ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1974

Seria: Energetyka z. 51 Nr kol. 405

Jan Nadziakiewicz

DOBÓR WSPÓŁCZYNNIKÓW UKŁADU REGULACJI REAKTORA SIŁOWNI JĄDROWEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę obliczania współczynników układu regulacji dla złożonych obiektów. Zastosowanie całkowego kryterium jakości procesu regulacji oraz metody najszybszego spadku pozwala na usystematyzowanie obliczeń. Przedstawione wykresy ilustrują proces stopniowego dochodzenia do optymalnego kształtu procesów przejściowych. Metoda nadaje się dla obiektów, dla których równania dynamiki dadzą się zlinearyzować.

1. Omówienie problemu regulacji siłowni jądrowej

Układ regulacji powinien zabezpieczać siłownię przed wystąpieniem znacznych przeregulowań w stanach nieustalonych, a w stanie ustalonym powinien stabilizować wielkości regulowane.

Stany nieustalone siłowni jądrowej mogą być spowodowane przez oddziaływanie różnych zakłóceń. Za główne zakłócenia uważa się:

1) rozruch reaktora lub jego wyłączenie,
2) zmianę mocy siłowni zależnie od zapotrzebowania na energię elektryczną.

Zmiana mocy siłowni związana jest z wystąpieniem odchyleń wszystkich parametrów od ich wartości ustalonych [1]. Odchylenia te mogą nie jednokrotnie mieć tak duże wartości, że spowodują one uszkodzenia, a nawet zniszczenie, niektórych elementów układu siłowni.

Na postać procesów przejściowych siłowni można wpływać przez właściwe sterowanie mocą reaktora prętami regulacyjnymi. Zmieniając moc odpowiednio powoli można ograniczyć wahania parametrów do wartości, które nie będą niebezpieczne dla urządzeń siłowni. Równocześnie jednak wzrośnie czas dojścia do nowego stanu równowagi. Powstaje więc

problem takiego sterowania mocą reaktora, aby odchylenia parametrów mieściły się w dopuszczalnych granicach, a równocześnie aby proces regulacji przebiegał możliwie szybko.

Ze względu na konieczność wprowadzenia uproszczeń w opisie matematycznym siłowni problem ten rozwiązany jest dla przypadku niewielkich odchyleń mocy reaktora od mocy nominalnej.

Jako przykład do obliczeń wybrano siłownię jądrową z obiegiem podwójnym z reaktorem chłodzonym wodą pod ciśnieniem. Jest to typ siłowni obecnie najpowszechniej w świecie stosowany ze względu na pewność działania i niskie koszty eksploatacyjne. Tego typu siłownią ma być też pierwsza polska siłownia jądrowa.

Obiekt regulacji - siłownię opisuje układ równań różniczkowych nieliniowych. Rozwiązanie i analiza takiego układu równań jest niemożliwa metodami analitycznymi a często i numerycznymi. Z tych względów konieczne jest dokonanie linearyzacji równań.

Zlinearyzowane równania opisują zachowanie się obiektu w okolicy punktu pracy. Dla niewielkich odchyleń, można na podstawie tego układu równań oceniać stabilność siłowni i jakość procesów przejściowych [2].

Z oceną własności dynamicznych wiąże się sprawa wyboru kryterium jakości procesów przejściowych oraz wyboru postaci sygnału zakłócającego układ. W pracy przyjęto całkowe kwadratowe kryterium jakości z uwagi na występowanie przebiegów oscylacyjnych [3].

Jako punkt wyjścia doboru układu regulacji przyjęto zachowanie się obiektu bez układu regulacji, tylko pod działaniem wewnętrznych sprzężeń zwrotnych. Zastosowany układ regulacji powinien poprawić postać przebiegów przejściowych w sensie wybranego kryterium.

Przyjęto, że sygnał sterujący mocą reaktora (przesunięcie prętów regulacyjnych) jest funkcją wszystkich parametrów siłowni takich jak: temperatura, ciśnienie itp. Współczynniki tej funkcji zmieniamy w taki sposób, aby malało kryterium jakości. W rezultacie otrzymuje się taką zależność sygnału sterującego od parametrów, której spełnienie poprawi proces regulacji.

Zastosowano metodę najszybszego spadku, polegającą na równoczesnej krokowej zmianie wszystkich współczynników w kierunku przeciwnym do gradientu funkcji kryterialnej [4].

Metoda pozwala na przerwanie obliczeń po dowolnej liczbie kroków w chwili, gdy zostanie stwierdzone, że przebiegi przejściowe parametrów siłowni mieszczą się w dopuszczalnych granicach. Nie jest przy tym wymagane dojście do absolutnego optimum funkcji kryterialnej. Po wykonaniu kolejnego kroku można obliczyć kształt przebiegów przejściowych i w ten sposób kontrolować prawidłowość kierunku zmian współczynników.

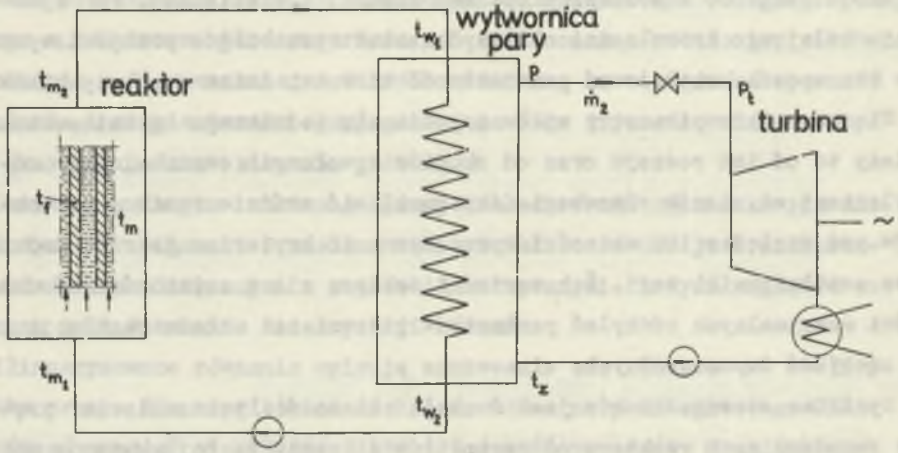
Nie wszystkie parametry siłowni podlegają jednakowym ograniczeniom. Zależy to od ich rodzaju oraz od skutków wywołanych ewentualnymi odchyleniami od stanów równowagi. Aby umożliwić zróżnicowanie parametrów pod względem ich ważności wprowadzono do kryterium jakości dodatkowe współczynniki wagi. Ich wartości dobiera się w zależności od wielkości maksymalnych odchyleń parametrów siłowni bez układu regulacji i od odchyleń dopuszczalnych.

Wynikiem szeregu kroków jest funkcja zależności przesunięcia prętów regulacyjnych reaktora od parametrów siłowni. Na tej podstawie można określić strukturę układu regulacji siłowni oraz przybliżone wartości współczynników tego układu.

2. Obiekt regulacji - siłownia jądrowa

Jako obiekt wybrano siłownię z reaktorem chłodzonym wodą pod ciśnieniem. Siłownia posiada dwa obiegi. W pierwszym obiegu chłodziwem jest woda pod ciśnieniem, co zabezpiecza przed wystąpieniem wrzenia. Woda ta jest równocześnie moderatorem neutronów w reaktorze. Odbiera ona ciepło od elementów paliwowych w rdzeniu reaktora i przekazuje w wymienniku ciepła do obiegu wtórnego. W obiegu wtórnym wytwarza się para wodna nasycona sucha zasilająca turbinę parową (rys. 1).

Ten typ obiegu jest obecnie najczęściej stosowany w siłowniach dużej mocy.



Rys. 1. Schemat obiegu siłowni jądrowej

2.1. Równania dynamiki siłowni

Kinetykę reaktora opisujemy z uwzględnieniem jednej grupy neutronów opóźnionych [5].

