

dr inż. Janusz Lewandowski
doc. dr hab. inż. Andrzej Miller

Instytut Techniki Ciepłej
Politechniki Warszawskiej

OBLICZENIA STOPNIA REGULACYJNEGO I GRUPY STOPNI NIEREGULOWANYCH TURBINY PAROWEJ W ZMIENNYCH WARUNKACH PRACY

Przedstawiono metody obliczeń stopnia regulacyjnego i grupy stopni nieregulowanych turbiny parowej w zmiennych warunkach pracy, przeznaczone głównie do wykorzystania przy modelowaniu matematycznym procesów nieustalonych w turbinach. Na podstawie studiów literaturowych i prac własnych zaproponowano odpowiedni zestaw zależności do obliczeń rozpatrywanych elementów turbiny. Podano schematy blokowe obliczeń oraz przykładowe wyniki uzyskane przy wykorzystaniu proponowanych metod.

Wykaz oznaczeń

- a - współczynnik
- C - współczynnik
- e - łuk zasilania w stopniu regulacyjnym
- E - współczynnik
- G - natężenie przepływu
- h - wewnętrzny spadek entalpii
- H - izentropowy spadek entalpii
- i - entalpia właściwa
- J - liczba elementów
- k - współczynnik określający straty wilgotności
- n - prędkość obrotowa
- \bar{n} - względna zredukowana prędkość obrotowa
- N - moc

- p - ciśnienie
v - objętość właściwa
x - wskaźnik prędkości
 \bar{x} - względny wskaźnik prędkości
y - stopień suchości pary
 Δ - przyrost lub strata
 ε - stosunek ciśnień
 $\bar{\varepsilon}$ - względny stosunek ciśnień
 ζ - współczynnik strat
 η - sprawność
 $\bar{\eta}$ - sprawność względna
 ψ - współczynnik separacji wody

Indeksy

- j - dotyczy j-ego elementu
kr - dotyczy warunków krytycznych
max - dotyczy wartości największej
n - dotyczy stanu odniesienia
opt - dotyczy warunków pracy przy największej sprawności
r - dotyczy stopnia regulacyjnego
s - dotyczy tzw. "suchej" sprawności
u - dotyczy sprawności obwodowej
w - dotyczy wody
y - dotyczy obszaru pary wilgotnej
 α - dotyczy wlotu
 ω - dotyczy wylotu

1. WSTĘP

Zagadnienie obliczeń stopnia regulacyjnego i grupy stopni nieregulowanych w zmiennych warunkach pracy pojawia się przede wszystkim przy wyznaczeniu osiągnięć turbiny parowej w warunkach różnych od znamionowych. Dotyczy to zarówno pracy

turbiny w warunkach ustalonych [1], [2] jak i nieustalonych [3]. Stopień regulacyjny i grupy stopni nieregulowanych są bowiem podstawowymi elementami części przepływowej turbin, a brak stopnia regulacyjnego w niektórych turbinach może być traktowany jako przypadek szczególny. Przez grupę stopni nieregulowanych rozumie się zespół dowolnej ilości jednorodnych stopni turbinowych o stałych przekrojach przepływowych oraz jednakowym natężeniu przepływu pary przez wszystkie stopnie. W szczególnym przypadku grupa stopni może być zredukowana do pojedynczego stopnia nieregulowanego.

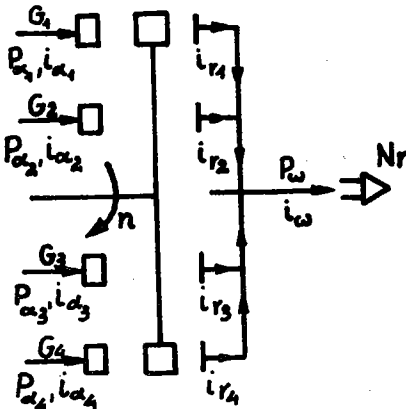
Większość spotykanych w literaturze metod obliczeń stopnia regulacyjnego i grup stopni nie jest dostatecznie ogólna i dotyczy tylko przypadków szczególnych, zwykle pracy turbiny przy stałej prędkości obrotowej ($n = \text{const}$), przy jednakowych entalpiach pary przed poszczególnymi segmentami dyszowymi stopnia regulacyjnego, a często także przy stałej sprawności poszczególnych grup stopni. Ponadto metod tych nie można na ogół zastosować bezpośrednio w przypadku turbin na parę nasyconą. Proponowane przez autorów metody obliczeń dotyczą ogólnego przypadku zmian warunków pracy i przeznaczone są do wykorzystania przede wszystkim przy modelowaniu matematycznym procesów nieustalonych w turbinach.

Opracowanie poszukiwanych metod wymagało przeprowadzenia krytycznej analizy wyników opublikowanych prac. W pracach tych działanie rozpatrywanych elementów turbiny w zmienionych warunkach pracy rozważane jest z różnych punktów widzenia i dla różnych celów. Po odpowiedniej interpretacji uzyskanych wyników umożliwiło to autorom wskazanie ogólniejszych własności i zależności, które po pewnych modyfikacjach zostały wykorzystane w rozpatrywanym przypadku. Wykorzystano w tym zakresie także wyniki wielu dotychczasowych prac własnych. Podstawowe zależności konieczne do obliczeń rozpatrywanych elementów turbiny zostały podane w artykule. W przypadku zależności pomocniczych dla wyznaczenia niektórych współczynników i określenia typowych charakterystyk podano źródła literaturowe, które zdaniem autorów zawierają najbardziej odpowiednio do tego celu dane i zależności.

Dla określenia osiągniętych stopnia czy grupy stopni w zmienionych warunkach potrzebna jest znajomość przelotności (określającej natężenie przepływu) oraz sprawności wewnętrznej (określającej moc i parametry czynnika na wylocie). W tym układzie przedstawiono dalej omówione metody obliczeń.

