ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1971

Seria: ENERGETYKA z. 40 Nr kol. ~~142~~ 311

KAZIMIERZ KUTARBA, GERARD KOSMAN
Katedra Kotłów i Maszyn Cieplnych

O PEWNYCH PROBLEMACH WSPÓŁCZESNYCH METOD OBLICZEŃ TURBIN CIEPLNYCH

Streszczenie. W artykule rozpatrzono kilka zagadnień związanych w automatyzacją obliczeń projektowych turbin parowych. Przedstawiono zasady prowadzenia na elektronowych maszynach cyfrowych obliczeń cieplnych turbin związanych z konstruowaniem jednostek o optymalnej charakterystyce. Omówiono tok obliczeń przebiegu linii ekspansji pary w turbinie oraz sposób wyznaczania parametrów pary ekspansji pary w turbinie oraz sposób wyznaczania parametrów pary w upustach nieregulowanych. Przedstawiono przebieg obliczeń szczegółowych stopni turbiny reakcyjnej zmodyfikowaną metodą "v^2". Rozpatrzono problem określenia parametrów pary powstający przy przeprowadzaniu obliczeń cieplnych za pomocą maszyn cyfrowych.

1. Wstęp

Przy projektowaniu podstawowych urządzeń współczesnej energetyki - turbin parowych - konieczne jest przeprowadzenie obliczeń za pomocą elektronowych maszyn cyfrowych. Pracę obiegu turbiny opisują złożone zależności matematyczne. Właściwa analiza tych zależności umożliwia zaprojektowanie obiektu o optymalnej charakterystyce ekonomicznej i techniczno-ruchowej.

Realizacja obliczeń za pomocą elektronowych maszyn cyfrowych wymaga rozwiązania szeregu nowych problemów, które nie występowały w konwencjonalnych metodach obliczeniowych.

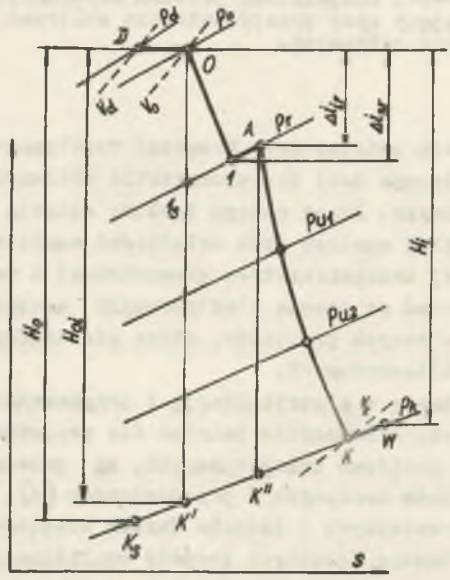
Zagadnienia związane z algorytmizacją i programowania obliczeń cieplnych turbin parowych, niezmiernie istotne dla projektantów siłowni cieplnych oraz maszyn i urządzeń energetycznych, są przedmiotem wieloletnich badań różnych ośrodków naukowych i przemysłowych [1], [5], [14]. Wyniki pierwszych prac prowadzonych w Zespole Turbin Cieplnych i Sprężarek przy Katedrze Kotłów i Maszyn Cieplnych zostały opublikowane w artykułach [7], [8].

W niniejszej pracy zostaną przedstawione nowe opracowania z tej dziedziny dotyczące wstępnego określenia przebiegu linii ekspansji pary w turbinie, wyznaczenia parametrów pary w upustach nieregulowanych oraz przebiegu obliczeń szczegółowych stopni turbin reakcyjnych. Z omawianymi zagadnieniami wiąże się ściśle problem określenia parametrów termicznych i kalorymetrycznych czynnika obiegowego - wody i pary wodnej,

2. Wstępne określenie przebiegu linii ekspansji pary w turbinie

Rozpatrzmy proces ekspansji pary w turbinie wielostopniowej. Jako wielkości dane przyjmujemy ciśnienie p_d i temperaturę t_d pary świeżej przed zaworami regulacyjnymi, ciśnienie końcowe p_k, ciśnienia pary za stopniem regulacyjnym p_r sprawności stopnia regulacyjnego i całej turbiny. Należy określić przebieg linii ekspansji pary w turbinie (rys. 1) parametry pary w punktach charakterystycznych oraz spadki entalpii H_o, H_{oi}, H_i, Δi_{sr}, Δi_{ir}.

Przy obliczeniach przeprowadzonych metodami konwencjonalnymi omawiane zagadnienie nie przedstawia żadnych trudności. Użycie tablic względnie wykresów wody i pary szybko prowadzi do otrzymania końcowych wyników. Przeprowadzanie obliczeń za pomocą maszyn cyfrowych wymaga innego rozwiązania postawionego problemu, albowiem najczęściej nie jest możliwe wprowadzenie do praktycznie ograniczonej pamięci maszyny informacji zawartych w tablicach.



