

Andrzej WITKOWSKI, Jacek ZUKOWSKI, Michał STROZIK  
Politechnika Śląska, Gliwice

## ANALIZA ZJAWISK NIEUSTALONYCH ORAZ ZANIKANIA ŚLADU POZAŁOPATKOWEGO W PRZEPLYWIE ZA KOŁEM WIRNIKOWYM OSIOWEGO NISKOOBROTOWEGO STOPNIA SPRĘŻAJĄCEGO

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań nieustalonego pola prędkości, za kołem wirnikowym osiowego stopnia sprężającego, z wykorzystaniem systemu pomiarowego próbkowania cyklicznego, przy zastosowaniu sond termooanemometrycznych z trójdzielną folią. Szczególną uwagę zwrócono na zanikanie zjawisk nieustalonych losowych i periodycznych w przestrzeni międzywieńcowej koła wirnikowego i kierownicy tylnej w funkcji obciążenia aerodynamicznego stopnia. Wszystkie wielkości charakteryzujące przepływ w śladzie pozałopatkowym osiągają największe wartości w obszarze krawędzi wylotowych łopatek koła wirnikowego przy najniższych wartościach wskaźnika przepływu, po czym gwałtownie maleją, tym szybciej, im bardziej stopień sprężający jest obciążony aerodynamicznie.

## THE ANALYSIS OF UNSTEADY FLOW FIELD AND THE DECAY CHARACTERISTICS OF THE ROTOR BLADE WAKE IN THE AXIAL FLOW LOW SPEED COMPRESSOR STAGE

**Summary.** In the paper the three-dimensional unsteady flow field downstream of the rotor of the axial flow compressor stage has been investigated experimentally using a periodic multisampling measuring system with triple-split fiber probes. Special emphasis on the decay characteristics of the periodic and unresolved unsteadiness in the rotor stator blade row spacing at different point of operation has been made. While the rotor blade wake characteristics are highest in the trailing edge region they decay rapidly as the wake travels downstream. However they decay much faster at the larger aerodynamic load of the stage.

## 1. WPROWADZENIE

Rozpoznanie charakterystyk przepływu ustalonego i nieustalonego w śladzie pozałopatkowym koła wirnikowego w osiowych stopniach sprężających oraz wpływu tego śladu na wzajemne oddziaływanie wieńców łopatkowych wirnika i kierownicy tylnej w funkcji obciążenia aerodynamicznego ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia własności aerodynamicznych, mechanicznych ze względu na drgania oraz akustycznych tych maszyn. Ślad pozałopatkowy koła wirnikowego jest źródłem strat w stopniu w wyniku mieszania się uboższego energetycznie przepływu w śladzie z przepływem głównym. Rozpoznanie procesów zanikania zjawisk niestacjonarnych w śladzie pozałopatkowym wirnika jest niezbędne do właściwego zaprojektowania następnych wieńców łopatkowych. Kolejnym istotnym problemem jest analiza zjawisk przepływowych towarzyszących zbliżaniu się punktu pracy stopnia do pracy niestatecznej. Wprawdzie liczba badań dotyczących śladu pozałopatkowego w maszynach przepływowych jest bardzo duża [1], [2], [3], [4], [5], brak jednak wyczerpujących informacji na temat wpływu obciążenia aerodynamicznego na charakterystykę przepływu niestacjonarnego w śladzie pozałopatkowym wirnika w stopniu sprężarki osiowej. Stosownie do tego w niniejszej pracy przeprowadzono szczegółowe badania struktury przepływu w przekroju wylotowym koła wirnikowego osiowego stopnia sprężającego oraz zanikania wielkości charakteryzujących przepływ w śladzie pozałopatkowym w przestrzeni międzywieńcowej kierownicy tylnej w wybranych punktach charakterystyki aerodynamicznej stopnia.

## 2. STANOWISKO BADAWCZE I APARATURA POMIAROWA

**Stanowisko badawcze.** Układ przepływowy modelowego osiowego stopnia sprężającego MOSS [6], znajdującego się w Laboratorium Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, 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 jednostką napędową. Koło wirnikowe o stosunku średnic  $v = 0.56$  składa się z cylindrycznej piasty stalowej z zamocowanymi na

niej, za pomocą śrub, szesnastoma łopatkami zaprojektowanymi zgodnie z zasadą stałego wiru. Przyjęto profil C4 o szkieletowej kołowej. Ze względów konstrukcyjnych zastosowano dyfuzor pierścieniowy, zakrzywiony, wykonany z epidianu zbrojonego włóknem szklanym. W przekroju wylotowym dyfuzora zamontowane jest żaluzjowe urządzenie dławiące.

Stopień modelowy podłączony jest po stronie ssania do rurociągu pomiarowego. Podstawowymi elementami stanowiska pomiarowego są: rurociąg pomiarowy z wymiennymi wlotami lemniskatowymi do pomiaru strumienia przepływu oraz silnik prądu stałego o mocy 30 kW z tyrystorową regulacją prędkości obrotowej. Szczegóły konstrukcyjne stanowiska oraz charakterystyka aerodynamiczna stopnia przedstawione zostały we wcześniejszych publikacjach autorów [6], [7], [8].

