

Aleksander OLCZYK
Politechnika Łódzka

POMIARY PARAMETRÓW NIESTACJONARNYCH W BADANIACH TURBOZESPOŁÓW ŁADUJĄCYCH W WARUNKACH PRZEPLYWU PULSACYJNEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowane metody pomiaru niestacjonarnych parametrów termodynamiczno-przepływowych (ciśnien, temperatur, strumienia masy) opisujących funkcjonowanie turbiny ładującej w warunkach przepływu pulsacyjnego. Zaprezentowano szybkozmienne przebiegi mierzonych wielkości dla kilku wybranych częstotliwości pulsacji.

UNSTEADY FLOW MEASUREMENT APPLICATION TO THE TURBOCHARGER INVESTIGATIONS UNDER PULSATING FLOW CONDITIONS

Summary. The article presents the applied methods of measurements of instantaneous parameters (pressure, temperature, mass flow rate), describing behaviour of the turbocharger tested under pulsating flow conditions. Temporal variations of these parameters were presented for some pulse frequencies.

Wykaz oznaczeń stosowanych w tekście:

A, B, K - współczynniki równania Kinga

a, b, A', B' - stałe

c - ciepło właściwe [J/kg/K]

c_p - ciepło właściwe przy $p=\text{const}$ [J/kg/K]

d - średnica [m]

f_p - częstotliwość pulsacji [Hz]

k_Q - wskaźnik przeliczeniowy strumienia masy

l - długość spoiny (włókna pomiarowego) [m]

m - strumień masy [kg/s]

n - częstotliwość obrotów wału turbozespołu [Hz]

p - ciśnienie [Pa]

$R(T)$ - rezystancja włókna pomiarowego (w danej temperaturze) [Ω]

P_{ik} - pik generatora pulsacji

S - powierzchnia przekroju [m^2]

T - temperatura [K]

t - czas [s]

v - prędkość przepływu [m/s]

V - napięcie [V]

α - przejmowność ciepła [$W/m^2/K$]

λ - przewodność ciepła [$W/m/K$]

μ - lepkość dynamiczna [$kg/m/s$]

ρ - gęstość [kg/m^3]

τ - stała czasowa [s]

τ_p - okres pulsacji [s]

Indeksy:

i - wartość chwilowa

g - dotyczy gazu (czynnika)

s - dotyczy spoiny pomiarowej

KT - dotyczy kryzy turbiny

1. WSTĘP

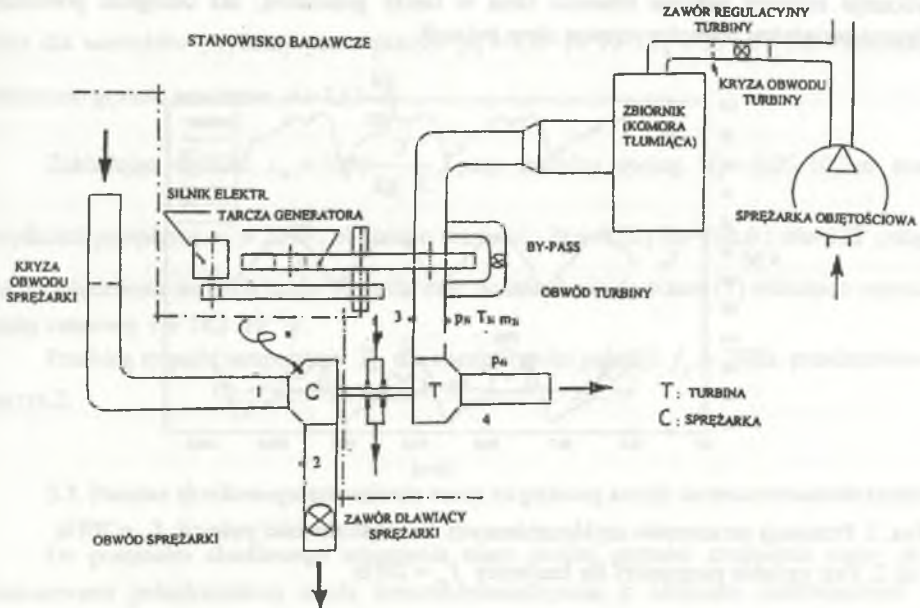
W rzeczywistych warunkach funkcjonowania turbozespołu ładującego skojarzonego z trakcyjnym silnikiem spalinowym przepływ przez turbinę ładującą jest silnie niestacjonarny. Dla ustalonego punktu pracy silnika parametry termodynamiczno-przepływowe dla turbiny stają się okresowymi funkcjami czasu, a przepływ przez turbinę staje się pulsacyjny.

