

Jerzy TCHÓRZEWSKI

# MOŻLIWOŚCI POPRAWY MODELU ROZWOJU KSE ZA POMOCĄ OBSERWATORÓW STANU NA PRZYKŁADZIE PODSYSTEMU MOCY OSIĄGALNEJ W ELEKTROWNIACH OGÓŁEM

**STRESZCZENIE** *W pracy zamieszczono wybrane wyniki badań dotyczące próby poprawienia modeli rozwoju krajowego systemu elektroenergetycznego na przykładzie podsystemu mocy osiągalnej w elektrowniach ogółem, m.in. poprzez wykorzystanie obserwatorów stanu. Pokazano, że układ dynamiczny opisany równaniami stanu i wyjścia może być sterowany za pomocą wektora stanu, który na potrzeby sterowania jest mierzony. Jednak nie zawsze wektor stanu jest mierzalny, m.in.: z powodów technicznych (brak możliwości wykonania pomiaru określonych elementów fizycznych), z powodów fizycznych (wektor stanu może zawierać elementy niefizyczne, a więc wprost niemierzalne) oraz z powodów systemowych (wektor stanu może zawierać elementy historyczne, statystyczne, itp.). Zamieszczono też wybrane wyniki badania wrażliwości modelu rozwoju systemu z punktu widzenia fabryk bezładnych. Bardziej interesujące wyniki badań poddano dyskusji i zamieszczono uwagi końcowe.*

**Słowa kluczowe:** badanie wrażliwości, fabryki bezładne, identyfikacja systemów, krajowy system elektroenergetyczny, modele rozwoju, obserwatory stanu

**DOI:** 10.5604/00326216.1210815

## 1. WSTĘP

---

Model rozwoju podsystemu mocy osiągalnej w elektrowniach ogółem (MOE) w krajowym systemie elektroenergetycznym (KSE) uzyskano w wyniku identyfikacji systemu w ujęciu teorii serownia i systemów [2, 4-5, 8, 9, 13, 19]. Trudności wynikające z pomiaru zmiennej stanu modelu rozwoju systemu MOE są uzasadnieniem wprowadzenia obserwatora stanu, którego zadaniem jest odtworzenie wektora stanu obserwowanego systemu. Obserwator stanu do odtworzenia wektora stanu wykorzystuje sygnały wejściowe do obserwowanego systemu, to jest zmienne  $u_i(\theta)$  oraz sygnały wyjściowe z obserwowanego systemu  $y_j(\theta)$ . W takim ujęciu model rozwoju podsystemu

---

**dr hab. inż. Jerzy TCHÓRZEWSKI**

e-mail: jtchorzewski@interia.pl, jerzy.tchorzewski@uph.edu.pl

Zakład Modelowania i Projektowania Systemów Informatycznych, Instytut Informatyki,  
Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach, ul. 3-Maja 54, 08-110 Siedlce

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, ISSN-0032-6216, LXIII, zeszyt 273, 2016

KSE opisany w przestrzeni stanów może być sterowany od wektora stanu i obserwowany przez obserwator stanu, jeżeli spełnia warunek obserwowalności i sterowalności [3, 7, 12]. Do celów odtwarzania stanu on-line wykorzystano asymptotyczne obserwatory stanu oparte o strukturę obserwowanego systemu. W rozważanym przypadku można było wyznaczyć obserwator stanu, gdyż znane były macierze obserwowanego podsystemu KSE ( $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ) oraz macierz stanu  $\mathbf{A}$  była asymptotycznie stabilna. Zauważono, że taki obserwator stanu realizuje się przez symulację modelu obserwowanego podsystemu MOE. Podstawowym problemem, który wystąpił dla projektowanego obserwatora stanu modelu rozwoju podsystemu KSE była nieznajomość warunków początkowych wektora stanu  $\mathbf{x}$ . Dodatkowym ograniczeniem było występowanie dynamiki błędu obserwacji, która zależała od wartości własnych macierzy stanu  $\mathbf{A}$ . Pokazano, że do zagwarantowania asymptotycznej stabilności macierzy stanu  $\mathbf{A}$  obserwatora stanu rozwoju podsystemu MOE należy macierz rozwoju podsystemu KSE zmodyfikować m.in. przez uwzględnienie sygnałów wyjściowych z obserwowanego podsystemu MOE.

## 2. MODEL ROZWOJU MOE W PRZESTRZENI STANÓW

Model rozwoju podsystemu mocy osiągalnej ogółem (MOE) występującego w KSE otrzymano na bazie danych eksperymentalnych z lat 1946-2007 dla 14 zmiennych wejściowych (tab. 1) oraz dla jednego wyjścia  $y_1(\theta)$  reprezentującego moc osiągalną w elektrowniach ogółem [MW] (model MISO)<sup>1)</sup>, który w przestrzeni stanów [13] można opisać w postaci macierzowo-wektorowej:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1342 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \\ u_{10} \\ u_{11} \\ u_{12} \\ u_{13} \\ u_{14} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,1342 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

<sup>1)</sup> Model MISO dotyczy podsystemu KSE otrzymanego dla wyjścia dotyczącego wielkości mocy osiągalnej w elektrowniach ogółem w latach 1947-2007, uzależnionej od 14 ww. wielkości wejściowych (tabela 1), w tym cen paliwa, na które wpływ mają nie tylko przesłanki ekonomiczno-techniczne, ale też polityczne w latach 1946-2007. Warto zauważyć, że w wyniku identyfikacji można ww. przypadku otrzymać np. tyle modeli podsystemów, ile wyróżni się wyjść (modele MISO) lub jeden model typu MIMO (mniej czytelny) dla potrzeb analizy. Dane liczbowe dotyczą KSE i zostały pobrane m.in. z roczników Statystyki Elektroenergetyki Polskiej i innych biuletynów, roczników, kwartalników i miesięczników publikowanych głównie przez ARE S.A.

$$y_1 = [1 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix},$$

gdzie:

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

**TABELA 1**  
Struktura zmiennych wejściowych

Lata	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$	$u_{10}$	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$	$u_{14}$
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