**System próbkowania pola prędkości.** W celu przeprowadzenia okresowego, zsynchronizowanego z kątowym położeniem łopatek koła wirnikowego próbkowania pola prędkości opracowano system pomiarowy zapewniający proces inicjowania, pobierania i przetwarzania wielkości pomiarowych z sond termooanemometrycznych z trójdzielną folią (STTF):

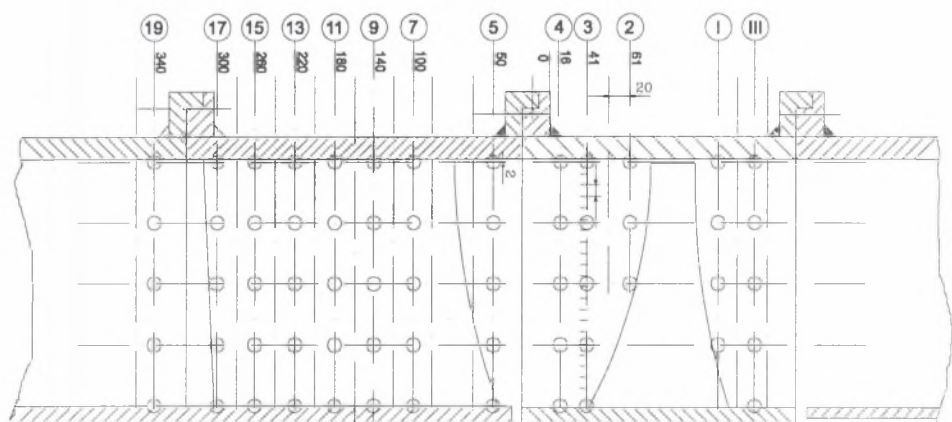
- sondy prostej, w której oś czujnika pokrywa się z osią uchwyty sondy;
- sondy  $90^\circ$ , w której oś czujnika usytuowana jest pod kątem prostym w stosunku do osi uchwyty sondy.

Główne elementy systemu pomiarowego to:

1. Blok zasilania i regulacji silnika napędowego. Modelowy osiowy stopień sprzężający zasilany jest silnikiem elektrycznym prądu stałego o mocy 30 kW, zasilanym przez szafę tyrystorową. Parametry układu zasilającego umożliwiają zmianę prędkości obrotowej koła wirnikowego w zakresie 10-3000 obr/min.
2. Blok pomiarowy. W skład bloku pomiarowego wchodzi: sonda termooanemometryczna, trzykanałowy układ automatycznych mostków pomiarowych oraz układ przetwarzania analogowo-cyfrowego. W pomiarach synchronicznych wykorzystuje się trzy kanały pomiarowe, umożliwiające próbkowanie sygnału z częstotnością 33 kHz w każdym torze pomiarowym. Podczas każdego obrotu wału impuls synchronizujący uruchamia "sekwencję pomiarową", zawierającą 100 próbek napięć z trzech sekcji sondy termooanemometrycznej, rozmieszczonych równomiernie wzdłuż obwodu obejmującego wybraną liczbę kanałów łopatkowych koła wirnikowego.

3. Blok synchronizacji. Zadaniem bloku synchronizacji jest wytworzenie impulsów inicjujących przetwarzanie A/C, odpowiadające określonej, wybranemu kątowemu położeniu koła wirnikowego.
4. Blok przetwarzania danych pomiarowych. Blok ten, którego zasadniczym elementem jest komputer laboratoryjny typu 486DX100, realizuje zasadnicze cztery zadania związane z procesem pomiaru, obliczaniem chwilowych wartości prędkości, uśrednianiem cyklicznym i weryfikacją wyników pomiarowych, analizą końcową i prezentacją graficzną otrzymanych wyników.

### 3. METODA BADAŃ ORAZ PRZETWARZANIA DANYCH POMIAROWYCH



Rys.3.1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych

Fig. 3.1. Locations of measurements

Na rysunku 3.1 przedstawiono lokalizację sond TSFP. W celu określenia rozkładu parametrów przepływu nieustalonego wzdłuż wysokości łopatki na sływie, próbkowanie pola prędkości prowadzone było na 38 promieniach w przekroju osiowym 3. Zanikanie wielkości charakterystycznych śladu pozałopatkowego przeprowadzono na średnim promieniu w 19 przekrojach osiowych za kołem wirnikowym oraz na średniej linii w kanale międzyłopatkowym kierownicy tylnej. W każdym punkcie pomiarowym zbierano sekwencję 100 próbek prędkości rozmieszczonych równomiernie wzdłuż obwodu obejmującego

w przybliżeniu dwie podziałki i uśrednionych grupowo dla 1000 obrotów zgodnie z zależnością:

$$\tilde{C}_m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_{m,n} . \quad (3.1)$$

Prędkość średnią otrzymamy w wyniku uśrednienia uśrednionej grupowo prędkości przez liczbę punktów próbkowania M w kierunku obwodowym:

$$\bar{C} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \tilde{C}_m = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{m,n} . \quad (3.2)$$

Prędkość chwilowa  $C(x,\tau)$  może zostać zdekomponowana do postaci trójskładnikowej:

$$C = \bar{C} + \tilde{C}' + C' , \quad (3.3)$$

gdzie:

- losowa fluktuacja prędkości

$$C'_{m,n} = C_{m,n} - \tilde{C}_m , \quad (3.4)$$

- okresowa fluktuacja prędkości

$$\tilde{C}'_m = \tilde{C}_m - \bar{C} . \quad (3.5)$$

Przeprowadzona dekompozycja chwilowej prędkości umożliwia obliczenie składowej osiowej, obwodowej i promieniowej oraz autokorelacji i skrośnej korelacji zarówno periodycznej, jak i losowej.

