ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ Seria: ENERGETYKA z. 139

Nr kol. 1590

Andrzej WITKOWSKI, Michał STROZIK, Mirosław MAJKUT, Jacek ZUKOWSKI Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Plitechnika Śląska ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice imiue@rie5.ise.polsl.gliwice.pl

EKSPERYMENTALNE I NUMERYCZNE BADANIA NIEUSTALONEGO PRZEPŁYWU W OSIOWYM NISKOOBROTOWYM STOPNIU SPRĘŻAJĄCYM

Streszczenie. Przedstawiono wyniki kompleksowych eksperymentalnych i numerycznych badań przepływu w osiowym niskoobrotowym stopniu spreżającym. Analizę numeryczną przepływu trójwymiarowego lepkiego przeprowadzono wykorzystując program numerycznej symulacji przepływu TASC-FLOW. Skojarzenie tych analiz z wynikami badań eksperymentalnych, prowadzonych przy wykorzystaniu dwóch różnych, pracujących na całkowicie odmiennej zasadzie technik pomiarowych umożliwia z kolei weryfikację doświadczalną stosowanego kodu numerycznego i jego doskonalenie.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE UNSTEADY FLOW IN AXIAL FLOW LOW COMPRESSOR STAGE

Summary. The paper reports a concerted application of experimental (TSFP and LDA) and computational fluid dynamic (CFD) techniques for an investigation of the low speed axial flow compressor stage. The experimental result have been used as inlet boundary condition for CFD calculations as well as a basic for verification of computational results. In the present state the CFD method supplied data giving a fair qualitative characterization of flow phenomena developing in the rotor.

1. Wstep

Rozpoznanie niestacjonarnych zjawisk przepływowych, występujących zarówno w kanałach nieruchomych, jak i wirujących i osiowych stopniach sprężających, szczególnie w obszarze niestabilnej części charakterystyki aerodynamicznej, ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia zarówno mechanizmu generowania tzw. wirującego oderwania, jak i w następstwie tego pompowania sprężarki.

Możliwości tego typu badań stwarza oprzyrządowanie osiowego niskoobrotowego stopnia sprężającego [1], (rys. 1) w dwa, pracujące na zupełnie odmiennej zasadzie, systemy pomiarowe [2]:

- kontaktowy, z wykorzystaniem termoanemometrycznych sond pomiarowych z trójrozdzieloną folią (TSFP) [3], [4],
- bezkontaktowy, z wykorzystaniem trójwymiarowego dopplerowskiego anemometru laserowego (LDA) [5].

Skojarzenie wyników badań eksperymentalnych z wynikami analizy numerycznej pozwala zarówno na ściślejsze ukierunkowanie badań oraz weryfikację wyników analizy numerycznej przepływu, prowadzonej z zastosowaniem różnych modeli turbulencji.



Rys. 1. Osiowy niskoobrotowy stopień sprężający Fig. 1. Low speed axial flow compressor stage

2. Metody eksperymentalne

2.1. Sondy termoanemometryczne z trójrozdzieloną folią (TSFP)

Sondy TSFP umożliwiają pomiar chwilowej prędkości i kierunku silnie burzliwych przepływów dwuwymiarowych w przypadku, gdy odchylenie kierunku przepływu od płaszczyzny prostopadłej do osi czujnika sondy nie przekracza 30°.



Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego z zastosowaniem sond TSFP Fig. 2. Schematic set up diagram of the measuring multisampling system with use of TSFP

Zastosowanie dwóch rodzajów sond – z czujnikiem prostym i wygiętym pod kątem 90° - pozwala przeprowadzić niejednoczesny pomiar trójwymiarowego pola prędkości przepływu metodą próbkowania cyklicznego. Wzorcowanie sond oraz pomiary kontrolne przeprowadzono na zaprojektowanym i wykonanym do tego celu stanowisku do wzorcowania sond, znajdującym się w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej [4]. Schemat blokowy próbkowania cyklicznego przedstawiony został na rys. 2.