Rys. 1. Wstępna linia przebiegu ekspansji pary w turbinie wielostopniowej

Jeżeli obliczenia realizujemy za pomocą EMC o małej pojemności pamięci to najkorzystniejsze jest zastąpienie tablic własności wody i pary równaniami stanu czynnika. Równania te określają wzajemną zależność parametrów termicznych i kalorycznych czynnika roboczego: entalpii, entropii, objętości właściwej, ciśnienia oraz temperatury. Równania stanu winny umożli-

wiać obliczenie każdego parametru spośród wymienionych, jako funkcji dwóch dowolnych z pozostałych parametrów.

Równanie określające własności wody i pary wodnej w zakresie potrzebnym do obliczeń technicznych można opracować w formie oddzielnych empirycznych wzorów, abstrahując od ich sensu fizycznego. Z drugiej strony można w oparciu o dane z tablic opracować równanie termiczne typu

$$v = v\,(\varrho, T) \quad \text{lub} \quad p = p\,(v, T) \tag{1}$$

natomiast zależności

$$s = s\,(p, T); \quad i = i\,(p, T) \tag{2}$$

otrzymać z równania (1) i związków między kalorycznymi i termicznymi parametrami stanu [10]:

$$\left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T = v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \tag{3}$$

$$ds = \frac{c_p}{T}\,dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp.$$

Należy dodać, że przyjęcie objętości właściwej jako zmiennej niezależnej (1) jest bardzo dogodne przy opracowywaniu równań, natomiast niewygodne dla obliczeń technicznych, ponieważ objętość właściwa nigdy nie jest wielkością daną.

Zależność (1) i (2) należy osobno opracować dla wody oraz pary przegrzanej. Dla określenia parametrów pary mokrej z zależności

$$f(x,p) = f'(p) + x\left[f''(p) - f'(p)\right] \tag{4}$$

musimy znać wartości objętości właściwej, entalpii i entropii na linii $x = 0$ oraz $x = 1$.

Wartości te można wyznaczyć z równań (1) i (2) odpowiednio dla wody i pary przegrzanej, musimy jednak najpierw określić równanie linii nasycenia w formie zależności temperatury nasycenia od ciśnienia

$$T_s = T_s(p). \tag{5}$$

Wstawiając zależność (5) do (2) otrzymujemy zależności entalpii i entropii od ciśnienia na linii granicznej x = 1

$$s'' = s''(p) = s\left[T_s(p),p\right]; \quad i'' = i''(p) = i\left[T_s(p),p\right]. \tag{6}$$

Niejednokrotnie w obliczeniach cieplnych turbin (gdy nie określamy parametrów wody zasilającej) zbyteczne okazuje się korzystanie z obszernych zależności (1) i (2) określających szczegółowo parametry wody. Potrzebne są tylko parametry na linii granicznej x = 0. W tym przypadku można korzystać z bardzo prostych zależności

$$v' = v'(p); \quad i' = i'(p); \quad s' = s'(p). \tag{7}$$

Zależności (1) i (2) dla pary przegrzanej oraz (5) i (7) stanowią podstawowy układ równań dla określenia parametrów czynnika roboczego turbiny. Równania te wprowadza się do maszyny w formie trzech podstawowych procedur (podprogramów Pp1 ÷ Pp3)[6]:

Pp1	a	$v = v\ (p,T)$
	b	$i = i\ (p,T)$
	c	$s = s\ (p,T)$

Pp2	$T_s = T_s\ (p)$

Pp3	a	$v' = v'(p)$
	b	$i' = i'(p)$
	c	$s' = s'(p)$

Wykorzystując procedurę Pp1 możemy wyznaczyć objętość właściwą, entalpię i entropię pary przed zaworami regulacyjnymi (punkt "D" na rys. 1). Dla określenia parametrów pary przed stopniem regulacyjnym (punkt 0) potrzebna jest zależność temperatury od ciśnienia i entalpii

$$T = T(p,i). \tag{8}$$

W większości przypadków do wyznaczenia temperatury wzgl. stopnia suchości pary przy żądanej wartości ciśnienia i entalpii nie układa się odrębnych równań, lecz wykorzystuje się drugą z zależności (2), którą rozwiązuje się metodą kolejnych przybliżeń. Ponieważ $i_d = i_0$ z równania (2) przy znanej wartości ciśnienia p_0 można wyznaczyć temperaturę T_0, a następnie z

