

Lukasz Kurpisz

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

NOWE METODY OBLICZEŃ PODGRZEWACZY REGENERACYJNYCH Z WYKORZYSTANIEM CHARAKTERYSTYK

W artykule przedstawiono nową koncepcję wykorzystania charakterystyk przy modelowaniu matematycznym podgrzewaczy regeneracyjnych bloków energetycznych.

Omówiono zasady budowy charakterystyk otrzymywanych po wstępnej eliminacji zmiennych niezależnych przy zastosowaniu aproksymacji średniokwadratowej.

Oceniono przydatność aproksymacji prowadzonej przy użyciu różnych funkcji bazowych w procesie wyznaczania przebiegu charakterystyk. Porównano wyniki obliczeń otrzymywanych przy użyciu modeli rozwiniętych i modeli uproszczonych zbudowanych na podstawie zależności funkcyjnych uzyskanych w procesie aproksymacji.

1. WSTĘP

Problem charakterystyk ma istotne znaczenie w przypadku obliczeń zmiennych warunków pracy podgrzewacza (tzw. obliczenia sprawdzające). Obliczenia podobne, prowadzone najczęściej w ramach szerzej zakrojonych obliczeń (blok, układ regeneracji) powinny wyróżniać się krótkim czasem liczenia oraz odpornością algorytmu obliczeniowego na zmienność danych wejściowych w szerokim zakresie. Dotyczą one zawsze przypadku kiedy obok konstrukcji podgrzewacza znany jest komplet informacji

o nominalnych warunkach pracy urządzenia, a obliczyć należy niektóre parametry termodynamiczne lub wydatki czynników wymieniających ciepło na podstawie zadanego zestawu parametrów charakteryzującego obecny punkt pracy [2].

Konwencjonalna forma obliczeń wymaga stosowania metod sekwencyjno-iteracyjnych [3], [4], co prowadzi do złożonego schematu blokowego, zawierającego dwie pętle iteracyjne w przypadku jednostrefowego podgrzewacza z kondensującym się czynnikiem grzejącym (rys.1), a trzy pętle iteracyjne w przypadku dwustrefowego podgrzewacza z chłodnicą skroplin (rys.2).

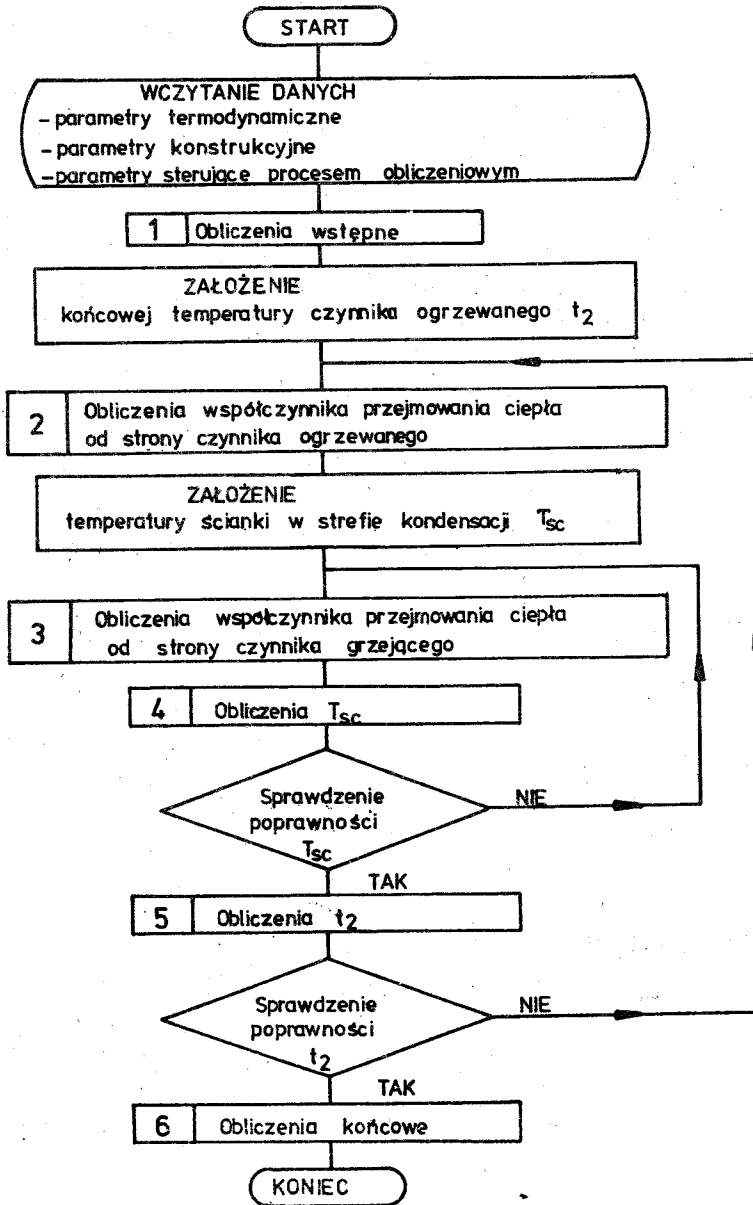
Taki układ obliczeń jest czasochłonny i w dość istotny sposób uzależniony od zakresu zmian wielkości iterowanych. Aby mieć pewność działania w szerokim zakresie, niezbędne jest wyposażenie algorytmu obliczeniowego w szereg zabezpieczeń, które zwiększając niezawodność zmuszają jednak do rozbudowy modelu i wpływają na dalsze wydłużenie czasu obliczeń.

Zastosowanie w procesie obliczeniowym charakterystyk potraktowanych jako zależność współczynnika przenikania ciepła od zadanego zestawu parametrów cieplno-przepływowych pozwoliłoby w znacznym stopniu uprościć schemat obliczeniowy i skrócić czasy obliczeń. Wydaje się to tym bardziej istotne, że wspomniane na wstępie obliczenia wymagają najczęściej określenia bardzo dużej liczby punktów pracy (optymalizacja, bilanse cieplne turbozespołów).

