

Tadeusz CHMIELNIAK, Seweryn POŁEĆ

Jerzy WIDENKA

Instytut Maszyn i Urzędzeń Energetycznych

DYNAMICZNY MODEL ROZRZĄDU I UKŁADU WYTWARZANIA MOCY
W STOPNIU REGULACYJNYM TURBINY

Streszczenie. Przedstawiono model dynamiczny rozrządu i wytwarzania mocy stopnia regulacyjnego turbiny parowej dla małych zmian parametrów pary idealnej, podlegającej przemianie adiabatycznej. W oparciu o charakterystyki statyczne układu wyprowadzono równanie różniczkowe, opisujące dynamikę zmian ciśnienia i temperatury, przy założeniu, że entalpia pary jest funkcją: $J = J(t, P)$. Jako niezależne wielkości WE przyjęto ciśnienie, temperaturę i położenie zaworów regulacyjnych: π_1^{Zi} , ν_1^{Zi} , γ_1^{Zi} . Moc wytwarzaną w stopniu stanowi suma mocy wytwarzanych w poszczególnych segmentach zasilania grupowego: ν^{Di} , uzależniona od parametru sprawności λ^{Di} .

Oznaczenie wielkości bezwzględnych i względnych

Symbole literowe

C_v - współczynnik przepływu zaworu kg/s	$c_v = C_v / C_{v0}$	$\Delta c_v = \Delta C_v / C_{v0}$
H - spadek entalpii kJ/kg/deg	$h = H / H_0$	$\Delta h = \Delta H / H_0$
J - entalpia właściwa kJ/kg	$i = J / J_0$	$\Delta i = \Delta J / J_0$
K - współczynnik wzmocnienia		
M - natężenie przepływu kg/s	$m = M / M_0$	$\Delta m = \Delta M / M_0$
N - moc kW	$v = N / N_0$	$\Delta v = \Delta N / N_0$
P - ciśnienie bar	$\pi = P / P_0$	$\Delta \pi = \Delta P / P_0$
R - stała gazowa kJ/kg/deg		
T - stała czasu s		
V - objętość zastępcza m ³		
Λ - sprawność internijna	$\lambda = \Lambda / \Lambda_0$	$\Delta \lambda = \Delta \Lambda / \Lambda_0$
Δ - oznaczenie przyrostu		
r - stopień reakcyjności		
ϱ - gęstość kg/m ³	$\varrho^* = \varrho / \varrho_0$	$\Delta \varrho^* = \Delta \varrho / \varrho_0$
t - temperatura K	$\nu^* = t / t_0$	$\Delta \nu^* = \Delta t / t_0$
τ - czas s		
G - ilość pary kg		

Oznaczenie górne

- T - turbina
- W - część WP turbiny bez stopnia regulacyjnego
- R - stopień regulacyjny turbiny
- Di - i-ty segment zasilający stopień R
- Zi - i-ty zawór regulacyjny

Oznaczenia dolne

- 0 - stan ustalony
- 1 - wejście WE
- 2 - wyjście WY

Symbole schematów blokowych

- K_{xyz} - współczynnik wzmocnienia
- T_{xyu} - stała czasu
- x - identyfikator makromodułu
- y - identyfikator równania
- u - identyfikator stałej czasu
- z - identyfikator wsp. wzmocnienia
- e - operator Laplace'a

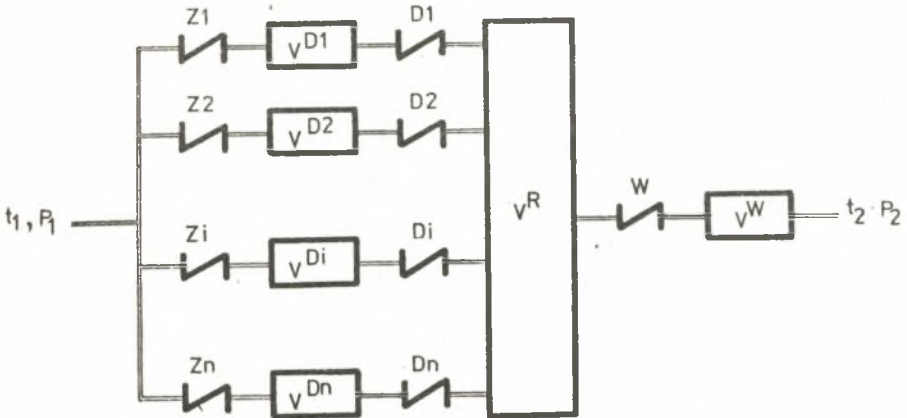
1. WSTĘP

Koncepcje modelu części regulacyjnej turbiny opiera się na możliwie dokładnym opisie statyki i dynamiki za pomocą równań różniczkowych w niewielkim zakresie zmian parametrów. Równania rozwiązane będą w dziedzinie operatorowej z zastosowaniem techniki modelowania cyfrowego i analogowego. Model przedstawiono w postaci ogólnej dla stopnia regulacyjnego z zasilaniem grupowym. Pomija się dynamikę wolnozmiennych procesów wymiany ciepła między czynnikiem roboczym a metalem turbiny.