W wyniku dalszych przekształceń otrzymuje się ostatecznie [12-18]:

$$X_{kse} = e^{A\theta} \cdot B \cdot u(\theta) = \begin{bmatrix} e^{0.1342\theta} & \frac{1}{0.1342} (e^{0.1342\theta} - 1)(\theta) & \frac{1}{0.1342} \cdot \left( \frac{1}{\theta} \cdot e^{0.1342\theta} - 1(\theta) \right) \\ 0 & 1(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1(\theta) \end{bmatrix} * \tag{2}$$

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

oraz

$$Y_{kse} = C \cdot X_{kse} = [1 \ 0 \ 0] \cdot X_{kse} \tag{3}$$

Wyniki otrzymanych w Simulinku odpowiedzi podsystemu MOE (zmiennej wyjściowej  $y_1$ ) na wymuszenia typu: skok jednostkowy  $1(\theta)$ , impuls Diraca  $\delta(\theta)$  oraz funkcja  $\sin(\theta)$  zestawiono w tabeli 5, przy czym rozwiązaniem układu równań zmiennych stanu są 3 następująco wyrażone zmienne stanu [13]:

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

$$\begin{aligned}
x_2 = & (-0,1443 \cdot \theta - 0,0539 \cdot 1(\theta)) \cdot u_1 + (0,3264 \cdot \theta - 0,7748 \cdot 1(\theta)) \cdot u_2 + 29,5244 \cdot \theta + 0,3683 \cdot 1(\theta)) \cdot u_3 + \\
& + (14,1706 \cdot \theta + 9,7155 \cdot 1(\theta)) \cdot u_4 + (0,068 \cdot \theta - 0,0528 \cdot 1(\theta)) \cdot u_5 + (0,0067 \cdot \theta - 0,0275 \cdot 1(\theta)) \cdot u_6 + \\
& + (-0,6104 \cdot \theta - 0,2766 \cdot 1(\theta)) \cdot u_7 + (0,0264 \cdot \theta - 0,0074 \cdot 1(\theta)) \cdot u_8 + (-0,0288 \cdot \theta + 0,1073 \cdot 1(\theta)) \cdot u_9 + \\
& + (0,1541 \cdot \theta - 0,2976 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{10} + (-0,0474 \cdot \theta + 0,0623 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{11} + (-0,0096 \cdot \theta - 0,01 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{12} + \\
& + (0,2337 \cdot \theta - 0,1287 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{13} + (0,0266 \cdot \theta + 0,3011 \cdot 1(\theta)) \cdot u_{14},
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
x_3 = & 1(\theta) \cdot (-0,1443 \cdot u_1 + 0,3264 \cdot u_2 + 29,5244 \cdot u_3 + 14,1706 \cdot u_4 + 0,068 \cdot u_5 + 0,0067 \cdot u_6 - 0,6104 \cdot u_7 + \\
& + 0,0264 \cdot u_8 - 0,0288 \cdot u_9 + 0,1541 \cdot u_{10} - 0,0474 \cdot u_{11} - 0,0096 \cdot u_{12} + 0,2337 \cdot u_{13} + 0,0266 \cdot u_{14}),
\end{aligned} \tag{6}$$

oraz zmienna wyjściowa:

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

### 3. OBSERWATOR STANU PODSYSTEMU MOE

Korzystając z posiadanej wiedzy o podsystemie MOE, konkretnie na podstawie znajomości parametrów podsystemu MOE opisanych macierzami **A**, **B**, **C** i **D** można znaleźć system liniowy, który w oparciu o znane wartości  $\mathbf{u}(t)$  oraz  $\mathbf{y}(t)$  może dostarczyć przybliżoną (aprosymowaną) wartość  $\hat{\mathbf{x}}(t)$ , estymatę stanu  $\mathbf{x}(t)$ .

Zakłada się, że w przypadku analizowanego podsystemu MOE warto jest wyznaczyć pełny wektor stanu  $x$  przy zastosowaniu obserwatora Luenberger'a. Podstawowa idea obserwatora Luenberger'a polega na dołączeniu do rozważanego stacjonarnego systemu liniowego, innego stacjonarnego systemu liniowego, na który podawane są sygnały  $u(t)$  oraz  $y(t)$  i który musi dostarczać na swoim wyjściu przybliżoną wartość  $\hat{\mathbf{x}}(t)$  stanu  $\mathbf{x}(t)$  [7]. Model obserwatora stanu dla systemu fizycznego wyprowadza się zwykle korzystając z powyższych równań. Można w nich ująć dodatkowe wyrażenia by zapewnić zbieżność stanu modelu do stanu fizycznego systemu po otrzymaniu kolejnych pomierzonych wartości wejść i wyjść obiektu. W szczególności wyjście obserwatora można odjąć od wyjścia obiektu i wówczas pomnożyć przez macierz wzmocnienia błędu zbieżności **L**, wyrażenie to następnie jest dodawane do równań stanu obserwatora w wyniku czego otrzymuje się **obserwator Luenberger'a**, określony przez poniższe równania (w przypadku układu liniowego z czasem ciągłym) [7]:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{L} \cdot [\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}], \\ \hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}}, \\ \hat{\mathbf{x}}(0) &= \hat{\mathbf{x}}_0,\end{aligned}\tag{8}$$

gdzie:

$\mathbf{L}$  – macierz wzmocnień obserwatora o wymiarach  $n \times q$ , a zatem:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{L}(\mathbf{y} - \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}}),\tag{9}$$

oraz dla rozważanego podsystemu MOE (pomijając zakłócenia):

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \dot{\hat{x}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1342 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \end{bmatrix} +\tag{10}$$

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

$$+ \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \cdot (y_1(\theta) - \hat{y}_1(\theta))$$

Błąd obserwatora Luenberger'a  $\mathbf{e} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}$  spełnia równanie:  $\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{L} \cdot \mathbf{C}) \cdot \mathbf{e}$ .