Równania opisujące zmianę koncentracji neutronów i zmianę koncentracji jąder generujących neutrony opóźnione:

$$\frac{dn}{d\tau} = \frac{x(1-\beta)-1}{l} n + \lambda \cdot c \qquad (1)$$

$$\frac{dc}{d\tau} = \frac{x\beta}{l} n - \lambda \cdot c \qquad (2)$$

gdzie

x - stosunek mnożenia reaktora,

β - udział neutronów opóźnionych,

l - średni czas życia neutronów w reaktorze,

n - gęstość neutronów w reaktorze n/cm^3,

c - koncentracja jąder generujących neutrony opóźnione $1/cm^3$,

λ - stała rozpadu jąder generujących neutrony opóźnione,

τ - czas.

Stosunek mnożenia x jest zależny od położenia prętów regulacyj - nych (x_z) i od wewnętrznych temperaturowych sprzężeń zwrotnych (x_T):

$$x = x_Z + x_T \tag{3}$$

Temperaturowe sprzężenie zwrotne można zapisać:

$$x_T = -\gamma_f \cdot t_f - \gamma_m \cdot t_m \tag{4}$$

gdzie

t_f, t_m - temperatury paliwa i moderatora,

γ_f, γ_m - dodatnie współczynniki.

Pisząc dla przyrostów i w postaci bezwymiarowej (wielkości z kreską oznaczają wartości w stanie ustalonym):

$$\frac{dn}{d\tau} = -\frac{\beta}{l} n + \frac{\lambda \bar{c}}{\bar{n}} c - \frac{(1-\beta)}{l} \gamma_f \bar{t}_f \cdot t_f - \frac{(1-\beta)}{l} \gamma_m \cdot \bar{t}_m \cdot t_m + \frac{(1-\beta)}{l} \bar{x}_z \cdot x_z \tag{5}$$

$$\frac{dc}{d\tau} = \frac{\bar{n}\beta}{\bar{c} \cdot l} n - \lambda c - \frac{\bar{n}\beta}{\bar{c} \cdot l} \cdot \gamma_f \cdot \bar{t}_f \cdot t_f - \frac{\bar{n}\beta}{\bar{c} \cdot l} \gamma_m \cdot \bar{t}_m \cdot t_m + \frac{\bar{n}\beta}{\bar{c} \cdot l} \cdot \bar{x}_z \cdot x_z \tag{6}$$

Bilans energetyczny paliwa

Równanie bilansu ciepła dla jednostki długości cylindrycznego pręta paliwowego:

$$M_f \frac{dt_f}{d\tau} = -A_f \alpha_f (t_f - t_m) + \pi R^2 q_v \tag{7}$$

gdzie

R - promień pręta paliwowego,

M_f - pojemność cieplna paliwa,

A_f - powierzchnia zewnętrzna pręta paliwowego,

t_f - temperatura, paliwa,

t_m - temperatura moderatora (chłodziwa),

α_f - współczynnik wnikania ciepła od paliwa do moderatora,

q_v - natężenie generacji ciepła w jednostce objętości paliwa.

Moc generowana w paliwie:

$$P_f = \pi \cdot R^2 \cdot q_v = K \cdot n \tag{8}$$

gdzie

K - stała proporcjonalności.

Pisząc w postaci bezwymiarowej:

$$\frac{dt_f}{d\tau} = \frac{K}{M_f} \cdot \frac{\bar{n}}{\bar{t}_f} \cdot n - \frac{A_f \alpha_f}{M_f} \cdot t_f + \frac{A_f \alpha_f}{M_f} \frac{\bar{t}_m}{\bar{t}_f} \cdot t_m \tag{9}$$

<u>Bilans energetyczny moderatora (chłodziwa)</u>

Bilans energetyczny odcinka kanału:

$$M_m \frac{dt_m}{d\tau} + \dot{m} \cdot c_m \cdot (t_{m2} - t_{m1}) - A_f \alpha_f (t_f - t_m) - \varepsilon \cdot K \cdot n = 0$$

Otrzymujemy dla przyrostów i w postaci bezwymiarowej:

$$\frac{dt_m}{d\tau} = \frac{A_f \alpha_f}{M_m} \frac{\bar{t}_f}{\bar{t}_m} t_f - \frac{1}{M_m} (A_f \alpha_f + 2\dot{m}\, c_m)\, t_m + \frac{2\dot{m} c_m}{M_m} \frac{\bar{t}_{m1}}{\bar{t}_m} t_{m1} + \frac{\varepsilon K}{M_m} \cdot \frac{\bar{n}}{\bar{t}_m} \cdot n \tag{10}$$

gdzie

M_m - pojemność cieplna chłodziwa w rdzeniu reaktora,

C_m - ciepło właściwe chłodziwa,

$\dot{m}$ - masowe natężenie przepływu chłodziwa,

t_m - średnia wartość temperatury chłodziwa w reaktorze,

t_{m1}, t_{m2} - wartości temperatur chłodziwa na dolocie i na wylocie z reaktora,

ε - część mocy cieplnej generowana w chłodziwie, $\varepsilon \cong 0{,}05$.

Podstawiono tu średnie wartości temperatury: $t_m = \frac{t_{m1} + t_{m2}}{2}$.

Rurociąg reaktor - wymiennik:

Przyjmujemy, że czas przepływu czynnika przez rurociąg wynosi τ_1. Płyn jest nieściśliwy a rurociągi są doskonale zaizolowane. Możemy napisać:

$$t_{w1}(\tau) = t_{m2}(\tau - \tau_1) \tag{11}$$

τ_1 - czas opóźnienia w rurociągu reaktor - wymiennik.

Rozwijając w szereg Taylora i pomijając wyrazy rzędu drugiego i wyższych otrzymamy:

$$\frac{dt_{w1}}{d\tau} = \frac{1}{\tau_1} t_{m2} - \frac{1}{\tau_1} t_{w1} \tag{12}$$

we współrzędnych bezwymiarowych:

$$\frac{dt_{w1}}{d\tau} = \frac{2}{\tau_1} \frac{\bar{t}_m}{\bar{t}_{w1}} t_m - \frac{1}{\tau_1} \frac{\bar{t}_{m1}}{\bar{t}_{w1}} t_{m1} - \frac{1}{\tau_1} t_{w1} \tag{13}$$

Rurociąg wymiennik ciepła - reaktor

Analogicznie do poprzednich równań można napisać:

$$\frac{dt_{m1}}{d\tau} = -\frac{1}{\tau_2} t_{m1} - \frac{1}{\tau_2} \frac{\bar{t}_{w1}}{\bar{t}_{m1}} t_{w1} + \frac{2}{\tau_2} \frac{\bar{t}_w}{\bar{t}_{m1}} t_w \tag{14}$$

Równanie wytwornicy pary [6]

Równanie bilansu energii po stronie pierwotnej:

$$M_w \frac{dt_w}{d\tau} + \dot{m} \cdot c_w (t_{w2} - t_{w1}) + A_w \alpha_w (t_w - t_r) = 0 \qquad (15)$$

gdzie

M_w - pojemność cieplna wody po stronie pierwotnej,

c_w - ciepło właściwe wody,

t_w - średnia wartość temperatury wody po stronie pierwotnej,

$\left.\begin{matrix} t_{w1} \\ t_{w2} \end{matrix}\right\}$ - temperatura wlotowa i wylotowa wody,

t_r - temperatura ścianki rury.

Podstawiając $t_w = \frac{1}{2}(t_{w1} + t_{w2})$ i pisząc we współrzędnych bezwymiarowych:

$$\frac{dt_w}{d\tau} = \frac{2\dot{m}c_w}{M_w} \frac{\bar{t}_{w1}}{\bar{t}_w} t_{w1} - \frac{1}{M_w}(A_w \alpha_w + 2\dot{m}\, c_w) t_w + \frac{A_w \alpha_w}{M_w} \frac{\bar{t}_r}{\bar{t}_w} t_r \qquad (16)$$

Bilans energii dla ścian rury wymiennika

Równanie bilansu dla jednostki powierzchni rury:

$$M_r \cdot \frac{dt_r}{d\tau} + \alpha_p (t_r - t_p) - \alpha_w (t_w - t_r) = 0 \qquad (17)$$

M_r - pojemność cieplna jednostki powierzchni rury,

$\left.\begin{matrix} \alpha_p \\ \alpha_w \end{matrix}\right\}$ - współczynniki wnikania ciepła do rury od strony pary i od strony wody,

t_p - temperatura pary po stronie wtórnej,

t_r - temperatura ścianki.

