

Justyn POŁOK

KRYTERIUM STABILNOŚCI CHARAKTERYSTYK
WENTYLATORÓW PROMIENIOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań nad histerezą charakterystyki wentylatorów promieniowych. W części teoretycznej przedstawiono zjawiska występujące w przepływie względnym przez kanały międzyłopatkowe, wprowadzając pojęcia liczb Richardsona i Rosby'ego. W oparciu o wyniki badań określono kryterium stabilności charakterystyki jako funkcji obciążenia i liczby Rosby'ego.

1. WSTĘP

Powstanie pętli histerazy charakterystyki wentylatora promieniowego ma ścisły związek z warunkami przepływu w kanale międzyłopatkowym. Istotny wpływ na powstawanie tego zjawiska ma wielkość cyrkulacji. Względny wektor "w" wzdłuż całej szerokości kanału międzyłopatkowego jest większy przy ścianie ciśnieniowej, odpowiednio do sił Coriolisa. Im większa różnica prędkości względnych Δw tym większa cyrkulacja a tym samym mniejsza skłonność do oderwania.

Różnicę prędkości Δw można wyznaczyć [1]:

$$\Delta w = w_s - w_p = a \left[2 \cdot \omega - \frac{w_m}{R_{\frac{1}{2}}} \right], \quad (1)$$

gdzie:

- a - oznacza szerokość kanału,
- ω - prędkość kątową,
- $R_{\frac{1}{2}}$ - promień krzywizny łopatki,
- w_m - średnia prędkość.

Jak widać, względna prędkość maleje w sposób prawie liniowy od ścianki ssącej do ścianki ciśnieniowej.

Dla liniowego przebiegu, prędkości względne przy ściankach wynoszą [1]:

$$w_p = w_m - \frac{\Delta w}{2}, \quad (a)$$

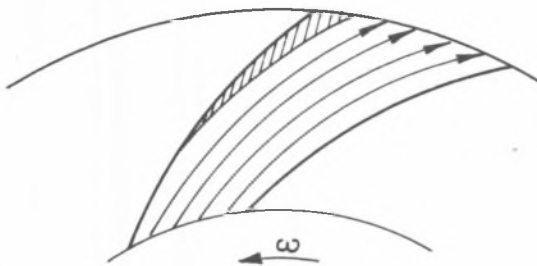
$$w_s = w_m + \frac{\Delta w}{2}. \quad (b)$$

Podstawiając do równań (a) i (b) równanie (1), otrzymamy:

$$w_p = w_m \left(1 + \frac{Q}{2R_2}\right) - a \cdot \omega, \quad (1a)$$

$$w_s = w_m \left(1 - \frac{Q}{2R_2}\right) + a \cdot \omega. \quad (1b)$$

Cząsteczki płynu poruszające się w kierunku powiększających się przekrojów poprzecznych poddane są działaniu siły Coriolisa skierowanej przeciwnie do kierunku wirowania wirnika. Tak więc warstwa przyścienna ma tendencję do przylegania do ciśnieniowej ścianki łopatki oraz do odrywania od powierzchni ssącej łopatki (rys. 1). Siły Coriolisa określają w sposób zdecydowany zachowanie się strumienia i oddziałują na wzrost warstwy przyściennej. Zgodnie z równaniem (1a) przy małych wydatkach

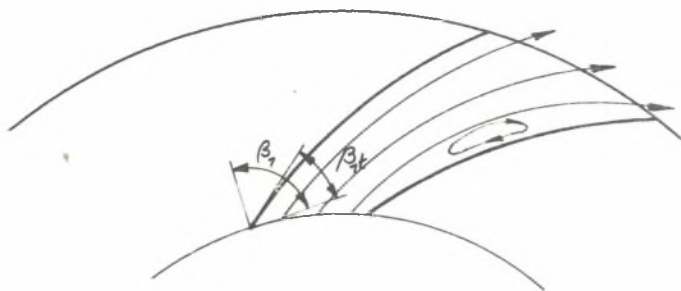


Rys. 1

większość strumienia przylega do ścianki ciśnieniowej. Zgodnie z równaniem (1b) przy małych wydatkach większość strumienia przylega do ścianki ssącej. Im większy wydatek, tym silniejsze odrywanie. Dla wartości wydajności ($Q = Q_n$) nominalnych odrywanie strumienia zanika. Proces ten występuje stopniowo i w niektórych wirnikach, gdzie stopień dyfuzorowości jest zbyt duży, przeciąga się nawet w pobliżu punktu nominalnego, uwidaczniając się w postaci nieciągłości charakterystyk tworząc pętlę histerezy.

