

Zbigniew BARTOŃ
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
Bożena PALUCHIEWICZ
Instytut Automatyki

O MOŻLIWOŚCI IDENTYFIKACJI MODELI DYNAMICZNYCH SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Streszczenie. W artykule zaprezentowano możliwości współpracy programu MA komputerowej symulacji układów dynamicznych z systemem eksperckim EDIP 2. Omówiono wykonane modyfikacje oprogramowania programu MA, które umożliwiły wykorzystanie wyników symulacji jako plików danych dla systemu. Zamieszczone, przykładowe wyniki badań pozwalają stwierdzić, iż możliwa jest identyfikacja modelu systemu elektroenergetycznego (SE) na podstawie ciągów czasowych wejścia i wyjścia (I/O) SE.

ABOUT THE POSSIBILITY IDENTIFICATION OF DYNAMIC MODELS OF POWER SYSTEM

Summary. This paper presents possibility of collaboration between the program MA of computer simulation for dynamic systems and the expert system EDIP 2. Modifications in software are described. There are allowed to make the most of the results simulation as the data base for expert system. The effectiveness of the proposed collaboration is demonstrated by simulation studies.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Резюме. В статье представлена возможность содействия программы MA для компьютерной симуляции динамических систем с экспертной системой EDIP 2. Обсуждены проведенные модификации в софтвере программы MA, которые сделали возможным использование результатов симуляции в качестве массивов данных для системы. Приведенные в качестве примера результаты исследований подтверждают возможность идентификации модели энергосистемы, используя дискретизацию входных и выходных величин энергосистемы.

1. WPROWADZENIE

Konieczność zapewnienia synchronicznej współpracy połączonych systemów elektroenergetycznych (SE) i ich części, szczególnie w warunkach awaryjnych, powoduje wzrost znaczenia syntezy zarówno struktury, jak parametrów układów regulacji. Prowadzenie doświadczeń w rzeczywistym SE jest nie tylko nieekonomiczne, ale zazwyczaj niemożliwe ze względu na:

- brak możliwości wyłączeń części SE,
- niemożliwość wielokrotnego powtarzania awarii.

Wykorzystuje się więc ideę prowadzenia badań nie na obiekcie rzeczywistym, ale na odpowiednio przygotowanych modelach matematycznych. Modele są narzędziem służącym do przewidywania zachowania się SE w stanach zagrożeniowych. Znane modele w postaci równań różniczkowych są prosto rozwiązywalne numerycznie. Zaletę tę wykorzystuje się do cyfrowego symulowania pracy SE. Dobre wyniki można otrzymać stosując np. program MA komputerowej symulacji układów dynamicznych [1], którego krótki opis zamieszczony jest w punkcie 3.1 niniejszego artykułu.

Ważnym czynnikiem jest efektywność modelu, to znaczy jego zdolność do całościowego opisu zjawisk i - ostatecznie - możliwość zbudowania sprawnego układu sterowania. Niestety trudno jest opisać tak rozumianą efektywność w postaci matematycznej nadającej się do zastosowania. Dlatego konieczne jest odwołanie się do metod identyfikacji [2], [3], [4].

Wielce interesujące możliwości w tej dziedzinie oferuje system EDIP 2 [5]. Krótką charakterystykę tego systemu przedstawiono w punkcie 3.2.

2. DYNAMICZNE MODELE SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Założmy, że SE traktujemy jako obiekt, do którego doprowadzana jest wielkość u . Wielkością wyjściową niech będzie y , natomiast białym szumem, generującym zakłócenia sprowadzane na wyjście e . Jeżeli wielkości te będą mierzone i określone w dyskretnych chwilach czasu iT ($i = -n, \dots, -1, 0, 1, \dots, n$), gdzie T jest okresem próbkowania, a zbiór wielkości mierzonych jest uporządkowany wg czasu, to wtedy wielkości te będą ciągami czasowymi, natomiast $u(i)$, $y(i)$ oraz $e(i)$ będą i -tymi próbkami tych ciągów [6]. Ciągi te, przy założeniu liniowości i stacjonarności, można powiązać relacją:

$$y(i) = G(z^{-1})u(i) + H(z^{-1})e(i), \quad (1)$$

gdzie:

z^{-1} - operator przesunięcia wstecz,

$G(z^{-1})$ - transmitancja toru sterowania,

$H(z^{-1})$ - transmitancja toru zakłócenia.

