

Konrad Świrski, Janusz Lewandowski, Andrzej Miller

Instytut Techniki Ciepłej

Politechnika Warszawska

KONCEPCJA JEDNOWYMIAROWEGO MODELU DO BADANIA WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH TURBINY GAZOWEJ

Streszczenie. Przedstawiono koncepcję zastosowania ciągłego, jednowymiarowego modelu akumulacji czynnika w układzie przepływowym turbiny gazowej. Stopień turbiny (sprężarki) sprowadzono do postaci jednowymiarowego kanału o zmiennej długości i przekroju.

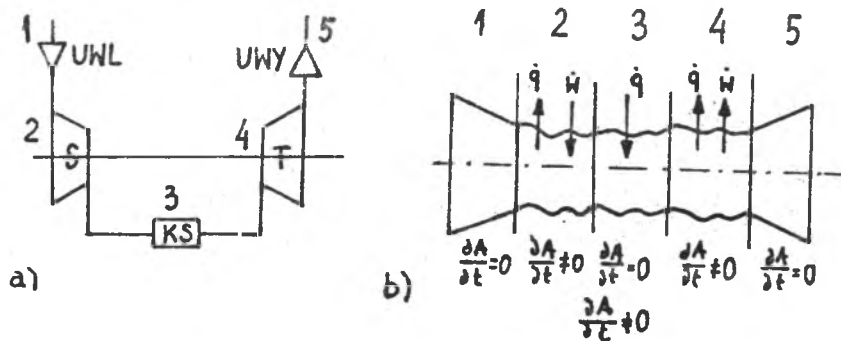
Резюме. Представлена концепция непрерывной, одномерной модели процесса аккумуляции рабочего вещества в проточной части газовой турбины. Турбинная (компрессорная) ступень сводена к виду канала со сменной длиной и сечением.

Summary. The paper presents the idea of one-dimensional continuous model of the accumulation process of working medium in the flow system of a gas turbine. The turbine (compressor) stage is modelled as one-dimensional channel with variable length and cross-section area.

1. WSTĘP

Zagadnienie pracy turbin w warunkach nieustalonych (rozruch, wyłączenie, zrzut obciążenia, sytuacje awaryjne) jest podstawowym problemem wyznaczającym ramy bezpiecznej pracy tego urządzenia. W związku ze skomplikowaniem budowy i złożonością geometrii układu, w którym przepływa czynnik roboczy oraz różnorodnością procesów fizycznych, dotychczasowe modele zakładały dyskretyzację układu [1]. Turbinę dzielono na podstawowe podukłady jak: układ wlotowy i wylotowy, sprężarka, komora spalania i turbina adaptując punktowe modele tych urządzeń. Ewentualnie układ przepływowy turbiny gazowej dzielono na szereg następujących po sobie części rozdzielonych stopniami turbiny (sprężarki) lub zaworami

przypisując akumulację czynnika do każdej z tych przestrzeni. Sprowadzało to model matematyczny do postaci o stałych skupionych (szerzej przedstawione w [1]). W prezentowanym poniżej modelu zaproponowano traktowanie zjawiska akumulacji czynnika w układzie przepływowym w sposób ciągły, stosując równania zachowania (ciągłości pędu i energii) związane z uśrednionym torem ruchu płynu, co pozwala sprowadzić zagadnienie do postaci jednowymiarowego przepływu w kanale o zmiennym przekroju i długości. Pominięcie odpowiednich członów w równaniach modelu pozwala uzyskać związki opisujące poszczególne zespoły turbiny gazowej i podzespoły modelu. Na rys. 1. przedstawiono schemat strukturalny układu turbiny gazowej (a) i odpowiadający mu schemat zastępczy w proponowanym modelu jednowymiarowym (b). Turbina gazowa zawiera podukłady: układ wlotowy-UWL, sprężarka-S, komora spalania-KS, turbina-T i układ wylotowy-UWY. W odcinkach modelowego kanału odpowiadającym podukładom zaznaczono procesy wymiany ciepła- q i pracy- w , w odcinkach zastępujących sprężarkę i turbinę przekrój i długość kanału są zmienne.



