kwietnia 1997. Dz.U. Nr. 54 z dn. 4 czerwca 1997 (z póź. zm.).
- [138] Rahimi A.F., Kato K., Ansari S.H., Brandwajn V., Cauley G., Sobajic J., *On External Network Model Development*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996, 905–910.
- [139] Rebizant W., *Metody inteligentne w automatyce zabezpieczeniowej*, PN IE Seria; Monografie Nr 29 (93), OW PWr., Wrocław 2004.
- [140] Rocznik Statystyczny. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 1947–2008.
- [141] Sachno M., Pate-Cornell M.E., *Managing technology development for safety-critical systems*, IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 51, Iss. 4, Nov. 2004, 451–461.
- [142] Sienkiewicz P., *Teoria efektywności systemów*, Wyd. Ossolineum, Wrocław 1987.
- [143] *SIMULINK. Dynamic System Simulation for MATLAB. Using SIMULINK*, The MathWorks, Inc., 1990–2008.
- [144] Sipa J., *Metodyka prognozowania bezpieczeństwa rozległych systemów technicznych*, Praca doktorska pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Franciszka W. Przystupy, PWr., Wrocław 2009.
- [145] Sobierajski M., *Po czerwcowej awarii 2006 czyli warunki bezpiecznego przesyłania energii elektrycznej*, Automatyka Elektroenergetyczna, nr 3, 2007.
- [146] Sobierajski M., *Electrical power systems analysis in Matlab*, OW PWr., Wrocław 2007.
- [147] Sobierajski M., Wikosz K., *Sieci elektroenergetyczne a rynki energii elektrycznej. Problemy i perspektywy*, Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, OW PWr., Wrocław 2000.
- [148] Söderstrom T., Fan H., Carsson B., Bigi S., *Least squares parameter estimation of continuous-time ARX models from discrete-time data*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 42, Iss. 5, may 1997, 659–673.
- [149] Sorvey R.M., Zinn C.D., *Mathematical model for long range expansion planning of generation and transmission in electric utility systems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. POS 96, No. 2, 1977.
- [150] Sozański J., *Niezawodność i jakość pracy systemu elektroenergetycznego*, WNT, Warszawa 1990.