2. OBLICZENIA STOPNIA REGULACYJNEGO

Natężenie przepływu pary $G_{\alpha j}$ przez poszczególne segmenty dyszowe stopnia regulacyjnego (rys.1) wyznaczyć można stosując równanie przelotności, niezależnie dla każdego j -tego strumienia pary



$$G_{\alpha j} = G_{krnj} \frac{P_{\alpha j}}{P_{\alpha nj}} \sqrt{\frac{(P_{\alpha j} v_{\alpha j})^n E}{P_{\alpha j} v_{\alpha j}}}, \quad (1)$$

przy czym:

$$E = 1 \quad \text{dla} \quad \frac{P_\omega}{P_{\alpha j}} \leq \varepsilon_{kr}, \quad (2)$$

$$E = \sqrt{1 - \frac{(\varepsilon_j - \varepsilon_{kr})^2}{(1 - \varepsilon_{kr})^2}} \quad \text{dla} \quad \frac{P_\omega}{P_{\alpha j}} > \varepsilon_{kr},$$

zaś

$$\varepsilon_j = \frac{P_\omega}{P_{\alpha j}}, \quad (3)$$

gdzie:

- $P_{\alpha j}, v_{\alpha j}$ - ciśnienie i objętość właściwa pary przed j -tym segmentem dyszowym,
- P_ω - ciśnienie za stopniem, a indeks "n" dotyczy warunków odniesienia (np. stan znamionowy).

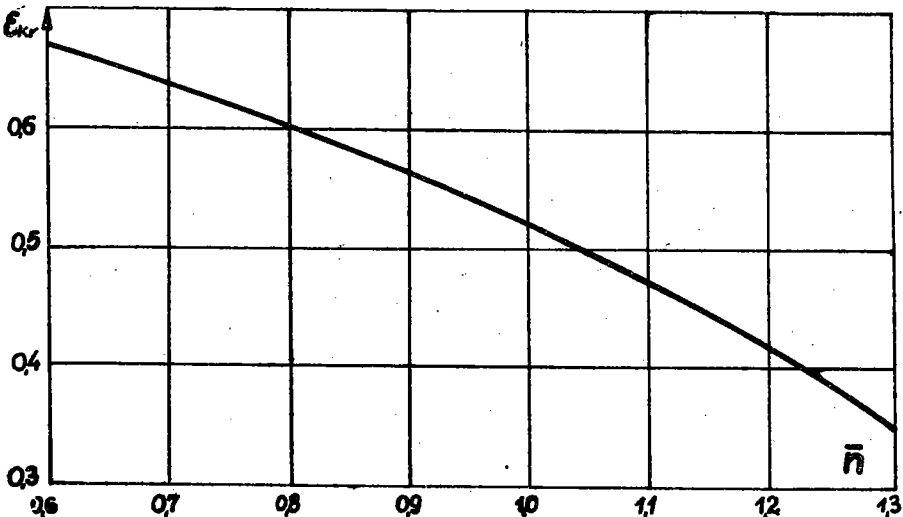
Wielkość oznaczona G_{krnj} jest krytycznym natężeniem przepływu pary przez j-ty segment dyszowy w warunkach odniesienia, natomiast ϵ_{kr} jest krytycznym stosunkiem ciśnień, zależnym od konstrukcji stopnia i właściwości czynnika roboczego. W przypadku turbiny pracującej ze zmienną prędkością obrotową stosunek ten jest jeszcze funkcją prędkości obrotowej \bar{n} [4], [9]

$$\epsilon_{kr} = f(\bar{n}), \tag{4}$$

gdzie

$$\bar{n} = \frac{n}{n_n} \sqrt{\frac{(p_{\alpha j} v_{\alpha j})_n}{p_{\alpha j} v_{\alpha j}}}. \tag{5}$$

Postać funkcji f w zależności (4) wynika z indywidualnych cech stopnia. Określić ją można na drodze eksperymentalnej lub teoretycznej, przykładowo przy wykorzystaniu metody podanej w pracy [4] lub wyprowadzonego w pracach własnych autorów [9] uogólnionego równania przelotności. Przykład tak wyznaczonej zależności (4) przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Przykładowa charakterystyka $\epsilon_{kr} = f(n)$ stopnia regulacyjnego turbiny K-220-44 wytwórni ChTGZ (ZSRR) wyznaczona na podstawie zależności podanych w pracy [9]

Sumaryczne natężenie przepływu pary przez stopień regulacyjny jest równe

$$G_{\omega} = \sum_{j=1}^J G_{\alpha_j}, \quad (6)$$

gdzie

J jest liczbą segmentów dyszowych.

Moc obwodową (związaną z pracą obwodową) uzyskiwaną w każdym j -tym strumieniu pary wyznaczyć można z zależności

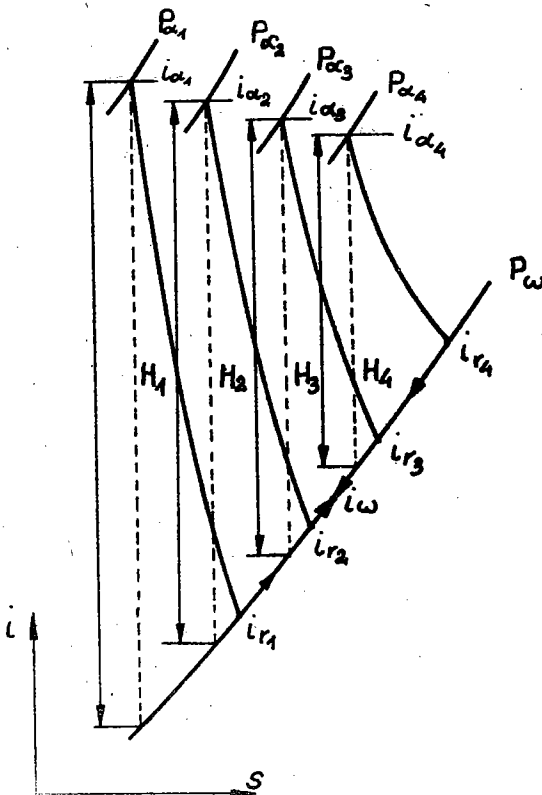
$$N_{uj} = G_{\alpha_j} H_j \varrho_{uj}, \quad (7)$$

gdzie

$$H_j = f(p_{\alpha_j}, i_{\alpha_j}, p_{\omega}) \quad (8)$$

jest izentropowym spadkiem entalpii w rozpatrywanym strumieniu pary (rys.3), a ϱ_{uj} jest sprawnością obwodową stopnia

w tym strumieniu. Sprawność obwodowa stopnia o określonej konstrukcji jest funkcją parametrów termodynamicznych pary przed stopniem, stosunku ciśnień i prędkości obrotowej. Wygodniej jest jednak rozpatrywać jej przebieg w funkcji innych zmiennych, jednoznacznie związanych z poprzednimi, a mianowicie w funkcji stosunku ciśnień ϵ_j oraz wskaźnika prędkości x_j [4], [5]



