

Włodzimierz STANISŁAWSKI, Marek RYDEL

POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI

Problemy konstruowania modeli hierarchicznych złożonych obiektów sterowania (cz. II)

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 2008 pełni funkcję prodziekana Wydziału ds. naukowych.



e-mail: w.stanislawski@po.opole.pl

Streszczenie

W części drugiej artykułu przedstawiono zagadnienia związane z budową zagregowanych hierarchicznych modeli dynamicznych obiektów sterowania o wielkiej złożoności, na przykładzie modelu parownika kotła energetycznego. W szczególności przedstawiono problemy konstrukcji modelu oraz redukcji zlinearyzowanego modelu parownika kotła energetycznego BP-1150. Zdefiniowano strukturę hierarchicznego modelu parownika oraz przedstawiono modele matematyczne poszczególnych podsystemów parownika. Szczególną uwagę zwrócono na redukcję modeli na poszczególnych poziomach hierarchii z zastosowaniem metody częstotliwościowych funkcji wagowych (ang. *Frequency Weighted*) z uwzględnieniem określonych zakresów adekwatności modeli. Redukcje modeli przeprowadzono na trzech poziomach: poziom pierwszy – strefa dogrzewu i trzy części strefy odparowania, poziom drugi – rury ekranowe, separator oraz układ cyrkulacji w parowniku, poziom trzeci – parownik

Słowa kluczowe: redukcja, modele hierarchiczne.

Hierarchical model construction problems of complex plants (Part II)

Abstract

Problems connected with building of aggregated hierarchical models of complex plants, are presented in the paper. The paper describes problems of linear model building and reduction of a steam boiler BP-1150. The hierarchical structure of a once-through steam boiler was defined, as well as mathematical models of particular parts of the boiler were presented in the paper. Especially, reduction of the models on particular hierarchy levels, using Frequency Weighted method and taking into account adequate ranges of models, were presented in the paper. Models on three levels were reduced: first level – one-phase flow zone and three parts of two-phase flow zone, second level – tubes of evaporator, separator and circulation system in evaporator, third level – evaporator.

Keywords: reduction, hierarchical model.

1. Wstęp

Zasady tworzenia hierarchicznych modeli złożonych obiektów sterowania przedstawiono w pierwszej części artykułu. Podstawowa idea polega na zastąpieniu jednego modelu o bardzo wysokiej złożoności – zbiorem modeli na każdym z poziomów hierarchii. Poszczególne modele charakteryzują się zakresem zastosowań oraz ściśle określonym zakresem adekwatności, który dla modeli zlinearyzowanych zdefiniowany jest przez częstotliwość maksymalną. Tak uzyskane modele opisują właściwości obiektu sterowania istotne na danym poziomie hierarchii, a pomijają szybkie procesy dynamiczne istotne na niższych poziomach.

Podstawowym narzędziem do tworzenia modeli hierarchicznych jest redukcja modeli na poszczególnych poziomach hierarchii. Dla modeli podsystemów parownika najkorzystniejsza okazała się metoda częstotliwościowych funkcji wagowych (ang. *FW – Frequency Weighted*) [3, 5, 7, 9], gdyż pozwala na wyznaczenie

Dr inż. Marek RYDEL

Jest pracownikiem Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. W 2002 uzyskał stopień mgra inż. na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, a w roku 2009 stopień doktora w dyscyplinie Automatyka i Robotyka na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z tworzeniem, redukcją oraz badaniami hierarchicznych modeli złożonych obiektów sterowania.

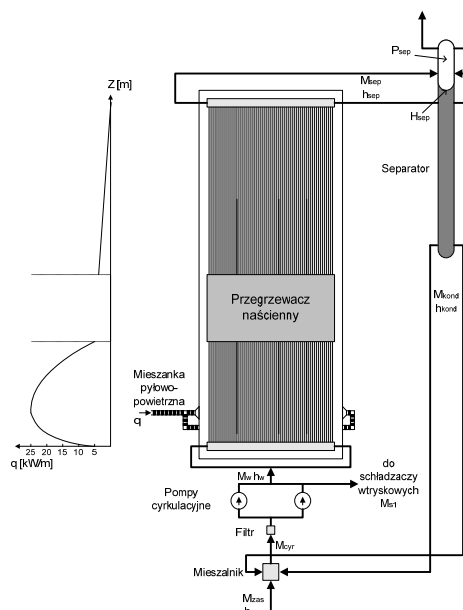


e-mail: m.rydel@po.opole.pl

modelu zredukowanego właściwie aproksymującego charakterystyki częstotliwościowe w określonym przedziale częstotliwości.

