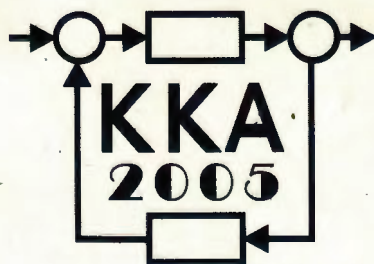


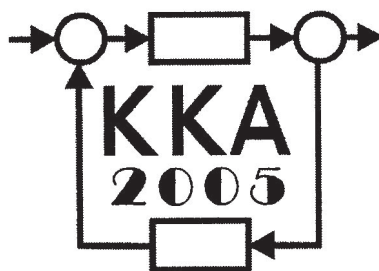
# **XV Krajowa Konferencja Automatyki**

## **Tom I**



**Redaktorzy:  
Zdzisław Bubnicki  
Roman Kulikowski  
Janusz Kacprzyk**

# XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom I



Redaktorzy:  
Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK

**ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

**WSPÓŁORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

## **WSPÓLORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **KOMITET PROGRAMOWY**

Przewodniczący  
Zastępca Przewodniczącego

Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI

## **CZŁONKOWIE**

Stanisław BAŃKA  
Mikołaj BUSŁOWICZ  
Ryszard GESSING  
Jakub GUTENBAUM  
Stanisław KACZANOWSKI  
Janusz KACPRZYK  
Józef KORBICZ  
Krzysztof KOZŁOWSKI  
Krzysztof KUŹMIŃSKI  
Krzysztof MALINOWSKI  
Antoni NIEDERLIŃSKI  
Tadeusz PUCHAŁKA  
Stanisław SKOCZOWSKI  
Jerzy ŚWIĄTEK  
Ryszard TADEUSIEWICZ  
Krzysztof TCHOŃ  
Jan WĘGLARZ

Michał BIAŁKO  
Władysław FINDEISEN  
Henryk GÓRECKI  
Jerzy JÓZEFczyk  
Tadeusz KACZOREK  
Jerzy KLAMKA  
Zbigniew KOWALSKI  
Juliusz L. KULIKOWSKI  
Kazimierz MALANOWSKI  
Wojciech MITKOWSKI  
Władysław PEŁCZEWSKI  
Leszek RUTKOWSKI  
Roman SŁOWIŃSKI  
Andrzej ŚWIERNIAK  
Piotr TATJIEWSKI  
Leszek TRYBUS  
Andrzej P. WIERZBICKI

## **KOMITET ORGANIZACYJNY**

Przewodniczący  
Zastępcy Przewodniczącego

Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK  
Stanisław KACZANOWSKI  
Tadeusz KACZOREK  
Krzysztof MALINOWSKI  
Roman OSTROWSKI  
Tadeusz PUCHAŁKA  
Dariusz WAGNER  
Jan STUDZIŃSKI  
Jan W. OWSIŃSKI

Członkowie

Sekretarze naukowci

**ISBN 83-89475-00-6**

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk  
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

TEORIA STEROWANIA  
– TEORIA SYSTEMÓW

# MODELE HIERARCHICZNE ZŁOŻONYCH OBIEKTÓW STEROWANIA

Włodzimierz STANISŁAWSKI\*, Marek RYDEL\*\*

\* Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
ul. K.Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, e-mail: stan@polo:po.opole.pl

\*\* Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
ul. K.Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, e-mail: m.rydel@weia:po.opole.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono zagadnienia związane z hierarchiczną budową modelu parownika kotła energetycznego oraz możliwości redukcji modeli jego podsystemów. Przedstawiono metody redukcji oraz ich wyniki na przykładzie podsystemów parownika kotła przepływowego BP-1150, wchodzącego w skład bloku energetycznego o mocy 360MW.

**Słowa kluczowe:** Agregacja, redukcja, abstrakcja, modele hierarchiczne

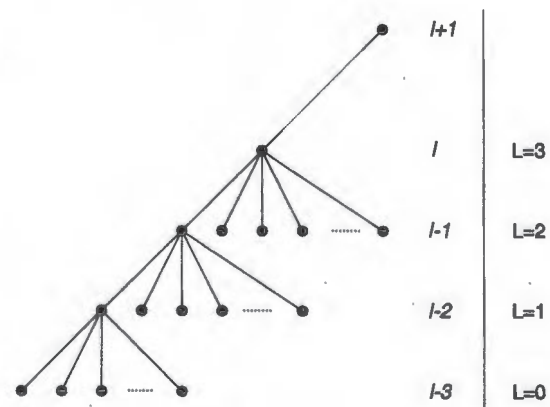
## 1. WSTĘP

Obiekty sterowania, takie jak bloki energetyczne, są systemami o wielkiej złożoności. Wielką złożoność modeli matematycznych i symulacyjnych takich systemów można zredukować poprzez narzucenie hierarchicznej struktury tych modeli, a także poprzez dekompozycję modeli na szereg prostszych podsystemów, na poszczególnych poziomach hierarchii. W takiej strukturze, systemy wyższej funkcjonalności, rezydujące na wyższych poziomach hierarchicznej struktury, nie są „powiadamiane” o niepotrzebnych szczegółach niższych poziomów.