Identyfikacja transmitancji równania (1) wymaga sparametryzowania ich w postaci funkcji wymiernych operatora przesunięcia. Można w tym celu wykorzystać wielomiany:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{dA} z^{-dA}, \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{dB} z^{-dB}, \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{dC} z^{-dC} \end{aligned} \quad (2)$$

z dyskretnym czasem opóźnienia k w torze sterowania.

Opierając się na relacjach (1) i (2) można wydzielić następujące podklasy modeli w dziedzinie czasu:

a) modele ARX, dla których równanie (1) przyjmuje postać:

$$y(i) = z^{-k} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(i) + \frac{1}{A(z^{-1})} e(i). \quad (3)$$

Trójka (k, dA, dB) określa strukturę modelu ARX. Model ten można opisać równaniem różnicowym:

$$\begin{aligned} y(i) + a_1 y(i-1) + \dots + a_{dA} y(i-dA) = \\ = b_0 u(i-k) + b_1 u(i-k-1) + \dots + b_{dB} u(i-k-dB) + e(i). \end{aligned} \quad (4)$$

Biegunami modelu są pierwiastki równania:

$$z^{dA} A(z^{-1}) = 0, \quad (5)$$

natomiast zerami modelu są pierwiastki równania:

$$z^{dB} B(z^{-1}) = 0. \quad (6)$$

b) Modele ARMAX, dla których równanie (1) przyjmuje postać:

$$y(i) = z^{-k} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(i) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} e(i). \quad (7)$$

Wykorzystanie czwórki (k, dA, dB, dC), określającej strukturę, umożliwia opisanie modelu następującym równaniem różnicowym:

$$y(i) + a_1 y(i-1) + \dots + a_{dA} y(i-dA) = b_0 u(i-k) + b_1 u(i-k-1) + \dots + b_{dB} u(i-k-dB) + e(i) + c_1 e(i-1) + \dots + c_{dC} e(i-dC) . \quad (8)$$

Pierwiastki równania:

$$z^{dC} C(z^{-1}) = 0 \quad (9)$$

są zerami transmitancji toru zakłócenia $H(z^{-1})$.

Warunki stabilności modeli są spełnione, gdy wszystkie jego bieguny leżą wewnątrz okręgu jednostkowego na płaszczyźnie Z . Modele ARX oraz ARMAX są minimalnofazowe, jeżeli ich zera leżą wewnątrz wspomnianego okręgu.

Proces identyfikacji modeli jest procesem iteracyjnym składającym się z powtarzających się następujących etapów:

- wstępnej identyfikacji,
- estymacji parametrów modelu,
- weryfikacji modelu.

3. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA PROGRAMU I SYSTEMU

3.1. Charakterystyka programu MA

Program MA, komputerowej symulacji układów dynamicznych, został opracowany do rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych z warunkami początkowymi. Model złożonego SE, będący układem dynamicznym, traktowany jest w przypadku stosowania tego programu jako zespół relacji (lub) operacji pomiędzy funkcjami, danymi i niewiadomymi. Odpowiednie powiązanie i przyporządkowanie danym niewiadomych umożliwia rozwiązanie problemu.

W programie MA operacje podstawowe realizowane są przez standardowe operacje maszynowe i podprogramy (np. do realizacji całkowania). Program łączeniowy konstruowany jest na podstawie blokowego schematu operacyjnego. Istnieje możliwość generowania wymuszeń (funkcji zadanych). Nie mogą one jednak pochodzić ze źródeł zewnętrznych. Czas symulowany może być używany jako wielkość wejściowa do wszystkich bloków.

