ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1966
Seria: ENERGETYKA z. 21 Nr kol. 156

KAZIMIERZ KUTARBA, JÓZEF ROZEWICZ
Katedra Cieplnych Maszyn Wirnikowych

OPTYMALIZACJA KONSTRUKCJI DWUWIEŃCOWEGO KOŁA CURTISA ZA POMOCĄ MASZYNY CYFROWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób automatyzacji obliczeń projektowych turbin parowych, na przykładzie stopnia dwuwieńcowego. Wskazano metodę optymalizacji konstrukcji oraz opisano program i przebieg obliczeń.

Wstęp

Stopnie Curtisa są często stosowane w turbinach parowych różnych typów. Możliwość ekonomicznego obniżenia ciśnienia i temperatury czynnika w jednym stopniu oraz utrzymania sprawności niemal na stałym poziomie przy zmiennym obciążeniu, spowodowały szerokie rozpowszechnienie konstrukcji. Stopnie te są stosowane w turbinach małej i średniej mocy, napędowych i okrętowych. Także w wielu nowoczesnych jednostkach energetycznych dużej mocy wykorzystane są stopnie Curtisa jako regulacyjne. Przykładem tego mogą być turbiny Westinghouse - 325 MW, LMZ - 150 MW i Siemens - 150 MW.

Ekonomiczność stopni Curtisa badana była do niedawna głównie drogą eksperymentalną na czynnych obiektach. Postęp badań teoretycznych dokonany w ostatnich latach umożliwił przeprowadzenie analizy porównawczej różnych parametrów konstrukcji[2] Prowadzi to do projektowania jednostek o sprawności optymalnej.

Stopień dwuwieńcowy posiada w porównaniu z jednowieńcowym bardziej złożony system palisad łopatkowych.

Układ konstrukcyjny determinuje:

a) rodzaj palisad,

b) charakterystyka geometryczna (pola, wysokości, kąty),

c) luzy osiowe i uszczelnienia.

Zasadniczymi czynnikami określającymi schemat geometryczny konstrukcji są:

a) stosunek ciśnień przed stopniem i za stopniem,

b) stosunek prędkości unoszenia i czynnika (u/c_1),

c) zakres zmienności obciążania stopnia,

d) stopień zasilania,

e) uszczelnienia,

f) warunki wytrzymałościowe łopatek (statyczne i dynamiczne),

g) technologiczność.

Głównym celem obliczeń konstrukcyjnych jest dobór takiego układu stopnia, by spełniał on zasadnicze wymagania warunków pracy całej trubiny, a równocześnie był optymalny. Przy najwyższej średniej ważonej sprawności osiąganej w założonych warunkach powinna być zapewniona niezawodność ruchowa. Ponadto powinny być spełnione wymogi unifikacji elementów.

Celem niniejszego opracowania jest wskazanie możliwości doboru zespołu parametrów dającego w efekcie konstrukcję o charakterystyce optymalnej.

1. Metoda obliczeń

Obliczenia cieplne i przypływowe stopnia turbiny są zagadnieniem bardzo złożonym. Wyznaczenie mocy rzeczywistych, strat energetycznych i ilościowych oraz prędkości przepływu - przy założonych warunkach wstępnych jest praktycznie niemożliwe w sposób ścisły. Obliczenia prowadzone są na podstawie pewnych uproszczonych metod, które zresztą dają zadowalające rezultaty [6, 7, 8, 9].

Jako podstawę oszacowania wskaźników ruchowych stopnia dla dobieranych parametrów założeniowych, można przyjąć dowolną sprawdzoną metodę obliczeń cieplnych i przepływowych stopnia turbiny. W rozpatrywanym przykładzie wykorzystaliśmy metodę opartą na zasadzie maksymalizacji sprawności obwodowej. Obliczenia składają się z dwóch części. W pierwszej przyjmuje się jako zasadnicze dane wejściowe: moc stopnia, parametry czynnika przed stopniem i za stopniem. Oblicza się natomiast jako wielkości zasadnicze sprawność oraz natężenie przepływu czynnika, a ponadto wyznacza się prędkości bezwzględne, względne i unoszenia (wartości bezwzględne i kąty pomiędzy wektorami prędkości).