2. MODEL STRUKTURALNY UKŁADU TECHNOLOGICZNEGO PARY I STOPNIA REGULACYJNEGO

Integralną częścią modelu układu wytwarzania turbozespołu parowego jest model układu zasilania turbiny wraz z częścią regulacyjną [1], [2], [3], [4]. Schemat technologiczny zasilania grupowego stopnia regulacyjnego pokazano na rys. 1 w postaci uproszczonych elementów przepływowych. Opory skupione Zi, Di, W stanowią elementy bierne opisywane nieliniowymi charakterystykami statycznymi, wiążącymi zmienne niezależne. Elementy czynne układu stanowią objętości zastępcze V^{Di} , V^R , V^W o parametrach skupionych, opisywane równaniami różniczkowymi bilansu masy i energii oraz równaniem stanu czynnika w objętości. Wielkościami WE układu wytwarzania stopnia re-

gulatoryjnego są zmiany temperatury i ciśnienia pary przed zaworami: v_1^{Zi} , v_1^{Di} , temperatury i ciśnienia na wylocie z części homogenicznej turbiny: v_2^W, v_2^D . Wielkościami w modelu są: zmiana mocy wytwarzanej przez stopień regulacyjny i część homogeniczną a także zmiany parametrów termodynamicznych w dowolnym miejscu układu.



Rys. 1. Schemat układu technologicznego

3. UKŁAD RÓWNAŃ OPISUJĄCYCH DYNAMIKĘ UKŁADU ZASILAJĄCEGO STOPIEŃ REGULACYJNY

Równanie różniczkowe (1), opisujące dynamikę przepływu przez kolejne opory: Z_i, D_i oddzielone objętością czynną rurociągów przepustowych V^{Di} , wraz z równaniem stanu (2) pozwala wyznaczyć zmianę ciśnienia P_1^{Di} w tej objętości dla znanych charakterystyk statycznych (3), (4).

$$M^{Zi} = M^{Di} = V^{Di} \cdot \frac{d\varphi^{Di}}{dt} \quad (1)$$

$$\varphi^{Di} = \varphi^{Di}(t_1^{Di}, P_1^{Di}) \quad (2)$$

$$M^{Zi} = M^{Zi}(t_1^{Zi}, P_1^{Zi}, P_2^{Zi}, C_v^{Zi}) \quad (3)$$

$$M^{Di} = M^{Di}(t_1^{Di}, P_1^{Di}, P_2^{Di}, \Lambda^{Di}) \quad (4)$$

Zakładamy, że wpływ zmian sprawności Λ^{Di} na zmiany natężenia przepływu jest pomijalny. Równanie (4) przyjmuje postać

$$M^{Di} = M^{Di}(t_1^{Di}, P_1^{Di}, P_2^{Di}, \Lambda_0^{Di}) \quad (4a)$$

Przyjmując równanie stanu pary doskonałej - względną zmianę gęstości opiszemy równanie:

$$\Delta \rho^* D_1 = \Delta \mathcal{H}_1^{D_1} - \Delta \mathcal{V}_1^{D_1} \quad (5)$$

Dla stopnia o reakcyjności: $r \approx 0,05-0,15$ można przyjąć [1], że reakcyjność jest równa udziałowi wirnika w spadku entalpii:

$$r \approx H_W / (H_D + H_W) \approx r_0 \quad (6)$$

Przyjmujemy, że reakcyjność odpowiadająca zmianie udziału wirnika w spadku entalpii dla małych zmian parametrów pozostaje stała, co oznacza, że zmiany spadku entalpii w dyszach i wirniku są proporcjonalne. Dla znanego udziału wirnika w stanie ustalonym określony jest stosunek ciśnień (7) za i przed kołem wirnikowym

$$\xi_p = P_1^W / P_2^{D_1} \approx P_{10}^W / P_{20}^{D_1} \quad (7)$$

Charakterystyka przepływu przez opór skupiony Z_i zależy od współczynnika przepływu $C_V^{Z_i}$, który wyznaczony został w zależności od wielkości γ^{Z_i} , czyli położenia zaworu regulacyjnego [5], [6], [7].