- [151] *Statystyka Elektroenergetyki Polskiej*, ARE, Warszawa 1946–2006.
- [152] Staniszewski R., *Cybernetyczna teoria projektowania*, Ossolineum, Wrocław 1986.
- [153] Staniszewski R., *Sterowanie procesem eksploatacji*, WNT, Warszawa 1990.
- [154] Stilponopolus D., *Optymalizacja rozwoju systemu wytwarzania energii elektrycznej metodą symulacji scenariuszy*, Praca doktorska pod kierunkiem doc. dr inż. Jana Kiszy, Wydział Elektryczny PWr., Wrocław 1983.
- [155] Szwceier W., *Bezpieczeństwo systemów energetycznych*, Warszawa 2004.
- [156] Szczerba Z., *Definicje związane z bezpieczeństwem systemu*, [w:] *Zdefiniowanie metod i narzędzi zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności w zróżnicowanych horyzontach czasowych*, J. Popczyk, i inni. Zadanie 1. Temat 1.1. Podzadanie 1.1.2. PBZ Nr PBZ-MEiN-1/2/2006 Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju, Wydział Elektryczny PŚ, Gliwice 2008.
- [157] Tadeusiewicz R., *Badanie właściwości układów samodzielnych współpracujących ze stochastycznie zmiennym środowiskiem*, *Postępy Cybernetyki*, 4, 1976.
- [158] Tarchalska U., *Analiza odtworzenia mocy zainstalowanej w źródłach energii elektrycznej energetyki zawodowej w latach 1991–2020*, *Energetyka*, 10, 1990.
- [159] Teive R.C.G., Silva E.L., Fonseca L.G.S., *A Cooperative Expert System for Transmission Expansion Planning of Electrical Power Systems*, *IEEE Transactions*, Vol. 13, No. 2, May 1998.
- [160] Tchórzewski J., Kłopotek M., *A Case study Study in Neural Network Evolution*, *Monografie IPI PAN* Nr 943, Warsaw 2002.
- [161] Tchórzewski J., Kłopotek M., *The concept of Making Discoveries in Evolving Neural Net*, *Proceedings of the IIS '2002 Symposium*, Physica – Verlag, IPI PAN, Sopot, Poland 2002.
- [162] Tchórzewski J., *Identification of Electric Power System from the Point of View of Development*, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 18, No. 4 B, 2009.
- [163] Tchórzewski J., *Development of Electrical Power System from the Point of View of Efficiency*, Part 1. *Basic development models based on IEEE IRS testing data*, *Computer Applications in Electrical Engineering*, IEEP PP, EEC PAN, IEEE Poland Section, PP, Poznań 2009.
- [164] Tchórzewski J., *Development of Electrical Power System from the Point of View of Efficiency*, Part 2. *Dynamic development models based on IEEE TRS testing data*, *Computer Applications in Electrical Engineering*, IEEP PP, EEC PAN, IEEE Poland Section, PP, Poznań 2009.
- [165] Tchórzewski J., Jurkowski B., *Informatyka kwantowa nowym wyzwaniem dla elektrotechniki stosowanej*, [w] *Postępy w Elektrotechnice Stosowanej*. Materiały VII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej PES-7. OW PTETiS. Wydż. Elektryczny PW, Ośrodek Promocji Badań z/z Energoelektroniki PW, Polska Sekcja IEEE, Kościelisko 2009.
- [166] Tchórzewski J., *Identification of the Electrical Power System Development for Creating a Control Model as Artificial Genetic Code*, *Proceedings of the IEEE Region 8 EUROCON 2009*, Conference 2009, Xplore, 2009.
- [167] Tchórzewski J., *Identification of the Unmanned Manufactory as Self-Development System for Creation Model in the Form of Artificial Genetic Code*, *International Conference on "Artificial Intelligence"*. Krakow 2009.
- [168] Tchórzewski J., *Wyniki badania rozwoju systemu elektroenergetycznego jako obiektu rzeczywistego złożonego z układów i urządzeń fizycznych*, [w:] *Postępy w Elektrotechnice Stosowanej*. Materiały VII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej PES-7. OW PTETiS. Wydż. Elektryczny PW, Ośrodek Promocji Badań z/z Energoelektroniki PW. Polska Sekcja IEEE, Kościelisko 2009.
- [169] Tchórzewski J., *The Development Process of Electrical Power System as Unmanned Factory*, *Electrical Engineering*, Iss. 59, *Academic Journals*, 2009.
- [170] Tchórzewski J., *Dynamiczny model rozwoju polskiej giełdy energii elektrycznej na przykładzie danych z lat 2002–2007*, *Rynek Energii*, nr II(IV), marzec 2009.