W drugiej części przeprowadza się obliczenia charakterystyki geometrycznej stopnia (długość i przekrój dysz, wysokości łopatek, stopień zasilania itp) oraz obliczenia sprawdzające. Danymi wejściowymi dla drugiej części obliczeń są wyniki obliczeń dokonanych w części pierwszej. Ze względu na to, że w części pierwszej wyznaczane są zasadnicze parametry konstrukcyjne i ruchowe stopnia, zagadnienie doboru optymalnej konstrukcji dotyczy głównie tej części.

Problem optymalizacji polega na ustaleniu głównych wielkości charakteryzujących maszynę, tak żeby spełnione były warunki więzów i żeby pewna funkcja opisująca jakość maszyny osiągała wartość optymalną [5]. W przyjętej metodzie obliczeń kryterium zasadniczym jest osiągnięcie maksymalnej sprawności obwodowej. Sprowadza się to w tym przypadku do znalezienia maksimum funkcji

$$\eta_u = f(u/c_1) \tag{1}$$

Bardziej szczegółowa analiza wykazuje jednak, że funkcja η_u posiada maksimum słabo znaczone. W otoczeniu punktu, dla którego osiąga maksimum posiada wartości bardzo mało różniące się od wartości maksymalnej. Dlatego warunek ten nie może być przyjęty jako jedyne kryterium doboru optymalnej konstrukcji. Jako następne kryterium należy przyjąć maksimum sprawności wewnętrznej (η_{oi}) lub minimum natężenia przepływu czynnika (G). Aczkolwiek obydwie wielkości powinny osiągać ekstrema równocześnie praktycznie przy niemal stacjonarnej wielkości jednej z nich daje się zaobserwować ekstremum drugiej.

Uwzględniając przybliżony charakter wyznaczenia poszczególnych wielkości uważamy, że nie jest celowe przeprowadzenie w pełni automatycznego poszukiwania wartości optymalnej drogą rzekomej maksymalizacji lub minimalizacji jednej funkcji.

Dodatkowym czynnikiem utrudniającym ściśle matematyczne sformułowanie kryteriów optymalizacji są względy unifikacyjne. Należałoby określić pewne dodatkowe kryteria charakteryzujące pracę obiektu (ciągłość pracy, zmienność obciążeń) oraz charakter produkcji (powtarzalność, seryjność itp.). Ze względu na różnorodność kryteriów i często ich przeciwstawność, opracowanie uniwersalnego algorytmu byłoby bardzo pracochłonne, a realizacja algorytmu wymagałaby wykorzystania maszyny cyfrowej średniej wielkości. Wydaje się celowe, na obecnym etapie automatyzacji obliczeń projektowych, pozostawienie ostatecznego doboru zespołu parametrów konstrukcyjnych projektantowi, który dokona wyboru na podstawie przeglądu wyników obliczeń szeregu wariantów.

W omawianym opracowaniu uwzględniono wskazany charakter zagadnienia i zdecydowano przeprowadzić automatyczne obliczenia, dostarczające konstruktorowi zestaw wyników odpowiadających różnym założonym parametrom konstrukcji. Decyzję optymalizacji finalnej pozostawiono człowiekowi.