Przy wydajnościach znacznie większych od nominalnych, kiedy kąty natarcia osiągają dodatnie wartości szczególnie przy małych promieniach krzywizny "noska" łopatki strumień odrywa się od ciśnieniowej strony łopatki (rys. 2). W tym jednak przypadku odrywanie nie rozprzestrzenia się na całą długość kanału, a pod działaniem siły Coriolisa lokalizuje się na ciśnieniowej stronie łopatki. Przy tym także może występować odrywanie od ssącej strony łopatki. Pojawienie się lokalnego oderwania strumienia od ciśnieniowej strony łopatki doprowadza do nieznacznego zmniejszenia kąta wylotu strumienia β_2 i promienia krzywizny linii prądu. Jak było to omówione wyżej czynniki te występują jednocześnie i dlatego w pewnym stopniu

Przy wydajnościach znacznie większych od nominalnych, kiedy kąty natarcia osiągają dodatnie wartości szczególnie przy małych promieniach krzywizny "noska" łopatki strumień odrywa się od ciśnieniowej strony łopatki (rys. 2). W tym jednak przypadku odrywanie nie rozprzestrzenia się na całą długość kanału, a pod działaniem siły Coriolisa lokalizuje się na ciśnieniowej stronie łopatki. Przy tym także może występować odrywanie od ssącej strony łopatki. Pojawienie się lokalnego oderwania strumienia od ciśnieniowej strony łopatki doprowadza do nieznacznego zmniejszenia kąta wylotu strumienia β_2 i promienia krzywizny linii prądu. Jak było to omówione wyżej czynniki te występują jednocześnie i dlatego w pewnym stopniu



Rys. 2

wzajemnie się kompensują, dzięki czemu przy większych wydajnościach charakterystyka spiętrzenia staje się praktycznie liniowa.

Znalezienie zależności lub wielkości, które mają wpływ na stabilizację przepływu w kanale międzyłopatkowym a jednocześnie stabilizację charakterystyki przepływowej wentylatora jest tematem niniejszego rozważania.

2. EFEKTY UWARSTWIENIA

Jednym z ważnych parametrów określających wzrost warstwy przyściennej jest opóźnienie lub przyspieszenie przepływu; definiowane:

$$\lambda_m = \frac{w_2}{w_1} \quad (2)$$

Wynikowa grubość warstwy przyściennej, odpowiadająca stracie pędu, może być wyliczona ze wzoru Truckenbrodta:

$$\left(\frac{\nu}{I}\right)_m = \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{\lambda_m}\right)^{4 + \frac{2}{n}} \frac{n}{n+1}}{\left(1 - \frac{1}{\lambda_m}\right)\left(4 + \frac{2}{n}\right)} \right] \quad (3)$$

gdzie:

$$\lambda_m = \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta_2} K_I \quad (4)$$

$$K_I = \frac{c_{2m}}{c_{1m}} \quad (5)$$

przy czym wykładnik:

- $n = 6$ - dla przepływu turbulentnego,
- $n = 4$ - dla przepływu turbulentnego bliskiego oderwania,
- $n = 1$ - dla przepływu laminarnego.

Omówiony w rozdz. 1 gradient prędkości można interpretować jako gradient liczby Richardsona [1].

Liczbę tę można zdefiniować [1]:

$$R_{iw} = \frac{2 \cdot \omega}{d \frac{dw}{dy}} \quad (6)$$

R_{iw} jest miarą stabilności wirującej warstwy przyściennej w kanale międzyłopatkowym.