Przyjmując, że wokół punktu pracy można napisać dla przyrostów:

$$\Delta t_p = C \Delta p$$

gdzie

p - ciśnienie pary nasyconej,

C - stała proporcjonalności.

Pisząc we współrzędnych bezwymiarowych:

$$\frac{dt_r}{d\tau} = \frac{\alpha_w}{M_r} \frac{\bar{t}_w}{\bar{t}_r} t_w - \frac{(\alpha_p + \alpha_w)}{M_r} t_r + \frac{\alpha_p C}{M_r} \frac{\bar{p}}{\bar{t}_r} p \qquad (18)$$

Bilans energii po stronie pary

Przyjmujemy, że wymiennik wytwarza parę nasyconą suchą a zasilany jest ze stałym natężeniem wodą o stałej temperaturze t_{zas}, niewiele niższej od temperatury nasycenia

$$V_p \frac{d(\varrho_p u_p)}{d\tau} + \dot{m}_2 i_2 - \dot{m}_1 i_1 + A_p \alpha_p (t_p - t_r) = 0 \qquad (19)$$

gdzie

ϱ_p, u_p - średnia gęstość i średnia energia wewnętrzna mieszaniny parowo-wodnej,

$\dot{m}_1$, $\dot{m}_2$ - natężenie przepływu na dolocie i wylocie z parowej części wymiennika,

i_1, i_2 - entalpie czynnika na wlocie i wylocie,

A_p, α_p - powierzchnia wymiany ciepła i współczynnik wnikania ciepła od strony pary,

V_p - objętość mieszaniny parowo-wodnej po stronie pary.

Bilans masowy czynnika po stronie pary:

$$V_p \frac{d\varrho_p}{d\tau} + \dot{m}_2 - \dot{m}_1 = 0 \qquad (20)$$

Pisząc we współrzędnych bezwymiarowych otrzymujemy z równań (19) i (20)

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{A_p \alpha_p \bar{t}_r}{m_p(\frac{\Delta u_p}{\Delta p})\bar{p}} \cdot t_r - \frac{A_p \alpha_p C}{m_p(\frac{\Delta u_p}{\Delta p})} \cdot p - \frac{\bar{i}_2 - \bar{u}_p}{m_p(\frac{\Delta u_p}{\Delta p})} \cdot \frac{\bar{m}_2}{\bar{p}} \cdot \dot{m}_2 \quad (21)$$

Równania dla rurociągu parowego

Zależność między natężeniami przepływu pary i ciśnieniami na początku i na końcu rurociągu można opisać przybliżonym równaniem [7]:

$$T_m \cdot \frac{d\dot{m}_2}{d\tau} + \dot{m}_2 = \dot{m}_t + T_1 \frac{dp}{d\tau} \quad (22)$$

gdzie wszystkie parametry są bezwymiarowymi przyrostami od stanu równowagi T_m, T_1, T_a - stałe.

Równocześnie przepływ pary przez zawór regulacyjny turbiny można dla przyrostów opisać równaniem:

$$\Delta m_t = (\frac{\Delta m_t}{\Delta p_t}) \Delta p_t + (\frac{\Delta m_t}{\Delta y}) \Delta y \quad (23)$$

gdzie

y - otwarcie zaworu,

p_t - ciśnienie pary przed turbiną.

We współrzędnych bezwymiarowych:

$$m_t = c_1 \cdot p_t + c_2 \cdot \mu \quad (24)$$

gdzie

c_1, c_2 - stałe

μ - względne otwarcie zaworu.

Podstawiając (23) i (20) do równania (21) otrzymujemy:

$$\frac{d\dot{m}_2}{d\tau} = \frac{T_1}{T_m} \frac{A_p \alpha_p}{m_p\left(\frac{\Delta u_p}{\Delta p}\right)} \cdot \frac{\bar{t}_r}{\bar{p}} \cdot t_r - \frac{T_1}{T_m} \frac{A_p \alpha_p C}{m_p\left(\frac{\Delta u_p}{\Delta p}\right)} p -$$

$$- \frac{1}{T_m} \cdot \left(1 + T_1 \frac{(\bar{i}_2 - \bar{u}_p)}{m_p\left(\frac{\Delta u_p}{\Delta p}\right)} \frac{\bar{m}_2}{\bar{p}}\right) \dot{m}_2 + \frac{c_1}{T_m} p_t + \frac{c_2}{T_m} \mu \tag{25}$$

Zależność między ciśnieniami p i p_t a natężeniem przepływu pary m_t można zapisać równaniem we współrzędnych bezwymiarowych:

$$T_p \frac{dp_t}{d\tau} + p_t = k_1 p - k_2 \left(T_2 \frac{dm_t}{d\tau} + m_t\right) \tag{26}$$

gdzie

k_1, k_2 - stałe.

Łącząc ostatnie równania otrzymamy:

$$\frac{dp_t}{d\tau} = \frac{k_1}{T_p + k_2 c_1 T_2} p - \frac{1 + k_2 c_1}{T_p + k_2 c_1 T_2} p_t - \frac{k_2 c_2}{T_p + k_2 c_1 T_2} \cdot \mu \tag{27}$$

2.2. Dane wyjściowe do obliczeń

Jako przykład danych do obliczeń przyjęto wartości parametrów opierając się na charakterystyce elektrowni jądrowej Yankee Atomic [8]. Jest to elektrownia z reaktorem chłodzonym wodą pod ciśnieniem. Wybrano tę elektrownię, ponieważ obecnie na świecie najczęściej buduje się elektrownie tego typu. Również pierwsza polska elektrownia jądrowa będzie posiadała reaktor chłodzony wodą pod ciśnieniem.

Obliczenia wykonano dla następujących wartości parametrów i współczynników:

Typ reaktora	- ciśnieniowy, wodny, z paliwem tlenkowym lekko wzbogaconym (3,4% U235),
Moderator - chłodziwo	- lekka woda,
Moc cieplna reaktora	- 485 MW,
Sredni strumień neutronów termicznych	- $2,5 \cdot 10^{13}$ n/cm^{2}s,
Czas życia neutronów	- $1,85 \cdot 10^{-5}$ s,
Łączna powierzchnia prętów paliwowych	- 1440 m^2,
Współczynnik wnikania ciepła od paliwa do chłodziwa	- 36 kW/m^{2}K,
Natężenie przepływu chłodziwa	- 1,36 kg/s,
Temperatury chłodziwa wlot-wylot	- 258/278°C,
Temperaturowe współczynniki reaktywności:	
paliwa	- $2,7 \cdot 10^{-4}$ 1/K,
moderatora	- $5,4 \cdot 10^{-4}$ 1/K,
Powierzchnia wymiennika ciepła	- 5000 m^2,
Ciśnienie pary nasyconej za wymiennikiem	- 35 bar,
Ciśnienie pary przed turbiną	- 32,6 bar,
Natężenie przepływu pary	- 232 kg/s,
Moc elektryczna turbozespołu	- 145 MW.

Dla zmniejszenia ilości równań wprowadzimy pewne uproszczenia.

1. W równaniu (1) zaniedbamy koncentrację jąder generujących neutrony opóźnione C. Aby skompensować ten błąd skorygujemy czas życia neutronów l, tak aby uwzględniał on istnienie neutronów opóźnionych.
2. Pominiemy pojemność cieplną ściany rury wymiennika.