Składowe niestacjonarności losowej

$$T_{z,i} = \frac{\sqrt{\bar{C}_{z,i}^{\prime 2}}}{\bar{C}_i} \cdot 100\% \quad T_{\theta,j} = \frac{\sqrt{\bar{C}_{\theta,j}^{\prime 2}}}{\bar{C}_j} \cdot 100\% \quad T_{r,i} = \frac{\sqrt{\bar{C}_{r,i}^{\prime 2}}}{\bar{C}_i} = 100\% , \quad (3.6)$$

gdzie składowe losowe korelacji prędkości mają postać:

$$\bar{C}_{z,j}^{\prime 2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_{z,j,n} - \tilde{C}_{z,j})^2 , \quad (3.7)$$

$$\bar{C}_{\theta,j}^{\prime 2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_{\theta,j,n} - \tilde{C}_{\theta,j})^2 , \quad (3.8)$$

$$\bar{c}_{r,j}^{\prime 2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_{r,j,n} - \tilde{c}_{r,j})^2. \quad (3.9)$$

Składowe losowe korelacji skróśnej:

$$\overline{(C'_z C'_{g,j})} = \frac{1}{U_m^2} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{z,j,n} - \tilde{c}_{z,j}) (C_{g,j,n} - \tilde{c}_{g,j}) \right], \quad (3.10)$$

$$\overline{(C'_z C'_{r,j})} = \frac{1}{U_m^2} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{z,j,n} - \tilde{c}_{z,j}) (C_{r,j,n} - \tilde{c}_{r,j}) \right], \quad (3.11)$$

$$\overline{(C'_g C'_{r,j})} = \frac{1}{U_m^2} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{g,j,n} - \tilde{c}_{g,j}) (C_{r,j,n} - \tilde{c}_{r,j}) \right]. \quad (3.12)$$

Składowe periodyczne korelacji skróśnej

$$\overline{(\tilde{c}'_z \tilde{c}'_{g,j})} = \frac{1}{U_m^2} [(C_{z,j} - \bar{c}_z) (\tilde{c}_{g,j} - \bar{c}_g)], \quad (3.13)$$

$$\overline{(\tilde{c}'_z \tilde{c}'_{r,j})} = \frac{1}{U_m^2} [(C_{z,j} - \bar{c}_z) (\tilde{c}_{r,j} - \bar{c}_r)], \quad (3.14)$$

$$\overline{(\tilde{c}'_g \tilde{c}'_{r,j})} = \frac{1}{U_m^2} [(\tilde{c}_{g,j} - \bar{c}_g) (\tilde{c}_{r,j} - \bar{c}_r)]. \quad (3.15)$$

## 4. WYNIKI BADAŃ

W celu określenia wpływu punktu pracy stopnia, badania zjawisk nieustalonych występujących w śladzie pozałopatkowym koła wirnikowego przeprowadzono w czterech punktach charakterystyki aerodynamicznej [6]: w punkcie odpowiadającym maksymalnemu wskaźnikowi wydajności ( $\varphi=0.423$ ), nominalnemu wskaźnikowi wydajności ( $\varphi_N = 0.374$ ) oraz w dwóch punktach ( $\varphi = 0.338$  oraz  $\varphi = 0.323$ ) o wskaźnikach wydajności mniejszych od nominalnego. Punkt pracy dla  $\varphi = 0.323$  jest położony w pobliżu punktu przegięcia charakterystyki aerodynamicznej koła wirnikowego.

### 4.1. Zmienność wielkości charakterystycznych śladu pozałopatkowego wzdłuż wysokości łopatki na splywie

Celem badań było określenie wpływu obszarów brzegowych w pobliżu piasty i osłony zewnętrznej oraz punktu pracy stopnia na wielkości charakterystyczne śladu pozałopatkowego koła wirnikowego. Analizie poddano następujące zależności:

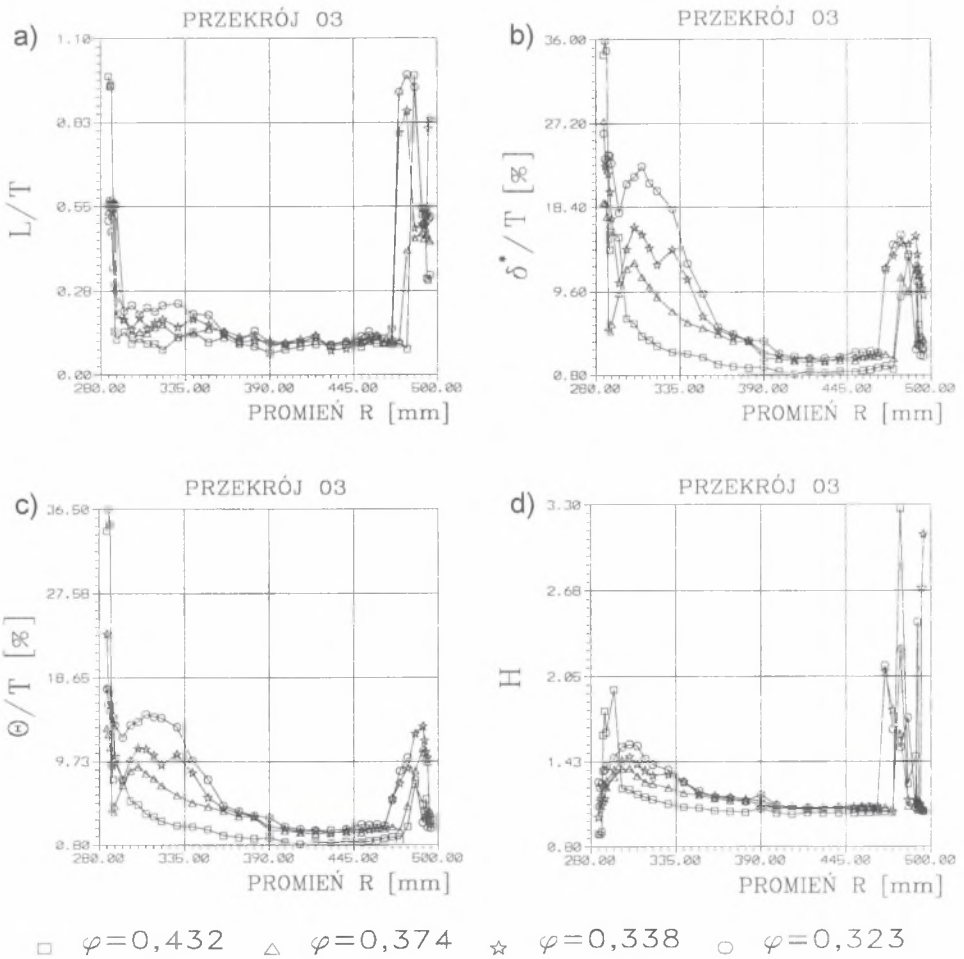
- szerokość śladu łopatkowego określoną w połowie wysokości śladu tzw. semiślad,  $L/T$ , (rys. 4.1a);
- miarę liniową straty strumienia przepływu (rys. 4.1b)

$$\delta^* = \int_a^{\delta} \left( 1 - \frac{\bar{W}(n)}{\bar{W}} \right) dn; \tag{4.1}$$