Podobne wyrażenie:

$$R_{ic} = \frac{\frac{w}{R} n}{d \frac{dw}{dy}} \quad (7)$$

jest miarą stabilności warstwy przyściennej zakrzywionej ścianki tarczy nakrywającej, gdzie R_n oznacza promień krzywizny. Suma liczb Richardsona R_{iw} i R_{ic} jest gradientem prędkości względnej i może być przedstawiona w postaci:

$$R_{isp} = \frac{2 \cdot \omega \cdot a}{w_m} \sin \delta - \frac{Q}{R} \frac{\Delta w}{w_m}, \quad (8)$$

po przekształceniu otrzymamy:

$$R_{isp} = \frac{4 \pi \cdot \sin^2 \beta_2 \cdot \varepsilon}{Z} \left[\frac{\sin^2 \beta_2 \cdot \sin \delta}{K_I \cdot \operatorname{tg} \beta_1} - \frac{\varepsilon \cdot \cos \beta_2 - \cos \beta_1}{\varepsilon^2 - 1} \right] \quad (9)$$

gdzie:

$\varepsilon = \frac{d_2}{d_1}$ - stosunek średnic,

δ - kąt nachylenia osi przepływu,

$$K_I = \frac{c_{m2}}{c_{m1}} = \frac{b_1}{b_2} \cdot \frac{1}{\varepsilon},$$

Z - liczba łopatek.

Iloczyn liczby Richardsona i grubości warstwy przyściennej, odpowiadającej stracie pędu, określany jest jako współczynnik obciążenia.

$$D_{sp} = R_{isp} \left(\frac{V}{I} \right)_m \quad (10)$$

Współczynnik obciążenia wydaje się być właściwym parametrem do wyrażenia danych aerodynamicznych wirnika i może stanowić jedno z kryterium stabilności charakterystyki przepływowej. Drugie kryterium może stanowić liczba Rosby'ego definiowana wg [2]

$$\frac{\Delta w}{w_m} = \frac{2}{R_o} \quad (11)$$

R_o - liczba Rosby'ego.

Dla warunków na wlocie do kanału międzyłopatkowego zależność na liczbę R_o będzie następująca:

$$R_o = \frac{\varphi \cdot z \cdot d_2 \cdot \varepsilon^2}{8\pi \cdot b_1 \cdot \sin^2 \beta_1 - \frac{\pi \cdot \varphi \cdot d^2}{2R} \varepsilon \cdot \sin \beta_1} \quad (12)$$

gdzie:

φ - liczba przepływu,

b_1 - szerokość wirnika na wlocie.

Dla punktu optymalnego (φ_o) obliczono dla szeregu wirników wskaźnik obciążenia D_{sp} wg zależności (10) oraz liczbę Rosby'ego wg zależności (12). Grubość warstwy przyściennej obliczono dla przypadku przepływu turbulentnego. Wyniki zestawiono w tabelicy 1.

Tabelica 1

Nr wir.	Dane wirnika						D_{sp}	R_o
	D_2/D_1	b_1 (mm)	b_2 (mm)	β_1	β_2	Z		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
24	1,4	176	130	30	50	12	2,50	3,61
25	1,4	176	130	30	70	16	3,77	4,18
26	1,4	176	130	34	110	24	3,55	8,82
27	1,4	176	130	19	36	10	1,67	6,67
28	1,4	153,5	107,5	19	36	10	1,37	6,69
29	1,4	117,5	71,5	19	36	10	1,67	6,38
30	1,4	176	130	19	36	7	2,38	4,67

