

Andrzej WITKOWSKI,
Tadeusz CHMIELNIAK,
Michał STROZIK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej

Marek MIRSKI

Raciborska Fabryka Kotłów "RAFAKO", Racibórz

METODA POMIARU TURBULENCJI I ZJAWISK NIEUSTALONYCH W STOPNIU WENTYLATORA OSIOWEGO

Streszczenie. Przedstawiono oprzyrządowanie, metodę pomiaru turbulencji oraz nieustalonych zjawisk przepływowych w osiowym stopniu wentylatorowym. Stanowisko wyposażone jest zarówno w centralnie sterowane sondy aerodynamiczne, jak i termoanemometryczne. Do badań charakterystyk turbulencji opracowano wielopróbkowy, zsynchronizowany z kątowym położeniem koła wirnikowego system pomiarowy z wykorzystaniem sondy termoanemometrycznej z trójdzielną folią.

Przedstawiono wstępne wyniki badań przepływu nieustalonego w wybranym punkcie przekroju wlotowego koła wirnikowego stopnia modelowego wentylatora osiowego.

A METHOD OF TURBULENCE AND UNSTEADINESS MEASUREMENTS IN AN AXIAL FANS STAGE

Summary. The instrumentation and method of measuring the turbulence and unsteadiness phenomenon in a axial fans stage has been presented. The stand is equipped in data transmission system for transferring and processing signals from as well as a five hole and triple-split fiber probes. For experimental investigations of turbulence characteristics a periodic multisampling measuring systems has been developed with the use of a triple-split probe. Preliminary experimental results of investigations of flow unsteadiness in choiced point behind a rotor of a axial fans stage has been presented.

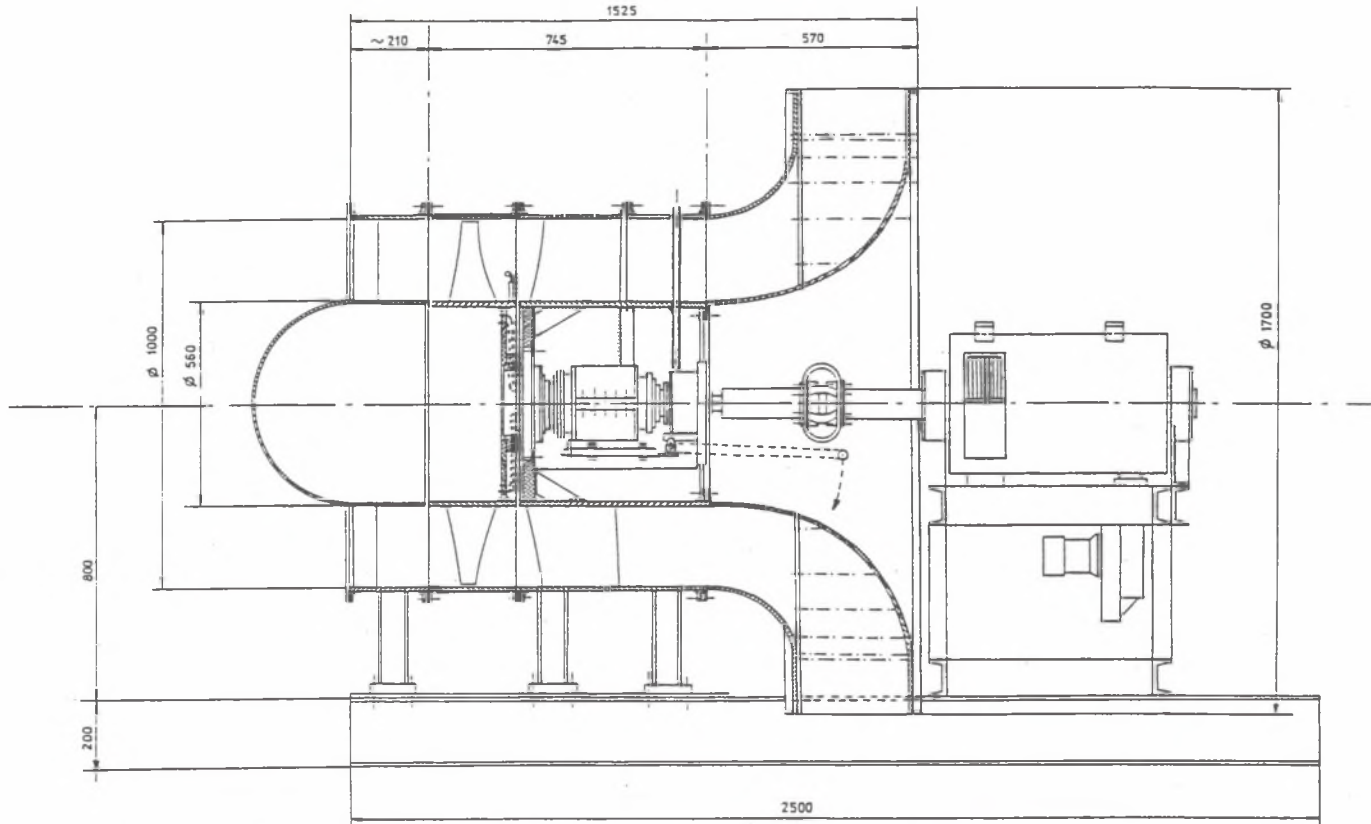
EINE METHODE ZUR MESSUNG DER TURBULENZ UND DER INSTATIONÄREN VORGÄNGE IN AXIALVENTILATORSTUFE

Zusammenfassung. Die Meßeinrichtungen und die Methode zur Messung der Turbulenz und instationärer Strömungsvorgänge in der Axialventilatorstufe wurden dargestellt. Der Prüfstand ist mit zentral gesteuerten aerodynamischen und termoanemometrischen Sonden ausgerüstet. Für die Untersuchung von Turbulenzcharakteristiken ein, synchronisierter mit der Position des Rotors, Meßsystem mit termoanemometrischer Sonde bearbeitet wurde. Es wurden die erste Untersuchungsergebnisse der instationären Strömung im auserwählten Punkte des Austrittsquerschnittes des Rotors des Modell – Axialventilators gegeben.

