

Włodzimierz STANISŁAWSKI, Marek RYDEL

POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
INSTYTUT AUTOMATYKI I INFORMATYKI

Redukcja zlinearyzowanych modeli podsystemów kotła energetycznego jako obiektu sterowania

Dr hab. inż. Włodzimierz STANISŁAWSKI

Studia i doktorat na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. Habilitacja na Uniwersytecie Elektrotechnicznym w Sankt Petersburgu. Od 2003 stanowisko profesora Politechniki Opolskiej. Kieruje Zakładem Informatyki. Zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z modelowaniem i symulacją komputerową złożonych obiektów sterowania, a w szczególności bloków energetycznych. Od 1 września 2005 pełni funkcję prodziekana Wydziału ds. studenckich.

e-mail: stan@po.opole.pl



Mgr inż. Marek RYDEL

Jest doktorantem na wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. W 2002 uzyskał stopień mgr inż. na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z tworzeniem i badaniami hierarchicznych modeli złożonych obiektów sterowania.

e-mail: m.rydel@weia.po.opole.pl



Streszczenie

Zagadnienia prezentowane w artykule są związane z budową zagregowanych hierarchicznych modeli dynamicznych obiektów sterowania o wielkiej złożoności na przykładzie modelu parownika kotła energetycznego. W szczególności przedstawiono problemy redukcji zlinearyzowanego modelu rur ekranowych parownika kotła energetycznego BP-1150. Poddano analizie problem doboru parametrów filtrów wagowych dla redukcji modelu metodą FW (ang. Frequency Weighted).

Słowa kluczowe: redukcja, modele hierarchiczne.

Reduction of linearized models of power plant evaporator subsystems as control objects

Abstract

The problems connected with reduction of hierarchical models of complex control objects were presented in the article. The paper describes influence of parameters weight function on approximation errors and possibilities of parameters optimization.

Keywords: reduction, hierarchical model.

1. Wstęp

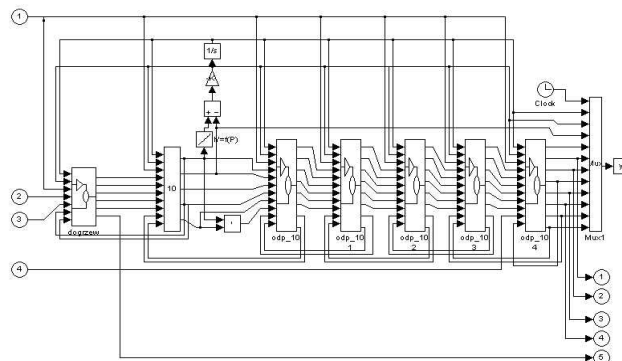
Blok energetyczny jako obiekt sterowania jest systemem o wielkiej złożoności. Analiza właściwości dynamicznych takiego obiektu jest możliwa poprzez narzucenie hierarchicznej struktury modelu oraz dekompozycję modelu na poszczególnych poziomach hierarchii na szereg prostszych do zamodelowania i analizy podsystemów [4]. Programy symulacyjne (np. MATLAB/Simulink) udostępniają technologię budowy modeli hierarchicznych poprzez łączenie podsystemów o ukierunkowanym działaniu. Należy jednak zwrócić uwagę, że związane jest to wyłącznie z funkcjonowaniem graficznego edytora modelu, gdyż w rzeczywistości model przechowywany jest w postaci jednopoziomowej, w postaci układu równań różniczkowych zwyczajnych.

Podczas analizy właściwości dynamicznych, jak również podczas projektowania układów sterowania złożonymi obiektami, niezbędne są modele matematyczne niskiego rzędu aproksymujące właściwości dynamiczne obiektu z zadaną dokładnością. Redukcja modelu nie jest operacją jednoznaczną, a w literaturze można znaleźć cały szereg technik pozwalających na przeprowadzenie redukcji modelu złożonego [1]. Wszystkie algorytmy wymagają znacznej mocy obliczeniowej komputerów [1].

2. Modele podsystemów bloku energetycznego

W artykule przedstawiono problem redukcji zlinearyzowanego modelu jednego z podsystemów kotła energetycznego BP-1150, jakim są rury ekranowe parownika [4, 5].