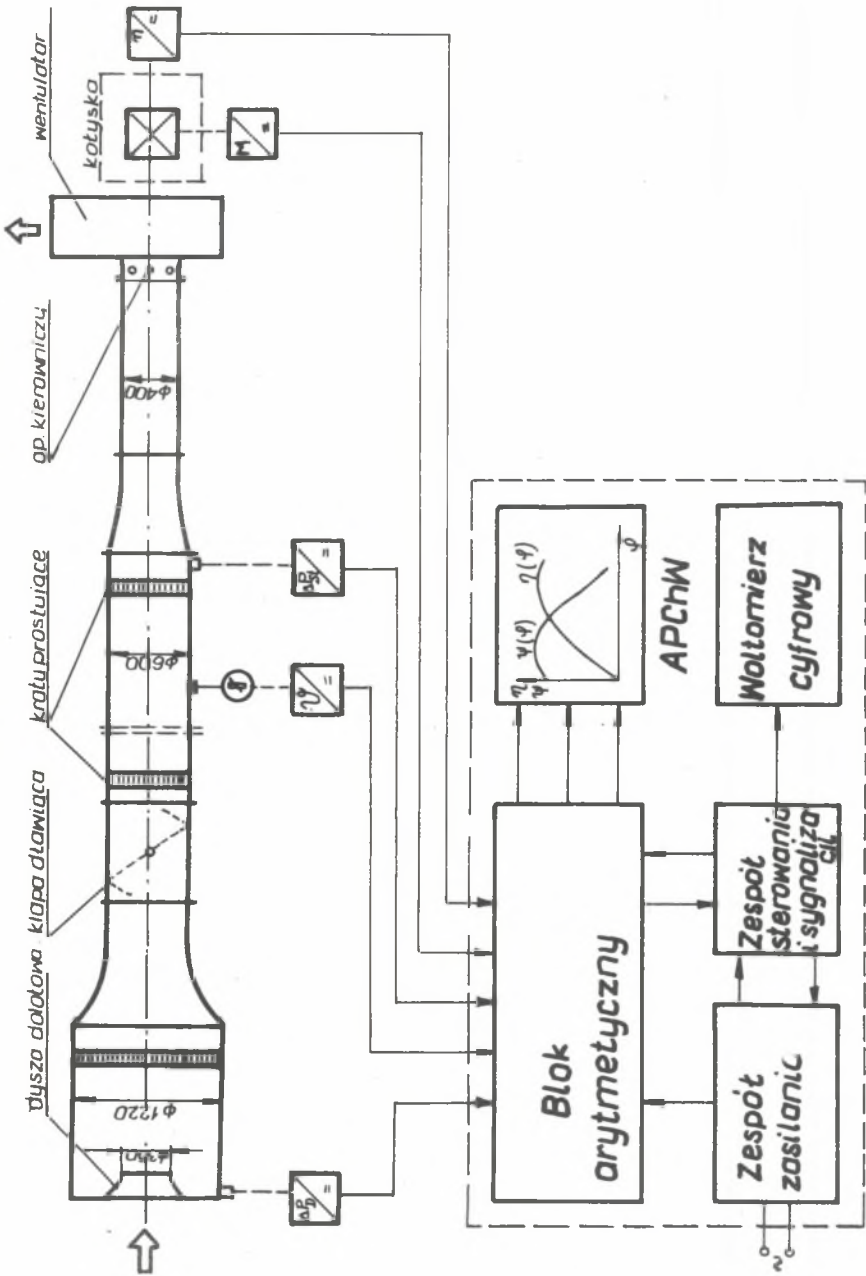
Tablicy 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
31	1,4	176	130	19	36	14	1,19	9,34
32	1,4	176	130	19	32	9	3,32	6,66
23	1,4	176	130	20	20	7	0,003	2,78
43	1,6	176	112,5	20	20	7	1,01	3,88
44	1,6	176	112,5	19	36	7	2,46	4,20
45	1,6	176	112,5	19	36	10	1,72	6,40
46	1,6	176	112,5	19	36	14	1,25	9,72
35	1,8	176	95	34	110	24	2,47	2,68
36	1,8	176	95	20	20	7	0,04	4,14
37	1,8	176	95	19	32	9	1,02	6,94
38	1,8	176	95	19	36	14	1,15	9,67
39	1,8	176	95	19	36	10	1,64	5,52
40	1,8	176	95	19	36	7	2,29	3,83
41	1,8	176	95	30	50	12	1,30	3,54
42	1,8	176	95	30	70	16	3,01	4,90