1. WSTĘP

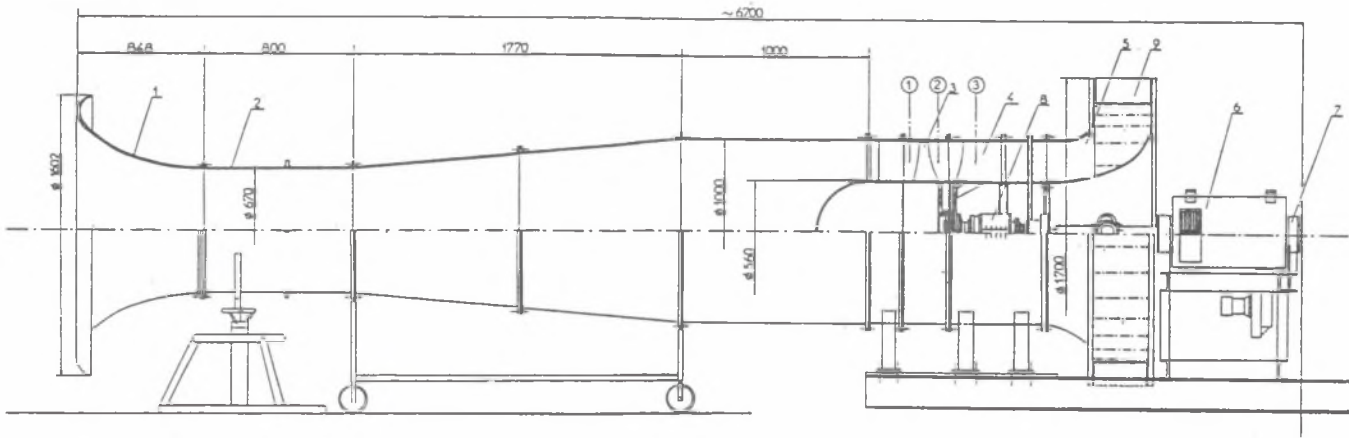
Sprawność nowoczesnych stopni sprężających w znacznym stopniu determinowana jest poprzez występowanie wtórnych przepływów oraz narastanie profilowych i pierścieniowych [1] warstw przyściennych.

Niekorzystne oddziaływanie tych zjawisk na charakterystykę aerodynamiczną, wytrzymałościową i akustyczną stopnia wentylatorowego potęgowane jest poprzez wzajemne oddziaływanie stacjonarnych i wirujących wieńców łopatkowych i wynikającą z tego nieustaloność przepływu. Istotne znaczenie w generowaniu nieustalonych zjawisk w przepływie ma przecinanie przez wieńce łopatkowe śladów pozałopatkowych i wtórnych wirów spływających z poprzedzającego wieńca. Szczegółowe rozpoznanie charakterystyk śladów pozałopatkowych, rozprzestrzeniania się tych śladów w przestrzeni pomiędzy wieńcem łopatkowym koła wirnikowego i kierownicy tylnej, jak również w kanałach międzyłopatkowych kierownicy tylnej, w wybranych punktach charakterystyki aerodynamicznej, na drodze eksperymentalnej jest niezbędne również w procesie doskonalenia i weryfikacji programów trójwymiarowej analizy i procedur projektowych maszyn przepływowych. Z przedstawionych przesłanek wynika konieczność opracowania urządzenia umożliwiającego pomiar trójwymiarowego, nieustalonego pola przepływu w wybranych przekrojach kontrolnych osiowego stopnia sprężającego [2]. Urządzenie zapewnia okresowe, zsynchronizowane z kątowym położeniem koła wirnikowego, próbkowanie pola przepływu z wykorzystaniem sondy termoanemometrycznej z trójdzielną folią [3].



Rys. 2.1. Modelowy osiowy stopień wentylatorowy

Fig. 2.1. Model axial flow compressor stage



Rys. 2.2. Stanowisko badawcze

Fig. 2.2. Test stand

2. STOPIEŃ MODELOWY

Układ przepływowy modelowego osiowego stopnia wentylatorowego (rys. 2.1) składa się z pierścieniowej części wlotowej, koła wirnikowego, łopatek kierownicy tylnej oraz krzywoliniowego dyfuzora pierścieniowego. Zasadniczym elementem stopnia modelowego jest koło wirnikowe o średnicy zewnętrznej 1000 mm podwieszone na wale i połączone z urządzeniem do przenoszenia impulsów ciśnieniowych z układu wirującego do układu stałego, z uszczelnieniem wodnym.