Rys. 1. Schemat strukturalny turbiny gazowej (a) i odpowiadający schemat zastępczy modelu jednowymiarowego (b)

Fig. 1. Structural scheme of gas turbine unit (a) and corresponding one-dimensional flow path model (b)

2. MODEL MATEMATYCZNY

W jednowymiarowym modelu współrzędną wiodącą związano z torem ruchu płynu. Wyprowadzając prawa zachowania masy, pędu i energii dla przepływu nieustalonego z wymianą ciepła gazu lepkiego i ściśliwego o zmiennym przekroju $A(l)$ w kierunku ruchu otrzymujemy równania:

- ciągłości

$$\frac{\delta(\rho A)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho c A)}{\delta l} = 0 \quad (1.1)$$

- pedu

$$\frac{\delta(\rho c A)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho c c A)}{\delta l} = \rho f_u A + \frac{\delta p}{\delta l} A + p_T C \quad (1.2)$$

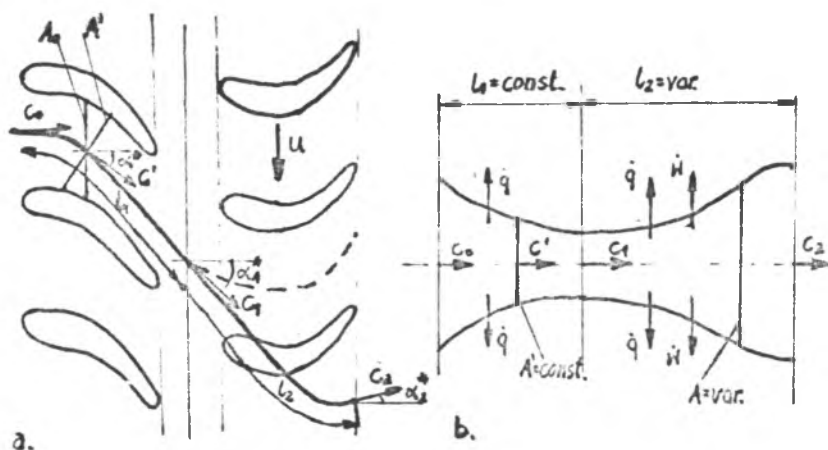
- energii

$$\frac{\delta}{\delta t} \left(\rho \left(e + \frac{c^2}{2} \right) A \right) + \frac{\delta}{\delta l} \left(\rho c \left(e + \frac{c^2}{2} \right) A \right) = \rho c f_u A + \frac{\delta}{\delta l} (p c A) + j_u C \quad (1.3)$$

gdzie: c - prędkość bezwzględna czynnika,
 ρ - gęstość,
 p - ciśnienie,
 e - energia wewnętrzna,
 A - powierzchnia przepływu,
 f - jednostkowe siły masowe,
 j - energia doprowadzona do przepływu,
 p_T - człon lepkościowy,
 C - obwód kanału.

Uzupełniając układ równań o równanie stanu $p = f(T, \rho)$ i zależność na energię wewnętrzną czynnika otrzymujemy matematyczny opis przepływu. Modelowanie w powyższy sposób układów wlotowych i wylotowych nie nastęrcza większych trudności. Są to kanały o zmiennym przekroju będącym funkcją zmiennej bieżącej wyznaczanych na podstawie danych geometrycznych turbiny. Pomijalne są siły masowe i wymiana ciepła na tym odcinku kanału. Zjawiska zachodzące w komorze spalania traktowane są jako dostarczanie ciepła na odcinku kanału odpowiadającym długości komory. Zastosowanie powyższych równań dla tych elementów układu prezentowane było w wielu pracach [2]. W odróżnieniu - przepływ w turbinie (sprężarce) jest zjawiskiem zachodzącym w skomplikowanej trójwymiarowej geometrii z dominującymi procesami wymiany pracy i wymianą ciepła. Na rys.2 przedstawiono przepływ przez wieniec kierowniczy i wirnikowy turbiny (rozwiniecie przekroju na promieniu średnim na płaszczyźnie) z zaznaczonym uśrednionym torem ruchu płynu (w wieńcu wirnikowym jest on zależny od prędkości przepływu, geometrii kanału i prędkości obwodowej turbiny).

Sumaryczny przekrój osiowy przestrzeni międzyłopatkowej turbiny (sprężarki) jest uśredniany na średnim promieniu. Zakłada się, że przekrój



Rys.2. Przepływ przez wieniec kierowniczy i wirnikowy turbiny (a) i przepływ w modelowym kanale (b)

Fig.2. Flow through stator and rotor blade row of a turbine (a) and one-dimensional modelled channel (b)

modelowego kanału jest funkcją przekroju w kierunku osiowym i kąta odchylenia wektora prędkości bezwzględnej od kierunku osiowego α^* (rys.2). Tor ruchu płynu w kanale międzyłopatkowym i kąt odchylenia α^* w warunkach nieustalonych jest zmienny co implikuje zmienność przekroju i długości kanału przy zachowaniu stałej objętości. W celu uwzględnienia pracy odebranej (turbina) z układu i sił działających na czynnik w zaproponowanym modelu przyjęto założenie o wprowadzeniu na odcinku modelowanego kanału fikcyjnych sił masowych skierowanych przeciwnie (turbina) do ruchu elementu płynu. Przepływający czynnik oddaje pracę wskutek działania tych sił równą pracy stopnia turbinowego (wyliczoną na podstawie danych klasycznych). Powoduje to wprowadzenie odpowiednich członów w równaniach pędu i energii. Analogiczne postępowanie przeprowadzane jest dla sprężarki. Powyższe równania wraz z przyjętymi założeniami oraz zestaw odpowiednio dobranych warunków brzegowych pozwala na utworzenie aparatu matematycznego do badania zjawisk nieustalonych w turbinach gazowych.