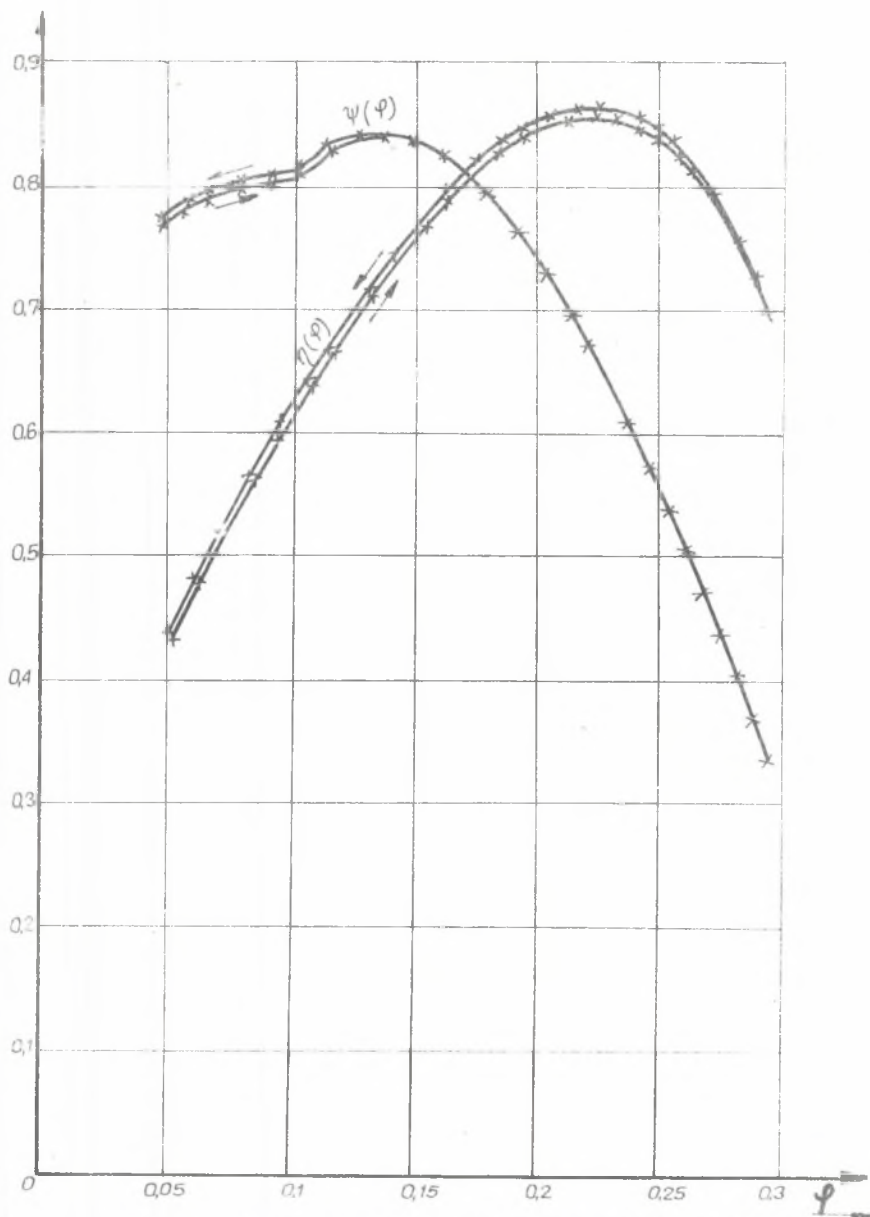
3. KRYTERIUM STABILNOŚCI

Przedstawione w tablicy 1 wirniki zostały przebadane na stoisku pomiarowym, którego schemat przedstawiono na rys. 3. Do pomiaru użyto automatycznego przelicznika charakterystyk wentylatorów (A P Ch W), który w znacznym stopniu skrócił przebieg pomiarów. APChW przed przystąpieniem do pomiarów został wycechowany i przeprowadzono pomiar kontrolny. Wykres charakterystyki bezwymiarowej wykreślono punktowo na rejestratorze X, Y, Y. Każdy z wirników miał pomierzone dwie charakterystyki, jedną przy oddławieniu a drugą przy zadławieniu wentylatora w czasie pomiaru. Tym sposobem można ustalić histerezę a tym samym stabilność charakterystyki przepływowej wentylatora. Wykresy charakterystyk z pracy [3] i [4] dla niektórych wirników przedstawiono na rys. 4, 5, 6 (z histerezą) oraz 7 i 8 (bez histerezy). Chcąc w oparciu o wyliczone kryteria oraz pomiary określić uogólnione kryterium stabilności charakterystyki wentylatora promieniowego naniesiono na układ współrzędnych $R_0 = f(D_{sp})$ obliczone wartości z tablicy 1.