2.2. Sondy LDA

Do pomiaru trójwymiarowego nieustalonego pola prędkości, zarówno w elementach nieruchomych, jak i wirujących stopnia, zastosowano kompletny zestaw pomiarowy laserowego anemometru dopplerowskiego firmy DANTEC z laserem typu Spectra Physic Argon-Jon, o mocy 4 W [5]. W celu wystarczająco silnych impulsów świetlnych zastosowano posiew cząstek o średniej średnicy 0,6 do 1,1 µm. Dla prowadzenia badań metodą próbkowania cyklicznego zaadaptowano elementy bloku synchronizacji z układu próbkowania sondami termoanemometrycznymi. Schemat blokowy przedstawiono na rys. 3.

255



Rys. 3. Schemat blokowy systemu pomiarowego LDA Fig. 3. Schematic set up diagram of the multisampling measuring system with use of LDA

Światłowodowe sondy LDA zamontowane na urządzeniu trawersującym umożliwiają osiowy, obwodowy i promieniowy przesuw sondy oraz obrót w płaszczyźnie horyzontalnej. Te trzy liniowe stopnie swobody, wraz z obrotem, zapewniają usytuowanie sond z dokładnością \pm 0,25 mm. LDA połączony jest zdalnie światłowodem o długości 15 m z sondami zainstalowanymi przed oknem pomiarowym na korpusie stopnia sprężającego.



2.3. Proces pomiaru i przetwarzania danych

Rys. 4. Lokalizacja punktów pomiarowych Fig. 4. Measurement locations

Na rysunku 4 przedstawiono lopunktów pomiarowych kalizacie w stopniu na wybranej powierzchni obrotowej. W celu zapewnienia pełnego rozpoznania obrazu przepływu w obszarze łopatek koła wirnikowego, pomiar przeprowadza się w 101 osiowych przekrojach pomiarowych, począwszy od przekroju przed kołem wirnikowym (1,35 osiowego rzutu cięciwy profilu łopatki na średnim promieniu), a skończywszy w odległości równej 2,25 osiowego rzutu cięciwy za kołem wirnikowym. W celu określenia stopnia niejednorodności przepływu w kierunku obwodowym na wlocie do koła wirnikowego zapewniono zmianę wzaiemnego usytuowania punktów próbkowania i lopatek kierownicy

wlotowej poprzez obrót pierścienia nośnego kierownicy wlotowej (rys. 1).

Dla zwiększenia wiarygodności wyników pomiaru chwilowych wartości prędkości C_i w procesie przetwarzania danych uwzględniono wpływ czasu przejścia cząstek przez objętość pomiarową z zależności [7]:

$$C_{i} = \frac{\sum \left(C_{i} \cdot \Delta t_{i} \right)}{\sum \Delta t_{i}}, \qquad (1)$$

gdzie C_i - prędkość pojedynczej cząstki oraz Δt_i - czas przejścia cząstki przez przestrzeń pomiarową. Po dokonaniu pomiaru wszystkich chwilowych wartości prędkości następuje uśrednienie grupowe w każdym oknie pomiarowym zgodnie z zależnością:

$$\overline{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} C_i, \qquad (2)$$

gdzie \overline{C} - uśredniona grupowo prędkość, C_i - prędkość chwilowa, zmierzona w poszczególnym oknie pomiarowym koła wirnikowego oraz N - całkowita liczba pomiarów w każdym z okien pomiarowych. Następnie możemy obliczyć niepoliczalną funkcję prędkości w każdym oknie pomiarowym:

$$C' = C_i - \overline{C}, \tag{3}$$

oraz odpowiednią wariancję:

$$\overline{\left(\mathbf{C}'\right)^{2}} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N} \left(\mathbf{C}_{i} - \overline{\mathbf{C}}\right)^{2}\right]}{N-1},$$
(4)

która określa poziom niepoliczalnej niestacjonarności w każdym oknie pomiarowym [5].

Chwilowa prędkość C_i może być zdekomponowana do postaci trójskładnikowej:

$$C_{i} = \overline{C} + \widetilde{C} + C', \qquad (5)$$

gdzie:

 \overline{C} – prędkość uśredniona w czasie według (5),

 \widetilde{C} – okresowa fluktuacja prędkości,

C' – losowa fluktuacja prędkości.

