

Janusz Lewandowski

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

MODEL MATEMATYCZNY SEPARATORA - - PRZEGRZEWACZA PARY DO BADANIA DYNAMIKI TURBINY DLA ELEKTROWNI JĄDROWEJ

Przedstawiono model matematyczny separatora - przegrzewacza pary dla celów badania dynamiki turbiny na parę nasyconą dla elektrowni jądrowej. Omówiono koncepcję oraz strukturę modelu. Podano główne zależności modelu oraz przedstawiono sposób jego rozwiązania. Zamieszczono przykładowe wyniki obliczeń procesów przejściowych w separatorze - przegrzewaczu pary zachodzących na skutek skokowych zmian obciążenia turbozespołu.

WYKAZ OZNACZEŃ

- A - współczynnik
- \bar{A} - macierz współczynników układu algebraicznych równań liniowych
- \bar{B} - macierz wolnych wyrazów układu algebraicznych równań liniowych
- c - ciepło właściwe
- F - powierzchnia
- G - natężenie przepływu
- i - entalpia właściwa
- k - współczynnik wymiany ciepła
- m - masa
- p - ciśnienie
- Q - strumień ciepła
- t - czas

T	- temperatura
v	- objętość właściwa
w	- prędkość
W	- objętość
\bar{X}	- macierz niewiadomych układu algebraicznych równań liniowych
y	- stopień suchości pary
Δ	- strata
σ	- napięcie powierzchniowe cieczy

Indeksy

g	- dotyczy pary grzejnej
kr	- dotyczy wielkości krytycznej
m	- dotyczy metalu
p	- dotyczy parametrów po separacji lub pary
s	- dotyczy wielkości średniej lub bloku separacji
w	- dotyczy wody
x	- dotyczy odparowującej wody
α	- dotyczy wlotu
ω	- dotyczy wylotu
1,2,3	- dotyczy parametrów między modułami, zgodnie z rys.2.

1. WSTĘP

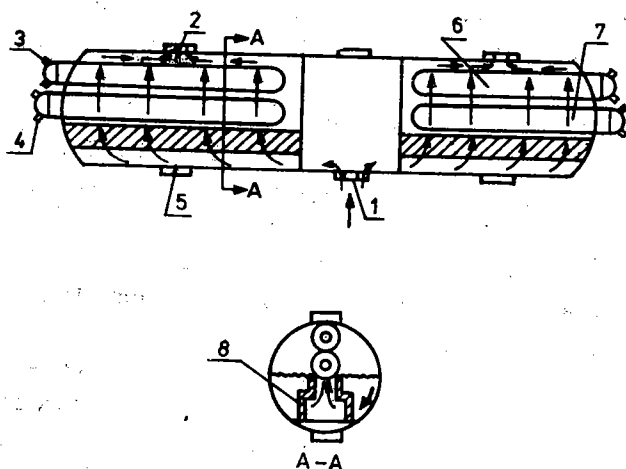
Brak odpowiednich doświadczeń konstrukcyjnych i eksploatacyjnych pozwalających przewidzieć własności dynamiczne maszyn i urządzeń instalowanych w elektrowniach jądrowych oraz zastrzone wymagania w zakresie bezpieczeństwa tych elektrowni powodują szczególną potrzebę wyznaczania charakterystyk dynamicznych poszczególnych maszyn i urządzeń metodami obliczeniowymi. Niezbędne jest zatem opracowanie odpowiednich modeli matematycznych elementów elektrowni, w tym turbiny na parę nasyconą [1], [2], [3].

Przykłady takich modeli, uwzględniających procesy nieustalone w turbinie, zachodzące pod wpływem silnych, szybkozmiennych zakłóceń, pojawiających się przy obciążeniu turbiny w za-

kresie $0,3 \div 1,0$ obciążenia maksymalnego, przedstawiono w pracach [4], [5]. Jednym z modułów tych modeli jest model matematyczny separatora - przegrzewacza pary, który ze względów redakcyjnych nie był w dotychczas publikowanych pracach przedstawiony. Niniejsza praca jest zatem uzupełnieniem prac [4], [5] w zakresie modelu matematycznego separatora-przegrzewacza pary.

