

Łukasz Kurpisz, Zbigniew Jankowski, Maciej Kulig, Krzysztof Urbaniec

Instytut Techniki Ciepłej

OPTIMALIZACJA UKŁADU REGENERACJI BLOKU DUŻEJ MOCY

W artykule przedstawiono podstawowe zasady przyjęte przy formułowaniu zadania optymalizacji układu regeneracji. Omówiono zakres decyzji objętych optymalizacją, ustalając równocześnie kryterium oceny zgodnie z obowiązującymi zasadami rachunku techniczno-ekonomicznego. Po dokonaniu analizy numerycznych cech zadania przyjęto koncepcję budowy modelu matematycznego układu regeneracji oraz przedstawiono algorytm rozwiązania, w tym numeryczną metodę optymalizacji. Przedstawiono również przykładowe wyniki obliczeń.

1. WSTĘP

Wśród zagadnień prognozowania i projektowania rozwoju energetyki szczególnie istotne są problemy nowych bloków energetycznych.

Zakupiona licencja firmy BBC przewiduje produkcję turbin 360 MW i bloki o tej mocy będą sukcesywnie wprowadzane do eksploatacji w latach osiemdziesiątych, stając się podstawowym wyposażeniem maszynowym naszych elektrowni. Wynika stąd istotne znaczenie problematyki doskonalenia tych jednostek. Nie można przy tym założyć, że licencyjna konstrukcja turbiny będzie już na wstępie poddana procesom modernizacyjnym. To samo dotyczy drugiego podstawowego elementu bloku, tzn. ko-

cia. Doskonalenie bloku powinno oprzeć się w tej sytuacji przede wszystkim na ocenie układu regeneracji i poszukiwaniu możliwości ulepszeń zarówno struktury układu regeneracji, jak też jego elementów. Należy pamiętać, że był on pierwotnie projektowany dla warunków odmiennych od krajowych, przy inaczej kształtujących się proporcjach kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Pozwala to przypuszczać, że w rozwiązaniu układu regeneracji istnieją rezerwy umożliwiające obniżenie kosztów inwestycyjnych a także poprawę sprawności bloku. Jest to podstawowa przesłanka determinująca zakres prac podjętych celem budowy i uruchomienia systemu programów optymalizacji układu regeneracji bloku dużej mocy.

2. ZAKRES DECYZYJNY OPTIMALIZACJI

W zagadnieniach optymalizacji wszelkich układów cieplnych mogą występować decyzje określające [1], [2]:

- strukturę, tj. zbiór elementów układu i połączeń między nimi,
- wielkości cieplno-przepływowe, tj. natężenie przepływu, parametry stanu czynników termodynamicznych itp.,
- rozwiązania konstrukcyjne elementów układu, tj. ich wymiary, przekroje przepływowe itp.

W przypadku układu regeneracji bloku energetycznego w zasadzie można poszukiwać optymalnych decyzji określających (odpowiednio do powyższego podziału):

- liczbę podgrzewaczy regeneracyjnych, schemat ich połączenia z upustami turbiny, schemat zrzutu skroplin, ew. sposób połączenia turbiny napędu pompy zasilającej,
- wielkości cieplno-przepływowe charakterystyczne dla układu, jak natężenia przepływu pary w upustach turbiny i temperatury wody zasilającej za poszczególnymi podgrzewaczami,
- rozwiązania konstrukcyjne: podgrzewaczy regeneracyjnych, odgazowycza i innych elementów układu.

Przegląd literatury przedmiotu (np. przegląd dokonany w [1]) wykazuje, że tak kompleksowo postawionego zadania optymalizacyjnego dziś jeszcze praktycznie nigdy się nie rozwiązuje jako jednego zadania matematycznego. Składa się na to kilka przyczyn. Po pierwsze dla optymalizacji struktury nie istnieją dotąd dostatecznie uniwersalne i skuteczne metody teoretyczne. Po drugie, nawet dla ustalonej struktury przy szczegółowo sformułowanym zadaniu jego wymiarowość jest duża, co wraz z innymi, specyficznymi utrudnieniami matematycznymi prowadzi do trudności w praktycznym rozwiązywaniu.

W obecnym stanie wiedzy i na podstawie istniejących doświadczeń, najbardziej skuteczne podejście do problemu optymalizacji układu regeneracji jest następujące [3]:

- optymalnej struktury poszukuje się przez porównywanie wariantów z pewnego znanego zbioru,
- dla ustalonej struktury (tj. dla każdego rozpatrywanego wariantu) rozwiązuje się zadanie poszukiwania optymalnych natężeń przepływu, temperatur i niektórych cech konstrukcyjnych elementów układu.

Należy podkreślić, że niektóre cechy konstrukcyjne podgrzewaczy, np. ilość stref, położenie poziome lub pionowe, czy zunifikowana (dla całego traktu regeneracyjnego lub jego części) średnica rurek powierzchni ogrzewalnej, mogą być wybrane (analogicznie jak w przypadku struktury) z odpowiedniego zbioru wariantów.

Przyjmując takie podejście uznano, że optymalizacja powinna doprowadzić do tego, aby dla każdej z rozpatrywanych struktur układu można było wyznaczyć optymalny sposób podgrzewu wody zasilającej i optymalne cechy konstrukcyjne podgrzewaczy regeneracyjnych. Porównując rozwiązania optymalne uzyskane dla każdego rozpatrzonego wariantu można wtedy także poszukiwać optymalnej struktury.

3. KRYTERIUM OCENY

Prezentowana metoda obliczeniowa może, zgodnie z intencją autorów, znaleźć w przyszłości zastosowanie m.in. jako narzędzie

dzie wyznaczenia optymalnych rozwiązań układów regeneracji przy opracowywaniu takich zamierzeń rozwojowych elektroenergetyki jak:

- budowa lub rozbudowa elektrowni,
- modernizacja elektrowni.

Stanowiło to podstawę do sformułowania kryterium oceny rozwiązań dostosowanego do obowiązujących w elektroenergetyce zasad oceny efektywności ekonomicznej inwestycji i zamierzeń rozwojowych [4], [5].

Jednak ze względu na ograniczenie merytorycznego zakresu pracy do układu regeneracji bloku energetycznego, celowe okazało się wyłączenie z rozważań problematyki kosztów innych części elektrowni.

Wychodząc z tych ogólnych założeń przyjęto następujący wskaźnik jakości układu regeneracji, wywodzący się z formuły względnej oceny efektywności

$$F = \frac{J(r + s) + K_s}{W T} + k_z \quad (1)$$

gdzie:

- J - wartość nakładów inwestycyjnych,
- r - stopa dyskontowa,
- s - średnia stawka amortyzacji,
- K_s - średnio-roczna wartość kosztów (bez paliwa, amortyzacji oraz oprocentowania kosztów stałych),
- W - efekt użytkowy, wyrażony mocą netto bloku,
- T - roczny czas użytkowania mocy netto,
- k_z - jednostkowe koszty paliwa (na jednostkę energii elektrycznej netto).

Wartość nakładów inwestycyjnych przyjęto bez uwzględnienia zamrożenia

$$J = K_b + \sum_i K_i \quad (2)$$

gdzie:

- K_b - koszt części cieplnej bloku wraz z elementami układu regeneracji, lecz bez podgrzewaczy,
- K_i - koszt i-tego podgrzewacza.

Ponieważ dla różnych możliwych rozwiązań układu regeneracji zmienna będzie tylko ta część kosztu bloku, która jest związana z niektórymi elementami układu regeneracji, koszt ten można zapisać wzorem

$$K_b = (K_b^0 - K_{ur}^0) + K_{ur} \quad (3)$$

gdzie:

K_{ur} - zmienna część kosztów układu regeneracji, obejmująca:

- koszty rurociągów i armatury,
- koszt pompy zasilającej,
- koszt pompy kondensatu,
- koszty pomp pomocniczych;

K_b^0 - oznacza koszt bloku, bez podgrzewaczy, w wariancie podstawowym (porównawczym);

K_{ur}^0 - koszt elementów układu regeneracji obejmujący (składniki jak wyżej) w wariancie podstawowym.

Koszty innych urządzeń związanych z układem regeneracji, jak skraplacz i odgazowywacz, uznano za stałe i w związku z tym stanowią one część składnika K_b^0 . Jeśli chodzi o koszt pojedynczego podgrzewacza regeneracyjnego, to uznano, że przy optymalizacji cech konstrukcyjnych może być szacowany np. na podstawie całkowitej powierzchni wymiany ciepła wg zależności:

$$K = A F^B, \quad (4)$$

gdzie:

$A = 110\ 000\ \text{zł/m}^2$ (dla podgrzewaczy WP),

$A = 16\ 000\ \text{zł/m}^2$ (dla podgrzewaczy NP),

$B = 0,7$.

Wartości współczynników A i B dobrano na podstawie analizy kosztów produkowanych w Polsce podgrzewaczy; błąd względny powyższego oszacowania kosztu nie przekracza 10%.

Inną możliwością jest szacowanie kosztu wg wzoru

$$K = k_j F, \quad (4a)$$

gdzie:

- F - powierzchnia wymiany ciepła [m^2],
 k_j - jednostkowy koszt 1 m^2 powierzchni wymiany ciepła [$z\$/m^2$]. Dla podgrzewaczy WF - $k_j = 23\ 000\ z\$/m^2$,
 dla podgrzewaczy NP - $k_j = 2600\ z\$/m^2$.