2. ANALIZA CECH MODELU MATEMATYCZNEGO PODGRZEWACZA REGENERACYJNEGO

Zakładając typowe zadanie obliczeniowe [3], polegające na poszukiwaniu wydatku czynnika grzejącego (G_p) i temperatury wody ogrzewanej na wyjściu (t_2), można przyjąć, że najbardziej celowe będzie zastosowanie charakterystyki o postaci

$$k = k(G_w, P_1, t_1, I_1, P_1, G_s, I_{s1}), \quad (1)$$



Rys.1. Obliczenia jednostrefowego podgrzewacza regeneracyjnego opisanego modelem rozwiniętym

co lokuje p_1 w grupie zmiennych zależnych, a wobec słabego wpływu zmienności p_1 na procesy wymiany ciepła nie prowadzi do poważniejszych błędów.

Wartość wykładnika potęgi α zależy od liczby Reynoldsa oraz rodzaju występujących strat przepływu. Dla przepływów burzliwych przy istnieniu tylko oporów miejscowych $\alpha = 2$, a przy oporach tarcia $\alpha = 1,75$. Stąd też przyjmując, że opory tarcia stanowią główną część całkowitych oporów przepływu można przyjmować do obliczeń $|\alpha| = 1,8$.

- Funkcje $G_s = G_s(P)$ oraz $I_{s1} = I_{s1}(P)$ zależne są od układu spływu skroplin. Dla układów, w których występuje zawracanie skroplin, bądź ich odprowadzanie bezpośrednio do kondensatora lub odgazowywacza wartości $G_s = 0$ i $I_{s1} = 0$. W pozostałych typach układów na podstawie dokonanej przez autorów analizy parametrów różnych bloków stwierdzono, że wpływ zmienności tych funkcji jest pomijalnie mały i można w przypadku I_{s1} przyjmować wartość ustaloną ($I_{s1} = I_{s1}^n$), a w przypadku G_s zastąpić zależnością $G_s = G_s^n \left(\frac{G_w}{G_w^n} \right)$, co eliminuje obie te wielkości z układu zmiennych niezależnych.

Dalszej eliminacji można dokonać stosując analizę numeryczną dla oceny wpływu pozostałych czterech zmiennych na zmienność współczynnika przenikania ciepła k .

W tym celu obliczono numerycznie pochodne cząstkowe:

$$\frac{\partial k}{\partial G_w} (G_w, t_1, I_1, P_1), \quad (3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t_1} (G_w, t_1, I_1, P_1), \quad (4)$$

$$\frac{\partial k}{\partial I_1} (G_w, t_1, I_1, P_1), \quad (5)$$

$$\frac{\partial k}{\partial P_1} (G_w, t_1, I_1, P_1). \quad (6)$$

Obliczeń dokonano w zakresie zmian $\pm 10\%$ w stosunku do wartości wyjściowej każdej z rozpatrywanych zmiennych. Ze zbioru

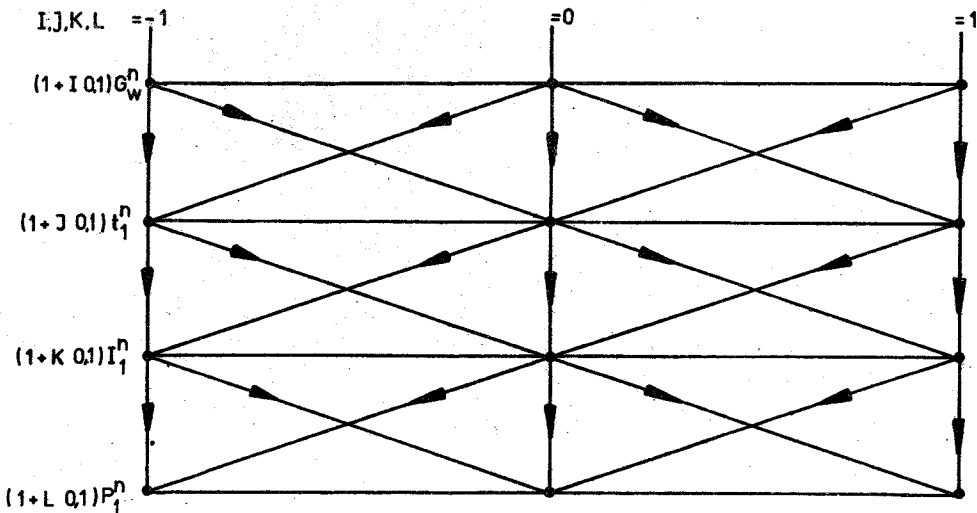
ru możliwych do przyjęcia wartości wyjściowych związanych ze stanem bloku w przedziale ($P_{\min} \div P_{\max}$) wybrano te, które odpowiadają nominalnemu punktowi pracy.

Przyjęty zakres zmian wynika z obranej metody obliczeniowej, a przy ograniczaniu się do analizy otoczenia punktu nominalnego kierowano się wynikami wcześniejszych prac [3]. Skonstruowana została siatka różnicowa

$$(G_W^n \cdot (1+I \cdot 0, 1), t_1^n \cdot (1+J \cdot 0, 1), I_1^n \cdot (1+K \cdot 0, 1), P_1^n \cdot (1+L \cdot 0, 1)),$$

gdzie:

$G_W^n, t_1^n, I_1^n, P_1^n$ - parametry termodynamiczne i wydatek czynnika ogrzewanego w punkcie nominalnym;
 $I, J, K, L = -1, 0, 1.$



Rys.3. Sposób doboru zestawów danych przy eliminacji zmiennych niezależnych

Wartości funkcji k w węzłach siatki wyliczone zostały przy pomocy procedury realizującej obliczenia z wykorzystaniem modelu rozwiniętego¹⁾ (por.rys.1), a zestawy danych przy-

¹⁾ Wg definicji na str.7!

jęto jako kombinacje czterech badanych zmiennych stworzone przez wszystkie możliwe połączenia zgodne ze strzałkami na rys.3.