Dla podanych wielkości obliczono wartości współczynników równań opisujących dynamikę siłowni. Równania te, z wartościami liczbowymi mają postać:

$$\frac{dn}{d\tau} = -0{,}08\ t_f - 1{,}54\ t_m + 10{,}6\ x_z \qquad \text{(I)}$$

$$\frac{dt_f}{d\tau} = 0{,}20\ n - 5{,}86\ t_f + 5{,}66\ t_m \qquad \text{(II)}$$

$$\frac{dt_m}{d\tau} = 0{,}007\ n + 4{,}20\ t_f - 7{,}86\ t_m + 3{,}66\ t_{m1} \qquad \text{(III)}$$

$$\frac{dt_{w1}}{d\tau} = 3{,}85\ t_m - 2{,}0\ t_{w1} - 1{,}85\ t_{m1} \qquad \text{(IV)}$$

$$\frac{dt_{m1}}{d\tau} = -2{,}15\ t_{w1} - 2{,}0\ t_{m1} + 4{,}16\ t_w \qquad \text{(V)}$$

$$\frac{dt_w}{d\tau} = 1{,}0\ t_{w1} - 1{,}40\ t_w + 0{,}07\ p \qquad \text{(VI)}$$

$$\frac{dp}{d\tau} = 358\ t_w - 81{,}6\ p - 4{,}90\ m_2 \qquad \text{(VII)}$$

$$\frac{dm_2}{d\tau} = 1000\ t_w - 228\ p - 16{,}6\ m_2 + 2{,}86\ p_t + 2{,}86\mu \qquad \text{(VIII)}$$

$$\frac{dp_t}{d\tau} = 3{,}30\ p - 3{,}30\ p_t - 0{,}446\ \mu \qquad \text{(IX)}$$

2.3. Zakresy dopuszczalnych zmian wielkości regulowanych

Dopuszczalne zmiany parametrów siłowni są określone przez wymagania eksploatacyjne i wytrzymałościowe. Parametrami, których zmiany najsilniej wpływają na eksploatację siłowni lub wywołującymi największe zagrożenie są:

- temperatura paliwa

- temperatura ścianki elementu paliwowego
- natężenie przepływu i ciśnienie pary przed turbiną.

Graniczną wartością temperatury w osi pręta jest temperatura topnienia uO_2. Stopienie dwutlenku uranu doprowadzić może do deformacji pręta paliwego, pęknięcia jego osłony i skażenia promieniotwórczego pierwotnego obiegu chłodzącego [9].

Przyjęto jako dopuszczalne odchylenie wartości:

$$\left(\frac{\delta t_f}{t_f}\right)_{max} = 0{,}01 = 1\%$$

Dopuszczalna temperatura ścianki elementu paliwowego określona jest przez ciśnienie chłodziwa w reaktorze. Temperatura ta nie może przekroczyć temperatury nasycenia, gdyż spowodowałoby to wrzenie wody i powstanie pęcherzy gazowych. Skutkiem tego byłyby zaburzenia w pracy reaktora, a nawet jego niestabilność.

Przyjęto wartość:

$$\left(\frac{\delta t_m}{t_m}\right)_{max} = 0{,}05 = 5\%$$

Parametry pary przed turbiną mają bezpośredni wpływ na moc turbozespołu. Z tego względu konieczne jest przyjęcie małych wartości dopuszczalnych odchyleń tych wielkości od stanu ustalonego [10].

Przyjęto wartości dopuszczalnych względnych zmian natężenia przepływu pary i ciśnienia pary przed turbiną:

$$\left(\frac{\delta \dot{m}_t}{\dot{m}_t}\right)_{max} = 0{,}01 = 1\%$$

$$\left(\frac{\delta p_t}{p_t}\right)_{max} = 0{,}01 = 1\%$$

3. Metoda obliczeń

Obiekt regulacji opisany jest więc układem równań różniczkowych pierwszego rzędu o stałych współczynnikach:

$$\begin{aligned}
\dot{y}_1 &= A_{11}\, y_1 + A_{12}\, y_2 + \dots\dots\dots + A_{1n}\, y_n + d_1 \cdot x \\
\dot{y}_2 &= A_{21}\, y_1 + A_{22}\, y_2 + \dots\dots\dots + A_{2n}\, y_n \\
\dot{y}_3 &= A_{31}\, y_1 + A_{32}\, y_2 + \dots\dots\dots + A_{3n}\, y_n \\
\dot{y}_n &= A_{n1}\, y_1 + A_{n2}\, y_2 + \dots\dots\dots + A_{nn}\, y_n
\end{aligned} \tag{28}$$

gdzie

x - sygnał sterujący,

y_k - parametry układu.

Celem pracy jest znalezienie takiej zależności sygnału sterującego x od zmiennych parametrów y_i, która będzie minimalizowała wskaźnik jakości procesu, przy ograniczeniu maksymalnych wartości y_i w stanie nieustalonym oraz ograniczeniu czasu trwania procesu regulacji:

$$x = x\,(y_1, y_2 \dots\dots\dots y_n) \tag{29}$$

3.1. Wybór kryterium jakości procesu regulacji

Kryterium zastosowane do oceny procesu regulacji powinno odpowiadać następującym warunkom:

- uwzględniać czas trwania procesu regulacji,
- uwzględniać wielkość przeregulowania i błąd ustalony,
- nadawać się do zastosowania dla procesów oscylacyjnych,
- dać się obliczać bez obliczania procesów przejściowych,
- dać się łatwo zapisać w formie matematycznej.

Wybrano kwadratowe kryterium całkowe

$$I = \int_0^{\infty} \left[\alpha (y - \bar{y})^2 + \gamma \left(\frac{\partial y}{\partial \tau} \right)^2 \right] d\tau \tag{30}$$

gdzie

α, γ - współczynniki,

y - jest zmienną fizyczną opisującą układ.

Na podstawie teorii programowania dynamicznego można stwierdzić, że optymalny sygnał sterujących $x(\tau)$ jest liniową funkcją parametrów [11]:

$$x(\tau) = \sum_{1-1}^{n} b_i \cdot y_i(\tau) \tag{31}$$

Podstawiając to równanie do równań (28) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{d\tau} &= a_{11} y_1 + a_{12} y_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots + a_{1n} y_n \\ \frac{dy_2}{d\tau} &= a_{21} y_1 + a_{22} y_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots + a_{2n} y_n \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \frac{dy_n}{d\tau} &= a_{n1} y_1 + a_{n2} y_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots + a_{nn} y_n \end{aligned} \tag{32}$$

gdzie

$a_{1i} = A_{1i} + d_1 \cdot b_i \qquad i = 1 \ldots n,$

oraz

$a_{ki} = A_{ki} \qquad k = 2, 3 \ldots n,$

Należy więc tak dobrać współczynniki a_{1j}, aby kwadratowe kryterium całkowe osiągnęło minimum.

Kwadratowe kryterium całkowe można napisać w postaci [12]:

$$I = \frac{Q}{P} \cdot Z^2, \tag{33}$$

gdzie wyznaczniki P i Q zawierają współczynniki a_{ij}.

3.2. Obliczenie współczynników układu regulacji

Dla podanych poprzednio wartości parametrów i współczynników wykonano obliczenia na maszynie cyfrowej ODRA 1204 w Ośrodku Maszyn Matematycznych Politechniki Śląskiej [13].