- miarę liniową straty pędu strumienia (rys. 4.1c)

$$\theta = \int_a^{\delta} \left[ \left( 1 - \frac{\bar{W}(n)}{\bar{W}} \right) \cdot \frac{\bar{W}(n)}{\bar{W}} \right] dn; \tag{4.2}$$

- parametr kształtu śladu pozałopatkowego  $H = \delta^* / \theta$  (rys. 4.1d).



Rys. 4.1. Rozkład charakterystycznych wielkości geometrycznych śladu pozałopatkowego wzdłuż promienia

Fig. 4.1. Spanwise variation of the geometrical characteristics of the wake



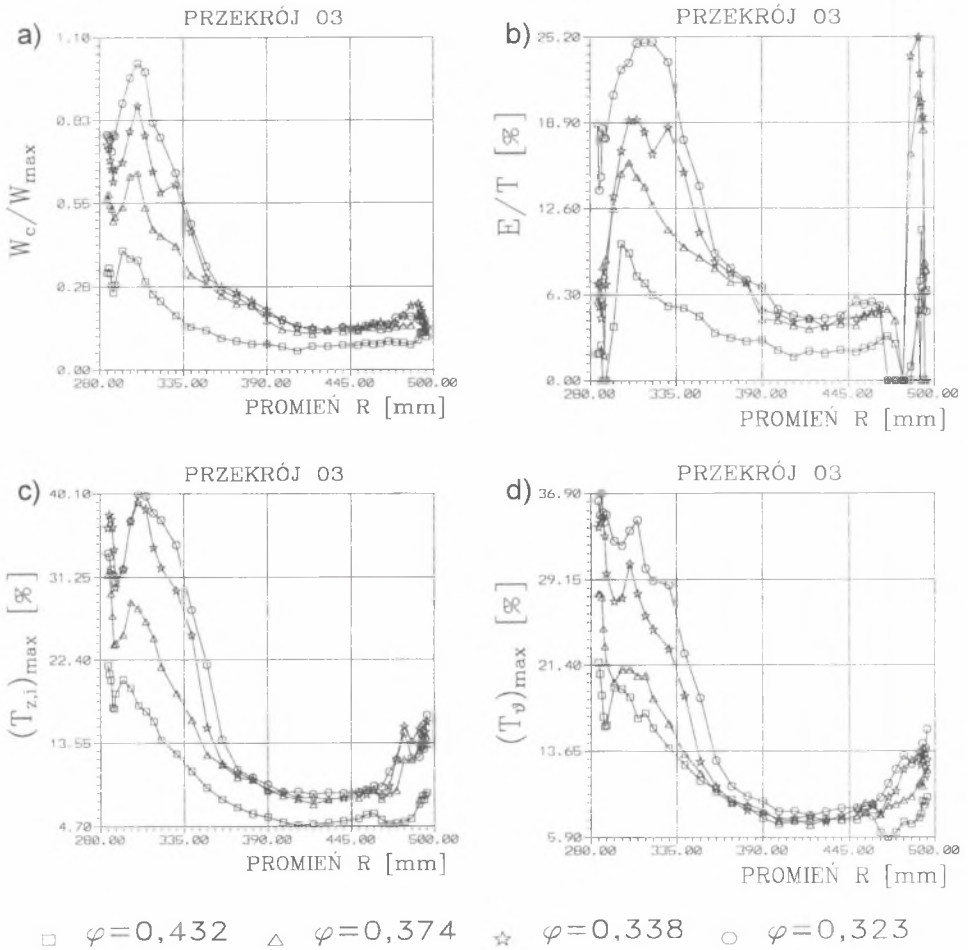
Na rysunkach 4a, b, c, d uwidoczony jest silny wpływ piasty i osłony zewnętrznej na wielkości charakteryzujące geometrię śladu pozałopatkowego. Grubość względna śladu pozałopatkowego, odniesiona do podziałki łopatek  $T$ , jest w przybliżeniu stała w obszarze przepływu głównego, po czym gwałtownie, wielokrotnie, narasta w obszarze piasty i osłony zewnętrznej, tym silniej, im bardziej stopień jest obciążony aerodynamicznie. Od obciążenia aerodynamicznego zależy również odległość od ścianek wystąpienia zaburzenia i zmienia się od 10 mm przy piascie, przy najmniejszym obciążeniu ( $\varphi = 0.423$ ) do połowy wysokości kanału przy obciążeniu największym ( $\varphi = 0.323$ ). W jeszcze większym stopniu silny wpływ powierzchni brzegowych przy większych obciążeniach aerodynamicznych uwidacznia się w przypadku miar liniowych zmniejszenia strumienia wydajności (rys. 4.1b) oraz straty pędu (rys. 4.1c). Wzrost obciążenia aerodynamicznego powoduje intensywne narastanie warstw przyściennych, oderwanie strug oraz przepływy zwrotne, które szczególnie intensywnie występują w pobliżu piasty, gdzie profile łopatkowe są najbardziej obciążone aerodynamicznie. Potwierdzenie tego zjawiska można zaobserwować na kolejnych wykresach (rys. 4.2a, b, c, d), ilustrujących zmienność defektu prędkości  $W_d/W_{\max}$  (rys. 4.2a), względnej miary liniowej straty energii kinetycznej  $E/T$ , gdzie:

$$E = \int_a^b \left[ 1 - \left( \frac{\tilde{W}(n)}{\tilde{W}} \right)^2 \right] \cdot \frac{\tilde{W}(n)}{\tilde{W}} dn \quad (4.3)$$

oraz składowej osiowej  $T_z$  (rys. 4.2c) i obwodowej  $T_g$  (rys. 4.2d) niestacjonarności przepływu za kołem wirnikowym w funkcji promienia oraz wskaźnika wydajności. We wszystkich czterech przypadkach można zaobserwować taki sam jakościowy charakter przebiegu krzywych. Niskie, ustabilizowane na równym poziomie wartości odpowiednich wielkości w górnej części kanału łopatkowego, począwszy w przybliżeniu od środka, a skończywszy w odległości mniej więcej 10% wysokości łopatek od ich wierzchołka oraz silny ich wzrost przy piascie, tym silniejszy i rozpoczynający się na tym większym promieniu, im większe jest obciążenie układu łopatkowego. Biorąc pod uwagę, że użyte w pomiarach czujniki termooanemometryczne nie umożliwiają pomiaru ciśnień, do przybliżonej oceny jakościowej strat występujących w obszarze śladu pozałopatkowego koła wirnikowego można wykorzystać przedstawione na wykresach (rys. 4.2) rozkłady niestacjonarności przepływu oraz w szczególności rozkład wzdłuż promienia miary liniowej zmniejszenia energii



kinetycznej. Stwarza to możliwość oceny jakościowej pracy układu łopatkowego zarówno w nominalnym punkcie pracy ( $\varphi_N = 0.374$ ), jak i przy zmiennym obciążeniu.



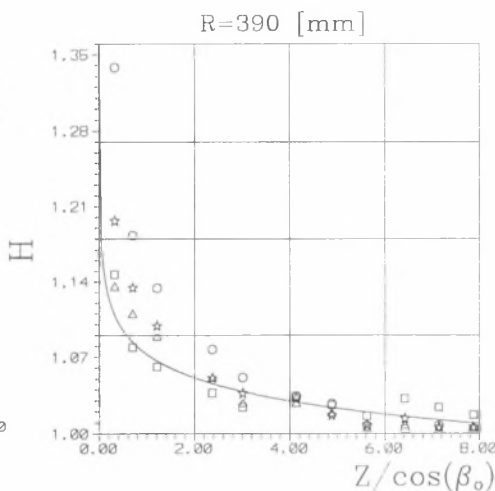
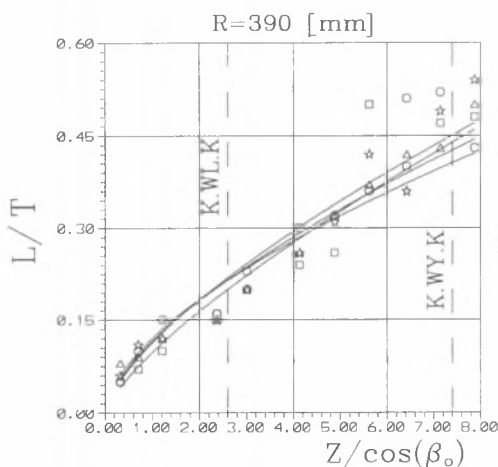
Rys. 4.2. Rozkład wielkości charakteryzujących niestacjonarność przepływu w śladzie pozałopatkowym wzdłuż promienia

Fig. 4.2. Spanwise distributions of characteristics of unsteady wakes

W przypadku analizowanego wieńca łopatkowego już w nominalnym punkcie pracy można zaobserwować w obszarze bliskim piasty duży wzrost zarówno niestacjonarności przepływu, jak i miary liniowej straty energii kinetycznej, co sugeruje nadmierne obciążenie aerodynamiczne palisad łopatkowych w pobliżu piasty.

## 4.2. Charakterystyka zanikania śladu pozałopatkowego koła wirnikowego w przestrzeni międzywieńcowej i międzyłopatkowej kierownicy tylnej

Wiedza dotycząca charakterystyk zanikania defektu prędkości oraz niestacjonarności przepływu w śladzie pozałopatkowym jest niezbędna do zrozumienia zjawisk towarzyszących wzajemnemu oddziaływaniu następujących po sobie wieńców wirnikowych i statorowych. Ślad pozałopatkowy w zależności od odległości od krawędzi wylotowej łopatek koła wirnikowego może być zakwalifikowany do trzech kategorii: w obszarze krawędzi wylotowych, śladu bliskiego oraz śladu dalekiego [5]. Najczęściej przyjmuje się, że obszar tuż za krawędzią rozciąga się do kilkunastu procent cięciwy, obszar bliski od 20% do 30%, a daleki poza tym obszarem [8].



Rys. 4.3. Zmienność grubości semiśladu w funkcji odległości od krawędzi wylotowych łopatek dla różnych  $\varphi$

Rys. 4.4. Zmienność parametru kształtu śladu pozałopatkowego w funkcji odległości od krawędzi wylotowych łopatek dla różnych  $\varphi$

Fig. 4.3. Variation of semi-wake width with streamwise distance at different  $\varphi$

Fig. 4.4. Variation of rotor wake shape factor with streamwise distance at different  $\varphi$

Na rysunkach 4.3 i 4.4 przedstawiono porównanie zachowania się geometrii śladu pozałopatkowego opisanej kolejno przez zanikanie grubości semiśladu (rys. 4.3) oraz parametr kształtu śladu pozałopatkowego (rys. 4.4) określonych w czterech punktach charakterystyki aerodynamicznej wieńca, na średnim promieniu, w funkcji zredukowanej do

