

Edward SZWARC, Arkadiusz DĄBROWSKI

Politechnika Warszawska

MODEL DYNAMIKI PIONOWEJ U-RUROWEJ WYTWORNICY PARY
DLA ELEKTROWNI JĄDROWEJ Z REAKTOREM WODNYM CIŚNIENIOWYM

Streszczenie. Przedstawiono nieliniowy model dynamiki pionowej U-rurowej wytwornicy pary dla elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym. Opisano procesy cieplne i hydrauliczne z uwzględnieniem asymetrii obciążenia cieplnego w obszarze pęczka grzejnego oraz zmiany krotności cyrkulacji naturalnej czynnika obiegu wtórnego. Zaprezentowano wybrane charakterystyki dynamiczne obliczone na maszynie cyfrowej IBM379/145. Zestawiono najważniejsze wnioski.

Oznaczenia

- α - krotność obiegu naturalnego
- d - średnica, m
- F - powierzchnia ogrzewalna, m^2
- H - wysokość, m
- i - entalpia, kJ/kg
- M - strumień masy, kg/s
- Q - ilość ciepła, W
- P - ciśnienie, MPa
- S - przekrój, m^2
- t - temperatura, $^{\circ}C$
- V - objętość, m^3
- γ - współczynnik rozdziału ciepła
- z - stopień otwarcia zaworu,
- α - współczynnik wnikania ciepła, W ($m^2 \cdot K$)
- α^* - zastępczy współczynnik wnikania ciepła, W ($m^2 \cdot K$)
- δ - grubość, m
- Δp - spadek ciśnienia
- λ - przewodność cieplna, W (m.K)
- ρ - gęstość właściwa, kg/m^3

Indeksy cyfrowe

- Pierwszy 1 - obieg pierwotny
- 2 - obieg wtórny
- 0 - metal

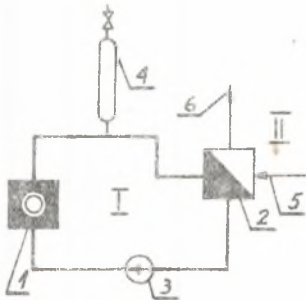
- Drugi 1 - wejście
 2 - wyjście
 0 - wartość średnia
- Trzeci 1 - ustalony stan początkowy ($\bar{t} = 0$)

Indeksy literowe

- k - kanał
 śr - średni
 w - wewnętrzny
 z - zewnętrzny

1. Wstęp

Wytwornica pary jest jednym z głównych urządzeń niekonwencjonalnych elektrowni jądrowych z reaktorami wodnymi ciśnieniowymi (PWR, WWER). Tworzy ona wraz z reaktorem zasadniczy zespół w jądrowym układzie wytwarzania pary i jest (rys. 1) elementem przynależnym zarówno do obiegu pierwotnego jak i wtórnego elektrowni. Z tego względu dynamika jej ma istotny wpływ na dynamikę bloku.



Rys. 1. Uproszczony schemat wytwornicy pary w elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym

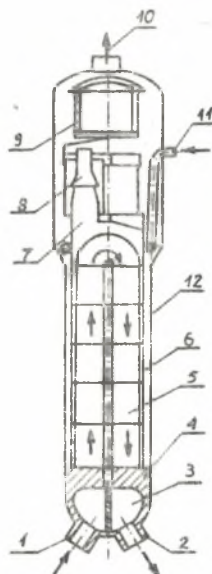
- 1 - reaktor, 2 - wytwornica pary, 3 - główna pompa cyrkulacyjna, 4 - stabilizator ciśnienia, 5 - doprowadzenie wody zasilającej, 6 - odprowadzenie pary do turbiny. I - obieg pierwotny, II - obieg wtórny

2. Budowa i działanie pionowej U-rurowej wytwornicy pary

Pionowa U-rurowa wytwornica pary jest aktualnie i będzie w latach 80 najpowszechniej stosowanym typem wytwornicy w blokach jądrowych krajów zachodnich. Również w kraju ten typ wytwornicy jest przedmiotem szeregu prac studialnych. Budowę i zasadę działania wytwornicy przedstawia schematycznie rys. 2.