Podstawowe operacje można podzielić na liniowe oraz nieliniowe. Liniowe są: dodawanie, mnożenie przez stały współczynnik oraz całkowanie, natomiast do nieliniowych należą: mnożenie, ograniczanie, $\sin(\cdot)$, $\cos(\cdot)$, $\exp(\cdot)$. Warunki początkowe

podawane są jako wartości stałe, przy czym bloki oznaczające wielkości stałe posiadają tylko wyjścia. Wszystkie operacje nazwano w programie blokami funkcyjnymi. Należy podkreślić, że z wyjątkiem bloku oznaczającego wartość stałą pozostałe muszą być umieszczane w schemacie połączeń pomiędzy kolejno ponumerowanymi węzłami spełniającymi rolę sumatorów. Bloki tego samego rodzaju muszą być pomumerowane podobnie jak węzły.

Rozwiązanie problemu za pomocą modelowania symulacyjnego można podzielić na dwa etapy: przygotowania programu, czyli danych, oraz jego wykonania. Przygotowanie programu zawiera wstępną analizę problemu, opracowanie jego modelu matematycznego, schematu blokowego, sporządzenia zestawień zawierających dane o współczynnikach, wartościach początkowych i innych parametrach oraz napisanie programu połączeń.

Wykonanie programu polega na wprowadzeniu danych do komputera i przeprowadzeniu procesu obliczeniowego wraz z obserwacją i rejestracją przebiegu obliczeń.

W przypadku badania układów sterowania (regulacji) stosuje się tzw. symulację strukturalną. Schemat blokowy tworzy się nie według równania różniczkowego całego układu, ale na podstawie równań lub równoważnych im przepustowości operatorowych poszczególnych jego członów. Bardziej złożone problemy, wymagające np. analizy i syntezy, mogą wymagać więcej niż jednego schematu blokowego.

3.2. Charakterystyka systemu EDIP

System EDIP 2 [5] może być implementowany na komputerach kompatybilnych z IBM PC. W porównaniu z innymi programami służącymi do identyfikacji jego działanie jest charakterystyczne dla systemów eksperckich. Obejmuje ono następujące aspekty identyfikacji:

- testowanie poprawności wyboru okresu próbkowania,
- rozstrzygnięcie problemu stacjonarności lub niestacjonarności identyfikowanego sygnału lub obiektu,
- wybór struktury modelu i stopnia występujących w nim wielomianów,
- testowanie stopnia uwarunkowania macierzy informacyjnej.

Pomyślna realizacja przedstawionej koncepcji wymagała jednak takiej modyfikacji programu MA, aby jego wyniki mogły być plikami danych dla systemu EDIP.

Konieczna więc była zmiana oprogramowania programu MA. Powinno być możliwe zadawanie dowolnego okresu próbkowania, jednakowego dla wejść i wyjść z modelu oraz po zakodowaniu rejestrowanie wartości wielkości próbkowanych, a następnie konwersja tych wyników do plików. Pliki te powinny spełniać wymagania stawiane danym do identyfikacji, które są przygotowywane poza systemem EDIP.

Wszystkie konieczne, a wymienione zmiany oprogramowania zostały wykonane.

4. PRZYKŁAD WSPÓŁPRACY PROGRAMU I SYSTEMU

W celu zbadania możliwości współpracy programu MA i systemu EDIP zamodelowano zwarcie trójfazowe w SE połączonym z siecią sztywną. Układ regulacji prędkości obrotowej turbiny był adaptacyjny [7], [8]. Ciągłem czasowym wejściowym obiektu był sygnał układu stabilizacji mocy mechanicznej, natomiast wyjściowym był ciąg czasowy kąta δ (odchylenia prędkości chwilowej od synchronicznej). Przebiegi czasowe, których konwersja została zrealizowana do systemu EDIP, pokazano na rys. 1.