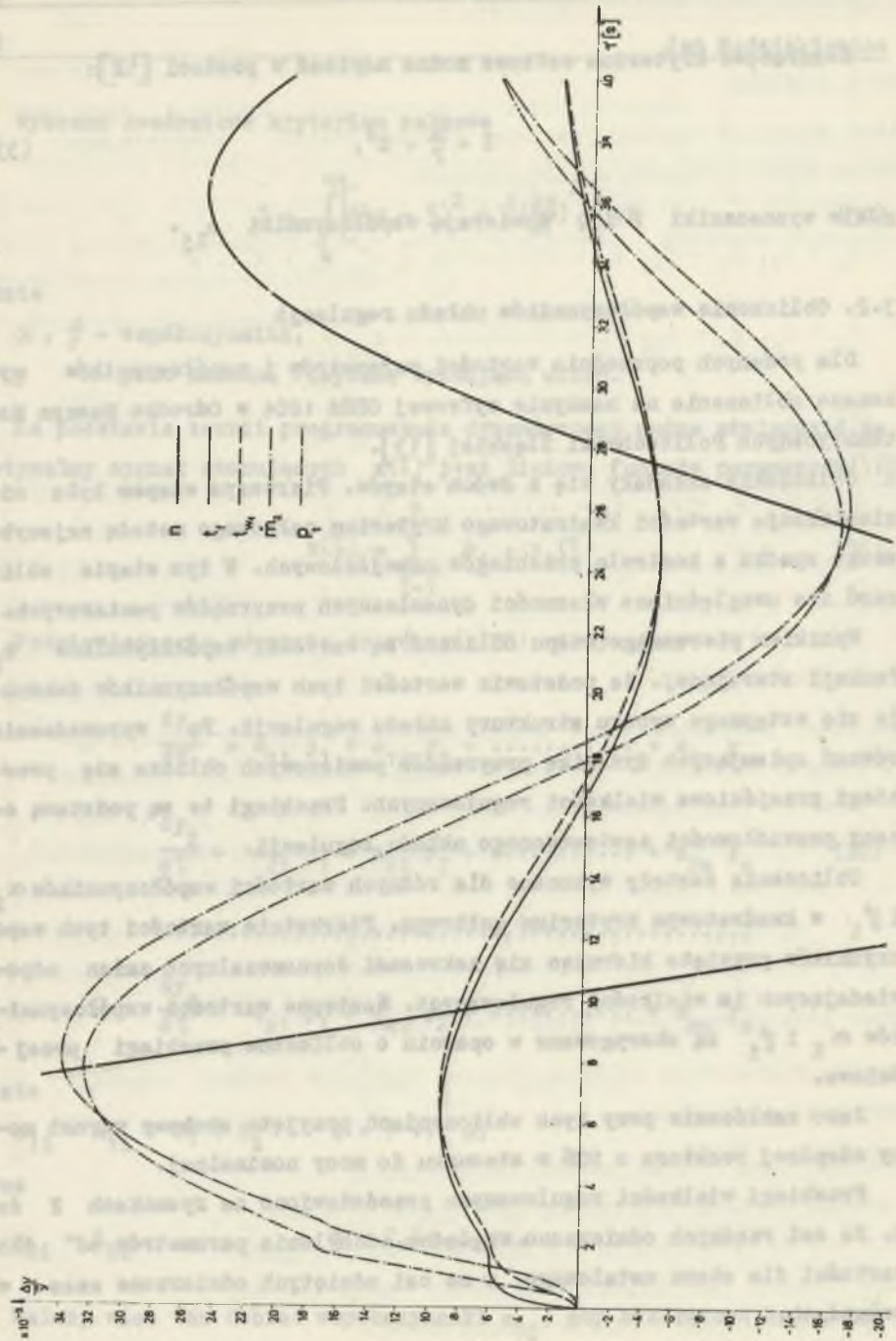
Obliczenia składały się z dwóch etapów. Pierwszym etapem była minimalizacja wartości kwadratowego kryterium całkowego metodą najszybszego spadku z kontrolą przebiegów przejściowych. W tym etapie obliczeń nie uwzględniano własności dynamicznych przyrządów pomiarowych.

Wynikiem pierwszego etapu obliczeń są wartości współczynników b_i funkcji sterującej. Na podstawie wartości tych współczynników dokonuje się wstępnego wyboru struktury układu regulacji. Po wprowadzeniu równań opisujących dynamikę przyrządów pomiarowych oblicza się przebiegi przejściowe wielkości regulowanych. Przebiegi te są podstawą oceny prawidłowości zastosowanego układu regulacji.

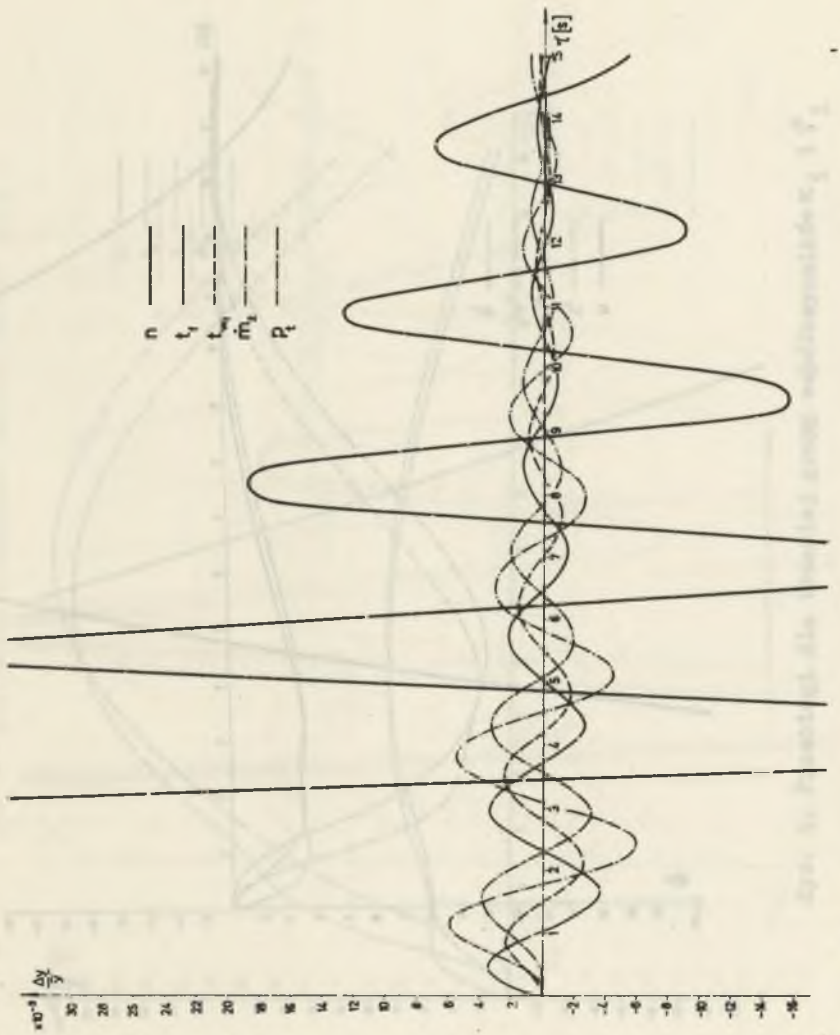
Obliczenia zostały wykonane dla różnych wartości współczynników α_i i γ_i w kwadratowym kryterium całkowym. Pierwotnie wartości tych współczynników przyjęto kierując się zakresami dopuszczalnych zmian odpowiadających im wielkości regulowanych. Następne wartości współczynników α_i i γ_i są skorygowane w oparciu o obliczone przebiegi przejściowe.

Jako zakłócenie przy tych obliczeniach przyjęto skokowy wzrost mocy cieplnej reaktora o 10% w stosunku do mocy nominalnej.

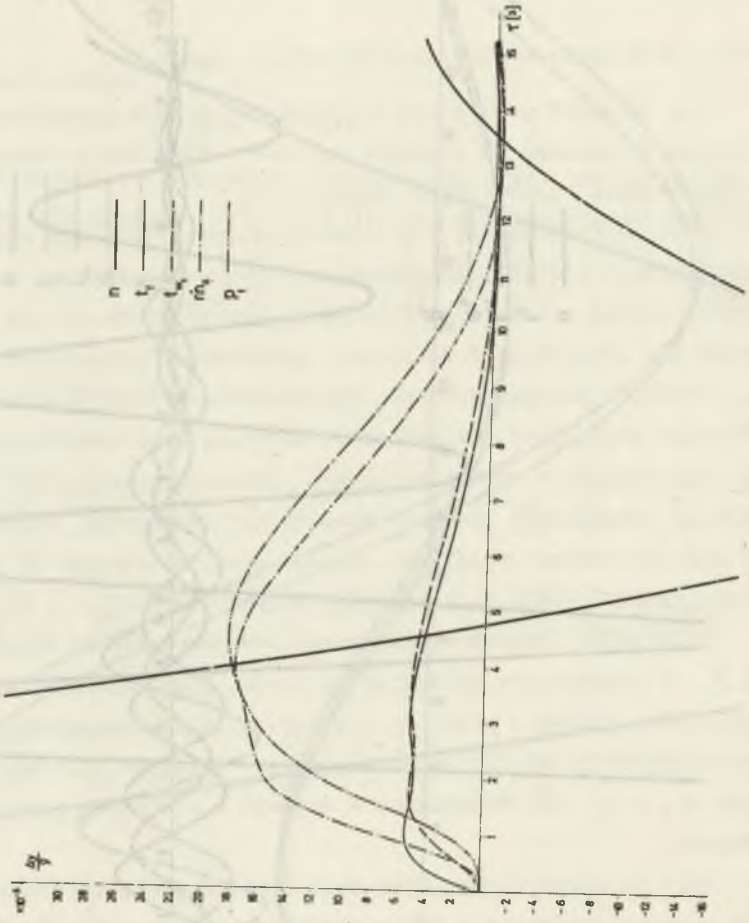
Przebiegi wielkości regulowanych przedstawiono na rysunkach 2 do 9. Na osi rzędnych odmierzono względne odchylenia parametrów od ich wartości dla stanu ustalonego, a na osi odciętych odmierzono czas w sekundach.