Pp1a i Pp1c objętość właściwą i entropię pary. Dla określenia parametrów pary w punkcie "K_s" potrzebna jest zależność

$$T = T(p,s); \quad x = x(p,s). \tag{9}$$

Podobnie jak w przypadku poprzednim dla określenia temperatury względnie stopnia suchości pary rozwiązuje się pierwszą z zależności (2) metodą kolejnych przybliżeń. Dalsza analiza procesu ekspansji pary w turbinie wskazuje, że potrzebne są również zależności określają temperaturę i ciśnienie w zależności od entalpii i entropii, a także zależność odwrotna do Pp2. Sposób postępowania w tych przypadkach jest podobny do poprzednich. Szczegółowe algorytmy obliczeń poszczególnych iteracji metody kolejnych przybliżeń dla zależności (8), (9) i innych wprowadza się do maszyny w formie uzupełniających procedur (podprogramów Pp4 ÷ Pp7):

Pp4	$T,x = f(p,i)$
Pp5	$T,x = f(P,s)$
Pp6	$p = p(i,s); \quad T,x = f(i,s)$
Pp7	$p = f/T_s)$

Po określeniu parametrów pary we wszystkich punktach charakterystycznych za pomocą podanych procedur można bez trudu określić interesujące nas spadki entalpii.

W chwili obecnej istnieje szereg opracowań omawiających równania stanu (1) dla wody i pary wodnej. Zależności te można wykorzystać do obliczeń cieplnych turbin parowych na maszynach cyfrowych. Pewne szczegółowe wskazówki oraz źródła danych podano w punkcie 5 pracy.

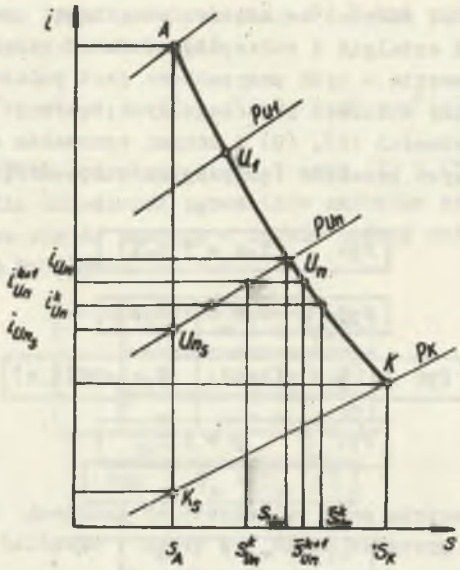
3. Określenie parametrów pary w upustach nieregulowanych

Na podstawie wstępnych obliczeń układu regeneracyjnego określa się przyrost temperatury wody zasilającej na poszczególnych podgrzewaczach, a następnie ciśnienia pary p_u w upustach nieregulowanych. Żeby określić pozostałe parametry pary w tych upustach należy znaleźć punkty przecięcia linii ekspansji pary z poszczególnymi izobarami p_u.

Rozpatrzmy część linii ekspansji pary zawartej między punktami A i K. Jako wielkości dane przyjmujemy parametry punktów A i K, ciśnienia w upustach $p_{u,1}, \ldots, p_{uN}$ oraz równanie linii ekspansji $s = f(i)$ Przez N oznaczono liczbę upustów regeneracyjnych.

Temperaturę T_{Un} entalpię i_{Un} oraz entropię s_{Un} pary w upuście (punkt U_n na rys. 2) obliczymy metodą kolejnych przybliżeń [6]. Parametry teoretyczne (punkt U_{ns}) obliczamy z Pp5 i Pp1. Jako pierwsze przybliżenie netalpii i_{Un} w upuście przyjmujemy

$$i^1_{Un} = i_{Un_s}. \tag{10}$$



Rys. 2. Określenie parametrów pary w upustach nieregulowanych

Kolejność obliczeń podaje schemat przedstawiony na rys. 3. Entalpii i^k_{Un} odpowiada na linii ekspansji pary $s = f(i)$ punkt O entalpii

$$\bar{s}^k_{Un} = f(i^k_{Un}). \tag{11}$$

Wartość ta różni się od wartości entropii pary w upuście s_{Un}.
K-te przybliżenie entropii s^k_{Un} obliczamy z wzoru

$$\bar{s}^k_{Un} = s_A + a\left[\bar{s}^k_{Un} - s_A\right], \tag{12}$$

gdzie: $0 < a < 1$.