2. Model hierarchiczny parownika kotła

Kotły BB-1150 oraz BP-1150 wchodzące w skład bloków energetycznych o mocy 360 MW są kotłami przepływowymi opartymi na konstrukcji firmy *SULZER*, ze stałym punktem końcowym strefy odparowania. Separacja wody od pary na wylocie z parownika odbywa się w pionowym wodooddzielaczu. Kotły są przystosowane do pracy w układzie blokowym z turbiną parową o mocy znamionowej 360 MW. W skład parownika kotła BP-1150 wchodzi: pionowe rury ekranowe parownika stanowiące ekran komory paleniskowej, separator, mieszalnik, filtr, pompa cyrkulacyjna oraz rurociągi łączące (rys. 1).



Rys. 1. Uproszczony schemat parownika kotła BP-1150
Fig. 1. Steam generator simplified scheme of the BP-1150 boiler

Model parownika kotła BP-1150 zawiera dwie wielkości wyjściowe: ciśnienie w separatorze P_{sep} i poziom wody w separatorze H_{sep} oraz pięć wielkości wejściowych: przepływ pary na wylocie z separatora M_p , względną wartość strumienia cieplnego \tilde{q} , przepływ wody do schładzaczy pary M_{s1} , przepływ wody zasilającej M_{zas} oraz entalpia wody zasilającej h_{zas} .

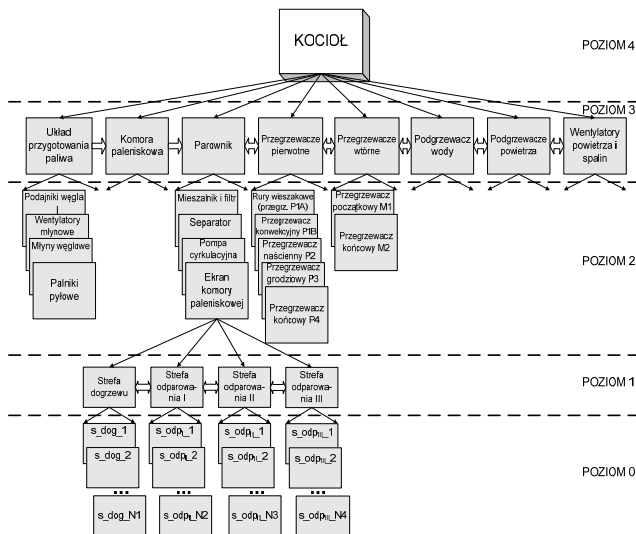
$$[P_{sep} H_{sep}]^T = \text{parownik} ([M_p \tilde{q} M_{s1} M_{zas} h_{zas}]^T) \quad (1)$$

Model parownika zawiera modele następujących podsystemów: mieszalnik, filtr, ekran komory paleniskowej, separator, pompa cyrkulacyjna, węzeł zasilania schładzaczy pary, rurociągi łączące. Podsystemy modelu parownika mogą być opisane przez podanie wektorów wejściowych U^i_2 , wyjściowych Y^i_2 oraz określenie operatorów opisujących poszczególne podsystemy F^i_2 :

Ekran komory paleniskowej
 $[h_{sep} M_{sep} P_w]^T = \text{parownik.ekran} ([M_w, q, h_w, P_{sep}]^T)$
 Separator
 $[P_{sep} H_{sep}]^T = \text{parownik.separator} ([M_{kond} M_{sep} h_{sep} M_p]^T)$
 Mieszalnik
 $[M_{kond} h_m]^T = \text{parownik.mieszalnik} ([M_{pom} M_{zas} h_{zas} h_{kond}]^T)$
 Filtr
 $h_{fj} = \text{parownik.filtr} ([M_{pom} h_{we_f}]^T)$ (2)
 Pompa cyrkulacyjna
 $M_{pom} = \text{parownik.pompa} ([P_{sep} P_w H_{sep} M_{kond}]^T)$
 Węzeł zasilania schładzaczy pary
 $M_{pom} = \text{parownik.węzeł_zasilania_schładzaczy} ([M_{pom} M_{s1}]^T)$
 Rurociągi łączące
 $h_{we_f} = \text{parownik.rurociąg1} (h_m)$
 $h_w = \text{parownik.rurociąg2} (h_f)$

Rury ekranowe oraz separator, ze względu na znaczne rozmiary oraz złożoność procesów w nich zachodzących, należy analizować jako układy o czasoprzestrzennej dynamice. W celu uzyskania modeli o parametrach skupionych, zastosowano metodę elementów skończonych, uwzględniając rozłożenie parametrów wzdłuż długości, a także wzdłuż promienia oraz obwodu ścianek rur i pletw łączących.