Wyeliminowane wcześniej trzy parametry potraktowano jako zmienne zależne lub stałe, przyjmując ich wartości w każdym węźle wg następujących zależności:

$$P_1 = P_1^n \left(\frac{G_w}{G_w^n} \right)^{1,8},$$

$$G_s = G_s^n \left(\frac{G_w}{G_w^n} \right),$$

$$I_{s1} = I_{s1}^n = \text{const.}$$

Pochodne cząstkowe aproksymowano centralnymi ilorazami różnicowymi w węzłach siatki według następującej formuły

$$\frac{\partial k}{\partial x_i} \left[x_1 \dots, x_i^n \dots, x_4 \right] = \frac{1}{2 \cdot H_i} \left[k(x_1 \dots, x_i^n + H_i \dots, x_4) - k(x_1 \dots, x_i^n - H_i \dots, x_4) \right],$$

gdzie:

$$x_i^n = G_w^n, t_1^n, I_1^n, P_1^n.$$

Wartości pozostałych zmiennych w poszczególnych węzłach siatki określa się tworząc kombinacje wielkości trójwyrazowych ciągów zbudowanych według zasady:

$$x_a^{(1)} = x_a^n - H_a,$$

$$x_a^{(2)} = x_a^n,$$

$$x_a^{(3)} = x_a^n + H_a,$$

gdzie:

x_a^n - wartość zmiennej w punkcie nominalnym,

H_a - odległość między węzłami w a -tym kierunku,

$$H_a = 0,1 \cdot x_a^n,$$

$$a = 1, 2, 3, 4.$$

Powyższe postępowanie zapewnia dokładność aproksymacji rzędu H_1^2, H_3^2, H_4^2 kolejnych pochodnych cząstkowych funkcji k względem G_w, t_1, I_1, P_1 .

Kontynuując proces eliminacji wprowadzono normę umożliwiającą ocenę stopnia zależności współczynnika przenikania k od czterech badanych zmiennych

$$\|u\|_H = \sqrt{H \sum_{x \in \Omega_H} u^2(x)}, \quad (7)$$

gdzie:

$$H = H_1 H_2 H_3 H_4,$$

Ω_H - zbiór węzłów siatki,

u - przyjmuje kolejno postać $\frac{\partial k}{\partial G_w}, \frac{\partial k}{\partial t_1}, \frac{\partial k}{\partial I_1}, \frac{\partial k}{\partial P_1}$.

Przykład obliczeniowy oparto o dane konstrukcyjne i parametry układu w stanie nominalnym dla pierwszego podgrzewacza niskoprężnego projektowanego turbozespołu dla bloku jądrowego WWER-440 [2]. Wyniki zamieszczone w tabelicy 1 potwierdziły fakt zróżnicowania wpływu badanych zmiennych na wartość funkcji.

Tabelica 1

Wartości pochodnych cząstkowych

$\left\ \frac{\partial k}{\partial G_w} \right\ _H$	$\left\ \frac{\partial k}{\partial t_1} \right\ _H$	$\left\ \frac{\partial k}{\partial P_1} \right\ _H$	$\left\ \frac{\partial k}{\partial I_1} \right\ _H$
0,061	43,146	281,265	0,032

Bardzo mała wartość pochodnej cząstkowej $\frac{\partial k}{\partial I_1}$ ($\left\| \frac{\partial k}{\partial I_1} \right\|_H = 0,032$), w połączeniu z niewielkimi zmianami entalpii pary upustowej w całym zakresie obciążeń bloku upoważniają do

stwierdzenia, że wpływ parametru I_1 na zmienność funkcji k jest z praktycznego punktu widzenia pomijalnie mały. Umożliwia to eliminację parametru I_1 ze zbioru zmiennych niezależnych. Tak więc ostateczna postać charakterystyki dla podgrzewacza z kondensującym się czynnikiem grzejącym uwzględnia następującą zależność współczynnika przenikania ciepła od wejściowych parametrów termodynamicznych i wydatku czynnika ogrzewanego

$$k = k[G_w(P), t_1(P), P_1(P)]. \quad (8)$$

3. METODYKA PRZYGOTOWANIA DANYCH DO WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK

W praktyce istnieją trzy podstawowe możliwości określania zależności opisanych związkami (2), których znajomość jest niezbędna dla aproksymacji równania (8):

- na podstawie wyników badań układu regeneracji dokonywanych podczas pracy bloku przy zmiennym obciążeniu (np. pomiary gwarancyjne),
- na podstawie wyników obliczeń bilansów ciepła i masy turbozespołu przy różnych obciążeniach,
- przez automatyczny dobór parametrów dokonywany na podstawie znanych wartości nominalnych i informacji o przewidywanym przebiegu poszukiwanych funkcji.

Oba pierwsze przypadki nie wymagają komentarza, gdyż znany zestaw \underline{P}_t może być bezpośrednio wprowadzony jako dane do programu realizującego obliczanie współczynnika przejmowania ciepła k przy użyciu modelu rozwiniętego. Najczęściej jednak brak jest podobnych informacji, gdyż obliczenia tego typu występują w fazie projektowej, co eliminuje możliwości ewentualnych pomiarów (przypadek pierwszy). Z kolei uzyskane w wyniku obliczeń charakterystyki mają umożliwiać obliczenia bilansowe, rzadko więc wyniki tych ostatnich są znane na początku (przypadek drugi). Pozostaje więc przypadek trzeci

a sugerowany tok postępowania można na podstawie dokonanej analizy warunków pracy szeregu bloków [11] i dotychczasowych rozważań sprowadzić do następujących zaleceń szczegółowych:

1) eliminuje się ze zbioru \underline{P}_t wielkości przyjęte jako stałe w całym zakresie obciążeń (I_1, I_S) i zmienne zależne (p_1, G_S);

2) zmienność pozostałych parametrów można z dostateczną dokładnością przyjmować jako liniową, co sprowadza równania (2) do postaci:

$$G_w = \alpha_G G_w^n \left(\frac{P}{P^n} \right),$$

$$t_1 = (1 - \alpha_t) t_1^n + \alpha_t t_1^n \left(\frac{P}{P^n} \right), \quad (9)$$

$$P_1 = \alpha_P P_1^n \left(\frac{P}{P^n} \right),$$

gdzie:

G_w^n, t_1^n, P_1^n - parametry bloku dla stanu nominalnego.

3. Współczynniki proporcjonalności można przyjmować jako:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_G &= 1 \\ \alpha_P &= 1 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{- co wynika z prawa przelotności przez układ} \\ \text{łopatkowy turbiny,} \end{array} \quad (10)$$

$\alpha_t = 0,25$.