Stanowią one system o parametrach rozłożonych wzdłuż długości, opisany układem równań cząstkowych hiperbolicznych, z wyróżnionymi strefami przepływu jednofazowego (woda) oraz 2-fazowego (mieszanka parowo-wodna). Dla celów analizy oraz symulacji kotła w środowisku MATLAB/Simulink opracowano model rur ekranowych parownika o parametrach skupionych, stosując metodę elementów skończonych. Model matematyczny fragmentu rur ekranowych parownika w środowisku MATLAB/Simulink przedstawiono na rys. 1. Kompletny model rur ekranowych zawiera około 400 zmiennych stanu.



Rys. 1. Model fragmentu rur ekranowych parownika w środowisku MATLAB/Simulink

Fig. 1. The Model of a fragment of evaporator tubes in MATLAB/Simulink environment

3. Problemy redukcji liniowych modeli dynamicznych

Do pierwszych prac w dziedzinie redukcji liniowych układów dynamicznych należy zaliczyć fundamentalną pracę B. C. Moore'a [3], który wprowadził koncepcję zrównoważonej realizacji (ang. Balanced Realization) oraz redukcji poprzez wydzielenie części dominującej systemu (ang. Balanced Truncation). W 1984 roku K. Glover [2] wprowadził metodę optymalnej redukcji wg normy Hankela (ang. Optimal Hankel Norm). Metody te, pierwotnie opracowane dla liniowych układów asymptotycznie stabilnych, stały się podstawą do opracowania metod redukcji układów niestabilnych. Uogólnieniem metod BT są metody wykorzystujące wagowe funkcje częstotliwościowe (ang. Frequency Weighted - FW). Pierwszą tego typu metodę zaproponował D. Enns w 1984 r., jednakże przedstawiony algorytm nie gwarantował zachowania stabilności modelu zredukowanego w przypadku jednoczesnego zastosowania wejściowych i wyjściowych częstotliwościowych funkcji wagowych. Wada ta została usunięta w algorytmach zaproponowanych w pracach Lin i Chiu w 1992 r. oraz Wanga w 1999 r. [6].

Szeroko stosowane są także metody oparte na aproksymacji Kryłowa (ang. Krylov-based approximation methods), z których największe znaczenie osiągnęły dwie procedury: Lanczos oraz Arnoldi [1].

Zadanie redukcji modelu liniowego może być przedstawione następująco. Na podstawie stabilnego (lub niestabilnego) modelu rzędu n , przedstawionego w przestrzeni stanu (1), należy wyznaczyć model zredukowany rzędu r (2), gdzie $r < n$ taki, aby określona miara $\|y(t) - y_r(t)\|$ przyjmowała wartość minimalną.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_r(t) &= A_r x_r(t) + B_r u(t) \\ y_r(t) &= C_r x_r(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Model przedstawiony równaniami (1) można nazwać zrównoważonym, jeżeli gramiany sterowalności P i obserwowalności Q przyjmują postać diagonalną i są identyczne. Zrównoważenie układu wymaga wyznaczenia odpowiedniego przekształcenia nieosobliwego $x \rightarrow Tx$, spełniającego następujące równanie:

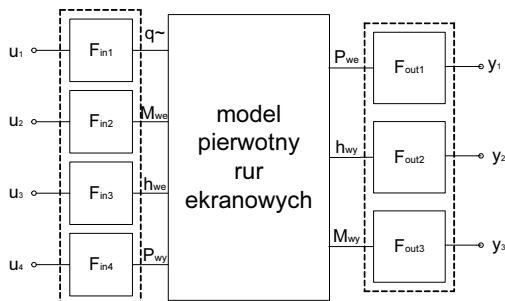
$$\bar{P} = \bar{Q} = TPT^T = (T^T)^{-1}QT^{-1} \quad (3)$$

W literaturze można znaleźć wiele algorytmów wyznaczania macierzy transformacji T [1]. Na podstawie uzyskanego modelu zrównoważonego wydziela się następnie część dominującą układu.

Metody redukcji oparte na algorytmach **BT** minimalizują maksymalny błąd aproksymacji charakterystyki częstotliwościowej w całej dziedzinie częstotliwości. W wielu praktycznych zastosowaniach istotny jest określony zakres częstotliwości, dla którego model zredukowany dobrze opisuje właściwości obiektu. Metoda **FW**, wprowadzając wagowe funkcje częstotliwościowe, umożliwia minimalizację błędów aproksymacji dla zadanego przedziału częstotliwości.

