

Franciszek STRZELCZYK  
Instytut Techniki Ciepłej, Łódź

## MATEMATYCZNE MODELOWANIE PRZEGRZEWACZY PARY

**Streszczenie.** Przedstawiono cyfrowy model przegrzewacza pary przeznaczony do symulacji dużych zmian obciążenia kotła. Model powstał z aproksymacji podstawowej transmitancji wymiennika ciepła funkcjami wymiernymi według całkowitego kryterium powierzchni błędów.

## MATHEMATICAL MODELLING OF STEAM SUPERHEATERS

**Summary.** The paper gives a mathematical model of a superheater used in the simulation of large load changes. The model originated from the approximation of the primary transfer function of a heat exchanger with rational functions by using of integral criterion for the error surface.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ

**Резюме.** Представлено цифровую модель пароперегревателя, предназначенную для симуляции глубоких изменений нагрузки котла. Модель создана на базе аппроксимации основной трансмитанции теплообменника с помощью рациональных функций, по интегральному критерию поверхности ошибок.

### Oznaczenia

A – pole przekroju, c – ciepło właściwe, i – entalpia, L – długość rury wymiennika, m – strumień masy czynnika, n – liczba podziału wymiennika na elementy jednostkowe, p – ciśnienie,  $\dot{q}$  – jednostkowy strumień ciepła przemowiany na drodze promieniowania spoza przestrzeni wymiennika,  $\dot{Q}$  – strumień ciepła, s – operator Laplace'a, t – temperatura, U – obwód rury, x – współrzędna długości,  $\alpha$  – przejmowalność energii cieplnej,  $\rho$  – gęstość właściwa masy,  $\tau$  – czas.

## Indeksy

a – element jednostkowy, c – czynnik ogrzewany, D – para, G – spaliny, r – rura, 1 – zewnętrzna strona rury lub wejście do wymiennika (elementu podziału), 2 – wewnętrzna strona rury lub wyjście z wymiennika (elementu podziału).

## Wzory pomocnicze

$$\kappa = \frac{\alpha_2 U_2 L}{m_c c_c}, \quad \kappa' = \frac{\kappa}{1 + \nu} \quad - \text{współczynnik nagrzewania czynnika,}$$

$$\kappa'_a = \frac{\kappa'}{n} \quad - \text{współczynnik nagrzewania elementu jednostkowego,}$$

$$T_r = \frac{A_r \rho_r c_r}{\alpha_2 U_2}, \quad T'_r = \frac{T_r}{1 + \nu} \quad - \text{stała czasowa nagrzewania rury,}$$

$$\nu = \frac{\alpha_1 U_1}{\alpha_2 U_2} \quad - \text{współczynnik korekcyjny przekazywania ciepła pomiędzy spalinami i czynnikiem ogrzewanym,}$$

$$\eta = \frac{A_c \rho_c c_c}{A_r \rho_r c_r} \quad - \text{stosunek pojemności cieplnych czynnika ogrzewanego i rury.}$$

## 1. WPROWADZENIE

Nieliniowe cząstkowe równania bilansowe, opisujące właściwości dynamiczne kotłowych wymienników ciepła – przegrzewaczy pary, bądź podgrzewaczy wody, po zlinearyzowaniu i przekształceniu Laplace'a są rozwiązywane w dziedzinie operatorowej, a następnie wynik rozwiązania wyrażony funkcjami transcendentnymi jest aproksymowany wyrażeniami wymiernymi, pozwalającymi przejść do dziedziny czasu. W ten sposób wymiennik ciepła, jako człon o stałych rozłożonych, jest odwzorowany szeregowym połączeniem n elementów o stałych skupionych. Liczba podziału n wymiennika zależy od wartości współczynnika nagrzewania i zastosowanego sposobu aproksymacji transmitancji wymiennika. Otrzymuje się układ liniowych równań różniczkowych zwyczajnych.