Zgodnie z powyższymi zaleceniami automatyczny dobór parametrów \underline{P}_t może zostać przeprowadzony przez zestawianie kombinacji wielkości określonych równaniem (9) dla wartości P uzyskanych przez podział pełnego zakresu zmiany obciążeń ($P_{\min} \div P_{\max}$) na zadaną liczbę części. Tok postępowania powinien być następujący:

- przyjmuje się obszar pracy podgrzewacza, tzn. P_{\min} i P_{\max} oraz ustala wartości współczynników proporcjonalności w równaniach (9),
- wychodząc z zestawu danych dla obciążenia nominalnego (G_w^n, t_1^n, P_1^n), po założeniu kroku zmian ΔP ustalającego punkty podziału rozpatrywanego obszaru, oblicza się wartości parametrów (zmiennych niezależnych) w tych punktach, co daje siatkę wielkości wejściowych (rys.4);

wi końcową część działań zmierzających do ustalenia charakterystyki opisanej zależnością (8). Wykonuje się to wg schematu przedstawionego na rysunku 5 przez minimalizację funkcji

$$F_c = \sum_{i=1}^n |k_i^r - k_i^a|^2, \quad (11)$$

gdzie:

k_i^r - wartość współczynnika przenikania ciepła z n-wierszowej tablicy wyjściowej (uzyskana z obliczeń modelem rozwiniętym),

k_i^a - wartość współczynnika przenikania ciepła wyliczona w oparciu o założoną funkcję aproksymującą o postaci:

$$k_i^a = k(G_w, t_1, P_1) = \sum_{j=0}^m a_j \varphi_j(G_w, t_1, P_1), \quad (12)$$

gdzie:

φ_j - funkcja bazowa decydująca o błędzie aproksymacji, której wybór był celem prowadzonych eksperymentów numerycznych.

Obliczenia prowadzono dla kilku baz:

- baza funkcji liniowych:

$$\varphi_0 = 1, \varphi_1 = G_w, \varphi_2 = t_1, \varphi_3 = P_1,$$

- baza funkcji logarytmicznych:

$$\varphi_0 = 1, \varphi_1 = \ln(G_w), \varphi_2 = \ln(t_1), \varphi_3 = \ln(P_1),$$

- baza wielomianów \leq drugiego stopnia:

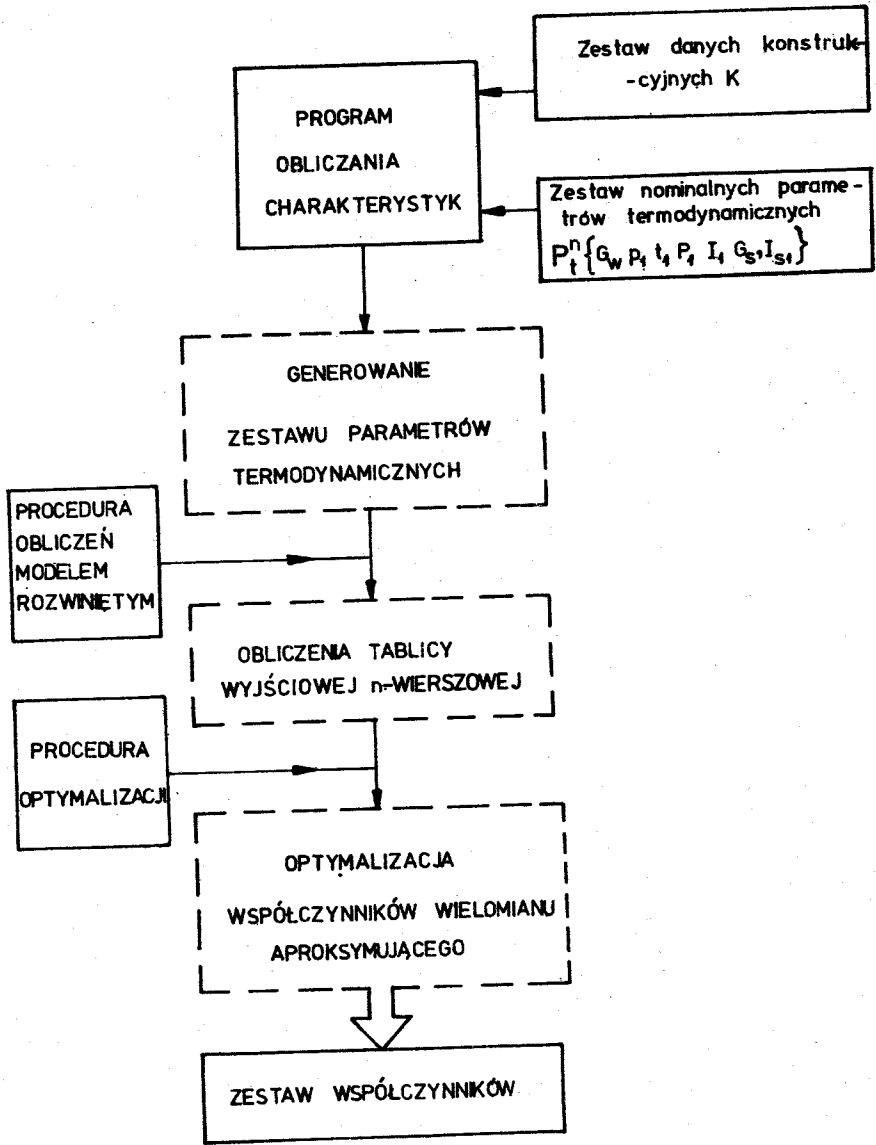
$$\varphi_0 = 1, \varphi_1 = G_w, \varphi_2 = t_1, \varphi_3 = P_1, \varphi_4 = G_w t_1$$

$$\varphi_5 = G_w P_1, \varphi_6 = t_1 P_1, \varphi_7 = G_w^2, \varphi_8 = t_1^2,$$

$$\varphi_9 = P_1^2,$$

- baza wielomianów \leq trzeciego stopnia:

$$\varphi_0 = 1, \varphi_1 = G_w, \varphi_2 = t_1, \varphi_3 = P_1, \varphi_4 = G_w t_1$$