$$C_V^{Z_i} = C_V^{Z_i}(\gamma^{Z_i}) \quad (8)$$

To pozwala na określenie względnej zmiany współczynnika przepływu:

$$C_V^{Z_i} = K_{ic} \cdot \Delta \gamma^{Z_i} \quad (9)$$

$$K_{ic} = \frac{\partial C_V^{Z_i}}{\partial \gamma^{Z_i}} \cdot \frac{\gamma_0^{Z_i}}{C_{V_0}^{Z_i}} \quad (9a)$$

Wykorzystując zlinearyzowane charakterystyki statyczne (2, 3, 4a) w równaniu (1) dla założonych małych zmian parametrów otrzymamy równanie różniczkowe opisujące dynamikę zmian ciśnienia w objętości V^{D_1} . Równanie po sformułowaniu ma postać:

$$\begin{aligned} K_{111} \cdot \gamma_1^{Z_1} + K_{112} \cdot \mathcal{H}_1^{Z_1} + K_{113} (1 + s \cdot T_{112}) \cdot \mathcal{V}_1^{D_1} + K_{115} \cdot \mathcal{H}_2^{D_1} + K_{ic} \cdot K_{116} \gamma^{Z_1} = \\ = (1 + s \cdot T_{111}) \cdot \mathcal{H}_1^{D_1}, \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie pominięto znaki przyrostów zmiennych odniesionych:

$$\psi_1^{Zi} \equiv \Delta \psi_1^{Zi}, \quad \mathcal{H}_1^{Zi} \equiv \Delta \mathcal{H}_1^{Zi} \text{ itp.}$$

$$K_{i11} = \frac{\partial M^{Zi}}{\partial t_1^{Zi}} \cdot \frac{t_{10}^{Zi}}{M_o^{Zi}} \cdot \frac{1}{K_{i14}}$$

$$K_{i12} = \frac{\partial M^{Zi}}{\partial P_1^{Zi}} \cdot \frac{P_{10}^{Zi}}{M_o^{Zi}} \cdot \frac{1}{K_{i14}}$$

$$K_{i13} = - \frac{\partial M^{Di}}{\partial t_1^{Di}} \cdot \frac{t_{10}^{Di}}{M_o^{Di}} \cdot \frac{1}{K_{i14}}$$

$$K_{i14} = \frac{\partial M^{Di}}{\partial P_2^{Di}} \cdot \frac{P_{20}^{Di}}{M_o^{Di}} - \frac{M^{Zi}}{P_2^{Zi}} \cdot \frac{P_{20}^{Zi}}{M_o^{Zi}} \quad (11 \text{ a-1})$$

$$K_{i15} = \frac{\partial M^{Di}}{\partial P_2^{Di}} \cdot \frac{P_{20}^{Di}}{M_o^{Di}} \cdot \frac{1}{K_{i14}}$$

$$K_{i16} = \frac{\partial M^{Zi}}{\partial C_v^{Zi}} \cdot \frac{v_{v0}^{Zi}}{M_o^{Zi}} \cdot \frac{1}{K_{i14}}$$

$$K_{op} = \frac{v_{10}^{Di} P_{10}^{Di}}{M_o^{Zi} R^{Di} t_{10}^{Di}}$$

$$T_{i11} = K_{ip}/K_{i14}$$

$$T_{i12} = K_{ip}/(K_{i14} \cdot K_{i13}).$$

Dla równania stanu pary doskonałej podstawa stałej czasu jest równa $K_{ip} = 10^2 \cdot G_o^{Di} / M_o^{Di}$ [s]; K_{ic} wprowadzono na podstawie (9).

Bilans energii objętości czynnej, ograniczonej oporami skupionymi Zi , Di wraz z równaniami stanu czynnika, pozwala wyznaczyć zmiany temperatury przed dyszami stopnia. Bilans energii sprowadzono do bilansu entalpii, pomijając zmiany prędkości przepływu czynnika w objętości V^{Di}

$$M_2^{Zi} \cdot J_2^{Zi} - M_1^{Di} \cdot J_1^{Di} = V^{Di} \cdot \frac{d}{dt} (\varrho^{Di} \cdot J_1^{Di}). \quad (12)$$

$$J_1^{D1} = J_1^{D1} (\tau_1^{D1}, P_1^{D1}). \quad (13)$$

W stanie ustalonym zachowana jest równość:

$$J_{10}^{D1} = J_{20}^{D1} = J_{10}^{Z1}. \quad (14)$$

Zlinearyzowane równanie (12), pomijając małe wyższego rzędu, ma postać:

$$\Delta J_2^{Z1} - \Delta J_1^{Z1} + \frac{J_{10}^{Z1}}{M_o^{Z1}} (\Delta M^{Z1} - \Delta M^{D1}) = \frac{V^{D1} \varphi_o^{D1} J_{10}^{D1}}{M_o^{Z1}} \cdot \frac{d(\varphi^{*D1} \cdot i_1^{D1})}{dt} \quad (15)$$

gdzie:

$$\varphi^{*D1} = \varphi^{D1} (\psi_1^{D1}, \mathcal{H}_1^{D1}) \quad (16)$$

$$i_1^{D1} = i_1^{D1} (\psi_1^{D1}, \mathcal{H}_1^{D1}). \quad (17)$$

Różniczkę po prawej stronie równania (15) można przekształcić do postaci

$$\frac{d(\varphi^{*D1} \cdot i_1^{D1})}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\left(1 + \frac{\partial J_1^{D1}}{\partial P_1^{D1}} \cdot \frac{P_1^{D1}}{J_1^{D1}} \right) \cdot \Delta \mathcal{H}_1^{D1} - \left(1 - \frac{\partial J_1^{D1}}{\partial t_1^{D1}} \cdot \frac{t_{10}^{D1}}{J_1^{D1}} \right) \Delta \psi_1^{D1} \right] \quad (18)$$

Podstawienie w równaniu (15) zlinearyzowanych charakterystyk (3, 4a, 13) i równanie (18) prowadzą do równania różniczkowego, które po stransformowaniu ma postać (pominięto znaki przyrostów zmiennych odniesionych):

$$K_{121} \cdot \psi_1^{Z1} + K_{122} \cdot \mathcal{H}_1^{Z1} + K_{124} (1 + s \cdot T_{122}) \cdot \mathcal{H}_1^{D1} + K_{125} \cdot \mathcal{H}_2^{D1} + K_{ic} \cdot K_{116} \cdot \psi_1^{Z1} = (1 + s \cdot T_{121}) \cdot \psi_1^{D1} \quad (19)$$

$$K_{121} = \left(\frac{\partial M^{Z1}}{\partial t_1^{Z1}} \cdot \frac{J_{10}^{Z1}}{M_o^{Z1}} + \frac{\partial J_1^{Z1}}{\partial t_1^{Z1}} \right) \frac{t_{10}^{Z1}}{K_{123}}$$

$$K_{122} = \left(\frac{\partial M^{Z1}}{\partial P_1^{Z1}} \cdot \frac{J_{10}^{Z1}}{M_o^{Z1}} + \frac{\partial J_1^{Z1}}{\partial P_1^{Z1}} \right) \frac{P_{10}^{Z1}}{K_{113}}$$

$$K_{123} = - \frac{\partial M^{D1}}{\partial t_1^{D1}} \cdot \frac{J_{10}^{Z1} \cdot t_{10}^{D1}}{M_o^{Z1}} - \frac{\partial J_1^{D1}}{\partial t_1^{D1}} \cdot t_{10}^{D1}$$

$$K_{i24} = - \frac{\partial J_1^{D1}}{\partial P_1^{D1}} \cdot \frac{P_{10}^{D1}}{K_{i23}} \quad (20a-j)$$

$$K_{i25} = - \frac{\partial M^{D1}}{\partial P_2^{D1}} \cdot \frac{J_{20}^{D1} P_{20}^{D1}}{M_o^{Z1}} \cdot \frac{1}{K_{i23}}$$

$$K_{i26} = \frac{\partial M^{Z1}}{\partial C_v^{Z1}} \cdot \frac{J_{20}^{Z1} C_{v0}^{Z1}}{M_o^{Z1}} \cdot \frac{1}{K_{i23}}$$

$$K_{iT1} = \frac{V^{D1} P_{10}^{D1} J_{10}^{D1}}{M_o^{Z1} R^{D1} t_{10}^{D1}} \left(\frac{\partial J_1^{D1}}{\partial t_1^{D1}} \cdot \frac{t_{10}^{D1}}{J_{10}^{D1}} - 1 \right)$$

$$K_{iT2} = - \frac{V^{D1} P_{10}^{D1} J_{10}^{D1}}{M_o^{Z1} R^{D1} t_{10}^{D1}} \left(\frac{\partial J_1^{D1}}{\partial P_1^{D1}} \cdot \frac{P_{18}^{D1}}{J_{10}^{D1}} + 1 \right)$$