Ogólną strukturę modelu hierarchicznego kotła energetycznego BP-1150 przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Struktura modelu hierarchicznego kotła BP-1150
 Fig. 2. Hierarchical model structure of the BP-1150 boiler

3. Modele podsystemów bloku energetycznego

Rury ekranowe

Poszczególne elementy skończone rur ekranowych posiadają wymiary na tyle małe, aby można było założyć, że stanowią układy dynamiczne o parametrach skupionych (opisane układem równań różniczkowych zwyczajnych). Równania bilansowe opisujące przepływ wody w k -tej sekcji wchodzącej w skład strefy dogrzewu przyjmują następującą postać:

$$\Delta Z_k \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_k \frac{dP_k}{dt} + \Delta Z_k \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_k \frac{dh_k}{dt} = M_{k-1} - M_k$$

$$\Delta Z_k \rho_k \frac{dh_k}{dt} - \Delta Z_k \frac{dP_k}{dt} = M_{k-1} (h_{k-1} - h_k) - \frac{M_{k-1} (P_{k-1} - P_k)}{\rho_{k-1}} + \frac{q_{dk}}{A} \Delta Z_k$$
 (3)
$$\Delta Z_k \rho_k \frac{dM_k}{dt} = \frac{M_{k-1}^2}{\rho_{k-1}} - \frac{M_k^2}{\rho_k} - \Delta Z_k \rho_k g \cos \beta - (P_{k+1} - P_k) 10^3 - \Delta Z_k f_k \frac{M_k^2}{\rho_k}$$

gdzie: $q_{dk} = \pi d \alpha_k (\Theta_{wk} - \vartheta_k)$

natomiast dla k -tej sekcji strefy odparowania:

$$\Delta Z_k \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_k \frac{dP_k}{dt} + \Delta Z_k \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_k \frac{dh_k}{dt} = M_{k-1} - M_k$$

$$\Delta Z_k \rho_k \frac{dh_k}{dt} - \Delta Z_k \frac{dP_k}{dt} = M_{k-1} (h_{k-1} - h_k) - \frac{M_{k-1} (P_{k-1} - P_k)}{\rho_{k-1}} + \frac{q_{dk}}{A} \Delta Z_k +$$
 (4)
$$+ M_{k-1} \left[\left(\frac{w_2}{w} \right)_{k-1} - 1 \right] (h_{k-1} - h') - M_k \left[\left(\frac{w_2}{w} \right)_k - 1 \right] (h_k - h')$$

$$\Delta Z_k \rho_k \frac{dM_k}{dt} = \frac{M_{k-1}^2}{\rho_{k-1}} - \frac{M_k^2}{\rho_k} - \Delta Z_k \rho_k g \cos \beta - (P_{k+1} - P_k) 10^3 - \Delta Z_k f_k \frac{M_k^2}{\rho_k}$$

gdzie: $q_{dk} = \pi d \alpha_k (\Theta_{wk} - \vartheta_k)$, $\frac{w_2}{w} = \frac{1}{1-c} \frac{S}{S+c}$, $S = f(P, h, M)$.

Parametry czynnika roboczego w strefie dogrzewu jak również odparowania są funkcjami ciśnienia P oraz entalpii h :

$$\rho = f(P, h) = \frac{1}{(1-c)v' + cv''} = \frac{h_{21}}{v_{21}} \frac{1}{h - \frac{h'v'' - h''v'}{v_{21}}}$$
 (5)
$$h_{21} = h'' - h', v_{21} = v'' - v', c = \frac{h - h'}{h_{21}}, h' = h'(P), h'' = h''(P)$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_k = \frac{\rho_k v_{21}}{h_{21}} \frac{d}{dP} \left(\frac{h_{21}}{v_{21}} \right) + \frac{\rho_k^2 v_{21}}{h_{21}} \frac{d}{dP} \left(\frac{h'v'' - h''v'}{v_{21}} \right)$$
 (6)
$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \right)_k = - \frac{\rho_k^2 v_{21}}{h_{21}}, w_2 = \frac{S_k}{1 + c_k (S_k - 1)} w, S_k = \frac{w_{2k}}{w_{1k}} = f(P_k, c_k, w_k)$$

Równania (3) i (4) należy jeszcze uzupełnić zależnościami transportu ciepła, dopływającego z komory paleniskowej, wzdłuż promienia i obwodu ścianki rury oraz wzdłuż pletwy łączącej.

Oznaczenia ważniejszych wielkości: P – ciśnienie, M – przepływ masyowy czynnika roboczego odniesiony do jednostki powierzchni przekroju, ρ – gęstość, ΔZ – długość elementarnej sekcji, β – kąt nachylenia rur ekranowych, α – współczynnik przejmowania ciepła, θ – temperatura ścianki rury, w – prędkość przepływu czynnika roboczego, w_2 – prędkość przepływu pary, h' h'' – entalpia wrzącej wody i pary nasyconej suchej, c – stopień suchości mieszaniny parowo-wodnej, v' v'' – objętość właściwa wrzącej wody i pary nasyconej suchej.