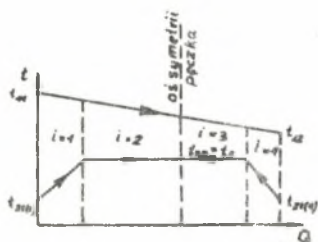
Ze względu na specyficzny kształt elementów powierzchni ogrzewalnej (U-ruki lub rurki w kształcie litery \sqcap) proces wymiany ciepła jest w pionowej U-rurowej wytwornicy pary wysoce zróżnicowany w obszarze obu poziomów pęczka grzejącego, co widać wyraźnie na wykresie $t - Q$ (rys. 3). Ma

to bezpośredni wpływ na zróżnicowanie natężenia przepływu wody cyrkulacyjnej w przestrzeni międzyrurkowej pęczka grzejnego.



Rys. 2. Budowa i zasada działania pionowej U-rurowej wytwornicy pary

1 - wlot chłodziwa reaktorowego, 2 - wylot chłodziwa reaktorowego, 3 - komory chłodziwa reaktorowego, 4 - dno sitowe, 5 - pęczek grzejny, 6 - kanał opalowy, 7 - kanał nieogrzewany, 8 - pierwszy stopień separacji wilgoci, 9 - drugi stopień separacji wilgoci, 10 - wylot pary, 11 - wlot wody zasilającej, 12 - płaszcz wytwornicy



Rys. 3. Wykres $t - Q$ wytwornicy (rozwiniecie wzdłuż rurki grzejnej)

3. Wprowadzenie do modelu dynamiki

Prezentowany model dynamiki pionowej U-rurowej wytwornicy pary jest modelem wysoce uproszczonym. Określa on zależności matematyczne pomiędzy przebiegami dynamicznymi parametrów czynników obiegu pierwotnego i wtórnego na wylocie z wytwornicy a przebiegami parametrów tychże czynników na wlocie do wytwornicy przy założeniu rozłożonych pojemności cieplnych. Nie zawiera on natomiast żadnych zależności określających dynamiczny stan naprężeń w neutralizowanych węzłach konstrukcyjnych wytwornicy.

Tak sformułowany model jest modelem w III stopniu uproszczenia, jeżeli przyjąć klasyfikację podaną w [1].

W wyniku realizacji modelu powinny zostać określone:

- a) parametry pary wylotowej,
- b) parametry chłodziwa reaktorowego na wylocie z wytwornicy,
- c) poziom wody w kanale opadowym,
- d) charakterystyczny parametr geometryczny (długość, wysokość) poszczególnych stref wymiany ciepła,
- e) średnie temperatury ścianki rurki pęczka grzejnego w poszczególnych strefach obliczeniowych wytwornicy.

4. Koncepcja modelu i przyjęty model fizyczny wytwornicy

Koncepcja modelu dynamiki rozpatrywanego typu wytwornicy podporządkowana została konieczności określenia parametrów wymienionych w p. 3a-3e z uwzględnieniem problemów wynikających:

- a) ze zmiennej krotności cyrkulacji czynnika obiegu wtórnego,
- b) z asymetrii obciążenia cieplnego w obszarze pęczka grzejnego.

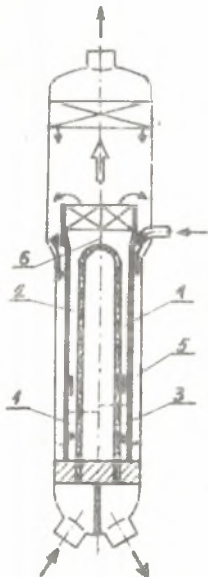
Zależność funkcyjną krotności cyrkulacji czynnika obiegu wtórnego od czasu przyjęto na podstawie dostępnych danych eksploatacyjnych z terenu elektrowni jądrowych z wytwornicami rozpatrywanego typu [5].

Uwzględniając asymetrię obciążenia cieplnego na obszarze pęczka grzejnego, założono podział pęczka na dwie gałęzie "gorącą" i "zimną" o stałych długościach równych połowie długości średniej rurki pęczka grzejnego. W obszarze każdej gałęzi wyróżniono dwie strefy

- strefę podgrzewu,
 - strefę wrzenia,
- o długościach zmiennych w funkcji czasu.