W rozpatrywanym przypadku separator-przegrzewacz traktowany jest jako element łączący układy przepływowe części wysokoprężnej (WP) i niskoprężnej (NP) turbiny. Rozważane są tu zatem tylko takie zjawiska, które mają wpływ na rozpatrywane w pracach [4], [5] stany nieustalone turbiny. Opracowany model matematyczny jest więc z założenia uproszczony i nie może służyć do wyznaczania wszystkich charakterystyk separatora-przegrzewacza.

Poważną trudność przy modelowaniu matematycznym separatora-przegrzewacza stanowi z jednej strony różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych, a z drugiej szczupłość informacji odnośnie szczegółów budowy tego urządzenia. Projektowane bądź eks-



Rys.1. Schemat separatora-przegrzewacza pary wytwórnicy Westinghouse [2]; 1 - wlot pary z części wysokoprężnej turbiny, 2 - wylot pary do części niskoprężnej turbiny, 3 - wlot pary grzejnej, 4,5 - wypływy skroplin, 6 - pierwszy stopień przegrzewacza, 7 - drugi stopień przegrzewacza, 8 - separator

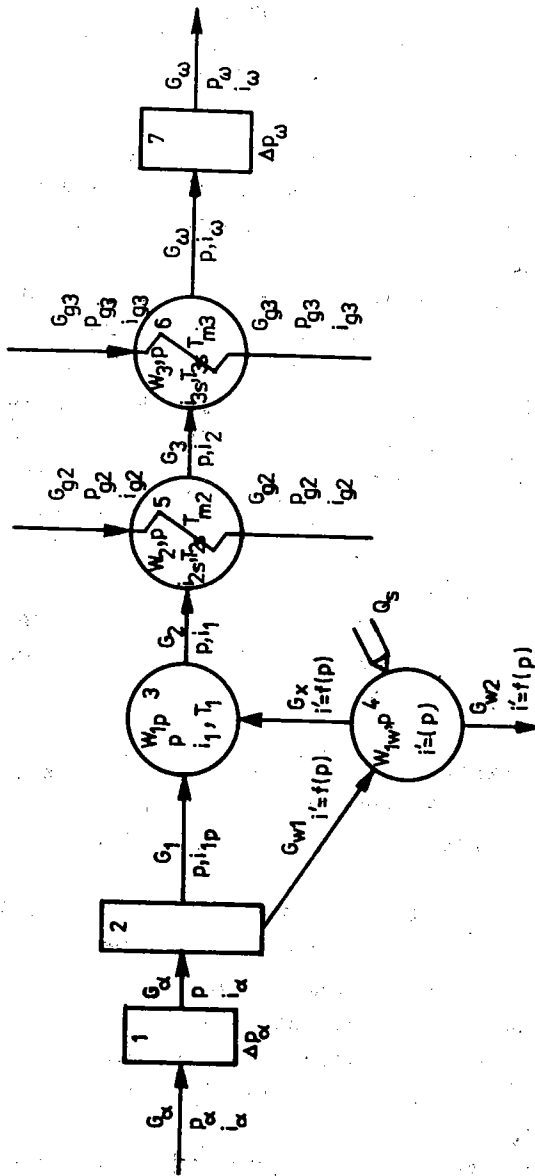
placowane obecnie separatory-przegrzewacze posiadają układ poziomy lub pionowy, separują wodę przy wykorzystaniu sit bądź żaluzji, przegrzewają parę w przegrzewaczach jedno- lub dwustopniowych [2], [3], [6], [7], [8]. Przegląd stosowanych konstrukcji wykazał, że mimo tego celowe jest opracowanie możliwie ogólnego modelu matematycznego, obejmującego większość spotykanych rozwiązań konstrukcyjnych separatorów-przegrzewaczy. Model taki odpowiada najbardziej złożonym konstrukcjom tych urządzeń, których przykładem jest przedstawiony na rys.1 separator-przegrzewacz wytwórni Westinghouse [2]. Modele konstrukcji mniej złożonych można otrzymać przez pominięcie odpowiednich modułów opracowanego modelu.

W celu zachowania omówionej ogólności modelu, zależności indywidualne, związane z konkretną konstrukcją separatora-przegrzewacza, podano dalej w ogólnej, funkcyjnej postaci.