2. Program obliczeń

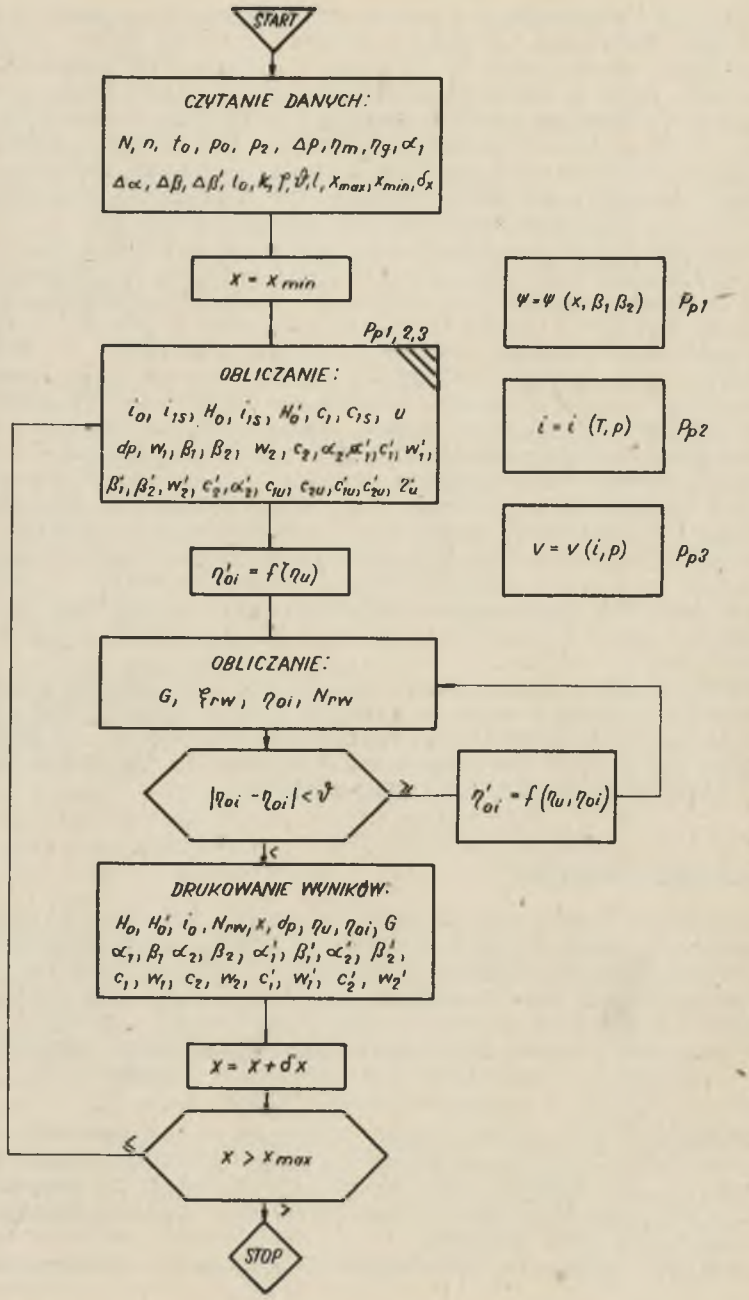
Dla każdej ze wskazanych powyżej dwóch części obliczeń opracowano osobne programy. W pierwszej części przeprowadzone są obliczenia wielowariantowe. W drugiej wyznaczone są wielkości uzupełniające i sprawdzające dla wybranego wariantu.

Sieć działań obliczeń wielowariantowych pokazano na rys. 1. Jako dane wejściowe wczytywane są: parametry czynnika na dolocie, moc, obroty, współczynniki strat i sprawności, a ponadto zakres i interwał zmienności $x = u/c_1$.

Niezbędne w toku obliczeń wielkości parametrów termodynamicznych czynnika wyznaczone są przy pomocy przybliżonych zależności funkcyjnych ujętych w podprogramy. Zależności te spełniają rolę przypadającą w obliczeniach konwencjonalnym tablicom lub wykresom pary wodnej.

Entalpię właściwą przegrzanej pary wodnej wyznaczono ze wzoru:

$$i = 2{,}722\left(\frac{T}{100}\right)^2 + 169{,}57\,\frac{T}{100} + 2018 - 555{,}2\,\frac{p}{(T/100)^3}\ \frac{kJ}{kg} \qquad (2)$$



Rys. 1. Sieć działań obliczeń zasadniczych parametrów konstrukcyjnych

gdzie:

T - temperatura, ^{o}K

p - ciśnienie bar.

Objętość właściwą określono wzorem:

$$v = \frac{0{,}00229\ i - 4{,}42}{p} \quad m^3/kg \tag{3}$$

Wzory powyższe wynikają z przekształconych równań termicznych Kocha i w zakresie pary przegrzanej dają dokładność odpowiadającą dokładności odczytu z wykresu (i,s). Błąd wartości uzyskanych z tych wzorów w zakresie ciśnień i temperatur występujących w omawianym przykładzie dochodzi do 1%, w porównaniu z wartościami odczytanymi z tablic parowych.

W przypadku pożądanej większej dokładności należy skorzystać ze wzorów Hotesa [3].