Tak więc w obszarze pęczka grzejnego podzielono wytwornicę na 4 strefy:

- 1 - strefa podgrzewu współprądowego,
- 2 - strefa wrzenia przy zgodnym kierunku przepływu czynników obiegu pierwotnego i wtórnego,
- 3 - strefa wrzenia przy przeciwnym kierunku przepływu czynników obiegu pierwotnego i wtórnego,
- 4 - strefa podgrzewu przeciwproudowego.



Rys. 4. Pionowa U-rururowa wytwornica pary: podział na strefy obliczeniowe

Poza obszarem pęczka grzejnego, dla celów badania dynamiki poziomu wody w kanale opadowym wyróżniono strefę tego kanału (strefa 5). Wyróżniono również strefę nieogrzewanego kanału między skrajnymi rurkami pęczka grzejnego a separatorami I stopnia, w której w wyniku procesu mieszania czynnika obiegu wtórnego następuje ustalenie parametrów termodynamicznych pary wylotowej (strefa 6).

Model fizyczny wytwornicy przyjęty jako podstawa dla opracowania modelu dynamiki przedstawiony został na rys. 4.

5. Podstawowe założenia przyjęte przy budowie modelu dynamiki

Ograniczone możliwości rozwiązania skomplikowanego układu równań różniczkowych i algebraicznych powstającego w wyniku próby stworzenia modelu dynamiki wytwornicy zmuszają do przyjęcia daleko idących założeń upraszczających. Potwierdzają to źródła literaturowe, np. [3], [4], [6].

W trakcie budowy prezentowanego modelu przyjęto szereg założeń upraszczających wyszczególnionych w [7].

Do najważniejszych należą następujące:

1. Znane są wszystkie interesujące wielkości w ustalonym stanie wyjściowym.
2. Wytwornica jest obiektem o rozłożonej pojemności cieplnej.
3. Płaszcz zewnętrzny wytwornicy jest ścianką adiabatyczną.
4. Wężownice pęczka grzejnego są całkowicie zalane wodą obiegu wtórnego.
5. Przyjmuje się rurkę grzejną o długości średniej jako reprezentatywną dla pęczka.
6. Przyjmuje się liniowy spadek ciśnienia czynnika obiegu pierwotnego na długości rurki grzejnej.
7. Przyjmuje się stały wydatek w obiegu pierwotnym ($M_{10} = \text{const}$).
8. Przyjmuje się, że para jest pobierana wyłącznie przez turbinę.
9. Nie uwzględnia się awaryjnych stanów pracy wytwornicy.

6. Podstawowe zależności przyjęte przy budowie modelu

6.1. Równania stanu

Równania stanu dla czynnika jednogazowego zapisano jako funkcje dwu zmiennych typu:

$$F(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

natomiast dla stanu nasyconia jako funkcje jednej zmiennej

$$F(x, y) = 0 \quad (2)$$

6.2. Równania zachowania masy

W związku z przyjęciem założenia 7 p. 5 równanie zachowania masy rozpatrzone wyłącznie dla czynnika obiegu wtórnego:

a) w strefach przepływu jednofazowego (strefy $i = 1, i = 4$) równanie to ma postać:

$$\frac{d}{dt} [Q_{20i}(\tau) \cdot V_{20i}(\tau)] = M_{21i}(\tau) \cdot M_{22i}(\tau) \quad (3)$$

b) w strefach przepływu dwufazowego ($i = 2, i = 3$) równanie zachowania masy sprowadzone do postaci:

$$\frac{d}{dt} [Q'_{20i}(\tau) \cdot V'_{20i}(\tau)] = M_{21i}(\tau) - M_{22i}(\tau) \quad (4)$$

c) dla strefy kanału opadowego równanie zachowania masy przyjęto w postaci:

$$\frac{d}{dt} Q_{20(5)}(\tau) \cdot H_{20(5)}(\tau) \cdot S_k = M_{21}(\tau) - M_{22}(\tau) \quad (5)$$

6.3. Równania zachowania pędu

Równanie zachowania pędu dla czynnika obiegu pierwotnego przyjęto uwzględniając założenie 6 p. 5 w postaci:

$$P_{12i}(\tau) = P_{11i}(\tau) - \frac{P_{10}(\tau)}{1_{10}} \cdot 1_{1i}(\tau) \quad (6)$$

Ze względu na charakter procesów (cyrkulacja naturalna czynnika obiegu wtórnego) nie uwzględniono w modelu równania zachowania pędu dla czynnika obiegu wtórnego.