Separator

Rola separatora w kotłach przepływowych firmy SULZER polega na oddzielaniu wody z mieszaniny parowo-wodnej opuszczającej rury ekranowe parownika. Separator stanowi pionowy zbiornik cylindryczny o długości $L_{sep} \approx 34$ m i średnicy wewnętrznej $d=0,8$ m oraz średnicy zewnętrznej $D=0,94$ m. Do górnej części separatora doprowadzana jest mieszanina parowo-wodna z prędkością około 16 m/s, stycznie usytuowanymi króćcami. Dolnymi króćcami, również usytuowanymi stycznie, jest odprowadzana

woda do mieszalnika z prędkością około 2,5 m/s. Mechanizm rozdziału faz w polu sił odśrodkowych występujących w separatorze jest bardzo złożonym procesem, zależnym od szeregu wielkości fizycznych oraz parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych.

Separator jako obiekt sterowania jest układem o czterech wielkościach wejściowych: M_p , M_{sep} , h_{sep} , M_{kond} i dwóch wielkościach wyjściowych: P_{sep} , H_{sep} . W pracy zastosowano model separatora o parametrach skupionych, wyznaczony na podstawie równań bilansu masy oraz energii wewnętrznej czynnika roboczego, a także bilansu energii cieplnej w grubościennym płaszczu zewnętrznym [8].

Na podstawie powyższych równań bilansowych uzyskuje się następujące równania stanu opisujące bilans masy oraz energii cieplnej czynnika roboczego w separatorze:

$$\begin{bmatrix} ab \\ cd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dP_{sep}}{dt} \\ \frac{dH_{sep}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{sep}^* - M_p^* - M_{kond}^* \\ M_{sep}^* h_{sep}^* - M_p^* h'' - M_{kond}^* h' - \pi d \alpha L_{sep} (\vartheta - \Theta_1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

gdzie: $a = A_z H_{sep} \frac{d\rho'}{dP} + (V - A_z H_{sep}) \frac{d\rho''}{dP}$, $b = A_z (\rho' - \rho'')$,
 $c = A_z H_{sep} \frac{d(\rho' h')}{dP} + (V - A_z H_{sep}) \frac{d(\rho'' h'')}{dP}$, $d = A_z (\rho' h' - \rho'' h'')$

Natomiast płaszcz separatora opisany jest następującym wektorem stanu:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \dots \\ \Theta_k \\ \dots \\ \Theta_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4 d \alpha \Delta (\vartheta - \Theta_1) - (d+2\Delta) \lambda (\Theta_1 - \Theta_2)}{[(d+2\Delta)^2 - d^2] \rho_{st} c_{st} \Delta} \\ \dots \\ \frac{4 [d+2(k-1)\Delta] \lambda (\Theta_{k-1} - \Theta_k) - (d+2k\Delta) \lambda (\Theta_k - \Theta_{k+1})}{[(d+2k\Delta)^2 - [d+2(k-1)\Delta]^2] \rho_{st} c_{st} \Delta} \\ \dots \\ \frac{4 [d+2(N-1)\Delta] \lambda (\Theta_{N-1} - \Theta_N)}{[D^2 - (D-2\Delta)^2] \rho_{st} c_{st} \Delta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że separator jest podsystemem niestabilnym. Niestabilność ta związana jest z zależnością parametrów pary nasyconej suchej oraz wrzącej wody od ciśnienia. Wartość bieguna dodatniego, decydującego o niestabilności separatora jako obiektu sterowania, silnie zależy od obciążenia kotła i jest największa dla obciążenia 100% [6]. Niestabilność separatora rzutuje na niestabilność całego parownika jako obiektu sterowania.

4. Redukcja modelu parownika

Zakresy adekwatności modeli parownika

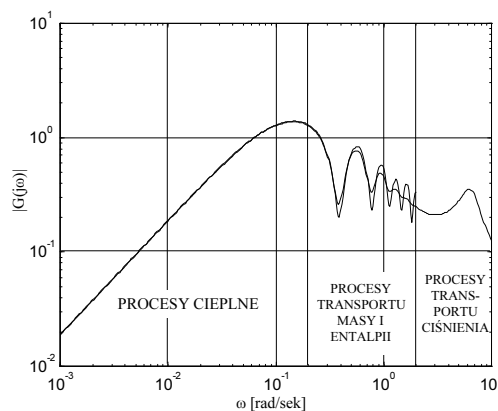
Opracowane modele parownika badano w szerokim zakresie częstotliwości (do 1000 rad/s), jednak zakres adekwatności modelu pierwotnego jest ograniczony ze względu na przyjęte następujące założenia upraszczające:

- mieszanina parowo-wodna znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej (założenie to jest słuszne dla $\omega < 100$ rad/s),
- uproszczenie modelu transportu energii cieplnej wzdłuż promienia ścianki rury (zastosowany model przestaje być adekwatny dla częstotliwości $\omega > 20$ rad/s),
- redukcja klasy modelu poprzez dyskretyzację zmiennej przestrzennej zapewnia adekwatność do około 20 rad/s.

