

## SYNTEZA DIAGNOSTYCZNEGO MODELU UKŁADU STEROWANIA Z WYKORZYSTANIEM METOD IDENTYFIKACJI I WIELOWARTOŚCIOWEGO KODOWANIA

Henryk BOROWCZYK

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych  
ul. Ks. Bolesława 6, 01-494 Warszawa, [borowczyk@post.pl](mailto:borowczyk@post.pl),

### Streszczenie

Przedstawiono metodę tworzenia diagnostycznego modelu układu sterowania na podstawie wyników eksperymentalnych badań diagnostycznych, z wykorzystaniem metod identyfikacji oraz wielowartościowego kodowania parametrów modelu dynamicznego.

Słowa kluczowe : diagnostyka, identyfikacja, kodowanie, logika wielowartościowa, układ sterowania

### SYNTHESIS OF A CONTROL SYSTEM DIAGNOSTIC MODEL WITH USE OF IDENTIFICATION METHODS AND MULTIVALENT ENCODING

#### Abstract

A method of a control system diagnostic model creation, based on experimental results of diagnostic examination with use of identification methods and multivalent encoding of dynamic model parameters, was presented.

Key words: diagnostics, identification, encoding, multiple-valued logic, control system

## 1. WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych problemów diagnostyki technicznej jest zbudowanie modelu diagnostycznego opisującego relacje między stanami diagnozowanego obiektu a szeroko rozumianymi symptomami [1, 5]. Należy przy tym uwzględnić możliwość implementacji wyznaczonego modelu w zautomatyzowanym (komputerowo sterowanym) systemie diagnostycznym. Komputeryzacja procesu diagnozowania umożliwia efektywne zbieranie i wszechstronne przetwarzanie sygnałów diagnostycznych, a także ograniczenie roli czynnika ludzkiego, co zwiększa obiektywizm otrzymywanych rezultatów.

Model diagnostyczny może być zbudowany na podstawie analizy związków między fizykalnymi wielkościami charakteryzującymi stan obiektu i mierzalnymi sygnałami diagnostycznymi lub z wykorzystaniem formalnych metod identyfikacji, których podstawą są wyniki eksperymentalnych badań obiektu zdanego (bez uszkodzeń) i obiektu niezdanego – z uszkodzeniami (rzeczywistymi lub symulowanymi).

W pracy przedstawiono zagadnienie budowy diagnostycznego modelu układu sterowania na podstawie eksperymentalnych danych - czasowych przebiegów sygnałów diagnostycznych [2] - z zastosowaniem metod identyfikacji matematycznych modeli układów dynamicznych oraz wielowartościowego kodowania parametrów modeli wyznaczo-

nych dla obiektu zdanego i niezdanego (po wprowadzeniu symulowanych uszkodzeń).

## 2. DIAGNOZOWANY OBIEKT

Diagnozowanym obiektem jest wielozakresowy układ sterowania lotniczego silnika turbinowego. Ze względu na złożoność obiektu i wynikające stąd trudności oceny jego stanu - dąży się do dekompozycji procesu diagnozowania z uwzględnieniem zakresów pracy układu.

Podczas badań eksperymentalnych, z wykorzystaniem zaprojektowanego w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych stanowiska diagnostycznego, zarejestrowane zostały czasowe przebiegi sygnałów, które są nośnikami informacji o funkcjonowaniu obiektu, m. in. [2]:

- DSS - położenie dźwigni sterowania silnikiem,
- DR - średnica dyszy regulowanej,
- n - prędkość obrotowa wirnika silnika,
- P2 - ciśnienie powietrza za sprężarką,
- t4 - temperatura spalin za turbiną,
- Pw - ciśnienie paliwa zasadniczej komory spalania.

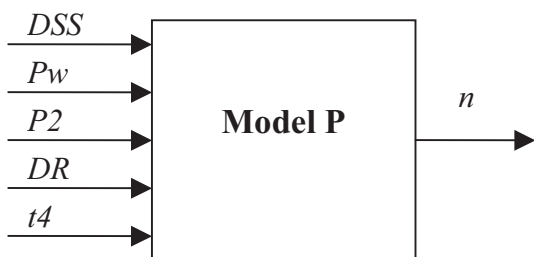
Wyznaczono przebieg wzorcowy (prawidłowy, bez uszkodzeń – oznaczony dalej jako U0) oraz zbiór przebiegów z symulowanymi uszkodzeniami – oznaczenie  $U_i$ , gdzie  $i = 1, 2, \dots, N$  odpowiada kolejnemu numerowi uszkodzenia, natomiast  $N$  - liczbie rozpatrywanych uszkodzeń

### 3. IDENTYFIKACJA MODELU UKŁADU STEROWANIA

Celem identyfikacji jest zbudowanie matematycznego modelu, który z wymaganą dokładnością odwzoruje właściwości dynamiczne badanego obiektu. Identyfikacja jest procesem iteracyjnym i obejmuje następujące etapy:

- wykonanie zaplanowanego eksperymentu identyfikacyjnego i zarejestrowanie zmiennych wejściowych i wyjściowych (lub przygotowanie danych zebranych podczas eksploatacji obiektu),
- wybór struktury modelu,
- wyznaczenie parametrów modelu wybraną metodą identyfikacji,
- ocena zgodności właściwości dynamicznych modelu i rzeczywistego obiektu - dokładności identyfikacji, np. przez porównanie odpowiedzi czasowych modelu i obiektu na jednakowy sygnał wejściowy,
- jeśli uzyskana dokładność nie jest wystarczająca - przyjęcie innej struktury modelu i ponowna identyfikacja parametrów.

Na rys. 1 przedstawiono schemat identyfikacyjnego modelu układu sterowania przyspieszaniem rozpatrywany w pracach [8, 9]. Przyjęto model autoregresji z zewnętrznym wymuszeniem: *ARX* (*AutoRegressive with eXogenous Input*) zaimplementowany w przyborniku *System Identification Toolbox* [10].



Rys. 1. Schemat identyfikacyjnego modelu układu sterowania przyspieszaniem [3, 9]

Do identyfikacji zastosowano biblioteczną funkcję *arx*, która wykorzystuje metodę najmniejszych kwadratów. Funkcję *arx* wywołuje się następującym poleceniem [10]:

$$\mathbf{th} = \mathbf{arx}([\mathbf{y} \ \mathbf{u}], [\mathbf{na} \ \mathbf{nb} \ \mathbf{nk}])$$

gdzie:

- $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{u}$  - wektory kolumnowe wyjściowy i wejściowy;
- $\mathbf{na}$  - liczba biegunów (pierwiastków mianownika transmitancji);
- $(\mathbf{nb} - 1)$  - liczba zer (pierwiastków licznika transmitancji);
- $\mathbf{nk}$  - opóźnienie w układzie;
- $\mathbf{th}$  - macierz wyniku w formacie THETA [10].

Dokładność identyfikacji zależy od trafności wyboru stopnia transmitancji operatorowej oraz od jakości zarejestrowanych danych doświadczalnych (czasowych przebiegów sygnałów diagnostycz-

nych). Dobór postaci modelu oraz parametrów jego struktury stanowi osobne zagadnienie, które nie będzie w niniejszej pracy przedmiotem rozważań.

W pracach [3, 4, 8, 9] zastosowano modele o następujących parametrach strukturalnych:

$$\mathbf{na} = [4], \mathbf{nb} = [4 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4], \mathbf{nk} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

Z macierzy  $\mathbf{th}$ , za pomocą funkcji *th2tf*, uzyskuje się współczynniki licznika i mianownika dyskretnego transmitancji modelu. Przejście z modelu dyskretnego na ciągły realizuje się za pomocą funkcji *d2c* [10].

Wybrane współczynniki transmitancji ciągłej dla modelu *P* przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.

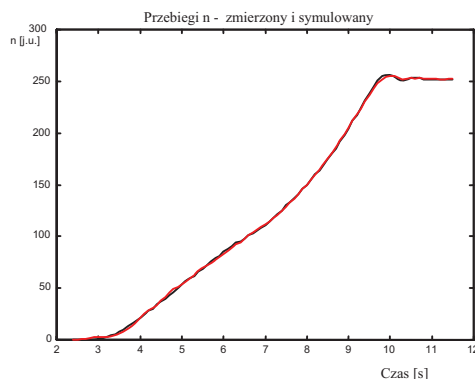
Wybrane współczynniki transmitancji ciągłej

B2 - Pw	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
U0	3254	446	13,85	1,182	0,017
U1	1889	450,3	17,75	0,258	0,011
U2	1919	440,2	6,232	1,077	0,002
U3	1936	203,2	16,36	0,067	0,007
U4	4339	36,93	5,488	0,205	0,028
A - n	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
U0	3773	5925	1121	66,24	1,000
U1	1241	6182	1066	94,07	1,000
U2	445,1	3739	724,0	62,39	1,000
U3	2347	4319	1253	80,87	1,000
U4	3388	5242	872,1	54,15	1,000

Wyznaczone modele dynamiczne mogą być wykorzystane do badań symulacyjnych w celu określenia różnicy między sygnałami wyjściowymi:

- zmierzonym podczas badań eksperymentalnych;
- generowanym przez model.

Na rys. 2 przedstawiono przebiegi sygnału wyjściowego  $n$  uzyskanego z badań symulacyjnych modelu *P* oraz zarejestrowanego podczas badań eksperymentalnych układu bez uszkodzeń.