6.4. Równania zachowania energii

a) Dla czynnika obiegu pierwotnego

$$\frac{d}{dt} [Q_{10i}(\tau) \cdot V_{10i}(\tau) \cdot i_{10i}(\tau)] = M_{10} [i_{11i}(\tau) - i_{12i}(\tau)] + Q_{10i}(\tau) \quad (7)$$

przy czym równanie (7) jest obowiązujące dla stref 1-4.

b) Dla czynnika obiegu wtórnego

b1) w strefie przepływu jednofazowego

$$\frac{d}{dt} [Q_{20i}(\tau) \cdot V_{20i}(\tau) \cdot i_{20i}(\tau)] = Q_{20i}(\tau) - [M_{22i}(\tau) \cdot i_{22i}(\tau) + M_{21i}(\tau) \cdot i_{21i}(\tau)] \quad (8)$$

b2) w strefie przepływu dwufazowego.

Zgodnie z pierwszą zasadą termodynamiki równanie zachowania energii w strefie przepływu dwufazowego można zapisać w postaci:

$$dQ = dJ - Vdp \quad (9)$$

Przy zaniedbaniu członu Vdp , co wg [6] prowadzi dla ciśnień mniejszych od 7MPa, do błędu nie przekraczającego 2% oraz zastąpieniu wyrażenia $\dot{Q}_{20i}(\gamma) \cdot i_{20i}(\gamma) \cdot V_{20i}(\gamma)$ wyrażeniem $\dot{Q}'_{20i}(\gamma) \cdot i'_{20i}(\gamma) \cdot V'_{20i}(\gamma)$, co dla warunków charakterystycznych dla pracy pionowej U-rurowych wytwornic pary obarcza obliczenia błędem nie większym niż 8%, uzyskuje się równanie zachowania energii w postaci:

$$\frac{d}{d\gamma} \left[\dot{Q}'_{20i}(\gamma) \cdot V'_{20i}(\gamma) \cdot i'_{20i}(\gamma) \right] = Q_{20i}(\gamma) \cdot M_{22i}(\gamma) \cdot i_{22i}(\gamma) + M_{21i}(\gamma) \cdot i_{21i}(\gamma) \quad (10)$$

6.5. Równania bilansowe

a) Równanie bilansu ciepła na granicy: czynnik obiegu pierwotnego - ścianka rurki grzejnej:

$$Q_{10i}(\gamma) = F_{10i}(\gamma) \cdot \alpha_{10i}^*(\gamma) \cdot [t_{10i}(\gamma) - t_{00i}(\gamma)] \quad (11)$$

b) Równanie bilansu ciepła dla ścianki rurki:

$$\frac{d}{d\gamma} \left[\dot{Q}_{10} \cdot V_{00i}(\gamma) \cdot c_o \cdot t_{00i}(\gamma) \right] = Q_{10i}(\gamma) - Q_{20i}(\gamma) \quad (12)$$

c) Równanie bilansu ciepła na granicy: ścianka rurki - czynnik obiegu wtórnego:

$$Q_{20i}(\gamma) = F_{20i}(\gamma) \cdot \alpha_{20i}^*(\gamma) [t_{00i}(\gamma) - t_{20i}(\gamma)] \quad (13)$$

W równaniach powyższych wielkości $\alpha_{10i}^*(\gamma) \cdot \alpha_{20i}^*(\gamma)$ definiowano jako

$$\alpha_i^*(\gamma) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i(\gamma)} + \frac{1}{4\lambda_{00}} \ln \frac{dz}{dw}} \quad (14)$$

Zaś współczynniki wnikania ciepła $\alpha_i(\gamma)$ określono na podstawie powszechnie stosowanych zależności.