Wyrażenie  $\mathbf{L} \cdot [\mathbf{y}(\theta) - \hat{\mathbf{y}}(\theta)]$  nazywane jest częścią korekcyjną obserwatora stanu, a macierz  $\mathbf{L}$  macierzą wzmocnienia błędu zbieżności. Obserwator jest stabilny asymptotycznie, gdy błąd obserwatora  $\mathbf{e} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}$  dąży do zera. Obserwator Luenberger'a dla rozważanego układu dyskretnego jest więc stabilny asymptotycznie jeśli macierz  $[\mathbf{A} - \mathbf{L} \cdot \mathbf{C}]$  posiada wszystkie wartości własne wewnątrz koła jednostkowego. Do celów sterowania wyjście obserwatora podsystemu MOE jest sprzężone z wejściem zarówno obserwatora jak i podsystemu poprzez macierz wzmocnienia  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{u}(\theta) = \mathbf{K} \cdot \hat{\mathbf{x}}(\theta).\tag{11}$$

Równania obserwatora przyjmują wówczas postać<sup>2)</sup>:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{x}}}(\theta) &= \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}(\theta) + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{y}(\theta) - \hat{\mathbf{y}}(\theta)) - \mathbf{B} \cdot \mathbf{K} \cdot \hat{\mathbf{x}}(\theta), \\ \hat{\mathbf{y}}(\theta) &= \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}}(\theta).\end{aligned}\quad (12)$$

a więc ostatecznie:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{x}}}(\theta) &= (\mathbf{A} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{K}) \cdot \hat{\mathbf{x}}(\theta) + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{y}(\theta) - \hat{\mathbf{y}}(\theta)), \\ \hat{\mathbf{y}}(\theta) &= \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}}(\theta).\end{aligned}\quad (13)$$

Z uwagi na zasadę separacji, macierze  $\mathbf{K}$  i  $\mathbf{L}$  mogą być dobrane niezależnie, bez negatywnego wpływu na ogólną stabilność rozwoju podsystemu MOE. W praktyce bieguny obserwatora  $[\mathbf{A} - \mathbf{L} \ \mathbf{C}]$  dobiera się zwykle tak by były zbieżne kilkakrotnie razy szybciej niż bieguny systemu  $\mathbf{A} - \mathbf{B} \ \mathbf{K}$ .

Wzmocnienie obserwatora  $\mathbf{L}$  dobiera się tak, aby błąd był asymptotycznie zbieżny do zera (to znaczy przy założeniu, że macierz  $[\mathbf{A} - \mathbf{L} \ \mathbf{C}]$  jest macierzą Hurwitza). Wartości własne macierzy  $[\mathbf{A} - \mathbf{L} \ \mathbf{C}]$  można dobrać poprzez właściwy wybór wzmocnienia obserwatora  $\mathbf{L}$ , przy założeniu, że para  $[\mathbf{A}, \ \mathbf{C}]$  jest obserwowalna, to znaczy zachowany jest warunek obserwowalności<sup>3)</sup>:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

co w rozważanym przypadku jest spełnione, gdyż dla rozpatrywanego modelu rozwoju podsystemu MOE, macierz obserwowalności<sup>4)</sup>  $\mathbf{O}$  jest następująca:

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0,1342 & 1 & 0 \\ (0,1342)^2 & 0,1342 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Rząd macierzy obserwowalności  $\mathbf{O}$  wynosi 3, a więc jest równy liczbie elementów wektora stanu<sup>5)</sup>.

Przed wyznaczeniem obserwatora stanu należy sprawdzić, czy rozwój podsystemu MOE jest stabilny. Rozpatrywany podsystem posiada trzy bieguny, spośród których dwa bieguny o wartości równej zero ( $s_1 = s_2 = 0$ ) oraz trzeci o dodatniej wartości

<sup>2)</sup> Macierz  $\mathbf{D}$  w rozważanym przypadku jest zerowa.

<sup>3)</sup> Przed przystąpieniem do projektowania obserwatora należy sprawdzić czy układ jest sterowalny i obserwowalny.

<sup>4)</sup> Przy wykorzystaniu Control System Toolboxa wygodnie jest skorzystać z funkcji `obsv(A,C)`, która zwraca elementy ww. macierzy obserwowalności, a następnie wyznaczyć rząd za pomocą funkcji `rank()`, co jest bardzo pomocne przy wyższych rządach macierzy  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{C}$ .

<sup>5)</sup> Można dodać, że system jest też sterowalny, gdyż rząd macierzy sterowalności  $\mathbf{S} = [\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B} \ \dots \ \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}]$  wynosi również 3. Wykorzystano do ww. celu funkcję `CST ctrb(A,B)` oraz `rank()`.

$s_3 = 0,1342$ . Zatem rozpatrywany rozwój podsystemu MOE jest niestabilny, stąd można np. wprowadzić w torze sprzężenia zwrotnego regulator opisany macierzą  $\mathbf{K}$ .

Właściwości dynamiczne regulatora  $\mathbf{K}$  można np. zmieniać przez odpowiedni dobór macierzy  $\mathbf{K}$ . Przed zbudowaniem obserwatora należy wyznaczyć ww. regulator  $\mathbf{K}$ , który zapewni stabilność rozwoju podsystemu MOE jako układu zamkniętego, to znaczy można założyć, że wektor stanu jest w pełni dostępny.

Macierz  $\mathbf{K}$  regulatora może zostać wyznaczona w środowisku MATLAB z wykorzystaniem Control System Toolbox'a np. w następujący sposób:

$$K = place(A, B, [b_1 \quad b_2 \quad b_3]), \quad (16)$$

co pozwala wygenerować macierz  $\mathbf{K}$  dla  $p_1 = -0,1342$ ,  $p_2 = -1$ ,  $p_3 = -1$ , np. postaci:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0,017 & -210,0344 & 0,1771 \\ -0,0743 & 936,7111 & -0,7866 \\ 0,0044 & 11,8619 & 0,0309 \\ -0,0089 & -27,9706 & 0,0088 \\ 0,0068 & -82,8298 & 0,701 \\ -0,0013 & 16,9962 & -0,0142 \\ -0,0333 & 416,2478 & -0,3508 \\ -0,0005 & 6,5598 & -0,0055 \\ 0,0066 & -84,0773 & -0,705 \\ 0,0324 & -407,7325 & 0,3429 \\ 0,0135 & -168,5652 & 0,1418 \\ 0,0101 & -1,1189 & 0,0010 \\ -0,0101 & 128,2892 & -0,1074 \\ 0,0240 & -303,3198 & 0,2547 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Po umieszczeniu regulatora  $\mathbf{K}$  w torze sprzężenia zwrotnego od wektora stanu układ zamknięty można opisać równaniem:

$$\mathbf{FR} = \mathbf{A} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{K} \quad (18)$$

czyli:

$$\mathbf{FR} = \begin{bmatrix} 0,1342 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} 0,343 & -0,1965 & -5,1912 & -14,5048 & 0,1554 & 0,0134 & -0,0523 & -0,0027 & 0,0302 & 0,0884 & 0,1310 & 0,0155 & -0,0286 & -0,022 \\ -0,0539 & -0,7748 & 0,3883 & 9,7155 & -0,0528 & -0,0275 & -0,2766 & -0,0074 & 0,1073 & 0,2976 & 0,0623 & -0,01 & -0,1287 & 0,3019 \\ -0,1443 & 0,3264 & 29,5244 & 14,1706 & 0,068 & 0,0067 & -0,6104 & 0,0264 & -0,0288 & 0,1541 & -0,0474 & -0,0096 & -0,2337 & 0,0266 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{K}$$

i ostatecznie:

$$\mathbf{FR} = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 0,001 & -0,0001 & 0,0001 \\ 0,0001 & 1,342 & 0,0001 \\ -0,0001 & 0,0001 & -0,0010 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Dalej można znaleźć wartości własne nowego podsystemu rozwoju (z uwzględnieniem ww. regulatora  $\mathbf{K}^{(6)}$ ).

Ze względu na fakt, że podsystem MOE jest sterowalny i obserwowalny można wyznaczyć macierz stanu obserwatora stanu, która jest równa:

$$\mathbf{FO} = \mathbf{A} - \mathbf{L} \cdot \mathbf{C} \quad (21)$$

czyli w przypadku rozważanego rozwoju podsystemu MOE:

$$\mathbf{FO} = \begin{bmatrix} 0,1342 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1342 & 1 & 0 \\ -l_2 & 0 & 1 \\ -l_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Następnie wyznacza się równie charakterystyczne obserwatora stanu:

$$\det(s\mathbf{1} - \mathbf{FO}) = s^3 + s^2 \cdot (l_1 - 0,1342) + s \cdot l_2 + l_3 \quad (23)$$

Przyjmując, że obserwator stanu posiada trzy bieguny uzyskuje się:

$$C(s) = s^3 - (p_1 + p_2 + p_3) + s(p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3) - p_1p_2p_3. \quad (24)$$

Porównując współczynniki równania charakterystycznego obserwatora (23) z równaniem założonym (24), otrzymuje się współczynniki macierzy  $\mathbf{L}$ :

$$l_1 = -p_1 - p_2 - p_3 + 0,1342, \quad l_2 = p_1p_2 + p_1p_3 + p_2p_3, \quad l_3 = -p_1p_2p_3.$$

Przy doborze wartości własnych obserwatora stanu należy kierować się następującymi zasadami:

- 1) wartości własne obserwatora powinny zapewniać stabilność pracy obserwatora (bieguny powinny posiadać ujemne części rzeczywiste),
- 2) bieguny obserwatora powinny być tak dobrane, by części rzeczywiste biegunów obserwatora były dużo mniejsze od części rzeczywistych obserwowanego systemu,
- 3) obserwator można zaprojektować tylko dla układu obserwowalnego i stabilnego.

Korzystając z powyższych zasad można zaprojektować obserwator stanu dla rozważanego podsystemu MOE opisanego w przestrzeni stanu równaniami (9), który posiada nowa macierz stanu  $\mathbf{FR}$ , macierz wejść  $\mathbf{B}$  oraz macierz  $\mathbf{C}$  i  $\mathbf{D}$ .

Gdy wzmocnienie obserwatora  $\mathbf{L}$  jest duże to liniowy obserwator Luenberger'a jest bardzo szybko zbieżny do stanu układu. Jednakże, duże wzmocnienie obserwatora prowadzi do zjawiska szczytowania, które polega na tym, że początkowy błąd estymatora może stać się niewspółmiernie duży (to znaczy, niepraktyczny lub niebezpieczny w użyciu).

Teorię (zamkniętego) obserwatora Luenberger'a rozwija teoria filtru Klamana. Filtr Kalmana jest optymalnym obserwatorem stanu układu dlatego pozwala na wyznaczenie

<sup>6)</sup> Układy korekcyjne o parametrach nastawialnych nazywane są regulatorami, a o parametrach nienastawialnych korektorami.



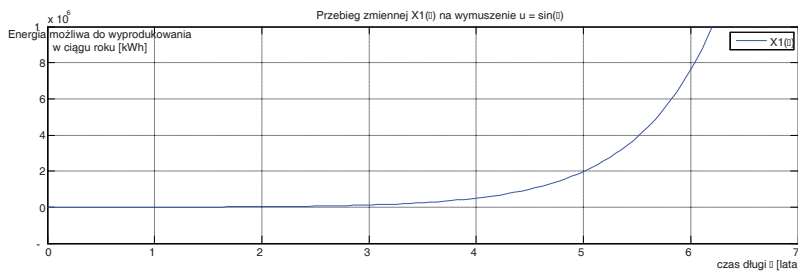
optymalnego wzmocnienia obserwatora. Opracowano też inne nieliniowe metody obserwatorów z dużym wzmocnieniem.

Na przykład sterowanie ślizgowe może być stosowane do projektowania obserwatorów, które w skończonym czasie doprowadzają błąd estymowanej zmiennej stanu do zera, nawet w obecności błędów pomiarowych; inne zmienne stanu mają błąd, który zachowuje się podobnie do błędu w obserwatorze Luenbergera w sytuacji, gdy ustanie szczytowanie. Obserwatory z przesuwnym trybem mają również pożądane własności radzenia sobie z szumem, podobne do tych jakie wykazuje filtr Kalmana.