- [171] Tchórzewski J., Chyży E., *Statyczne modele rozwoju polskiej giełdy energii elektrycznej na przykładzie danych z lat 2002–2007*, Rynek Energii, nr II(IV), marzec 2009.
- [172] Tchórzewski J., *Modele rozwoju systemu elektroenergetycznego jako systemu sterowania w środowisku MATLAB z wykorzystaniem System Identification Toolboxa*. Materiały Konferencyjne XIV Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, PG, Gdańsk–Jurata 2009.
- [173] Tchórzewski J., *Ocena modeli rozwoju systemu elektroenergetycznego z punktu widzenia efektywności i bezpieczeństwa*. Materiały Konferencyjne XIV Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, PG, Gdańsk–Jurata 2009.
- [174] Tchórzewski J., *Development of Electrical Power System from Point of View of Safety*, Precedings of 2008 IEEEI 25-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, IEEE Xplore 2008.
- [175] Tchórzewski J., *The Development Process of Power System as Unmanned Factory*. *Electrical Engineering*, IEEP PP, EEC PAN, IEEE Poland Section, 2008, 67–68.
- [176] Tchórzewski J., *The Identification Process of Power System as Self-Evolving Technical Object*, Computer Applications in Electrical Engineering. IEEP PP, EEC PAN, IEEE Poland Section, 2008, 68–69.
- [177] Tchórzewski J., Chrzanowski Ł., *Systemowy algorytm koewolucyjny SAK do projektowania rozwoju sieci elektroenergetycznych*, Zeszyt Naukowy pod red. J. Irzykowskiego, E. Rosołowskiego, W. Rebizanta, *Sieci Elektroenergetyczne w Przemśle i Energetyce*, PWr., Wrocław 2008, 307–312.
- [178] Tchórzewski J., *Rozwijający się system elektroenergetyczny jako fabryka bezładna*. Materiały V Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej nt. Modelowanie i Symulacja. MiS-5 2008, PW. Wydz. Elektryczny, SEP. PTETiS, Warszawa–Kościelisko 2008, 165–168.
- [179] Tchórzewski J., *Self-Evolving Electricity Power System as Unmanned Factory*, Proceedings of Artificial Intelligence Studies AP-IPI PAN – WAT, Siedlce 2008, 63–80.
- [180] Tchórzewski J., *Systemowa metoda badania rozwoju konstrukcji na przykładzie zmian struktury i parametrów infrastruktury elektroenergetycznej*. *Postępy w Elektrotechnice Stosowanej*, Materiały VI Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej PES-5, OW PTETiS, Wydz. Elektryczny PW, Ośrodek Promocji Badań z/z Energoelektroniki PW, Polska Sekcja IEEE, Kościelisko 2007 (pod auspicjami IEEE), 217–22.
- [181] Tchórzewski J., *Model of Control System Development on Example the System of Electricity Market*, Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 16, No. 4B, 2007, 179–183.
- [182] 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*, De Baets B. i in. (red.), AOW EXIT, Warsaw 2004, 533–540.
- [183] Tchórzewski J., *Systemowy algorytm ewolucyjny w modelowaniu rozwoju rynku energii elektrycznej*, Inżynieria Wiedzy i Systemy Ekspertowe, Z. Bubnicki, Grzech A. (red.), t. 1, OW PWr., Wrocław 2003, 231–238.
- [184] Tchórzewski J., *The system supports the analysis process of the regularities in the development of electric power transmission network*, Journal of Applied Computer Science, Vol. 10, No. 1, 2002.
- [185] Tchórzewski J., *The parametric and structural changes of the steering process on power transmission grid*, International Scientific Conference on „Energy Saving in Electrical Engineering, Proceedings FEE, WUT, Warsaw 2001.
- [186] Tchórzewski J., *System-aided research process of controlling system development regularities on power transmission grid*, SMC–10. International Conference Proceedings, Vol. 2, I CS.TUŁ. Łódź–Zakopane 2001.
- [187] Tchórzewski J., *Badanie prawidłowości rozwoju systemów elektroenergetycznych*. *Sztuczne życie elektroenergetycznej sieci przesyłowej*, Monografia Nr.41, A.P. Siedlce 2000.