średniej cięciwy łopatki wirnikowej odległości osiowej. Grubość śladu pozałopatkowego narasta stosunkowo intensywnie w obszarze tuż za krawędzią wylotową łopatek wirnika, po czym przyrost ten maleje w miarę przemieszczania się śladu w przestrzeni międzywieńcowej stopnia oraz międzyłopatkowej kierownicy tylnej (KWL.K – krawędź wlotowa kierownicy tylnej, K.WY.K – krawędź wylotowa kierownicy tylnej). Największa grubość semiśladu odpowiada najmniejszej wartości wskaźnika wydajności. Funkcja opisująca zależność grubości połówkowego śladu pozałopatkowego od zredukowanej odległości za wirnikiem wentylatora ma postać:

$$\frac{L}{T} = a \cdot \left( \frac{Z}{\cos \beta_o} \right)^b \quad (4.4)$$

Na rysunku 4.5 przedstawiono z kolei zmienność parametru kształtu śladu pozałopatkowego z odległością za krawędzią wylotową koła wirnikowego, przy zmiennym wskaźniku wydajności. Funkcja opisująca zależność parametru kształtu śladu pozałopatkowego od zredukowanej odległości za krawędzią wylotową izolowanego profilu, określona przez Spence'a [9], ma postać:

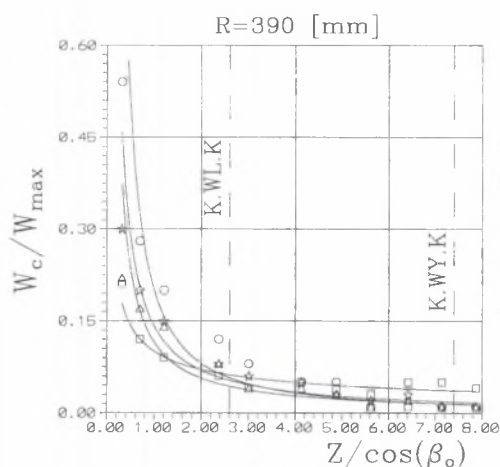
$$\left( 1 - \frac{1}{H} \right) = \left( 1 - \frac{1}{H_{te}} \right) \cdot \left( 40 \cdot \left( \frac{Z}{\cos \beta_o} \right) + 1 \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.5)$$

gdzie:

H - wartość współczynnika kształtu w śladzie pozałopatkowym;

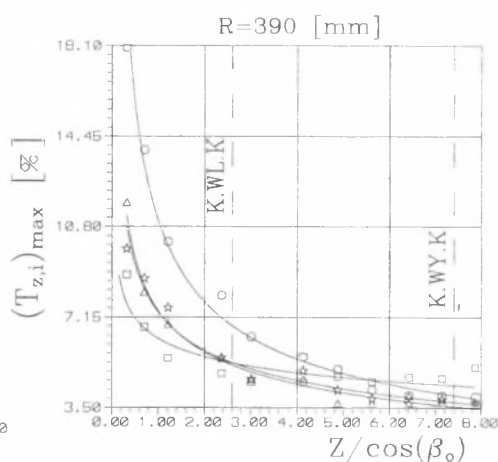
$H_{te}$  - szacowana wartość współczynnika kształtu na splywie z łopatki wirnika.

W pracy [10] wykazano, że równanie (4.5) może być również wykorzystane z wystarczającą dokładnością do opisu zmienności parametru kształtu za palisadą sprężarkową. Na rysunku 4.5 przedstawiono porównanie krzywej wykreślonej linią ciągłą na podstawie powyższego równania ze zmiennością parametru kształtu wyznaczonego eksperymentalnie dla wirującej palisady. W obszarze krawędzi wylotowej dokładność jest niezadowalająca, szczególnie przy małych wartościach wskaźnika wydajności  $\varphi$ , natomiast w dalszej odległości od krawędzi równanie (4.5) dokładnie odwzorowuje wartości pomiarowe parametru kształtu. Można więc zarekomendować to równanie do przewidywania zmienności parametru śladu również za wirującymi palisadami sprężarkowymi.



Rys. 4.5. Zanikanie defektu prędkości w śladzie poza-łopatkowym w funkcji odległości od krawędzi wylotowych łopatek dla różnych  $\varphi$

Fig. 4.5. Decay of rotor wake velocity defect at different  $\varphi$



Rys. 4.6. Zanikanie maksymalnej wartości składowej osiowej niestacjonarności przepływu za kołem wirnikowym dla różnych  $\varphi$