Rys. 2. Odpowiedź modelu i układu rzeczywistego bez uszkodzeń (linia ciągła)

Jak widać, uzyskano zgodność wyników badań symulacyjnych z danymi zarejestrowanymi na obiekcie rzeczywistym.

**4. MODEL DIAGNOSTYCZNY**

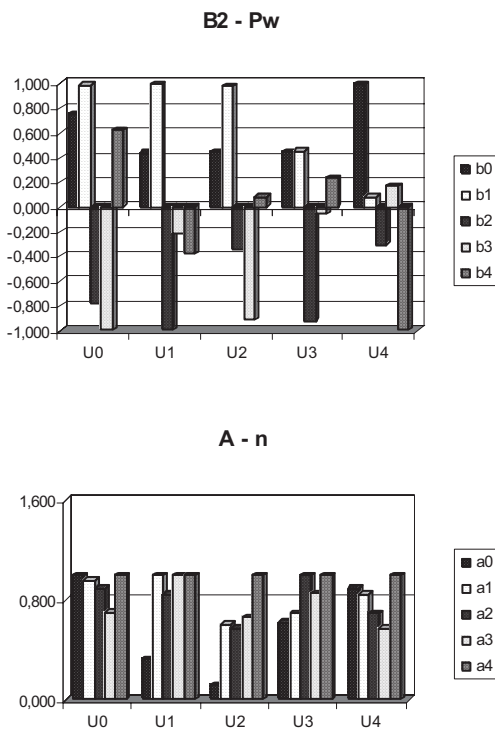
Wyznaczone w procesie identyfikacji współczynniki transmitancji zawierają informację o stanie technicznym badanego obiektu. Mogą zatem stanowić podstawę do opracowania modelu diagnostycznego opisującego relacje między wartościami współczynników a uszkodzeniami.

Ponieważ współczynniki transmitancji przyjmują wartości znacznie różniące się między sobą (a stąd trudne do analizy) celowe staje się przeprowadzenie ich normalizacji według zależności:

$$a_i' = \frac{a_i}{a_{i\max}}; \text{ gdzie: } a_{i\max} = \max_{j=1,\dots,N} |a_i(Uj)|;$$

przy czym:  $N$  – liczba rozpatrywanych uszkodzeń.

Po dokonaniu normalizacji współczynniki transmitancji przyjmują wartości z przedziału  $[-1;1]$ . Przykładowy wykres znormalizowanych współczynników przedstawiono na rys.35.



Rys. 3. Wybrane znormalizowane wartości współczynników transmitancji modelu  $P$  [3, 9]

Kolejnym krokiem jest określenie zasady całkowitoliczbowego kodowania, polegającego na przypisaniu wartościom współczynników transmitancji z określonego przedziału liczb rzeczywistych, jednej liczby całkowitej ze znakiem.

Na rys. 4 przedstawiono przyjęte zasady kodowania dla modelu układu sterowania przyspieszaniem  $P$ .

Zakres zmienności współczynników  $B$  modelu  $P$  podzielono na cztery jednakowe podzakresy i wyróżnioną wartość 0, natomiast zakres zmienności współczynników  $A$  – na dwa podzakresy.

$b_i$		$a_i$	
Przedział	Kod	Przedział	Kod
$[-1, -1/2)$	-2	$[0, 0,8]$	0
$[-1/2, 0)$	-1	$(0,8, 1,0]$	1
0	0		
$(0, 1/2]$	1		
$(1/2, 1,0]$	2		

Rys. 4. Zasady kodowania wartości współczynników transmitancji modelu  $P$

Wyniki kodowania wartości współczynników transmitancji przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2**

Wartości kodowe współczynników transmitancji

A	a0	a1	a2	a3	a4
U0	1	1	1	0	1
U1	0	1	1	1	1
U2	0	0	0	0	1
U3	0	0	1	1	1
U4	1	1	0	0	1

B2	b0	b1	b2	b3	b4
U0	2	2	-2	-2	2
U1	1	2	-2	-1	-1
U2	1	2	-1	-2	1
U3	1	1	-2	-1	1
U4	2	1	-1	1	-2

**5. KLASYFIKACJA USZKODZEŃ**

Na podstawie wyznaczonych tabel kodowych można rozróżniać zaistniałe uszkodzenia, a także wnioskować o braku uszkodzeń (czyli o stanie zdatości obiektu). Klasyfikacja uszkodzeń polega na analizie ciągów kodowych odpowiadających stanowi wzorcowemu  $U_0$  oraz odpowiednim klasom uszkodzeń  $U_i$ . Klasyfikacji dokonuje się przez porównanie parami odpowiednich ciągów kodowych – jeżeli ciągi różnią się co najmniej w jednej pozycji to uszkodzenia są rozróżnialne. W przeciwnym przypadku należy rozważyć zmianę sposobu kodowania – zmianę granic lub zwiększenie ilości przedziałów. Skuteczność klasyfikacji jest tym lepsza, im większa jest ilość pozycji, na których różnią się poszczególne pary ciągów kodowych.