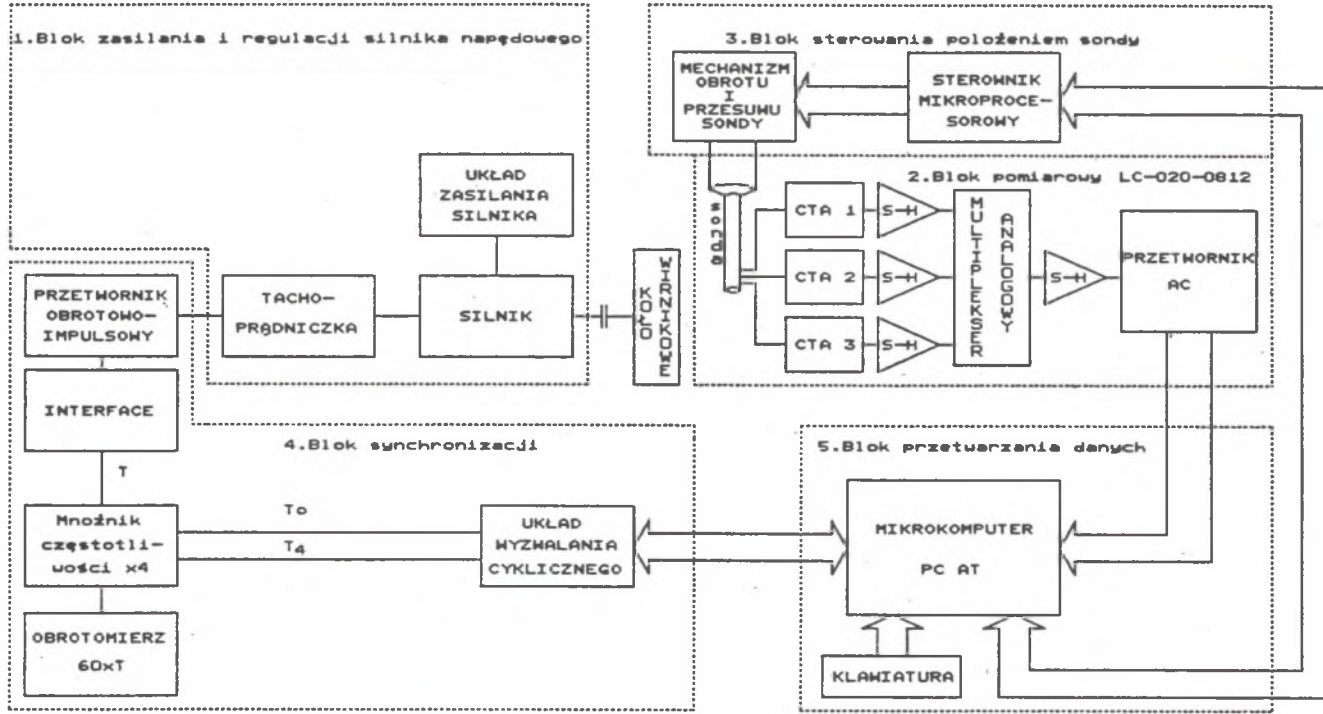
Stopień modelowy podłączony jest po stronie ssania do rurociągu pomiarowego (rys. 2.2). Podstawowymi elementami stanowiska pomiarowego są: rurociąg pomiarowy z wymienionymi wlotami lemniskatowymi do pomiaru natężenia przepływu oraz silnik elektryczny prądu stałego o mocy 30 kW z ciąglą tyrystorową regulacją liczby obrotów, zabudowany w kołyszce umożliwiającej pomiar momentu obrotowego.

3. SYSTEM POMIAROWY PRÓBKOWANIA CYKLICZNEGO

Do badań zjawisk nieustalonych w osiowym stopniu wentylatorowym oraz burzliwości przepływu opracowany został system pomiarowy umożliwiający okresowe, zsynchronizowane z położeniem łopatek koła wirnikowego, próbkowanie pola prędkości. System ten zapewnia proces inicjowania, pobierania i przetwarzania impulsów pomiarowych z sondy do minikomputera. Schemat blokowy systemu pomiarowego przedstawiony został na rysunku 3.1. Główne elementy systemu to: blok pomiarowy, blok synchronizacji, blok przetwarzania danych.

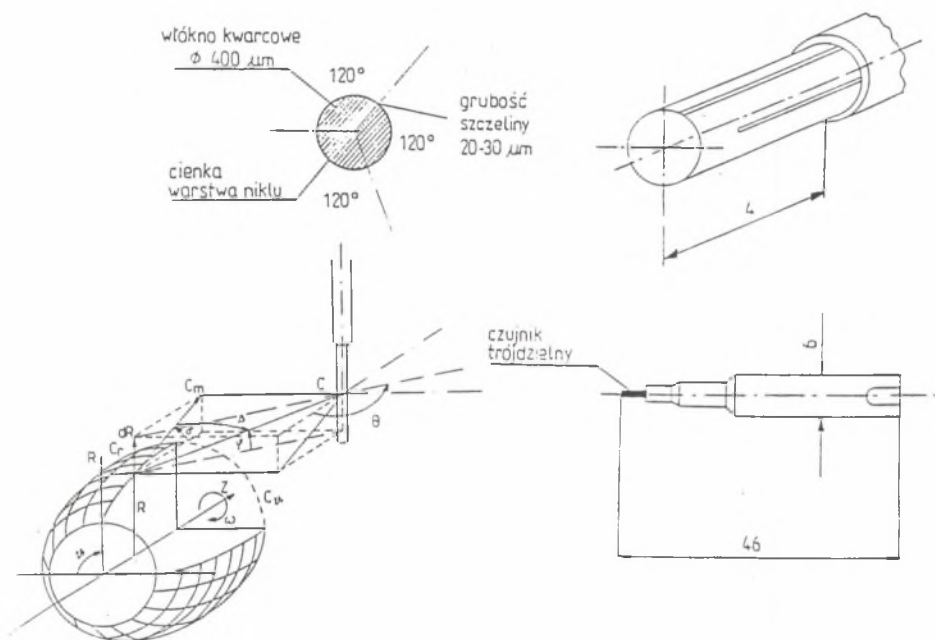
3.1. Blok pomiarowy

W bloku pomiarowym zastosowana jest sonda termoanemometryczna typu 55R92 z trójdzieloną warstwą (rys. 3.2) [3], [4]. Sonda ma trzy pola pomiarowe przesunięte względem siebie o 120° i umożliwia pomiar silnie burzliwych przepływów dwuwymiarowych, a także trójwymiarowych w przypadku, gdy odchylenie kierunku przepływu od płaszczyzny prostopadłej do osi sondy nie przekracza $\pm 30^\circ$. Prędkość gazu C_{x0} stanowi funkcję sumy kwadratów napięć mierzonych w poszczególnych segmentach sondy. Każde z pól pomiarowych sondy współpracuje z mostkiem anemometrycznym. Sygnały wyjściowe poda-



Rys. 3.1. Schemat blokowy systemu próbkowania cyklicznego

Fig. 3.1. Schematic set up diagram of the multisampling measuring system



Rys. 3.2. Sonda termooanemometryczna z trójdzielną warstwą

Fig. 3.2. Outline of Triple-Split Probe

wane są na wejściu toru pomiarowego modułu składającego się z przetwornika analogowo-cyfrowego, multipleksera analogowego oraz wzmacniaczy próbkujących typu Sample & Hold. Maksymalna częstotliwość próbkowania sygnału analogowego wynosi 100.000 Hz na jeden kanał. Pozwala to na równoczesny pomiar w trzech kanałach pomiarowych termooanemometru z minimalnym okresem 31,5 μs .