Rys.3. Umowny schemat rozprężania się pary w stopniu regulacyjnym z czterema segmentami dyszowymi ($J = 4$)

$$\varrho_{uj} = f(x_j, \varepsilon_j)$$

lub posługując się wielkościami względnymi

$$\bar{\varrho}_{uj} = f(\bar{x}_j, \bar{\varepsilon}_j), \tag{9}$$

gdzie:

$$\bar{\varrho}_{uj} = \frac{\varrho_{uj}}{\varrho_{u \max}}, \tag{10}$$

$$\bar{x}_j = \frac{x_j}{x_{\text{opt}}} = \bar{x}_{nj} \frac{n}{n_n} \sqrt{\frac{H_{nj}}{H_j}}, \tag{11}$$

$$x_j = \frac{u}{\sqrt{2H_j}},$$

$$\bar{\varepsilon}_j = \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_{\text{opt}}}, \tag{12}$$

x_{opt} oraz ε_{opt} odpowiadają maksymalnej sprawności $\varrho_{u \max}$, natomiast u jest prędkością obwodową na średnim promieniu.

Funkcję f uzyskuje się przez aproksymację wyników badań konkretnego stopnia, bądź uogólnionych wyników badań stopni podobnych, np. [4], [5].

Straty dodatkowe występujące w stopniu regulacyjnym można podzielić na trzy grupy:

- straty związane z częściowym zasilaniem z pominięciem strat wentylacji,
- straty wilgotności,
- straty tarcia i wentylacji.

Dwie pierwsze straty określono oddzielnie dla każdego strumienia pary, zaś stratę tarcia i wentylacji sumarycznie dla całego stopnia.

Straty związane z częściowym zasilaniem można, jak to wynika z nowszych badań, określić z zależności [4], [7]

$$\beta_{1j} = C_1 x_j^3 + C_2 x_j^2 \varrho_{uj} + x_j \varrho_{uj} + C_4. \tag{13}$$

Współczynniki C_1, C_2, C_3, C_4 zależą od geometrii stopnia i można je wyznaczyć z zależności podanych np. w pracy [4].

Straty wilgotności obliczyć można korzystając z zależności podanej w pracy [8]

$$\beta_{2j} = 1,8 x_j (1 - \gamma_{Rj}), \quad (14)$$

gdzie

γ_{Rj} jest stopniem suchości pary w końcu procesu rozprężania w j-tym strumieniu pary.

Wewnętrzny spadek entalpii w j-tym strumieniu pary wynosi zatem

$$h_j = H_j (2u_j - \beta_{1j} - \beta_{2j}), \quad (15)$$

a moc stopnia regulacyjnego N' bez uwzględnienia strat tarcia i wentylacji, jest równa

$$N' = \sum_{j=1}^J G_{\alpha j} h_j. \quad (16)$$

Entalpia końcowa i_{Rj} każdego strumienia pary wynosi

$$i_{Rj} = i_{\alpha j} - h_j, \quad (17)$$

a entalpia po zmieszaniu się strumieni

$$i'_{\omega} = \frac{\sum_{j=1}^J G_{\alpha j} i_{Rj}}{G_{\omega}}. \quad (18)$$

Straty tarcia i wentylacji wyznaczyć można z zależności [4]

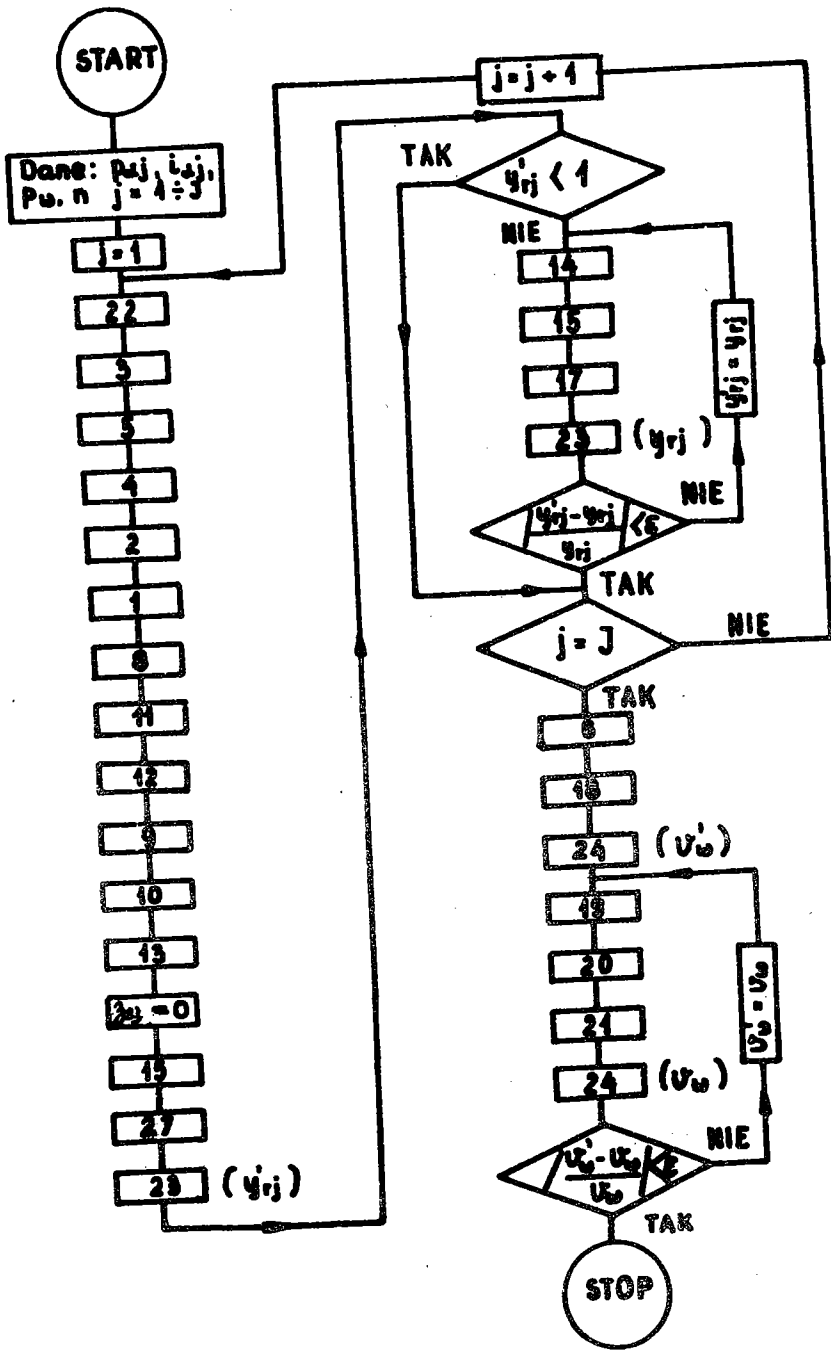
$$\Delta N_{tw} = C_5 - C_6 \left(1 - \sum_{j=1}^J e_j \right) \frac{n^3}{v_{\omega}}, \quad (19)$$