- [188] Tchórzewski J., *Kod informacyjny rozwoju systemu elektroenergetycznej sieci przesyłowej obliczem jego natury*, Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Nr 91, Seria: Konferencje 34, PWr., Wrocław 2000.
- [189] Tchórzewski J., *Systemowe wspomaganie procesu badania prawidłowości rozwoju systemu sterowania na przykładzie elektroenergetycznej sieci przesyłowej*, PE '2000 Konferencje 38, Wyd. PCz., Częstochowa 2000.
- [190] Tchórzewski J., *Wielki system elektroenergetyczny w warunkach zmian strukturalno-parametrycznych własności. Prognozowanie w Elektroenergetyce*, Konferencje 38, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000, 239–246.
- [191] Tchórzewski J., *Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe w planowaniu rozwoju elektroenergetycznej sieci przesyłowej metodą miejsc geometrycznych pierwiastków*, Prognozowanie w elektroenergetyce, PE '98 Konferencja 25, PCz., Częstochowa 1998.
- [192] Tchórzewski J., *Development algorithms of elementary steering process of a power generating system*, 9th – International Symposium on System – Modeling – Control, Institute of Computer Technical. University of Łódź, Zakopane 1998.
- [193] Tchórzewski J., *Systemowe badanie prawidłowości rozwoju systemu sterowania na przykładzie rozwoju elektroenergetycznej sieci przesyłowej*, Rozprawa naukowa nr 58, AP, Siedlce 1997.
- [194] Tchórzewski J., *Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe w planowaniu rozwoju elektroenergetycznej sieci przesyłowej*, Monografie, Nr. WSRP, Siedlce 1995.
- [195] Tchórzewski J., *Algorytm genetyczny rozwoju systemu sterującego*, Zeszyty Naukowe WSRP, Seria: Cybernetyka Wiedzy i Technologia Edukacyjna, Siedlce 1, 1993.
- [196] Tchórzewski J., *Niezawodność systemu organizacji transportu jako problem prawidłowego zabezpieczenia działania*, Archiwum Transportu, PW, Warszawa 1993.
- [197] Tchórzewski J., *Badanie prawidłowości rozwoju systemu sterowania*, Postępy Cybernetyki, 4, 1992.
- [198] Tchórzewski J., *Cybernetyka życia i rozwoju systemów*, Monografia Nr 22, WSRP, Siedlce 1992
- [199] Tchórzewski J., *Identyfikacja systemu organizacji montażu zespołu elektrowni*, Archiwum Energetyki, 1, 1990.
- [200] Tchórzewski J., *Inżynieria rozwoju systemów*, Monografie Nr 18, WSRP, Siedlce 1990.
- [201] Tchórzewski J., *Wybrane prawidłowości rozwoju systemu organizacji wewnętrznej procesu sterowania*, Postępy Cybernetyki, 2, 1989.
- [202] Thalassinakis E.J., Dialynas E.N., *A Method for Optimal Spinning Reserve Allocation in Isolated Power Systems Incorporating an Improved Speed Governor Model*, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 22, No 4, Nov. 2007.
- [203] Toczyłowski E., *Efektywność ekonomiczna mechanizmów rynkowych i regulacyjnych w energetyce*, Rynek Energii, II(I), 1–22, March 2008.
- [204] Trybuła S., Radzik T., *Gry wyboru momentów działania*, OW PWr., Wrocław 2010.
- [205] Trzaska Z.A., *Modelowanie i symulacja układów dynamicznych*, Wyd. PW, Warszawa 1993.
- [206] Tuszyński J., *Normalizacja zagadnień niezawodności*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7, 1995.
- [207] Twardy L., *Zasady inwestowania w elektroenergetyce ze szczególnym uwzględnieniem programu modernizacyjnego w elektrowniach i elektrociepłowniach*, Energetyka, nr 8, 1991.
- [208] Tymotek A., *Analiza taryf przesyłowych jako elementu bezpiecznego i efektywnego kierowania pracą systemu elektroenergetycznego*, Praca doktorska pod kierunkiem naukowym prof. dr hab. inż. Artura Wilczyńskiego, Wydział Elektryczny PWr., Wrocław 2005.
- [209] Ustawa z dnia 01 kwietnia 2007 roku o zarządzaniu kryzysowym. Dz.U. Nr 89 z dnia 1 kwietnia 2007 r., ze zm.
- [210] Wiliński A., Czapiński P., *GMDH-based Multiple Prediction of Financial Markets*, Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 17, No. 3b, 2008.
- [211] Wajs K., *Linie pierwiastkowe w automatyce – problemy i zastosowania*, WNT, Warszawa 1973.