4. Metody doboru filtrów dla metody FW

Podczas redukcji modelu MIMO metodą FW zasadniczym zadaniem jest dobór filtrów wejściowych oraz wyjściowych (rys. 2). W pracy zastosowano dolnoprzepustowe filtry Butterwortha, dla których określono częstotliwość graniczną oraz rząd (wszystkie filtry posiadają jednakowe parametry). Jako miarę jakości aproksymacji modelu zastosowano średniokwadratowy błąd względny. Na rys. 3 przedstawiono zależność względnego błędu średniokwadratowego, wyznaczonego dla częstotliwości z przedziału 0..1 [rad/s], modelu rur ekranowych parownika kotła przepływowego BP-1150, w funkcji parametrów filtrów wagowych (n – rząd filtru, ω – częstotliwość graniczna filtru).

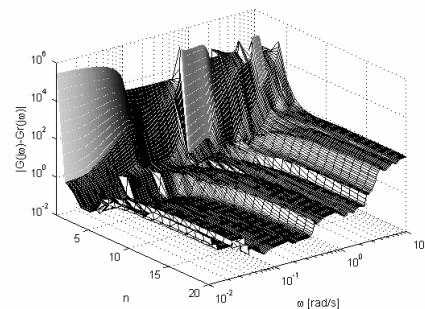


Rys. 2. Modyfikacja modelu pierwotnego poprzez wprowadzenie funkcji wagowych
Fig. 2. The modification of original model by inserting weight functions

Z przedstawionej zależności wynika występowanie wielu lokalnych minimów wartości normy błędu aproksymacji. Z tego względu, w celu wyznaczenia parametrów filtrów, konieczne jest

użycie metod optymalizacji globalnej. Uzyskanie dokładnego wyniku jest możliwe przy pomocy algorytmów hybrydowych, które łączą w sobie algorytmy przeszukiwania globalnego i lokalnego. Celem działania algorytmu przeszukiwania globalnego jest wyznaczenie rozwiązania przybliżonego, które będzie punktem startowym dla algorytmu przeszukiwania lokalnego. W tym celu wykorzystano połączenie algorytmów ewolucyjnych oraz metody simpleksu.

Zastosowanie przedstawionych w artykule metod redukcji liniowych modeli złożonych obiektów sterowania umożliwiło opracowanie uproszczonych modeli podsystemów kotła przepływowego BP-1150 [5] charakteryzujących się niskim rzędem i dużą dokładnością aproksymacji charakterystyk częstotliwościowych w zadanym przedziale częstotliwości.



Rys. 3. Wpływ parametrów filtrów wagowych na wartość błędu aproksymacji modelu zredukowanego
Fig. 3. The influence of weighted filters parameters on approximation error values of reduced model

5. Podsumowanie

W przypadku modeli obiektów złożonych, zawierających setki, tysiące lub więcej zmiennych stanu, zastosowanie metod znanych z teorii sterowania do analizy oraz projektowania układów sterowania jest utrudnione, lub nawet niemożliwe. Z tego powodu w wielu przypadkach jest niezbędne uzyskanie uproszczonego (zredukowanego) modelu obiektu sterowania, adekwatnego w określonym zakresie częstotliwości.

Metody redukcji modeli zlinearyzowanych wymagają rozbudowanych bibliotek numerycznych, jak również znacznego nakładu obliczeniowego. Do podstawowych bibliotek można zaliczyć m.in. SLICOT opracowany dla środowiska MATLAB.

Praca powstała przy współfinansowaniu Europejskiego Funduszu Społecznego Unii Europejskiej oraz budżetu państwa.

6. Literatura

- [1] Antoulas A.: Approximation of Large-Scale Dynamical Systems. SIAM, Philadelphia 2005.
- [2] Glover K.: All optimal Hankel-norm approximations of linear multivariable systems and their L_2 -error bounds, Int. J. Control vol. 39, no. 6, 1984.
- [3] Moore B.: Principal component analysis in linear systems: Controllability, observability and model reduction. IEEE Trans. Automat. Contr. vol. AC-26, no. 1, 1981.
- [4] Stanisławski W., Imajew D.: Hierarchical Approach to the Steam Boiler Modelling and Simulation., 12th European Simulation Multiconference.. Simulation-Past, Present and Future. Manchester, 1998.
- [5] Stanisławski W., Rydel M.: Modele hierarchiczne złożonych obiektów sterowania, XV Krajowa Konferencja Automatyki – KKA'2005 Warszawa, s. 149-154
- [6] Wang G., Sreeram V., Liu W. Q.: A New Frequency-Weighted Balanced Truncation Method and an Error Bound, IEEE Trans. Automat. Contr. vol. 44, no. 9, 1999.