Model matematyczny bloku energetycznego powinien umożliwiać symulację zmian obciążenia w zakresie stabilnej pracy bloku (50–100% obciążenia) oraz inne jego stany, między innymi rozruch i odstawienie bloku [1, 2]. Dla takich dużych zmian strumienia masy czynnika ogrzewanego występują duże zmiany wartości współczynnika nagrzewania czynnika  $\kappa$ , określającego właściwości dynamiczne wymiennika. W pracy [3] przeanalizowano niektóre sposoby aproksymacji podstawowej transmitancji wymienników. Wygodnym kryterium aproksymacji transmitancji wymiennika jest minimum powierzchni

błędu odpowiedzi czasowej. Zaletą tej metody aproksymacji jest możliwość przedstawienia współczynników funkcji aproksymującej w postaci analitycznej, co jest wygodne do wykorzystania w modelu cyfrowym. Jak wykazano w [3], odpowiednio dobierając stopień funkcji aproksymującej można otrzymać wystarczającą dokładność modelu również do badania układów regulacji.

W niniejszym artykule wykorzystując wyniki prac [3, 4] omówniono realizację cyfrowego modelu przegrzewacza pary.

## 2. SFORMUŁOWANIE MODELU

Równaniami wyjściowymi opisującymi model matematyczny stopnia wymiennika dla ogólnie przyjmowanych założeń, w przypadku równomiernego rozkładu temperatury spalin wzdłuż rury  $t_G(x, \tau) = t_G(0, \tau)$ , są:

– bilans ciepła dla strumienia czynnika w odcinku  $dx$  rury

$$A_c \rho_c \frac{\partial}{\partial \tau} i_c(x, \tau) dx + \dot{m}_c \frac{\partial}{\partial x} i_c(x, \tau) dx = d\dot{Q}_{rc}(x, \tau) \quad (1)$$

– bilans ciepła dla odcinka  $dx$  rury

$$A_r \rho_r c_r \frac{d}{d\tau} t_r(x, \tau) = d\dot{Q}_{Gr}(x, \tau) - d\dot{Q}_{rc}(x, \tau), \quad (2)$$

przy czym całkowity strumień ciepła przejmowany przez odcinek  $dx$  rury wymiennika w obrębie wymiennika (pierwszy składnik) i na skutek promieniowania spoza wymiennika (drugi składnik) wynosi:

$$d\dot{Q}_{Gr}(x, \tau) = \alpha_1 U_1 [t_G(0, \tau) - t_r(x, \tau)] dx + \dot{q} U_1 dx, \quad (3)$$

a strumień ciepła przejmowany przez czynnik w odcinku  $dx$  rury

$$d\dot{Q}_{rc}(x, \tau) = \alpha_2 U_2 [t_r(x, \tau) - t_c(x, \tau)] dx \quad (4)$$

Dla warunków ustalonych ( $\tau = 0$ ) z zależności (1)–(4), po scałkowaniu i uwzględnieniu równań stanu

$$i_c = i_c(t_c, p_c), \quad (5)$$

otrzymuje się temperaturę czynnika na wylocie wymiennika dla  $x = L$

$$t_{c2}(\kappa', 0) = t_{c1}(0) \cdot \exp(-v\kappa') + \left[ t_G(0) + \frac{\dot{q}(0)}{\alpha_1} \right] [1 - \exp(-v\kappa')] \quad (6)$$

Z układu równań (1)–(4), po przejściu do postaci operatorowej, stransformowaniu względem czasu  $\tau$ , scałkowaniu po zmiennej  $\kappa'$ , otrzymuje się dla przyrostów temperatury wyrażenie:

$$\Delta t_{c2}(s) = \Delta t_{c1} \exp(-v\kappa') A(\kappa', s) + \left[ \Delta t_G(s) + \frac{\Delta \dot{q}(s)}{\alpha_1} \right] B(s) [1 - \exp(-v\kappa') A(\kappa', s)], \quad (7)$$

gdzie:

$$A(\kappa', s) = \exp \left[ -\kappa' T_r' \left( d + \frac{1}{1 + T_r' s} \right) s \right], \quad (8)$$

$$B(s) = \frac{v}{T_r'^2 ds^2 + T_r'(e + v)s + v}, \quad (9)$$

przy czym:

$$d = \eta(1 + v^2) \quad (10)$$

$$e = 1 + d \quad (11)$$

### 3. APROKSYMACJA TRANSMITANCJI WYMIENNIKA WEDŁUG CAŁKOWITEGO KRYTERIUM POWIERZCHNI BŁĘDÓW

Wyrażenie  $A(\kappa', s)$  opisuje znaną postać podstawowej transmitancji wymiennika ciepła, przy czym iloczyn  $T_r = \kappa' T_r' d$  oznacza czas transportu czynnika w rurze. Jeżeli  $d = 0$ , wówczas transmitancja  $A(\kappa', s)$  nie uwzględnia opóźnienia transportowego. Aby przejść do dziedziny czasu, transmitancja ta aproksymowana jest funkcjami wymiennymi:

$$A(\kappa', s) \cong \left( \frac{1 + \sum_{i=1}^n b_i s^i}{1 + \sum_{i=1}^m a_i s^i} \right)^n, \quad (12)$$

gdzie  $n$  jest liczbą podziału wymiennika na elementy o jednostkowej wartości współczynnika nagrzewania czynnika  $\kappa_a$ .

Zestawienie wzorów określających współczynniki w funkcjach aproksymujących

Nr fun. apr.	Funkcja aproksymująca	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
1	$\frac{1 + b_1 T_r s + b_2 T_r^2 s^2 + b_3 T_r^3 s^3}{1 + a_1 T_r s + a_2 T_r^2 s^2 + a_3 T_r^3 s^3}$	$P_1 + b_1$	$\frac{P_2}{2} + b_1 P_1 + b_2$	$\frac{P_3}{6} + \frac{b_1 P_2}{2} + b_2 P_1 + b_3$	$\frac{(2P_3 P_5 - P_2 P_6) M_2 + M_4 M_5}{M_2 M_3 + M_1 M_4}$	$\frac{M_5 - b_1 M_1}{M_2}$	$\frac{P_4 + 4b_1 P_3 + 12b_2 P_2}{24P_1}$
2	$\frac{1 + b_1 T_r s + b_2 T_r^2 s^2}{1 + a_1 T_r s + a_2 T_r^2 s^2 + a_3 T_r^3 s^3}$	$P_1 + b_1$	$\frac{P_2}{2} + b_1 P_1 + b_2$	$\frac{P_3}{6} + \frac{b_1 P_2}{2} + b_2 P_1$	$\frac{M_3}{M_4}$	$\frac{P_4 + b_1 P_3}{12P_2}$	
3	$\frac{1 + b_1 T_r s}{1 + a_1 T_r s + a_2 T_r^2 s^2 + a_3 T_r^3 s^3}$	$P_1 + b_1$	$\frac{P_2}{2} + b_1 P_1$	$\frac{P_3}{6} + \frac{b_1 P_2}{2}$	$-\frac{P_4}{4P_3}$		
4	$\frac{1 + b_1 T_r s + b_2 T_r^2 s^2}{1 + a_1 T_r s + a_2 T_r^2 s^2}$	$P_1 + b_1$	$\frac{P_2}{2} + b_1 P_1 + b_2$		$\frac{2P_2 P_3 - P_1 P_4}{4P_1 P_3 - 6P_2^2}$	$-\frac{P_3 + 3b_1 P_2}{6P_1}$	
5	$\frac{1 + b_1 T_r s}{1 + a_1 T_r s + a_2 T_r^2 s^2}$	$P_1 + b_1$	$\frac{P_2}{2} + b_1 P_1$		$-\frac{P_3}{3P_1}$		
6	$\frac{1 + b_1 T_r s}{1 + a_1 T_r s}$	$\frac{\kappa_a e^2 + 2}{2e}$			$\frac{2 - \kappa_a e^2}{2e}$		
7	$\frac{1}{1 + a_1 T_r s + a_2 T_r^2 s^2 + a_3 T_r^3 s^3}$	$\kappa_a e$	$\frac{\kappa_a^2 e^2}{2} - \kappa_a$	$\frac{\kappa_a^3 e^3}{2} - \kappa_a^2 e + \kappa_a$			
8	$\frac{1}{1 + a_1 T_r s + a_2 T_r^2 s^2}$	$\kappa_a e$	$\frac{\kappa_a^2 e^2}{2} - \kappa_a$				
9	$\frac{1}{1 + a_1 T_r s}$	$\kappa_a e$					