Rys.5. Organizacja procesu aproksymacji charakterystyk

$$\varphi_5 = G_w P_1, \quad \varphi_6 = t_1 P_1, \quad \varphi_7 = G_w^2, \quad \varphi_8 = t_1^2,$$

$$\varphi_9 = P_1^2, \quad \varphi_{10} = G_w P_1 t_1, \quad \varphi_{11} = G_w^2 t_1, \quad \varphi_{12} = G_w t_1^2,$$

$$\varphi_{13} = G_w^2 P_1, \quad \varphi_{14} = G_w P_1^2, \quad \varphi_{15} = t_1^2 P_1, \quad \varphi_{16} = t_1 P_1^2,$$

$$\varphi_{17} = G_w^3, \quad \varphi_{18} = t_1^3, \quad \varphi_{19} = P_1^3$$

Wyniki przykładowych obliczeń dla pięciu podgrzewaczy niskoprężnych projektowanego turbozespołu dla bloku jądrowego WWER-440 [2] przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Błędy średnie kwadratowe aproksymacji dla poszczególnych baz

Wymiennik \ Baza	1	2	3	4	5
Liniowa	0,312	0,207	0,310	0,360	0,285
Logarytmiczna	0,188	0,0811	0,135	0,108	0,0829
Kwadratowa	0,0445	0,0288	0,0385	0,0209	0,0206
Sześcienne	0,0122	0,0233	0,0109	0,00546	0,00183

4. METODYKA OPRACOWANIA MODELI UPROSZCZONYCH

Uwzględniając uzyskane rezultaty (tabl.2) i uzasadnione dążenie do kompromisu pomiędzy dokładnością wyników z jednej strony i prostotą obliczeń z drugiej, można z pełnym przekonaniem zarekomendować aproksymację średniokwadratową w bazie wielomianów stopnia ≤ 2 jako odpowiednią metodę przybliżania przy użyciu metod komputerowych uniwersalnej charakterystyki podgrzewacza opisanej funkcją (8).

Umiejętność budowy takich charakterystyk, a w konsekwencji wykorzystanie ich przy modelowaniu, w sposób zasadniczy skraca proces obliczeniowy [6] nie prowadząc do niedokładności, jakich źródłem są zbyt uproszczone formuły opisujące zmienność współczynnika przenikania ciepła w warunkach pracy odmiennych od nominalnych, zalecane przez takich autorów jak Sokołow [9] lub Szubin [10].

Wobec powszechności występowania w układach regeneracji jednostrefowych podgrzewaczy regeneracyjnych z kondensującym się czynnikiem grzejnym, w pierwszym rzędzie dokonano próby zastosowania zależności (8) przy obliczeniach komputerowych takich właśnie urządzeń. Za punkt wyjścia przyjęto znane formuły [7] umożliwiające rozwiązanie typowego zadania obliczeniowego dla podgrzewacza, tzn. pozwalające na obliczenie końcowej temperatury podgrzewanej wody (t_2) i wydatku pary grzejnej (G_p), przy zadanych parametrach termodynamicznych czynników wymieniających ciepło na wlocie do podgrzewacza, znanym wydatku podgrzewanej wody i doprowadzanych skroplin a także ustalonej powierzchni wymiany ciepła. Wspomniane zależności uzyskuje się przez rozwiązanie układu równań bilansowych

$$G_w(i_2 - i_1) = G_p(I_1 - I_2) + G_s(I_{s1} - I_2) = F k \Delta t_{sr} \lg, \quad (13)$$

gdzie:

G_w, i_1, i_2 - wydatek, entalpia wlotowa i wylotowa czynnika podgrzewanego,

G_p, I_1, I_2 - wydatek, entalpia wlotowa i wylotowa kondensującej się pary,

G_s, I_{s1} - wydatek, entalpia wlotowa skroplin z poprzedniego stopnia,

F - powierzchnia wymiennika,

$k, \Delta t_{sr} \lg$ - współczynnik przenikania ciepła, średnia logarytmiczna różnica temperatur.

Rozwiązanie równań (13) podawane jest w literaturze przy pominięciu strat ciśnienia po stronie pary grzejnej ($\Delta P = 0$), co umożliwia zapis średniej logarytmicznej różnicy temperatur w postaci

$$\Delta t_{sr} \lg = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{T_n - t_1}{T_n - t_2}\right)}, \quad (14)$$

gdzie:

T_n - stała temperatura nasycenia

i po prostych przekształceniach prowadzi do poszukiwanych zależności:

$$t_2 = T_n - (T_n - t_1) e^{-\left(\frac{FK}{G_w c_p}\right)}, \quad (15)$$

$$G_p = \frac{G_w(i_2 - i_1) - G_s(I_{s1} - I_2)}{I_1 - I_2}, \quad (16)$$

gdzie:

c_p - średnie ciepło właściwe ogrzewanej wody.

Równania (15) i (16) pozwalają na podstawie charakterystyki (8) na bezpośrednie wyznaczenie szukanych wielkości.

W trakcie prac prowadzonych nad modelowaniem podgrzewaczy regeneracyjnych okazało się jednak, że traktując powyższe równania jako podstawę dalszych działań można doprowadzić do uściślenia procesu obliczeniowego, unikając zbędnych rozbieżności (tabl.3) bez nadmiernego przedłużania czasu obliczeń (tabl.4) i rozbudowy samego modelu. Pozostawia się mianowicie stratę ciśnienia po stronie pary ΔP i prowadzi rozważania podobne do przytoczonych powyżej.

Tablica 3

Wpływ spadku ciśnienia kondensującej się pary ΔP na wyniki obliczeń (na przykładzie podgrzewacza PN-1 bloku 360 MW, $P_1 = 0,382$ bar.)