3.2. Blok synchronizacji

Zadaniem bloku synchronizacji jest wytworzenie impulsów wyzwalających przetwarzanie A/C, w chwili czasowej odpowiadającej określone, wybranemu przez mierzącego, kątowemu położeniu koła wirnikowego. Przetwornik optoelektryczny generuje N (3600) impulsów na obrót wału dających rozdzielczość kątową $0,1^\circ$.

3.3. Blok przetwarzania danych

Sterowanie procesem próbkowania cyklicznego oraz zbieranie i przetwarzanie danych pomiarowych odbywa się przy zastosowaniu komputera typu IBM PC/AT z procesorem 386 DX 40 MHz i pamięcią 8 MB RAM (8 x 1M SIMM).

4. BADANIA WSTĘPNE

4.1. Warunki techniczne pomiaru

System pomiarowy przetestowany został po usytuowaniu sondy termomometrycznej z trójdzielną folią za kołem wirnikowym, na średnim promieniu ($\bar{r} = 390$ mm), w odległości 50 mm za tylną krawędzią łopatek. W analizowanej serii pomiarowej wykorzystano sondę z czujnikiem prostym, co umożliwiło wyznaczenie jedynie składowej osiowej i obwodowej prędkości bezwzględnej. Przy liczbie obrotów $n = 1000$ obr/min czas przejścia strugi o szerokości podziałki koła wirnikowego odpowiadającej $22,5^\circ$ kątowym wyniósł odpowiednio 3,75 ms. Zaprogramowany czas przetwarzania jednej próbki składającej się trzech równoczesnych sygnałów napięciowych E_1, E_2, E_3 wyniósł 40 μ s. Przy przyjętej liczbie próbek w jednej sekwencji pomiarowej przypadającej na jeden obrót, czas niezbędny na powtórzenie kolejnych sekwencji wyniósł 70 ms. Umożliwia to pobieranie kolejnych sekwencji pomiarowych co każdy obrót przy ~ 857 obr/min oraz co drugi obrót przy ~ 1714 obr/min. Sto próbek wektorów prędkości odpowiadających trzystu impulsom napięciowym zajmuje 1,8 kB pamięci, co przy 7 MB dysponowanej pamięci wirtualnej umożliwia pobieranie około 3800 sekwencji pomiarowych.

Stosownie do przedstawionych uwarunkowań technicznych przeprowadzono wstępne próbkowanie pola przepływu przy 1000 obr/min, dla dwóch wersji

szerokości strugi na wylocie z koła wirnikowego. W pierwszej wersji pobierano 100 próbek co drugi obrót koła wirnikowego w czasie 4 ms, co odpowiadało 24° mierzonym na obwodzie koła wirnikowego i o $1,5^\circ$ przekraczało podziałkę kątową łopatek.

W drugim przypadku zwiększono okres przetwarzania próbek dwukrotnie, co umożliwiło zebranie 100 próbek na obwodzie koła wirnikowego obejmującego dwa kanały międzyłopatkowe. W obu przypadkach zebrano po 1000 sekwencji pomiarowych, czyli 100.000 próbek, które następnie zostały przetworzone przy zastosowaniu metody grupowego uśredniania [5], [6], [7].

Uzyskane prędkości chwilowe wykorzystywane są następnie do obliczeń wielkości charakterystycznych turbulencji:

- uśredniona grupowo prędkość w danym punkcie próbkowania

$$\bar{C}(i) = \sum_{n=1}^N \frac{C(i,n)}{N} \quad (4.1)$$

gdzie:

- N – określa liczbę obrotów,
- i – numer punktu próbkowania w kierunku obwodowym,
- n – kolejny numer obrotu,
- $C(i,n)$ – chwilowa wartość prędkości;

- wektor średniej prędkości okresowej:

$$\bar{C} = \frac{1}{MN} \sum_i^M \sum_n^N C_{in} \quad (4.2)$$

gdzie:

- M – liczba punktów próbkowania przypadająca na dany obrót – jedna sekwencja pomiarowa;

- uśredniona wartość kąta kierunkowego prędkości bezwzględnej C_2 :

$$\bar{\alpha}_{2i} = \sum_{n=1}^N \frac{\alpha_{2i,n}}{N} \quad (4.3)$$

- składowe prędkości bezwzględnej zgodnie z rysunkiem 4.1:
składowa osiowa

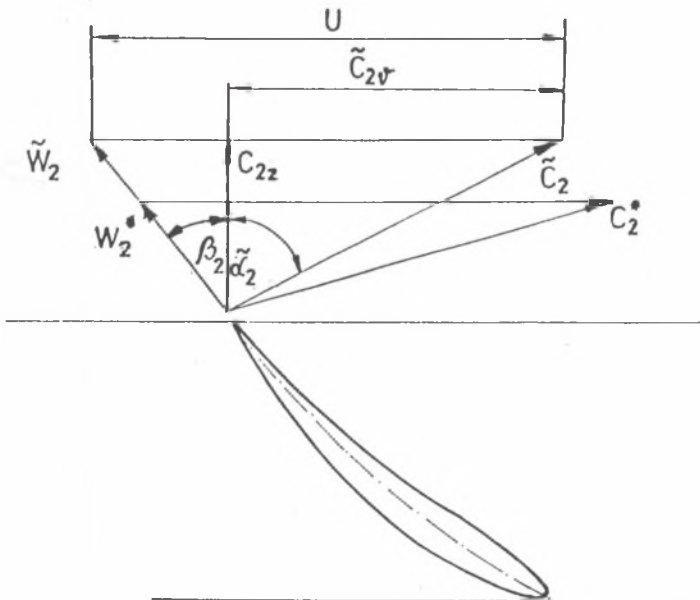
$$\tilde{C}_{2zi,n} = \tilde{C}_{2i,n} \cos \tilde{\alpha}_{2i,n} \quad (4.4)$$