$M_1 = 6P_1 P_5 - 20P_3^2$   
 $M_2 = 30P_1 P_4 = 60P_2 P_3$   
 $M_3 = 6P_2 P_5 - 10P_3 P_4$   
 $M_4 = 40P_3^2 - 30P_2 P_4$   
 $M_5 = 5P_3 P_4 - P_1 P_6$   
 $P_i = \sum_{k=1}^i i-1 a^{(k)} P_{(i-k)}$   
gdzie  $a^{(1)} = \kappa_a - e$   
 $a^{(2)} = -2\kappa_a$   
dla  $i > 2$   
 $a^{(i)} = -i a^{(i-1)}$

W tabelicy 1 zestawiono wzory [3, 4] określające współczynniki dla poszczególnych funkcji aproksymujących dla  $l = m \leq 3$ , przy czym przez  $P_1$  oznaczono kolejne pochodne transmitancji  $A(\kappa', s)$  dla  $s = 0$ .

Dla oceny dokładności aproksymacji transmitancji wykorzystano następujące wskaźniki w dziedzinie czasu:

$$\Delta h = h_G(\kappa', \tau) - h_A(\kappa', \tau), \quad (13)$$

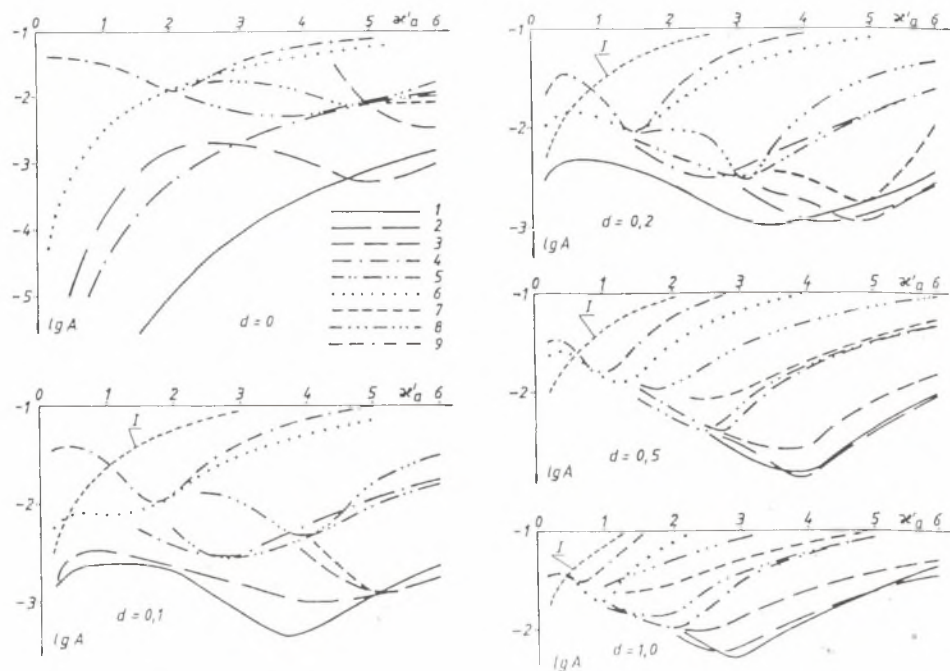
$$A = \int_0^{\tau} \left| \frac{h_G(\kappa', \tau)}{h_A(\kappa', \tau)} - 1 \right| d\tau, \quad (14)$$

gdzie:  $h_A(\kappa', \tau)$  i  $h_G(\kappa', \tau)$  – odpowiedzi czasowe na wymuszenia skokowe dla transmitancji (8) i funkcji aproksymującej.