Generowanie danych do identyfikacji polega w tym przypadku na odczytaniu przez system dyskretnych wartości tych przebiegów z pliku.

4.1. Identyfikacja modelu ARX

Identyfikacja modelu polega na estymacji czasu opóźnienia obiektu, a następnie estymacji parametrów wielomianów. Najlepszy model poszukiwany jest dla kolejnych struktur w procesie iteracyjnym.

W prezentowanym przypadku uzyskano najlepszy model dla struktury $(k, dA, dB) = (1, 2, 3)$. Parametry tego modelu były następujące:

$$\begin{array}{ll} a_1 = -1,245, & b_0 = 0,010; \\ a_2 = -0,498, & b_1 = -0,007; \\ a_3 = 0,749, & b_2 = -0,002. \end{array}$$

Bieguny i zera tego modelu przyjmują wartości:

bieguny	zera
-0,750,	-0,185,
0,998 - j0,057,	-0,002.

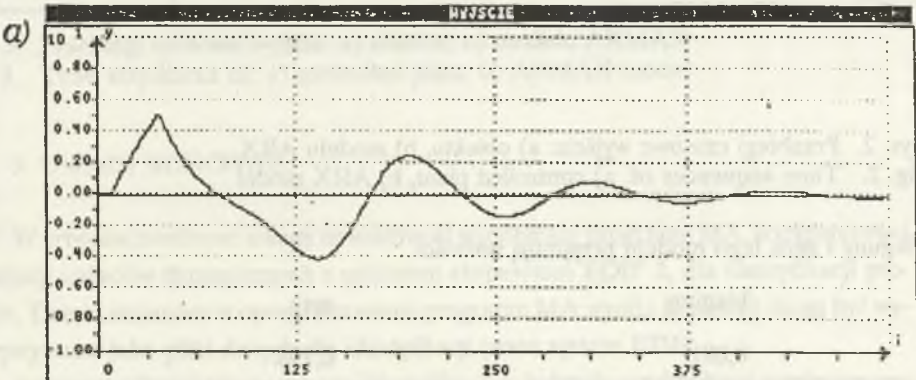
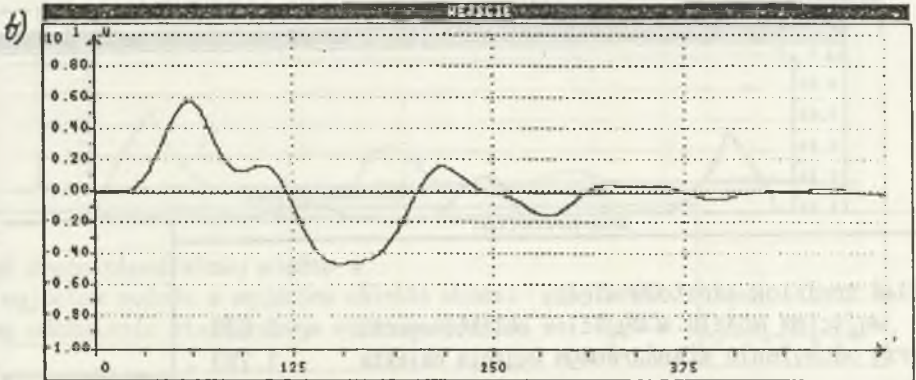
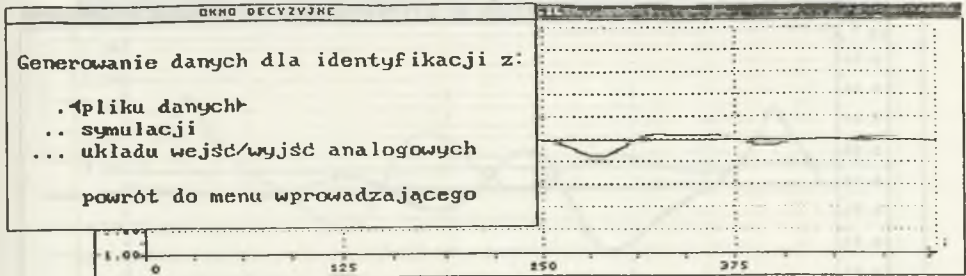
Otrzymany model jest, jak można zauważyć, stabilny oraz minimalnofazowy.