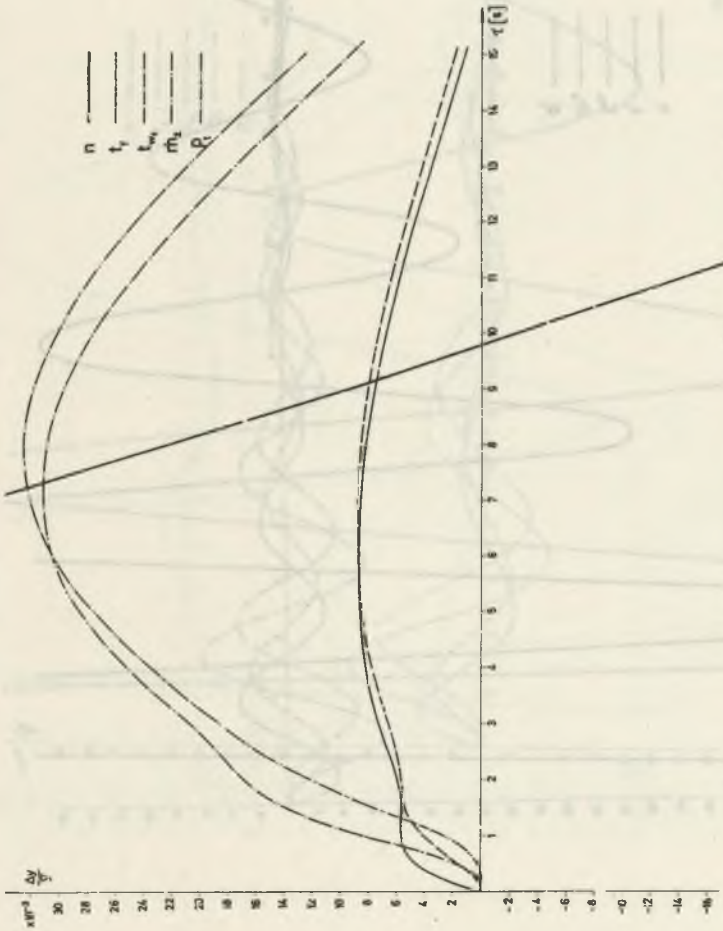
Rys. 2. Przebiegi wielkości regulowanych bez układu regulacji przy skokowym wzroście mocy cieplnej reaktora



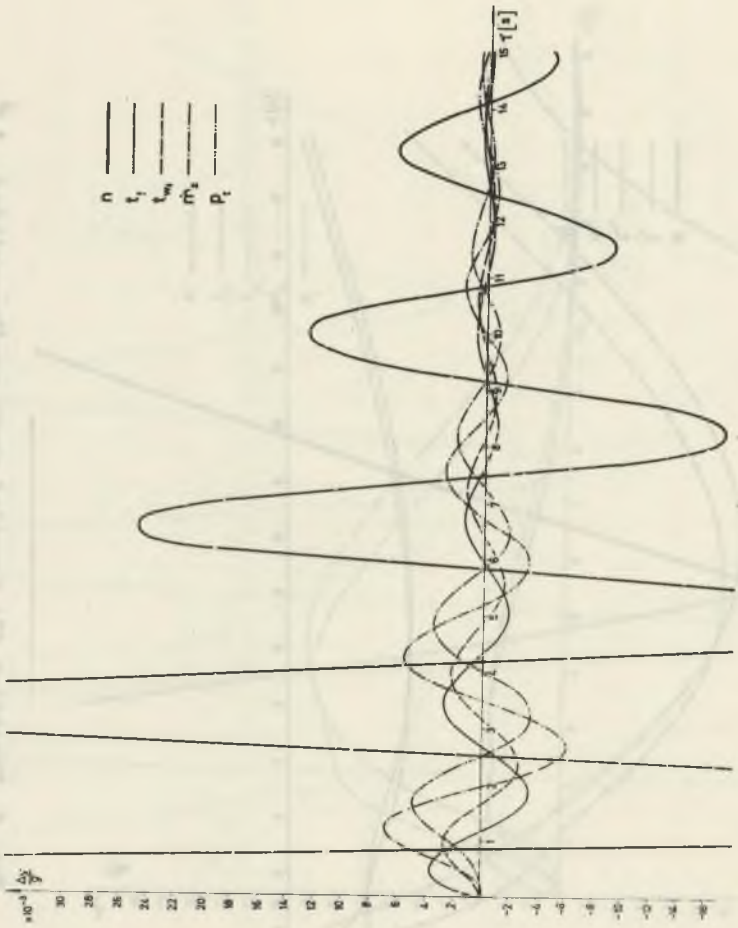
Rys. 3. Przebiegi dla pierwszej grupy współczynników α_1 i γ_1



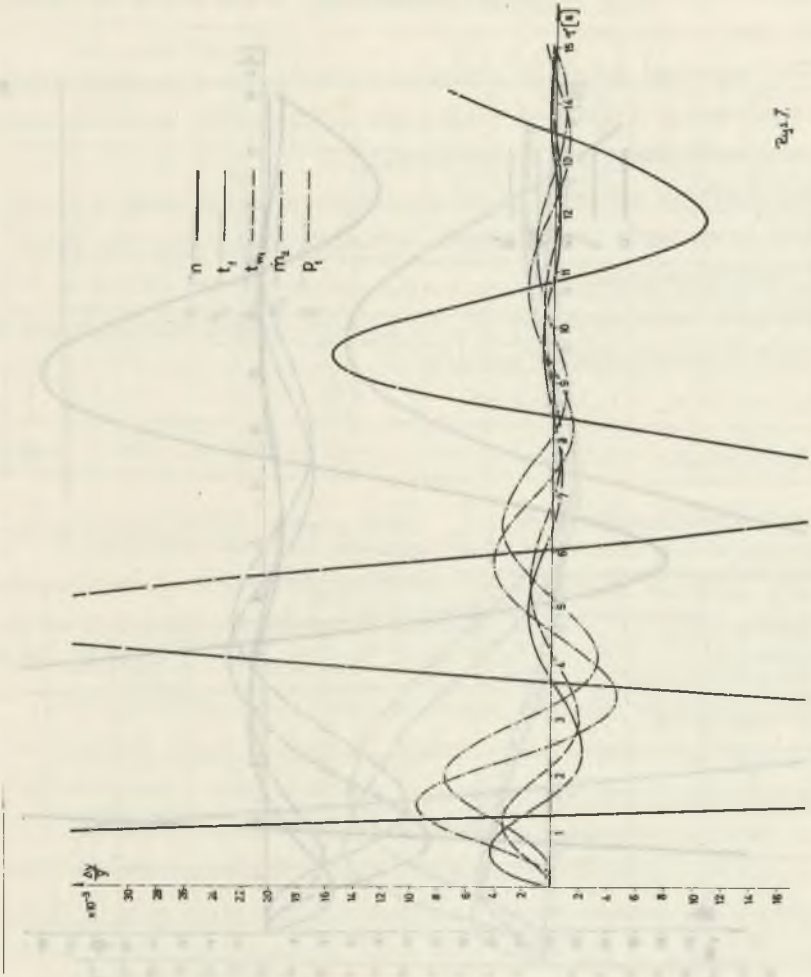
Rys. 4. Przebiegi dla drugiej grupy współczynników α_1 i γ_1^*