2. KONCEPCJA MODELU MATEMATYCZNEGO

Zastosowanie modelu matematycznego separatora-przegrzewacza do badania procesów nieustalonych w turbinie wymaga rozpatrzenia zjawisk akumulacji masy i energii pary wodnej przepływającej z części WP do NP turbiny oraz akumulacji ciepła w rurkach grzejnych przegrzewacza. Pominięta może być akumulacja czynnika grzejjego w przegrzewaczu, gdyż nie ma ona znaczącego wpływu na zjawiska zachodzące w układzie przepływowym turbiny [1]. Pozostałe zjawiska zachodzące w separatorze-przegrzewaczu: wymiana ciepła, separacja wody itd., jako wielokrotnie szybsze od wymienionych wyżej zjawisk akumulacji mogą być rozpatrywane jako ciągi chwilowych stanów ustalonych.

Opisanie wymienionych zjawisk w sposób nie związany z konkretną konstrukcją separatora-przegrzewacza wymaga sporządzenia jego umownego schematu zastępczego, składającego się z bloków odpowiadającym dalej właściwym modułom modelu matematycznego. Schemat taki dla możliwie ogólnej konstrukcji tego urządzenia przedstawiono na rys.2. Wyróżniono w nim siedem bloków.



Rys.2. Schemat zastępczy separatora-przeprzewacza pary

Bloki 1 oraz 7 ujmują opory przepływu pary przez separator-przegrzewacz. Całkowite opory przepływu podzielono na dwie części i przypisano króćcom wlotemu i wylotowemu, przyjmując, że w pozostałych blokach panuje jednakowe ciśnienie p . Blok 2 uwzględnia proces separacji wody. Bloki 3 i 4 to odpowiednio przestrzeń parowa i wodna strefy separacji, w której może zachodzić akumulacja masy i energii pary i wody. Bloki 5 i 6 stanowią pierwszy i drugi stopień przegrzewacza pary. Uwzględnione są w nich zjawiska wymiany ciepła, akumulacji masy i energii przegrzewanej pary oraz akumulacji ciepła w rurkach przegrzewacza.

Zjawiska zachodzące w blokach 1, 2 i 7 rozpatrywane są statycznie. Opisać je zatem można równaniami algebraicznymi. Wyróżnione w blokach 3, 4, 5, 6 zjawiska akumulacji wymagają opisu w postaci równań różniczkowych zwyczajnych, wynikających z równań bilansu masy, energii i ciepła. Oznacza to, że separator-przegrzewacz, podobnie jak cała turbina [1], [4], [5] rozpatrywany jest jako urządzenie o stałych skupionych. Uproszczenie takie jest uzasadnione wobec omówionego wcześniej zakresu zastosowań modelu.

Wielkości wejściowe i wyjściowe modelu separatora-przegrzewacza wynikają z organizacji obliczeń w modelu matematycznym turbiny parowej [1], [5], [4]. Wielkościami wejściowymi są:

- natężenie przepływu G_{α} oraz entalpia i_{α} pary dopływającej z części WP turbiny,
- natężenie przepływu pary G_{ω} wypływającej do części NP turbiny,
- ciśnienie p_{g2} i p_{g3} oraz entalpie i_{g2} , i_{g3} pary grzejnej na wlocie do obu stopni przegrzewacza,
- natężenie przepływu wody odprowadzanej z separatora G_{w2} .

Podstawowymi wielkościami wyjściowymi są:

- ciśnienie p_{α} na wlocie do separatora,
- ciśnienie p_{ω} oraz entalpia i_{ω} pary na wylocie z przegrzewacza,
- natężenia przepływu pary grzejnej G_{g2} oraz G_{g3} .

Za dodatkowe wielkości wyjściowe uważać można wszystkie występujące w modelu wielkości, z wyjątkiem wejściowych.

3. OPIS MODELU MATEMATYCZNEGO

Opory przepływu pary wilgotnej na wlocie do separatora (blok 1) wyznaczyć można z zależności [9]

$$\Delta p_{\alpha} = \frac{\Delta p_{\alpha n}}{G_{\alpha n}^2} v_{\alpha n}'' \frac{G_{\alpha n}^2}{v_{\alpha n}''}, \quad (1)$$

zatem ciśnienie na wlocie do separatora wynosi

$$p_{\alpha} = p + A_{\alpha} \frac{G_{\alpha}^2}{v}, \quad (2)$$

gdzie A_{α} jest stałą wartością wynikającą ze znamionowych warunków pracy separatora.