gdzie:

C_5, C_6 - stałe zależne od geometrii stopnia, przy czym można je wyznaczyć z zależności podanych np. w pracy [4],

e_j - łuk zasilania w j-tym strumieniu, z tym, że należy przyjąć, że jeżeli $G_{\alpha j} = 0$, to $e_j = 0$,

v_{ω} - objętość właściwa za stopniem regulacyjnym.



Rys.4. Schemat blokowy obliczeń stopnia regulacyjnego. Liczby w poszczególnych blokach odpowiadają numerom podanych zależności

Moc wewnętrzna stopnia regulacyjnego N wynosi

$$N = N' - \Delta N_{tw}, \quad (20)$$

zaś entalpia pary za stopniem

$$i_{\omega} = i'_{\omega} - \frac{\Delta N_{tw}}{G_{\omega}}. \quad (21)$$

W przypadku pracy stopnia regulacyjnego w obszarze pary przegrzanej przyjęć należy, że

$$\sum_{2j} = 0.$$

Zbiór zależności (1) - (21) uzupełniony zależnościami wynikającymi z własności czynnika roboczego:

$$v_{\alpha j} = f(p_{\alpha j}, i_{\alpha j}), \quad (22)$$

$$y_{rj} = f(p_{\omega}, i_{rj}), \quad (23)$$

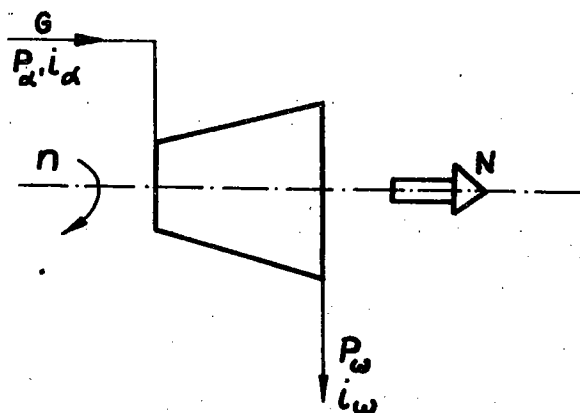
$$v_{\omega} = f(p_{\omega}, i_{\omega}), \quad (24)$$

stanowi układ nieliniowych równań algebraicznych.

Schemat blokowy rozwiązania tego układu przedstawiono na rys.4. Jako wielkości zadane do obliczeń przyjęto ciśnienia $p_{\alpha j}$ i p_{ω} , entalpie $i_{\alpha j}$ oraz prędkość obrotową turbiny n . Na schemacie tym podano numery zależności wykorzystywanych w danym fragmencie obliczeń.

3. OBLICZENIA GRUPY STOPNI NIEREGULOWANYCH

Natężenie przepływu pary przez grupę stopni turbinowych (schemat przepływu pary przez taką grupę, podano na rys.5) wyznaczyć można z równania przelotności w postaci



Rys.5. Schemat grupy stopni nieregulowanych

$$G = G_{krn} A \frac{P_\alpha}{P_{\alpha n}} \sqrt{\frac{(P_\alpha v_\alpha)_n}{P_\alpha v_\alpha}} E, \quad (25)$$

przy czym:

$$E = 1 \quad \text{dla} \quad \frac{P_\omega}{P_\alpha} \leq \varepsilon_{kr},$$

$$E = \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{kr}}{1 - \varepsilon_{kr}} \right)^2} \quad \text{dla} \quad \frac{P_\omega}{P_\alpha} > \varepsilon_{kr}, \quad (26)$$

$$\varepsilon = \frac{P_\omega}{P_\alpha},$$

gdzie:

P_α, v_α - ciśnienie i objętość właściwa pary przed grupą,

P_ω - ciśnienie pary za grupą,

G_{krn} - krytyczne natężenie przepływu pary przez grupę stopni w warunkach odniesienia.

ε_{kr} - krytyczny stosunek ciśnień grupy.

Współczynnik A oraz stosunek ciśnień ε_{kr} traktowane są tu jako funkcje prędkości obrotowej turbiny \bar{n}

$$A = \frac{G_{kr}}{G_{krn}} \frac{P_{\alpha n}}{P_\alpha} \frac{(P_\alpha v_\alpha)}{(P_\alpha v_\alpha)_n} = f_1(\bar{n}), \quad (28)$$