6.6. Równania specjalne

a) Równanie określające krotność cyrkulacji czynnika obiegu wtórnego

Równanie to uzyskano na podstawie interpolacji wyników podanych wg [5]

$$c_{20}(\gamma) = c_{201}(2,963 M^3 - 3,444 M^2 - 1,967 M + 3,464) \quad (15)$$

gdzie:

$$M = \frac{M_{22}(\gamma)}{M_{21}} \quad (16)$$

b) Równanie określające współczynnik rozdziału ciepła

$$\gamma(\gamma) = \frac{Q_{20(2)}(\gamma)}{Q_{20(2)}(\gamma) + Q_{20(3)}(\gamma)} \quad (17)$$

c) Równanie poboru pary

Równanie to przyjęto w oparciu o [2] jako:

$$M_{22}(\gamma) = K \cdot P_{22}(\gamma) \cdot z_{20}(\gamma) \quad (18)$$

gdzie:

$$K = \frac{M_{221}}{P_{221} \cdot z_{201}} \quad (19)$$

7. Struktura modelu

Model zbudowany dla celów realizacji obliczeń dynamicznych zestawiono z szeregu makrobloków, tj.:

makrobloku "PRIM" - opisującego dynamikę obiegu pierwotnego dla stref 1-4 wytwornioy,

makrobloku "SELO" - opisującego dynamikę obiegu wtórnego w strefach przepływu jednofazowego (1,4),

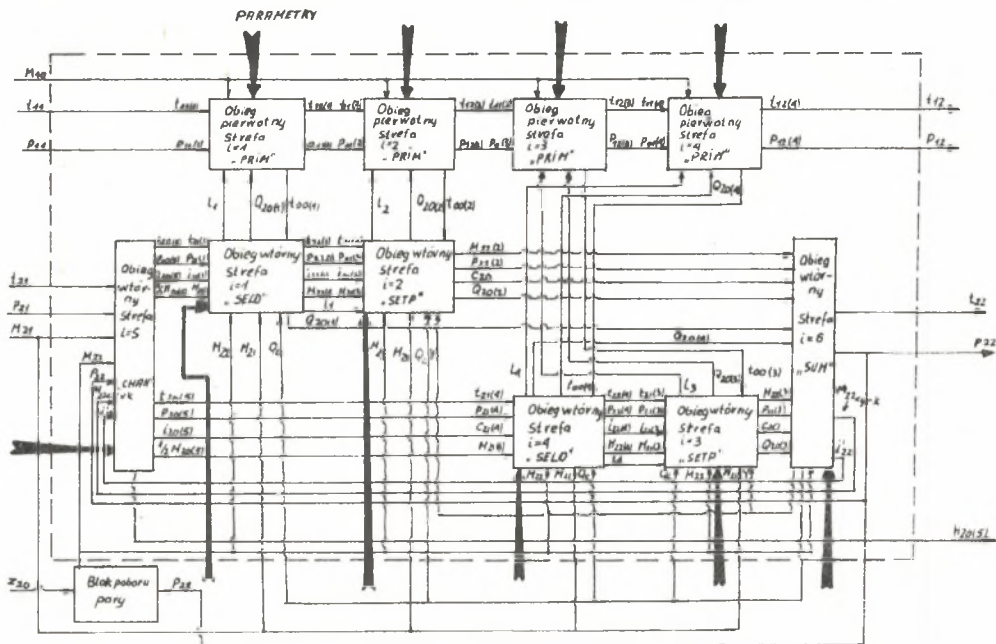
makrobloku "SETP" - opisującego dynamikę obiegu wtórnego w strefach przepływu dwufazowego (2,3),

makrobloku "SUM" - opisującego parametry czynnika obiegu wtórnego w kanale nieogrzewanym (strefa 6),

makrobloku "CHAN" - opisującego dynamikę czynnika obiegu wtórnego w kanale opadowym (strefa 5),

makrobloku poboru pary.

Schemat blokowy wytwornicy z zaznaczonymi wejściami i wyjściami oraz sprzężeniami występującymi między makroblokami przedstawiono na rys. 5.