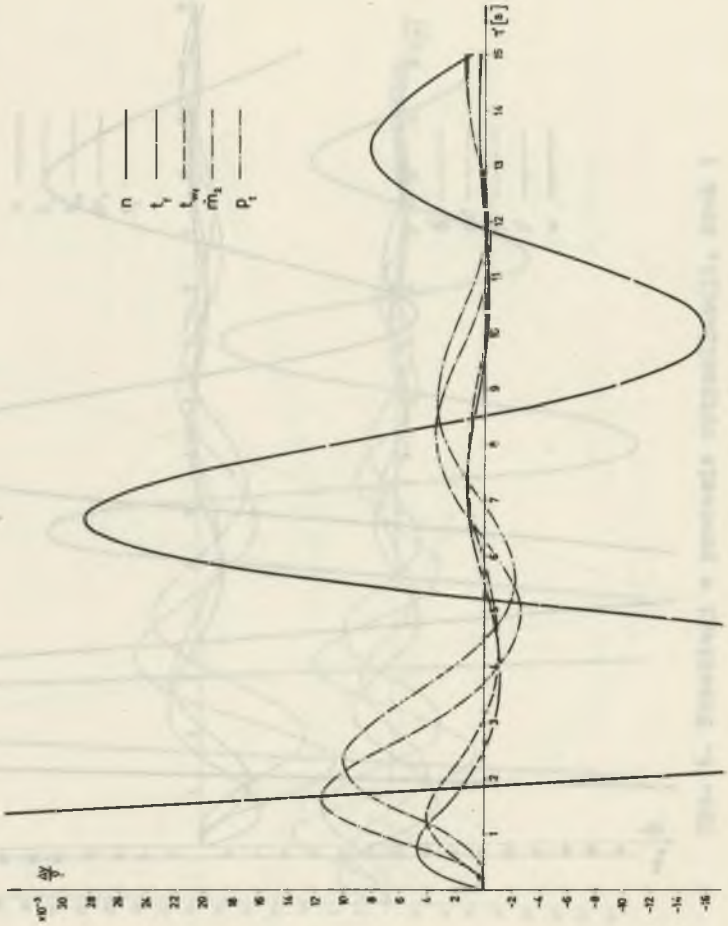
Rys. 5. Przebiegi dla trzeciej grupy współczynników α_1 i γ_1^*



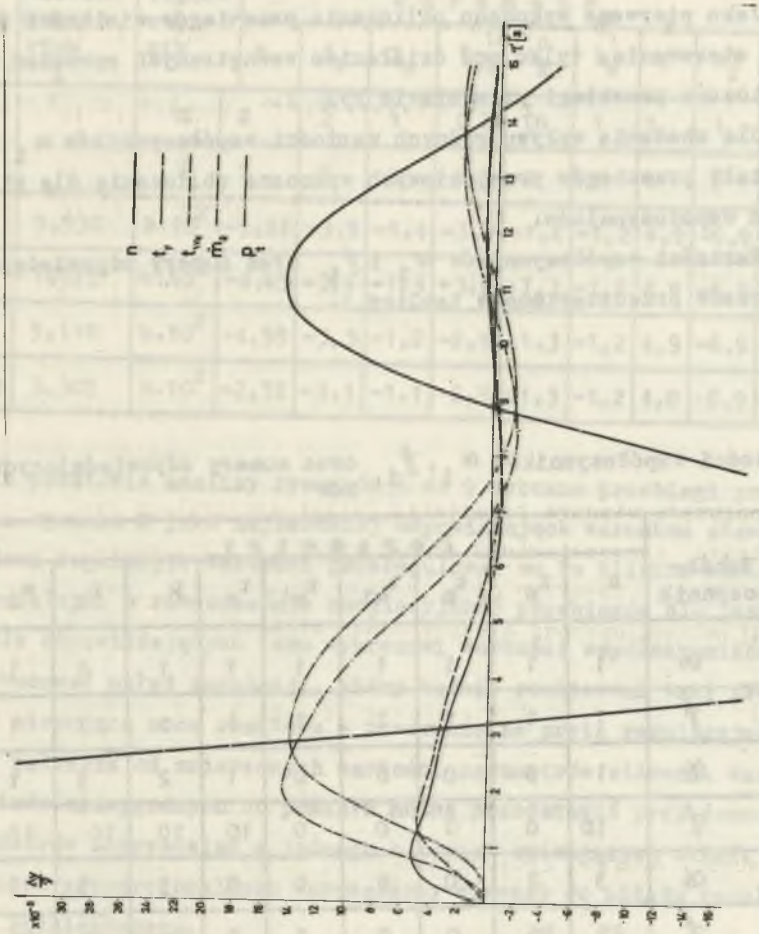
Rys. 6. Przebiegi w procesie optymalizacji, krok 1



Rys. 7. Przebiegi w procesie optymalizacji, krok 2



Rys. 8. Przebiegi w procesie optymalizacji, krok 3



Rys. 9. Przebiegi w procesie optymalizacji, krok 4

Aby nie zaciemniać wykresów, pokazano na nich przebiegi tylko tych wielkości, które mają najistotniejszy wpływ na pracę siłowni, są to: n, t_f, t_{w1}, m_2, p_t.
Wahania pozostałych wielkości są mniejsze a ich wpływ na proces regulacji jest niewielki.

Jako pierwsze wykonano obliczenia przebiegów wielkości regulowanych bez sterowania, tylko pod działaniem wewnętrznych sprzężeń zwrotnych. Obliczone przebiegi przedstawia rys. 2.

Dla zbadania wpływu różnych wartości współczynników α_i i γ_i na kształt przebiegów przejściowych wykonano obliczenia dla kilku grup tych współczynników.

Wartości współczynników α_i i γ_i oraz numery odpowiadających im wykresów przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Wartości współczynników α_i, γ_i oraz numery odpowiadających im rysunków

Lp.	Współczynnik	Parametry									Numer rysunku
		n	t_f	t_m	t_{w1}	t_{m1}	t_w	p	p_t	m_2	
1	α	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
	γ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	α	1	0	0	0	0	1	2	5	1	4
	γ	10	0	0	0	0	10	10	10	10	
3	α	3	2	0	0	0	0	3	3	3	5
	γ	25	25	0	0	0	0	25	25	25	

Następne wykresy obrazują proces stopniowej zmiany przebiegów przejściowych w miarę posuwania się w kierunku minimum kwadratowego kryterium całkowego. Wszystkie te wykresy zostały wykonane dla jednej grupy wartości współczynników α_i i γ_i (tablica 2).

Tablica 2

Wartości współczynników b_i oraz numery rysunków dla kolejnych kroków procesu optymalizacji

Krok	Wartość kryterium I	Współczynnik	Parametr									Nr rys.
			n	t_f	t_m	t_{w1}	t_{m1}	t_w	p	m_2	p_t	
		α	2	2	1	0	0	1	1	1	2	
		γ	2	2	1	0	0	1	1	2	2	
1	9,930	$b.10^2$	-9,24	-3,9	-1,4	-3,0	+1,4	-1,2	4,9	-6,9	-2,8	6
2	7,015	$b.10^2$	-4,45	-3,6	-1,3	-3,0	+1,3	-1,2	4,9	-6,9	-2,8	7
3	5,110	$b.10^2$	-4,59	-3,3	-1,2	-2,9	+1,3	-1,2	4,9	-6,9	-2,8	8
4	3,307	$b.10^2$	-2,72	-3,1	-1,1	-2,9	+1,3	-1,2	4,8	-6,9	-2,8	9

Na podstawie analizy rysunków 6 do 9 wybrano przebiegi przedstawione na rysunku 8 jako najbardziej odpowiadające warunkom stawianym układowi regulacji. Wartości przeregulowań są tu bliskie wartościom dopuszczalnym, a równocześnie oscylacyjność przebiegów nie jest duża.