Aby badania turbozespołu prowadzone były w warunkach możliwie zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy, turbinę ładującą obciąża się przepływem pulsacyjnym (generowanym za pomocą generatora pulsacji).

Wywołanie przepływu pulsacyjnego na wlocie do turbiny wymusza zastosowanie przyrządów pomiarowych zdolnych do możliwie precyzyjnego pomiaru i przetwarzania szybkozmiennych sygnałów mierzonych wielkości.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 1. Diagram of test stand

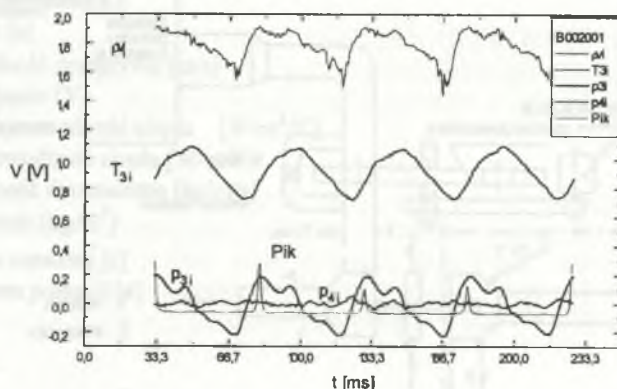
Generator pulsacji typu wirującej tarczy, wraz z by-passem, tworzy układ formowania pulsacji o częstotliwościach z zakresu 0–115 Hz oraz amplitud względnych pulsacji ciśnienia do wartości 0,35.

Oprócz szeregu pomiarów stacjonarnych wykonano pomiary czterech wielkości szybkozmiennych (p_3 , p_4 , T_3 , m_3) w przekrojach kontrolnych turbiny (3-wył do turbiny; 4-wył z turbiny). W stosunku do sprężarki poczyniono założenie o stacjonarności przepływu.

Sygnaly z czujników wartości chwilowych rejestrowane były w pamięci komputera typu IBM 486 za pośrednictwem karty pomiarowej RTI-860 o częstotliwości próbkowania 250 kHz na kanał i czasie przejścia między kanałami $5\mu s$.

3. POMIARY WIELKOŚCI SZYBKOSMIENNYCH

Na rys. 2. przedstawiono przebiegi mierzonych parametrów szybkozmiennych (w postaci napięć na wyjściu z karty pomiarowej) oraz pik generatora pulsacji (jako znacznika wykresu) w czasie odpowiadającym czterem pełnym okresom pulsacji [4]. Pik generatora wskazuje moment pełnego otwarcia okna w tarczy generatora, zaś odległość pomiędzy dwoma sąsiednimi pikami wyznacza okres pulsacji.



Rys. 2. Przebiegi parametrów szybkozmiennych dla częstotliwości pulsacji $f_p = 20\text{Hz}$

Fig. 2. Fast variable parameters for frequency $f_p = 20\text{Hz}$

3.1. Pomiary ciśnień szybkozmiennych

Ciśnienia szybkozmiennie p_{3i} i p_{4i} mierzone były za pomocą różnicowych czujników piezokwarcowych rejestrujących zmiany ciśnienia statycznego na ściance kanału. Częstotliwości własne użytych czujników sięgają 60 kHz (dane producenta).

Czujniki wraz ze swym torem pomiarowym były wywzorcowane statycznie. Wzmocnienie sygnału dobrano tak, aby 1 V na wejściu do karty pomiarowej odpowiadał $1 \cdot 10^5 \text{Pa}$ mierzonego ciśnienia.

3.2. Pomiary temperatury chwilowej

Do pomiaru temperatury chwilowej T_{3i} użyto termopary Chromel-Alumel o średnicy spoiny pomiarowej $50\mu\text{m}$, uprzednio wywzorcowanej w tuneliku.

Dla oszacowania własności dynamicznych termopary dokonano, przy pewnych założeniach upraszczających [4], obliczenia jej stałej czasowej:

$$\tau = \frac{\rho_s c_s d_s}{4\alpha} \quad (1)$$

Przy przyjęciu za obowiązujący (dla spiny w kształcie walca) wzoru Kramersa [2]:

$$Nu = 0,42 Pr^{0,2} + 0,57 Pr^{0,33} Re^{0,5} \quad (2)$$

oraz dla warunków (wybrany punkt pracy): $p_3 = 1,35 \cdot 10^5 \text{ Pa}$; $T_3 = 35 + 273,16 = 308,16 \text{ K}$;

obliczono gęstość powietrza $\rho = 1,51 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Zakładając wartość $c_p = 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$, przy średnicy spiny $d_s = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ oraz

prędkości przepływu $v_3 = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, obliczono wartości: $Pr = 0,70$; $Re = 100,6$; $Nu = 172$; skąd

po uwzględnieniu definicji liczby Nusselta oraz podstawieniu do wzoru (1) obliczono wartość stałej czasowej $\tau = 18,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

Przebieg sygnału temperatury T_{3i} dla częstotliwości pulsacji $f_p = 20 \text{ Hz}$ przedstawiono na rys.2.