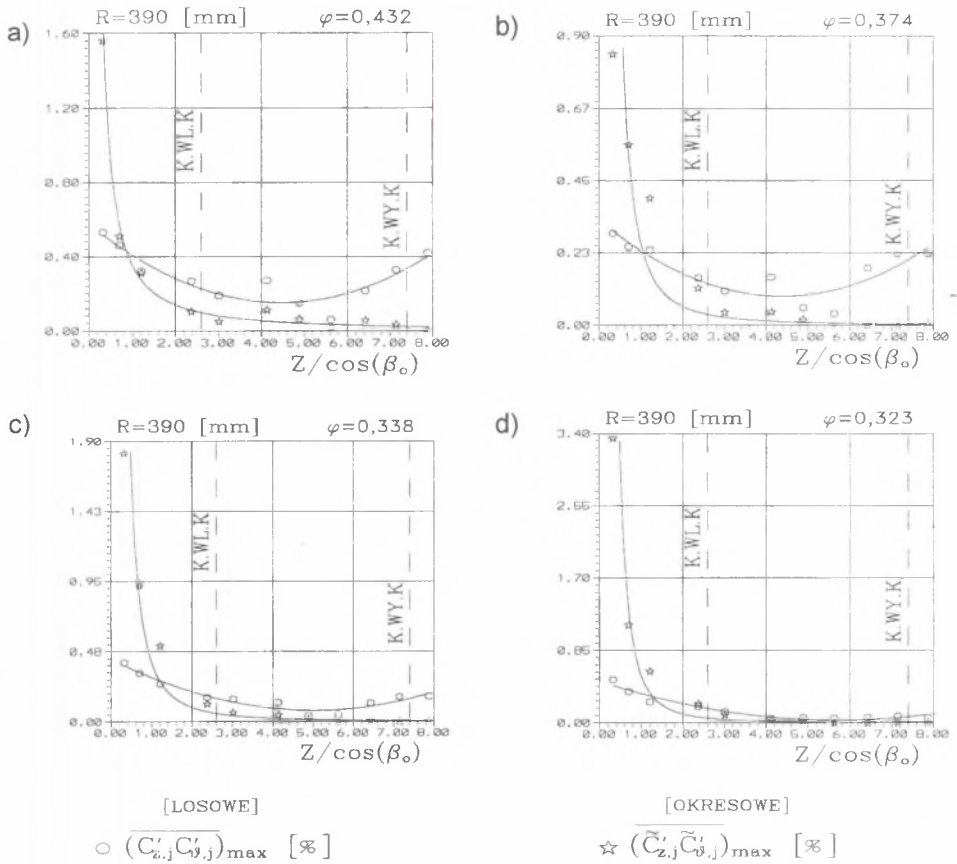
Fig. 4.6. Decay of rotor wake maximum unresolved unsteadiness at different  $\varphi$

Zgodnie z rysunkiem 4.4 parametr kształtu gwałtownie maleje tuż za krawędzią wylotową łopatek koła wirnikowego, po czym spadek wartości jest łagodniejszy, w miarę jak ślad pozałopatkowy przemieszcza się w obszarze kierownicy tylnej. Największą wartość parametr kształtu osiąga tuż za krawędzią wylotową koła wirnikowego przy największym obciążeniu aerodynamicznym, po czym obniża swą wartość znacznie szybciej niż przy mniejszych obciążeniach aerodynamicznych, przyjmując najmniejszą wartość, począwszy od względnej osiowej odległości w granicach 5.0 w obszarze kierownicy tylnej. Podobną, jeszcze wyraźniej zaakcentowaną tendencję zaobserwować można w odniesieniu do charakterystyki zanikania defektu prędkości  $W_c$  (rys. 4.5), który również osiąga swą największą wartość i zanika jeszcze szybciej w punkcie pracy bliskim obszarowi niestabilnej pracy stopnia ( $\varphi=0.323$ ). Szybki spadek defektu prędkości w obszarze krawędzi wylotowej łopatek koła wirnikowego stanowi efekt wysokiej niestacjonarności przepływu oraz występowania przepływów wtórnych. W obszarze śladu bliskiego i dalekiego zanikanie defektu prędkości jest znacznie powolniejsze. Funkcja opisująca zależność defektu prędkości względnej od zredukowanej odległości za wirnikiem wentylatora jest typu potęgowego:

$$\frac{W_c}{W_{\max}} = a^* \left( \frac{Z}{\cos \beta_o} \right)^b \quad (4.6)$$

#### 4.3. Charakterystyka zanikania zjawisk niestacjonarnych w śladzie pozałopatkowym

Na rysunku 4.6 przedstawiono zanikanie składowej osiowej niestacjonarności przepływu w śladzie pozałopatkowym. Obserwujemy tu szybkie zanikanie niestacjonarności w miarę oddalania się od krawędzi wylotowych łopatek. Korelacja osiąga tym wyższe wartości i zanika tym szybciej, im wyższe jest obciążenie aerodynamiczne łopatek. Zanikanie skrótnych korelacji maksymalnych fluktuacji prędkości zarówno periodycznych, jak i losowych w funkcji wskaźnika wydajności przedstawione zostało na rys. 4.7. Periodyczna niestacjonarność zdefiniowana równaniami (3.13) (3.14) (3.15) w rozdziale 3 jest spowodowana ruchem względnym następujących po sobie wieńców łopatkowych, podczas gdy niestacjonarność losowa wynika z fluktuacji pola prędkości nieskorelowanej z prędkością koła wirnikowego. We wszystkich przypadkach korelacji maksymalna wartość korelacji periodycznej fluktuacji prędkości jest znacznie większa od maksymalnej losowej korelacji w obszarze krawędzi wylotowej łopatek. Wynika to z tego, że periodyczna korelacja prędkości wywołana jest periodycznymi zmianami prędkości wzdłuż podziałki łopatek, które są bardzo duże w śladzie pozałopatkowym. Natomiast korelacje periodyczne zanikają szybciej niż korelacje losowe, tak że maksymalne periodyczne korelacje prędkości przyjmują wartość poniżej losowych maksymalnych korelacji prędkości już w obszarze bliskiego śladu pozałopatkowego, zbliżając się do zera w obszarze kanałów międzyłopatkowych kierownicy tylnej. Losowe korelacje fluktuacji prędkości również maleją w obszarze tuż za krawędzią wylotową łopatek koła wirnikowego, po czym w odróżnieniu od korelacji periodycznych fluktuacji prędkości ponownie narastają one w obszarze wylotowym kierownicy tylnej. Stanowi to przypuszczalnie efekt generowania warstw przyściennych i związanych z tym przepływów wtórnych w tym obszarze. Wszystkie zależności korelacyjne fluktuacji prędkości aproksymowane zostały za pomocą odpowiednich funkcji potęgowych.