- [212] Wilkosz K., *Metody wstępnego uwiarygodniania danych pomiarowych parametrów stanu pracy systemu elektroenergetycznego*, PN IE PWr. Seria; Monografie, Wrocław 1990.
- [213] Wnukowska B., *Metodyka analizy i prognozowania potrzeb energetycznych odbiorców przemysłowych na rynku energii*, Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki PWr., Seria: Monografie Nr 30 (95), OW PWr., Wrocław 2005.
- [214] Wojciechowski H., *Modele makroekonomiczne elektrowni i elektrociepłowni. Analiza kosztów bez uwzględnienia warunków bezpieczeństwa. Wnioski i propozycje działań dla zapewnienia bezpieczeństwa elektroenergetycznego*. Projekt badawczy Nr PBZ-MEiN-1/2/2006, Konsorcjum Politechniki Gdańskiej, Śląskiej, Warszawskiej i Wrocławskiej, Gdańsk, Gliwice, Warszawa, Wrocław, grudzień 2008.
- [215] Viswanadham N., Sharma M., Taneja M., *Inspection Allocation in Manufacturing Systems Using Stochastic Search Techniques*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 26, No. 2, Mar. 1996.
- [216] Wolf G., Duane T., Martin D., *Modifying Black water HVDC for Voltage Control Capability without Power Transfers*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, Oct. 1999.
- [217] Yeddapanudi S.R.K., Li Y., McCalley J.D., Chowdhury A.A., Jewell W.T., *Risk-Based Allocation of Distribution System*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 2, May 2008, 287–295.
- [218] Yu O.S., *Economic and Technical Determinants of Power System Development*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 5, Sept/Oct 1980, 1975–1983.
- [219] Zajczyk R., *Modele matematyczne systemu elektroenergetycznego do badania elektromechanicznych stanów nieustalonych i procesów regulacyjnych*, Wyd. PG, Gdańsk 2003.
- [220] Zaporowski B. (pod kier.), *Analiza efektywności ekonomicznej oraz wpływu na środowisko, z uwzględnieniem bezpieczeństwa elektroenergetycznego kraju, technologii wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach systemowych oraz skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w elektrociepłowniach małej mocy*, Politechnika Poznańska, Poznań, grudzień 2007.
- [221] Ziemianek S., *Modele matematyczne alokacji strat przesyłu mocy metodami śledzenia przepływów mocy czynnej*, ZN PW, Elektryka, 2003.
- [222] Zimmer A., Englot A., *Identyfikacja obiektów i sygnałów. Teoria i praktyka dla użytkowników MATLABA*, Politechnika Krakowska, Kraków 2005.
- [223] Zhou N., Trudnowski D.J., Pierre J.W., Mittelstadt W.A., *Electromechanical Mode Online Estimation Using Regularized Robust RLS Methods*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 4, Nov 2008, 1670–1680.
- [224] Żukowska K., Gracik M., *Bezpieczeństwo międzynarodowe. Teoria i praktyka*, OW SGH, Warszawa 2006.
- [225] Xiang Li X., Chen H., Gao S., *Electric power system load forecast model based on State Space time-varying parameter theory*, International Conference on Power System Technology, POWERCOM, China 2010, 1–4.
- [226] Weron R., *Modeling and Forecasting Loads and Prices in Deregulated Electricity Markets*, ARE, Warszawa 2006.
- [227] Wiszniewski A., *Dlaczego sieci elektroenergetyczne powinny być inteligentne*, [w:] *Present Problems of Power System Control*, Scientific Papers of the Institute of Electrical Power Engineering of the Wrocław University of Technology, OW PWr., Wrocław 2011, 125–129.