Izentropowy spadek entalpii na stopniu pomiędzy punktami 1 i 2 wyznaczono ze wzoru:

$$H = \frac{\varkappa}{\varkappa - 1}\, p_1\, v_1 \left[1 - (p_2/p_1)^{\frac{\varkappa - 1}{\varkappa}} \right] \tag{4}$$

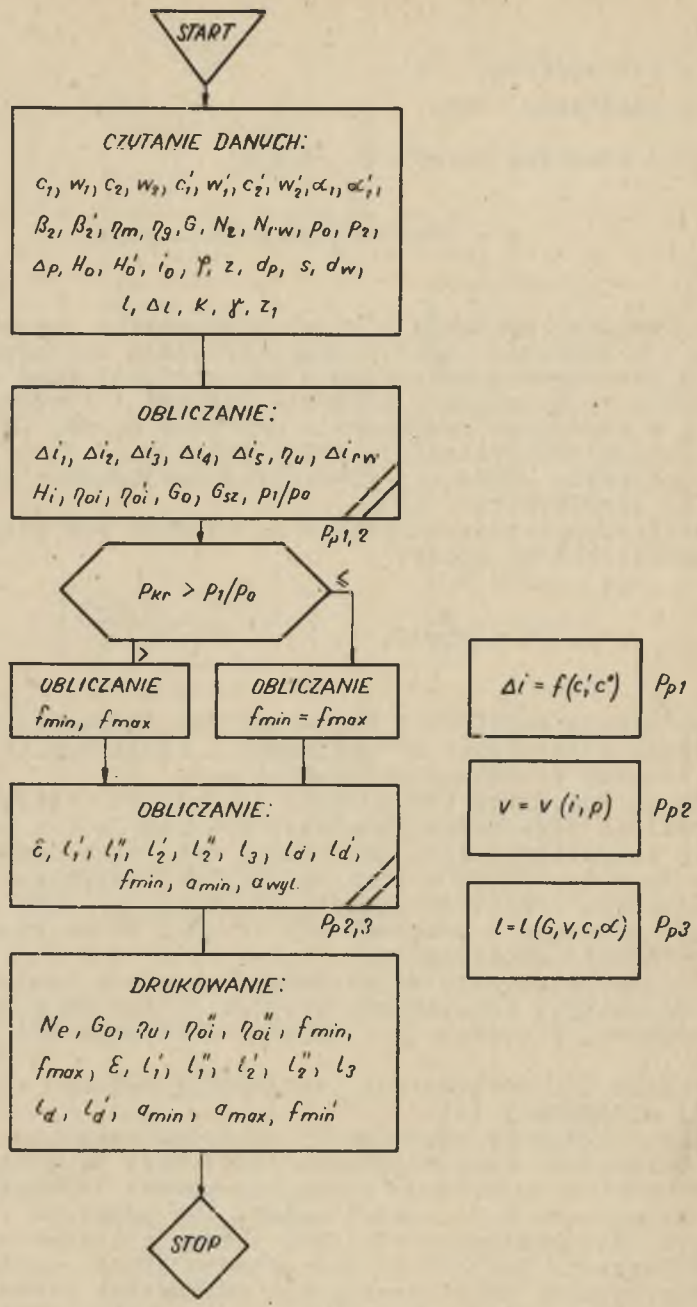
Empiryczne zależności współczynnika charakteryzującego straty tarcia w łopatkach od wysokości i krzywizny łopatek wydzielono również w osobnym podprogramie.

Sposób wstępnego oszacowania sprawności wewnętrznej w zależności od sprawności obwodowej zawarty jest w programie. Liczba charakteryzująca dokładność wstępnego oszacowania w porównaniu z uzyskanym w toku obliczeń wyczytywana jest w danych wejściowych. Jeżeli dokładność oszacowania jest zbyt mała następuje iteracja i powtórne obliczenia, aż do momentu uzyskania pożądanej dokładności.

Program przewiduje wydawnictwo wyników w postaci tabelarycznej. Na wstępie tabulagramu wyników podane są główne parametry założeniowe, a następnie wielkości obliczone dla każdej wartości x.

Program ten realizowany jest według metody syntezy iteracyjnej optymalnej [1].

Sieć działań drugiej części obliczeń pokazano na rys. 2. Jako zasadnicze dane wejściowe wczytywane są parametry czynnika na dolocie, wyznaczone uprzednio spadki entalpii, prędkości oraz wyznaczone w pierwszej części lub założone parametry wymiarowe. Wielokrotne powtarzane w toku obliczeń operacje ujęto w podprogramy. Dotyczy to wyznaczenia strat wewnętrznych, wysokości łopatek oraz termicznych parametrów stanu. Działania logiczne tej części ograniczają się do wyboru dysz o przekroju stałym lub rozszerzającym się w zależności od rodzaju przepływu (podkrytyczny lub ponadkrytyczny).