- składowa obwodowa

$$\tilde{C}_{2\theta i,n} = \tilde{C}_{2i,n} \sin \tilde{\alpha}_{2i,n} \quad (4.5)$$

- prędkość przepływu względnego

$$\tilde{W}_{2i,n} = \sqrt{\tilde{C}_{2zi,n}^2 + (U - \tilde{C}_{2\theta i,n})^2} \quad (4.6)$$



Rys. 4.1. Trójkąt prędkości na wylocie koła wirnikowego

Fig. 4.1. Rotor outlet velocity triangles

– kąt kierunkowy prędkości względnej

$$\beta_{2i,n} = \arctg U - \frac{\check{C}_{2\theta,i,n}}{\check{C}_{2z,i,n}} \quad (4.7)$$

– funkcje korelacyjne prędkości

$$\overline{C_{z,i}^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_{z,i,n} - \check{C}_{z,i})^2 \quad (4.8)$$

$$\overline{C_{\theta,i}^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_{\theta,i,n} - \check{C}_{\theta,i})^2 \quad (4.9)$$

$$\overline{C_{r,i}^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_{r,i,n} - \check{C}_{r,i})^2 \quad (4.10)$$

$$\overline{C_z C_{\theta,i}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_{z,i,n} - \check{C}_{z,i})(C_{\theta,i,n} - \check{C}_{\theta,i}) \quad (4.11)$$

$$\overline{C_z C_{r,i}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_{z,i,n} - \check{C}_{z,i})(C_{r,i,n} - \check{C}_{r,i}) \quad (4.12)$$

$$\overline{C_{\theta} C_{r,i}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_{\theta,i,n} - \check{C}_{\theta,i})(C_{r,i,n} - \check{C}_{r,i}) \quad (4.13)$$

gdzie:

$\check{C}_z, \check{C}_{\theta}, \check{C}_r$ – pulsacje prędkości.

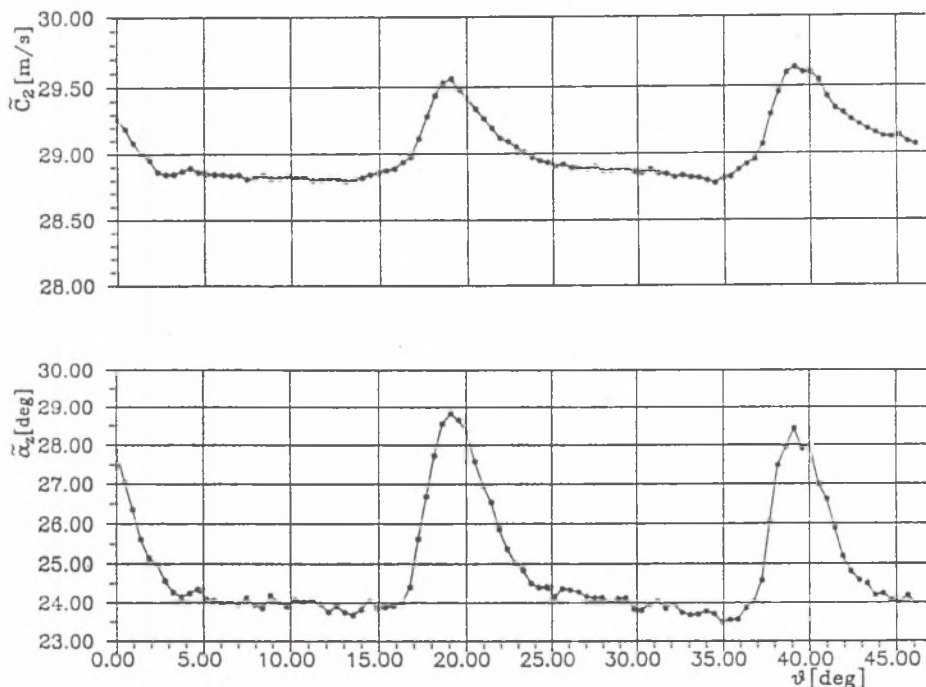
Intensywność turbulencji:

$$T_{z,i} = \frac{\sqrt{\overline{C_{z,i}^2}}}{\check{C}_i} \quad - \text{turbulencja w kierunku osiowym} \quad (4.14)$$

$$T_{\theta,i} = \frac{\sqrt{C_{\theta,i}^2}}{C_i} \quad - \text{turbulencja w kierunku obwodowym} \quad (4.15)$$