Obciążenie bloku [%]	40	60	80	100	120	ΔP
t_2 [°C]	54,821	61,357	65,792	68,955	71,176	0
	54,726	61,201	65,578	68,705	70,915	0,05P ₁
	54,599	61,023	65,347	68,439	70,632	0,10P ₁
	54,473	60,823	65,099	58,151	70,319	0,15P ₁
G_p [kg/s]	3,8711	6,5535	9,3119	11,981	13,813	0
	3,8475	6,5028	9,2351	11,854	13,654	0,05P ₁
	3,8217	6,4474	9,1426	11,722	13,489	0,10P ₁
	3,7918	6,3870	9,0420	11,574	13,312	0,15P ₁

Tablica 4

Porównanie czasu obliczeń (w sekundach) 5 stanów obciążeń podgrzewacza PN-1 przy użyciu modelu rozwiniętego, całkowicie uproszczonego (z pominięciem spadku ciśnienia P) i uproszczonego (z uwzględnieniem spadku ciśnienia P)

Obciążenie Typ modelu	40	60	80	100	120
Model rozwinięty	1,54	1,58	1,73	1,56	1,68
Model uproszczony $\Delta P = 0$	0,99	1,00	0,98	0,98	0,99
Model uproszczony $\Delta P = 0,1P_1$	1,00	1,06	1,11	1,20	1,00

Układ równań bilansowych (13) nie ulega zmianie, natomiast zależność opisującą średnią logarytmiczną różnicę temperatur (14) należy zapisać jako

$$(14') \quad \Delta t_{sr \lg} = \frac{(T_{n1} - t_2) - (T_{n2} - t_1)}{\ln \left(\frac{T_{n1} - t_2}{T_{n2} - t_1} \right)},$$

gdzie:

T_{n1}, T_{n2} - temperatury kondensującej się pary na wlocie i wylocie.

Taka postać równania (14') uniemożliwia uproszczenia, które doprowadziły do uzyskania zależności (15).

Oznaczając

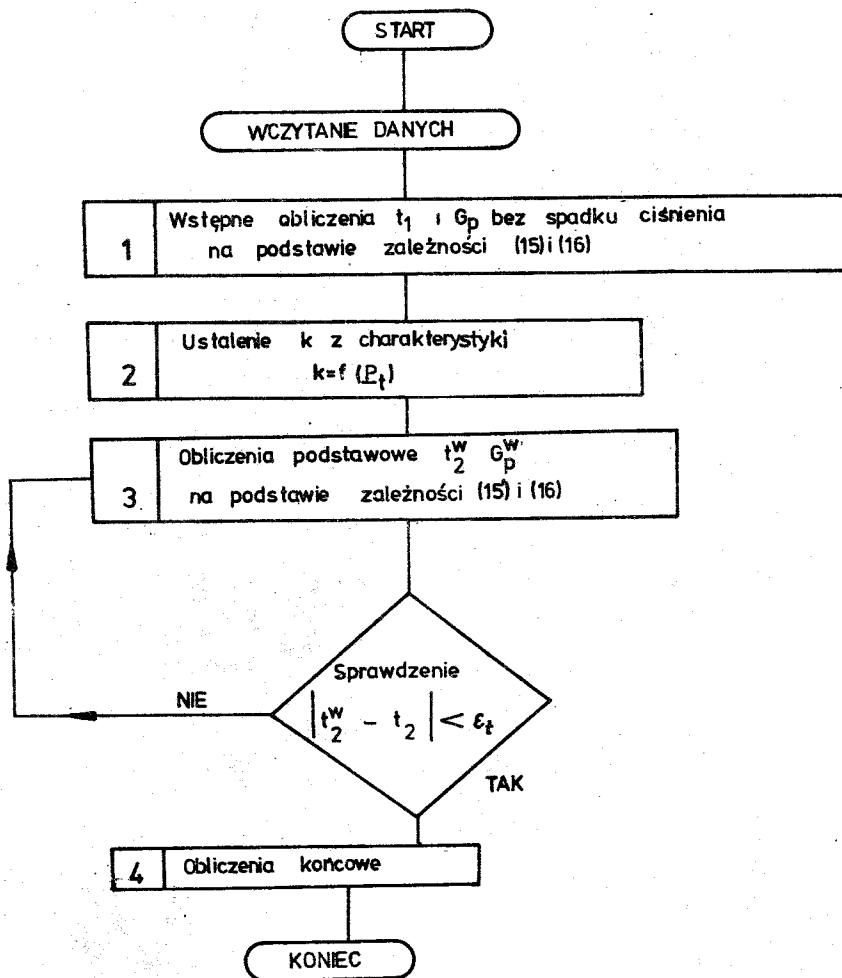
$$Z = \frac{T_{n1} - T_{n2}}{t_2 - t_1} \quad (17)$$

można wzór (15) sprowadzić do postaci

$$(15') \quad t_2 = T_{n1} - e^{-\frac{Fk(1-Z)}{G_w c_p}} \cdot (T_{n2} - t_1)$$

pozostawiając nie zmieniony wzór (16).

Pozwala to na realizację obliczeń wg prostego schematu blokowego (rys.6), a zestawienie wyników obliczeń 5 stanów obciążeń wszystkich podgrzewaczy niskoprężnych bloku 360MW przedstawiono w tabelicy 5.



Rys.6. Schemat blokowy obliczeń podgrzewacza jednostrefowego przy użyciu modelu uproszczonego

Jak widać z rys.6 w porównaniu ze schematem blokowym obliczeń modelu rozwiniętego (rys.1) ograniczono liczbę pętli iteracyjnych do jednej. Jej pozostawienie jest konieczne ze względu na występującą zależność spadku ciśnienia pary grzej-

Tablica 5

Porównanie wyników obliczeń temperatury t_2 [°C] w podgrzewaczach PN-1 ÷ PN-4 bloku 360 MW dla 5 stanów obciążeń przy użyciu modelu rozwiniętego i uproszczonego

Wymienniki \ Obciążenie bloku [%]		40	60	80	100	120
PN 1	model rozwinięty	54,821	61,357	65,792	68,955	71,176
	model uproszczony	54,926	61,490	66,009	69,253	71,359
PN 2	model rozwinięty	77,464	86,013	91,886	96,079	98,808
	model uproszczony	77,546	86,075	92,003	96,251	98,891
PN 3	model rozwinięty	107,28	118,29	125,96	131,63	135,47
	model uproszczony	107,31	118,30	125,99	131,71	135,47
PN 4	model rozwinięty	123,64	136,45	145,93	153,48	158,67
	model uproszczony	123,66	136,45	145,93	153,49	158,63

nej od nie znanego w początkowej fazie obliczeń wydatku. Z przebiegu obliczeń wynika, że proces jest silnie zbieżny i nie wydłuża zasadniczo czasu obliczeń, a zamieszczone w tablicy 5 wyniki świadczą o zadowalającej dokładności procesu.