Odnosząc kosztu K_s przyjęto, że nie zawiera on żadnych składników nie związanych ściśle z częścią cieplną bloku i jest równy kosztom remontów kapitalnych i bieżących

$$K_s = a J, \quad (5)$$

gdzie:

- a - współczynnik łącznych kosztów remontów.
 Jednostkowy koszt paliwa określono wzorem

$$k_z = k_p \frac{1}{\eta_k \eta_{W_u}}, \quad (6)$$

gdzie:

- k_p - koszt jednostki masy paliwa,
 W_u - wartość opałowa paliwa,
 η_k - sprawność kotła.

Symbol η oznacza sprawność turbozespołu rozumianą jako

$$\eta = \eta_b - \frac{N_{pw}}{N_b}, \quad (7)$$

gdzie:

- η_b - sprawność brutto turbozespołu obejmująca sprawności: teoretyczną obiegu, wewnętrzną turbiny, mechaniczną turbiny, rurociągów, generatora,
 N_{pw} - moc potrzeb własnych bloku,
 N_b - moc brutto turbozespołu (na zaciskach generatora).

W tym miejscu należy zauważyć, że występująca we wzorze (1) moc netto W wynosi

$$W = N_b - N_{pw}. \quad (8)$$

Ponieważ przy różnych możliwych rozwiązaniach układu regeneracji zmienia się tylko ta część mocy potrzeb własnych, która bierze się ze zużycia mocy na pompowanie skroplin, można wyrazić moc potrzeb własnych jako

$$N_{pw} = (N_{pw}^0 - \Delta N_{pw}^0) + \Delta N_{pw}, \quad (9)$$

gdzie:

N_{pw}^0 - moc potrzeb własnych w wariancie podstawowym,

ΔN_{pw}^0 - moc pompowania skroplin w wariancie podstawowym,

ΔN_{pw} - aktualna wartość mocy zużywanej na pompowanie skroplin.

Obok wskaźnika jakości układu regeneracji konieczne okazało się sformułowanie wskaźnika jakości podgrzewacza regeneracyjnego dla indywidualnej oceny rozwiązań konstrukcyjnych podgrzewaczy. Wiąże się to z podstawową koncepcją [1], [3] formułującą problem optymalizacyjny jako zadanie optymalizacji wupoziomowej, w którym na niższym poziomie ocenia się elementy układu, a na wyższym poziomie - cały układ.

Podgrzewacz regeneracyjny nr i można oceniać wg kosztu rocznego obliczanego jako:

$$f_i = K_i(r + s) + N_{pi}^T k_e, \quad (10)$$

gdzie:

N_{pi} - moc zużywana na pompowanie wody przez i -ty podgrzewacz,

k_e - koszt energii elektrycznej zużywanej na potrzeby własne,

- pozostałe oznaczenia jak we wzorach (1) ÷ (9).

Wskaźniki jakości F oraz f_i (wyrażone wzorami (1) i (10) będące funkcjami tych wielkości, które uznano za zmienne decyzyjne przyjęto jako główną i pomocniczą funkcję celu.

Podkreślić należy, że ewentualna zmiana formuły względnej oceny efektywności inwestycji (1) nie miałaby wpływu na dalsze rozważania prowadząc jedynie do korekty ostatecznie przyjętej funkcji celu.

4. NUMERYCZNE CECHY PROBLEMU

Problem optymalizacji przedstawiony w p.2 jest złożonym zadaniem obliczeniowym i w sposób efektywny mógł zostać rozwiązany tylko na drodze numerycznej za pomocą najbardziej skutecznych algorytmów. Warunkiem użycia wyspecjalizowanych algorytmów optymalizacyjnych było nadanie problemowi odpowiedniej postaci matematycznej.

W najbardziej ogólnej postaci sformułowano go następująco: znaleźć n -wymiarowy wektor zmiennych decyzyjnych $\underline{x}^{\text{opt}}$, który spełnia warunki nierównościowe oraz równania

$$\varphi_j(\underline{x}) \leq 0 ; \quad j = 1, 2, \dots, m_n \quad (11a)$$

$$\psi_j(\underline{x}) = 0 ; \quad j = 1, 2, \dots, m_r \quad (11b)$$

i dla którego funkcja celu $F(\underline{x})$ przyjmuje wartość ekstremalną.

W rozpatrywanym problemie zmienne decyzyjne \underline{x} obejmują wybrane wielkości konstrukcyjne (charakteryzujące podgrzewacze regeneracyjne) oraz niektóre parametry termodynamiczne i natężenia przepływu nośników ciepła. Wśród zmiennych \underline{x} wyróżnić trzeba zmienne niezależne, charakteryzujące jednoznacznie wynik projektowania oraz zmienne zależne (zmienne stanu). Liczba zmiennych niezależnych $n - m_r$ jest liczbą stopni swobody problemu optymalizacyjnego.

Ograniczenia nierównościowe (11a) pojawiają się w związku z istnieniem pewnych warunków technicznych (ograniczenia cieplne i konstrukcyjne) oraz fizykalnych (warunki sensu fizycznego określonych wielkości).

Równania (11b) wynikają z zachowania ogólnych praw fizyki i zależności kinetycznych - bilansu masy i energii, zachowania pędu, przebiegu wymiany ciepła i masy, itp. Są to tzw. równania stanu; dla stanu ustalonego układu regeneracji są one równaniami algebraicznymi.

Funkcja $F(\underline{x})$, czyli wskaźnik jakości układu (patrz p.3) jest z formalnego punktu widzenia funkcją rzeczywistą, określoną na przestrzeni zmiennych decyzyjnych.

W problemach projektowania urządzeń i układów ciepłno-przepływowych model matematyczny określony przez funkcje $F(\underline{x})$, $\varphi(\underline{x})$ i $\psi(\underline{x})$ charakteryzuje się dwoma cechami wpływającymi w sposób istotny na stopień trudności problemu: złożonością i nieliniowością. Złożoność modelu wynika ze znacznej liczby zmiennych stanu, dużej liczby równań stanu oraz skomplikowanej postaci funkcji celu i równań stanu. Nieliniowość modelu wynika z nieliniowości funkcji celu, ograniczeń (11a) oraz nieliniowości niektórych równań stanu (11b).

Dodatkowym utrudnieniem obliczeniowym jest fakt, że uzyskanie analitycznych wyrażań na gradienty funkcji $F(\underline{x})$, $\varphi(\underline{x})$ i $\psi(\underline{x})$ jest praktycznie niemożliwy. Zmusza to do stosowania (w obliczeniach optymalizacyjnych) numerycznych metod iteracyjnych z grupy metod bezgradientowych.

Należy jednak zauważyć, że istnieją możliwości pewnych uproszczeń procesu obliczeniowego, związane z cechami struktury rozpatrywanego układu ciepłno-przepływowego. Istotne jest to, że powiązania pomiędzy poszczególnymi węzłami bilansowymi nie są silnie rozbudowane. Na rys. 1 pokazano przykładową strukturę równań bilansowych $g_j(\underline{z}) = 0$, $j = 1, 2, \dots, M$, typową dla takich układów (budowa modułowa). Macierz powiązań ma postać macierzy zbliżonej do blokowo-kątowej (wyrazy oznaczone kółkami są nieliczne). Własność ta miała istotne znaczenie dla ustalenia algorytmu obliczeniowego (punkt 6).

Modułowa struktura układu wpływa również na postać funkcji celu, nadając jej cechy addytywności. Umożliwia to zastosowanie dekompozycji problemu, a także ułatwia uzyskanie blokowej struktury algorytmu obliczeń funkcji celu. Łatwo wykazać, że funkcja $F(x)$ i funkcje $f_1(x)$ (p.3) są związane zależnością o postaci

$$F(\underline{x}) = F_1(\underline{t}) \sum_1^N f_1(\underline{t}, \underline{s}^i) + F_2(\underline{t}), \quad (12)$$

Nr węzła	j	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈	Z ₉	Z ₁₀	Z ₁₁	Z ₁₂	Z ₁₃	Z _{N1}	Z _N		
		1	1	x	x	x	x	x													
2	x		x	x	x	x							⊗								
3	x		x	x	x	x															
2	4				x	x	x	x	x									⊗	⊗		
	5				x	x	x	x	x												
	6				x	x	x	x	x									⊗			
3	7							x	x	x	x	x	x								
	8							x	x	x	x	x	x								
	9	⊗						x	x	x	x	x	x								
	10	⊗	⊗					x	x	x	x	x	x								
N		⊗	⊗															x	x	x	x
	M-1																	x	x	x	x
	M	⊗																x	x	x	x

Rys.1. Graficzna reprezentacja typowej struktury układu równań bilansowych $g_j(\underline{z}) = 0$ dla układów cieplnych, \underline{z} jest wektorem zmiennych opisujących układ

gdzie:

$\underline{t}, \underline{s}^i; i = 1, \dots, N$ - odpowiednio wybrane podzbiory w zbiorze zmiennych decyzyjnych \underline{x} ,

F_1, F_2 - znane funkcje.