$$T_{i21} = K_{iT1} / K_{i23}$$

$$T_{i22} = K_{iT2} / K_{i23} \cdot K_{i24}$$

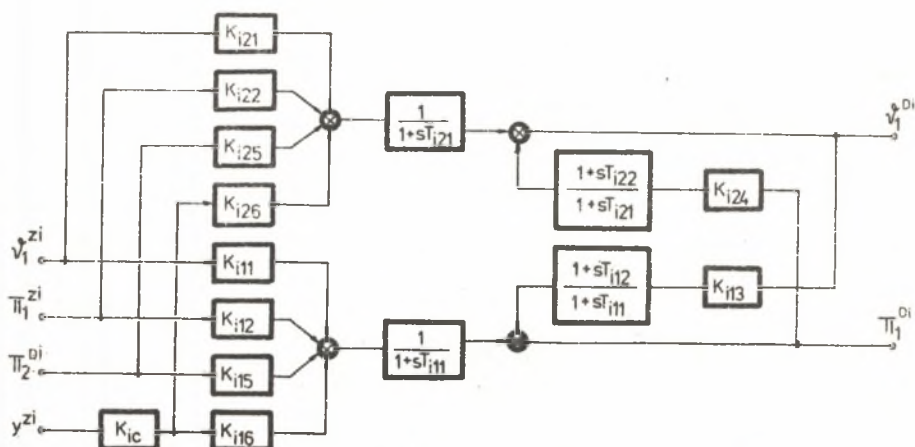
Jeśli spełnione jest równanie stanu pary doskonałej, podstawy stałych czasu upraszcza się do postaci:

$$K_{iT1} = \left(\frac{\partial J_1^{D1}}{\partial t_1^{D1}} t_{10}^{D1} - J_{10}^{D1} \right) \cdot \frac{G_o^{D1}}{M_o^{Z1}}$$

(20i-j)

$$K_{iT2} = - \left(\frac{\partial J_1^{D1}}{\partial P_1^{D1}} P_{10}^{D1} + J_{10}^{D1} \right) \cdot \frac{G_o^{D1}}{M_o^{Z1}}$$

Połączone schematy blokowe równań (10) i (19) stanowią opis dynamiki zmian temperatury i ciśnienia w objętości czynnej V^{D1} (rys. 2).



Rys. 2. Schemat blokowy opisu dynamiki zmian temperatury ϑ_1^{Di} i ciśnienia π_1^{Di} ; $i = 1, 2$

4. UKŁAD RÓWNAŃ OPISUJĄCYCH DYNAMIKĘ STOPNIA REGULACYJNEGO

Znając zmiany parametrów przed dyszami stopnia regulacyjnego i charakterystyki statyczne poszczególnych segmentów zasilających, określamy zmiany parametrów w objętości czynnej stopnia regulacyjnego V^R . Równanie różniczkowe bilansujące natężenie przepływu:

$$\sum_{i=1}^n M^{Di} - M^W = V^R \cdot \frac{d\varphi^R}{dt} \quad (21)$$

$$\varphi^R = \varphi^R(t_1^W, P_1^W) \quad (22)$$

$$M^W = M^W(t_1^W, P_1^W, P_2^W, \Lambda_0^W), \quad (23)$$

gdzie przyjęto dla zmian natężenia przepływu $\Lambda^W \approx \Lambda_0^W$ (pomija się wpływ zmian sprawności na natężenie przepływu). Charakterystykę statyczną natężenia przepływu przez segmenty dyszowe stanowi równanie (4a).

Linearyzacją równania (21) z zastosowaniem charakterystyk statycznych przepływu (4a) i (23) oraz (5) otrzymujemy równanie dogodne do transformacji. Równanie po transformacji (dla zerowych warunków początkowych) ma postać:

$$\sum_{i=1}^n K_{i31} \cdot \psi_1^{Di} + \sum_{i=1}^n K_{i32} \cdot \pi_1^{Di} + K_{n+1,33} (1 + s \cdot T_{n+1,32}) \psi_1^W + K_{n+1,35} \cdot \pi_2^W =$$

$$= (1 + s \cdot T_{n+1,31}) \cdot \pi_1^W \quad (24)$$

W równaniu pominięto znaki przyrostów wielkości względnych $\psi_1^{Di} \equiv \Delta \psi_1^{Di}$, $\pi_1^{Di} \equiv \Delta \pi_1^{Di}$ itp.