Poszczególne procesy dynamiczne zachodzące w parowniku przepływowym odbywają się z różnymi szybkościami i można je umiejscowić w różnych zakresach częstotliwości. Granice między tymi zakresami można określić następująco:

- $\omega < 0,2$ rad/s
Wartość częstotliwości granicznej dla tego przedziału wynika z czasu przelotu cząstki czynnika roboczego przez rury ekranowe parownika ($\tau_p \approx 30$ s) $\omega = 2\pi/30 \approx 0,2$ rad/s. Oznacza to, że w tym przedziale częstotliwości mają miejsce procesy dynamiczne trwające dłużej od czasu przebywania cząstki czynnika roboczego w rurach ekranowych i nie są zauważalne procesy transportu masy, a jedynie procesy akumulacji energii cieplnej.
- $2 > \omega > 0,2$ rad/s
W tym przedziale częstotliwości obserwowane są zjawiska dynamiczne związane z transportem czynnika roboczego wzdłuż rur ekranowych, a wraz z nim zmian gęstości oraz entalpii czynnika roboczego. Maksymalna częstotliwość dla tego przedziału częstotliwości wynika z czasu przebywania cząstki czynnika roboczego w pierwszej części strefy odparowania ($\tau_p \approx 3$ s) $\omega = 2\pi/3 \approx 2$ rad/s.
- $\omega > 2$ rad/s
W tym przedziale częstotliwości obserwowane są zjawiska związane z przemieszczaniem się zmian przepływu i ciśnienia wzdłuż rur ekranowych parownika. Czas przemieszczenia się zmian ciśnienia przez rury ekranowe parownika wynosi $\tau_{dzw} \approx 0,5$ s. Zmiany ciśnienia po odbiciu się od drugiego brzożu rur ekranowych powracają po czasie około 1 s co powoduje, że pierwsze ekstremum w charakterystykach częstotliwościowych, spowodowane przemieszczaniem się zmian ciśnienia, występuje dla częstotliwości $\omega = 2\pi/2\tau_{dzw} \approx 6$ rad/s.

Na rys. 3 przedstawiono wybraną charakterystykę częstotliwościową modułu dla rur ekranowych parownika kotła BP-1150 w celu zobrazowania zdefiniowanych powyżej przedziałów częstotliwości.



Rys. 3. Charakterystyka częstotliwościowa modułu przepływu masowego na wylocie rur ekranowych dla wymuszenia strumieniem cieplnym
 Fig. 3. Magnitude response of mass flow at the outlet of steam generator tubes for changes of heat rate

Redukcja modeli pierwszego poziomu hierarchii

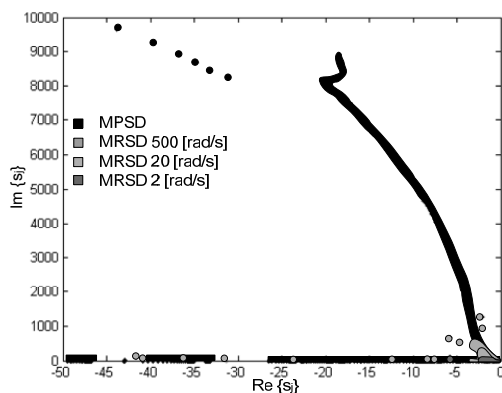
Na pierwszym poziomie modelu parownika znajdują się modele strefy dogrzewu i odparowania, wchodzące w skład modelu rur ekranowych. Zawierają one szereg połączonych ze sobą elementów skończonych, z których każdy jest układem 55-tego rzędu:

- strefa dogrzewu – 150 elementów skończonych,
- strefa odparowania I – 50 elementów skończonych,
- strefa odparowania II – 75 elementów skończonych,
- strefa odparowania III – 200 elementów skończonych.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki redukcji poszczególnych odcinków rur ekranowych, a na rys. 4 wartości własne modeli zredukowanych strefy dogrzewu.