Procedura dekompozycji wykonywana jest tak długo, aż będzie możliwe i celowe wyznaczenie modeli podsystemów najniższego (zerowego) poziomu. Na rys.1 wykreślono graf typu „drzewo”, ilustrujący schemat dekompozycji modelu złożonego obiektu sterowania (wielką literą  $L$  oznaczono bezwzględną numerację poziomów modelu, natomiast małą literą  $l$  – względną). Modele podsystemów zerowego poziomu opisywane są układami równań różniczkowych (różnicowych) i algebraicznych – w przypadku modelowania w sposób analityczny, lub modelami typu WE/WY – w przypadku identyfikacji.

Z reguły procedura dekompozycji nie jest zbyt złożona. Programy symulacyjne (np. MATLAB/Simulink, MATRIX<sub>X</sub>) udostępniają technologię budowy modeli hierarchicznych poprzez mechaniczne łączenie podsystemów o ukierunkowanym działaniu. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że hierarchiczna budowa tych modeli związana jest wyłącznie z funkcjonowaniem graficzne-

go redaktora modeli (zagnieżdżanie modeli podsystemów, maskowanie). Natomiast w rzeczywistości MATLAB/Simulink przechowuje model w postaci jednorodnej, jako układ równań różniczkowych zwyczajnych.



Rys. 1. Struktura zależności modeli podsystemów złożonego obiektu sterowania („drzewo” ilustruje hierarchiczną strukturę modelu).

Istotą modelu hierarchicznego jest fakt, że jedynie podsystemy zerowego poziomu opisywane są zestawem równań różniczkowych oraz algebraicznych. Na wszystkich wyższych poziomach, model zawiera podsystemy należące do poziomu niższego, z określoną strukturą powiązań między nimi. Na tej podstawie model na  $l$ -tym poziomie może być przedstawiony jako zbiór podsystemów poziomu  $l-1$  oraz zestawu połączeń między tymi podsystemami (nie mogą w tym opisie wystąpić podsystemy innych poziomów):

$$S_l = \langle S_{l-1}^i, P_l \rangle \text{ dla } i=1,2,\dots,n_l \quad (1)$$

gdzie:

$n_l$  - liczba podsystemów na  $l$ -tym poziomie hierarchii,  
 $P_l$  - zbiór powiązań między podsystemami na  $l$ -tym poziomie.

Poszczególne podsystemy na poziomie  $l-1$  -  $S_{l-1}^i$  - są układami o ukierunkowanym działaniu [11, 12], posiadającymi wektor wielkości wejściowych  $U_{l-1}^i = [u_{l-1}^{i,1}, u_{l-1}^{i,2}, \dots, u_{l-1}^{i,m}]$ , wektor wielkości wyjściowych  $Y_{l-1}^i = [y_{l-1}^{i,1}, y_{l-1}^{i,2}, \dots, y_{l-1}^{i,j}]$  oraz wektor stanu  $X_{l-1}^i = [x_{l-1}^{i,1}, x_{l-1}^{i,2}, \dots, x_{l-1}^{i,k}]$ . Każdy z agregatów - poza wektorami  $U_{l-1}^i, Y_{l-1}^i, X_{l-1}^i$  opisany jest operatorami przejść i wyjść  $H_{l-1}^i, G_{l-1}^i$ :

$$\begin{aligned} X_{l-1}^i &= H_{l-1}^i(U_{l-1}^i) \\ Y_{l-1}^i &= G_{l-1}^i(U_{l-1}^i, X_{l-1}^i) = G_{l-1}^i[U_{l-1}^i, H_{l-1}^i(U_{l-1}^i)] \\ &= F_{l-1}^i(U_{l-1}^i) \end{aligned} \quad (2)$$

Analiza właściwości dynamicznych obiektu sterowania na podstawie  $l$ -poziomego („płaskiego”) modelu o dużej złożoności jest praktycznie niemożliwa. Wyznaczenie stabilności, sterowalności, czy obserwowalności modelu przy pomocy klasycznych metod teorii sterowania (opracowanych dla układów jednopoziomowych) jest praktycznie niewykonalne ze względu na problemy natury obliczeniowej. Np. algorytm Kalmana wyznaczania sterowalności i obserwowalności zawodzi już dla modeli 10-tego rzędu. Natomiast hierarchiczna konstrukcja modelu, oraz dekompozycja modeli na poszczególnych poziomach hierarchicznej struktury daje możliwość analizy, z zastosowaniem procedury agregacji [8].