Na rys. 1 dla poszczególnych zależności aproksymujących (podanych w tabelicy 1) porównano wskaźniki dokładności (14) aproksymacji funkcji (8) jako funkcję współczynnika nagrzewania elementu jednostkowego  $\kappa'_a$  dla kilku wartości współczynnika  $d$ . Z rysunku wynika, że występują optymalne wartości jednostkowego współczynnika nagrzewania  $\kappa'_a$  (dla  $d > 0$ ), dla których całka (14) osiąga minimum. Czym wyższy stopień mianownika funkcji aproksymującej, tym wyższa jest wartość optymalnego, jednostkowego współczynnika nagrzewania. Na rys. 1 podano również wartość błędu obliczenia charakterystyki odpowiedzi czasowej dla przypadku bezpośrednio rozwiązywania układu równań (1)–(4) – krzywa I. Z porównania wynika, że aby otrzymać jak najmniejszy błąd odwzorowania, należy dla tego przypadku stosować jak najmniejszą wartość współczynnika  $\kappa'_a$ , a zatem i mały krok całkowania równań, co powoduje znaczne wydłużenie czasu obliczeń przebiegów czasowych.

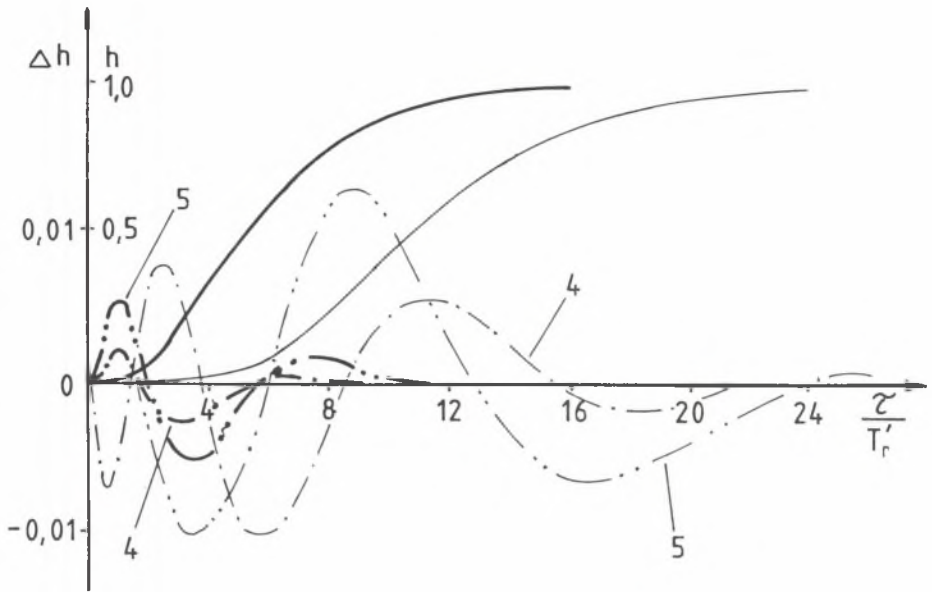
Liczba równań różniczkowych opisujących wymiennik zależy od liczby podziału  $n$  i stopnia mianownika  $m$  funkcji wymiernej (12). Dla takiej samej liczby równań różniczkowych  $N$  z wszystkich postaci funkcji (tablica 1), funkcja nr 1 najdokładniej aproksymuje przegrzewacz.

Na rys. 2 przedstawiono odpowiedzi czasowe dla  $\kappa' = 4,5$  i  $\kappa' = 9$  oraz błędy aproksymacji w przypadku zastosowania funkcji aproksymujących nr 4 lub nr 5. Nawet w przypadku dwukrotnego zwiększenia wartości współczynnika nagrzewania  $\kappa'$ , stosując funkcję nr 4, błąd aproksymacji  $\Delta h < 0,01$  (rys. 2 i 3).



Rys. 1. Wartości całki A (w skali logarytmicznej) błędu odwzorowania odpowiedzi czasowej wymiennika ciepła w funkcji jednostkowej wartości współczynnika nagrzewania czynnika dla różnych wartości współczynnika d (określonego wzorem (10)). Cyfry 1–9 oznaczają numery funkcji (podanych w tablicy 1) aproksymujących transmitancję (8). I – błąd odwzorowania charakterystyki odpowiedzi czasowej w przypadku bezpośredniego numerycznego rozwiązania równań (1)–(4)

Fig. 1. Values of the integral A of the error of the heat exchanger time response representation versus the per unit value of heating coefficient d (defined by the equation (10)). Numerals 1 to 9 denote numbers of functions (given in Table 1), which approximate the transfer function (8). I – The error of the representation of the time response characteristics for the direct numerical solution of the equations (1) to (4)