Obliczonej wartości entropii odpowiada na izobarze P_{Un} punkt, którego entalpię przyjmujemy jako (k+1) przybliżenie entalpii i_{Un}.
Sposób obliczenia wartości i_{Un}^{k+1} zależny jest od tego czy punkt U_n znajduje się w obszarze pary przegrzanej, czy w obszarze pary mokrej. Należy więc porównać wartość K - tego przybliżenia entropii z entropią na linii nasycenia. Temperaturę nasycenia dla ciśnienia p_{Un} wyznaczamy z Pp2

$$T_{sU} = T_s(p_{Un}) \tag{13}$$

natomiast entropię na linii x = 1 z Pp1c

$$s''_{Un} = s(p_{Un}, T_{sU}). \tag{14}$$

A. Obszar pary przegrzanej $s_{Un}^{k} \geqslant s''_{Un}$.

Najpierw obliczamy (k+1) przybliżenie temperatury z Pp5

$$t_{Un}^{k+1} = t(p_{Un}, s_{Un}^{k}) \tag{15}$$

a następnie entalpię z Pp1b

$$t_{Un}^{k+1} = i(p_{Un}, t_{Un}^{k+1}). \tag{16}$$

B. Obszar pary mokrej $s_{Un}^{k} < s''_{Un}$.

Stopień suchości pary wyznaczamy z równania (4)

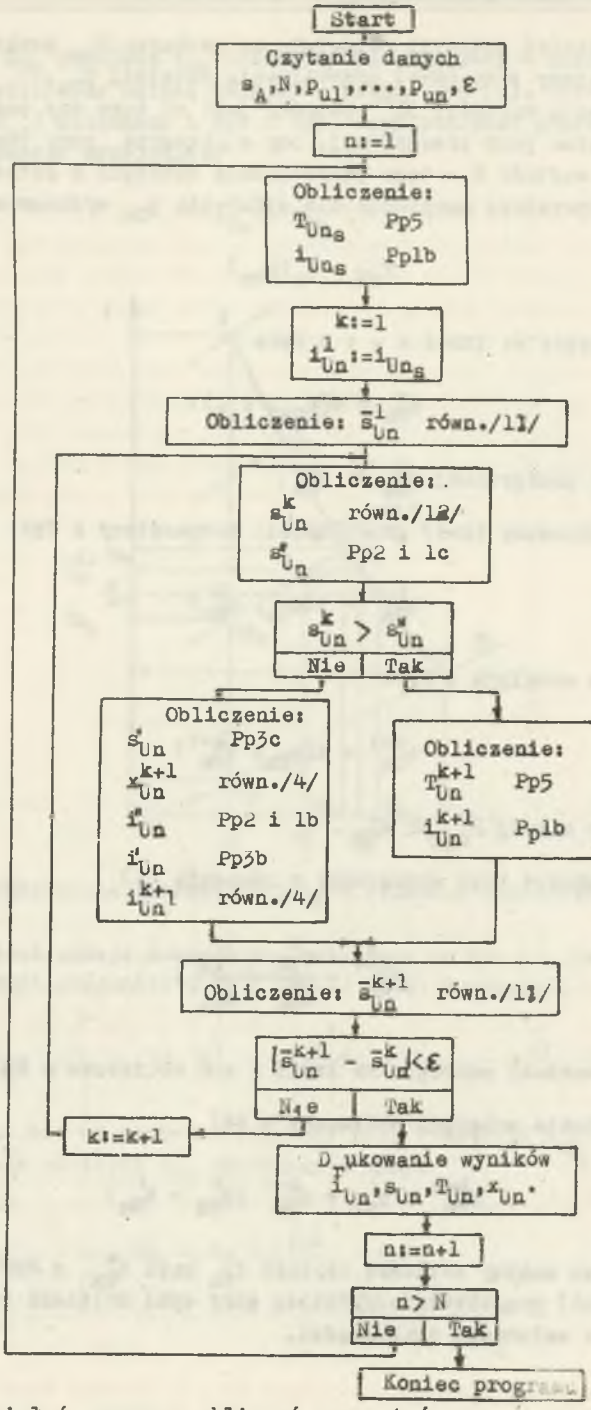
$$x_{Un}^{k+1} = \frac{s_{Un}^{k} - s'_{Un}}{s''_{Un} - s'_{Un}}, \tag{17}$$

gdzie: s'_{Un} - wartość entropii na linii x = 0 obliczona z Pp3c.

(k+1) przybliżenie entalpii obliczamy z (4)

$$i_{Un}^{k+1} = i'_{Un} + x_{Un}^{k+1} (i''_{Un} - i'_{Un}) \tag{18}$$

najpierw jednak musimy obliczyć wartość i'_{Un} oraz i''_{Un} z Pp3b i Pp1b. Po obliczeniu (k+1) przybliżenia entalpii pary cykl obliczeń powtarza się aż do osiągnięcia założonej dokładności.