Na wylocie z separatora-przegrzewacza (blok 7) mamy do czynienia z parą przegrzaną, zatem opory przepływu są tu równe

$$\Delta p_{\omega} = \frac{\Delta p_{\omega n}}{G_{\omega n}^2} v_{\omega n} \frac{G_{\omega}^2}{v_{\omega}} \quad (3)$$

i odpowiednio

$$p_{\omega} = p - A_{\omega} \frac{G_{\omega}^2}{v_{\omega}}. \quad (4)$$

Wilgotność pary po separacji (blok 2) wyznaczyć można z doświadczalnej charakterystyki separatora, która zazwyczaj podawana jest w postaci [9], [10]

$$y_{1p} = f\left(\frac{w}{w_{kr}}\right), \quad (5)$$

gdzie: y_{1p} jest stopniem suchości pary po separacji,
 w - prędkością przepływu pary przez separator określoną jako

$$w = \frac{G_{\alpha} v_{\alpha}}{F_s} \quad (6)$$

F_s jest tu powierzchnią przepływu pary.

Tak zwaną krytyczną prędkość pary w_{kr} można wyznaczyć z doświadczalnej zależności [9], [10]

$$w_{kr} = f(\sigma, v'_\alpha, v''_\alpha, y_\alpha), \quad (7)$$

gdzie $\sigma = f(p)$ jest napięciem powierzchniowym pary.

Ilość separowanej wody jest równa

$$G_{w1} = G_\alpha \left(1 - \frac{y_\alpha}{y_{1p}} \right), \quad (8)$$

a pozostająca ilość pary

$$G_1 = G_\alpha - G_{w1}. \quad (9)$$

W przypadku braku charakterystyki separatora (6), (7) z dobrą dokładnością można przyjąć, że $y_{1p} = \text{const}$, gdyż jak wykazują badania separatorów [8], [9] w szerokim zakresie zmian warunków pracy stopień suchości pary za separatorem zmienia się w bardzo niewielkich granicach.

W bloku 3 zachodzić może akumulacja masy i energii pary wodnej, zaś w bloku 4 odseparowanej wody. Dodatkowo na skutek parowania lub skraplania wody, między tymi blokami wymieniany może być strumień masy G_x . Powyższe zjawiska można opisać równaniami bilansu masy i energii. Przy przyjęciu, że para i woda znajdują się w stanie równowagi termodynamicznej [1] równania te, po odpowiednich przekształceniach [1], przyjmują poniższą postać:

- dla pary wodnej (blok 3)

$$G_1 - G_2 + G_x = \frac{1}{v_1} \frac{dw_{p1}}{dt} - \frac{w_{p1}}{v_1^2} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_{i1} \frac{dp}{dt} +$$

$$- \frac{w_{p1}}{v_1^2} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right)_{p1} \frac{di_1}{dt}, \quad (10)$$

$$G_1 i_{1p} - G_2 i_1 + G_x i'' = \frac{i_1}{v_1} \frac{dw_{p1}}{dt} +$$

$$- w_{p1} \left[1 + \frac{i_1}{v_1^2} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_{i1} \right] \frac{dp}{dt} + \frac{w_{p1}}{v_1} \left[1 - \frac{i_1}{v_1} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right)_{p1} \right] \frac{di_1}{dt}, \quad (11)$$

- dla wydzielonej wody (blok 4)

$$G_{w1} - G_{w2} - G_x = -\frac{1}{v_1'} \frac{dW_{p1}}{dt} - \frac{W_1 - W_{p1}}{v_1'^2} \left(\frac{\partial v'}{\partial p} \right) \frac{dp}{dt}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} (G_{w1} - G_{w2})i' - G_x i'' + Q_s = \\ = -\frac{i'}{v'} \frac{dW_{p1}}{dt} - (W_1 - W_{p1}) \left[1 + \frac{i'}{v'^2} \left(\frac{\partial v'}{\partial p} \right) - \frac{1}{v'} \left(\frac{\partial i'}{\partial p} \right) \right] \frac{dp}{dt}, \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie Q_s jest strumieniem ciepła przejętym od metalu żaluzji separatora.