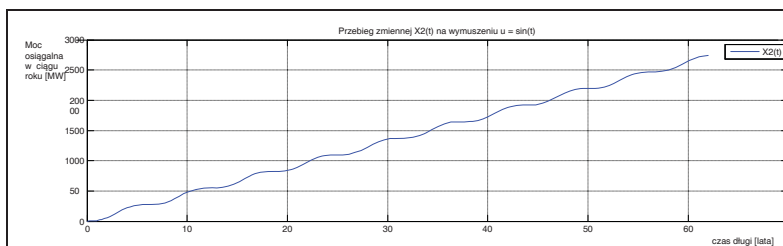
#### 4. INTERPRETACJA WYBRANYCH WYNIKÓW BADAŃ W KATEGORIACH FABRYK BEZŁUDNYCH

Projektowanie modelu rozwoju podsystemu MOE na bazie danych liczbowych statystycznych w kategoriach fabryki bezludnej (ang. smart factory) np. na potrzeby badania kierunków rozwoju KSE wiąże się z potrzebą przeprowadzenia szczegółowych badań strukturalnych oraz parametrycznych.

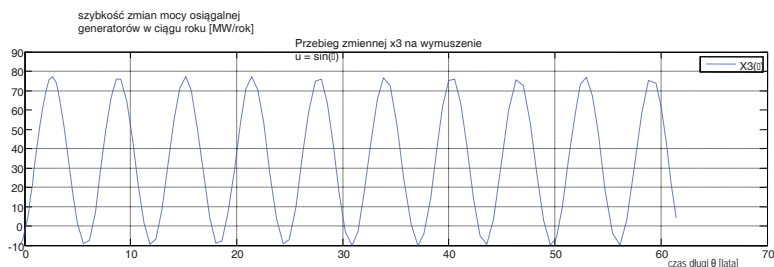
Szczegółowe przebiegi poszczególnych zmiennych stanu na wymuszenie  $\sin(t)$  zamieszczono na rysunkach 1-3.



**Rys. 1. Przebieg zmiennej stanu  $x_1$  (energia elektryczna możliwa do wyprodukowania w ciągu roku) występującej w modelu ciągłym (ss133) systemu KSE przy wymuszeniu  $u = \sin(\theta)$ .** Oznaczenia: oś  $y$ :  $x_1$  – energia elektryczna możliwa do wyprodukowania w ciągu roku [kWh], oś  $x$  – czas długi ( $\theta$ ) [lata]. Opracowanie własne w MATLABIE



**Rys. 2 Przebieg zmiennej stanu  $x_2$  (prognozowana moc generatorów w ciągu roku) 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 ( $\theta$ ) [lata]. Opracowanie własne w MATLABIE



**Rys. 3.** Przebieg zmiennej stanu  $x_3$  (szybkość zmian prognozowanej mocy osiągalnej w ciągu roku) występującej w modelu ciągłym (ss133) systemu KSE na wymuszenie  $u = \sin(\theta)$ . Oznaczenia: oś  $y$ :  $x_3$  – szybkość zmian mocy osiągalnej generatorów w ciągu roku [MW/rok], oś  $x$  – czas długi ( $\theta$ ) [lata]. Opracowanie własne w MATLABIE

W niniejszej pracy został pokazany przykład obliczeniowy podsystemu MOE występującego w systemie KSE na bazie modelu MISO dla ww. 14 zmiennych wejściowych oraz jednej zmiennej wyjściowej  $y_1(\theta)$  reprezentującej moc osiągalną w elektrowniach ogółem jako podsystem KSE [13].

W wyniku identyfikacji podsystemu MOE dla okresów trzydziestoletnich z postępowaniem pięciu lat na zbiorze danych statystycznych z lat 1946-2007 (62 lata) uzyskano osiem modeli parametrycznych jako modeli dyskretnych  $arx$ , które zamieniono na osiem modeli parametrycznych ciągłych  $th$ , a te na modele ciągłe w przestrzeni stanów. W ten sposób uzyskano m.in. osiem macierzy **A** oraz osiem macierzy **B** [13]. Wymiary macierzy pokazano w tabeli 2.

Analiza zmian wymiarów modelu wskazuje na zmiany strukturalne rozwoju ww. podsystemu mocy osiągalnej w elektrowniach ogółem występującego w krajowym systemie elektroenergetycznym w latach 1946-2007. Najprostsze modele wystąpiły w latach 1946-1975 oraz 1961-1990, a najbardziej złożone w latach 1951-1980 oraz 1956-1985. Zmiany wartości wybranych elementów macierzy **A** odpowiedzialnej za stopień wewnętrznej organizacji podsystemu MOE oraz macierzy **B** odpowiedzialnej za poziom sterowania zamieszczono w tabeli 3.

**TABELA 2**

Wybrane wymiary macierzy modeli zmiennych stanu rozwoju podsystemu MOE

Lp.	Badane okresy	Wymiary macierzy			
		A	B	C	D
1	1946-1975	1 x 1	1 x 14	1 x 1	1 x 14
2	1951-1980	16 x 16	16 x 14	1 x 16	1 x 14
3	1956-1985	15 x 15	15 x 14	1 x 15	1 x 14
4	1961-1990	1 x 1	1 x 14	1 x 1	1 x 14
5	1966-1995	7 x 7	7 x 14	1 x 7	1 x 14
6	1971-2000	5 x 5	5 x 14	1 x 5	1 x 14
7	1976-2005	3 x 3	3 x 14	1 x 3	1 x 14
8	1978-2007	6 x 6	6 x 14	1 x 6	1 x 14

**TABELA 3**

Wybrane wymiary macierzy modeli zmiennych stanu rozwoju podsystemu MOE

Lp.	Badane okresy	Wartości wybranych elementów macierzy						
		A			B			
		$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{21}$	$b_{11}$	$b_{18}$	$b_{19}$	$b_{21}$
1	1946-1975	0,5109	0	0	0,1566	0,0094	0,1153	0
2	1951-1980	1,8773	1	0,579	0	0	0	0
3	1956-1985	1,8934	0,1958	0	0	0	0	1
4	1961-1990	0,5109	0	0	0,1566	0,0094	0,1153	0
5	1966-1995	0,4649	1	-0,123	0,8884	0,0235	0,1095	0
6	1971-2000	1,2467	1	-0,0257	0,8193	0,0372	-0,0092	0
7	1976-2005	0,2617	1	0,1323	0,905	0,0203	-0,0424	0
8	1978-2007	0,7824	1	-0,02224	0,53	0,0288	-0,1557	0

Wybrane przebiegi zmian elementów macierzy **A** zobrazowano na wykresach w tabeli 4, a przebiegi zmian elementów macierzy **B** na wykresach w tabeli 5.