Rys. 3. Sieć działań programu obliczeń parametrów pary w upustach nieregulowanych

4. Obliczenia szczegółowe wielostopniowej turbiny reakcyjnej

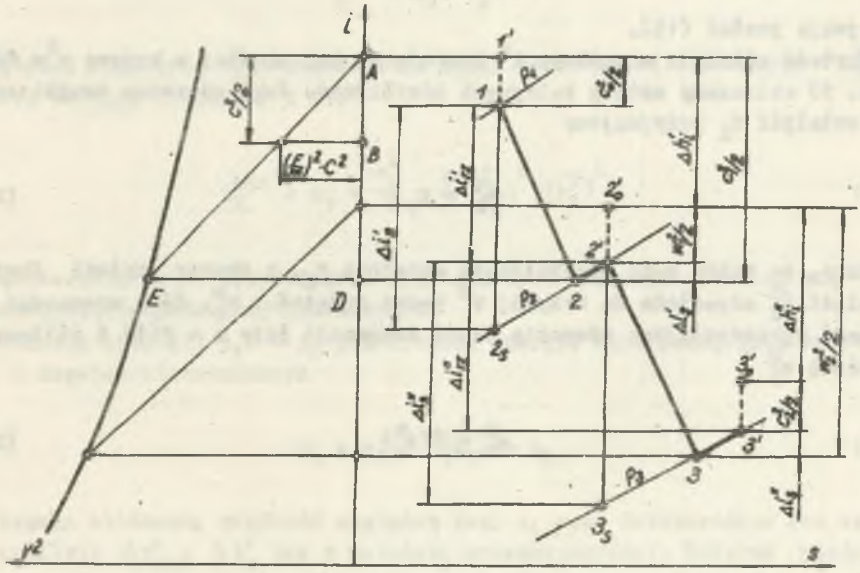
Zgodnie z ogólnymi zasadami, obliczenia cieplne turbin parowych na maszynach cyfrowych podzielone są na dwa etapy: wstępny i szczegółowy. Wszystkie podane dotychczas uwagi (punkty 2 i 3) odnosiły się do obliczeń wstępnych. W drugim etapie obliczeń przeprowadza się obliczenia szczegółowe stopni turbiny. Spadki entalpii na poszczególnych stopniach wielostopniowej turbiny reakcyjnej wyznacza się najczęściej metodą "v^2". Szczegółowy opis tej metody można znaleźć w [9]. Metoda ta pozwala na określenie przydatności danego z góry przyjętego układu łopatkowego do realizowania zadanego spadku entalpii.

Załóżmy więc, że znane są wymiary geometryczne stopni, natężenie przepływu pary $\dot{m}$, entalpia początkowa pary i_1 oraz prędkość pary c_0 na wlocie do łopatek kierowniczych. Rozpatrzmy przebieg rozprężenia w stopniu turbiny reakcyjnej (rys. 4a). Jak wiadomo, miejscem geometrycznym wszystkich stanów pary w przekroju końcowym kierownic jest linia Fanno

$$i_1 - i + \frac{c_0^2}{2} = \left(\frac{\dot{m}}{F_k}\right)^2 \cdot \frac{v^2}{2}, \tag{19}$$

gdzie:

F_k – przekrój przepływowy łopatek kierowniczych.



Rys. 4. Przebieg ekspansji pary w stopniu reakcyjnym

Parametry pary w przekroju wylotowym określa więc punkt przecięcia linii Fanno z linią ekspansji pary. Żeby jednak uniknąć wykreślenia linii Fanno dla każdego przekroju kierownicy i wirnika poszczególnych stopni wykorzystujemy własność, że w układzie i, v^2 linia Fanno jest linią prostą. Ponieważ znany jest wstępny przebieg linii ekspansji pary w turbinie można dla spadku wewnętrznego wykreślić krzywą $v^2 = \varphi(i)$ (rys. 4b). Znając trójkąt ABC oraz krzywą v^2 nie trudno skonstruować trójkąt podobny ADE, a tym samym wyznaczyć spadki i prędkości na danym stopniu.

Przedstawiona metoda jest więc metodą wykreślno-analityczną. Zastosowanie do obliczeń cieplnych wielostopniowych turbin reakcyjnych maszyn cyfrowych wymaga zmodyfikowania przedstawionej metody.

Kolejność obliczeń w tym przypadku jest następująca.

Wartość entalpii w punkcie 1'' (rys. 4 i 5) wynosi

$$i_{1''} = i_1 + \frac{c_0^2}{2}. \tag{20}$$

Równanie linii prostej (linii Fanno) przechodzącej przez 1'' i nachylonej do osi pod kątem

$$\alpha_k = \operatorname{arctg} 2 \left(\frac{F_k}{\dot{m}}\right)^2 \tag{21}$$

przyjmuje postać (19).