Podobne postępowanie zastosowano przy modelowaniu podgrzewaczy dwustrefowych z chłodnicą skroplin, przyjmując że do obliczeń strefy kondensacji wykorzystana się przytoczone powyżej rozumowanie. Przy takim założeniu pozostaje do roztrzygnięcia sprawa szybkiego obliczenia chłodnicy skroplin, tzn. strefy, w której wymiana ciepła następuje pomiędzy ciepłymi czynnikami roboczymi. Dobierając odpowiednie zależności kierowano się z jednej strony omawianymi wcześniej założeniami co do zestawu danych, wynikłymi z typowego zadania obliczeniowego wymiennika jako całości, z drugiej zaś przyjętym założeniem o zastosowaniu do dalszej fazy obliczeń wzorów (15')

i (16). W tej sytuacji wskazane okazało się użycie zależności podanych m.in. przez Bosnjakovića [1] i Lebediewa [7], które umożliwiają łatwe określenie końcowych temperatur czynników wymieniających ciepło bez zmiany stanu skupienia:

$$T_{22} = T_{12} - (T_{12} - t_{21})\Phi, \quad (18)$$

$$t_{11} = t_{21} + (T_{12} - t_{21})\frac{\Phi}{R}, \quad (19)$$

gdzie:

$$\Phi = \frac{1 - e^{-(1-\frac{1}{R})S}}{1 - \frac{1}{R}e^{-(1-\frac{1}{R})S}}, \quad (20)$$

$$S = \frac{k F}{G_p C_p}, \quad (21)$$

$$R = \frac{G_w c_p}{G_p C_p}. \quad (22)$$

Analiza powyższych wzorów pokazuje, że dla realizacji obliczeń przy ich pomocy, również w tej strefie niezbędne jest wykorzystanie możliwie prostej zależności, opisującej związek współczynnika przenikania ciepła z niektórymi parametrami konstrukcyjnymi i cieplno-przepływowymi. Celowe okazało się użycie do tego celu uproszczonych wzorów podanych przez Nisterowicza [8], słusznych w całym zakresie zmian parametrów odpowiadających warunkom pracy części niskoprężnej układu regeneracji

$$k_2 = \frac{B_t w_t^{0,8}}{\left[1 + \frac{B_t}{B_m} \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right)^{0,8} x_w \right] d_w^{0,2}}, \quad (23)$$

gdzie:

B - funkcja pomocnicza o postaci

$$B = 1400 + 18t - 0,035 \cdot t^2,$$

przy czym B_t - odpowiada wartości tej funkcji przy przepływie w rurkach, określonej dla średniej temperatury czynnika $t = 0,5 (t_{11} + t_{21})$,

B_m - odpowiada wartości funkcji przy przepływie w przestrzeni międzyrurowej dla średniej temperatury czynnika $t = 0,5 (T_{12} + T_{22})$,

w_t - prędkość wody w rurkach,

$\Delta t, \Delta T$ - różnice temperatur czynnika ogrzewanego i grzejącego,

d_w - wewnętrzna średnica rurek,

X_ψ - wielkość pomocnicza

$$X_\psi = \left(\frac{F_m}{F_t} \right)^{0,8} \left(\frac{d_h}{d_w} \right)^{0,2},$$

gdzie:

F_m, F_t - powierzchnie przekrojów przepływowych w przestrzeni międzyrurowej i w rurkach,

d_h - średnica hydrauliczna przestrzeni międzyrurowej.

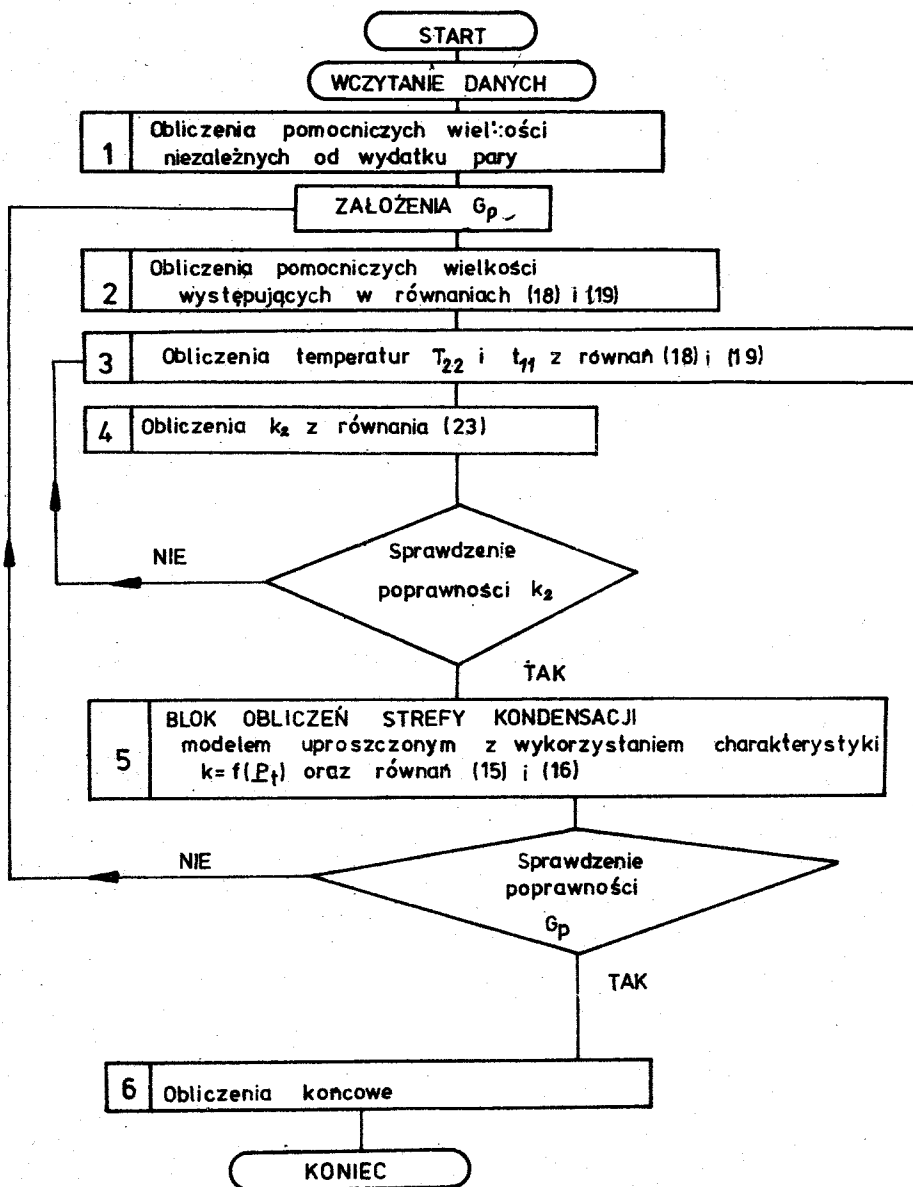
Połączenie zależności (18) i (19) z równaniem (23) pozwoliło na budowę uproszczonego modelu, którego obliczenie prowadzono wg schematu blokowego, przedstawionego na rys.7.

