

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

78

WARSZAWA-POZNAŃ 1980

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA—EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ROMUALD PUZYREWSKI
KAZIMIERZ STELLER (PRZEWODNICZĄCY · CHAIRMAN) · ROBERT SZEWAŁSKI
JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY—EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA—EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1980

Printed in Poland

ISBN 83-01-02543-3
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 330+90 egz. Ark. wyd. 8,75. Ark. druk. 7,125 Papier druk. sat. kl. V,
70 g. 70×100 cm. Oddano do składania 21 kwietnia 1980 r. Druk ukończono
w lipcu 1980 r. Zamówienie nr 231/9. T-10/317. Cena zł 30,—

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

ROMUALD PUZYREWSKI*

Gdańsk

Problemy optymalizacji aerodynamicznej stopnia turbiny

Optymalizacja aerodynamiczna stopnia turbiny jest problemem kompleksowym. W pracy wymieniono zasadnicze czynniki decydujące o sprawności stopnia. Przedstawiono metodę kojarzenia palisady kierowniczej z wirnikową dla zapewnienia maksymalnej sprawności stopnia.

1. Wstęp

Z problemami optymalizacji stopnia turbinowego zetknąłem się po raz pierwszy jako student Sekcji Turbin Parowych Okrętowych, Wydziału Budowy Okrętów, słuchając wykładów Profesora R. Szewalskiego z teorii projektowania turbin parowych. Były to lata 1955 - 1957. Od tego czasu, po 25-letnim okresie, nie uległa zmianie potrzeba poszukiwania optymalnych rozwiązań, których podstawowe idee były i są tak silnie akcentowane w pracach R. Szewalskiego [1]. W okresie tym weszły do powszechnej praktyki projektowania turbin maszyny cyfrowe, a ponadto rozwinęły się metody programowania nieliniowego. Elementy te pozwalają spojrzeć na problemy optymalizacji aerodynamicznej stopnia turbiny przez pryzmat stosunkowo efektywnych narzędzi uzyskiwania optymalnych rozwiązań, np. takich jak optymalne skojarzenie profilu kierowniczego z wirnikowym, zapewniające maksymalną możliwą do osiągnięcia sprawność stopnia.

2. Ogólna charakterystyka czynników decydujących o sprawności stopnia

Zadanie optymalizacji aerodynamicznej stopnia jest jedynie fragmentem problemu najefektywniejszej konwersji energii cieplnej w mechaniczną techniką turbinową. Relację pomiędzy mocą cieplną a uzyskiwaną na drodze techniki turbinowej mocą mechaniczną można zapisać w formie następującej proporcji:

$$l_t \sim \eta_0 \eta_i q_c \dot{m}, \quad (1)$$

gdzie q_c [kJ/kg] jest ilością energii doprowadzonej do jednego kilograma czynnika robo-

* Prof. nadzw. dr hab. inż., Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk.

czego, $\dot{m}$ [kg/J] – masowym natężeniem czynnika roboczego, η_0 – sprawnością obiegu, zaś η_i – sprawnością wewnętrzną turbiny.

Ta prosta proporcja zawiera w sobie zasadnicze elementy decydujące o efektywności konwencjonalnej metody konwersji energii cieplnej w mechaniczną.

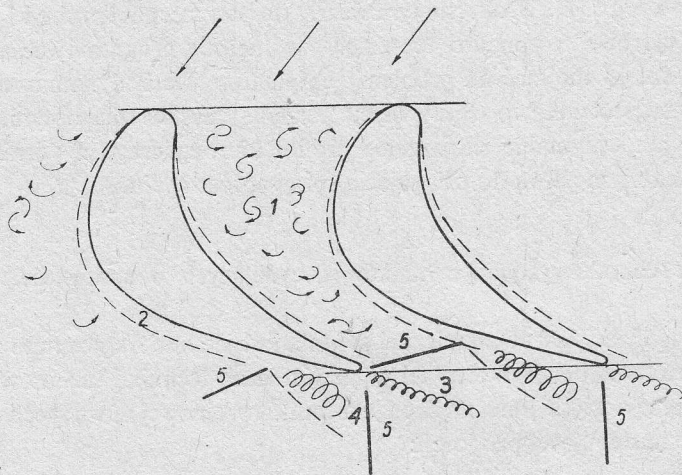
Istnieje stała tendencja do podwyższania wszystkich czterech czynników iloczynu w proporcji (1).

Podwyższenie sprawności wewnętrznej turbiny jest możliwe poprzez podwyższenie sprawności stopnia turbiny.