Rys. 2. Unormowane odpowiedzi czasowe  $h$  i błędy aproksymacji  $h$  (wzór (13)) dla funkcji aproksymujących nr 4 oraz 5 i liczby podziału  $n = 2$ . Parametry przegrzewacza:  $\chi = 4,5$ ,  $d = 0,2$ ,  $v = 0,1$  – linie grube;  $\chi = 9$ ,  $d = 0,2$ ,  $v = 0,1$  – linie cienkie

Fig. 2. Normalized time responses  $h$  and errors of approximation  $h$  (equation 13) for the approximating functions No 4 and No 5 as well as for division number  $n = 2$ . Parameters of the superheater:  $\chi = 4,5$ ,  $d = 0,2$ ,  $v = 0,1$  – heavy lines;  $\chi = 9$ ,  $d = 0,2$ ,  $v = 0,1$  – fine lines

#### 4. REALIZACJA MODELU PRZEGRZEWACZA

Dla znamionowych obciążeń  $m_n$  kotłów wartości  $\kappa'$  i  $d$  wynoszą odpowiednio:

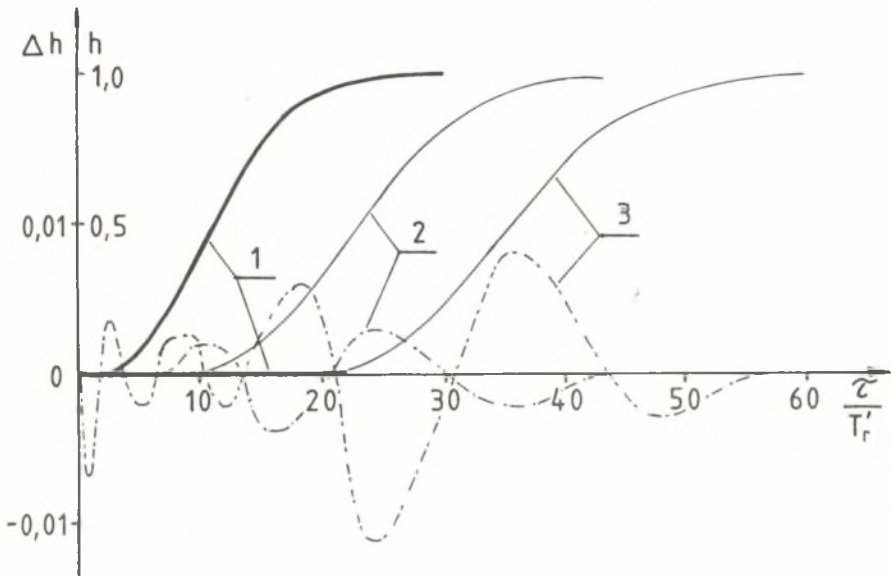
- dla przegrzewacza pary  $\kappa'_n = 4 \div 12$ ,  $d \leq 0,2$ ;
- dla podgrzewacza wody  $\kappa'_n = 20 \div 50(80)$ ,  $d \leq 0,8 \div 1,2$ .

Wraz ze zmniejszeniem obciążenia kotła  $\dot{m}$  wzrastają wartości współczynników nagrzewania według szacunkowej zależności:

$$\frac{\kappa'}{\kappa'_n} = \left( \frac{\dot{m}_n}{\dot{m}} \right)^k, \quad (15)$$

gdzie:





Rys. 3. Unormowane odpowiedzi czasowe  $h$  i błędy aproksymacji  $h$  dla funkcji aproksymującej nr 4 i liczby podziału  $n = 4$  przegrzewaczy wtórnych o parametrach: 1)  $\chi = 10$ , 2)  $\chi = 15$ , 3)  $\chi = 20$

Fig. 3. Normalized time response  $h$  and error of approximation  $h$  for the approximation function No 4 and for division number  $n = 4$ , for resuperheaters having parameters: 1)  $\chi = 10$ , 2)  $\chi = 15$ , 3)  $\chi = 20$

$k = 0,2$  dla przegrzewaczy pracujących ze stałym ciśnieniem pary,  
 $k = 0,5$  dla przegrzewaczy pracujących z parametrami poślizgowymi,  
 $k = 1,0 \div 1,2$  dla podgrzewaczy wody.