Dla odpowiadających temu wykresowi wartości współczynników b_i można zbudować układ regulacji, który będzie realizował taki proces. Wielkość sterująca mocą reaktora - przesunięcie pręta regulacyjnego, będzie zależała od zmierzonych wartości parametrów siłowni. Wartości parametrów niewygodnych do pomiaru można przedstawić przy pomocy innych parametrów korzystając z jednego z równań opisujących układ. Oprócz elementów proporcjonalnych wprowadzimy wówczas do układu regulacji element różniczkujący.

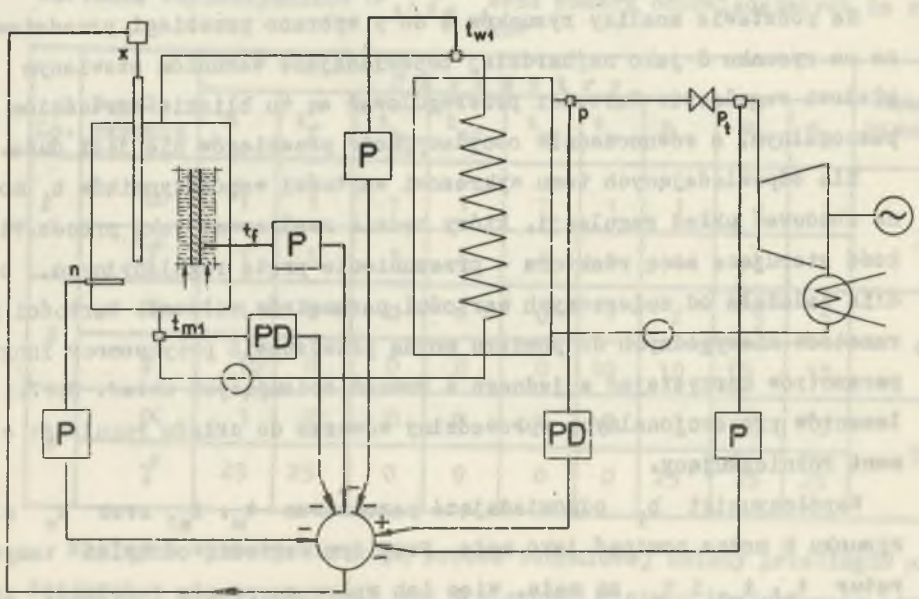
Współczynniki b_i odpowiadające parametrom t_m, t_{m1} oraz t_w dla rysunku 8 można pominąć jako małe. Przy tym wartości odchyleń temperatur t_m, t_{m1} i t_w są małe, więc ich wpływ na proces regulacji został pominięty. Wielkość m_2 jako niewygodna do pomiaru wyrażona została jako funkcja innych parametrów z równań VII i V. Ostatecznie za-

leżność przesunięcia pręta sterującego od parametrów siłowni ma postać:

$$X = 0{,}46\, n - 0{,}03\, t_f - 2{,}70\, t_{w1} - 2{,}46\, t_{m1} - 1{,}23\, \frac{dt_{m1}}{d\tau} + \tag{34}$$

$$+ 1{,}10\, p + 0{,}01\, \frac{dp}{d\tau} - 0{,}03\, p_t$$

Wielkości występujące we wzorze są zmierzonymi wartościami odpowiednich parametrów.



Rys. 10. Schemat układu regulacji siłowni jądrowej

Na podstawie zależności (34) zbudowano schemat układu regulacji. Układ ten opiera się na pomiarze następujących parametrów siłowni: gęstości neutronów w reaktorze n, temperatury paliwa t_f, temperatury chłodziwa na wlocie do reaktora t_{m1}, temperatury chłodziwa na wlocie do wytwornicy pary t_{w1}, ciśnienia pary za wytwornicą p i ciśnienia pary za zaworem regulacyjnym p_t (rys. 10).

Wnioski

1. Dobór układu regulacji w oparciu o metody grafoanalityczne lub analogowe napotyka na poważne trudności spowodowane złożonością obiektu. Duża ilość równań opisujących dynamikę siłowni utrudnia wykreślenie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych. Z drugiej strony dla zamodelowania tych równań konieczne byłoby zastosowanie bardzo rozbudowanego układu analogowego.

2. Metoda doboru układu regulacji przedstawiona w pracy opiera się na minimalizacji kwadratowego kryterium całkowego. Wprowadzenie tego kryterium jako ilościowej oceny jakości procesu regulacji umożliwia usystematyzowanie procesu doboru układu regulacji przy pomocy maszyny cyfrowej.

3. Dobór parametrów układu regulacji powinien przebiegać w dwóch etapach. Pierwszym etapem jest wybór wartości współczynników α_i i γ_i w kwadratowym kryterium całkowym. W drugim etapie możemy uściślić kształt przebiegów przejściowych drogą stopniowej minimalizacji kwadratowego kryterium całkowego.

4. Zaproponowana w pracy metoda doboru układu regulacji może być zastosowana tylko dla obiektów, które w okolicy stanu ustalonego można opisać równaniami różniczkowymi liniowymi pierwszego rzędu.

5. W pracy rozpatrzono układ z jedną wielkością sterującą, ale możliwa jest modyfikacja metody uwzględniająca kilka wielkości sterujących.

6. Zasadniczą rolę w doborze układu regulacji odgrywają zlinearyzowane równania różniczkowe opisujące dynamikę obiektu. Równania te po-

winny w możliwie najlepszy sposób przedstawiać zachowanie się obiektu w stanach nieustalonych.

LITERATURA

[1] Asch M. - Nuclear Reactor Kinetics. McGraw Hill NY 1965.

[2] Krassowski A.A, Pospiełow G.S. - Podstawy automatyki i cybernetyki technicznej. WNT Warszawa.

[3] Cessing R. - Dobroć układów automatycznej regulacji. Skrypt Pol. Śl. Gliwice 1967.

[4] Nal B.M., Feneh H. - Physics and Engineering Design Optimization of Nuclear Power Plant Using Gradient Methods.III Intern. Conf. Geneva 5, 184 (1964).

[5] Schultz M.A. - Control of Nuclear Reactors and Power Plant. Mc Graw - Hill Book Co. NY 1961.

[6] Campbell D.P. - Dynamika procesów. PWN, W-wa 1962.

[7] Cermak J., Peterka V., Zavorka J. - Dynamika regulowanych Soustav, Academia, Praha 1968.

[8] Directory of Nuclear Reactors. Vol. 1, 1959.

[9] Reaktory wysokotemperaturowe. Ośrodek Informacji o Energii Jądrowej. Warszawa 1970.

[10] Wymagania techniczne dla aparatury regulacyjnej procesów cieplnych w energetyce. Wyd. II. Energopomiar, Gliwice 1970.

[11] Tou G.J. - Nowoczesna teoria sterowania. WNT Warszawa 1967.

[12] Feldbaum A.A. - Układy elektryczne regulacji automatycznej. PWT Warszawa 1958.

[13] Nadziakiewicz J. - Dobór układu regulacji siłowni jądrowej z reaktorem chłodzonym wodą pod ciśnieniem. Praca doktorska, Pol.Śl. Gliwice 1972 r.

Praca wpłynęła do Redakcji w listopadzie 1973 roku.

ПОДБОР КОЭФИЦИЕНТОВ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Р е з ю м е

В работе представлен метод расчета коэффицентов системы регулирования для сложных объектов. Применение интегрального критерия качества процесса регулирования, а также метода градиентов позволяет систематизировать расчеты. Представленные диаграммы иллюстрируют процесс постепенного выяснения оптимального развития протекающих процессов. Метод применеиим к объектам, для которых уравнения динамики удается представить линейно.

THE SETTING OF CONTROL SYSTEM FACTORS FOR THE NUCLEAR PLANT REACTOR

S u m m a r y

A method of calculations of the coefficients of regulation system for complicated industrial system had been presented. The integral criterion of quality and gradient method of its minimisation makes it possible to use a computer to optimise the regulation system.The diagrams showed step by step the optimisation of transient processes. This method can be used to the systems described by linearized equations of dynamics.