Podobne równania opisują zjawiska akumulacji pary wodnej w obu stopniach przegrzewacza. Równania te po przekształceniach [1] przyjmują postać

- dla I stopnia przegrzewacza (blok 5)

$$G_2 - G_3 = -\frac{W_2}{v_{2s}^2} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_{i_{2s}} \frac{dp}{dt} - \frac{W_2}{v_{2s}^2} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right)_{p_{2s}} \frac{di_{2s}}{dt}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} G_2 i_1 - G_3 i_2 + Q_2 = \\ = -W_2 \left[1 + \frac{i_{2s}}{v_{2s}^2} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_{i_{2s}} \right] \frac{dp}{dt} + \frac{W_2}{v_{2s}^2} \left[1 - \frac{i_{2s}}{v_{2s}^2} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right)_{p_{2s}} \right] \frac{di_{2s}}{dt}, \end{aligned} \quad (15)$$

- dla II stopnia przegrzewacza (blok 6)

$$G_3 - G_w = -\frac{W_3}{v_{3s}^2} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_{i_{3s}} \frac{dp}{dt} - \frac{W_3}{v_{3s}^2} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right)_{p_{3s}} \frac{di_{3s}}{dt}, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} G_3 i_2 - G_w i_w + Q_3 = \\ = -W_3 \left[1 + \frac{i_{3s}}{v_{3s}^2} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_{i_{3s}} \right] \frac{dp}{dt} + \frac{W_3}{v_{3s}^2} \left[1 - \frac{i_{3s}}{v_{3s}^2} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right)_{p_{3s}} \right] \frac{di_{3s}}{dt}. \end{aligned} \quad (17)$$

Entalpie i_{2s} oraz i_{3s} są średnimi entalpiami dla poszczególnych stopni przegrzewacza

$$i_{2s} = \frac{i_1 + i_2}{2}, \quad (18)$$

$$i_{3s} = \frac{i_2 + i_w}{2} \quad (19)$$

Ilości ciepła Q_2 i Q_3 określić można z równań wymiany ciepła w obu stopniach przegrzewacza

$$Q_2 = F_2 k_2 (T_{m2} - T_{2s}), \quad (20)$$

$$Q_3 = F_3 k_3 (T_{m3} - T_{3s}). \quad (21)$$

W zależnościach tych F_2 oraz F_3 oznaczają powierzchnie ogrzewalne przegrzewacza, T_{m2} i T_{m3} średnią temperaturę metalu rurek grzejnych, a k_2 i k_3 odpowiednie współczynniki przenikania ciepła.

Temperaturę metalu rurek wyznaczyć można z równań bilansu ciepła dla rurek

$$Q_{g2} - Q_2 = m_{m2} c_{m2} \frac{dT_{m2}}{dt}, \quad (22)$$

$$Q_{g3} - Q_3 = m_{m3} c_{m3} \frac{dT_{m3}}{dt}, \quad (23)$$

gdzie: m_{m2} i m_{m3} oznaczają masy odpowiednich pęczków grzejnych,

c_{m2} i c_{m3} - ciepła właściwe metalu.

Ilości ciepła doprowadzanego do rurek od strony czynnika grzejnego wyznaczyć można z równań wymiany ciepła:

$$Q_{g2} = F_2 k_{g2} (T_{g2} - T_{m2}), \quad (24)$$

$$Q_{g3} = F_3 k_{g3} (T_{g3} - T_{m3}). \quad (25)$$

Przy założeniu pełnej kondensacji czynnika grzejnego [9], [11] natężenia przepływu pary grzejnej w obu pęczkach przegrzewacza są równe

$$G_{g2} = \frac{Q_{g2}}{i_{g2} - i'_{g2}}, \quad (26)$$

$$G_{g3} = \frac{Q_{g3}}{i_{g3} - i'_{g3}}. \quad (27)$$

W równaniach (20), (21), (24), (25) nie zostały określone współczynniki przenikania ciepła k_2, k_3, k_{g2}, k_{g3} . Współczynniki te zależą od geometrii rurek przegrzewacza oraz parametrów termodynamicznych i prędkości przepływu czynników. Wyznaczyć je można wykorzystując zależności podane np. w pracach [11], [9], [12], [13].