Rozwój systemu elektroenergetycznego w ujęciu teorii sterowania i systemów

Streszczenie

Do tej pory uzyskiwano modele prognostyczne, planistyczne, czy też programistyczne w wyniku stosowania algorytmów jednocenariuszowych rozwoju systemu EE i dopiero na tej podstawie poszukiwano nowych stanów rozwoju systemu EE. W literaturze przedmiotu brak jest wyników badań identyfikacyjnych rozwoju systemu EE z wykorzystaniem teorii identyfikacji oraz teorii sterowania i systemów przy wykorzystaniu algorytmów wielocenariuszowych. Z tych względów niniejsza praca może być uzupełnieniem teorii i praktyki badania rozwoju systemu EE w zakresie prowadzenia prac projektowych rozwoju systemu EE z punktu widzenia możliwości wzrostu efektywności systemu oraz z punktu widzenia potrzeby wzmocnienia poziomu bezpieczeństwa z jednej strony oraz inspiracją dla badań w zakresie fabryk bezludnych z punktu widzenia poszukiwania wzrostu stopnia wewnętrznej organizacji systemu oraz poszukiwania wyższych poziomów sterowania rozwojem systemów EE z drugiej strony.

W celu uzyskania odpowiednich modeli rozwoju krajowego systemu elektroenergetycznego (dalej: KSE) w przestrzeni stanów przeprowadzono najpierw identyfikację rozwoju SEE w środowisku MATLAB z wykorzystaniem System Identification Toolboxa (dalej: SIT) dla kolejnych kroczących etapów rozwoju (z postępowaniem jednego roku), z wykorzystaniem danych liczbowych z lat 1946–2007, co umożliwiło uzyskanie katalogu 33 macierzy \mathbf{th} (modele arx).

Następnie zbudowano katalog modeli rozwoju KSE w przestrzeni stanów, stosując aparat matematyczny teorii sterowania i systemów, po czym badano zachowanie się rozwoju KSE z wykorzystaniem Control System Toolboxa (dalej: CST), a między innymi z wykorzystaniem metody linii pierwiastkowych Evansa do wizualizacji zmian strukturalnych i parametrycznych rozwoju KSE.

W efekcie końcowym związano zagadnienie rozwoju KSE z ruchem pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej z lub s i tym samym uzyskano informację o zmianach parametrycznych oraz o zmianach strukturalnych modelu rozwoju systemu EE, które wykorzystano w procesie identyfikacji metamodelu rozwoju KSE.

Ponadto do oryginalnych rozwiązań należy m.in. opracowanie katalogu modeli rozwoju KSE, oraz na ich bazie uzyskanie metamodelu rozwoju KSE możliwego do wykorzystania w prognozowaniu, planowaniu czy programowaniu rozwoju systemu EE. Proces ten nazwano procesem projektowania rozwoju (projektowane są parametry i struktura modelu). Ponadto uzyskany model rozwoju w przestrzeni stanów pozwala na generowanie wektora stanu rozwoju systemu EE, co przekłada model rozwoju na możliwość wykorzystania bogatego dorobku teorii sterowania i systemów w prowadzonych badaniach prawidłowości rozwoju KSE jako systemu sterowania i w ślad za tym umożliwia projektowanie rozwoju systemu EE jako systemu rozwijającego się.

Do istotnych i oryginalnych osiągnięć należy też między innymi problematyka prowadzenia badań wrażliwościowych z punktu widzenia efektywności i bezpieczeństwa rozwoju, a także z punktu widzenia

wzrostu stopnia wewnętrznej organizacji rozwoju i poziomu sterowania rozwojem. Warto dodać, że uzyskany w wyniku identyfikacji model rozwoju KSE w efekcie końcowym zostaje sprowadzony do modelu w postaci sztucznego kodu genetycznego (kodu informacyjnego) systemu EE, który umożliwia w systemowy sposób generowanie populacji początkowej dla algorytmów ewolucyjnych, a możliwość w dalszej perspektywie wykorzystania sztucznych sieci neuronowych SOM otwiera nowe możliwości badawcze w zakresie systemowej wizualizacji wiedzy o rozwoju systemu w postaci map wiedzy.