Pozostawienie dwóch pętli iteracyjnych okazało się niezbędne zarówno ze względu na konieczność wstępnego założenia wydatku czynnika roboczego G_p , który może być wyliczony dopiero w końcowej fazie (przy liczeniu strefy kondensacji), jak też wobec potrzeby doprowadzenia do zgodności założonej przed obliczeniem w bloku 3 i obliczonej w bloku 4 wartości współczynnika przenikania ciepła w strefie chłodnicy skroplin (k_2).

Tablica 6

Porównanie czasów obliczeń (w sek.) 5 stanów obciążeń podgrzewacza dwustrefowego przy użyciu modelu rozwiniętego i uproszczonego

Obciążenie bloku [%]	40	60	80	100	120
Typ modelu					
Model rozwinięty	03,48	04,02	05,12	04,78	04,90
Model uproszczony	01,66	01,64	01,56	01,48	01,16



Rys.7. Schemat blokowy obliczeń podgrzewacza dwustrefowego z chłodnicą skroplin przy użyciu modelu uproszczonego

Wyniki obliczeń [6] a także porównanie czasów liczenia modelem rozwiniętym i uproszczonym 5 stanów obciążeń przykładowego podgrzewacza dwustrefowego (tablica 6), pozwalają, podobnie jak w przypadku podgrzewacza jednostrefowego, na pozytywną ocenę przedstawionej metody obliczeń.

Uzyskane tą drogą modele uproszczone pozwalają na uzyskanie wyników, których błąd względny w porównaniu z wynikami obliczeń modelami rozwiniętymi nie przekracza 1% (w większości przypadków 3%). Potwierdza to celowość wykorzystania charakterystyk i zbudowanych przy ich pomocy modeli uproszczonych do modelowania matematycznego i obliczeń komputerowych urządzeń tego typu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B o s n j a k o v i ć: Technische thermodynamik t.I.
- [2] K u r p i s z Ł., J a n k o w s k i Zb. i inni: Modelowanie układu cieplnego i głównych urządzeń elektrowni jądrowej z reaktorem typu WWER dla ustalonych warunków pracy przy różnych obciążeniach. Cz.II - Elementy zadania POLAT. Tom 5: Wymienniki regeneracyjne. Opracowanie ITC PW. Warszawa 1975.
- [3] K u r p i s z Ł.: Modelowanie matematyczne regeneracyjnych wymienników ciepła z uwzględnieniem zmiennych warunków pracy. Rozprawa doktorska PW. Warszawa 1972.
- [4] J a n k o w s k i Zb., K u r p i s z Ł.: Modelowanie matematyczne regeneracyjnych wymienników ciepła. Archiwum Energetyki 3/1974.
- [5] K u r p i s z Ł., J a n k o w s k i Zb. i inni: Opracowanie rozwiniętych modeli wymienników, algorytmów obliczeń oraz metodyki postępowania przy określaniu charakterystyk regeneracyjnego wymiennika ciepła. Opracowanie ITC PW. Warszawa 1978.
- [6] K u r p i s z Ł., J a n k o w s k i Zb. i inni: Opracowanie programów obliczeń wymienników ciepła z wykorzystaniem modeli rozwiniętych i charakterystyk. Opracowanie ITC PW. Warszawa 1979.

- [7] Le b i e d i e w P.D.: Wymienniki ciepła, urządzenia suszarnicze i chłodnicze. WNT. Warszawa 1968.
- [8] N e s t e r o v i č N.: Universalnaja nomogramma dla podbora vodovodjannyh podogrevatelej dla sistem gorjačego vodosnabženija. Izvjestja vysšykh učebnyh zavedenij 2/71.
- [9] S o k o l o v E.J.: Teplovyje charakteristiki teploobmennych apparatov. Teploenergetika 5/58.
- [10] Š u b i n E.P.: Teplovyje charakteristiki teploobmennikov. Vodosnabženije i sanitarnaja tehnika 6/62.
- [11] P r a w d z i k E., S m y k A., P o r t a c h a J.: Charakterystyki przepływowe maszyn, urządzeń, zespołów i układu cieplnego elektrowni jądrowej z reaktorami WWER-440. Opracowanie ITC PW. Warszawa 1977.

НОВЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕКУПЕРАЦИОННЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

В работе приводится новая концепция использования характеристик для математического моделирования рекуперационных подогревателей. Оговариваются принципы построения характеристик, получаемых в результате предварительного исключения независимых переменных по методу среднеквадратичной аппроксимации. Оценивается пригодность аппроксимации, осуществляемой на основе различных базовых функций, для определения хода характеристик. Сравняются результаты вычислений, полученных при использовании расширенных и упрощенных моделей, построенных с учетом функциональных зависимостей, полученных в процессе аппроксимации.

NEW METHODS OF THE CALCULATION OF THE FEEDWATER HEATERS WITH THE APPLICATION OF THE CHARACTERISTICS

S u m m a r y

A new conception of using of the characteristics for the mathematical modelling of the feedwater heaters is presented.

The principles of the characteristics construction and the methods of the elimination of the independent variables are discussed.

The usefulness of the approximation for determination of the characteristics shape is estimated.

The comparison of the results of the computer calculations of the full scale models and the models simplified by the characteristics is shown.

Rękopis dostarczono w listopadzie 1980 r.