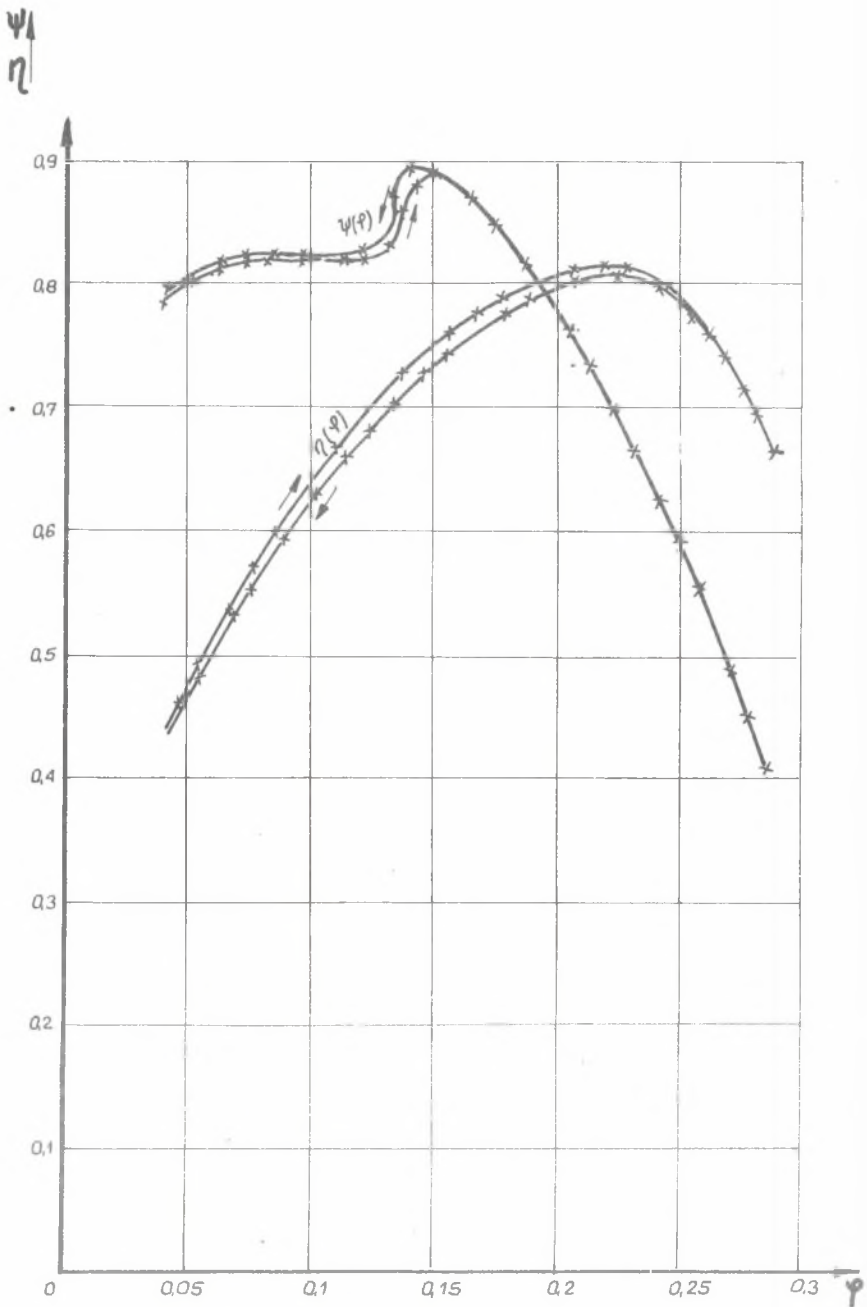
Konfrontując te wartości z pomiarami okazuje się, że powstaje wyraźna granica pokazana na rys. 9 (linią ciągłą), powyżej której wentylatory wykazywały histerezę charakterystyki, natomiast poniżej histereza nie występowała. Linia ta stanowi interpolację obszaru granicznego pomiędzy zbiorem punktów $R_0 = f(D_{sp})$, obejmujących obszar, gdzie występuje histereza oraz gdzie nie występuje histereza charakterystyki wentylatora.