Można wyodrębnić trzy zasadnicze grupy czynników decydujących o sprawności aerodynamicznej stopnia. Pierwsza grupa to procesy dysypacji energii kinetycznej w przepływie. W płynach newtonowskich, a do nich można zaliczyć czynniki gazowe pracujące w turbinach, mamy liniową relację pomiędzy tensorem naprężeń a tensorem prędkości deformacji. Wówczas przypadająca na jednostkę objętości moc dysypacji energii kinetycznej określana jest następującym wyrażeniem

$$N_d = \mu \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 \right], \quad (2)$$

gdzie μ jest dynamicznym współczynnikiem lepkości, a u_x , u_y , u_z – składowymi wektora



Rys. 1. Charakterystyczne obszary dysypacji energii kinetycznej

prędkości. Jak widać z relacji (2), wszędzie tam, gdzie mamy nierównomierne pola prędkości ma miejsce proces zamiany energii kinetycznej w energię cieplną. W przepływie przez palisadę, możemy wyróżnić kilka obszarów charakteryzujących się mniej lub bardziej inten-

sywną dysypacją energii kinetycznej, jak na rysunku 1. Obszarami tymi są:

- 1) obszar turbulentnego przepływu wewnątrz kanału łopatkowego,
- 2) obszar warstw przyściennych,
- 3) obszar śladów aerodynamicznych,
- 4) obszar oderwań,
- 5) wąskie obszary o silnej zmianie prędkości jakimi są fale uderzeniowe.

Jak z tego widać, w całym przepływie zachodzi proces dysypacji energii kinetycznej. Natura jak gdyby chciała się bronić przed organizowaną przez człowieka zamianą energii cieplnej w mechaniczną, zamieniając na swój sposób energię mechaniczną w ciepłą w procesie dysypacji.

Ale procesy dysypacyjne stanowią tylko część strat określających sprawność stopnia turbinowego. Nawet gdybyśmy mieli czynnik roboczy idealny ($\mu=0$), to sprawność stopnia, w myśl używanych definicji, będzie mniejsza od jedności. Sprawność akcyjnego stopnia, przez który przepływa czynnik nielepki, wyraża się zależnością

$$\eta = 4 \left(\cos \alpha_1 - \frac{u}{c_1} \right) \frac{u}{c_1}, \quad (3)$$

gdzie u/c_1 jest stosunkiem prędkości obwodowej u palisady wirnikowej do prędkości czynnika c_1 na wylocie z palisady kierowniczej, wypływającego pod kątem α_1 w stosunku do kierunku obwodowego. Z relacji (3) wynika, że nawet przy założeniu braku jakichkolwiek procesów dysypacyjnych sprawność jest mniejsza od jedności, a jej wartość maksymalna wynosi

$$\eta_{\max} = \cos^2 \alpha_1 < 1. \quad (4)$$

Dzieje się tak dlatego, iż czynnik roboczy opuszcza stopień z pewną energią kinetyczną, która nie została zamieniona na pracę mechaniczną w stopniu. Tak więc, obok procesów dysypacyjnych w obrębie stopnia, o sprawności będzie decydował dobór zespołu parametrów stopnia, takich jak w najprostszym przypadku u/c_1 i α_1 . Intensywność procesów dysypacyjnych i zespół parametrów stopnia są od siebie zależne. Jest to podstawowa zależność, niejako strukturalna, dla problemu aerodynamicznej optymalizacji stopnia. Zwracał uwagę na tę zależność profesor R. Szewalski pisząc relacje funkcyjne typu

$$\eta = f \left(\alpha_1, \frac{u}{c_1}, \psi, \varphi \right) \quad (5)$$

i

$$\psi = \psi(\beta_1, \beta_2, \bar{l}), \quad \varphi = \varphi(\bar{l}, \alpha_1), \quad (6)$$

gdzie ψ i φ to współczynniki prędkości, β_1, β_2 kąty wlotowy i wylotowy strumienia na palisadę wirnikową, $\bar{l}$ — odniesiona długość łopatki.