Uzupełnienie modelu matematycznego separatora-przegrzewacza stanowią odpowiednie zależności określające związki między występującymi w modelu pochodnymi termodynamicznymi pary wodnej i wody, a parametrami termodynamicznymi oraz między poszczególnymi parametrami termodynamicznymi [14].

4. METODA ROZWIĄZANIA MODELU MATEMATYCZNEGO

Opisany w poprzednim punkcie model matematyczny separatora-przegrzewacza pary ma postać układu nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych i algebraicznych. Metodę rozwiązania takich układów omówiono w pracy [15]. Wymaga ona doprowadzenia równań różniczkowych do postaci normalnej. W rozpatrywanym przypadku wykorzystać można w tym celu fakt, że układ równań jest liniowy względem pochodnych. Równania (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17) zapisać można w postaci macierzowej

$$\bar{A} \bar{X} + \bar{B} = 0, \quad (28)$$

gdzie:

\bar{A} jest macierzą współczynników,

\bar{X} - macierzą zmiennych,

\bar{B} - macierzą wyrazów wolnych.

Macierze te przedstawiono poniżej.

$$\begin{array}{cccccccc}
 -\frac{w_{p1}}{v_1} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right) i_1 & -\frac{w_{p1}}{v_1} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right) p_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -w_{p1} \left[1 + \frac{i_1}{v_1} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right) i_1 \right] & \frac{w_{p1}}{v_1} \left[1 - \frac{i_1}{v_1} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right) p_1 \right] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{w_1 - w_{p1}}{(v')^2} \left(\frac{\partial v'}{\partial p} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -(w_1 - w_p) \left[1 + \frac{i'}{(v')^2} \left(\frac{\partial v'}{\partial p} \right) - \frac{1}{v'} \left(\frac{\partial i'}{\partial p} \right) \right] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{w_2}{v_{2s}} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right) i_{2s} & -\frac{w_2}{v_{2s}} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right) p_{2s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -w_2 \left[1 + \frac{i_{2s}}{v_{2s}} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right) i_{2s} \right] & \frac{w_2}{v_{2s}} \left[1 - \frac{i_{2s}}{v_{2s}} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right) p_{2s} \right] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{w_3}{v_{3s}} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right) i_{3s} & -\frac{w_3}{v_{3s}} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right) p_{3s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -w_3 \left[1 + \frac{i_{3s}}{v_{3s}} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right) i_{3s} \right] & \frac{w_3}{v_{3s}} \left[1 - \frac{i_{3s}}{v_{3s}} \left(\frac{\partial v}{\partial i} \right) p_{3s} \right] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array}$$