3.3. Pomiar chwilowego strumienia masy za pomocą sondy termooanemometrycznej

Do pomiarów chwilowego strumienia masy (ściślej gęstości strumienia masy ρv) zastosowano jednokanałową sondę termooanemometryczną z włóknem wolframowym o średnicy $5 \mu\text{m}$. Sondę umieszczano tak, aby włókno pomiarowe znajdowało się w środku kanału, prostopadle do jego osi.

Sonda pracuje w trybie CTA (Constant Temperature Anemometry) z możliwością regulacji przegrzewu włókna. Szczegółowy opis stosowanej metody wzorcowania sondy i pomiaru chwilowego strumienia masy przedstawiono w pracy [3].

3.3.1. Wybór postaci równania charakterystyki sondy

Wychodząc z równania bilansu mocy wytwarzanej na skutek przepływu prądu przez włókno pomiarowe i mocy odbieranej przez czynnik na drodze przejmowania ciepła, można wyprowadzić równanie charakterystyki sondy termooanemometrycznej w postaci [3]:

$$V^2 = A' + B'(\rho v)^k (T_s - T_g) \quad (3)$$

gdzie: $A' = R(T_s) \frac{\lambda_g S_s}{d_s} a$, $B' = R(T_s) \frac{\lambda_g S_s}{d_s} \left(\frac{d_s}{\mu}\right)^k b$.

Współczynniki a, b, K są stałymi, które trzeba wyznaczyć podczas wzorcowania. Wzór (3) jest słuszny przy założeniu związku liczb kryterialnych w postaci:

$$Nu = a + b Re^K.$$

3.3.2. Wzorcowanie sondy

Postać charakterystyki opisana równaniem (3) jest trudna do praktycznego zastosowania z uwagi na zmienność temperatur T_s i T_g .

Aby uniezależnić się od zmienności temperatury T_s , przyjęto tryb pracy sondy CTA (tryb stałotemperaturowy) [5].

Wzorcowanie sondy bezpośrednio na stanowisku badawczym, w warunkach zbliżonych do prowadzenia pomiarów (podobne poziomy temperatur), umożliwiło uproszczenie równania charakterystyki wzorcowania do postaci znanej jako równanie Kinga:

$$V^2 = A + B(\rho v)^K. \quad (4)$$

Wzorcowanie prowadzono w warunkach statycznych, zadając kilkanaście (w praktyce 10÷12) wartości (ρv) wyznaczonych na podstawie pomiaru strumienia masy \dot{m}_{KT} na kryzie turbiny (traktowanej jako przyrząd wzorcowy).

3.3.3. Pomiar chwilowego strumienia masy

Znając wartości współczynników A, B i K wyznaczonych podczas wzorcowania, można wyrazić chwilowy strumień masy jako:

$$\dot{m}_s = \left(\frac{V^2 - A}{B} \right)^{1/K} S_3. \quad (5)$$

Przy znanych wartościach A, B, K, S_3 pomiar sprowadza się więc do zarejestrowania wartości napięcia V .

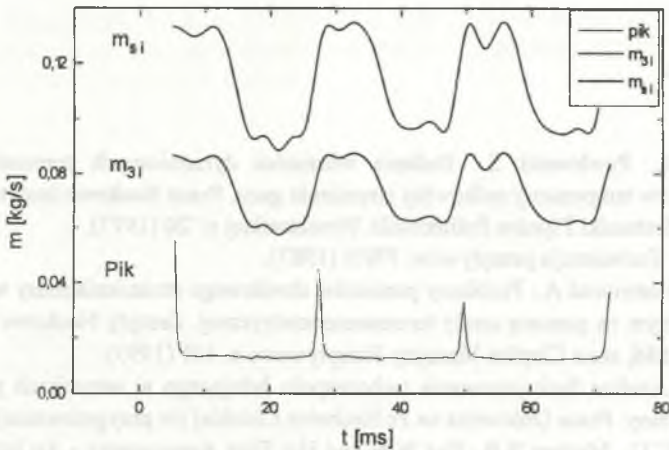
Uwaga: Wzór (5) byłby słuszny w przypadku spełnienia warunku prostokątnego rozkładu prędkości w przekroju (3) w każdej chwili czasu. Ponieważ warunek ten nie jest spełniony, wprowadzono tzw. wskaźnik przeliczeniowy strumienia masy k_Q .