## 2. AGREGACJA JAKO METODA BADANIA WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH OBIEKTÓW ZŁOŻONYCH

Pod pojęciem agregacji rozumie się wnioskowanie o właściwościach modelu na danym poziomie hierarchii, na podstawie modeli podsystemów poziomu bezpośrednio niższego, oraz topologii połączeń tych podsystemów. Innymi słowy, aby uzyskać zagregowany model obiektu na wyższym poziomie hierarchii, niezbędna jest znajomość modeli poszczególnych podsystemów danego poziomu, oraz topologii połączeń między nimi (poszczególne podsystemy opisane są blokami o ukierunkowanym działaniu). Modele podsystemów wyższych poziomów hierarchii są modelami zagregowanymi, reprezentującymi właściwości modelu istotnymi dla danego poziomu. Właściwości te wynikają z właściwości modeli warstw niższych.

Agregację modelu można przeprowadzać na dwa sposoby, stosując redukcję lub abstrakcję modeli na poszczególnych poziomach hierarchii [8]. Tak przy zastosowaniu jednej, jak i drugiej procedury, na danym poziomie hierarchii uzyskuje się model o uproszczonej strukturze (niższego rzędu), w stosunku do modelu uzyskanego na podstawie połączenia modeli podsystemów niższego poziomu.

Podczas redukcji, model oryginalny uzyskany na podstawie połączenia podsystemów niższego poziomu, jest aproksymowany przez model niższego rzędu, zapewnia-

jący wymaganą dokładność aproksymacji. W modelu zredukowanym, zbiór zmiennych wejściowych pozostaje niezmienny w stosunku do modelu pierwotnego, natomiast zmianie ulegają zmienne stanu oraz zmienne wyjściowe. Uzyskany model zredukowany nie może być zbyt skomplikowany, aby jego zachowanie mogło być fizycznie zinterpretowane, oraz jednocześnie nie może być zbyt prosty (trywialny), aby na jego podstawie było możliwe projektowanie układów sterowania. Redukcja modelu nie jest operacją jednoznaczną i w zależności od przyjętego kryterium aproksymacji opracowano cały szereg technik pozwalających przeprowadzić redukcję modelu złożonego. Ta szeroka lista metod została opracowana ze względu na to, że każda z nich może dawać najlepsze rezultaty w pewnych konkretnych przypadkach [1, 2, 9, 14].

Ogólnie, zadanie redukcji modelu liniowego może być przedstawione następująco:

Dany jest stabilny, lub niestabilny model  $n$ -tego rzędu zapisany w przestrzeni stanu:

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (3)$$

$$Y = CX + DU$$

dla  $k$  wielkości wejściowych oraz  $m$  wielkości wyjściowych.

Wyznaczyć model zredukowany  $r$ -tego rzędu:

$$\frac{dX_r}{dt} = A_r X_r + B_r U \quad (4)$$

$$Y_r = C_r X_r + D_r U$$

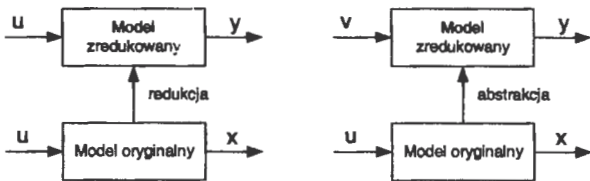
dla  $k$  wielkości wejściowych oraz  $m$  wyjściowych, gdzie  $r < n$ , aby określona miara  $\|Y - Y_r\|$  przyjmowała wartość minimalną. Redukcja modelu jest więc operacją aproksymacji modelu złożonego przy pomocy modelu zredukowanego.

Wektor stanu modelu zredukowanego  $X_r$ , związany jest z wektorem stanu modelu złożonego  $X$  następującą zależnością:  $X_r = C_r X$ , gdzie macierz  $C_r$  ma rozmiar  $r \times n$ .