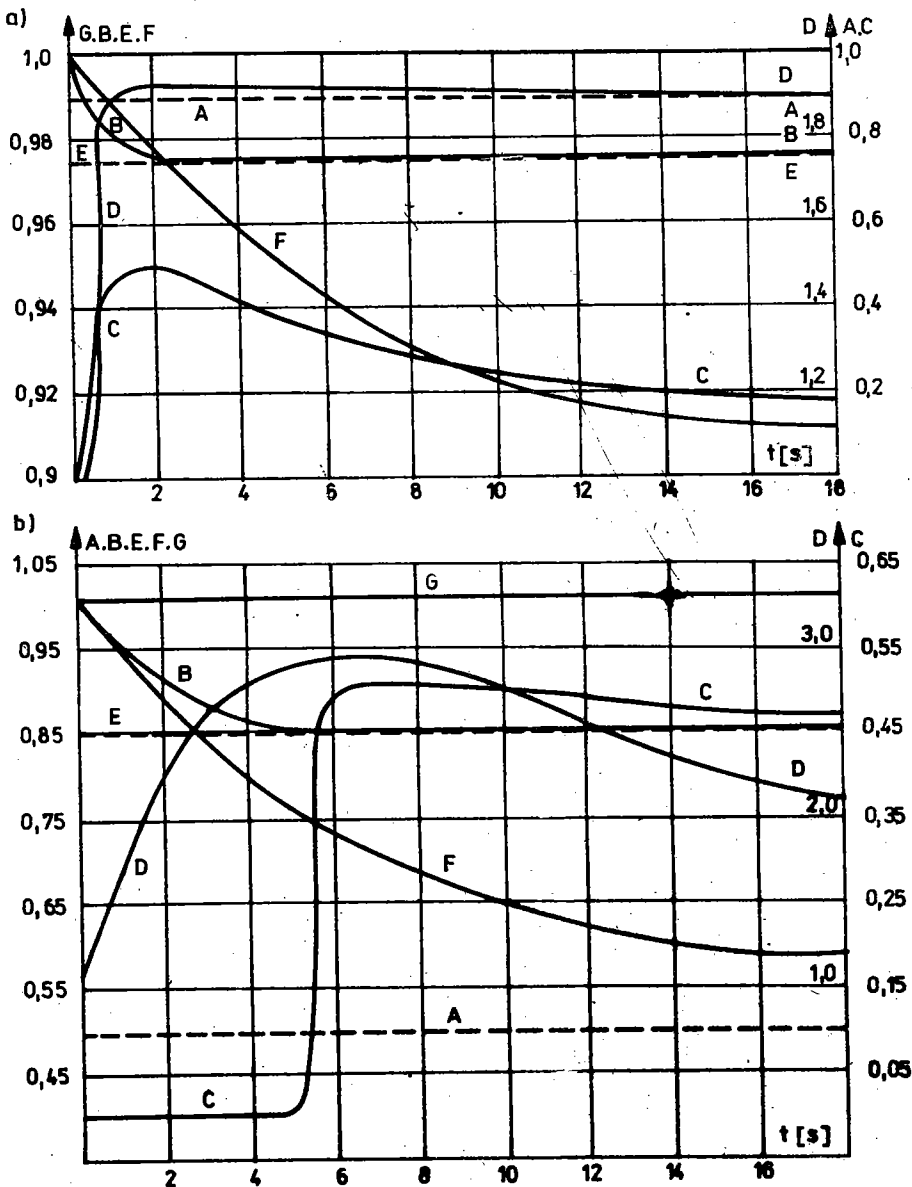
$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \frac{dp}{dt} \\ \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_{2s}}{dt} \\ \frac{di_{3s}}{dt} \\ \frac{dW_{p1}}{dt} \\ G_x \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_1 i_{1p} \\ G_{w1} - G_{w2} \\ (G_{w1} - G_{w2}) i'' + Q_s \\ 0 \\ Q_2 \\ -G_w \\ G_w i_w + Q_3 \end{bmatrix}$$

Pozwala to dalej wyznaczyć wartości pochodnych poprzez rozwiązanie układu równań (27). Wykorzystać można do tego celu jedną z wielu metod rozwiązywania układów równań liniowych.

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ

Wykorzystując przedstawiony model matematyczny przeprowadzono obliczenia wybranych procesów przejściowych dla separatora-przegrzewacza o konstrukcji poziomej, z separatorami żaluzjowymi i dwukrotnym przegrzewem pary. Separatory tego typu, podobne do przedstawionego na rys.1 separatora-przegrzewacza wytwórni Westinghouse, instalowane są między innymi w części radzieckich elektrowni jądrowych z reaktorami typu WWER-440 i turbinami K-220-44 [3].

Przedmiotem przykładowych obliczeń były między innymi procesy skokowej zmiany obciążenia turbozespołu. Część uzyskanych wyników przedstawiono na rys.3. Na rys.3a zamieszczono przebiegi czasowe wybranych parametrów pracy separatora-przegrzewacza powstałe w wyniku skokowej zmiany obciążenia turbozespołu ze 100% do 90%. Na rys.3b przedstawiono przebiegi tych samych parametrów po skoku obciążenia ze 100% do 50%.



Rys.3. Przebiegi czasowe parametrów pracy separatora-przegrzewacza pary po skokowej zmianie obciążenia turbozespołu: a) 100% do 90%, b) 100% do 50%; A - $\frac{G_{\alpha}}{G_{\alpha 0}}$ wymuszenie, B - $\frac{T_{m2}}{T_{m20}}$, C - $\frac{G_{g2}}{G_{g20}}$,

$$D - \frac{G_{g3}}{G_{g30}}, E - \frac{T_{g2}}{T_{g20}} \text{ (wymuszenie)}, F - \frac{p}{p_0}, G - \frac{1}{1-\omega}$$