A zatem m.in. przeprowadzono badania rozwoju KSE na gruncie teorii sterowania i systemów w zakresie:

- identyfikacji systemu EE, w celu uzyskania katalogu modeli KSE dla kolejnych okresów czasu długiego θ ,
- identyfikacji modelu KSE w celu uzyskania na tej bazie metamodelu rozwoju KSE,
- oceny rozwoju KSE z punktu widzenia efektywności i bezpieczeństwa rozwoju, a także z punktu widzenia wzrostu wewnętrznej organizacji systemu EE oraz poziomu sterowania.

W pierwszej kolejności przeprowadzono identyfikację SEE dla różnych etapów rozwoju, uzyskując statyczne modele rozwoju, a na ich podstawie dynamiczny model rozwoju KSE, będący w gruncie rzeczy metamodelem rozwoju systemu EE. W procesie identyfikacji wykorzystano dane statystyczne dla okresu identyfikacyjnego 30 lat z krokiem jednego roku [21, 44, 139, 149, 162–164, 198]. Badania przeprowadzono w środowisku MATLABA i Simulinka z wykorzystaniem SIT oraz CST [14, 66, 67, 146, 166–174]. W procesie analizy ocenowej wykorzystano podstawy teorii konstrukcji oraz eksploatacji systemów [4, 20, 49, 56, 125, 148, 150–152, 176–178, 206], a ocenę rozwoju przeprowadzono z punktu widzenia efektywności i bezpieczeństwa rozwoju [3, 17, 34, 59, 93, 109, 131, 134, 156, 162, 164, 202, 208, 209, 217, 218, 223]. W efekcie końcowym z punktu widzenia zmian parametrycznych oraz zmian strukturalnych pokazano możliwe kierunki rozwoju KSE na wybranych przykładach liczbowych, a zwłaszcza związane ze wzrostem wewnętrznej organizacji SEE oraz uzyskaniem wyższego poziomu sterowania rozwojem.

W wyniku identyfikacji uzyskano modele parametryczne liniowe (lub sprowadzone do liniowych) w postaci macierzy \mathbf{th} (modele arx) jako modele dyskretne przekształcone w środowisku MATLABA na modele liniowe ciągłe, a następnie na modele ciągłe w przestrzeni stanów (modele ss), dla 14 zmiennych wejściowych oraz pojedynczych zmiennych wyjściowych (cztery modele typu MISO). Identyfikację przeprowadzono dla 33 okresów rozwoju KSE uzyskując ostatecznie macierze **A**, **B**, **C** i **D**. Następnie zbadano zmiany zarówno stopni, jak też zmiany wartości elementów poszczególnych macierzy. Definiując pojęcie efektywności rozwoju zbadano efektywność rozwoju dla całego okresu rozwoju KSE jako systemu zagregowanego, jak też dla poszczególnych etapów rozwoju, a definiując pojęcie bezpieczeństwa rozwoju zbadano poziomy bezpiecznego rozwoju systemu EE.

Wreszcie poprzez związanie zagadnienia rozwoju z ruchem pierwiastków na płaszczyźnie zmiennej zespolonej s lub z przeprowadzono badania ocenowe, w tym badanie efektywności rozwoju, badanie bezpieczeństwa rozwoju oraz wizualizację rozwoju parametrycznego oraz strukturalnego SEE z wykorzystaniem m.in. Simulinka.

Badania dotyczące rozwoju systemu KSE poprzedzono badaniami rozwoju systemu EE na bazie danych testowych IEEE RTS.

The Development of the Power System in Terms of Control Theory and Systems

Summary

Thus far forecasting planning and programming models have been obtained as a result of implementation of one-scenario algorithms of EE system's development and only on the basis of those models new states of EE system development were searched for. In the literature, there are no results for identification researches of EE system development using multi-scenario algorithms. For these reasons the following work can be complementary to the theory and practice of development of EE system the area of carrying out project works from the perspectives of possibility of increase in the system's effectiveness, the need of increasing the safety level. An inspiration for the researches in the area of deserted factories seeking the increase in the degree of internal organization of the system and searching for higher level of managing the development of the EE system.