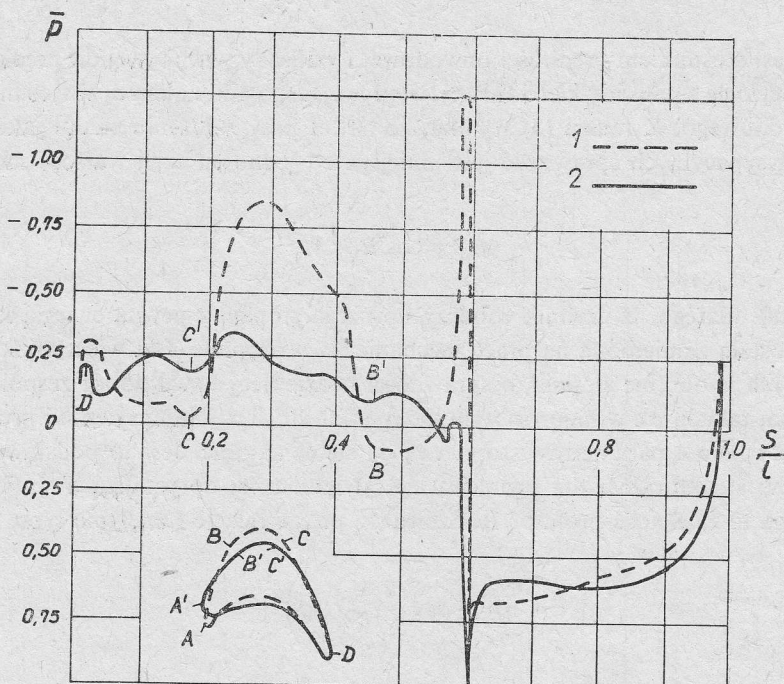
Jest trzeci czynnik decydujący o sprawności stopnia. Ma on charakter konstrukcyjno-technologiczny. Chodzi tu o ilość i jakość uszczelnień w obrębie stopnia, staranność wykonania powierzchni, wreszcie przestrzenne ukształtowanie łopatki (zwinięcie).

Powierzchnie opływowe winny być aerodynamicznie gładkie, tzn. wymiar liniowy nierówności winien być mniejszy od laminarnej podwarstwy co najmniej czterokrotnie. Uszczelnienia w obrębie stopnia zmniejszają straty nieszczelności. Wadliwa technologia uszczelnień powodująca zwiększenie przecieków może doprowadzić do zniweczenia zabiegów aerodynamicznych zmniejszających straty dysypacji energii.

Optymalizacja aerodynamiczna stopnia turbiny winna uwzględniać zespół czynników wymienionych w trzech grupach.

3. Minimalizacja procesów dysypacji energii

Zmniejszenie strat spowodowanych procesami dysypacji energii w wartwach przyściennych uzyskuje się metodami w dużym stopniu racjonalizowanymi. Jeżeli profil łopatkki ukształtuje się tak, ażeby prędkość wzdłuż profilu na zewnętrznej granicy warstwy przyściennej nie będzie malała (brak przepływów lokalnie dyfuzorowych), jak to pokazano na rysunku 2 według [2], to można zmniejszyć straty w palisadzie kierowniczej z 0,05

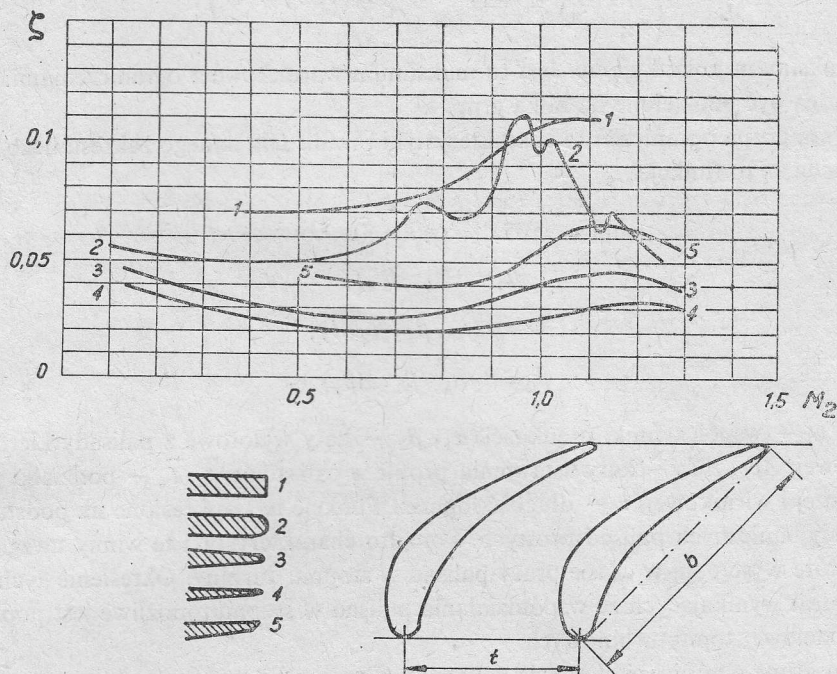


Rys. 2. Rozkłady prędkości na profilach według [2]