Jak wynika z analizy tabeli 2, dla rozpatrywanego układu, poszczególne stany obiektu (zdatości i uszkodzenia) są rozróżnialne przy zastosowaniu kodu pięciowartościowego. W przypadku konieczności uwzględnienia większej ilości uszkodzeń lub

dla uzyskania większej precyzji klasyfikacji uszkodzeń, może okazać się niezbędne rozszerzenie sposobu kodowania o kolejne wartości kodowe. Należy jednak uwzględnić fakt, że wraz ze wzrostem wartościowości kodowania klasyfikacja staje się trudniejsza i wymaga zastosowania formalnych metod analizy wykorzystujących np. logikę wielowartościową i teorię informacji [1] lub sieci neuronowe.

## 6. PODSUMOWANIE

Zaproponowana metoda syntezy diagnostycznego modelu układu sterowania obejmuje:

- zastosowanie metod identyfikacji do zbudowania modelu dynamicznego odwzorowującego zachowanie rzeczywistego obiektu,
- analizę wpływu uszkodzeń na parametry modelu obiektu zdadnego oraz niezdatnego (po wprowadzeniu symulowanych uszkodzeń [2]),
- przeprowadzenie wielowartościowego kodowania parametrów modelu – przypisanie liczb całkowitych określonym przedziałom wartości parametrów,
- zbudowanie wielowartościowej tabeli stanów jako formy odwzorowania relacji między stanami obiektu a towarzyszącymi im symptomami w postaci określonych wartości kodowych zbioru parametrów modelu.

Kluczowym zagadnieniem identyfikacji jest weryfikacja modelu. O jakości odwzorowania przez model zachowania rzeczywistego obiektu wnioskować można, porównując wartości błędu średniokwadratowego sygnału wyjściowego dla różnych struktur oraz odpowiadające im wartości szukanych parametrów. Poddanie tych parametrów odpowiednim przekształceniom, umożliwi wnioskowanie o stanie badanego obiektu. Istotne jest, aby procedura postępowania przy tworzeniu modelu była oparta na jednokowym wzorcu.

Uzyskane rezultaty praktyczne [3, 4, 8, 9] wskazują na możliwość opracowania efektywnej metody diagnozowania układów sterowania przez połączenie wiedzy z wielu dziedzin: identyfikacji procesów, logiki wielowartościowej, teorii informacji oraz sztucznych sieci neuronowych.

## LITERATURA

- [1] Borowczyk H.: *Quasi-informacyjna metoda wyznaczania programu diagnozowania złożonych obiektów technicznych*. Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1984.
- [2] Borowczyk H., Kaćki Cz., Koblański A.: „*Technologia identyfikacji uszkodzeń turbinowych silników odrzutowych typu 89 przy pomocy stanowiska diagnostycznego KAPSO-17MK.*”, ITWL, Warszawa 1991.
- [3] Borowczyk H., Sobiech M.: *Koncepcja diagnostycznego modelu układu sterowania przyspieszeniem turbinowego silnika odrzutowego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej "Budowa i eksploatacja maszyn", Z. 11 – w druku.
- [4] Borowczyk H., Raszkievicz P.: *Koncepcja diagnostycznego modelu układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej "Budowa i eksploatacja maszyn", Z. 11 – w druku.
- [5] Lindstedt P.: *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*. Wyd. ASKON, Warszawa 2002.
- [6] Lindstedt P., Borowczyk H.: *Kompleksowy system diagnostyczny statku powietrznego*; ITWL, Warszawa 1998.
- [7] Manerowski J.: *Identyfikacja modeli dynamiki ruchu sterowanych obiektów latających*. Wyd. ASKON, Warszawa 1999.
- [8] Raszkievicz P.: *Model diagnostyczny układu sterowania dopalaczem turbinowego silnika odrzutowego*, Praca magisterska, Politechnika Białostocka, Białystok 2003.
- [9] Sobiech M.: *Model diagnostyczny układu sterowania przyspieszeniem turbinowego silnika odrzutowego*; Praca magisterska, Politechnika Białostocka, Białystok 2003.
- [10] System Identification Toolbox, User's guide, The MathWorks.



Dr inż. Henryk BOROWCZYK, pracownik naukowo-badawczy Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych w Warszawie i naukowo-dydaktyczny Politechniki Białostockiej. W latach 1996-2001 kierownik Zakładu Diagnostyki Techniki Lotniczej ITWL.

Działalność naukowo-badawcza: kompleksowa diagnostyka lotniczych silników turbinowych z wykorzystaniem teorii informacji, metod identyfikacji matematycznych modeli układów dynamicznych, metod sztucznej inteligencji.