Operacja abstrakcji natomiast jest związana z grupowaniem stanów systemu w ekwiwalentne klasy. W wyniku abstrakcji, konstruowany jest drugi model o niższym rzędzie, charakteryzujący się innymi wielkościami wejściowymi, wyjściowymi oraz współrzędnymi wektora stanu. Celem abstrakcji jest wyznaczenie takiego przekształcenia wektora stanu  $X$  w wektor  $X_r$ :  $X_r = C_r X$ , aby nowy model (nazywany abstrakcją) posiadał określone właściwości wtedy i tylko wtedy, gdy model pierwotny posiada określone właściwości. Określone jest to mianem propagacji danej właściwości od makro-modelu (abstrakcji) do mikro-modelu (modelu pierwotnego). Właściwościami, które są interesujące z punktu widzenia teorii sterowania dla każdego poziomu modelu hierarchicznego mogą być: optymalność, sterowalność, obserwowalność, stabilność itp.) [8]. Np. w przypadku badania właściwości sterowalności, należy wyznaczyć warunki przy których sterowalność modelu będącego

abstrakcją, implikuje sterowalność modelu pierwotnego. Po uzyskaniu takich warunków będzie możliwe określenie sterowalności modelu pierwotnego (złożonego) na podstawie badania sterowalności abstrakcji tego modelu, która ma mniejszą złożoność od modelu pierwotnego.

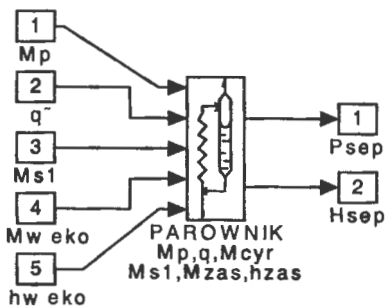
Dysponując takimi warunkami, w miejsce badania określonej właściwości modelu pierwotnego (złożonego), można tą właściwość zbadać na prostszej, jednak równoważnej abstrakcji modelu. Na rys. 2 przedstawiono podstawowe różnice między redukcją oraz abstrakcją modeli.



Rys. 2. Porównanie redukcji i abstrakcji modelu.

### 3. HIERARCHICZNY MODEL PAROWNIKA KOTŁA BP-1150

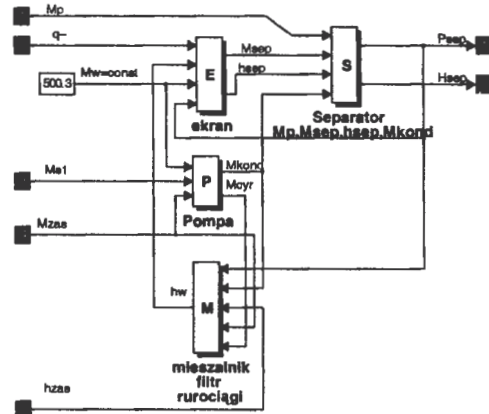
Z pewnym uproszczeniem [11, 12], parownik przepływowy kotła BP-1150 może być analizowany jako obiekt regulacji o dwóch wielkościach wyjściowych:  $P_{sep}$  (ciśnienie pary w separatorze),  $H_{sep}$  (wysokość słupa wody w separatorze), dwóch wielkościach sterujących:  $q^-$  (względna wielkość strumienia ciepłego dopływającego do rur ekranowych),  $M_{w_eko}$  (masowy przepływ wody zasilającej), oraz szeregu wielkości zakłócających:  $M_p$  (masowy przepływ pary opuszczającej separator),  $M_{s1}$  (masowy przepływ wody do schładzaczy pary),  $h_{w_eko}$  (entalpia wody zasilającej). Schemat modelu parownika opracowany dla środowiska MATLAB/Simulink przedstawiono na rys. 3.



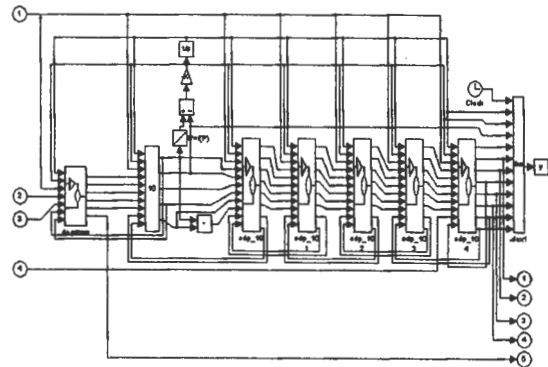
Rys. 3. Model parownika kotła BP-1150 na najwyższym poziomie hierarchii.

Na rys. 4 przedstawiono strukturę modelu parownika kotła BP-1150, obrazującą powiązania pomiędzy modelami poszczególnych podsystemów parownika (rury ekranowe, separator, pompa cyrkulacyjna oraz mieszalnik, filtr i rurociągi łączące). Każdy z podsystemów parownika stanowi system złożony z szeregiem wyróżnionych podsystemów. Dla przykładu model rur ekranowych zawiera: model strefy dogrzewu, model strefy odparowania z dużym obciążeniem cieplnym, fragment rur ekranowych przykryty przez przegrzewacz naścien-

ny, oraz górny odcinek rur ekranowych z małym obciążeniem cieplnym. Powiązania poszczególnych podsystemów wchodzących w skład rur ekranowych przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Struktura powiązań podsystemów modelu parownika.