2. ROZWIĄZANIE NUMERYCZNE

Model matematyczny ma postać układu równań różniczkowych cząstkowych. W rozwiązaniu numerycznym proponowane jest użycie metody różnic skończonych

z jawnym dwukrokowym schematem Laxa-Vendorffa [3] o zmiennym kroku w kierunku liniowym w którym dla równania w postaci:

$$\frac{\delta F}{\delta t} + \frac{\delta G}{\delta x} = H \quad (2.1)$$

przy zastosowaniu siatki różnicowej:

$$\begin{aligned} t_{n+1} &= t_n + \Delta t & n &= 0, 1, \dots, N \\ x_{j+1} &= x_j + \Delta x_j & j &= 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (2.2)$$

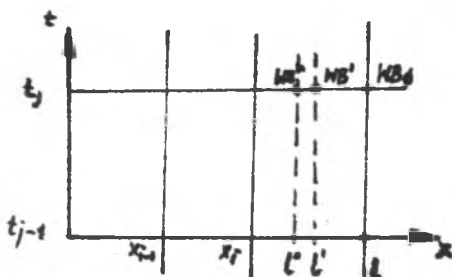
pierwszy krok ma postać

$$F_{j+1/2}^{n+1/2} = \frac{1}{2} ((F_{j+1}^n + F_{j-1}^n) - (G_{j+1}^n - G_j^n) \frac{\Delta t}{\Delta x_j} + \frac{1}{2} \Delta t (H_{j+1}^n + H_{j-1}^n)) \quad (2.3)$$

drugi krok

$$F_j^{n+1} = F_j^n - (G_{j+1/2}^{n+1/2} - G_{j-1/2}^{n+1/2}) \frac{\Delta t}{\Delta x_j} + \frac{1}{2} \Delta t (H_{j+1/2}^{n+1/2} - H_{j-1/2}^{n+1/2}) \quad (2.4)$$

W odcinkach kanału odpowiadającym turbinie i sprężarce schemat różnicowy należy uzupełnić cyklem iteracji z uwagi na zmienną długość przewodu. Rys.3. przedstawia siatkę różnicową dla odcinka modelowego kanału odpowiadającego turbinie (sprężarce). Zmienna długość kanału zależna m.in. od parametrów czynnika powoduje przesuwanie warunku brzegowego. W każdym kroku czasowym stosowana jest pętla iteracyjna wyznaczająca kolejno parametry po chwili $t_j = t_{j-1} + \Delta t$ dla kanału o długości l , długość kanału l' , parametry czynnika dla warunku brzegowego w l' , itd aż do uzyskania zadowalającej zbieżności.



Rys.3. Schemat siatki różnicowej (zmienna długość kanału)
 Fig.3. Differential mesh scheme (variable flow path length)

Badanym układem jest turbina gazowa GTD. Przykładowe wyniki zostaną przedstawione na Sympozjonie.

LITERATURA

- [1] Lewandowski J., Badyda K., Miller A., Szczap J. Modelowanie matematyczne procesu akumulacji czynnika roboczego w układzie przepływowym turbiny cieplnej. XXVI Sympozjon Modelowanie w mechanice, Beskid Śląski 1987.
- [2] Schobeiri T. Digital Computer Simulation of The Dynamic Operating Behaviour of Gas Turbines, BBC Review, March 1987.
- [3] Potter D.: Metody obliczeniowe fizyki -fizyka komputerowa. PWN, Warszawa 1977.

CONCEPTION OF ONE-DIMENSIONAL MODEL OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF GAS TURBINE

The article presents an idea of modelling of the dynamic behavior of gas turbine using continuous model of accumulation process of working medium in the flow system of gas turbine. Previous models generally applied lumped-parameter system for this problem [1]. The paper suggests using conservation laws (eq. 1.1-1.3) attached with average flow path of working medium which transformed flow system of gas turbine into one-dimensional model with variable length and cross-section area (See Fig.1). Fig.2. presents the way of turbine (compressor) stage modelling. The flow cross-section area is depended on absolute velocity deviation angle from axial direction, work transfer process is modelled by introducing artificial body forces. The numerical solution is based on two steps, Lax-Vendorff's scheme (eq.2.1-2.4) combined with iterations in the turbine (compressor) sections (Fig.3).