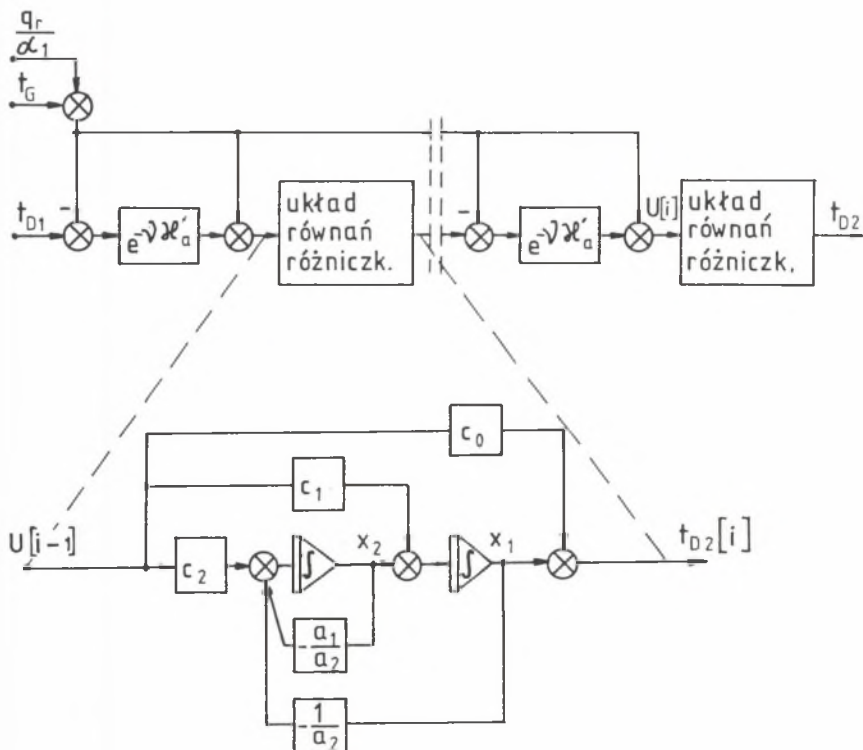
Ponieważ w czasie obliczeń modelu należy zachować stałą liczbę równań, więc należy wybrać taką postać funkcji aproksymującej, aby przy jak największym wzroście współczynnika nagrzewania  $\kappa_a$  następowało jak najmniejsze pogorszenie wskaźnika  $A$  (rys. 1). Z funkcji 3 stopnia będą to funkcje nr 1, 2 i 3 lub z funkcji 2 stopnia – funkcje nr 4 i 5.

W modelu wymiennika temperatura spalin  $t_G$ , strumień ciepła  $\dot{q}$  oraz temperatura czynnika  $t_c$  przepływającego w rurach występują w postaci jawnej, natomiast zmiany strumieni czynnika i spalin w postaci niejawnej. Zmiany przepływu strumieni czynnika i spalin odwzorowywane są przez zmiany wartości przejmowalności ciepła  $\alpha$  oraz zmiany wartości współczynników  $a_i$  i  $b_i$  w układzie równań różniczkowych.

Na rys. 4 przedstawiono schemat ideowy modelu wymiennika ciepła z zastosowaniem funkcji aproksymującej 2 stopnia. W przypadku przegrzewacza pary dla określenia liczby podziału  $n$  przegrzewacza można przyjąć  $\kappa_a' = 2,5$ .

Ze względu na dość złożoną postać wyrażen na współczynniki  $a_1$  i  $b_1$  dla funkcji 3 stopnia korzystniejsza jest postać funkcji 2 stopnia. Stosując funkcję 2 stopnia zwiększa się liczba podziału  $n$  wymiennika i dzięki temu schemat z rys. 4 lepiej odwzorowuje wymuszenie w torze spalin – nie zachodzi potrzeba stosowania dodatkowych równań różniczkowych w tym torze.