Wartość entalpii w punkcie 2'' przecięcia tej prostej z krzywą $v^2 = \varphi(i)$ (rys. 5) obliczamy metodą kolejnych przybliżeń. Jako pierwsze przybliżenie entalpii i_2 przyjmujemy

$$i_2^1 = i_1. \tag{22}$$

Załóżmy, że znamy k-te przybliżenie entalpii i_2, a chcemy znaleźć (k+1). Entalpii i_2^k odpowiada na krzywej v^2 punkt objętości v_2^k. Żeby wyznaczyć tą wartość wykorzystujemy równanie linii ekspansji pary $s = f(i)$ i obliczamy entropię s_2^k

$$s_2^k = f(i_2^k). \tag{23}$$

Z podprogramu Pp6 przy znanych wartościach s_2^k i i_2^k otrzymujemy wartość ciśnienia p_2^k, temperatury T_2^k względnie stopnia suchości pary x_2^k

$$p_2^k = p(i_2^k, s_2^k)$$

$$T_2^k = f(i_2^k, s_2^k) \quad \text{lub} \quad x_2^k = f(i_2^k, s_2^k). \tag{24}$$

Jeżeli szukany punkt znajduje się w obszarze pary mokrej, to objętość właściwą v_2^k obliczamy z (4)

$$v_2^k = v_2' + x_2^k (v_2'' - v_2'), \tag{25}$$

gdzie:

$$v_2' = v'(p_2^k); \quad v_2'' = v''(p_2^k).$$

Jeżeli szukany punkt znajduje się w obszarze pary przegrzanej, to objętość właściwą v_2^k obliczamy z Ppia

$$v_2^k = v(p_2^k, T_2^k). \tag{26}$$

Objętości właściwej v_2^k odpwowiada na linii Fanno punkt o entalpii i_2^{k+1}, której wartość obliczamy z (19)

$$i_2^{k+1} = i_1 + \frac{c_0^2}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{\dot{m}}{F_k}\right)^2 (v_2^k)^2. \tag{27}$$

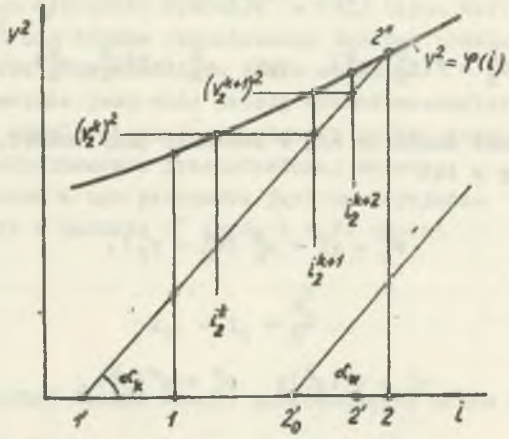
Po obliczeniu (k+1) przybliżenia entalpii cykl obliczeń powtarza się aż do osiągnięcia założonej dokładności.

Różnica entalpii $i_1' - i_2$ przedstawia energię kinetyczną przy wpływającej z łopatek kierowniczych

$$c_1 = 1{,}41 \sqrt{i_1' - i_2}. \tag{28}$$

Następnie obliczamy prędkość względną pary w_1 oraz interesujące nas spadki entalpii $\Delta i_{rz}'$, $\Delta i_s'$ jak w metodzie konwencjonalnej. Podobne obliczenia przeprowadzamy dla łopatki wirnikowej. Po wyznaczeniu spadków entalpii $\Delta i_{rz}''$, $\Delta i_s''$ obliczamy całkowity spadek entalpii w stopniu Δi_s, stopień reakcyjności ϱ oraz moc wewnętrzną stopnia L_i. Obliczenia te jak

również dalsze (obliczenie sprawności poszczególnych stopni, obliczenie mocy i sprawności całej turbiny) nie przedstawiają żadnych trudności dlatego też nie będziemy ich omawiać.



Rys. 5. Wyznaczenie entalpii pary w przekroju końcowym łopatek kierowniczych

Do wyznaczania spadków entalpii na poszczególnych stopniach turbiny reakcyjnej wykorzystuje się często uproszczoną metodę v^2, w której traktuje się łopatkę kierowniczą i wirnikową jako całość. Metodę tą można w analogiczny sposób modyfikować i przystosować do obliczeń na elektronowych maszynach cyfrowych.

5. Równania stanu (1) dogodne dla obliczeń cieplnych turbin

W literaturze technicznej można znaleźć szereg różnych równań stanu (1) dla wody i pary przegrzanej, przeznaczonych do obliczeń na maszynach cyfrowych [2, 3, 4, 11, 13]. Niektóre z nich [np. 3 i 13] zostały opracowane specjalnie do obliczeń cieplnych turbin, inne obejmują większy obszar wykresu i, s.

Jedno z pierwszych opracowań w tym zakresie stanowi praca Hotesa [2]. W charakterze przybliżonych funkcji przyjął Hotes wielomiany względem ciśnienia, których współczynniki zależą tylko od temperatury

$$y(p,T) = \sum_{i=0}^{n} A_i(T)p^i. \tag{29}$$

Równania dla pary przegrzanej można stosować w obszarze ograniczonym izotermą 700°C, izobarą 294 ata, izentropą 1,35 kcal/kg°C oraz linią nasyce-

nią. Równania dla wody można stosować w obszarze temperatur (0...250)°C i obszarze ciśnień (0...294) ata. Szczegółowe zależności (29) dla objętości właściwej entalpii, oraz entropii podano również w [8].