Wskaźnik k_Q zdefiniowano jako:

$$k_Q = \frac{\overline{\dot{m}_s}}{\dot{m}_{KT}}$$

gdzie: $\overline{\dot{m}_s} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \dot{m}_{si} dt$ - uśredniona wartość strumienia masy mierzonego przez sondę; \dot{m}_{KT} - rzeczywisty strumień masy mierzony przez kryzę turbiny (kryza KT umieszczona jest przed generatorem pulsacji (rys.1), a więc przepływ przez nią jest zawsze ustalony).

Mnożąc dla każdej chwili czasu chwilową wartość \dot{m}_{si} przez wskaźnik k_Q , uzyskuje się skorygowany przebieg $\dot{m}_{3i} = k_Q \dot{m}_{si}$, który po uśrednieniu w jednym okresie pulsacji (lub jego wielokrotności) daje rzeczywistą wartość strumienia masy \dot{m}_{KT} (rys. 3).



Rys. 3. Przebiegi chwilowego strumienia masy na wlocie do turbiny:

\dot{m}_{si} - strumień uzyskany z pomiaru sondą termoneometryczną,

\dot{m}_{3i} - strumień po korekcji za pomocą współczynnika k_Q

Fig.3. Diagrams of transient mass flow rate at the turbine inlet:

\dot{m}_{si} - mass flow rate determined using the hot wire probe,

\dot{m}_{3i} - mass flow rate after correction by coefficient k_Q

Wartości współczynnika k_Q dla większości punktów pomiarowych są bliskie jedności, jednak w kilku przypadkach wartość k_Q dochodzi do 0,65. Z reguły sonda „zawyża” mierzona wartość strumienia masy (włókno umieszczone w osi kanału rejestruje wartości w pobliżu maksimum prędkości).

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono zastosowane metody pomiaru chwilowych parametrów przepływu pulsacyjnego przez turbinę zespołu ładującego. Zrealizowane pomiary umożliwiły bezpośrednie określenie chwilowych parametrów pracy turbiny (moc, stosunek ciśnień), bez uciekania się do metod pośrednich (jak np. zastosowanie hipotezy quasi-stacjonarności [4]). Dodatkową korzyścią jest wyeliminowanie kłopotliwej konieczności instalowania hamulca w miejsce koła sprzężarkowego w celu określenia mocy turbiny.

LITERATURA

1. Ciepłucha J., Pawłowski S.: Badanie własności dynamicznych termoelektrycznych przetworników temperatury całkowitej strumienia gazu. Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej n° 20 (1977).
2. Elsner J.W.: Turbulencja przepływów. PWN (1987).
3. Olczyk A., Hammoud A.: Problemy pomiarów chwilowego strumienia masy w przepływie niestacjonarnym za pomocą sondy termoanemometrycznej. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 686, seria Ciepłota Maszyn Przepływowe z. 105 (1993).
4. Olczyk A.: Analiza funkcjonowania turbozespołu ładującego w warunkach pulsacyjnego zasilania turbiny. Praca Doktorska na Politechnice Łódzkiej (w przygotowaniu).
5. Rasmussen C.G., Madsen B.B.: Hot Wire and Hot Film Anemometry - An Introduction to the Theory and Application of the DISA Constant Temperature Anemometer. DISA Publication (1986).

Recenzent: Dr hab. inż. Tadeusz Skubis

Wpłynęło do Redakcji dnia 24 października 1996 r.

Abstract

Investigations of the turbocharger behaviour under pulse flow conditions require an application of specific measurement equipment.

The radial flow turbine was tested in the range of pulse frequencies 20÷115 Hz and relative pressure pulse amplitudes up to 0,35.

The transient static pressures at inlet and outlet turbine sections were measured using piezoelectric transducers. Their resonance frequencies were up to 60 kHz.

For transient temperature measurements, thermocouple Chromel-Alumel (diameter 50 μm) was applied. The analysis of its dynamic properties was carried out in the paper.

The instantaneous mass flow rate measurements were made using the hot wire probe (wire diameter 5 μm). The method of probe rating and measurements were described.

In order to take into account non-uniformity of velocity profile at the turbine inlet section, coefficient k_Q was defined referring to mass flow rate measurements by an orifice.

Application of this coefficient permits correction of hot wire signal traces to improve the accuracy of instantaneous mass flow rate measurements.