**TABELA 4**Zmiany parametryczne rozwoju MOE wynikające ze zmian elementów macierzy **A**

A	Zmiany parametryczne	Uwagi
$a_{11}$		Element $a_{11}$ macierzy <b>A</b> wyraża stopień wpływu zmiennej stanu $x_1$ na stopień wewnętrznej organizacji pod systemu MOE wynikający z $dx_1/dt$ . Z przebiegu jego zmian widać tendencję malejącą wpływu zmiennej stanu $x_1$ na stopień wewnętrznej organizacji systemu MOE wyrażony za pomocą zmian zmiennej stanu $x_1$ .
$a_{12}$		Element $a_{12}$ macierzy <b>A</b> wyraża stopień wpływu zmiennej stanu $x_2$ na stopień wewnętrznej organizacji podsystemu MOE wynikający z $dx_1/dt$ . Z przebiegu jego zmian widać tendencję rosnącą wpływu zmiennej stanu $x_2$ na stopień wewnętrznej organizacji podsystemu MOE wyrażony za pomocą zmian zmiennej stanu $x_1$ .
$a_{21}$		Element $a_{21}$ macierzy <b>A</b> wyraża stopień wpływu zmiennej stanu $x_1$ na stopień wewnętrznej organizacji podsystemu MOE wynikający z $dx_2/dt$ . Z przebiegu jego zmian widać tendencję malejącą wpływu zmiennej stanu $x_1$ na stopień wewnętrznej organizacji podsystemu MOE wyrażony za pomocą zmian zmiennej stanu $x_2$ .

TABELA 5

Zmiany parametryczne rozwoju MOE wynikające ze zmian elementów macierzy

B	Zmiany parametryczne	Uwagi
$b_{11}$		<p>Element <math>b_{11}</math> macierzy <b>B</b> wyraża poziom wpływu zmiennej wejściowej <math>u_1</math> (zatrudnienia ogółem w elektrowniach) na poziom sterowania zmianami wyrażonymi przez <math>dx_1/dt</math>. Z przebiegu jego zmian widać tendencję rosnącą wpływu poziomu sterowania za pomocą zmiennej wejściowej <math>u_1</math> zmianami zmiennej stanu <math>x_1</math>. Wynikać to może z rosnącej automatyzacji sieci elektroenergetycznych, gdzie zatrudnienie osób fizycznych spadło praktycznie do zera.</p>
$b_{18}$		<p>Element <math>b_{18}</math> macierzy <b>B</b> wyraża stopień wpływu zmiennej wejściowej <math>u_8</math> (długość linii elektroenergetycznych napowietrznych ogółem) na poziom sterowania zmianami możliwej do wyprodukowania energii elektrycznej ogółem (<math>dx_1/dt</math>). Z przebiegu jego zmian widać tendencję rosnącą wpływu poziomu sterowania za pomocą zmiennej wejściowej <math>u_8</math> zmianami zmiennej stanu <math>x_1</math>.</p>
$b_{19}$		<p>Element <math>b_{19}</math> macierzy <b>B</b> wyraża stopień wpływu zmiennej wejściowej <math>u_9</math> (długość linii elektroenergetycznych kablowych ogółem) na poziom sterowania zmianami wyrażonymi przez <math>dx_1/dt</math>. Z przebiegu jego zmian widać tendencję malejącą wpływu poziomu sterowania za pomocą zmiennej wejściowej <math>u_9</math> zmianami zmiennej stanu <math>x_1</math>.</p>
$b_{21}$		<p>Element <math>b_{21}</math> macierzy <b>B</b> wyraża stopień wpływu zmiennej wejściowej <math>u_1</math> (zatrudnienie w elektrowniach) na poziom sterowania zmianami wyrażonymi przez <math>dx_2/dt</math>. Z przebiegu jego zmian widać tendencję malejącą wpływu poziomu sterowania za pomocą zmiennej wejściowej <math>u_1</math> zmianami zmiennej stanu <math>x_2</math>.</p>

Z przebiegu zmian ww. wartości elementów macierzy **A** wynika, że w badanym okresie wzrósł wpływ zmiennej stanu  $x_2$  na stopień wewnętrznej organizacji podsystemu MOE wyrażony za pomocą zmian zmiennej stanu  $x_1$  oraz zmalał wpływ zmiennej stanu  $x_1$  na stopień wewnętrznej organizacji podsystemu MOE wyrażony za pomocą zmian zmiennej stanu  $x_1$ , a także zmalał wpływ zmiennej stanu  $x_1$  na stopień wewnętrznej organizacji podsystemu MOE wyrażony za pomocą zmian zmiennej stanu  $x_2$ , a z przebiegu zmian ww. wartości elementów macierzy **B** wynika, że w badanym okresie wzrósł wpływ poziomu sterowania za pomocą zmiennej wejściowej  $u_1$  zmianami zmiennej stanu  $x_1$  oraz wpływ poziomu sterowania za pomocą zmiennej wejściowej  $u_8$  zmianami zmiennej stanu  $x_1$ .

Natomiast zmalał wpływ poziomu sterowania za pomocą zmiennej wejściowej  $u_9$  zmianami zmiennej stanu  $x_1$  oraz zmalał wpływ poziomu sterowania za pomocą zmiennej wejściowej  $u_1$  zmianami zmiennej stanu  $x_2$ .