Wyżej wspomniane opracowanie podaje zależności wielkości termicznych od ciśnienia i temperatury pary. W równaniach opracowanych w Zakładach Skoda w Pilznie [3] jako zmienne niezależne przyjęto w obszarze pary przegrzanej ciśnienie i entalpię. Przyjęcie zależności f(p,i) w miejsce zależności f(p,T) skraca znacznie obliczenia, ponieważ przy wyznaczaniu linii ekspansji pary w turbinie nie interesuje nas bezpośrednio temperatura, lecz entalpia pary w poszczególnych punktach turbiny. Wszystkie równania są zapisane w formie bezwymiarowej. Podstawową formę równań przyjęto w postaci wielomianu

$$y = \left\{\left[(a_n x + a_{n-1})\, x + a_{n-2}\right] x + \ldots + a_1\right\} x + a_0, \qquad (30)$$

gdzie:

y – bezwymiarowa objętość właściwa, entalpia względnie entropia
x – bezwymiarowe ciśnienie względnie temperatura.

Cechą charakterystyczną tego układu równań jest to, że podano zależności entropii wody od ciśnienia i temperatury. Zależność taka w obszarze wody, jak już wspomniano nie jest konieczna. Izentropową pracę pompy wody zasilającej można obliczyć z wzoru

$$L = k(p_2 - p_1)\, v_1, \qquad (31)$$

gdzie:

p_1 – ciśnienie wody przed pompą
v_1 – objętość właściwa wody przed pompą
p_2 – ciśnienie wody za pompą
k – współczynnik korekcyjny.

$$k = k(p_1, t, p_2).$$

Równanie dla pary przegrzanej można stosować w zakresie temperatur (0... ...650)°C i zakresie ciśnień (0...350) bar. Równanie dla wody można stosować dla ciśnień do 400 bar.

Wielkości obliczone z wyżej wspomnianych równań zgadzają się praktycznie w całym obszarze z wielkościami obliczonymi z równań stanu Juzy [4] Równania Juzy mają postać zmodyfikowanego równania Van der Waalsa

$$\beta = \frac{R\,T_{01}}{p_{01}\,v_{01}}\,\frac{\theta}{\chi}\,\xi - \frac{\alpha}{\chi^2}, \tag{32}$$

gdzie:

$$\xi = f\left(\frac{1}{\chi}\right); \quad \beta = \frac{p}{p_k}; \quad \chi = \frac{v}{v_k}.$$

$$\alpha = \sum_{n=1}^{8} \left[f_n(\chi) f'_n(\theta)\right].$$

Osobliwością równania Juzy jest to, że ma ono jedną formę dla całego opisywanego obszaru parametrów termicznych wody i pary wodnej. Współczynniki występujące w równaniu przyjmują różne wartości dla następujących czterech zakresów gęstości

$$0 < \frac{1}{\chi} \leqslant 1{,}3631$$

$$1{,}3631 < \frac{1}{\chi} \leqslant 2{,}504$$

$$2{,}504 < \frac{1}{\chi} \leqslant 3{,}328$$

$$3{,}328 < \frac{1}{\chi} \leqslant 5{,}293.$$

Przyjęcie w całym obszarze jednego równania sprawia, że jest ono skomplikowane oraz zawiera dużo stałych współczynników. Wyżej przedstawione równanie daje bardzo dokładne wyniki, a w obszarze punktu krytycznego nie znajduje równego sobie.

Należy również wspomnieć o równaniach stanu opracowanych przez Wukałowicza [13]. Równanie dla pary przegrzanej podaje zależność stosunku ściśliwości od ciśnienia i temperatury lub objętości właściwej i temperatury pary

$$z = z(p,T)$$

lub (33)

$$z = z\,(V,T).$$

Zależność stosunku ściśliwości od ciśnienia i temperatury przedstawiono w formie wielomianu względem ciśnienia lub gęstości. Druga zależność jest mniej korzystna. Własności pary przegrzanej można opisać równaniem z trzema współczynnikami

$$z = \frac{p\,v}{R\,T} = 1 + B\,p + C\,p^2 + D\,p^3 \tag{34}$$

B, C, D - współczynniki równania zależne tylko od temperatury. Zależność współczynników od temperatury przedstawiono również w formie wielomianu

$$\begin{aligned} B &= (b_0 + b_1\tau + b_2\tau^2 + \ldots + b_5\tau^5)10^{-4} \\ C &= (c_0 + c_1\tau + c_2\tau^2 + \ldots + c_8\tau^8)10^{-6} \\ D &= (d_0 + d_1\tau + d_2\tau^2 + \ldots + d_8\tau^8(10^{-8}, \end{aligned} \tag{35}$$

gdzie:

$$\tau = 1000\ T^{-1}.$$

Wartości stałe w równaniach, jak również stopień wielomianu, zmieniają się w zależności od zakresu stosowania równania.