W celu sprawdzenia poprawności wykonanych obliczeń dokonano weryfikacji modelu. Wybrano test symulacyjny. Wykreślony przebieg czasowy wielkości wyjściowych obiektu i modelu pokazano na rys. 2.

4.2. Identyfikacja modelu ARMAX

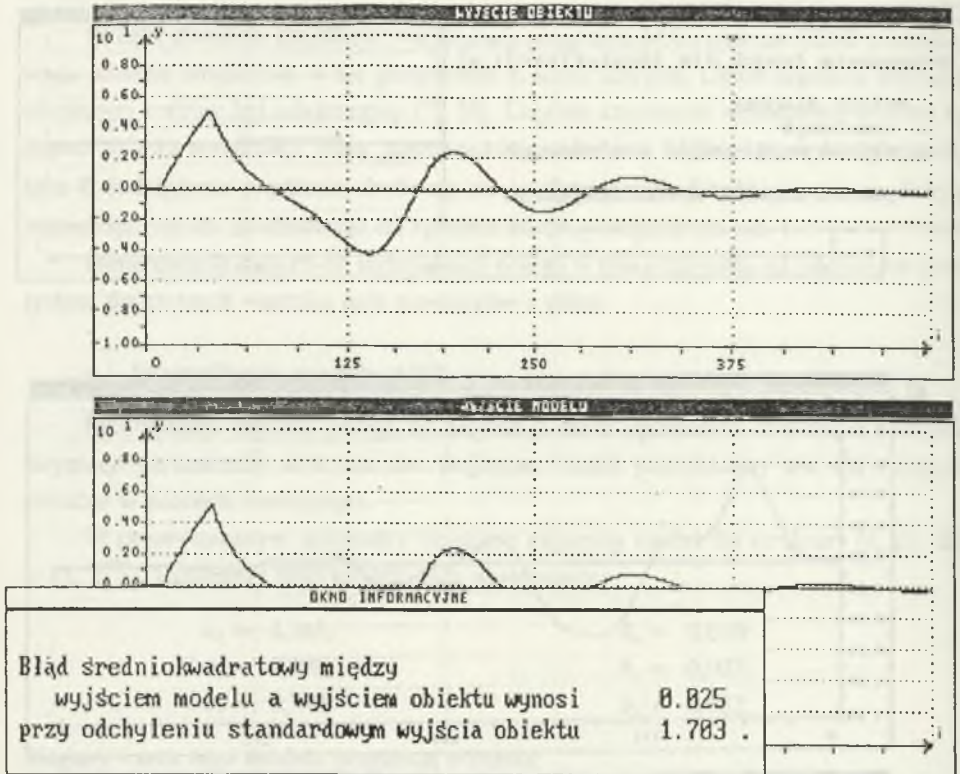
Identyfikacja modelu tego typu, przy spełnieniu warunków stabilności i minimalnofazowości, pozwoliła określić strukturę $(k, dA, dB, dC) = (1, 2, 1, 2)$. Parametry tego modelu były następujące:

$$\begin{array}{lll} a_1 = -1,878, & b_1 = 0,016, & c_1 = -0,596, \\ a_2 = 0,878, & b_2 = 0,014, & c_2 = 0,648 \end{array}$$



Rys. 1. Przebiegi ciągów czasowych po konwersji do systemu EDIP: a) wyjściowy, b) wejściowy