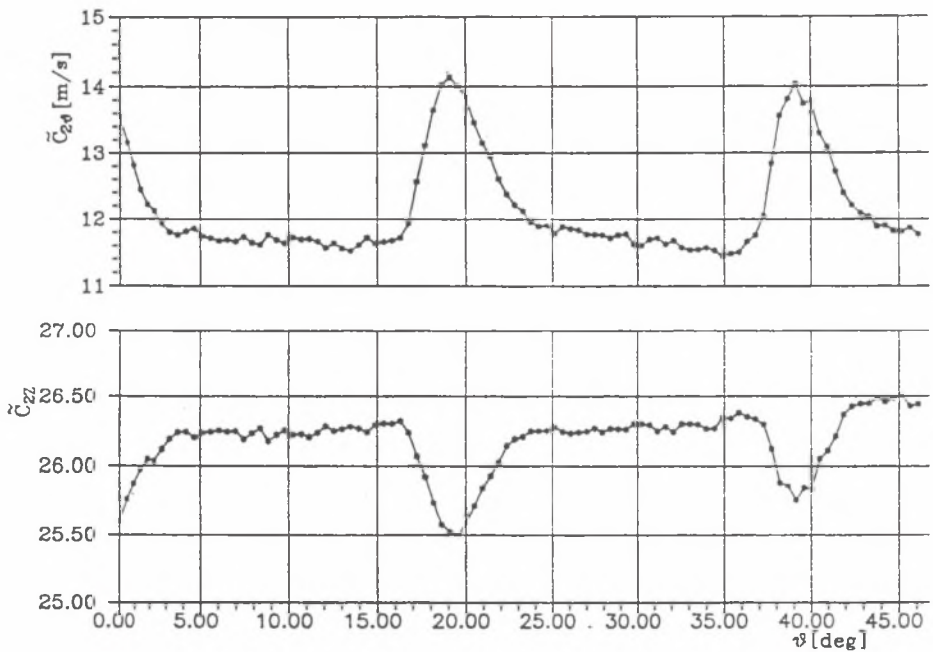
$$T_{r,i} = \frac{\sqrt{C_{r,i}^2}}{C_i} \quad - \text{turbulencja w kierunku promieniowym} \quad (4.16)$$

Na rysunkach 4.2 i 4.3 przedstawiono wyniki uśredniania grupowego prędkości bezwzględnej \tilde{C} , kąta $\tilde{\alpha}$ oraz \tilde{C}_z i obwodowej \tilde{C}_θ składowej prędkości. W obszarze śladu pozałopatkowego występuje defekt składowej osiowej prędkości bezwzględnej i towarzyszące mu maksimum składowej obwodowej prędkości. Wynika to z trójkątów prędkości na wylocie z koła wirnikowego (rys. 4.1). Rysunek 4.2 wskazuje również na silne zróżnicowanie kąta α w kierunku obwodowym.



Rys. 4.2. Uśredniony grupowo rozkład prędkości bezwzględnej oraz kąta kierunkowego

Fig. 4.2. Ensemble averaged absolute flow velocity \tilde{C} and angle $\tilde{\alpha}$ at the exit of the impeller

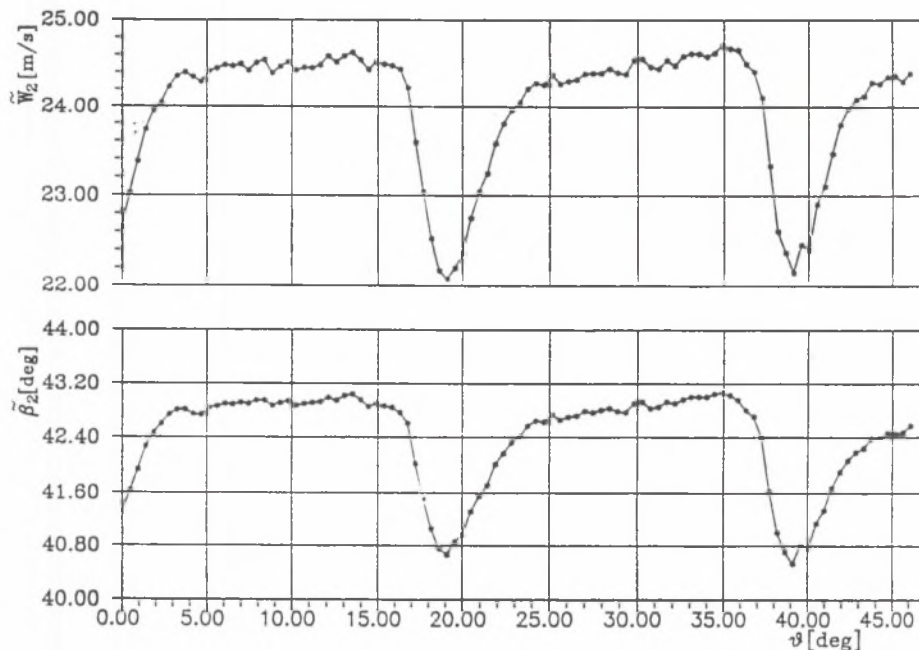


Rys. 4.3. Uśredniony grupowo rozkład składowej osiowej i obwodowej prędkości

Fig. 4.3. Ensemble averaged tangential \tilde{C}_θ and axial \tilde{C}_z velocity of absolute flow at exit of the impeller

Szczególnie interesujących informacji dostarcza analiza przepływu we względnym układzie współrzędnych (rys. 4.4). Obszar gwałtownego spadku prędkości względnej \tilde{W} stanowi ślad pozałopatkowy, którego lewa krawędź określa efekt oddziaływania strony wklęsłej łopatki, natomiast prawa strona efekt oddziaływania strony wypukłej. W szczególności opierając się na rysunku 4.4, oszacować można grubość profilowej warstwy przyściennej na splywie z łopatki oraz kąt strugi β , co ma istotne znaczenie z punktu widzenia doskonalenia obliczeń aerodynamicznych wirujących palisad łopatkowych.