1 — profil aerodynamicznie korzystny, 2 — profil aerodynamicznie niekorzystny

do $0,03 \div 0,02$, a w palisadzie wirnikowej z $0,08 \div 0,1$ do $0,05 \div 0,03$. W poprawieniu własności przepływowych palisad kierowniczych i wirnikowych istotną rolę odegrała teoria płaskich przepływów potencjalnych i badania w tunelach aerodynamicz-

nych. Można dziś stwierdzić, iż wypracowano profile o zminimalizowanych stratach w warstwach przyściennych. Znacznie mniej racjonalizowana jest metoda kształtowania krawędzi spływowych, zwłaszcza dla przepływów naddźwiękowych. O możliwości zreduko-



Rys. 3. Wpływ kształtu krawędzi na sprawność palisady

wania strat związanych z kształtowaniem krawędzi spływu może świadczyć wykres na rysunku 3 według [2]. Przepływy naddźwiękowe, zwłaszcza przy występujących w nich falach uderzeniowych, stanowią wciąż przedmiot badań aerodynamicznych.

4. Problem optymalnego kojarzenia profili

Jeżeli mamy do dyspozycji profil kierowniczy i wirnikowy o zminimalizowanych stratach, to pozostaje problem takiego skojarzenia profili, aby uzyskać maksymalną sprawność stopnia. Należy dokonać takiego wyboru parametrów stopnia, aby z jednej strony najlepiej wykorzystać własności aerodynamiczne palisad, z drugiej zaś zapewnić warunki określone konstrukcją całej turbiny.

Rozwinięty wzór na sprawność obwodową stopnia turbiny ma następującą postać [3]:

$$\eta = 2 \frac{u}{c_{0t}} \left[\varphi \sqrt{1-r} \cos \alpha_1 + \psi \cos \beta_2 \times \right. \\ \left. \times \sqrt{r + \left(\frac{u}{c_{0t}} \right)^2 + \varphi^2 (1-r) - 2 \varphi \frac{u}{c_{0t}} \cos \alpha_1 \sqrt{1-r} - \frac{u}{c_{0t}}} \right] \times \left(1 - \frac{\mu \delta (D+l) \sqrt{r}}{l D \sin \alpha} \right). \quad (7)$$

Wzór ten uwzględnia straty łopatkowe, stratę wylotową oraz straty od przecieków. Jest to nieliniowa funkcja wielu zmiennych

$$\eta = f\left(\alpha_1, \beta_2, \frac{u}{c_{0t}}, r, D, l, \delta, \varphi, \psi\right), \quad (8)$$

której maksimum poszukujemy. Jest to maksimum warunkowe z ograniczeniami. Ograniczenia mogą być podzielone na kilka grup.

Pierwsza grupa ograniczeń to charakterystyki profili. Dla danego zakresu liczb Reynolda i Macha są to funkcje

$$\varphi = \varphi(\bar{t}_k, \Delta\beta_k, \alpha_1, \bar{l}), \quad (9)$$

$$\alpha_1 = \alpha(\bar{t}_k, \Delta\beta_k), \quad (10)$$

$$\psi = \psi(\bar{t}_w, \beta_1, \beta_2, \bar{l}), \quad (11)$$

$$\beta_2 = \beta_2(\bar{t}_w, \beta_1, \Delta\beta_w), \quad (12)$$

gdzie φ i ψ – współczynniki prędkości, α_1, β_2 – kąty wylotowe z palisady kierowniczej i wirnikowej, $\Delta\beta_k, \Delta\beta_w$ – kąty ustawienia profili w palisadzie, $\bar{t}_k, \bar{t}_w$ – podziałki palisady kierowniczej i wirnikowej, $\bar{l}$ – długość łopatki. Funkcje te są określone na podstawie badań aerodynamicznych palisad prostych. Ponadto charakterystyki te winny uwzględnić te efekty, które występują w czasie pracy palisad w stopniu turbiny. Określenie tych dodatkowych strat wynikających ze współdziałania palisad w stopniu, możliwe jest poprzez badania modelowe stopni turbinowych.