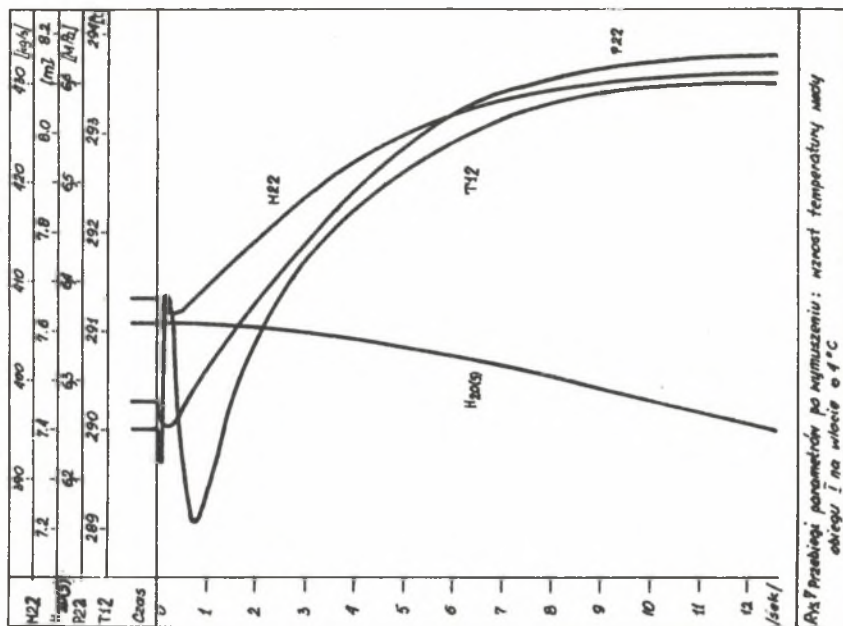
Rys. 5. Schemat blokowej pionowej U-rurowej wytwornicy pary dla celów obliczeń dynamicznych

8. Realizacja modelu

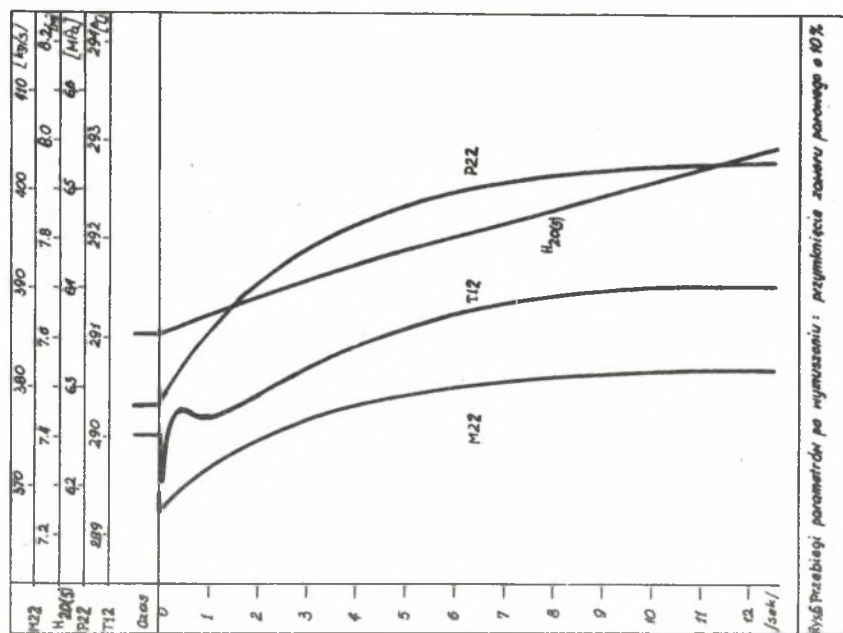
Model dynamiki omawianej wytwornicy zestawiono ze 125 równań, w tej liczbie z 17 równań różniczkowych, zwyczajnych, nieliniowych. Celem wyznaczenia wartości interesujących parametrów zbudowano algorytm obliczeń, który zapisano w postaci programu na emc w języku Fortran IV. Program zrealizowano na maszynie cyfrowej IBM-370/145. Badano odpowiedzi dynamiczne na zakłócenia wartości pięciu parametrów:

- ciśnienia czynnika obiegu pierwotnego,
- temperatury czynnika obiegu pierwotnego,
- temperatury wody zasilającej,
- wydatku wody zasilającej,
- wydatku pary.