Dla każdego  $i$ -tego elementu podziału wymiennika rozwiązuje się następujący układ równań różniczkowych:



Rys. 4. Schemat obliczeń charakterystyki statycznej i przebiegów czasowych wymiennika ciepła: a) schemat ogólny, b) schemat obliczeń przebiegów czasowych

Fig. 4. Schema of calculations referring to losses and time functions of the heat exchanger: a) general schema, b) schema of time function calculations

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{a_2} & -\frac{a_1}{a_2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} * [U(\tau) - U(0)], \quad (16)$$

gdzie:

$$c_0 = \frac{b_2}{a_2}, \quad c_1 = \frac{b_1}{a_2} - \frac{a_1}{a_2} c_0, \quad c_2 = \frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_2} c_0,$$

przy czym współczynnik  $a_1, b_1$  zgodnie z tablicą 1.

Temperatura pary na wylocie z elementu podziału

$$t_{D2}[i] = x_1 + c_0 U(\tau), \quad (17)$$

gdzie:

$$U(\tau) = t_{D1}[i] \exp(-v\kappa'_a) + \left( t_G + \frac{\dot{q}_r}{\alpha_1} \right) [1 - \exp(-v\kappa'_a)] \quad (18)$$

Wymuszenie  $U(0)$  wyznaczone jest z zależności (18) dla  $\tau = 0$ .

Wyznaczona z wzoru (17) temperatura wyjściowa z  $i$ -tego elementu jest wartością wejściową  $t_{D1}[i+1]$  dla  $i+1$ -ego elementu.

## 5. WNIOSKI

Z punktu widzenia jakości regulacji istotna jest zbieżność transmitancji aproksymującej i aproksymowanej dla wybranego pasma częstotliwości leżącego w 2, 3 i 4 ćwiartce charakterystyki amplitudowo-fazowej. Jak wykazano w [3, 4], jeżeli model ma służyć do doboru nastaw układów regulacji temperatury pary, wówczas do modelowania należy stosować funkcję nr 1 (tablica 1). Dobre wyniki otrzymuje się stosując do odwzorowania przebiegów czasowych funkcje nr 4 bądź nr 5.

Analityczne wyrażenie na współczynniki funkcji aproksymujących, jako funkcje ciągłe parametrów termodynamicznych i konstrukcyjnych wymienników, ułatwiają i upraszczają organizację matematycznego modelu przeznaczonego do odwzorowania właściwości statycznych i dynamicznych wymienników ciepła (przegrzewaczy i podgrzewaczy wody [4]) od stanu rozruchu do znamionowego stanu pracy kotła.

## LITERATURA

- [1] Franke J., Wittchow E., Lausterer G. K.: Das Dampferzeuger – Dynamikmodell der KWU und sein Einsatz in Planung und Betrieb von

- fossilbeheizten Kraftwerken, VGB Kraftwerkstechnik, 1984, nr 7, ss. 598–604.
- [2] Doležal R., Berndt G.: Matematische Störfallsimulation und Messungen an einem Naturumlaufkessel mittlerer Leistung, VGB Kraftwerkstechnik, 1986, nr 2, ss. 113–119.
- [3] Strzelczyk F.: Aproksymacja transmitancji przegrzewacza pary, PAK, 1991, nr 5, ss. 117–120.
- [4] Strzelczyk F.: Odwzorowanie przegrzewaczy pary i podgrzewaczy wody. Archiwum Energetyki, 1992, nr 3–4, ss. 141–153.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

Wpłynęło do Redakcji 8.08.1994 r.

## Abstract

The nonlinear partial balance equations describing the characteristics of a boiler exchanger, after the linearization and Laplace transformation have been solved in a operator domain, then the results have been approximated by rational expressions (Table 1) using the integral criterion of a deviation area.

The system of linear ordinary differential equations with variable coefficients has been obtained. Errors of approximation are given in Figs. 1 to 3. Analytical expressions of the coefficients for approximate functions, as the continuous functions of thermodynamics variables allow static and dynamic properties of boilers from a start-up to a rated running.

In the heat exchanger model shown, the temperature of combustion gases and temperature of a medium flowing in conduits, exist in the explicit form, whereas variations of the flow of the medium in the heat exchanger exist in the implicit form. Variations in the flow of the medium are represented by variation of coefficient values  $a_z$ ,  $b_z$  in the system of equations (16) to (18). The model allows simulation of large variations of a boiler loading.