Dzięki temu możliwa jest dwupoziomowa optymalizacja, o której wspomniano w p.3. Rozwiązania

$$\underline{x}^{\text{opt}} = (\hat{\underline{t}}, \hat{s}^1, \hat{s}^2, \dots, \hat{s}^N)$$

poszukuje się w dwóch poziomach:

$$F(\underline{x}^{\text{opt}}) = \min_{\underline{t}} \left\{ F_1(\underline{t}) \sum f_i(\underline{t}, \hat{s}^i) + F_2(\underline{t}) \right\},$$

$$f_i(\underline{t}, \hat{s}^i) = \min_{s^i} f_i(\underline{t}, s^i); \quad i = 1, \dots, N.$$

5. ZASADY BUDOWY MODELU MATEMATYCZNEGO UKŁADU REGENERACJI

Numeryczne rozwiązanie zadania optymalizacji wymagało przygotowania algorytmu, obliczającego wartości funkcji $\varphi(\underline{x})$, $\psi(\underline{x})$, $F(\underline{x})$ (por. p.6). Zasadniczą część algorytmu stanowiły zależności reprezentujące równania stanu wchodzące w skład modelu matematycznego układu regeneracji.

Przy opracowaniu równań stanu dla złożonego układu ciepło-przepływowego stosuje się znane zasady postępowania [6]. Układ dzieli się na szereg mniejszych części, tzw. węzłów bilansowych połączonych ze sobą w sposób odpowiadający rzeczywistej strukturze układu. Wielkości charakteryzujące połączenia międzywęzłowe (zmienne stanu) obejmują z reguły dwa parametry termodynamiczne oraz natężenie przepływu nośnika ciepła. W ten sposób model układu regeneracji można traktować jako zbiór równań bilansowych, odpowiadających poszczególnym węzłom bilansowym. Rodzaj i liczba równań dla danego węzła zależy od typu węzła.

Zestawienie wszystkich równań bilansowych w oryginalnej, nieprzetworzonej postaci i potraktowanie ich jako układu ograniczeń równościowych ($\psi_j(\underline{x}) = 0$, wzór 11b)) nie było wskazane ze względów numerycznych. Liczba równań bilansowych dla przeciętnie rozbudowanego układu regeneracji bloku energetycznego jest rzędu kilkuset [6]. Wspomniane postępowanie wprowadziłoby zatem bardzo dużą liczbę zmiennych zależnych, zwiększających wymiarowość problemu optymalizacyjnego.

Aby zmniejszyć rozmiary zadania i ułatwić obliczenia numeryczne, zgodnie z ogólnymi zasadami postępowania [7], dokonano eliminacji znacznej części zmiennych zależnych i odpowiadających im liczby równań. Eliminacja taka jest możliwa - bez koniecznego rozwiązywania układu równań - dzięki specyficznej strukturze macierzy powiązań (p.4) oraz liniowości niektórych równań. Mianowicie w układzie równań bilansowych można roz-

patrywać podukłady obejmujące równania dla poszczególnych węzłów bilansowych

$$g_j^{(k)} z^{(k)} = 0; \quad j = 1, 2, \dots, m_k, \quad (13)$$

gdzie:

$z^{(k)}$ jest n_k wymiarowym wektorem zmiennych występujących w równaniach stanu k -tego węzła.

Liczby naturalne m_k i n_k muszą spełniać relację $n_k \geq m_k$. Rozpatrując wektor zmiennych $z^{(k)}$ jako zbiór zmiennych niezależnych $w^{(k)} = w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_{q_k}^{(k)}$ oraz zmiennych zależnych $v^{(k)} = v_1^{(k)}, v_2^{(k)}, \dots, v_{r_k}^{(k)}$ równania (13) można przedstawić w postaci zależności

$$v^{(k)} = h^{(k)} \left(w^{(k)} \right), \quad (14)$$

gdzie:

$h^{(k)}$ - pewna funkcja wektorowa.

Liczby naturalne q_k i r_k spełniają warunek $q_k = m_k$, $r_k = n_k - m_k$. Zbiór zależności (14) jako model matematyczny k -tego węzła stanowi część składową ogólnego modelu układu.

Szczególnie korzystny jest taki podział zmiennych $z^{(k)}$ na zależne $v^{(k)}$ i niezależne $w^{(k)}$, aby przy pewnej ustalonej kolejności obliczeń węzłów zmienne zależne $v^{(j)}$, $j=1, 2, \dots, k$, były równocześnie zmiennymi niezależnymi dla węzłów $j=k+1, \dots, N$. Wtedy bowiem możliwe jest zapewnienie sekwencyjnej struktury algorytmu obliczeń, pokazanego schematycznie na rys.2. Na schemacie prostokąty reprezentują poszczególne części algorytmu odpowiadające związkowi (13), a linie łączące prostokąty określają sposób przesyłania informacji pomiędzy tymi częściami.

Dla ustalonej sekwencji obliczeń poszczególnych węzłów obliczane są kolejno zmienne

$$v^{(k)} = h^{(k)} \left(\underline{x}^{(k)}, u^{(k)} \right), \quad (15)$$

gdzie:

$$\left(\underline{x}^{(k)}, \underline{u}^{(k)} \right) = \underline{w}^{(k)}.$$

Ze względu na strukturę logiczną algorytmu wprowadzony został podział zmiennych niezależnych węzła $\underline{w}^{(k)}$ na dwie grupy:

- zmienne $\underline{u}^{(k)}$ należące do zbioru zmiennych zależnych $\underline{v}^{(k)}$,
gdzie
$$\underline{v}^{(k)} = \left\{ v_i^{(j)} : i = 1, 2, \dots, r_j, j < k \right\},$$
- pozostałe zmienne niezależne węzła $\underline{x}^{(k)}$.

Stosując omówiony teoretyczny schemat w konkretnych zadaniach obliczeniowych, można napotkać dwa czynniki utrudniające eliminację równań bilansowych:

- trudności z rozwikłaniem niektórych równań (13) ze względu na silne nieliniowości,
- odstępstwa od blokowo - kątowej struktury macierzy powiązań, utrudniające uzyskanie sekwencyjnej struktury algorytmu.

W pierwszym przypadku niektóre silnie nieliniowe równania muszą być wyłączone z procesu eliminacji i traktowane jako ograniczenia równościowe typu (11b). Ze względu na organizację algorytmu, zażności typu

$$v_i^{(k)} = g_j^{(k)}(\underline{x}^{(k)}, \underline{u}^{(k)})$$

wprowadzone są do modelu węzła. W takim przypadku wymiar wektora zmiennych niezależnych węzła spełnia relację $q_k > m_k$. Równocześnie w zbiorze ograniczeń równościowych problemu optymalizacyjnego muszą pojawić się ograniczenia typu

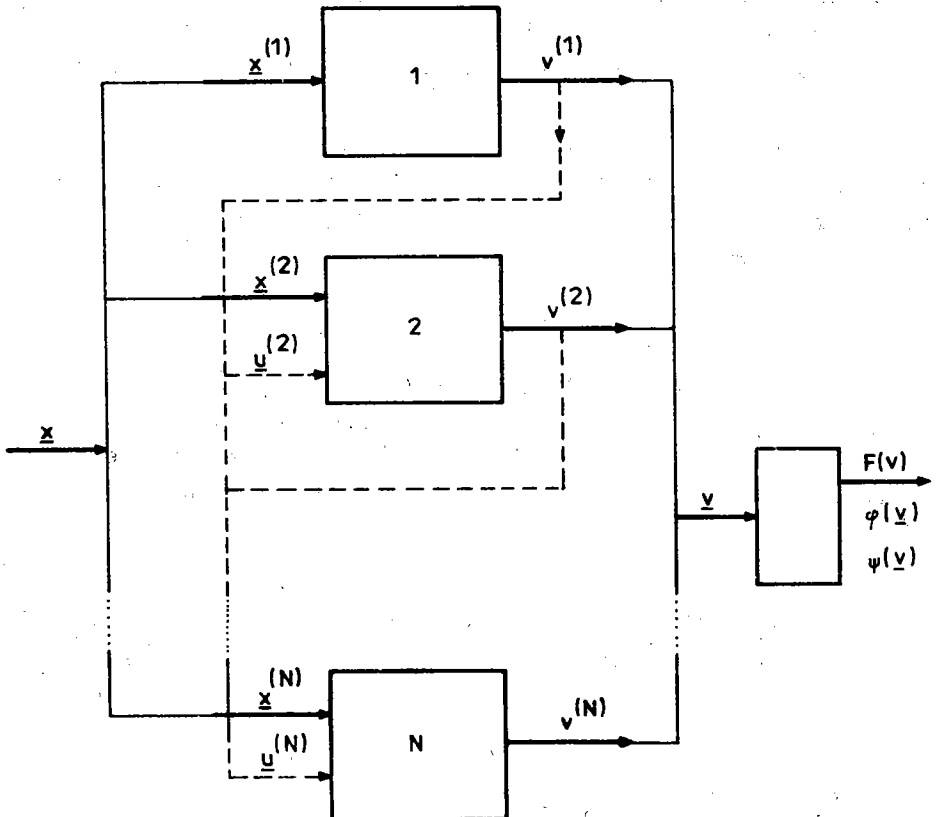
$$\psi_j(\underline{x}) = v_i^{(k)} = 0. \quad (16)$$

W drugim przypadku dla uzyskania sekwencyjnej struktury algorytmu obliczeń funkcji celu konieczne jest wprowadzenie pewnej liczby dodatkowych ograniczeń równościowych typu

$$\text{lub } \left. \begin{aligned} \psi_j(\underline{x}) &= x_i^{(k)} - v_i^{(j)} = 0 \\ \psi_i(\underline{x}) &= v_s^{(k)} - v_t^{(j)} = 0 \end{aligned} \right\} \text{ dla } \underline{v}^{(j)} \text{ nie należącego do } \underline{v}^{(k)}. \quad (17)$$

Przedstawiony sposób sekwencyjnego algorytmu przetworzenia równań stanu prowadzi zawsze do zmniejszenia wymiarowości problemu optymalizacji. Przy modelowaniu spotykanych w praktyce układów ciepło - przepływowych o niezbyt silnie rozbudowanej strukturze powiązań międzywęzłowych uzyskuje się znaczną redukcję liczby ograniczeń równościowych w stosunku do liczby równań bilansowych układu (równań stanu), tzn.