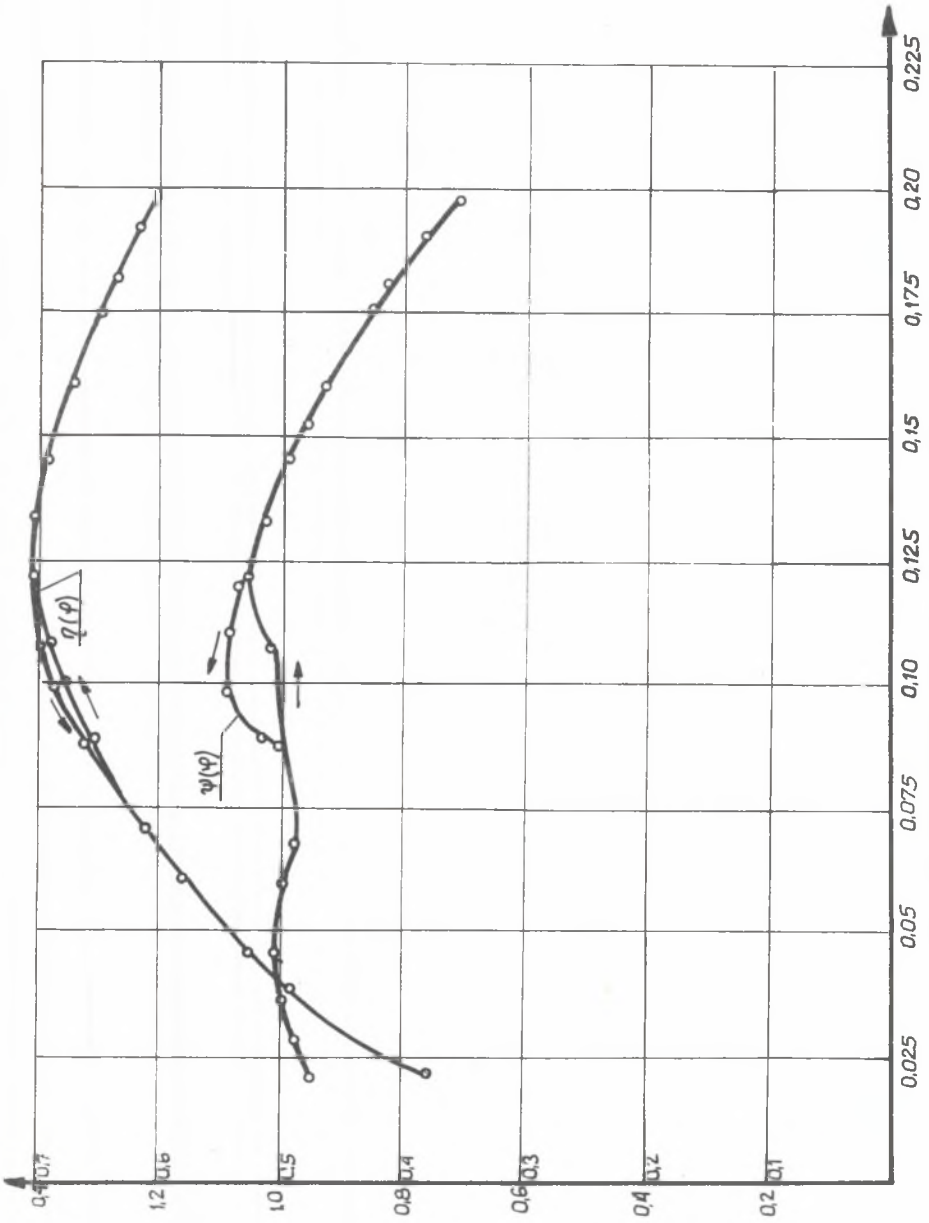
Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