Rys. 2. Sieć działań obliczeń charakterystyki geometrycznej stopnia oraz obliczeń sprawdzających

Program drugiej części obliczeń oparty jest na metodzie syntezy bezpośredniej zwykłej i przeprowadza zasadniczo jednoprzejściowe rozwiązania przekształconych równań wykonawczych.

Programy zapisano przy pomocy sytemu automatycznego kodowania SAKO przystosowanego do elektronowej maszyny cyfrowej ZAM 2 [4].

3. Przebieg obliczeń

W celu wyznaczenia optymalnego zespołu cech konstrukcyjnych należy przeprowadzić obliczenia według pierwszego programu. Część danych wejściowych ma charakter ściśle określony dla projektowanego przeznaczenia konstrukcji. Są to wielkości: N, n, t_0, p_0, p_2, Δp, η_m, η_g. Wartości φ i l przyjmowane są szacunkowo i powinny być sprawdzone przed obliczeniami końcowymi. Wielkości kąta α_1 oraz różnice kątów $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\beta'$ ustala konstruktor warunkowo, a powtarzając obliczenia przez wczytywanie różnych wartości tych parametrów, może zbadać ich wpływ na analizowane cechy konstrukcji. Optymalizacja automatyczna zależy od wartości $x = u/c_1$. W danych wejściowych wczytuje się wartości x_{min}, x_{max} oraz δx określającą różnicę kolejno przyjmowanych wartości x. Obliczenia przeprowadza się kolejno dla:

$$x_1 = x_{min}, \quad x_2 = x_1 + \delta x, \quad x_3 = x_2 + \delta x, \; \ldots \; x_n = x_{max}$$

W celu skrócenia czasu obliczeń można przy pewnym przedziale $[x_{min}; x_{max}]$ przyjąć duże δx, a następnie badać w okolicy punktu ekstremalnego podprzedział $[x'_{min}, x'_{max}]$ przy zmniejszonym $\delta x'$(np. początkowo $[0,10; 0.30]$ przy $\delta x = 0,05$; a następnie $[0,20; 0,25]$ przy $\delta x' = 0,005$).
Analogicznie przyjmując liczbę ϑ charakteryzującą ewentualny błąd iteracji należy ją dostosować do pożądanej dokładności. W obliczeniach wstępnych można ograniczyć się dokładnością, np. 1%, a w końcowych zmiejszyć do 0,1%.

Czas obliczeń 1 wariantu, dla jednej wielkości x na maszynie ZAM 2 jest rzędu 60 sekund. Fragment wyników obliczeń przykładu według omawianego programu zestawiono w tablicy 1, przy czym podano 5 wariantów dla $x_1 = 0,210$, $x_2 = 0,215$ i $x_3 = 0,220$ $x_4 = 0,225$, $x_5 = 0,230$. Dla przyjętych w przykładzie wielkości $N_e = 1000$ kW, $n = 3000$ 1/min, $p_0 = 28,4$ bar, $t_0 = 400^oC$, $p_2 = 9,81$ bar, ekstremum sprawności η_u oraz natężenia przepływu G zachodzi przy $x = 0,220$.

Po ustaleniu optymalnych parametrów konstrukcyjnych należy przeprowadzić obliczenia uzupełniające według drugiego programu. Jako dane wejściowe wczytywane są wielkości założone bądź

Tablica 1

Wyniki obliczeń zasadniczych parametrów konstrukcyjnych

Lp.	Wielkość	Jednostki	I	II	III	IV	V
1	$x=u/c_1$	kJ/kg	0,210	0,215	0,220	0,225	0,230
2	H_o	kJ/kg	280,95	280,95	280,95	280,95	280,95
3	H'_o	kJ/kg	268,97	268,97	268,97	268,97	268,97
4	i_o	kJ/kg	3231,10	3231,10	3231,10	3231,10	3231,10
5	d_p	m	0,931	0,954	0,976	0,998	1,020
6	N_{rw}	kW	31,26	34,36	37,67	41,21	44,99
7	η_u	-	0,611	0,615	0,617	0,617	0,617
8	η_{oi}	-	0,590	0,593	0,592	0,590	0,588
9	G	kg/s	7,006	6,965	6,963	6,970	6,983
10	α_1	1°	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
11	β_1	1°	25,12	25,27	25,42	25,58	25,73
12	α_2	1°	31,74	32,35	32,98	33,63	34,31
13	β_2	1°	22,12	22,27	22,42	22,58	22,73
14	α'_1	1°	28,74	29,35	29,98	30,63	31,31
15	β'_1	1°	54,08	56,20	58,95	61,85	64,90
16	α'_2	1°	116,23	119,22	123,16	126,72	129,94
17	β'_2	1°	51,08	53,20	55,95	58,85	61,90
18	c_1	m/s	696,8	696,8	696,8	696,8	696,8
19	w_1	m/s	561,5	558,4	555,2	552,1	548,9
20	c_2	m/s	329,5	324,2	319,0	313,8	308,6
21	w_2	m/s	460,4	457,9	455,3	452,7	450,1
22	c'_1	m/s	276,8	275,6	271,2	266,7	262,3
23	w'_1	m/s	164,4	162,6	158,2	154,1	150,5
24	c'_2	m/s	125,5	131,3	137,8	144,8	152,4
25	w'_2	m/s	144,6	143,3	139,2	135,7	132,5