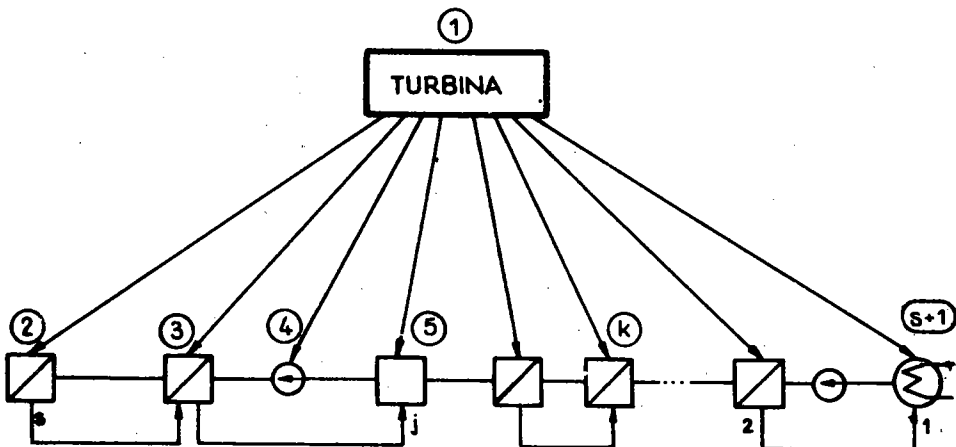
$$m_r \ll \sum_{k=1}^N m_k$$



Rys.2. Ideowy schemat algorytmu obliczeń funkcji celu dla układu wielowęzłowego. Oznaczenia wg opisu w tekście

W rozpatrywanym układzie regeneracyjnym bloku energetycznego wyróżnić można kilka podstawowych typów węzłów bilansowych:

- przepływowa część turbiny,
- wymiennik ciepła przeponowy (podgrzewacz) lub bezprzeponowy (odgazowywacz),
- skraplacz,
- pompa z napędem (elektrycznym lub turbinowym).

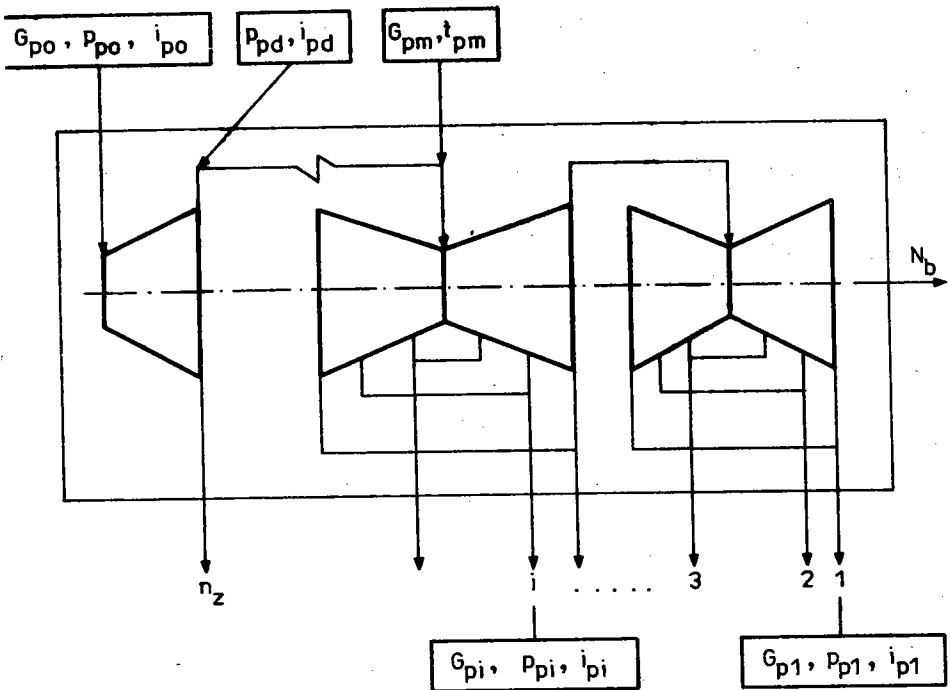


- wymiennik przeponowy
- odgazowywacz
- pompa
- skraplacz

Rys.3. Schemat połączeń międzywęzłowych dla układu regeneracji $j = 1, 2, \dots, s$ - numery elementów, k - numer węzła.

Schemat układu z zaznaczeniem powiązań międzywęzłowych pokazano na rys.3. Wielkości charakteryzujące powiązania międzywęzłowe dla dwóch podstawowych typów węzłów, podane zostały na rys.4 i 5.

Proponowany schemat algorytmu obliczeń układu, przedstawiono na rys.6. W algorytmie wyróżniono: blok obliczeń przepływowej części turbiny oraz blok obliczeń uogólnionego odbiornika pary (podgrzewacz przeponowy lub bezprzeponowy), pompa, skraplacz oraz blok obliczeń funkcji celu i ograniczeń.

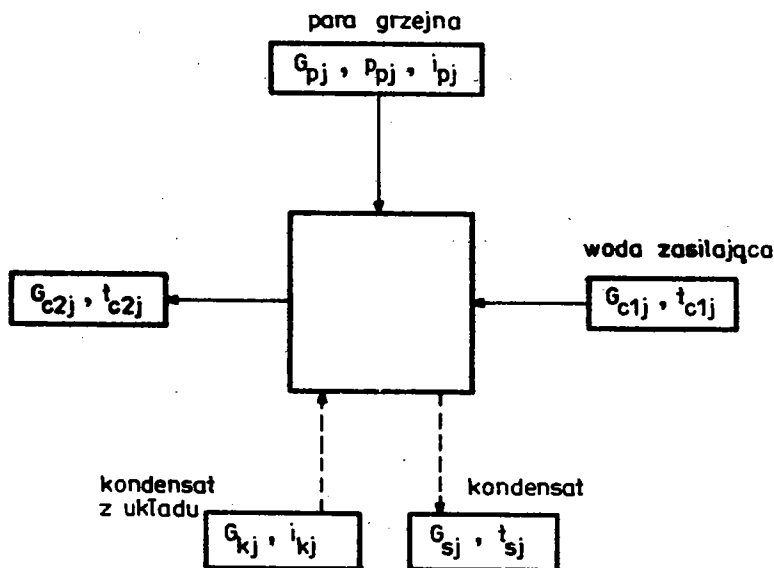


Rys.4. Węzeł bilansowy - przepływowa część turbiny:

- G_{po}, p_{po}, i_{po} - natężenie przepływu, ciśnienie, entalpia pary na wlocie do turbiny,
 p_{pd}, i_{pd} - ciśnienie, entalpia pary płynącej do przegrzewacza międzystopniowego,
 G_{pm}, t_{pm} - natężenie, temperatura pary na wylocie z przegrzewacza międzystopniowego,
 G_{pi}, p_{pi}, i_{pi} - natężenie, ciśnienie, entalpia pary w każdym z upustów regeneracyjnych,
 G_{p1}, p_{p1}, i_{p1} - natężenie, ciśnienie, entalpia pary płynącej do skraplacza,
 N_b - moc elektryczna brutto turbozespołu,
 n_z - liczba upustów regeneracyjnych

Kolejność wykonywania poszczególnych bloków obliczeń jest następująca:

- przepływowa część turbiny,
- kolejne odbiorniki w kolejności odwrotnej do kierunku przepływu wody w układzie regeneracyjnym,
- obliczenie funkcji celu oraz ograniczeń.