Zakłócenia realizowano jako "skoki jednostkowe" od wartości ustalonej. Charakterystyki dynamiczne dla danych wybranych zakłóceń przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 6



Rys. 7

9. Wnioski

W trakcie budowy i realizacji modelu dynamiki wytwornicy nasunęło się szereg wniosków. Do najważniejszych należą:

- a) dokonany podział wytwornicy w obszarze pęczka grzejnego na 4 strefy wydaje się optymalny. Zwiększenie krotności podziału zmusiłoby do stosowania skomplikowanej obliczeniowo procedury poszukiwania początku strefy wrzenia, co spowodowałoby nadmierną rozbudowę i tak skomplikowanego modelu;
- b) nie wszystkie z badanych zaburzeń parametrów na wlocie do wytwornicy prowadzą do równie istotnych zmian wartości parametrów na wylocie. Z testowanych zaburzeń najsilniejszy wpływ mają zaburzenia temperatury chłodziwa reaktorowego oraz wydatku pary;
- c) stan osiągnięcia nowego stanu równowagi jest różny dla różnych zaburzeń i wynosi od kilku do kilkunastu sekund. Praktycznie dla zaburzeń testowanych po czasie 15 sekund układ osiągał nowy stan ustalony bez względu na rodzaj zaburzenia.

LITERATURA

- [1] Duda M.: Struktura, zakres i założenia modelu matematycznego dynamiki podstawowych urządzeń EJ z reaktorem wodno-ciśnieniowym. Instytut Energetyki, 1974 (nie publikowane).
- [2] Girszfeld W.I., Kulikow W.S.: Issledovanie maneვენnosti bloka 200 MW, Теплоэнергетика, 1969 nr 1.
- [3] Rubek J.: Programa dla razozeta dinamiczeskich charakteristik parogeneratora na CUM pri uczytvanii osnovnykh nelineijnostiej. Sympozjum RWPG. Warszawa, 1973 (nie publikowane).
- [4] Sanathanan C.K.: Dynamic modeling of a large once-through steam generator. Nuclear Engineering and Design, 1972, t. 23 nr 3.
- [5] Shenk H., Mayr A., Pickel E.: Erfahrungen mit den Dampferzeugern im Kernkraftwerk Obrigheim... Mitteilungen der VGB, 1971 nr 3 s. 175-181.
- [6] Spasskov V.P. i inni: Matematicheskaja model dla issledovania dinamiki processov w I konture i parogeneratorach ustanovki s reaktorom tipa WWER. Sympozjum RWPG. Warszawa 1973 (nie publikowane).
- [7] Szwarz E.: Nelineiowy model dynamiki pionowej U-rurowej wytwornicy pary dla elektrowni jądrowej z reaktorem wodnym ciśnieniowym. Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska 1975 (nie publikowane).

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО U-ОБРАЗНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С РЕАКТОРОМ ТИПА ВВЭР

Резюме

Представлена нелинейная модель динамики U-образного вертикального парогенератора для атомной электростанции с реактором типа ВВЭР. Описаны процес-

сы теплообмена и гидравлики с обращением внимания на асимметрию тепловой нагрузки в пространстве греющего пучка и на изменение кратности естественной циркуляции. Указаны некоторые динамические характеристики. Подчеркнуты главные выводы.

THE COMPLEX MODEL OF DYNAMICS OF VERTICAL U-TUBE STEAM
GENERATOR FOR A NUCLEAR POWER STATION

S u m m a r y

Nonlinear model of vertical U-tube steam generator for PWR atomic power plant dynamics was shown. Heat transfer and hydrodynamic processes with taking into account asymmetric heat load in the area of tubes bundle and a change of natural circulation ratio was described. Selected dynamic characteristics and main conclusions are presented.