Rys. 5. Struktura powiązań podsystemów modelu rur ekranowych

Tak skonstruowany model parownika kotła BP-1150 charakteryzuje się znaczną złożonością (ponad 400 zmiennych stanu).

### 4. PROBLEMY REDUKCJI MODELI

W opinii wielu autorów, w ostatnich dwudziestu latach dwa osiągnięcia istotnie przyczyniły się do rozwoju teorii redukcji liniowych modeli dynamicznych. Są to: zrównoważona realizacja systemów dynamicznych (ang. balanced realization) opracowana przez Moore'a [7], oraz optymalna aproksymacja normy Hankela (ang. Optimal Hankel-Norm approximation) liniowych systemów wielowymiarowych [5]. Na ich podstawie opracowane zostały metody redukcji wywodzące się z rozkładu SVD (ang. singular value decomposition), których zaletą jest możliwość oszacowania błędu aproksymacji. Szeroko stosowane są także metody oparte na aproksymacji Kryłowa (ang. Krylov-based approximation methods). Największe znaczenie osiągnęły dwie procedury: Lanczos oraz Arnoldi [1, 6]. Metody te mogą być

stosowane do redukcji modeli bardzo wysokiego rzędu, lecz wynik redukcji nie posiada zagwarantowanego maksymalnego poziomu błędu, oraz nie jest gwarantowane zachowanie stabilności modelu zredukowanego. Spośród wielu metod znanych z literatury, duże znaczenie osiągnęły metody bazujące na zrównoważeniu układu a następnie jego redukcji (ang. BT - Balanced Truncation Method). Pierwszy tego typu algorytm zaprezentował B. Moore w 1981 r. [7]. Metoda ta, pierwotnie opracowana dla układów liniowych asymptotycznie stabilnych, stała się podstawą do opracowania metod redukcji także układów niestabilnych [3]. Uogólnieniem metod BT są metody Frequency Weighted Method [4, 14, 15] (FW), wprowadzające podczas minimalizacji błędu aproksymacji w zadanym przedziale częstotliwości częstotliwościowe funkcje wagowe ( $W_i$  - wejściową funkcję wagową oraz  $W_o$  - wyjściową funkcję wagową):

$$\|W_o(G(j\omega) - G_r(j\omega))W_i\|_{\infty} \quad (5)$$

Algorytmy BT mają za zadanie zrównoważyć model, a następnie podzielić go na dwie części: dominującą i „słabą”. Jako układ zredukowany - aproksymujący właściwości układu oryginalnego - można przyjąć część dominującą, odrzucając część „słabą”. W wyniku zastosowania tej metody odrzucana jest część zmiennych stanu, przy zachowaniu niezmiennych wielkości wejściowych. Aby możliwe było wydzielenie części dominującej konieczne jest zrównoważenie układu, co można osiągnąć poprzez znalezienie takiego przekształcenia nieosobliwego  $x \rightarrow Tx$ , aby gramiany sterowalności  $P$  i obserwowalności  $Q$  przekształconego układu (zależności 6, 7) były sobie równe, a na ich diagonalu znajdowały się wartości szczególne Hankela (ang. Hankel singular values) [5]. Wartości te służą jako kryterium podziału systemu na część dominującą i „słabą”. W celu zrównoważenia systemu konieczne jest zatem wprowadzenie macierzy transformacji  $T$ , takiej aby dla układu przekształconego spełniona została równość (8):

$$P = \int e^{At} B B^T e^{A^T t} dt \quad (6)$$

$$Q = \int e^{A^T t} C^T C e^{At} dt \quad (7)$$

$$P = Q = \Sigma^2 = \text{diag}[\sigma_i] \quad (8)$$

gdzie:  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n > 0$ .

Układ zrównoważony otrzymuje się w wyniku przekształceń układu oryginalnego (9, 10, 11). Przekształcenie to jest bezstratne, a macierze układu zrównoważonego mają taki sam wymiar jak układu oryginalnego.

$$\bar{A} = T A T^{-1} \quad (9)$$

$$\bar{B} = T B \quad (10)$$

$$\bar{C} = C T^{-1} \quad (11)$$

Redukcja modelu polega na wydzieleniu części dominującej poprzez odrzucenie pozostałych zmiennych stanu (12, 13, 14).