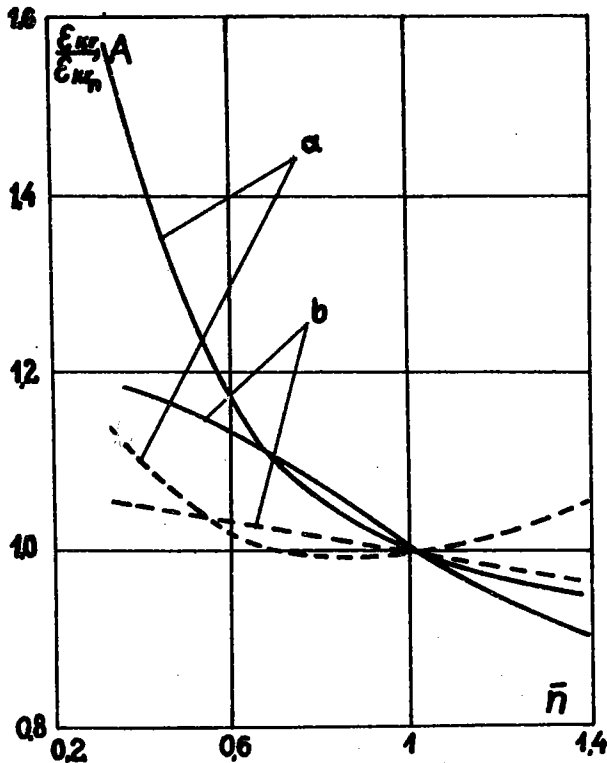
$$\varepsilon_{kr} = f_2(\bar{n}), \quad (29)$$

gdzie

$$\bar{n} = \frac{n}{n} \sqrt{\frac{(p_\alpha v_\alpha) n}{p_\alpha v_\alpha}}. \quad (30)$$

Funkcje f_1 oraz f_2 wynikają z konstrukcji grupy stopni. Należy je wyznaczyć na drodze eksperymentalnej lub teoretycznej.

Przykład tych zależności wyznaczonych dla konkretnych grup stopni metodą podaną w pracy [9] przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Przykładowe charakterystyki grupy stopni nieregulowanych, wyznaczone na podstawie zależności podanych w pracy [9]. Linie ciągłe: A = $f(\bar{n})$, linie przerywane $\frac{\varepsilon_{kr}}{\varepsilon_{ktn}} = f(\bar{n})$; a - grupa 11 stopni reakcyjnych; b - grupa 3 stopni akcyjnych

Moc grupy stopni turbinowych wyznaczyć można z zależności

$$N = G H \varrho_i \quad (31)$$

gdzie:

$H = f(p_\alpha, i_\alpha, p_\omega)$ - izentropowy spadek entalpii w grupie (rys.7),

ϱ_i - sprawność wewnętrzna grupy stopni.

Sprawność wewnętrzna jest równa

$$\varrho_i = \varrho_s k_y \quad (32)$$

Sprawność ϱ_s jest tzw. "suchą" sprawnością wewnętrzną grupy stopni, tj. sprawnością bez uwzględnienia strat związanych z wilgotnością pary. Wyznaczyć ją można z zależności

$$\varrho_s = \varrho_{sn} f_4(\bar{n}, \bar{\varepsilon}), \quad (33)$$

gdzie

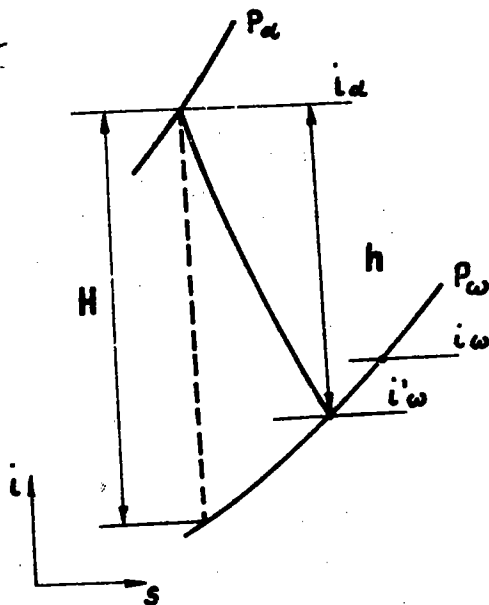
$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon_n} \frac{p_\omega}{p_\alpha} \quad (34)$$

Funkcja f_4 powinna być wyznaczana podobnie jak funkcje f_1 i f_2 w ramach oddzielnych obliczeń według metody podanej np. w pracy [9]. Współczynnik k_y uwzględnia straty wilgotności w stopniu. Można go wyznaczyć z zależności [8]

$$k_y = 1 - \left[k_1(1 - \gamma_\alpha) + k_2(\gamma_\alpha - \gamma_\omega) \right] \frac{H_y}{H}, \quad (35)$$

gdzie

$$H_y = f(p_\alpha, i_\alpha, p_\omega) \quad (36)$$



Rys.7. Umowny schemat rozprężania się pary w grupie stopni nieregulowanych

oznacza tę część spadku izentropowego, która leży w obszarze pary wilgotnej.

Współczynniki k_1 i k_2 zależą od konstrukcji grupy stopni i można je przyjąć na podstawie np. pracy [8].

Entalpia na wylocie z grupy stopni, w której nie występuje separacja wody, jest równa

$$i_{\omega} = i'_{\omega} = i_{\alpha} - \frac{N}{G}. \quad (37)$$

Natężenie przepływu wody separowanej w grupie stopni wyznaczyć można z zależności

$$G_w = G(1 - y'_{\omega})\psi, \quad (38)$$

gdzie stopień suchości y'_{ω} odpowiada entalpii i'_{ω} wyliczonej z zależności (37), a ψ jest współczynnikiem określającym efektywność separacji. Współczynnik ψ jest funkcją stopnia suchości pary

$$\psi = f(1 - y'_{\omega}). \quad (39)$$

Funkcję f określić należy wykorzystując wyniki odpowiednich badań doświadczalnych np. [8].

W przypadku grupy z separacją wody stopień suchości pary za grupą wyznaczyć można z zależności

$$y_{\omega} = y'_{\omega} + (1 - y'_{\omega})\psi. \quad (40)$$

Natężenie przepływu pary po odseparowaniu wody jest równe

$$G_{\omega} = G - G_w. \quad (41)$$

W przypadku pracy grupy stopni w obszarze pary przegrzanej przyjąć należy, że:

$$k_y = 1, \quad \psi = 0.$$

Do obliczeń pojedynczego stopnia wykorzystać można ogólne podane wcześniej zależności. W zakresie osiągow stopnia wygodniej jest jednak stosować nieco inne równania, wykorzystujące charakterystyki stopni pojedynczych.