W dalszej kolejności przedstawiono charakterystyczne wielkości turbulencji. Na rysunkach 4.5 i 4.6 wykreślone zostały rozkłady naprężeń Reynoldo-

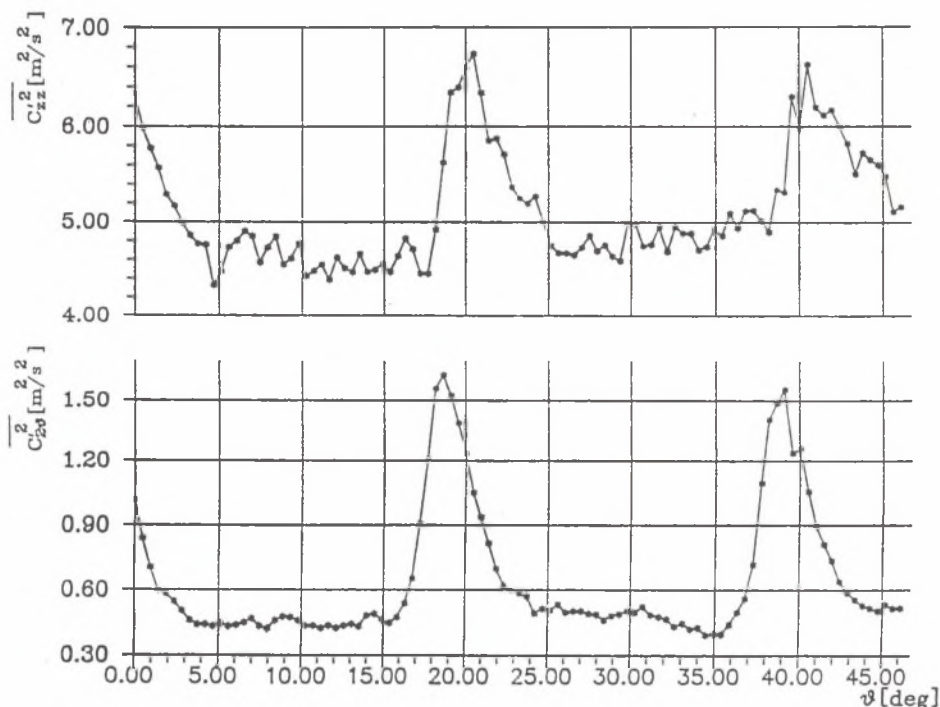


Rys. 4.4. Ślad pozałopatkowy w przepływie względnym

Fig. 4.4. Ensemble averaged relative velocity \bar{W} and air angle $\bar{\beta}$ at exit of the impeller

wskich. Eksperymentalne badanie tych naprężeń ma istotne znaczenie dla uzupełnienia informacji niezbędnych w analizie turbulentnego przepływu lepkiego i do rozwiązania równań pierścieniowej warstwy przyściennej w osiowych stopniach sprężających [2].

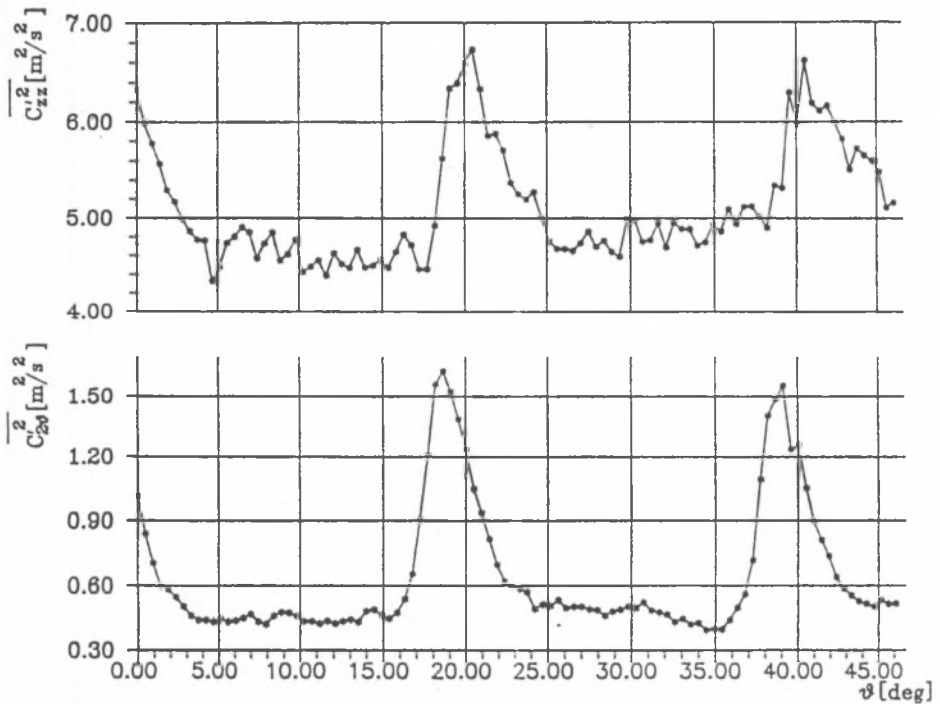
Rozkład dwu składowych intensywności turbulencji w przepływie bezwzględnym zdefiniowanym równaniami (4.14) i (4.15) przedstawiony jest na rysunku 4.7. Intensywność turbulencji w śladzie wskazuje na to, że obszar wzajemnego oddziaływania profilowych warstw przyściennych narastających po stronie wklęsłej i grzbietowej łopatki stanowi ośrodek o wysokiej aktywności generowania niestacjonarności przepływu.