Omówiony model matematyczny separatora-przegrzewacza pary wykorzystywany był wielokrotnie do badań dynamiki turbiny na parę nasyconą dla elektrowni jądrowej. Uzyskane wyniki omówiono między innymi w pracach [4] i [5], gdzie zamieszczono także przebiegi czasowe niektórych parametrów pracy separatora-przegrzewacza powstałe na skutek działania innych wymuszeń.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lewandowski J.: Metoda wyznaczania charakterystyk dynamicznych turbin na parę nasyconą dla elektrowni jądrowych. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 1978.
- [2] Moore M.J., Siverding C.H.: Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators. McGraw-Hill, 1976.
- [3] Trojanowski B.M.: Turbiny dla atomnych elektrostancji. Energijska, Moskwa, 1978.
- [4] Lewandowski J.: Metoda wyznaczania charakterystyk dynamicznych turbin dla elektrowni jądrowych. Archiwum Energetyki 1/1980.
- [5] Grunwald B., Lewandowski J., Miller A., Plewa J.: Model matematyczny turbiny na parę nasyconą do badania dynamiki turbozespołu elektrowni jądrowej. Biuletyn Informacyjny ITC PW (w druku).
- [6] Kosjak Ju.F.: Paroturbinnyje ustanowki atomnych elektrostancji. Energijska, Moskwa, 1978.
- [7] Andrejew P.A., Gierenszewicz B.A., Paramonow P.M., Terentiew F.K.: Promieźtocznyj sieparator paropriegriewatiel dla turbin Leningradskoj A.E.S. Energiomaszinoostrojenije 10/1974.
- [8] Wołkow P.A.: Isspytanie promieźtocznyh sieparatorow paropriegriewatieliej turbiny K-220-44/3000 na Kolskoj A.E.S. Tieploenergijska 2/1977.
- [9] Modelowanie układu cieplnego i głównych urządzeń elektrowni jądrowej z reaktorem typu WWER dla ustalonych warunków pracy przy różnych obciążeniach. Opracowanie ITC PW, Warszawa 1975 (niepublikowane).
- [10] Dmitrowicz A.: Badanie separatorów żaluzjowych na stoisku doświadczalnym i opracowanie wyników badań. Opracowanie Instytutu Techniki Ciepłej, Łódź, 1967 (niepublikowane).
- [11] Ciągadlak R.: Uproszczony model matematyczny dynamiki przegrzewacza separatora pary w języku symulacyjnym SOCP. Opracowanie Instytutu Energetyki, Warszawa, 1977 (niepublikowane).

- [12] M a r g u ł o w a T.H.: Raszot i projektowanie parogeneratorów atomnych stacyj. Gosenergoizdat., Moskwa, 1962.
- [13] P i o t r o w s k i J., F a s t o w s k i W.: Współczesne, wysokosprawne wymienniki ciepła. WNT, Warszawa, 1964.
- [14] L e w a n d o w s k i J.: Zagadnienia opisu własności termodynamicznych pary wodnej przy modelowaniu dynamiki turbin. Biuletyn Informacyjny ITC PW (w druku).
- [15] L e w a n d o w s k i J.: Zagadnienie modelowania matematycznego i symulacji cyfrowej procesów niestabilnych w turbinach parowych. Archiwum Energetyki 2/1981.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕПАРАТОРА - - ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТУРБИНЫ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

Описывается математическая модель промежуточного сепаратора-пароперегревателя для исследования динамики турбины, работающей на насыщенном паре, предназначенной для атомной электростанции. Оговаривается концепция и структура модели. Приводятся основные характеристики модели и методы ее решения. Приводятся примерные результаты вычислений, описывающих переходные процессы, возникающие в сепараторе-пароперегревателе вследствие скачкообразного изменения нагрузки турбины.

MATHEMATICAL MODEL OF A SEPARATOR/SUPERHEATER FOR ANALYZING THE DYNAMICS OF A NUCLEAR POWER PLANT TURBINE

S u m m a r y

The mathematical model of a moisture separator/steam superheater for analyzing the dynamics of a saturated steam turbine for nuclear power plants has been presented in this paper. The concept and structure of the model has been discussed.

The basic relationships appearing in the model have been given and the method of solving it presented. Exemplary results of calculating the transient processes occurring in the

separator/superheater as a consequence of jump changes in turbine load have been cited.

Rękopis dostarczono w listopadzie 1982 r.