Tab. 1. Wyniki redukcji modeli podsystemów poziomu pierwszego
Tab. 1. Reduction results of first level models

	Strefa dogrzewu	Strefa odparow. I	Strefa odparow. II	Strefa odparow. III
zakres adekw.	$\omega_{max} = 2 \text{ rad/s}$			
rzęd modelu zredukowanego	18	13	17	22
błąd aproksym. Δ_3	6,8 %	4,9%	7,6%	9,0%
błąd aproksym. Δ_6	1,1%	0,4%	1,1%	1,1%
zakres adekw.	$\omega_{max} = 20 \text{ rad/s}$			
rzęd modelu zredukowanego	33	29	35	52
błąd aproksym. Δ_3	7,8%	8,2%	8,9%	7,7%
błąd aproksym. Δ_6	1,1%	0,7%	1,1%	0,6%
zakres adekw.	$\omega_{max} = 500 \text{ rad/s}$			
rzęd modelu zredukowanego	68	78	113	242
błąd aproksym. Δ_3	6,8%	9,8%	7,9%	7,3%
błąd aproksym. Δ_6	0,7%	0,6%	0,7%	0,3%



Rys. 4. Wartości własne modeli strefy dogrzewu (MPSD – model pierwotny, MRSD – modele zredukowane o różnych zakresach adekwatności)
Fig. 4. Economizer zone models eigenvalues (MPSD – prime model, MRSD – reduced models with different ranges of adequacy)

Model pierwotny charakteryzuje się bardzo dużą sztywnością (stosunek modułów wartości własnych osiąga wartość 10^4), co pociąga za sobą znaczne trudności związane numerycznym rozwiązywaniem równań różniczkowych. W modelach zredukowanych uzyskuje się znaczne ograniczenie sztywności (np. dla modelu zredukowanego o zakresie adekwatności 20 rad/s, stosunek modułów wartości własnych nie przekracza 10^2).

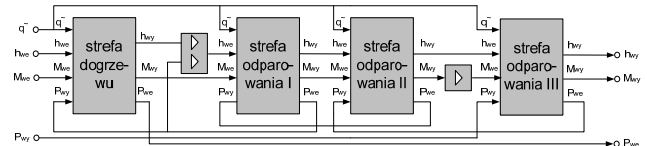
Redukcja modeli drugiego poziomu hierarchii

Model rur ekranowych (drugi poziom hierarchii modelu parownika) powstaje w wyniku połączenia zredukowanych modeli podsystemów pierwszego poziomu (strefa dogrzewu oraz trzy części strefy odparowania) (rys. 5). W zależności od szczegółowości analizy dynamiki poszczególnych odcinków rur ekranowych, można wykorzystywać modele o różnym zakresie adekwatności. Maksymalna częstotliwość, dla której modele zredukowane pierwszego poziomu zachowują adekwatność, wynosi 20 rad/s.

Jak wynika z rys. 5, w modelu rur ekranowych występują sprzężenia zwrotne, wynikające z przemieszczania się zmian ciśnienia czynnika roboczego w kierunku zgodnym z przepływem czynnika roboczego oraz w kierunku przeciwnym. Sprzężenia te bardzo słabo oddziałują na niskich częstotliwościach, jednak dla wysokich częstotliwości wzmocnienie w pętli sprzężenia zwrotnego przekracza 10.

Ponieważ zredukowane modele strefy dogrzewu oraz poszczególnych odcinków strefy odparowania poprawnie aproksymują charakterystyki częstotliwościowe wyłącznie dla częstotliwości $\omega < 20 \text{ rad/s}$, więc błędy aproksymacji w zakresie wyższych czę-

stotliwości nie były brane pod uwagę jako kryterium doboru modelu zredukowanego. Może więc okazać się, że po zamknięciu pętli sprzężeń zwrotnych dla modeli zredukowanych, model rur ekranowych będzie niestabilny. Modele o zakresie adekwatności do 20 rad/s mogą być zatem przydatne jedynie do analizy zjawisk dynamicznych zachodzących w poszczególnych odcinkach rur ekranowych, bez możliwości zastosowania do tworzenia modelu rur ekranowych [5].