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \Rightarrow A_r = A_{11} \quad (12)$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \Rightarrow B_r = B_1 \quad (13)$$

$$\bar{C} = [C_1 \quad C_2] \Rightarrow C_r = C_1 \quad (14)$$

Metody oparte na BT mają za zadanie minimalizacją błędu charakterystyki częstotliwościowej  $\|G(j\omega) - G_r(j\omega)\|$  w całej dziedzinie częstotliwości. W wielu przypadkach istotnym jest pewien zakres częstotliwości, dla którego model zredukowany powinien być adekwatny. Metoda Frequency Weighted, wprowadzając wagi częstotliwościowe ( $W_i$  dla wejść, oraz  $W_o$  dla wyjść), zmniejsza błędy aproksymacji dla zadanego przedziału częstotliwości. Wagi określa się na podstawie znajomości charakterystyki częstotliwościowej modelu oraz zakresu częstotliwości, dla którego model ma być adekwatny.

#### 4.1. Redukcja zlinearyzowanych modeli podsystemów parownika kotła bp-1150

Badaniom poddano zlinearyzowane modele rur ekranowych parownika (397 zmiennych stanu) oraz parownik kotła BP-1150 (421 zmiennych stanu). W pracy [13] przedstawione zostały wyniki redukcji fragmentu strefy dogrzewu rur ekranowych parownika 40-tego rzędu metodami BT, LFAB [10] (ang. low-frequency approximation balancing) oraz FW dla różnych parametrów filtrów wagowych.

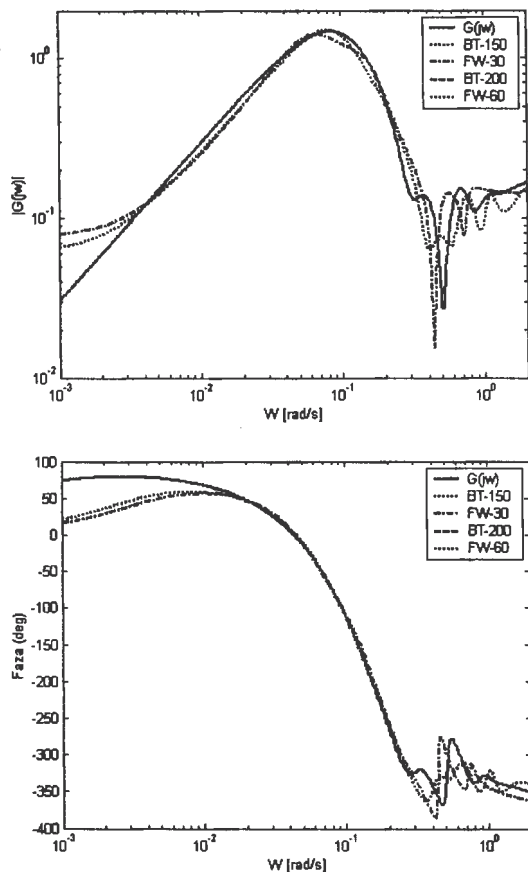
Na rys. 6 porównano charakterystyki amplitudowe oraz fazowe zlinearyzowanego modelu rur ekranowych. Przedstawione zostały charakterystyki dla wielkości wejściowej  $\Delta h_w$  (względne zmiany entalpii wlotowej czynnika roboczego do rur ekranowych parownika), oraz wielkości wyjściowej  $\Delta M_{sep}$  (względne zmiany przepływu masowego czynnika roboczego na wylocie rur ekranowych) układu oryginalnego (rząd 397) oraz modeli zredukowanych z zastosowaniem metod: BT (rząd modelu 150 oraz 200) oraz FW (rząd modelu 30 oraz 60). Filtry dla metody FW dobrane zostały eksperymentalnie tak, aby zminimalizować wpływ charakterystyki z zakresu, dla którego modele rur ekranowych oraz całego parownika są już nieadekwatne na wynik redukcji. Dla obu modeli jest to filtr dolnoprzepustowy posiadający następujące parametry: częstotliwość graniczna filtru  $\omega_i=1$  [rad/s], rząd filtru dla wejść  $W_i$ :  $k=6$  oraz dla wyjść  $W_o$ :  $k=2$ .

W celu lepszego zobrazowania różnic pomiędzy wynikami redukcji, na rys. 7 wykreślono rozkład błędu aproksymacji  $\|G(j\omega) - G_r(j\omega)\|$  w funkcji częstotliwości dla badanego wyjścia.