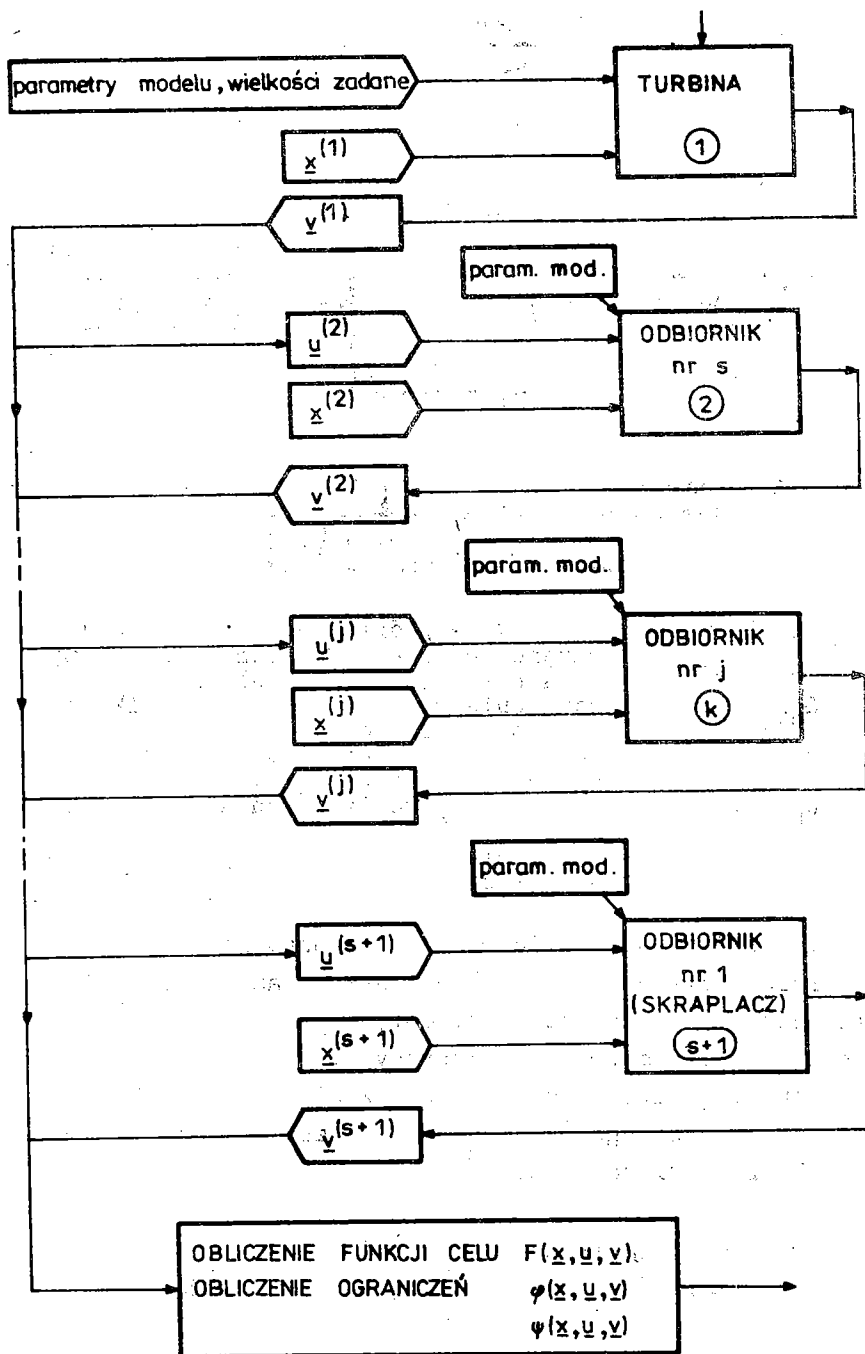
Rys.5. Węzeł bilansowy - podgrzewacz regeneracyjny:
 G_{pj}, P_{pj}, t_{pj} - natężenie przepływu, ciśnienie, temperatura pary grzejnej na wlocie,
 G_{c1j}, t_{c1j} - natężenie przepływu, temp. czynnika ogrzewanego na wlocie,
 G_{c2j}, t_{c2j} - natężenie przepływu, temperatura czynnika ogrzewanego na wylocie,
 G_{kj}, i_{kj} - natężenie przepływu, entalpia doprowadzonych skroplin,
 G_{sj}, t_{sj} - natężenie przepływu, temperatura skroplin na wylocie

Podkreślić należy, że rys.6 nie pokazuje, w jaki sposób w oparciu o kryterium $f_i(\underline{x})$ będą wykonywane obliczenia optymalizacyjne niższego poziomu, dotyczące rozwiązań konstrukcyjnych podgrzewaczy regeneracyjnych.

Z punktu widzenia metody obliczeniowej, pozwalającej na optymalizację całego układu, jest to zagadnienie, które może być pozostawione do oddzielnego rozstrzygnięcia.

6. ALGORYTM POSZUKIWANIA EKSTREMUM FUNKCJI Z OGRANICZENIAMI

W przypadku złożonych, wielowymiarowych problemów, w których funkcje $F(\underline{x})$, $\varphi(\underline{x})$, $\psi(\underline{x})$ są nieliniowe, obliczenia



Rys.6. Schemat algorytmu obliczeń funkcji celu i ograniczeń k - numer węzła

optymalizacyjne wykonuje się metodami numerycznymi typu iteracyjnego [8].

W odniesieniu do problemu optymalizacji układu regeneracji, najbardziej przydatne wydają się metody obliczeniowe wykorzystujące ideę transformacji funkcji celu, w których rozwiązanie pierwotnego problemu optymalizacji z ograniczeniami jest sprowadzane do wielokrotnego rozwiązania problemu bez ograniczeń. W ciągu ostatnich kilku lat osiągnięto znaczny postęp w tej grupie metod i w chwili obecnej są one uważane za najbardziej efektywne [9].

Szczególnie skuteczna jest metoda "funkcji kary z przesunięciem", zaproponowana przez Powella [10], która wyeliminowała szereg niekorzystnych cech wcześniejszych metod wykorzystujących tzw. funkcję barierową [11]. Algorytm Powella, opracowany pierwotnie tylko dla ograniczeń równościowych został rozszerzony na problemy z ograniczeniami nierównościami przez Michalskiego i Szymanowskiego [12] oraz rozwinięty dalej przez Wierzbickiego [13]. Analogiczny algorytm zaproponowany został później przez Rockafellara [9]. W algorytmach tych zastosowano funkcję kary m o postaci:

$$\Phi(\underline{x}, \underline{\delta}, \underline{\theta}) = F(\underline{x}) + \sum_{j=1}^m \delta_j [\varphi_j(\underline{x}) + \theta_j] \cdot \max[0, \varphi_j(\underline{x}) + \theta_j] \quad (18)$$

gdzie:

$\underline{\delta} = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m)$, $\underline{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ są parametrami potrzebnymi tylko do realizacji procesu obliczeniowego. Istotną cechą metody jest wprowadzenie modyfikacji parametrów $\underline{\theta}$ w kolejnych iteracjach wg formuły

$$\theta_j^{(k+1)} = \max [0, \varphi_j(\underline{x}) + \theta_j^{(k)}] \quad j = 1, \dots, m.$$

Efektywność wspomnianych wyżej algorytmów w istotny sposób zależy od zastosowanego sposobu poszukiwania w kolejnych iteracjach, ekstremum bez ograniczeń. W grupie metod bezgradientowych, najbardziej przydatnych dla rozważonego zagadnienia, istnieje kilka dobrze sprawdzonych i pewnie działających algorytmów [8], [12]. Próby porównania efektywności tych algorytmów na podstawie ujednoczonych kryteriów ilościowych

[8], [14] wykazują, że wśród metod bezgradientowych korzystnie wyróżnia się algorytm Stewarta [15] i Powella [16]. Bardzo dobre rezultaty uzyskano [17] stosując procedurę aproksymacji gradientu opracowaną przez Stewarta do dwóch innych algorytmów z grupy metod zmiennej metryki: Dawidona [18] i Fletchera [19].

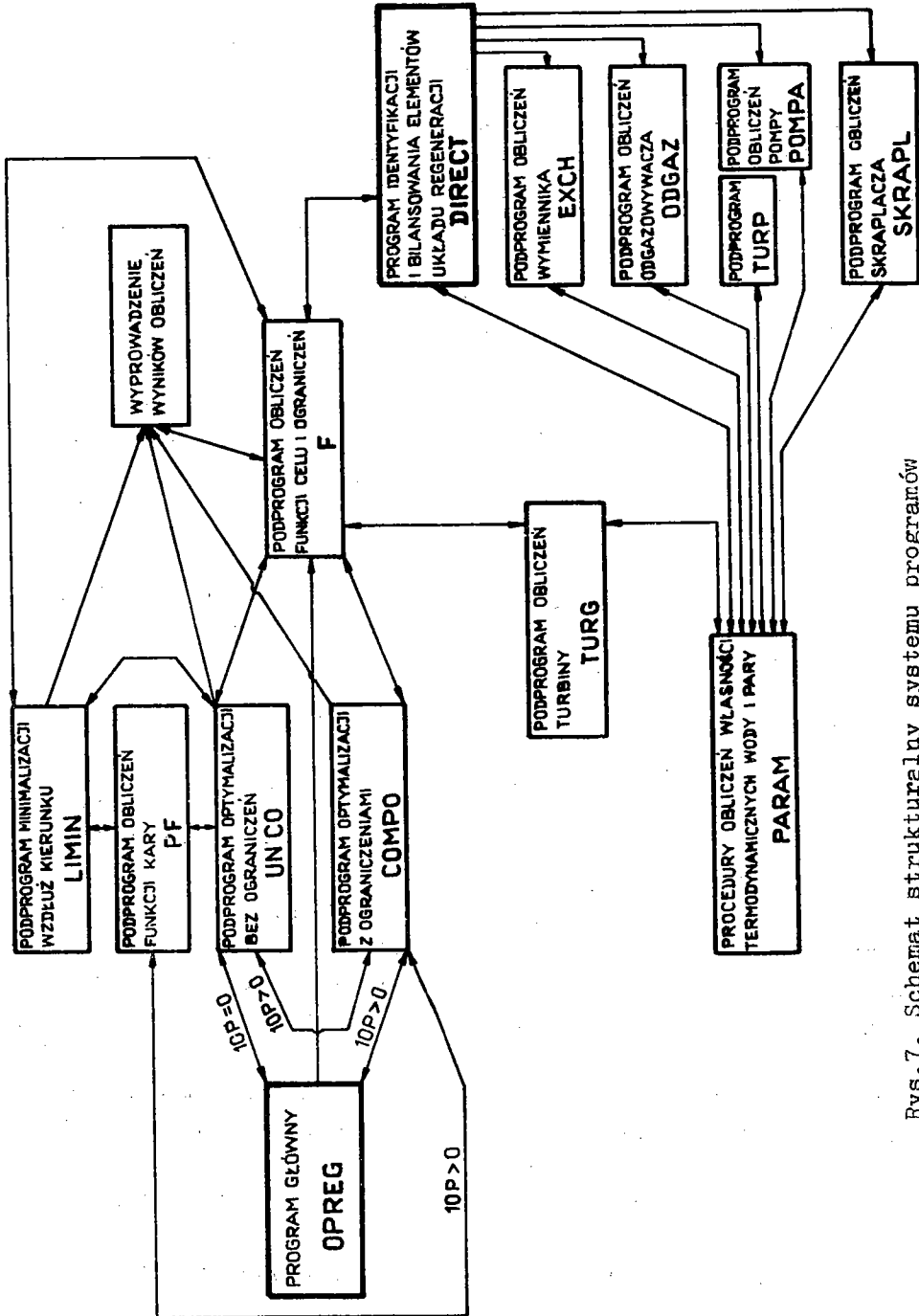
W przypadku prezentowanych prac, za najbardziej celowe uznano wykorzystanie programu MIPOW, opracowanego w Instytucie Badań Jądrowych. Program ten wykorzystuje funkcję kary typu [18], a do znalezienia ekstremum funkcji bez ograniczeń stosowana jest metoda kierunków sprzężonych Powella [16]. Dotychczasowe doświadczenia numeryczne [17] potwierdzają wysoką niezawodność tego programu. Program MIPOW ma postać uniwersalnego modułu, który współpracuje z dostarczonym przez użytkownika podprogramem obliczającym wartości funkcji φ_j , ψ_j i F dla dowolnie wybranych wartości zmiennych x .