## 5. DYSKUSJA WYNIKÓW

Z analizy przebiegów ww. zmiennych stanu  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_{13}$  wynikają m.in. następujące uwagi:

- rozwój podsystemu MOE zilustrowany przebiegiem zmiennej stanu  $x_1$  (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 eksponentialny ( $k_{11} \cdot e^{\theta/T}$ ), przebieg liniowy  $k_{12} \cdot \theta$  oraz przebieg skokowy  $k_{13} \cdot 1(\theta)$ ,
- stała czasowa występująca w charakterystyce wykładniczej zmiennej stanu  $x_1$  ( $T_1$ ) ma wartość ujemną i wynosi:

$$T_1 = -\frac{1}{0,1342} = -7,4516, \quad (25)$$

- można zauważyć, że w wyniku wymuszenia sinusoidalnego zmienna stanu:  $x_1$  po stosunkowo krótkim stanie przejściowym czasu długiego wywołanym wymuszeniem sinusoidalnym (trwającym 1,8 lat przy okresie rozwoju 61 lat – 2,95%) wróciła do stanu równowagi eksponentialnego wzrostu, czyli zmienna stanu  $x_1$  (energia możliwa do wyprodukowania w ciągu roku) ma przy wymuszeniu sinusoidalnym przebieg wynikający z drgań sinusoidalnych: tłumionych eksponentialnie ( $k_{11} \cdot e^{s_3 \cdot \theta}$ , szybkość tłumienia określa  $s_3 = 0,1342$ ), wzdłuż linii prostej ( $k_{12} \cdot \theta$ ) oraz wyznaczonych przez prostą równoległą do osi czasu  $\theta$  o wartości  $k_{13}$  w prawej półpłaszczyźnie,
  - a)  $x_2$  w wyniku wymuszenia sinusoidalnego zachowała kierunek zmian, przy czym zmiany były oscylacyjne niezanikające,
  - b)  $x_3$  w wyniku wymuszenia sinusoidalnego miała przebieg sinusoidalny o drganiach niegasnących.

Przykład badania wrażliwości przebiegu składowej eksponentialnej zmiennej stanu  $x_1$  (energia elektryczna możliwa do wyprodukowania w ciągu roku) na zmiany współczynnika wzmocnienia procesu rozwoju MOE  $k_{11}$  zamieszczono w tabeli 6 [13], przy wymuszeniu sinusoidalnym dla 14 wejść oraz jednego wyjścia  $y_1$  w 10 okresach rozwoju podsystemu MOE systemu KSE.

Z analizy przebiegu zmiennej stanu  $x_1$  (energia możliwa do wyprodukowania w ciągu roku) wynika (tab. 6), że w wyniku pobudzenia wejść funkcją sinusoidalną przebieg zmiennej stanu jest nadal wykładniczy (po bardzo krótkim wytrąceniu ze stanu równowagi), a zmniejszenie o rząd wielkości współczynników wzmocnienia powoduje spłaszczenie jego przebiegu (uodpornienie na wymuszenie sinusoidalne).

TABELA 6

Wyniki analizy przebiegu zmiennej stanu  $x_1$  (energia możliwa do wyprodukowania w ciągu roku)

Lp.	Zmiany parametryczne	Uwagi
1		Przebiegi składowej eksponentyjnej $k_{11} \cdot e^{k_{11} \cdot \theta}$ zmiennej stanu $x_1$ w zależności od $k_{11}$ (współczynnika wzmocnienia procesu rozwoju KSE). Oznaczenia: oś $y$ – wartość składowej wykładniczej zmiennej stanu $x_1$ , oś $x$ – okresy rozwoju (czas $\theta$ ).
2		Przebiegi składowej prostoliniowej $k_{12} \cdot \theta$ zmiennej stanu $x_1$ w zależności od $k_{12}$ (współczynnika wzmocnienia procesu rozwoju KSE). Oznaczenia: oś $y$ – wartość składowej wykładniczej zmiennej stanu $x_1$ , oś $x$ – okresy rozwoju (czas $\theta$ ).
3		Przebiegi zmiennej stanu $x_1$ , bez uwzględnienia wymuszenia sinusoidalnego, w zależności od $k_{11}$ , $k_{12}$ i $k_{13}$ (współczynników wzmocnienia procesu rozwoju KSE). Oznaczenia: oś $y$ – wartość 3 składowych (eksponentyjnej, prostoliniowej i skoku jednostkowego) zmiennej stanu $x_1$ , oś $x$ – okresy rozwoju (czas długi $\theta$ ).
4		Przebiegi zmiennej stanu $x_1$ w zależności od $k_{11}$ , $k_{12}$ i $k_{13}$ (współczynników wzmocnienia procesu rozwoju KSE) przy wymuszeniu sinusoidalnym dla 14 wejść oraz jednego wyjścia $y_1$ . Oznaczenia: oś $y$ – wartość zmiennej stanu $x_1$ , oś $x$ – okresy rozwoju (czas długi $\theta$ ).
5		Przebiegi zmiennej stanu $x_1$ w zależności od $k_{11}$ , $k_{12}$ i $k_{13}$ (współczynników wzmocnienia procesu rozwoju KSE). Oznaczenia: oś $y$ – wartość zmiennej stanu $x_1$ , oś $x$ – okresy rozwoju (czas długi $\theta$ ).

## 6. WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Wykorzystanie podstaw teorii sterowania i systemów oraz teorii identyfikacji rozwoju systemów umożliwiło wygenerowanie modeli rozwoju systemu mocy osiągalnej ogółem (MOE) jako podsystemu w KSE, w tym modeli rozwoju w postaci macierzy  $\mathbf{th}$  oraz równań w przestrzeni stanów (ss).

W wyniku rozwiązania układu równań zmiennych stanu z wykorzystaniem m-pliku w środowisku MATLABA otrzymano trzy zmienne stanu.

Na bazie otrzymanego rozwiązania równań stanu uzyskano w Simulinku odpowiedzi podsystemu MOE (zmiennej wyjściowej  $y_1$ ) na wymuszenia typu: skok jednostkowy  $1(\theta)$ , impuls Diraca  $\delta(\theta)$  oraz funkcja  $\sin(\theta)$ , które zinterpretowano. Podjęto próbę zaprojektowania systemu korygującego funkcjonowanie modelu rozwoju podsystemu MOE. Okazało się, że można zaprojektować obserwator stanu dla rozważanego rozwoju systemu opisanego w przestrzeni stanu równaniami (9), który posiada nową macierz stanu FR, macierz wejść  $\mathbf{B}$  oraz macierz  $\mathbf{C}$  i  $\mathbf{D}$ .