W przypadku pojedynczego stopnia, przy wyznaczaniu sprawności stopnia, można zamiast zależności (33) wykorzystać charakterystykę

$$\varrho_s = \varrho_s \max f(\bar{x}, \bar{\varepsilon}), \quad (42)$$

gdzie

$\varrho_s \max$ - maksymalna sprawność sucha stopnia,

$$\bar{x} = \frac{x}{x_{\text{opt}}} = \bar{x}_n \frac{n}{n_n} \sqrt{\frac{H_n}{H}}, \quad (43)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{opt}}}, \quad (44)$$

przy czym x_{opt} oraz ε_{opt} odpowiadają maksymalnej sprawności $\varrho_s \max$.

Funkcję f uzyskuje się, podobnie jak w przypadku zależności (33), przez aproksymację wyników badań konkretnego stopnia, bądź uogólnionych wyników badań stopni podobnych.

Innego sposobu określania wymagają w tym przypadku także wewnętrzna sprawność stopnia ϱ_i oraz straty wilgotności ζ_y .

Sprawność wewnętrzna pojedynczego stopnia jest równa

$$\varrho_i = \varrho_s - \zeta_y, \quad (45)$$

gdzie [4], [8]

$$\zeta_y = 2 \times \left[k_1 y_\alpha - k_2 (y_\alpha - y'_\omega) \right] \frac{H_y}{H}. \quad (46)$$

Współczynniki k_1 oraz k_2 zależą od typu stopnia, dyspersji wody i rodzaju urządzeń wewnątrzkadłubowej separacji. Wartość ich należy przyjąć na podstawie podanych wyżej prac. Stopień suchości y'_ω odpowiada warunkom w końcu procesu rozprężania bez uwzględnienia wewnątrzkadłubowej separacji (rys.7).

W przypadku pracy pojedynczego stopnia w obszarze pary przegrzanej należy przyjąć, że:

$$\zeta_y = 0, \quad \psi = 0.$$

W układach przepływowych turbin na parę nasyconą występują stopnie o specjalnych cechach konstrukcyjnych. Do takich specjalnych stopni należą między innymi stopnie-separatory [8] oraz ostatni, a często i przedostatni, stopień w części NP turbiny.

W przypadku stopnia-separatora wykorzystać można podane wcześniej zależności. Stopień taki posiada nieco mniejszą sprawność $\eta_{s \max}$ oraz charakteryzuje się znacznie większą efektywnością separacji (ujmowaną współczynnikiem ψ) niż typowe stopnie turbinowe. Charakterystyki (39) oraz (42) wyznaczone tu być powinny na podstawie badań stopni o takiej samej, bądź zbliżonej konstrukcji.

Ostatni i przedostatni stopień w części NP (niskorpeężnej) turbiny posiadają zwykle ekstremalne wymiary i wynikające z nich specjalne cechy. Można je uwzględnić przez zastosowanie odpowiednich indywidualnych zależności (25) oraz (42).

W odróżnieniu od pozostałych typów stopni odpowiednie charakterystyki powinny być określone na drodze badań doświadczalnych rozpatrywanego stopnia. Wyznaczanie tych charakterystyk na drodze teoretycznej nie jest, jak się wydaje, w stanie zapewnić odpowiedniej dokładności wyników. Również i przeniesienie wyników badań ze stopni podobnych, dopuszczalne w przypadku typowych stopni turbiny, dla stopni ostatnich może prowadzić do istotniejszych błędów w obliczeniach.

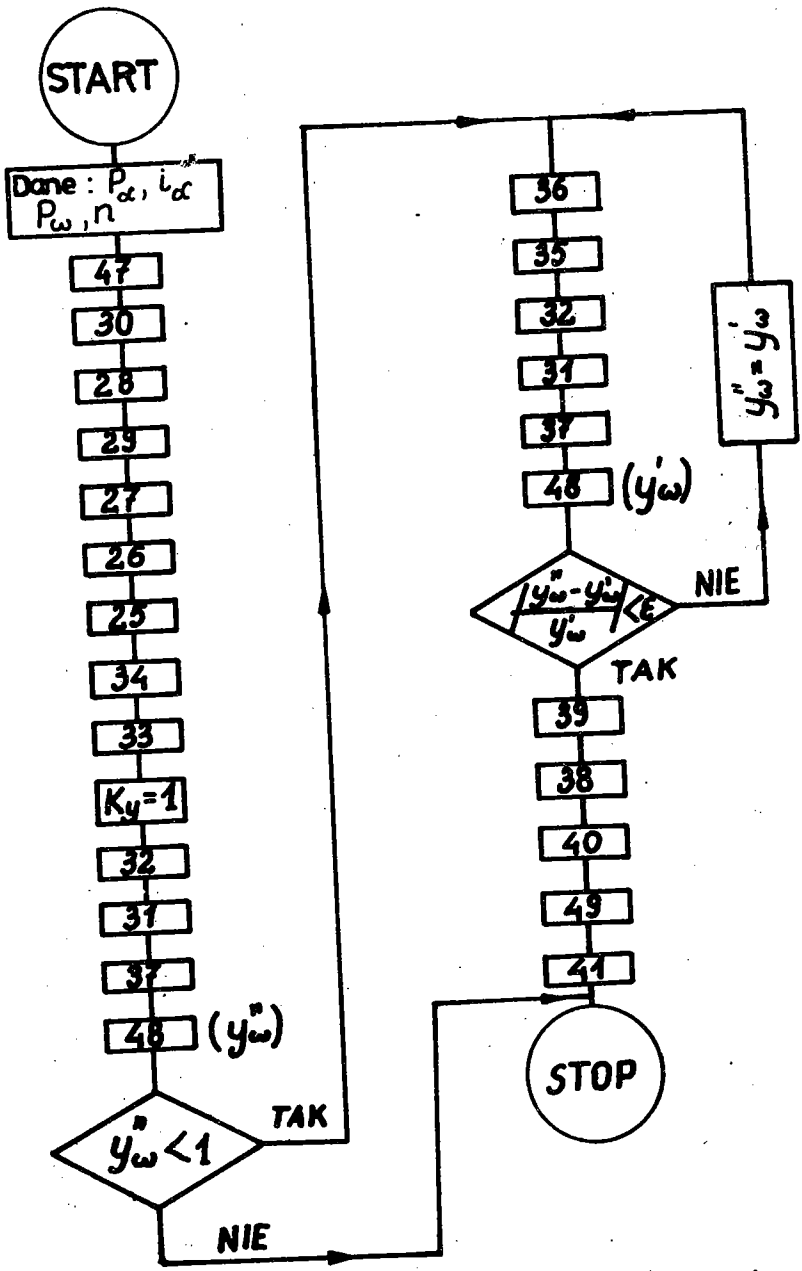
Podobnie jak w przypadku stopnia regulacyjnego zależności (25) ÷ (41) uzupełnić należy poniższymi równaniami wynikającymi z własności termodynamicznych czynnika roboczego:

$$v_{\alpha} = f(p_{\alpha}, i_{\alpha}), \quad (47)$$

$$y_{\omega} = f(p_{\omega}, i'_{\omega}), \quad (48)$$

$$i_{\omega} = f(p_{\omega}, y_{\omega}). \quad (49)$$

Przedstawione zależności opisujące pracę grupy stopni nie-regulowanych w zmiennych warunkach stanowią układ nieliniowych równań algebraicznych. Schemat blokowy rozwiązania tego układu przedstawiono na rys.8. Na schemacie tym podano numery zależności wykorzystywanych w danym fragmencie obliczeń.

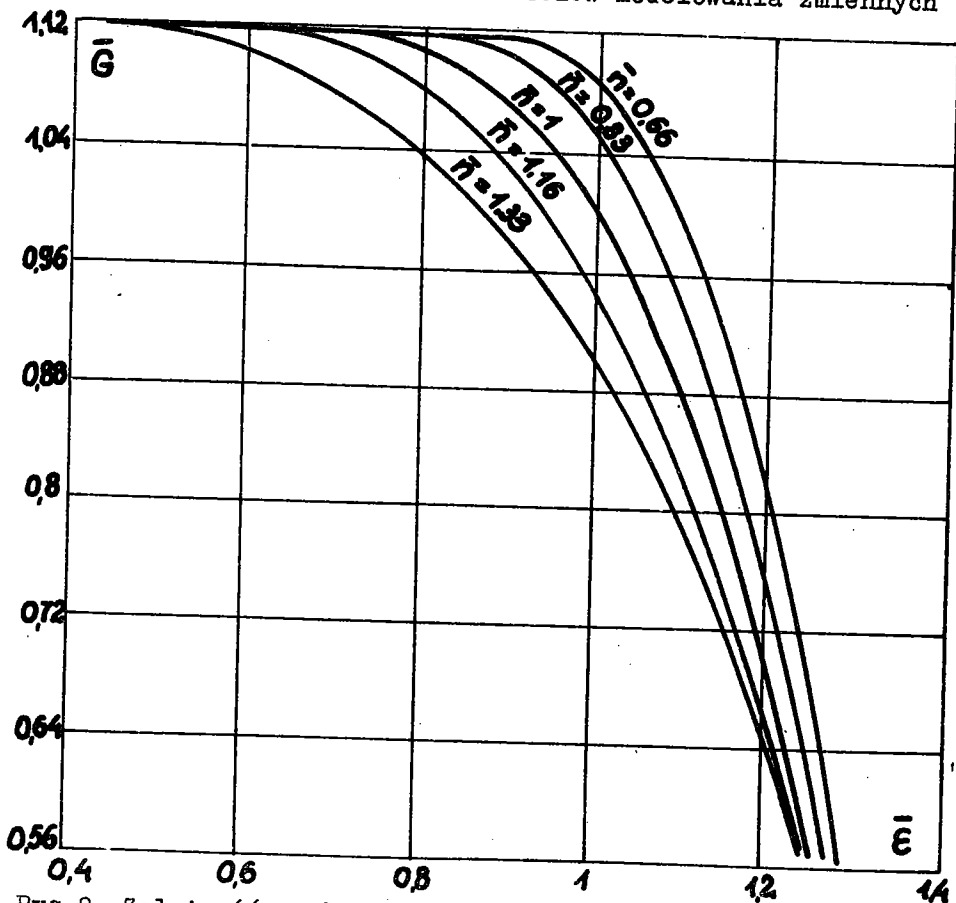


Rys.8. Schemat blokowy obliczeń grupy stopni nieregulowanych. Liczby w poszczególnych blokach odpowiadają numerom podanych zależności (y''_{ω} - założona wstępnie wartość y'_{ω})

Jako wielkości zadane do obliczeń przyjęto ciśnienia p_α , p_ω , prędkość obrotową turbiny n oraz entalpię i_α .

4. PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ

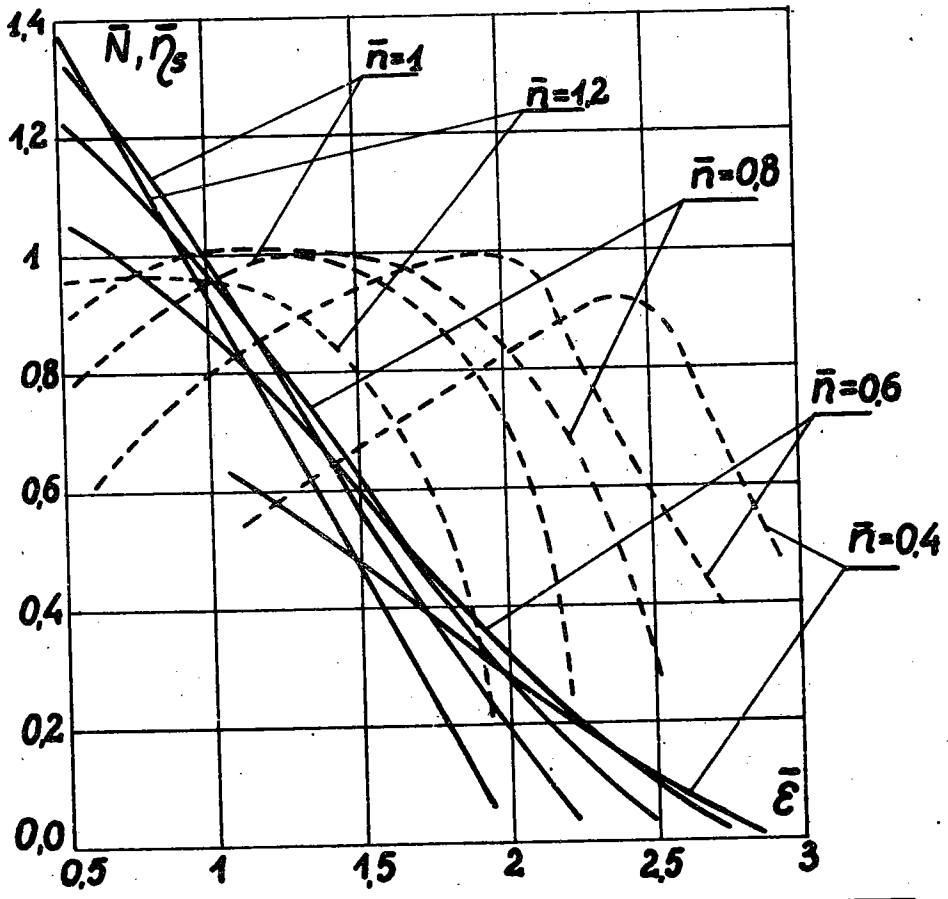
Przedstawione metody obliczeń były przez autorów wielokrotnie z powodzeniem stosowane dla celów modelowania zmiennych