7. SYSTEM PROGRAMÓW DLA ROZWIĄZYWANIA ZADANIA OPTYMALIZACYJNEGO

Opracowując narzędzie obliczeniowe dla optymalizacji układu regeneracji, wzięto pod uwagę możliwość dalszego doskonalenia niektórych jego części oraz ewentualność wykorzystywania pewnych części w pracach dotyczących turbozespołów. Wynikiem prac był system programów [20], którego schemat ilustrujący wzajemne powiązania modułów w różnych zadaniach obliczeniowych, przedstawiono na rys. 7.

Podstawowym elementem systemu jest program główny OPREG. Po wczytaniu danych wejściowych i ich wstępnym przetworzeniu, program główny, współpracując z szeregiem innych programów i procedur, może realizować dwa różne zadania, zależnie od wartości parametru sterującego IOP:

- prowadzenie obliczeń optymalizacyjnych ($IOP > 0$)
- prowadzenie obliczeń bilansowych ($IOP = 0$).



Rys.7. Schemat strukturalny systemu programów

Zadanie drugie, pomyślane jako uzupełnienie podstawowego zadania optymalizacji, polega na zbilansowaniu układu regeneracji o zadanym z góry podziale przyrostów temperatur i znanych powierzchniach wymiany ciepła w podgrzewaczach regeneracyjnych. Wyniki takich obliczeń mogą być porównywane z wynikami innych znanych obliczeń (np. projektowych), co stwarza punkt odniesienia dla kontroli poprawności wyników obliczeń optymalizacyjnych.

Oba zadania różnią się zarówno postacią funkcji celu, jak też i sposobem rozwiązania problemu. W pierwszym przypadku funkcja celu została sformułowana w oparciu o kryteria rachunku ekonomicznego (p.3), a problem polega na minimalizacji funkcji przy spełnieniu ograniczeń równościowych wynikających z konieczności spełnienia z zadaną dokładnością, równań bilansowych w obliczanym układzie.

W drugim przypadku chodzi o zadanie poszukiwania swobodnego minimum funkcji wielu zmiennych. Funkcja celu jest sumą kwadratów błędów równań bilansowych.

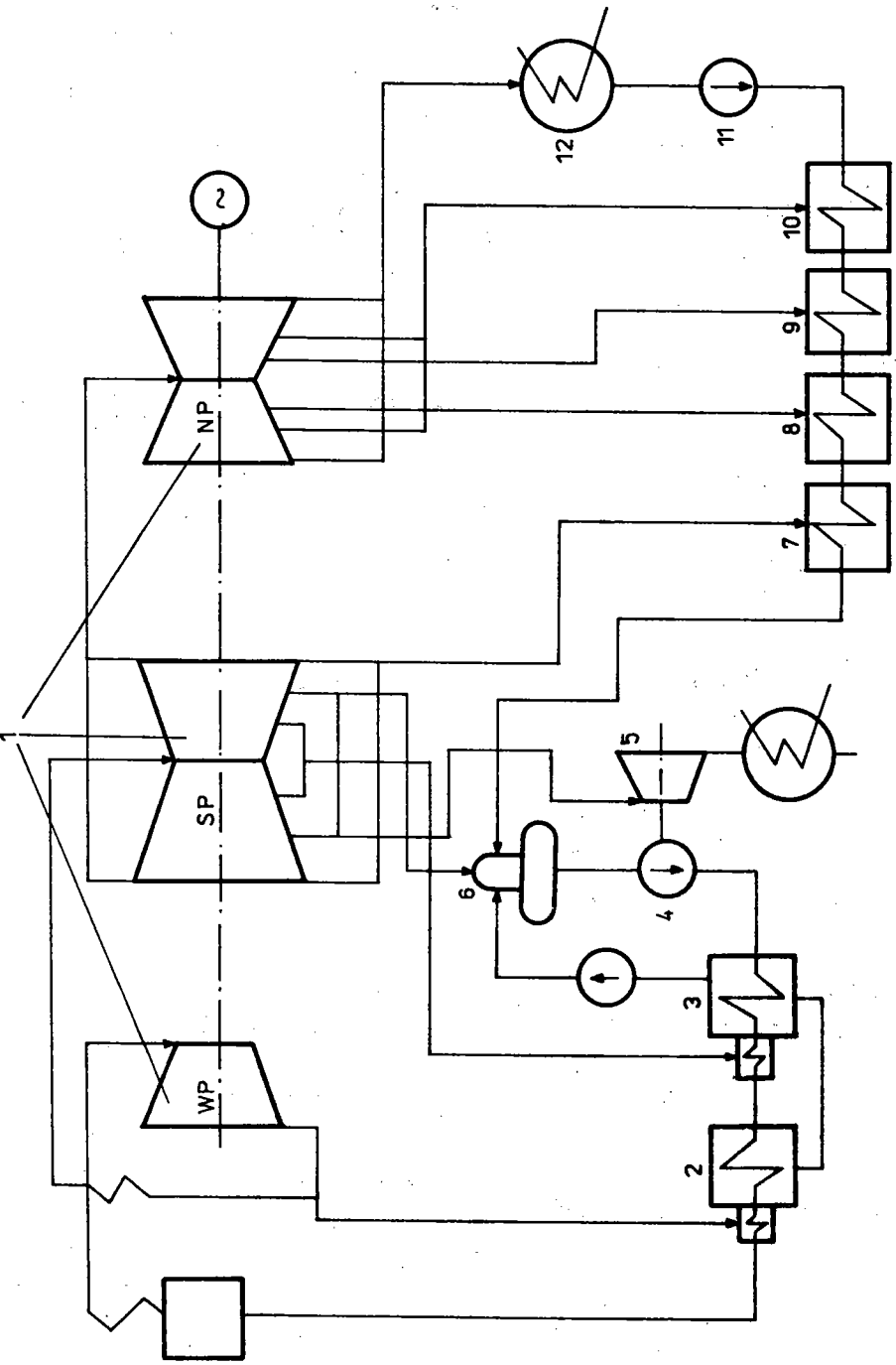
System programów umożliwia optymalizację układu regeneracji w następujących wariantach:

- 1) napęd pomp zasilających pomocniczą turbinę parową lub silnikiem elektrycznym,
- 2) ciśnienie w skraplaczu zadane lub optymalizowane,
- 3) schłodzenie skroplin w podgrzewaczach z chłodnicami skroplin zadane lub optymalizowane.