Fig. 1. Time sequences after conversion to EDIP system: a) output, b) input



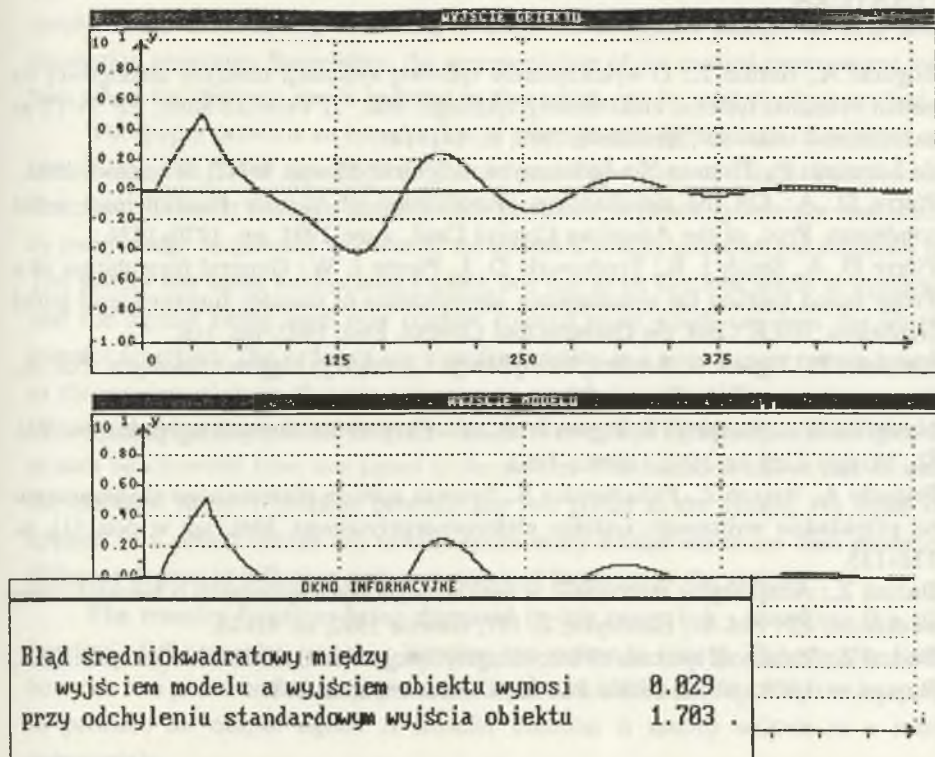
Rys. 2. Przebiegi czasowe wyjścia: a) obiektu, b) modelu ARX
 Fig. 2. Time sequences of: a) controlled plant, b) ARX model

Bieguny i zera tego modelu przyjmują wartości:

bieguny	zera
0,881,	0,798.
0,997.	

Wykreślony przebieg czasowy weryfikacji za pomocą danych do estymacji, będący wynikiem testu symulacyjnego, pokazano na rys. 3.

Porównując błędy średniokwadratowe między wyjściami modelu i obiektu można zauważyć, że przy tym samym odchyleniu standardowym wyjścia obiektu błąd w drugim przypadku jest większy o 0,003.



Rys. 3. Przebiegi czasowe wyjścia: a) obiektu, b) modelu ARMAX
Fig. 3. Time sequences of: a) controlled plant, b) ARMAX model

5. UWAGI KOŃCOWE

W artykule zwrócono uwagę na możliwość współpracy programu MA, komputerowej symulacji układów dynamicznych z systemem eksperckim EDIP 2, dla identyfikacji procesów. Dzięki zmianom w oprogramowaniu programu MA wyniki symulacji mogą być wykorzystywane jako pliki danych dla identyfikacji przez system EDIP.

Przeprowadzono eksperymenty identyfikacji, z których przykładowy zamieszczono w niniejszym artykule. Potwierdziły one celowość podjęcia próby skojarzenia programu MA i systemu EDIP.

Wykorzystanie proponowanego podejścia umożliwi określenie uproszczonych modeli dynamicznych SE, takich których charakterystyki są zbliżone do charakterystyk modeli wysokich rzędów, czyli rozbudowanych systemów elektroenergetycznych.