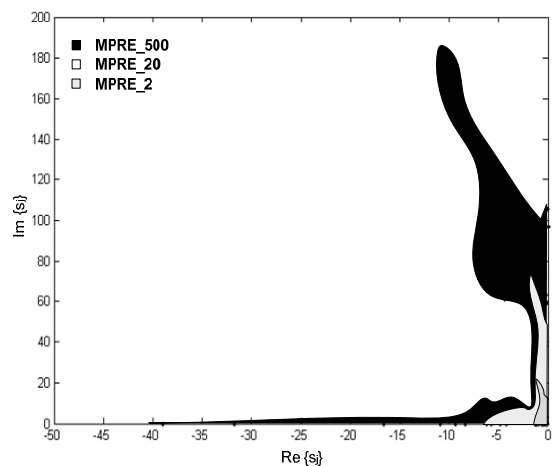
Rys. 5. Model rur ekranowych parownika
Fig. 5. Steam generator tubes model

Bardzo silne działanie sprzężenia zwrotnego dla wysokich częstotliwości oznacza, że zagwarantowanie stabilności modelu rur ekranowych wymaga poprawnej aproksymacji charakterystyk podsystemów w zakresie do 500 rad/s, a dla strefy dogrzewu do 1000 rad/s (rzędy modeli oraz błędy aproksymacji przedstawiono w tabeli 1). Tak szeroki zakres aproksymacji modeli podsystemów rur ekranowych pociąga za sobą ich wysoki rząd, przy niezmiennym zakresie adekwatności 0-20 rad/s. Model rur ekranowych, uzyskany na podstawie połączenia zredukowanych modeli poszczególnych odcinków rur ekranowych o zakresie aproksymacji do 500 – 1000 rad/s, może być następnie poddany kolejnym operacjom redukcji przy zachowaniu zakresu adekwatności do 20 rad/s.

W wyniku redukcji modelu rur ekranowych otrzymanego na podstawie zredukowanych modeli podsystemów otrzymano wyniki przedstawione w tabeli 2.

Tab. 2. Wyniki redukcji modelu rur ekranowych parownika
Tab. 2. Reduction results of the steam generator tube models

zakres adekwatności	$\omega_{max} = 2 \text{ rad/s}$	$\omega_{max} = 20 \text{ rad/s}$
rzęd modelu zredukowanego	44	85
błąd aproksymacji Δ_3	4,5%	8,3%
błąd aproksymacji Δ_6	0,6%	0,8%



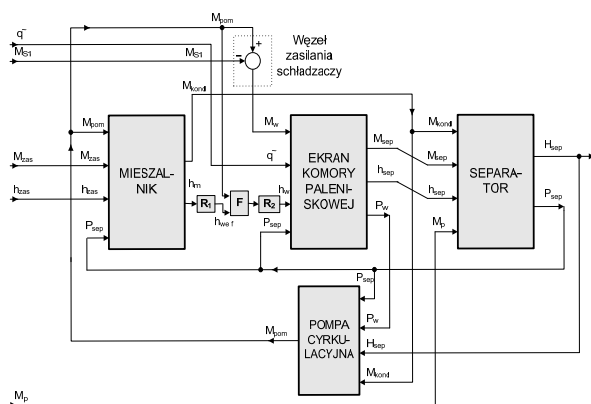
Rys. 6. Wartości własne modeli rur ekranowych parownika
Fig. 6. Eigenvalues of the steam generator tubes models

Na rys. 6 przedstawiono wartości własne następujących modeli rur ekranowych:

- model pierwotny zredukowany o zakresie aproksymacji 500 rad/s,
- model zredukowany o zakresie adekwatności 20 rad/s,
- model zredukowany o zakresie adekwatności 2 rad/s.

Model parownika kotła energetycznego BP-1150

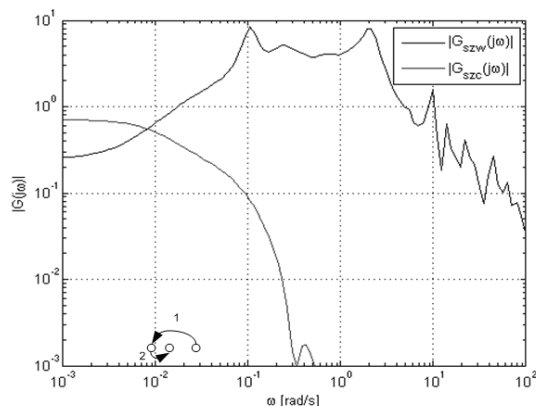
Model parownika kotła BP-1150 zawiera pięć wielkości wejściowych: M_p , q , M_{s1} , M_{zas} , h_{zas} oraz dwie wielkości wyjściowe: P_{sep} i H_{sep} . Strukturę powiązań poszczególnych podsystemów w modelu parownika przedstawiono na rys. 7. W modelu parownika decydujące znaczenie dla właściwości dynamicznych parownika mają procesy cieplne, dlatego też podczas wyznaczania modeli zredukowanych brano pod uwagę przedział częstotliwości $\omega < 2$ rad/s.