$$K_{i31} = \frac{\partial M^{Di}}{\partial t_1^{Di}} \cdot \frac{t_{10}^{Di}}{M_o^W} \cdot \frac{1}{K_{n+1,34}}$$

$$K_{i32} = \frac{\partial M^{Di}}{\partial P_1^{Di}} \cdot \frac{P_{10}^{Di}}{M_o^W} \cdot \frac{1}{K_{n+1,34}}$$

$$K_{n+1,33} = - \frac{\partial M^W}{\partial t_1^W} \cdot \frac{t_{10}^W}{M_o^W} \cdot \frac{1}{K_{n+1,34}}$$

$$K_{n+1,34} = \frac{\partial M^W}{\partial P_1^W} \cdot \frac{P_{10}^W}{M_o^W} - \sum_{i=1}^n \frac{\partial M^{Di}}{\partial P_2^{Di}} \cdot \frac{P_{20}^{Di}}{M_o^W} \quad (25a-h)$$

$$K_{n+1,35} = \frac{\partial M^W}{\partial P_2^W} \cdot \frac{P_{20}^W}{M_o^W} \cdot \frac{1}{K_{n+1,34}}$$

$$K_{n+1,P} = \frac{\sqrt{R} \cdot P_{10}^W}{M_o^W \cdot R^R \cdot t_{10}^W}$$

$$T_{n+1,31} = K_{n+1,P} / K_{n+1,34}$$

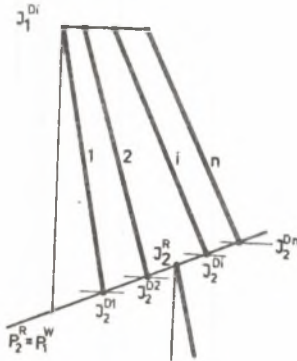
$$T_{n+1,32} = K_{n+1,P} / (K_{n+1,34} \cdot K_{n+1,33})$$

Współczynnik podstawy stałej czasu jest jedyką dla równania pary doskonałej $K_{n+1,P} = 10^2 \cdot G_o^R / M_o^W$ [s];

W segmentach dyszowych stopnia regulacyjnego zachodzi przemiana energetyczna. Ponieważ założono [6], że udział wirnika w spadku entalpii pozostaje stały, przemianę adiabatyczną w segmencie dyszowym i łopatkach wirnikowych opisuje charakterystyka stonnia:

$$h^{Di*} = h^{Di} (t_1^{Di}, P_{1,P_2}^{Di}, \Lambda^{Di}) \quad (26)$$

Ciśnienie P_2^{Di} spełnia równanie (7). Spadek entalpii można więc określić przez parametry początkowe oraz ciśnienie w objętości czynnej V^R i sprawność przemiany Λ^{Di} , która traktowana jest jak zmienny parametr, zależny od t_1^{Di} , P_1^{Di} , P_2^{Di} [1], [2].



$$\Lambda^{Di} = \Lambda^{Di}(t_1^{Di}, P_1^{Di}, P_2^{Di}) \quad (27)$$

Dla określenia stanu entalpii za kołem wirnikowym potrzebne jest ciśnienie w objętości V^R oraz temperatura. Zmiana temperatury zostanie wyznaczona z bilansu energii (entalpii) za poszczególnymi segmentami regulacyjnymi i zmiany entalpii w objętości V^R (rys. 3)

$$\sum_{i=1}^n M^{Di} J_1^R - M^W \cdot J_1^W = V^R \frac{d}{dt} (Q^R \cdot J_1^W) \quad (28)$$

Rys. 3. Schemat przemiany energetycznej w n-segmentowym stopniu regulacyjnym

$$\sum_{i=1}^n M^{Di} \cdot J_2^{Di} = J_2^R \cdot \sum_{i=1}^n M^{Di} \quad (29)$$

J_2^{Di} - entalpia za i-tym segmentem przed zmieszaniem,

J_1^W - entalpia przed częścią WP,

J_2^R - entalpia bilansowa wg równania (29)

$$\Delta J_2^{Di} = \Delta J_1^{Di} - \Delta H^{Di} \cdot \Lambda^{Di} \quad (30)$$

Zlinearyzowane dla małych zmian parametrów równanie (28) z uwzględnieniem (30) oraz charakterystyk statycznych ma postać transformowaną (z pominięciem znaków przyrostów wielkości względnych)

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n K_{i41} \cdot \delta_1^{Di} + \sum_{i=1}^n K_{i42} \cdot \delta_1^{Di} + K_{n+1,44} (1+s \cdot T_{n+1,42}) \cdot \delta_1^W + K_{n+1,45} \cdot \delta_2^W = \\ = (1+s \cdot T_{n+1,41}) \cdot \delta_1^W \end{aligned} \quad (31)$$

$$K_{i41} = \left[\frac{\partial M^{Di}}{\partial t_1^{Di}} \cdot \frac{J_2^{Di}}{M_o^W} + \left(\frac{\partial J_1^{Di}}{\partial t_1^{Di}} - \Lambda^{Di} \frac{\partial H^{Di}}{\partial t_1^{Di}} \right) \frac{M_o^{Di}}{M_o^W} \right] \frac{t_{10}^{Di}}{K_{n+1,43}}$$