Rys 4.7. Zanikanie maksymalnych wartości losowych i periodycznych skrośnych pulsacji prędkości w śladzie pozałopatkowym

Fig 4.7. Decay of rotor wake maximum unresolved and periodic velocities cross-correlation

### 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzono badania trójwymiarowego pola przepływu w śladzie pozałopatkowym koła wirnikowego, osiowego niskociśnieniowego stopnia sprężającego w celu lepszego zrozumienia wpływu punktu pracy na fluktuację przepływu. Uzyskane wyniki można podsumować następująco:

1. Defekt prędkości w śladzie pozałopatkowym oraz grubość śladu silnie narastają ze spadkiem strumienia przepływu. Wzrost ten jest tym szybszy, im bliżej punkt pracy stopnia znajduje się punktu pracy niestabilnej;



2. Wszystkie wielkości charakteryzujące przepływ w śladzie pozałopatkowym osiągają największe wartości w obszarze krawędzi wylotowych łopatek koła wirnikowego przy najniższych wartościach wskaźnika przepływu, po czym gwałtownie maleją tym szybciej, im bardziej obciążony aerodynamicznie jest stopień sprężający. Sprawia to, że w obszarze następującego za kołem wirnikowym wieńca statorowego zarówno wielkości geometryczne śladu, jak i niestacjonarności przepływu przy małych wskaźnikach przepływu osiągają wartości niższe od obserwowanych przy wysokich wskaźnikach przepływu;
3. We wszystkich analizowanych przypadkach korelacji prędkości pulsacyjnych maksymalne wartości korelacji prędkości periodycznych są znacznie większe od maksymalnych korelacji losowych w obszarze krawędzi wylotowych koła wirnikowego. Natomiast maksymalne korelacje periodyczne zanikają znacznie szybciej od korelacji losowych, co w efekcie prowadzi do tego, że maksymalne korelacje periodyczne są mniejsze od maksymalnych korelacji losowych w odległości  $\frac{Z}{\cos \beta_a} \approx 1.0$ . Analiza zanikania periodycznych i losowych zjawisk niestacjonarnych umożliwia wyciągnięcie praktycznych wniosków dotyczących doboru odległości pomiędzy sąsiadującymi ze sobą wieńcami przy projektowaniu stopni sprężarek osiowych.

Praca stanowi fragment projektu badawczego o symbolu 7T07A01109 finansowanego przez KBN.

## LITERATURA

1. Ravindranath A., and Lakshminarayana B., *Mean Velocity and Decay Characteristics of the Near and Far-Wake of a Compressor Rotor Blade of Moderate Loading*. ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 102, 1980, pp. 535-548
2. Reynolds B.D., and Lakshminarayana B., *Characteristics of Lightly Loaded Fan Rotor Blade Wakes*. NASA CR - 3188
3. Evans R.L., *Turbulence and Unsteadiness Measurements Downstream of a Moving Blade Row*. ASME Journal of Engineering for Power, 1975, pp. 131-138



4. Davino R., Lakshminarayana B., *Turbulence Characteristics in the Annulus-Wall Boundary Layer and Wake Mixing Region of a Compressor Rotor Exit*, ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 104, 1982, pp. 561-570
5. Zaccaria M.A., Lakshminarayana B., *Unsteady Flow Field Due to Nozzle Wake Interaction with the Rotor in an Axial Flow Turbine: Part II - Rotor Exit Flow Field*. ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 119, 1997, pp. 214-224
6. Witkowski A., Chmielniak T., Stozik M., Mirski M., *Facility for Turbulence and Unsteadiness Measurements Before and Behind a Axial Compressor Rotor Blade by Means of Periodic Multisampling with Triple Split Fiber Probes*. Proceedings of the Engineering System Design Analysis Conference, Vol. 8, - Part B. Design: "Analysis Synthesis and Applications". American Society of Mechanical Engineers, New York, 1994
7. Witkowski A., Chmielniak T., Stozik M., Mirski M., *Stand for investigations of threedimensional turbulent flow in axial compressing stage*. Archiwum Budowy Maszyn nr 3 - 4, Warszawa 1994
8. Witkowski A., Chmielniak T., Stozik M., Mirski M., *Turbulence Measurements in Axial Flow Low Pressure Compressor Stage with the Use of Triple Split Fiber Probes*. VDI Bertichte 1186. VDI Verlag GmbH Dusseldorf, 1995. Proceedings of the 1 European Conference Turbomachinery - Fluid Dynamic and Thermodynamic Aspects, March 1-3, 1995, Erlangen
9. Spence D.A., British Aero-Research Council C.P., 1953, No 125
10. Raj R., and Lakshminarayana B., *Characteristics of the Wake Behind a Cascade of Airfoils*. J. Fluid Mech., Vol. 61, 1973, part 4, pp. 218-228

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Drobnik

## Abstract

The rotor wake flow was measured downstream of the trailing edge of the rotor blades with a triple-split fiber probes TSFP to gain a better understanding of the rotor wake properties and its decay characteristics influenced by the different points of operation. The

spanwise characteristics of the wake geometry and unsteady flow are strongly affected by the aerodynamic load of the rotor. The region of fluctuations becomes higher as the flow rate decreases. The region of highest width of the rotor wake and flow unsteadiness are found close to the hub where extended corner stall exists and close to the outer wall where flow is strongly influenced by the leakage flow. The wake velocity defects, shape factor, maximum unresolved unsteadiness and maximum unresolved velocity cross correlation on the middle radius are highest in the trailing edge region and decreases farther downstream. They decay very rapidly in the trailing edge region and this trend slows in the far wake region. However all of this correlations decay much faster at the larger aerodynamic load of the blades. The variation of the rotor wake shape factor with streamwise distance downstream of the rotor was found matching the correlation developed by Spence [9] and confirmed in the [5] quite well in near and far wake region and not as well in the trailing edge region. In the trailing edge region the maximum periodic velocity cross-correlations are much larger than the maximum unresolved velocity cross-correlations. But the periodic velocity correlations decay much faster than the unresolved correlations. The issue of understanding the flow effects depending on the operating points and particularly near the stability line of compressor are of crucial practical interest for the understanding of flow effects near the stall region.