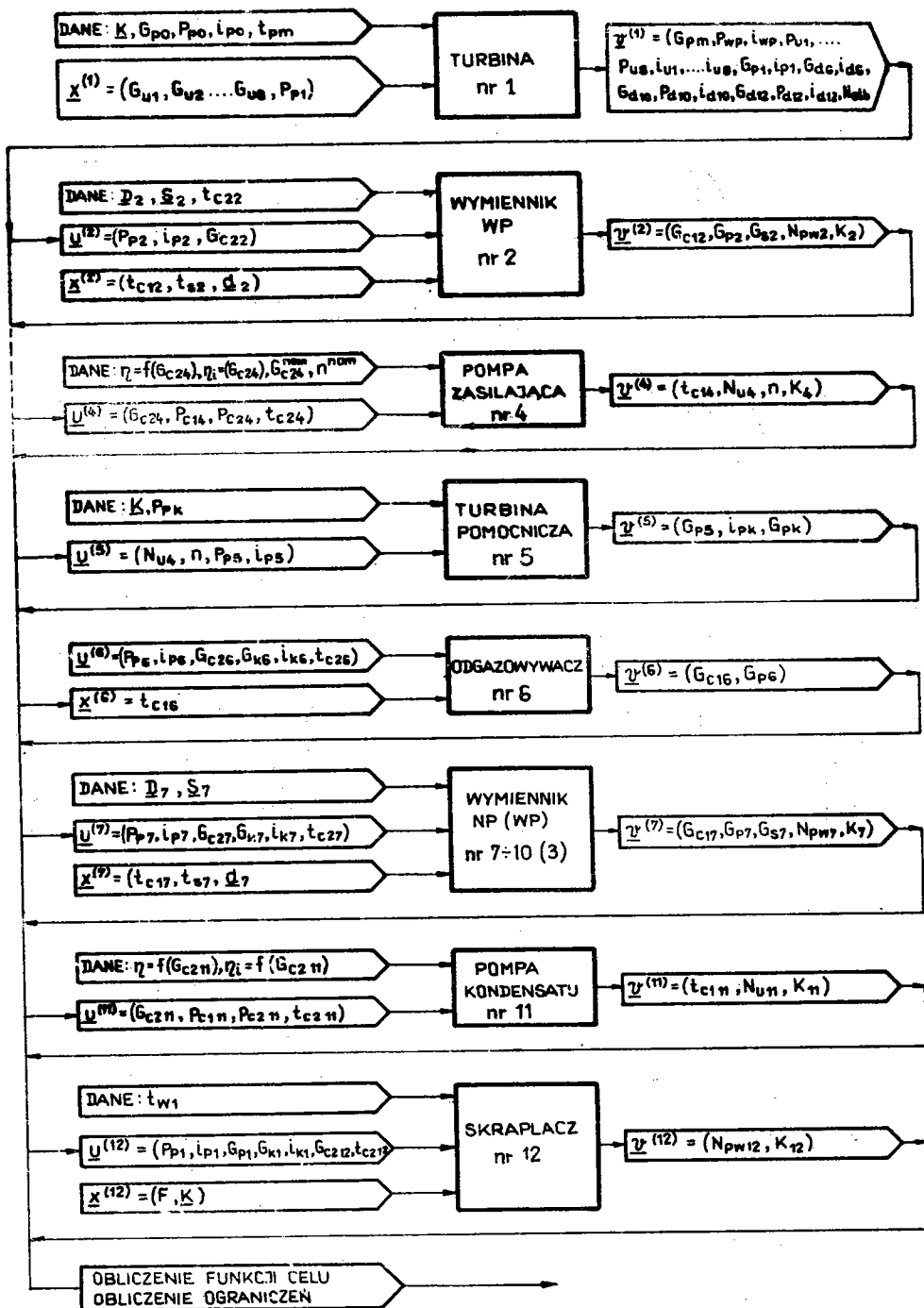
Zasada działania systemu jest oparta na algorytmie przedstawionym ramowo w p.5 (rys.6). Stosownie do struktury turbozespołu wraz z układem regeneracji (rys.8) sformułowano zadanie dla wszystkich elementów systemu i opracowano algorytm (rys.9).

Wśród elementów systemu, model matematyczny podgrzewacza regeneracyjnego jest bardziej skomplikowany od innych, gdyż spełnia dwie funkcje [20]:

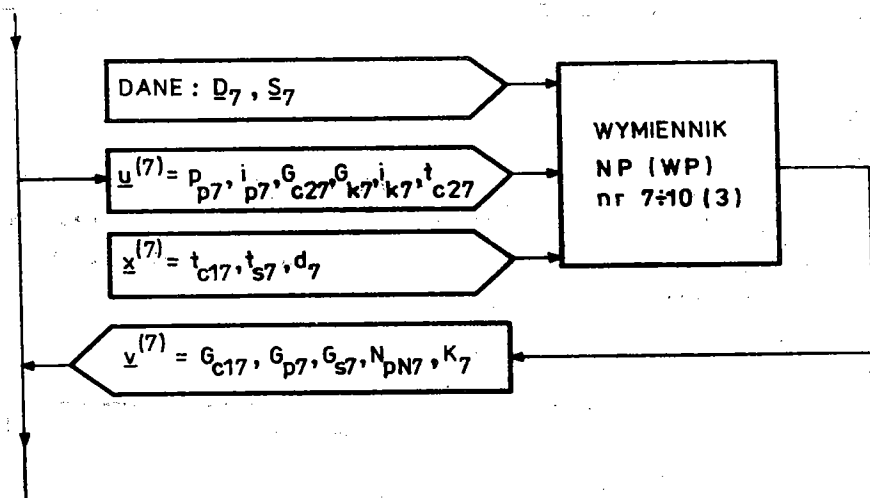
- bilansuje strumienie masy i energii we wstępnej fazie obliczeń modelu,
- optymalizuje wybrane wielkości konstrukcyjne (rozwiązuje zadania optymalizacyjne niższego poziomu).



Rys.8. Schemat układu regeneracji



Rys.9. Realizacja obliczeń funkcji celu i ograniczeń



Rys.10. Realizacja obliczeń podgrzewacza regeneracyjnego

Uogólniając można stwierdzić że zadanie łączne (rys.10) polega na tym, aby na podstawie ustalonych parametrów modelu wynikających z konstrukcji \underline{D} i struktury \underline{g} (zbiór DANE) dla ustalonych w danym kroku obliczeniowym wielkości należących do zbioru \underline{x} :

- temperatury czynnika ogrzewanego na wlocie (t_{c17}),
- temperatury skroplin na wylocie (t_{s7}) (tylko w przypadku podgrzewacza z chłodnicą skroplin; w pozostałych przypadkach przyjmuje się t_{s7} równe temperaturze nasycenia),
- zunifikowanej średnicy rurki (d_7),

oraz przy znajomości wielkości występujących w zbiorze \underline{u} :

- ciśnienia pary grzejnej na wlocie (p_{p7}),
- entalpii pary grzejnej na wlocie (i_{p7}),
- wydatku czynnika ogrzewanego na wylocie (G_{c27}),
- wydatku doprowadzonych skroplin (G_{k7}),
- entalpii doprowadzonych skroplin (i_{k7}),
- temperatury czynnika ogrzewanego na wylocie (t_{c27})

Obliczyć elementy zbioru \underline{y} w dwu wariantach:

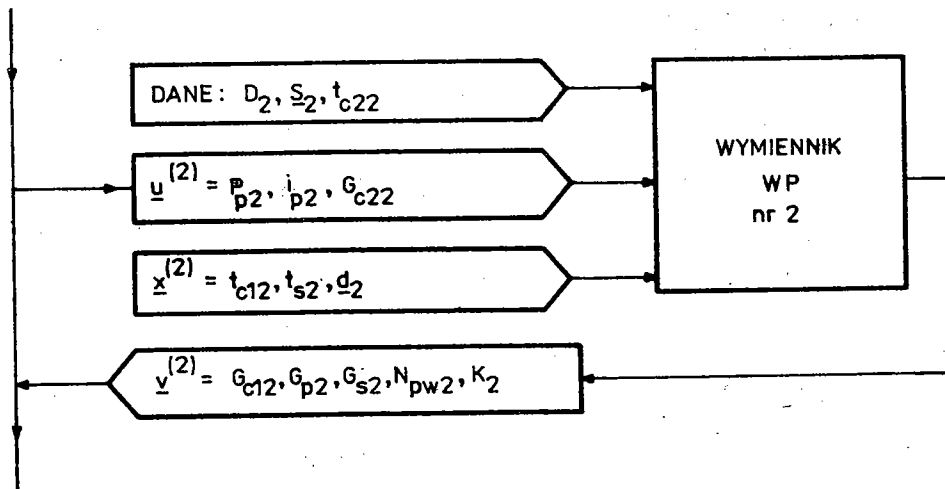
1) przy bilansowaniu:

- wydatek czynnika ogrzewanego na wlocie (G_{c17}),
- wydatek pary grzejnej (G_{p7}),
- wydatek skroplin (G_{s7}),

2) przy optymalizacji:

- moc pompowania (N_{pw7}),
- koszty podgrzewacza (K_7).

W przypadku ostatniego podgrzewacza WP (rys.11) zbiór DANE uzupełniony jest o temperaturę czynnika ogrzewanego na wylocie (t_{c22}), a ze zbioru \underline{u} są usunięte parametry doprowadzonych skroplin (G_{k2} , i_{k2}).



Rys.11. Realizacja obliczeń ostatniego podgrzewacza wysokoprężnego

Dla uproszczenia toku obliczeń przyjęto następujące założenia:

- 1) ciepło właściwe czynnika ogrzewanego jest stałe, a jako funkcję stanu czynnika można je przyporządkować:
 - w części WP układu regeneracji, ciśnieniu przed turbiną i temperaturze nasycenia odpowiadającej ciśnieniu w odgazowawcu,
 - w części NP układu regeneracji, ciśnieniu panującemu w odgazowawcu i temperaturze odpowiadającej nominalnym warunkom w skraplaczu;

2) spadek ciśnienia przy przepływie pary grzejnej przez podgrzewacz jest pomijalnie mały;

3) straty ciepła do otoczenia są pomijalnie małe.

Ze względu na wygodę programowania przyjęto koncepcję zbiorczego modelu matematycznego wszystkich elementów układu regeneracji w postaci nadrzędnego programu DIRECT wraz z grupą podprogramów EXCH, ODGAZ, POMPA, TURP, SKRAPL. Ich wzajemne powiązania z resztą programów systemu przedstawiono na rys.7.

8. WYNIKI OBLICZEŃ

System programów został wykorzystany do wykonania obliczeń układu regeneracji bloku 360 MW [20].

W tablicach 1 i 2 przedstawiono wyniki uzyskane dla podstawowego wariantu struktury układu odpowiadającego projektowi bloków dla elektrowni Bełchatów. Koszty podgrzewaczy były w tych obliczeniach wyznaczone z zależności (4a).