$$K_{i42} = \left[\frac{\partial M^{Di}}{\partial P_1} \cdot \frac{J_{20}^{Di}}{M_o^W} + \left(\frac{\partial J_1^{Di}}{\partial P_1} - \Lambda^{Di} \frac{H^{Di}}{P_1^{Di}} \right) \frac{M_o^{Di}}{M_o^W} \right] K_{n+1,43}^{P_{10}^{Di}} \quad (32a-h)$$

$$K_{n+1,43} = - \frac{\partial M^W}{\partial t_1} \cdot \frac{J_{10}^W t_{10}^W}{M_o^W} - \frac{\partial J_1^W}{\partial t_1} \cdot t_{10}^W$$

$$K_{n+1,44} = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial M^{Di}}{\partial P_2^{Di}} \frac{J_{20}^{Di} P_{20}^{Di}}{M_o^W} - \frac{\partial H^{Di}}{\partial P_1^{Di}} \frac{M_o^{Di} P_{10}^{Di}}{M_o^W} \cdot \Lambda^{Di} \right) - \frac{M^W}{P_1^W} \frac{J_{10}^W P_{10}^W}{M_o^W} - \frac{\partial J_1^W}{\partial P_1^W} \cdot P_{10}^W \right] \cdot \frac{1}{K_{n+1,43}}$$

$$K_{n+1,45} = - \frac{\partial M^W}{\partial P_2^W} \cdot \frac{J_{10}^W P_{10}^W}{M_o^W} \cdot \frac{1}{K_{n+1,43}}$$

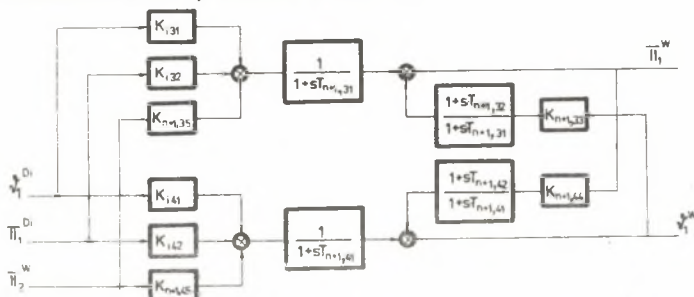
$$K_{n+1,T1} = \frac{V^R P_{10}^W J_{10}^W}{M_o^W R^2 t_{10}^W} \left(\frac{\partial J_1^W}{\partial t_1^W} \frac{t_{10}^W}{J_{10}^W} - 1 \right)$$

$$K_{n+1,T2} = - \frac{V^R P_{10}^W J_{10}^W}{M_o^W R^2 t_{10}^W} \left(\frac{\partial J_1^W}{\partial P_1^W} \cdot \frac{P_{10}^W}{J_{10}^W} + 1 \right)$$

$$T_{n+1,41} = K_{n+1,T1} / K_{n+1,34}$$

$$T_{n+1,42} = K_{n+1,T2} / K_{n+1,34} \cdot K_{n+1,44}$$

Połączoną dynamikę zmian ciśnienia i temperatury w objętości czynnej V^R opisuje schemat blokowy równań (rys. 4).



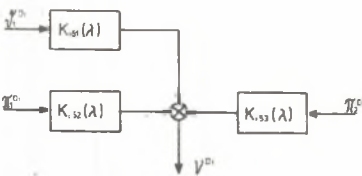
Rys. 4. Schemat blokowy opisu dynamiki zmian temperatury T_1^W i ciśnienia P_1^W ; $I = 1 \div n$

Sprawność wewnętrzna występująca w (26), jest traktowana jako zmienny parametr obliczeń w równaniach określających współczynniki (32a-i), co obrazuje jej wpływ na zmianę entalpii

$$K_{i41} = K_{i41}(\lambda^{Di}), \quad K_{i42} = K_{i42}(\lambda^{Di}), \quad K_{n+1,44} = K_{n+1,44}(\lambda^{Di}) \quad (33a-c)$$

5. RÓWNANIE ZMIAN MOCY WYTWARZANEJ

Równanie dynamiczne zmian mocy wytwarzanej w segmencie dyszowym stopnia regulacyjnego otrzymamy po zlinearyzowaniu równania modelowego (34) i wykorzystaniu równań (4a, 25, 27)



$$\frac{N^{Di}}{N_o^{Di}} = \frac{M_o^{Di} H_{90}^{Di} \lambda^{Di}}{M_o^{Di} H_{90}^{Di} \lambda_o^{Di}} = \frac{M_o^{Di} H_o^{Di}}{M_o^{Di} H_o^{Di}}, \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}^{Di} &= K_{151}(\lambda^{Di}) \cdot \dot{v}_1^{Di} + K_{152}(\lambda^{Di}) \cdot \dot{v}_1^{Di} + \\ &+ K_{153}(\lambda^{Di}) \cdot \dot{P}_2^{Di}. \end{aligned} \quad (35)$$