Rys. 7. Struktura modelu parownika kotła BP-1150 (R₁, R₂ - rurociągi łączące, F - filtr)

Fig. 7. BP-1150 steam boiler model structure (R₁, R₂ - connective pipe-lines, F - filter)

W modelu parownika występują dwa sprzężenia zwrotne, które mają istotny wpływ na właściwości dynamiczne parownika. Pierwsze z nich opisuje wpływ zmian ciśnienia w separatorze na zmiany przepływu masowego i entalpii mieszaniny parowo-wodnej na wylocie z rur ekranowych, które z kolei powodują zmiany ciśnienia w separatorze. To ujemne sprzężenie zwrotne ma charakter wewnętrzny i wynika ze specyfiki procesu generacji pary. Drugie sprzężenie zwrotne jest związane ze zmianami entalpii wlotowej do rur ekranowych parownika (spowodowanymi zmianami ciśnienia w separatorze). Wynika ono z recyrkulacji czynnika roboczego w parowniku [6] i jest dodatnim sprzężeniem zwrotnym. Charakterystyki częstotliwościowe układu otwartego dla wewnętrznego oraz cyrkulacyjnego sprzężenia zwrotnego (przy zamkniętym sprzężeniu wewnętrznym) oraz przemieszczenia dodatniego wartości własnej spowodowane funkcjonowaniem sprzężeń zwrotnych przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Charakterystyka amplitudowa układu otwartego dla wewnętrznego oraz cyrkulacyjnego sprzężenia zwrotnego oraz przemieszczenia dodatniego biegunu w wyniku funkcjonowania sprzężeń zwrotnych, (1) - wewnętrzne sprzężenie zwrotne, (2) - cyrkulacyjne sprzężenie zwrotne

Fig. 8. Open system magnitude response for inner and circulative closed loop, and positive pole displacements. (1) - inner closed loop, (2) - circulation closed loop

Jak wynika z charakterystyk częstotliwościowych, przebiegi dynamiczne mające miejsce w rurach ekranowych, są w znacznym stopniu tłumione przez separator charakteryzujący się dużą pojemnością cieplną. Decydujący wpływ na dynamikę parownika ma niestabilność separatora, co powoduje że dodatnia wartość własna występująca w modelu separatora, znajduje się także w modelu parownika. W modelach zredukowanych (np. rzędu $k=25$) zostają usunięte bieguny związane z szybkimi procesami transportu masy oraz ciśnienia w rurach ekranowych, natomiast pozostawiane są wartości własne, które odpowiadają za procesy cieplne.

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.

Wielopoziomowa konstrukcja modelu daje możliwość analizy przez zastosowanie procedury agregacji. Jednym z zasadniczych jej środków jest redukcja modelu na poszczególnych poziomach hierarchicznej struktury. Podejście takie umożliwia stworzenie zredukowanego modelu hierarchicznego, zawierającego zbiór modeli na każdym z poziomów hierarchii, charakteryzujących się różnymi zakresami adekwatności oraz dokładnością aproksymacji właściwości obiektu sterowania.

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.

6. Literatura

- [1] Antoulas A., Sorensen D.: Approximation of Large-Scale Dynamical System: An overview. Int. J. Appl. Comput. Sci., vol. 11, no. 5, 2001, pp. 1093-1121.
- [2] Enns D.: Model reduction with balanced realizations: An error bound and frequency weighted generalization., Proc 23rd IEEE Conf. Decision and Control, Las Vegas, NV 1984, pp. 127-132.
- [3] Imaev D., Rydel M., Stanisławski W.: Redukcja modeli parowników przepływowych jako obiektów sterowania, XVI KKA, 2008, s.198-207.
- [4] Rydel M.: Analiza algorytmów redukcji liniowych modeli złożonych obiektów dynamicznych.. Zesz. Nauk. PO, z.302, Opole 2005, s.69-90.
- [5] Rydel M.: Zredukowane hierarchiczne modele złożonych obiektów sterowania na przykładzie kotła energetycznego, Rozprawa doktorska, Opole 2009.
- [6] Stanisławski W.: Modelowanie i symulacja komputerowa parowników przepływowych kotłów energetycznych, Studia i monografie z.124, Opole, 2001.
- [7] Stanisławski W., Rydel M., Zygarlicki J.: Problemy redukcji modeli parownika kotła BP-1150, Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Energetyka 2004, Journal of Transdisciplinary Systems Science, vol. 9, 2004, s. 908-915.
- [8] Stanisławski W., Imajew D.: Hierarchical Approach to the Steam Boiler Modelling and Simulation., 12th European Simulation Multi-conference. Simulation-Past, Present and Future. Manchester 1998, pp. 171-175.
- [9] Stanisławski W., Rydel M.: Modele hierarchiczne złożonych obiektów sterowania, XV Krajowa Konferencja Automatyki, 2005, s.149-154.
- [10] 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, pp. 1734-1737.