otrzymane w wyniku obliczeń pierwszej części. Ponadto przyjmuje się warunkowo uzupełniające parametry konstrukcyjne z, s, d_w, Δl, γ, z_1, które wpływają na wymiary szczegółów konstrukcji. Dla znalezienia parametrów o pożądanej charakterystyce (np. ze względów unifikacyjnych) należy przeprowadzić o-

bliczenia dla kilku różnych wartości przyjętych warunkowo parametrów. Czas obliczeń 1 wariantu na maszynie cyfrowej ZAM 2 wynosi około 40 sekund. Tabulogram wyników podaje rezultaty obliczeń sprawdzających mocy, natężenia przepływu czynnika i sprawności oraz wyliczone zasadnicze parametry wymiarowe konstrukcji. Tablica 2 przedstawia wyniki dla założeń odpowiadających wariantowi $x = 0,220$ pierwszej części obliczeń.

Tablica 2

Wyniki obliczeń charakterystyki geometrycznej stopnia oraz obliczeń sprawdzających

Lp.	Wielkość	Jednostka	III	Lp.	Wielkość	Jednostka	III
1	N_e	kW	1000	10	l'_1	mm	14
2	G_o	kg/s	7,00	11	l''_1	mm	17
3	η'_u	-	0,616	12	l'_2	mm	19
4	η'_{oi}	-	0,596	13	l''_2	mm	22
5	η''_{oi}	-	0,571	14	l'_3	mm	26
6	F_1	cm^2	21,21	15	l''_3	mm	12
7	F_2	cm^2	24,76	16	a_{min}	mm	8,84
8	ε	-	0,19678	17	a_{wyl}	mm	10,32
9	f_{min}	cm^2	1,060	18	l_d	mm	14,11

4. Uwagi końcowe

Przeprowadzone obliczenia próbne wykazały przydatność programu do obliczeń konstrukcyjnych turbin parowych. Dokładność uzyskiwanych rezultatów w ramach jednego wariantu odpowiada dokładności uzyskiwanej w obliczeniach prowadzonych bez użycia maszyny. Ze względu na empiryczny charakter wielu wykorzystywanych wzorów dążenie do osiągnięcia większej dokładności bezwzględnej w obliczeniach konkretnego wariantu nie jest celowe.

Dzięki wykorzystaniu maszyny cyfrowej uzyskano praktyczną możliwość wykonania obliczeń wielu wariantów. Pozwala to na zrezygnowanie z przybliżonych oszacowań i zastąpienie ich konkretnymi obliczeniami. Praktycznie w ciągu 3 do 4 godzin pracy maszyny i około 50 godzin pracy konstruktora można wykonać obliczenia, które przy metodach konwencjonalnych wymagałyby kilku tysięcy godzin pracy.

Opracowany program posiada charakter uniwerslany i może być wykorzystany zarówno przy projektowaniu turbin parowych napędowych małej mocy wyposażonych wyłącznie w koło Curtisa, jak również przy wykonywaniu projektów turbin wielostopniowych ze stopniem regulacyjnym Curtisa.

Zastosowanie elektronowych maszyn cyfrowych umożliwia wykonanie w sposób ekonomiczny projektu konstrukcji o optymalnej charakterystyce.