Uśrednioną w czasie prędkość \overline{C} uzyskujemy przez uśrednienie wszystkich uśrednionych grupowo prędkości w każdym oknie pomiarowym, gdzie N_{OK} określa liczbę okien pomiarowych w każdym kanale łopatkowym:

$$\overline{\overline{C}} = \frac{1}{N_{ok}} \sum_{j=1}^{N_{ok}} \left[\frac{1}{N_w} \sum_{m=1}^{N_w} \overline{\overline{C}}_{j,m} \right]$$
(6)

3. Numeryczna analiza przepływu

Numeryczna analiza przepływu prowadzona jest z wykorzystaniem profesjonalnego programu obliczeniowego TASC-FLOW [6], rozwiązującego uśrednione w czasie układy równań Naviera-Stokesa, rozszerzone o równania opisujące dwa modele turbulencji typu dwurównaniowego oraz jeden typu RSM. Stwarza to możliwość doświadczalnej weryfikacji wyboru najwłaściwszego modelu turbulencji dla rozpatrywanego rodzaju przepływu.

4. Wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych

4.1. Porównanie wyników badań przepływu metodą próbkowania pola prędkości sondami TSFP i LDA

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie linii konturowych prędkości względnych na spływie z łopatek koła wirnikowego, uzyskanych z próbkowania pola prędkości sondami termoanemometrycznymi (TSFP) oraz laserowymi (LDA).





Fig. 5. Relative velocity contour plots downstream of the rotor a)TSFP system results b) LDA system results

Ilościowe różnice rozkładu prędkości względnych w śladzie pozałopatkowym oraz składowej osiowej turbulencji w wybranym przekroju osiowym (rys. 5) wykazane są na rys. 6. Zarówno kształt śladu, jak i wartości liczbowe prędkości i turbulencji, uzyskane za pomocą obu systemów pomiarowych, są bardzo do siebie zbliżone, przy zauważalnej tendencji do zawyżania wyników uzyskanych za pomocą sond TSFP.



Rys. 6. Porównanie rozkładów prędkości względnych W i turbulencji T_z w śladzie pozałopatkowym koła wirnikowego, uzyskane z pomiaru sondą TSFP i LDA
Fig. 6. Rotor wake velocity profiles and unresolved unsteadiness

Wpływ względnego przemieszczania się łopatek koła wirnikowego (ŁKW) i łopatek wlotowej kierownicy regulacyjnej (ŁWKR) (efekt zegarowy) przedstawiony został w postaci rozkładu linii konturowych prędkości względnych w kanałach międzyłopatkowych koła wirnikowego na rys. 7.



Rys. 7. Wpływ efektu zegarowego na pole prędkości w kanałach międzyłopatkowych koła wirnikowego:

$$\gamma = -20^{\circ}, \, \phi_{T} = 0,401, \, Yr = 0,50$$

Fig. 7. Relative velocity distributions in the rotor passages at the eight IGV rotor positions $\gamma = -20^{\circ}$, $\varphi_T = 0.401$, Yr = 0.50

Porównanie rysunków wykazuje silny wpływ śladu pozałopatkowego ŁWKR na pole prędkości i tym samym na obciążenie aerodynamiczne ŁKW. W uzupełnieniu ilościowe porównanie obwodowych rozkładów prędkości względnych i osiowej składowej turbulencji w wybranym przekroju osiowym przedstawiono na rys. 8.



- Rys. 8. Obwodowy rozkład prędkości względnych (a) i składowych turbulencji (b) w kanale międzyłopatkowym koła wirnikowego: $\gamma = -20^{\circ}$, $\varphi_T = 0,401$, Yr = 0,50
- Fig. 8. Circumferential relative velocity (a) and unresolved unsteadiness (b) distributions in the rotor passages $\gamma = -20^{\circ}$, $\phi_T = 0.401$, Yr = 0.50

4.2. Porównanie wyników eksperymentalnych z symulacją numeryczną przepływu

Na rysunku 9 przedstawione zostały linie konturowe prędkości względnych, wyznaczone za pomocą sond LDA oraz poprzez symulację numeryczną z wykorzystaniem programu komputerowego TASC-FLOW z wyborem modelu turbulencji k – ε .