Rys. 4.5. Rozkłady naprężeń Reynoldowskich $\overline{C_z^2}$ i $\overline{C_r^2}$ Fig. 4.5. Reynolds stresses $\overline{C_z^2}$ and $\overline{C_r^2}$ distribution at exit of the impeller

5. WNIOSKI KOŃCOWE

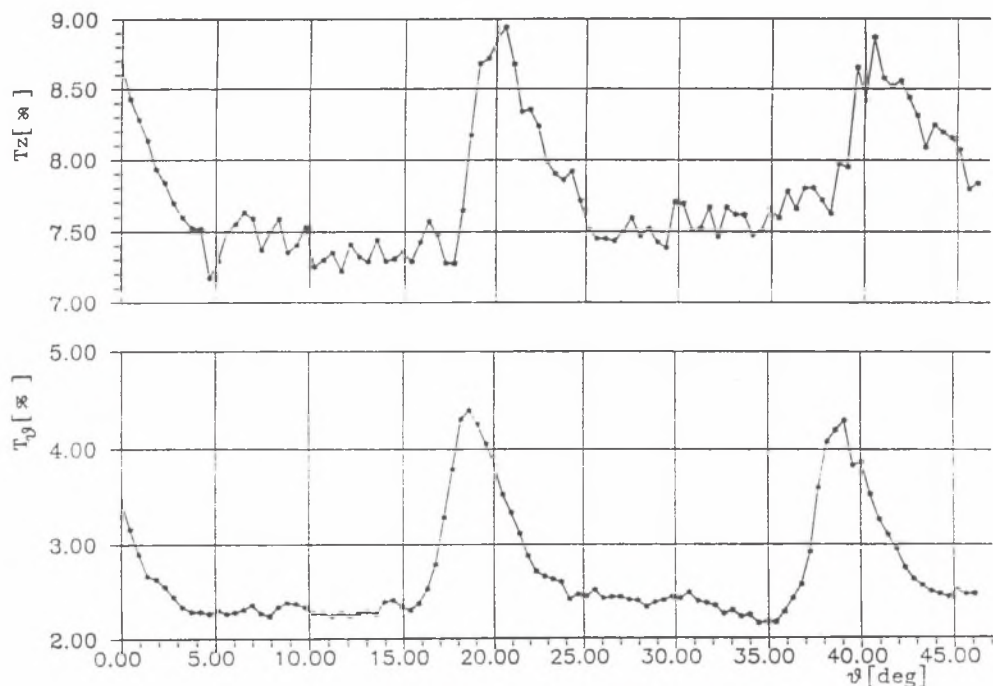
Przedstawione stanowisko stwarza szerokie możliwości prowadzenia badań szeregu nie rozpoznanych do końca zjawisk występujących w trójwymiarowym, turbulentnym przepływie w osiowym stopniu sprężającym. Szczególnie obiecujący jest opracowany i sprawdzony w niniejszej pracy system periodycznego wielopróbkowego sondowania pola prędkości.

Przeprowadzone wstępnie badania wskazują na możliwość wyznaczania rozkładu intensywności turbulencji i naprężeń Reynoldowskich w wybranych przekrojach przestrzeni międzywieńcowych stopnia ze szczególnym uwzględ-

Rys. 4.6. Rozkłady naprężeń Reynoldowskich $\overline{C_z C_\vartheta}$ Fig. 4.6. Reynolds stresses $\overline{C_z C_\vartheta}$ distributions at exit of the impeller

nieniem przemieszczania się wirów w obszarze nadłopatkowym, przepływów wtórnych w pobliżu piasty oraz rozpoznanie charakterystyk turbulencji w śladzie pozałopatkowym.

Znajomość tych zjawisk ma istotne znaczenie praktyczne z uwagi na ich bezpośredni wpływ na sprawność pracy, własności akustyczne oraz warunki wytrzymałościowe układu łopatkowego stopnia wentylatorowego.



Rys. 4.7. Rozkłady intensywności turbulencji

Fig. 4.7. Turbulence distributions T_z , T_b at exit of the impeller

LITERATURA

- [1] Witkowski A.: A New Conception of Theoretical and Experimental Investigations of Losses in Axial Compressor Impeller. Proc. of the Ninth Conference on Fluid Machinery, Budapest 1991 r.
- [2] Witkowski A., Stozik M., Mirski M.: Stanowisko do badań termooanemometrycznych trójwymiarowego, turbulentnego przepływu za kołem wirnikowym osiowego stopnia sprężającego metodą periodycznego, zsynchronizowanego z liczbą obrotów próbkowania. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. CMP zeszyt 103, Łódź 1993 r.
- [3] Jorgensen F. E.: Characteristics and Calibration of a Triple Split Probe for Reversing Flows. DISA Information No 27, 1982 r.

- [4] Materiały informacyjne firmy DANTEC: Triple Split Fiber Probes.
- [5] Bendat I. S., Piersol A. G.: *Random Data Analysis and Measurement Procedures*, pp. 425–483 Wiley, New York 1986 r.
- [6] Evans R. L.: Turbulence and Unsteadiness Measurements Downstream of a Moving Blade Row. *ASME Journal of Engineering for Power*, vol. 97, January 1975 r., pp. 131–137.
- [7] Binder A., Schroeder H., Hourmouziadis J.: Turbulence Measurements in a Multistage Low-Pressure Turbines. *ASME Journal of Turbomachinery*, vol. 111, April 1989 r., pp. 153–161.

Abstract

Due to progress in data reduction techniques, a full digital operating measuring technique based on triple split probe was built up in order to determine the unsteady flow field downstream of rotors, by nonrotating stationary fixed probe. Anemometer outputs at a point relative to impeller blades channel are sampled periodically with reference to pulses from optical incremental shaft encoders connected directly with shaft of impeller. The advantage of this technique than others is that relative positions of the sampling points are strictly fixed and independent from fluctuation of the rotating speed during spatial resolution and allows measurements without restrictions in the flow angle i. e. the probes are well suited for reversing flow and eddy structures. So this probe has always optimum positions with respect to every particular for situation and mustn't to be revolved during the measurements. As all the sampling points on the same circumference are scanned in every revolution, it is possibly to save notably the measuring time, thus to prevent a considerable change in the three sensor probe owing to contamination. It should be stressed also that probe is more robust and less sensitive to contamination than wire probes. The research axial flow compressor stage as described in this paper has provisions among other things, for carrying out the following measurements:

1. Rotor blade static pressure
2. Upstream and downstream flow field of the rotor
3. Transport of rotor wakes in the blade row spacing and stator passage
4. The unsteady flow associated with rotor stator interaction.