O Z N A C Z E N I A

a_{min}, a_{wyl} - szerokość dyszy minimalna i wylotowa;

c_1, c_2, c_1', c_2', c_{1s} - prędkość bezwzględna czynnika;

d_p, d_w - średnica podziałowa wirnika i zewnętrzna wału;

F_1, F_2 - powierzchnia przekroju dysz;

f_{min} - minimalny przekrój dyszy;

G, G_o - natężenie przepływu czynnika (z obliczeń wstępnych i sprawdzających)

H_o, H_o, H_i - izentropowy spadek entalpii, z uwzględnieniem straty dolotowej i rzeczywistej;

i_o, i_1, i_{1s} - entalpia właściwa;

l - średnia wysokość łopatek;

l_1', l_2'', l_2', l_2'' l_3', l_3'' - wysokości wylotowe i wlotowe trzech rzędów łopatek i długość dyszy;

N_e - moc efektywna

N_{rw} - strata mocy na skutek tarcia i wentylacji;

n - obroty;

p, p_o, p_2 - ciśnienie bezwzględne;

s - luz promieniowy;

T, t - temperatura bezwzględna i względna;

$x = u/c_1$ - stosunek prędkości unoszenia do bezwzględnej;

z - ilość labiryntów w uszczelnieniu;

z_1 ilość dysz na obwodzie;

α_1, α_2, α_1', α_2', β_1, β_2, β_1', β_2', - kąty wektorów prędkości bezwzględnych i względnych;

γ - kąt rozwarcia dyszy;

δx - interwał przyrostu x;

Δi_i - straty wewnętrzne stopnia;

Δ_p - straty ciśnienia na dolocie;

$\Delta_\alpha, \Delta_\beta$ - różnice kątów łopatek;

- stopień zasilania;

η_g, η_m, η_{oi}, η_u - sprawność generatora, mechaniczna, wewnętrzna, obwodowa;

ϑ - liczba oceny dokładności iteracji;

$\varkappa$ - wykładnik adiabaty,

ξ_{rw} - straty tarcia i wentylacji.

φ - współczynnik strat przepływu w dyszach;

ψ - współczynnik strat przepływu w palisadach łopatkowych;

LITERATURA

[1] Bąbiński C.: Inżynieria projektowania przemysłowego, cz. II WNT, 1965.

[2] Dejcz M.E.: Trojanowski B. M,: Issledowanija i rasczety stupieniej osiewych turbin, Maszinostrojenije 1964.

[3] Hotes H.: Bestimmung der Zustandsgrössen von Wasserdampf und Wasser auf digitalen Rechenautomaten, Algemeine Wärmetechnik t.IX, Nr 11/12, 1960.

[4] Łukaszewicz L., Mazurkiewicz A.: System automatycznego kodowania SAKO. Prace Zakł. Apar. Mat. PAN Nr C2, 1961.

[5] Oderfeld J.: Podstawy statystycznej syntezy maszyn - Referat IV Konf. Dynamiki Maszyn, 1965.

[6] Szczeglejew A.W.: Parowyje turbiny, GEI, 1955.

[7] P.N. Szlachin: Parowyje turbiny, GEI, 1960.

[8] Traupel W.: Thermische Turbomaschinen, t.I, Springer 1958.

[9] Zalf G.A. Zwiagincew W.W.: Tiepłowoj rasczet parowych turbin, Maszgiz, 1961.

Praca wpłynęła do Redakcji w dniu 3 lutego 1966 r.

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РАСЧЕТЫ
ДВУХВЕНЕЧНЫХ СТУПЕНЕЙ СКОРОСТИ ПАРОВЫХ ТУРБИН
НА ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Р е з ю м е

Рассмотрен метод автоматизации проектных расчетов паровых турбин, на примере двухвенечной ступени скорости. Метод основан на расчете ряда вариантов при различных отношениях u/c_1.

Главная цель вычислений - определение параметров соответствующих оптимальному коэффициенту полезного действия при предполагаемых эксплуатационных условиях.

Приводятся блок-схемы программ расчетов на электронных цифровых машинах и численные результаты примерных расчетов.

THE OPTIMAL DESIGN OF CURTIS STAGES OF STEAM TURBINES
BY USE OF THE DIGITAL COMPUTER

S u m m a r y

The way of automatic calculation of steam turbines is presented. As the example are taken the Curtis stages. The method is based on calculation series of version which depend on quantity of velocity ratio u/c_1. The principal aim of computation is to find the construction parameters at which the efficiency reaches optimal value.

The computer program is described. The results of computation of the Curtis stage are given as a numerical example.