In order to obtain suitable models of development of a country's electroenergetic system (further: KSE) in the space of states an identification of development of SEE was firstly carried out in the MATLAB environment using System Identification of Toolbox (further: SIT) for following states of development (with the one year advancement) using numeric data from 1946–2007, which enabled achieving a catalogue of matrices \mathbf{th} (ARX models).

Following a creation of catalogue of KSE development models in the space of states, a catalogue of KSE development models in the space of stages was built using mathematical apparatus of theory of management and systems. Afterwards the behaviour of the KSE's development model was assessed using Control System of Toolbox (further: CST) *inter alia* using the method of root locus analysis with the aim of visualising structural and parametric changes in the KSE development.

Eventually, the issue of KSE's development was tied with the movement of elements on the plane of complex variables z or s and by doing that obtained information about parametric and structural changes of the EE system development model, which was used in the identification process of meta-model development of the KSE.

In addition to the original solutions, such as developing a catalogue of KSE development models, and on their basis obtaining a meta-model of KSE development possible to use in forecasting, planning and programming the development of the EE system. This process is called the process of design development (designed parameters and structure of the model). What is more, the resulting model of development in the state space allows you to generate the state vector of the system development EE, which translates model of development the possibility of using the wealth of legacy systems and control theory in this study, the accuracy of the NPS development of the control system and followed the development of the system enables the design of EE as a developing system.

The important and original achievements should also include the issue of research sensitivities in terms of efficiency and safety of the development, as well as in terms of increase in the internal organiza-

tion of the development and control of the level of development. It is worth noting that the results from the identification model of development KSE in the end is brought into the model as an artificial genetic code (code information) EE system, which enables the system to generate the initial population method for evolutionary algorithms, and the possibility of using the artificial neural network SOM in the long run, opens new opportunities for research in the field of system visualization of knowledge about the development of the system as a knowledge map.

Thus, among others, KSE development studies were conducted on the basis of control theory and systems in the following areas:

- EE system identification, in order to obtain the directory KSE models for successive long time periods θ ,
- KSE model identification for the development of the base meta-model KSE,
- assessment of the development of the KSE in terms of efficiency and safety of the development, as well as from the point of view of growth of internal organization of the EE system and the level of control.

Firstly, SEE were identified for various stages of development to provide static models of development, and on the basis of a dynamic model of the development of the KSE, which is in fact a meta-model development of the EE. In the process of identification of statistical data used for the identification period of 30 years from step one year [21, 44, 139, 149, 162–164, 198]. The study was carried out in MATLAB Simulink and using SIT and CST [14, 66, 67, 146, 166–174]. In the process of analysis used assessment basics of the construction and operation of the systems [4, 20, 49, 56, 125, 148, 150–152, 176–178, 206], and assessment of the development was carried out in terms of efficiency and safety of the development [3, 17, 34, 59, 93, 109, 131, 134, 156, 162, 164, 202, 208, 209, 217, 218, 223]. In the end, from the point of view of parametric change and structural change the work shows possible development directions of KSE on selected numerical examples, particularly associated with an increase in the internal organization of SEE and achieving a higher level of development control.

As a result of the identification of the parametric linear model obtained (or reduced to a linear) as a matrix \mathbf{th} (ARX models) as converted into discrete models in the Matlab environment for continuous linear models, and then models for a continuous state space (models ss) for 14 input variables and single variable output (four models of type MISO). The identification was carried out for 33 periods of the KSE's development to give final matrices **A**, **B**, **C** and **D**. Afterwards changes in both steps were examined, as well as the changes in the values of the individual matrix elements. Defining the concept of development efficiency, the effectiveness of development for the entire period of development of the KSE as the aggregate system was examined. as well as for the various stages of development. Defining the concept of the sustainable development assisted examining levels of secure development of the EE system.

Finally, by binding aspects of the development with those of the movement of elements in the plane of the complex variable s or z assessment studies were conducted, including test development efficiency, safety study of development and visualization of the development of parametric and structural SEE using such Simulink.

Research on the development of the KSE system was preceded with the research on the development of EE system based on IEEE RTS test data.