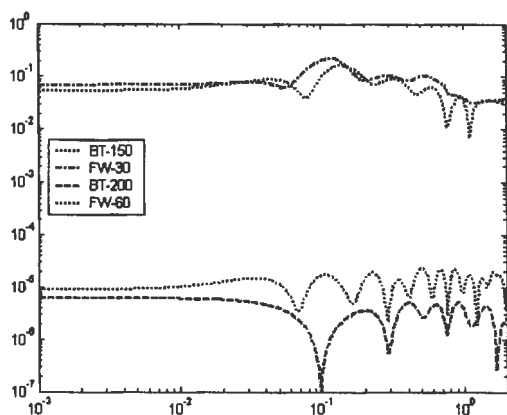
Na rys. 8 porównano charakterystyki amplitudowe oraz fazowe zlinearyzowanego modelu parownika kotła BP-1150. Przedstawiono charakterystykę toru



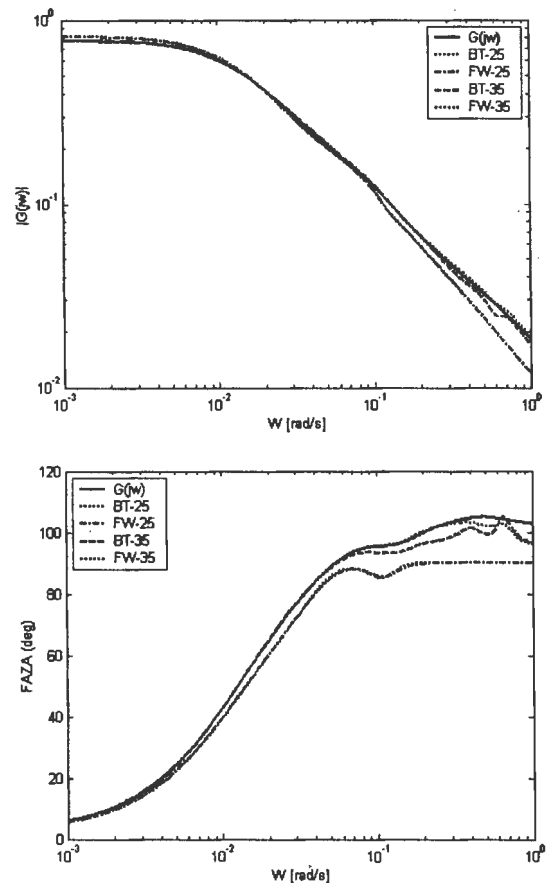
$\Delta M_p^- \rightarrow \Delta P_{sep}^-$ , gdzie:  $\Delta M_p^-$  (względne zmiany przepływu pary na wylocie z separatora),  $\Delta P_{sep}^-$  (względne zmiany ciśnienia w separatorze). Rys. 9 przedstawia rozkład błęd aproksymacji w funkcji częstotliwości dla badanego wyjścia.



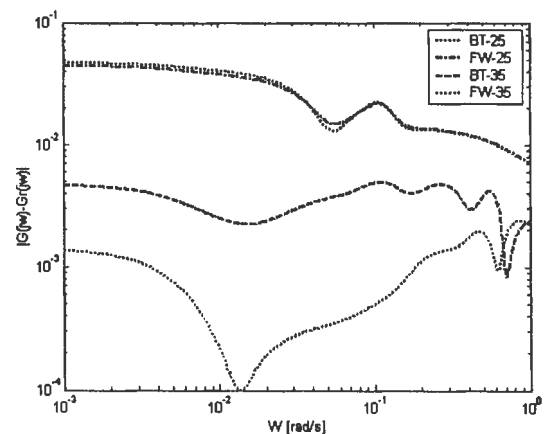
Rys. 6. Charakterystyka częstotliwościowa modułu oraz fazy modelu rur ekranowych parownika dla toru  $\Delta h_w^- \rightarrow \Delta M_{sep}^-$ .



Rys. 7. Błąd aproksymacji charakterystyki amplitudo-fazowej modelu rur ekranowych parownika dla toru  $\Delta h_w^- \rightarrow \Delta M_{sep}^-$ .



Rys. 8. Charakterystyka częstotliwościowa modułu oraz fazy modelu parownika kotła BP-1150 dla toru  $\Delta M_p^- \rightarrow \Delta P_{sep}^-$ .



Rys. 9. Błąd aproksymacji charakterystyki amplitudo-fazowej modelu parownika kotła BP-1150 dla toru  $\Delta M_p^- \rightarrow \Delta P_{sep}^-$ .