Przeprowadzono badania wrażliwości, w tym m.in. zbadano zachowanie się modelu w kategoriach fabryk bezładnych uzyskując szereg interesujących wyników badań. W dalszych badaniach można wykorzystać możliwość bogaty dorobek z zakresu zastosowań metod sztucznej inteligencji do projektowania i eksploatacji także innych podsystemów KSE jak też całego Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, w tym metody ewolucyjne, sztuczne sieci neuronowe i systemy ekspertowe w odniesieniu do metod badania rozwoju systemów prowadzonych w ujęciu teorii sterowania i fabryk bezładnych [1, 3, 6, 9, 11, 12-18].

### LITERATURA

1. Helt P., Parol M., Piotrowski P.: Metody sztucznej inteligencji. Przykłady zastosowań w elektroenergetyce. OW PW. Warszawa, 2012 r.
2. Konieczny J.: Inżynieria systemów działania. WNT. Warszawa, 1983 r.
3. Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R.: Podstawy teorii sterowania. WNT. Warszawa, 2005 r.
4. Malko J.: Wybrane zagadnienia prognozowania w elektroenergetyce. OW PW. Wrocław 1995 r.
5. Mielczarski W.: Rozwój systemów elektroenergetycznych. Studia BAS. Nr 4 (32), s. 39-50. www.bas.sejm.gov.pl. Warszawa, 2012 r.
6. Osowski S.: Modelowanie i symulacja układów i procesów dynamicznych. OW PW. Warszawa, 2007 r.
7. Orłowska-Kowalska T.: Obserwatory strumienia i prędkości wirnika silnika indukcyjnego. PN IMNE, seria: Studia i Materiały, nr 19, s. 101-118, 1995 r.
8. Paska J.: Niezawodność systemów elektroenergetycznych. OW PW. Warszawa, 2005 r.
9. Rebizant W.: Metody inteligentne w automatyce zabezpieczeniowej. PN IE Seria: Monografie Nr 29 (93). OW PWr. Wrocław, 2004 r.

10. Staniszewski R.: Sterowanie procesem eksploatacji. WNT. Warszawa, 1990 r.
11. Tadeusiewicz R.: Badanie właściwości układów samodzielnych współpracujących ze stochastycznie zmiennym środowiskiem. Postępy Cybernetyki. Nr 4, 1976 r.
12. Tchórzewski J.: Modele rozwoju krajowego systemu elektroenergetycznego w ujęciu teorii sterowania i systemów. Poznan University of Technology. Academic Journals. Electrical Engineering. Tom 78, s. 17-26. OW PP. Poznań 2014 r.
13. Tchórzewski J.: Rozwój systemu elektroenergetycznego w ujęciu teorii sterowania i systemów. OW PWr. Wrocław 2013 r.
14. Tchórzewski J.: The Development Process of Electrical Power System as Unmanned Factory. Electrical Engineering. Issue 59. Academic Journals, OW PP, Poznań 2009 r.
15. Tchórzewski J.: Identification of Electric Power System from Point of View of Development. Polish Journal of Environmental Studies. Vol. 18, nr 4B, s. 191-194. HARD Publishing Company, Olsztyn, 2009 r.
16. Tchórzewski J.: The Development Process of Power System as Unmanned Factory. Electrical Engineering. IEEP PP, EEC PAN, IEEE PS, s. 67-68, 2008 r.
17. Tchórzewski J.: Cybernetyka życia i rozwoju systemów. Monografie nr 22, stron 408. Wydawnictwa Uczelniane WSRP w Siedlcach. Siedlce, 1992 r.
18. Tchórzewski J.: Inżynieria rozwoju systemów. Monografie nr 18, stron . Wydawnictwa Uczelniane WSRP w Siedlcach. Siedlce 1990 r.
19. Zajczyk R.: Modele matematyczne systemu elektroenergetycznego do badania elektromechanicznych stanów nieustalonych i procesów regulacyjnych. Wyd. PG. Gdańsk, 2003 r.
20. Zimmer A., Englot A.: Identyfikacja obiektów i sygnałów. Teoria i praktyka dla użytkowników MATLABA, Politechnika Krakowska. Kraków, 2005 r.

*Przyjęto do druku dnia 09.05.2016 r.*

## POSSIBILITY TO IMPROVE THE MODEL OF NPS DEVELOPMENT THROUGH THE OBSERVER OF STATE

Jerzy TCHÓRZEWSKI

**ABSTRACT** *The paper presents selected results of research on attempts to improve the models of development of the national electricity system (NPS), among others by using state observers. It is shown that the dynamic system described in the state space equations of state, and the output can be controlled by a state vector, which for the purposes of control is measured. But not always state vector is measurable, e.g., for technical reasons (lack of ability to measure certain physical elements), for physical reasons (state vector may contain non-physical and therefore unmeasurable quantities) and systemic reasons (state vector may contain historical elements, statistical, etc.).*

**Keywords:** *deserted factory, identification, national electricity system, models of development, observer status*



**Dr hab. inż. Jerzy TCHÓRZEWSKI, prof. UPH** w Siedlcach, Wydział Nauk Ścisłych, Instytut Informatyki, Zakład Modelowania i Projektowania Systemów Informatycznych. Zainteresowania naukowe: informatyka w elektroenergetyce, sztuczna inteligencja i fabryki bezludne, teoria sterowania i rozwoju systemów, rozwój systemów elektroenergetycznych. Senior member m.in. w: IEEE Power & Energy Society, IEEE Computational Intelligence Society, IEEE Computer System Society, IEEE Robotics and Automaton Society.



Członek m.in.: Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, Polskiego Stowarzyszenia Sztucznej Inteligencji, Towarzystwa Sztucznych Sieci Neuronowych, Polskiego Towarzystwa Cybernetycznego, Polskiego Towarzystwa Badań Operacyjnych i Systemowych, itp.