Drugą grupę ograniczeń stanowią zakresy ważności charakterystyk

$$\Delta\beta_k \in (\Delta\beta_{k \min}, \Delta\beta_{k \max}), \quad (13)$$

$$\Delta\beta_w \in (\Delta\beta_{w \min}, \Delta\beta_{w \max}), \quad (14)$$

$$\bar{t}_k \in (\bar{t}_{k \min}, \bar{t}_{k \max}), \quad (15)$$

$$\bar{t}_w \in (\bar{t}_{w \min}, \bar{t}_{w \max}), \quad (16)$$

$$\beta_1 \in (\beta_{1 \min}, \beta_{1 \max}). \quad (17)$$

Trzecia grupa ograniczeń to równania zachowania masy

$$\pi D l \rho_1 \mu_k c_{1t} \sin \alpha_1 = m, \quad (18)$$

$$\pi D (l + \Delta l) \rho_1 w_1 \sin \beta_1 = m - \Delta m, \quad (19)$$

$$\pi D (l + \Delta l) \rho_2 w_2 \sin \beta_2 = m - \Delta m, \quad (20)$$

$$\Delta m = \frac{\mu \delta}{l \sin \alpha_1} \left(\frac{D + l}{D} \right) \sqrt{r m}. \quad (21)$$

Do czwartej grupy ograniczeń można zaliczyć zależności wynikające z trójkątów prędkości

$$c_{1t} = \sqrt{2(1-r)h_{st}} = \sqrt{1-r} c_{0t}, \quad (22)$$

$$w_1 = \frac{c_{0r}}{\cos \beta_1} \left(\varphi \sqrt{1-r} \cos \alpha_1 - \frac{u}{c_{0r}} \right), \quad (23)$$

$$w_2 = \psi c_{0r} \sqrt{r + \frac{1}{\cos^2 \beta_1} \left(\varphi \sqrt{1-r} \cos \alpha_1 - \frac{u}{c_{0r}} \right)^2}, \quad (24)$$

$$u = \frac{\pi D n}{60}. \quad (25)$$

Dla tak sformułowanego zadania można zastosować podstawowe twierdzenie Kuhna-Tuckera programowania nieliniowego. W przestrzeni parametrów określających ustawienie profili w palisadzie oraz parametrów stopnia

$$x(\varphi, \psi, \alpha_1, \beta_1, \beta_2, r, l, \bar{t}_k, \bar{t}_w, \dots) = x(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_k) \quad (26)$$

warunkiem koniecznym na to, aby punkt dopuszczalny x był rozwiązaniem zadania

$$\eta = \max \eta(x), \quad (27)$$

jest spełnienie ograniczeń (9) – (25) zapisanych w formie

$$\left. \begin{array}{l} g_1(x) = 0 \\ g_2(x) = 0 \\ \vdots \\ g_n(x) = 0 \end{array} \right\} \quad n \text{ równań} \quad (28)$$

oraz istnienie λ_i takich, że

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \eta}{\partial x_1} - \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial x_2} - \sum_{i=1}^1 \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial x_2} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial \eta}{\partial x_k} - \sum_{i=1}^1 \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial x_k} = 0 \end{array} \right\} \quad k \text{ równań}. \quad (29)$$

W ten sposób zadanie sprowadza się do rozwiązania nieliniowego układu równań $n+k$ z niewiadomymi

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \quad \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n.$$

Dostateczność tak określonego punktu x należy badać poprzez zachowanie się funkcji η w okolicy tego punktu. Werbalny warunek maksymalizacji sprawności z uwzględnieniem ograniczeń sprowadza się do rozwiązania układu równań. Z dokładnością do charakterystyk palisad i poprawek ze względu na pracę ich w stopniu, uzyskano przykładowe rozwiązanie tak postawionego zadania w [3, 4].

Jak już wspomniano, problem optymalizacji sprawności stopnia nie kończy się na poprawnym skojarzeniu dobrych aerodynamicznie profili. O ostatecznym efekcie sprawnościowym będzie również decydowała kultura technologii i montażu turbiny.

Literatura

- [1] R. Szewalski, *Aktualne problemy rozwoju techniki energetycznej*. Ossolineum, 1978.
- [2] M. J. Żukowski, *Rasczet obtekanija rieszetok profilej turbomaszin*. Moskwa-Leningrad, Maszgiz, 1960.
- [3] R. Puzyrewski, L. Bogdali, *Optymalizacja sprawności obwodowej stopnia turbiny osiowej metodą programowania nieliniowego*. Oprac. wewn. IMP-PAN nr 95/78, Gdańsk 1978.
- [4] R. Puzyrewski, L. Bogdali, *Peripheral Efficiency Optimization of Axial Turbine Stage by Means of Nonlinear Programming*. Archiwum Budowy Maszyn nr 5, 1980.