## 5. WNIOSKI

Modele matematyczne bloku energetycznego, a w szczególności kotła, charakteryzują się dużą złożonością. Wynika ona ze skomplikowanej konstrukcji kotła (zawierającego znaczną liczbę urządzeń), znacznej komplikacji procesów fizycznych oraz chemicznych

zachodzących w kotle, a także z czasoprzestrzennej dynamiki (układy o parametrach rozłożonych w przestrzeni). Modele matematyczne i symulacyjne takich urządzeń konstruowane są w oparciu o metodę elementów skończonych. Dzięki temu układ o parametrach rozłożonych jest opisany zestawem równań różniczkowych zwyczajnych. W celu zapewnienia adekwatności modelu w szerokim zakresie częstotliwości liczba elementów skończonych zastosowanych w modelu musi być znaczna, co skutkuje wysokim rzędem modelu. Opracowany model opisuje zarówno bardzo szybkie procesy (rozprzestrzenianie się zmian ciśnienia wzdłuż rur ekranowych – zjawiska dźwiękowe), jak również procesy wolnozmiennne (procesy przenoszenia masy oraz ciepła). Z punktu widzenia właściwości dynamicznych parownika jako obiektu sterowania, istotne znaczenie posiadają procesy wolnozmiennne, podczas gdy procesy rozprzestrzeniania się zmian ciśnienia (o częstotliwościach przekraczających 1 Hz) mogą być w takim modelu pominięte.

W takim przypadku zastosowanie redukcji modeli wydaje się jak najbardziej celowe. Ponadto redukcja modeli pozwala na uzyskanie modelu uproszczonego, niezbędnego w procesie projektowania układów sterowania.

Zredukowane modele rur ekranowych zawierają nadal znaczną liczbę zmiennych stanu (rzęd kilkadziesiąt). Jest to spowodowane czasoprzestrzenną dynamiką i transportem masy wzdłuż rur ekranowych (opóźnienia transportowe).

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że lepsze wyniki redukcji modeli podsystemów parownika kotła BP-1150 uzyskuje się przy pomocy metod wprowadzających wagi częstotliwościowe. W przypadku modelu rur ekranowych dla porównywalnego poziomu błędów aproksymacji metoda FW umożliwiła otrzymanie modelu zredukowanego o kilkukrotnie mniejszej ilości zmiennych stanu w porównaniu z metodą BT.

#### HIERARCHICAL MODELS OF COMPLEX CONTROL SYSTEMS

**Abstract:** A hierarchical model of power plant evaporator and reduction subsystems models possibilities are presented in this paper. The linearized models reduction results are presented using gramian methods.

#### Literatura

- [1] Antoulas A., Sorensen D. (2001) Approximation of large-scale dynamical system: An overview. *Int. J. Appl. Comput. Sci.*, **11**, 5, 1093-1121.
- [2] Benner P. (2004) Solving Large-Scale Control Problems. *IEEE Control Systems Magazine*, **24**, 1.

- [3] Chiu T.Y. (1996) Model Reduction by the Low-Frequency Approximation Balancing Method for Unstable Systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **47**, 7, 995-997.
- [4] Enns D. (1984) *Model reduction with balanced realizations: An error bound and frequency weighted generalization.*, Proc 23<sup>rd</sup> IEEE Conf. Decision and Control, Las Vegas, NV, 127-132.
- [5] Glover K. (1984) All optimal Hankel-norm approximations of linear multivariable systems and their  $L^\infty$ -error bounds. *Int. J. Control*, **39**, 6, 1115-1193.
- [6] Gugercin S., Antoulas A. (2004) A Survey of Model Reduction by Balanced Truncation and Some New Results. *Int. J. Control*, **77**, 748-766.
- [7] Moore B. (1981) Principal component analysis in linear systems: Controllability, observability and model reduction. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **AC-26**, 1, 17-31.
- [8] Pappas J., Lafferriere G., Shankar S. (2000) Hierarchically Consistent Control Systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **45**, 6, 1144-1460.
- [9] Penzl T. (1999) *Algorithms for Model Reduction of Large Dynamical Systems*, Numerische Simulation auf massiv parallelen Rechnern, Technische Universität Chemnitz.
- [10] Prakash R. (1994) Properties of a Low-Frequency Approximation Balancing Method of Model Reduction. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **39**, 5, 1135-1141.
- [11] Stanisławski W. (2001) Modelowanie i symulacja komputerowa parowników przepływowych kotłów energetycznych. *Studia i monografie*, 124. Opole.
- [12] Stanisławski W., Imajew D. (1998) Hierarchical Approach to the Steam Boiler Modelling and Simulation., *12<sup>th</sup> European Simulation Multi-conference. Simulation-Past, Present and Future*. Manchester.
- [13] Stanisławski W., Rydel M., Zygarlicki J. (2004) Problemy redukcji modeli parownika kotła BP-1150. *Systems*, **9**, Special Issue 2/2.
- [14] Varga A., Anderson B. (2003) Accuracy-enhancing methods for balancing-related frequency-weighted model and controller reduction. *Automatica*, **39**, 919-927.
- [15] Wang G., Sreeram V., Liu W.Q. (1999) A New Frequency-Weighted Balanced Truncation Method and an Error Bound. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, **44**, 9, 1734-1737.



**Instytut Badań Systemowych  
Polskiej Akademii Nauk**

**ISBN 83-89475-02-2**