Zupełnie odmienną budowę od przedstawionych wzorów mają zależności opracowane przez E. Schmidta [11]. Formuły te podają zależność objętości właściwej, entalpii i netropii w zależności od ciśnienia i temperatury bezwzględnej odniesionych do ciśnienia i temperatury w punkcie krytycznym. W porównaniu do równań Hotesa równania Schmidta mają bardziej skomplikowaną postać.

Przedstawiony opis równań stanu wody i pary wodnej nie wyczerpuje oczywiście całości zagadnienia. Spośród różnych opracowań z tej dziedziny starano się wybrać te, które są szczególnie dogodne dla obliczeń cieplnych turbin parowych.

LITERATURA

[1] HOTES H.: Die Rurchrechnung des Wärmekreisprozesses von Dampfkraftwerken mit digitalen Rechenautomaten. AEG - Mitteilungen, 50,Nr 6-7,1960

[2] HOTES H.: Bestimung der Zustandsgrössen von Wasserdampf und Wasser auf digitalen Rechenautomaten. Allgemeine Wärmetechnik, 9, nr 11/12, 1960.

[3] JUZA J.: Uprawnieja dlja termodinamiczeskich swojstw wody i wodjanogo para, prednaznaczienny je dlja wyczislitielnych maszin. Tepłoenergetika nr 1, 1967.

[4] JUZA J.: An Equation of state for water and steam, steam tables in the critical region and in the range from 1000 to 100 000 bars.Praha 1966.

[5] KNIZIA K.: Die Ermittlung der optimalen Auslegungsgrössen des Dampfkraftprozesses mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen. Elektrizitätwirtschaft 59, 1960,

[6] KOSMAN G.: Algorytm obliczeń turbiny upustowo-kondensacyjnej za pomocą maszyny cyfrowej - magisterska praca dyplomowa wykonana w Katedrze CMW, G-ce, 1967.

[7] KUTARBA K.: Optymalizacja konstrukcji dwuwieńcowego koła Curtisa za pomocą maszyny cyfrowej. Zeszyty Naukowe Pol. Sl. "Energetyka" nr 21 1966.

[8] KUTARBA K.: Współczesne metody obliczeń cieplnych turbin parowych na elektronowych maszynach cyfrowych. Zagadnienia Maszyn Przepływowych 1967.

[9] KUTARBA K., GRELA St., PIENTKA J.: Turbiny parowe cz. I - skrypt,Gliwice, 1962;

[10] OCHEDUSZKO St.: Termodynamika stosowana, WNT Warszawa, 1964.

[11] SCHMIDT: Neue Zustandsgleichungen für Wasserdampf unter Berücksichtigung ihrer Verwendung in elektronische Rechenanlagen. BWK nr 6, 1962.

[12] SZCZEGLAJEW A.W.: Parowyje turbiny, Moskwa, 1967.

[13] WUKAŁOWICZ M.: Urawnienije sostojanija pieregrietogo wodjanogo para prigodnoje dlja rasczetow turbin s pomoszczju ECWM. Tepłoenergetika nr 5, 1967.

[14] ZIELENIN W.H.: Tiepłowoj rasczet turbiny na wyczislitielnoj masziniе Urał. Energomaszinostrojenije nr 2, 1963.

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ ПРОЕКТНЫХ РАСЧЕТОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Р е з ю м е

В работе рассмотрено задачу машинизации тепловых расчетов паровых турбин. Приведены результаты по составлению алгоритма и программы расчета тепловой схемы паротурбинной установки. Программа предусматривает расчет процесса расширения пара в турбине, давления пара в регенеративных теплообменниках а тоже расчет турбинных ступени. Кроме этого дается решение задачи об определении параметров воды и водяного пара. Применение вычислительных машин для тепловых расчетов турбин дает возможность повысить их качество и провести значительно больше вариантных расчетов для поиска оптимального решения.

SOME PROBLEMS OF MODERN METHOD OF THERMAL COMPUTATION THE STEAM TURBINES BY USE THE ELECTRONIC DIGITAL COMPUTERS

S u m m a r y

In this paper a method of thermal computation of the steam turbines is presented. Principles of thermal design of the steam turbines in connection with optimizing of the project are considered. The ways of initial estimation and exact calculation of the thermal system of steam turbine are described. The formulae of algorithmus of whole system and flow chart of the programme of computation of a single stage of turbine are presented. The problem of estimation of steam conditions by the digital computer is discussed. The formulae for polynomial interpolation of the steam conditions for substitution of the steam conditions tables are listed.