LITERATURA

1. Bogucki A., Bartoń Z.: O wykorzystaniu cyfrowej symulacji maszyny analogowej do badań dynamiki systemu elektroenergetycznego. Mat. "II Vedecka Konf. EF SVTS so zahraničnou ucast'ou", Bratislava 1989, ss. 141÷145.
2. de Larminat P., Thomas Y.: Automatyka, t. 2 Identyfikacja. WNT, Warszawa 1983.
3. Pierre D. A.: On the simultaneous identification of transfer function and initial conditions. Proc. of the American Control Conf., June 1992, pp. 1270÷1274.
4. Pierre D. A., Smith J. R., Trudnowski D. J., Pieere J. W.: General formulation of a Prony based method for simultaneous identification of transfer functions and initial conditions. IEEE Conf. on Decision and Control, Dec. 1992, pp. 1÷6.
5. Bielińska E., Figwer J.: Analiza, identyfikacja i predykcja ciągów czasowych. Pol. Śl., Skrypty Ucz. nr 1561, Gliwice 1991.
6. Niederliński A., Kasprzyk J., Figwer J.: EDIP - Ekspert dla identyfikacji procesów. Pol. Śl., Skrypty Ucz. nr 1663, Gliwice 1992.
7. Bogucki A., Bartoń Z., Paluchiewicz B.: Synteza metodą planowanego eksperymentu na przykładzie wybranego systemu elektroenergetycznego. Mat. jak w poz. [1], ss. 131÷135.
8. Bartoń Z.: Adaptacyjne sterowanie w wielomaszynowych systemach o hierarchicznej strukturze. ZN Pol. Śl., Elektryka, Z. 127, Gliwice 1992, ss. 41÷48.
9. Bartoń Z.: Stabilność systemu elektroenergetycznego w stanach zakłóceńowych. KBN, Raport nr 3.3021 91 02, IEiSU Pol. Śl., Gliwice 1992, ss. 1÷7.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Wróblewski

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 kwietnia 1994 r.

Niniejsza publikacja opiera się na pracach sponsorowanych przez II Polsko-Amerykański Fundusz im. Marii Skłodowskiej-Curie w ramach przedsięwzięcia Grant MEN/DOE-93-48.

Abstract

The dimension of a modern power networks is the main difficulty in development of realistic dynamic control strategies for large interconnected power systems. Substantial computational effort as well as the analysis of volumes of output date for detailed studies of such systems are required. The dynamic vastness precludes any attempt at controller design based on full analytic modeling for many control design techniques. The study of power system dynamics and damping control therefore tends to involve quite a bit of

simulation. For full order model this is inconvenient due to both the computational time involved and the difficulty of sorting through the enormous amount of data that the simulation generates. Sometimes, the representation of the control environment may be lost, when the dynamic size is reduced to that which can be analytically described.

This paper presents an introduction to concepts and applications of dynamic model identification in power system. The dynamic model by means of transfer function can be described. Transfer function identification problems in power system are characterized by many things. In general, an order of the system is usually unknown but relatively large. The system has many nonlinearities which one has to be cautious about in applications and the signals being used may contain colored noise which can bias the identified transfer functions. The order of any transfer function in a large power system is as large as the number of states that are necessary to model the system. For the largest systems this would mean many thousands of states. However most of those poles or eigenvalues cannot be observed from any signal in the system. This situation allows one to identify the effective transfer function between any two points in the system. An input signal applied to a power system will usually excite many modes which are then exhibited to different degree in different output signals and locations in the system.

The transfer functions being discussed in this paper is z - transform (z - plane) function of the impulse response between two points in system. The transfer function between two points contains the poles and zeros which are acted upon by the input signal to produce an output signal. A transfer function is usually written as a ratio of polynomials.

This paper describes possibility of collaboration between the program MA of computer simulation dynamic system and the expert system EDIP 2. In section 2 the input-output relations of the controlled system are described. The brief characteristics of the program MA and the system EDIP 2 contain section 3. Modifications in software are presented too. They allow for making the most of the results simulation as the data base for the expert system. In section 4 method is tested and model validation of the identified transfer function is also discussed.