Rys. 5. Schemat blokowy równania zmian mocy wytwarzanej w pojedynczym segmencie dyszowym stopnia regulacyjnego

Znaki przyrostów wielkości względnych pominięto. Współczynniki równania są funkcjami parametru zmian sprawności ze zmianą przepływu λ^{Di}

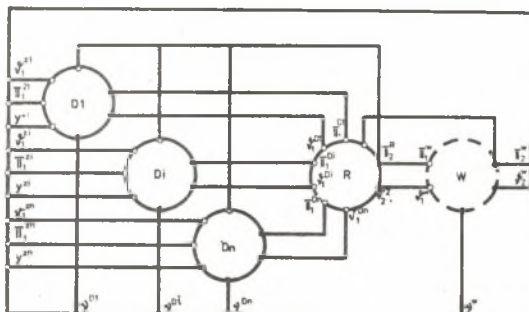
$$K_{151}(\lambda^{Di}) = \frac{\partial M_o^{Di}}{\partial t_1^{Di}} \frac{\lambda^{Di} \cdot t_{10}^{Di}}{M_o^{Di}} + \frac{\partial H_o^{Di}}{\partial t_1^{Di}} \frac{t_{10}^{Di}}{H_o^{Di}}$$

$$K_{152}(\lambda^{Di}) = \frac{\partial M_o^{Di}}{\partial P_1^{Di}} \frac{\lambda^{Di} \cdot P_{10}^{Di}}{M_o^{Di}} + \frac{\partial H_o^{Di}}{\partial t_1^{Di}} \frac{P_{10}^{Di}}{H_o^{Di}} \quad (35a-c)$$

$$K_{153}(\lambda^{Di}) = \frac{\partial M_o^{Di}}{\partial P_2^{Di}} \frac{\lambda^{Di} \cdot P_{20}^{Di}}{M_o^{Di}} + \frac{\partial H_o^{Di}}{\partial P_2^{Di}} \cdot \frac{P_{20}^{Di}}{H_o^{Di}}$$

Schemat blokowy równania zmian mocy wytwarzanej w pojedynczym segmencie dyszowym stopnia regulacyjnego pokazano na rys. 5.

Schemat strukturalny pełnego modelu dynamicznego przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Schemat struktury modelu dynamicznego rozrzędu stopnia regulacyjnego turbiny

Oznaczenie modułów technologicznych: D_1 , D_i , D_n - segmenty dyszowe, R - stopień regulacyjny, W - część homogeniczna turbiny, WE - punkty nie zaczerpnione, WY - punkty zaczerpnione

6. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiony model stanowi część opracowywanego obecnie w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych modelu dynamicznego pełnego procesu konwersji energii w turbozespole parowym. W dalszych etapach pracy zostanie rozpatrzona możliwość dokładnego rozwiązania równań opisujących dynamikę zarówno poszczególnych węzłów, jak i całego obiektu dla równania stanu pary rzeczywistej. Równolegle w oparciu o analizę częstotliwościową rozpatrzone zostaną możliwości uproszczeń tak, aby otrzymane zależności można było rozwiązać za pomocą techniki analogowej.

LITERATURA

- [1] Tuliszka E.: Turbiny ciepłne, WNT, Warszawa 1973.
- [2] Kwan R.: A mathematical model of a 220 MW boiler, J. Control, 1970, nr 6.
- [3] Kaczmarczyk T.: Koncepcja dynamicznego modelu turbozespołu. Prace JEiSU Pol.Śl. IV, 1976.
- [4] Kuda M. i inni: Analysis and Design of 200 MW Boiler + Turbine Unit Control Systems trough Analog and Digital Simulation IV Kongres IFAC, Warszawa 1969.
- [5] Schröder K.: Grosse Dampfkraftwerke. Die Kraftwerkaurüstung, tom 3. Springer Verl. 1963.
- [6] Büttner W., Sanerbeck U.: Auslegung von Stellventilen. Regelungstechnik, 1963, nr 5.
- [7] Chmielniak T. i inni: Projekt stacji do badań układu regulacji turbiny. Opracowanie IMiUE Pol.Śl., 1976.
- [8] Traupel: Thermische Turbomaschinen. Bd II Springer Verlag, 1967.