Rys.9. Zależność względnego natężenia przepływu pary $\bar{G} = \frac{G p_{\alpha n} \sqrt{p_{\alpha} v_{\alpha}}}{G_n p_{\alpha} \sqrt{(p_{\alpha} v_{\alpha})_n}}$ przez jeden z segmentów dyszowych stopnia regulacyjnego turbiny od względnego stosunku ciśnień za i przed stopniem $\bar{\epsilon}$ oraz zredukowanej względnej prędkości obrotowej turbiny \bar{n} . Obliczenia wykonano dla turbiny K-220-44 wytwórni ChTGZ (ZSRR)

warunków pracy turbiny, głównie zaś pracy w warunkach niestabilnych [3]. Przykładowe wyniki obliczeń stopnia regulacyjnego i grupy stopni nieregulowanych uzyskane przy wykorzystaniu podanych zależności przedstawiono na rys.9 oraz 10.

Na rys.9 zilustrowano przebieg zmian względnego natężenia przepływu pary przez jeden z segmentów dyszowych stopnia regulacyjnego w funkcji względnego stosunku ciśnień $\bar{\epsilon}$ oraz zre-



Rys.10. Zależność zredukowanej względnej mocy $\bar{N} = \frac{N \rho_{\alpha n} \sqrt{(\rho_{\alpha} v_{\alpha})_n}}{N_n \rho_{\alpha} \sqrt{\rho_{\alpha} v_{\alpha}}}$

grupy 3 stopni akcyjnych od stosunku ciśnień $\bar{\epsilon}$ oraz zredukowanej względnej prędkości obrotowej turbiny \bar{n} . Liniami przerywanymi zaznaczono przebieg zmian względnej sprawności grupy $\bar{\eta}_s$

dukowanej prędkości obrotowej turbiny \bar{n} . Obliczenia dotyczyły turbiny na parę nasyconą K-220-44 wytwórni ChTGZ (ZSRR).

Na rys.10 pokazano zależność mocy grupy 3 stopni akcyjnych od stosunku ciśnień $\bar{\epsilon}$ oraz zredukowanej prędkości obrotowej \bar{n} . Przedstawione wyniki ukazują bardzo istotny wpływ prędkości obrotowej turbiny zarówno na przelotność jak i osiągi stopnia regulacyjnego i grupy stopni nieregulowanych. Wpływu tego nie pozwalają uwzględnić lub uwzględniają w sposób bardzo przybliżony dotychczas stosowane, wymienione na wstępie metody obliczeń.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M i l l e r A.: Model matematyczny turbiny parowej kondensacyjnej dużej mocy. Archiwum Energetyki, 1-2/1973.
- [2] M i l l e r A.: Model matematyczny turbiny parowej przeciwprężnej. Biuletyn ITC PW, 28/1970.
- [3] L e w a n d o w s k i J.: Metoda wyznaczania charakterystyk dynamicznych turbin na parę nasyconą dla elektrowni jądrowych. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 1978.
- [4] A b r a m o w W.I., F i l i p o w G.A., F r o - ż o w W.W.: Teplowej rasczot turbin. Maszynostrojienie, Moskwa 1974.
- [5] D e j c z M.E., T r o j a n o w s k i B.M.: Issledowania i rasczoty stupieniej osiewych turbin. Maszynostrojienie, Moskwa 1964.
- [6] T r a u p e l W.: Thermische Turbomaschinen. Springer Verlag, Berlin, Bd I 1977, Bd II 1968.
- [7] M i e ż e r i c k i j A.D.: Opredelenie potier w parcialnoj osiewoj turbinnoj stupieni. Energomaszynostrojienie 6/1974.
- [8] T r o j a n o w s k i B.M.: Turbiny dla atomnych elektrostancji. Energia, Moskwa 1973.
- [9] M i l l e r A.: Modelowanie pracy turbin parowych i sprężarek wirnikowych dla celów sterowania procesami technologicznymi. Praca habilitacyjna, Politechnika Warszawska 1975.

РАСЧЕТ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ СТУПЕНИ И ГРУППЫ НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ СТУПЕНЕЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ В ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

Приводятся методы расчета регулирующей ступени и нерегулируемых ступеней паровой турбины, работающей в переменном режиме, предназначенные главным образом для математического моделирования переходных процессов в турбинах. На основании литературных данных и собственных работ авторов предлагаются соответствующие уравнения для расчета рассматриваемых элементов турбины. Приводятся блок-схемы алгоритма вычислений на электронной цифровой вычислительной машине и даются примеры расчетов, выполненных согласно предлагаемым методам.

CALCULATIONS OF THE GOVERNOR STAGE AND GROUP OF STAGES OF A STEAM TURBINE AT VARIABLE OPERATING CONDITIONS

S u m m a r y

The methods of performance calculations of governor stage and group of turbine stages at variable operating conditions have been presented. These methods are especially useful for mathematical modelling of transient processes in steam turbines. The appropriate set of formulae for calculation of turbine flow-part elements under consideration, based on literature data as well as on the results of the authors previous works have been given. The flow diagrams for computer calculations and some results obtained at applications of proposed methods have been presented.