a)

b)



Rys. 9. Porównanie linii konturowych prędkości względnych, wyznaczonych za pomocą symulacji numerycznej (a) oraz pomiaru sondami LDA (b): $\gamma = -20^{\circ}$, $\phi_T = 0,401$, Yr = 0,50

Fig. 9. Relative velocity contour plots a) numerical simulation results b) LDA measurement results $\gamma = -20^{\circ}$, $\phi_T = 0,401$, Yr = 0,50

Wyniki badań uzyskane z próbkowania pola przepływu sondą LDA posłużyły jako warunki brzegowe do obliczeń numerycznych.

Istotnym problemem w rozpoznaniu warunków pracy sprężarek jest określenie momentu inicjacji oderwania przepływu po stronie grzbietowej łopatek, które w konsekwencji prowadzi do zjawiska tzw. pompowania. Symulację tego procesu można zaobserwować na rys. 10, przy przechodzeniu pracy stopnia od punktu nominalnego (A) do punktu przegięcia charakterystyki pracy (B). Konfrontacja tego rodzaju obliczeń z wynikami badań eksperymentalnych stwarza możliwość rozpoznania zjawisk towarzyszących przechodzeniu sprężarek do obszaru pracy niestabilnej.



- Rys. 10. Proces oderwania strug na grzbietowej stronie profilu łopatki w miarę wzrostu obciążenia aerodynamicznego
- Fig. 10. Influence of the aerodynamic load on the separation processes on the upper side of the blade

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzono wstępne kompleksowe badania zjawisk niestacjonarnych w przepływie w niskoobrotowym osiowym stopniu sprężającym, z wykorzystaniem dwóch pracujących na odmiennej zasadzie technik pomiarowych, skonfrontowanych z numeryczną symulacją przepływu z wykorzystaniem komputerowego kodu obliczeniowego TASC FLOW. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość prowadzenia badań przepływu w osiowym stopniu sprężającym na podstawie wzajemnie uzupełniających się analiz: doświad-czalnej i numerycznej. Szczególnie obiecujące są wyniki badań w obszarze niestabilnej części charakterystyki aerodynamicznej stopnia. Ukierunkowują one dalsze badania na rozpoznanie zjawisk prowadzących do oderwania wirującego i w konsekwencji do pompażu.

Bibliografia

 Witkowski A.S., Chmielniak T.J., Strozik M.D., Mirski M.: Facility for Turbulence and Unsteadiness Measurements Before and Behind an Axial Compressor Rotor Blade by Means of Periodic Multisampling with triple Split Fiber Probes. Proceedings of the 1994 Engineering System Design Analysis Conference. Vol. 8. – Part B. Design: Analysis, Synthesis and Applications. American Society of Mechanical Engineers, New York 1994, 519-526.

- Witkowski A., Chmielniak T., Majkut M., Strozik M.: Measurement of the Unsteady Flow Field Due to Inlet Guide Vane Interaction with the Rotor in an Axial Flow Low Speed Compressor Stage. 5th European Conference on Turbomachinery, Fluid Dynamics and Thermodynamics. Praga 2003
- Jørgensen F.E.: Characteristics and Calibration of a Triple Split Probe for Reversing Flows. DISA Information, No 27, 1982
- Witkowski A., Strozik M.: Charakterystyka pomiarowa sond termoanemometrycznych z trójrozdzieloną folią. XV Krajowa Konferencja Mechaniki Płynów. Streszczenia referatów. Augustów 2002
- Witkowski A.S., Chmielniak T.J., Strozik M.D., Majkut M.M.: Three Dimensional Laser Doppler Anemometry to Measurements Unsteady Flow in a Low Speed Axial Flow Compressor Stage. Seminar Arbeitsgemeinschaft Turbomachinen. Gdańsk-Krzeszna-Gdynia 2001
- 6. AEA Technology Engineering Software Limited, Waterloo, Ontario, Canada. CFX-TASCFLOW User Documentation Version 2.8, January 1999
- 7. George W.K. Limitations to measuring accuracy inherent in the laser-Doppler signal. Proc. LDA Symp., Copenhagen, 1975