W poszczególnych rubrykach umieszczono, dla porównania, podstawowe parametry cieplno-przepływowe i konstrukcyjne układu regeneracji w dwóch wersjach. Pierwsza z nich składa się z wyników uzyskanych w obliczeniach bilansowych, przy zadanych podgrzewach wody zasilającej w poszczególnych podgrzewaczach. Druga obejmuje wyniki obliczeń optymalizacyjnych.

Jak widać, orbitalnie przyjęte podgrzewy wody zasilającej oraz dostosowane do nich powierzchnie wymiany ciepła w podgrzewaczach regeneracyjnych są dość odległe od analogicznych wielkości uzyskanych z obliczeń optymalizacyjnych. Optymalizacja rozwiązania doprowadziła do zmniejszenia podgrzewu w podgrzewaczach WP-7 i PN-3, przy równoczesnym zwiększeniu podgrzewu w pozostałych podgrzewaczach, zwłaszcza w PN-1 (o ponad 10%). Wyniki optymalizacji wskazują także na celowość zwiększenia łącznej powierzchni wymiany ciepła w podgrzewaczach o około 33%, przy czym nastąpiłoby to przez powiększenie wszystkich podgrzewaczy z wyjątkiem WP-7 (którego powierzchnię należałoby zmniejszyć). Warto dodać, że w wyniku wskazanych zmian można osiągnąć zmniejszenie wartości funkcji celu (tj. wskaźnika jakości wg wzoru (1) o 0,18%, przy równoczesnym wzroście sprawności bloku o 0,19% i obniżeniu jednostkowego kosztu paliwa o 0,19%.

tablica 1

Zestawienie wyników obliczeń podgrzewaczy NP bloku 360 MW

Typ obliczenia	Nr podgrzewacza													
	PN-1			PN-2			PN-3			PN-4				
	t_{c1}	t_{c2}	Δt	t_{c1}	t_{c2}	Δt	t_{c1}	t_{c2}	Δt	t_{c1}	t_{c2}	Δt	F	
Bilansowanie	39,2	68,9	29,7	68,9	96,1	27,2	494,0	96,1	132,0	35,9	720,0	132,0	153,0	722,0
Optymalizacja	39,2	72,2	33,0	72,2	100,0	27,5	916,0	100,0	134,0	34,0	984,0	134,0	154,0	889,0

[m²]

F - powierzchnia wymiennika

[°C];

 t_{c1} - temperatura cz. ogrzewanego na wejściu

[°C].

 t_{c2} - temperatura cz. ogrzewanego na wyjściu

Tablica 2

Zestawienie wyników obliczeń podgrzewaczy WP bloku 360 MW

	Nr podgrzewacza									
	WP - 6					WP - 7				
	t_{c1}	t_{c2}	Δt	F_1	F_2	t_{c1}	t_{c2}	Δt	F_1	F_2
Bilansowanie	184,0	212,0	28,0	229,0	153,0	212,0	250,0	38,0	289,0	156,0
Optymalizacja	184,0	214,0	30,0	258,0	171,0	214,0	250,0	36,0	273,0	144,0

t_{c1} - jak w tablicy 1 [°C]

t_{c2} - jak w tablicy 1 [°C]

F_1 - powierzchnia strefy kondensacji [m²]

F_2 - powierzchnia strefy schładzania pary [m²]

9. PODSUMOWANIE

Zadanie optymalizacji układu regeneracji bloku dużej mocy zostało rozwiązane w oparciu o zbudowany do tego celu system programów komputerowych. Przedmiotem optymalizacji są parametry cieplno-przepływowe oraz wymiary konstrukcyjne podgrzewaczy regeneracyjnych. Zakłada się znajomość charakterystyk konstrukcyjnych przepływowej części turbiny, struktury układu regeneracji oraz głównych cech rozwiązań konstrukcyjnych podgrzewaczy (ilość stref, liczba biegów, układ). Założenia te wynikają z omówionego na wstępie wariantu przystosowania systemu do analizy różnych wariantów układu regeneracji bloku energetycznego z turbiną 18k 360; równocześnie jednak na podkreślenie zasługuje fakt, że system można dostosować do układów z innymi turbinami drogą niewielkich modyfikacji programowych.

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych szeregu wariantów układu regeneracji potwierdzają przydatność systemu do rozwiązywania rozpatrywanego zadania na użytek analiz techniczno-ekonomicznych układu regeneracji. Tym samym system wykazuje przydatność dla przygotowywania techniczno-ekonomicznych podstaw decyzji projektowych dotyczących układów regeneracji bloków dużej mocy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kurpisz Ł., Jankowski Zb., Jankowski J.: Optymalizacja układu regeneracji bloku >500 MW. Opracowanie ITC PW, Warszawa 1978.
- [2] Urbaniec K., Zgorzelski M.: Optymalizacja urządzeń i układów cieplnych. Referat na Sympozjum "Optymalizacja w mechanice", Beskid Śląski 1976.

- [3] K u r p i s z Ł., J a n k o w s k i Zb.: Koncepcja metody optymalizacji bloku dużej mocy. Ref. na posiedzeniu Komisji RWPg d/s Elektroenergii. Warszawa, maj 1979.
- [4] Ocena ekonomicznej efektywności inwestycji i innych zamierzeń rozwojowych. Zbiór przepisów. PWE, Warszawa 1974.
- [5] Branżowe wytyczne w sprawie metod oceny ekonomicznej efektywności inwestycji produkcyjnych w energetyce. Zjednoczenie Energetyki, Warszawa 1976.
- [6] P o r t a c h a J.: Optymalizacja struktury układu ciepłego siłowni parowych. Archiwum Energetyki, 1972, nr 1.
- [7] K u l i g M.: Algorytm optymalizacyjny w zagadnieniach projektowania ciepło-przepływowych układów energetycznych. Referat na Konferencji "Optymalizacja projektowania i eksploatacji systemów i urządzeń elektroenergetycznych", PW Warszawa, XI.1980.
- [8] F i n d e i s e n W., S z y m a n o w s k i J., W i e r z b i c k i A.: Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji. PWN, Warszawa, 1977.
- [9] F l e t c h e r R.: Methods Related to Lagrangian Functions in Numerical Methods for Constrained Optimization. W pracy zbior. Gill P.E., Murray W., Numerical Methods for Constrained Optimization. Acad. Press. London and N.York, 1974 str.219.
- [10] P o w e l l M.J.D.: A method for Non-Linear Constraints in Minimization Problems. Raport 310, A.E.R.E. Harwell, England 1967.
- [11] R y a n D.M.: Penalty and Barrier Functions in Numerical Methods for Constrained Optimization (patrz 9 str. 175-190).
- [12] S z y m a n o w s k i J. i in.: Biblioteka programów optymalizacji. WFW, Warszawa 1970.
- [13] W i e r z b i c k i A.: A penalty Function Shifting Method in Constrained Static Optimization and its Convergence Properties, Arch. Aut.Tel.XVI/4, 1971.
- [14] H i m m e l b l a u D.M.: A Uniform Evaluation of Unconstrained Optimization Techniques, Conference on Numerical Methods for Non-linear Optimization. Dundee University, 1971.
- [15] S t e w a r t G.W.: A Modification of Davidons Minimization Method to Accept Difference Approximation of Derivatives J.Assoc.Comp. Mach, Vol. 14, 1967, str. 72+83.
- [16] P o w e l l M.J.D.: An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables Without Calculating Derivatives. The Computer Journ., Vol.7, 1969, str.155-162.

- [17] K u l i g M.: Zastosowanie numerycznych metod optymalizacji przy projektowaniu układów i urządzeń jądrowych. Konferencja Naukowo-Techniczna "Energetyka Jądrowa 79". Warszawa, październik 1979. Mater. konferen-
cyjne wyd. PTJ, nr 6-7, 1979.
- [18] D a v i d o n W.C.: Variance Algorithm for Minimization. Comp. Journ., Vol.10, 1968, str.406+410.
- [19] F l e t c h e r R.: A New Approach to Variable Metric Algorithms. Comp. Journ., Vol.13, 1970, str.317+322.
- [20] K u r p i a z Ł., Zb. J a n k o w s k i i i n.: Optymalizacja układu regeneracji bloku dużej mocy. Etap I i II. Opracowanie ITC PW, Warszawa 1979, 1980.
- [21] M i l l e r A. - Model matematyczny turbiny parowej kondensacyjnej dużej mocy. Archiwum Energetyki 1-2/1973.

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

В работе приводятся основные принципы, принятые при формулировании задания оптимизации схемы регенерации. Устанавливается область решений, охваченных оптимизацией. Одновременно определяется критерий оценки согласно действующим принципам технико-экономического расчета. В результате проведения численного анализа признаков задачи принимается концепция построения математической модели регенерации, а также приводится алгоритм решения, в том числе по численному методу оптимизации. Приводятся также примеры результатов вычислений.

OPTIMIZATION OF THE REGENERATIVE CYCLE OF A LARGE STEAM TURBINE UNIT

S u m m a r y

Basic principles of the optimization of the regenerative cycle, including the scope of optimal decisions and the form of the objective function are described. Taking into account numerical features of the problem, the concepts for mathematical modelling of the regenerative cycle and the

algorithm of calculations are proposed. Consequently, the detailed structure of the mathematical model is developed. Some results obtained from a numerical example are presented.

Rękopis dostarczone w październiku 1981