ψ
7

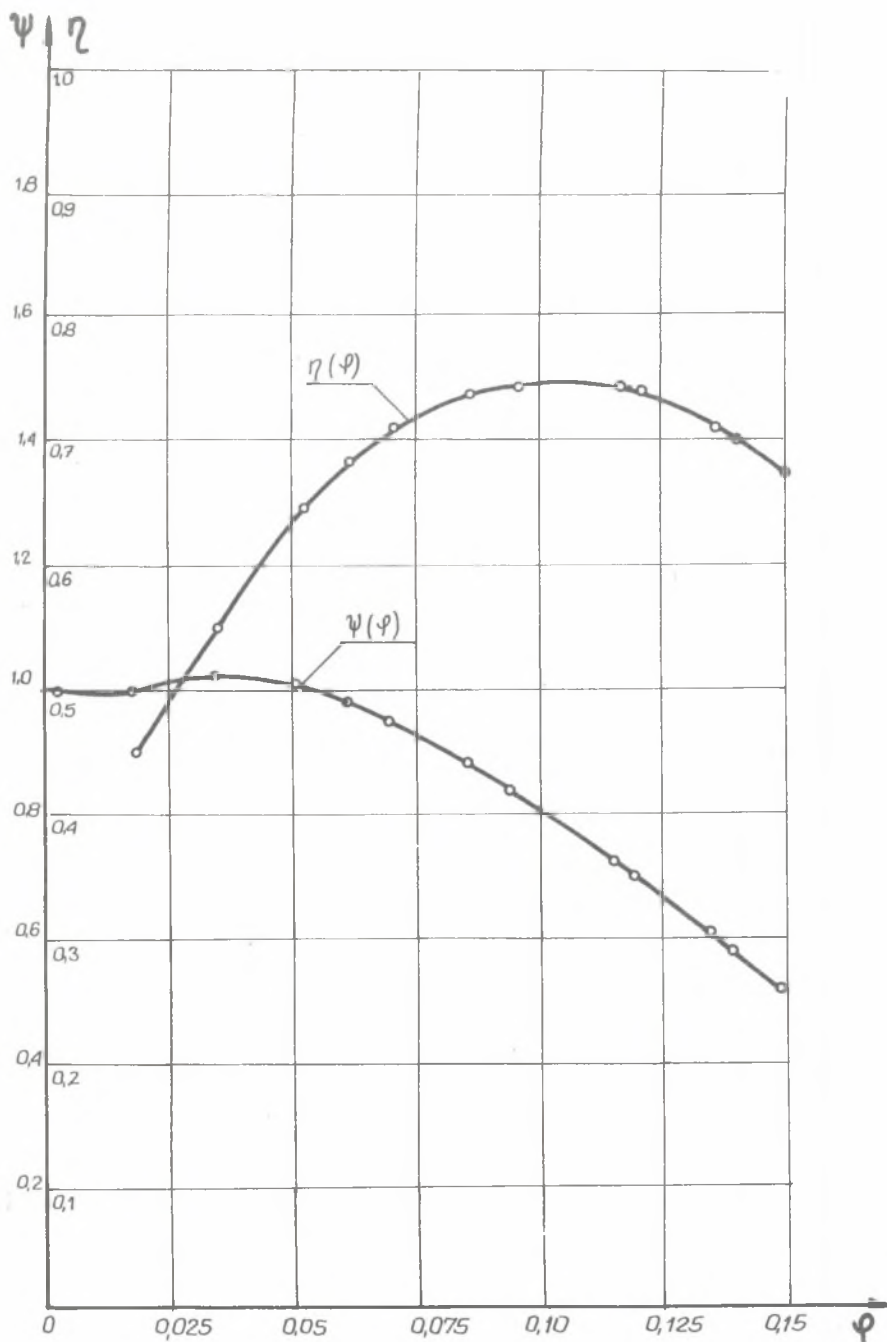
Rys. 4. Charakterystyka przepływowa. Wirnik nr 27



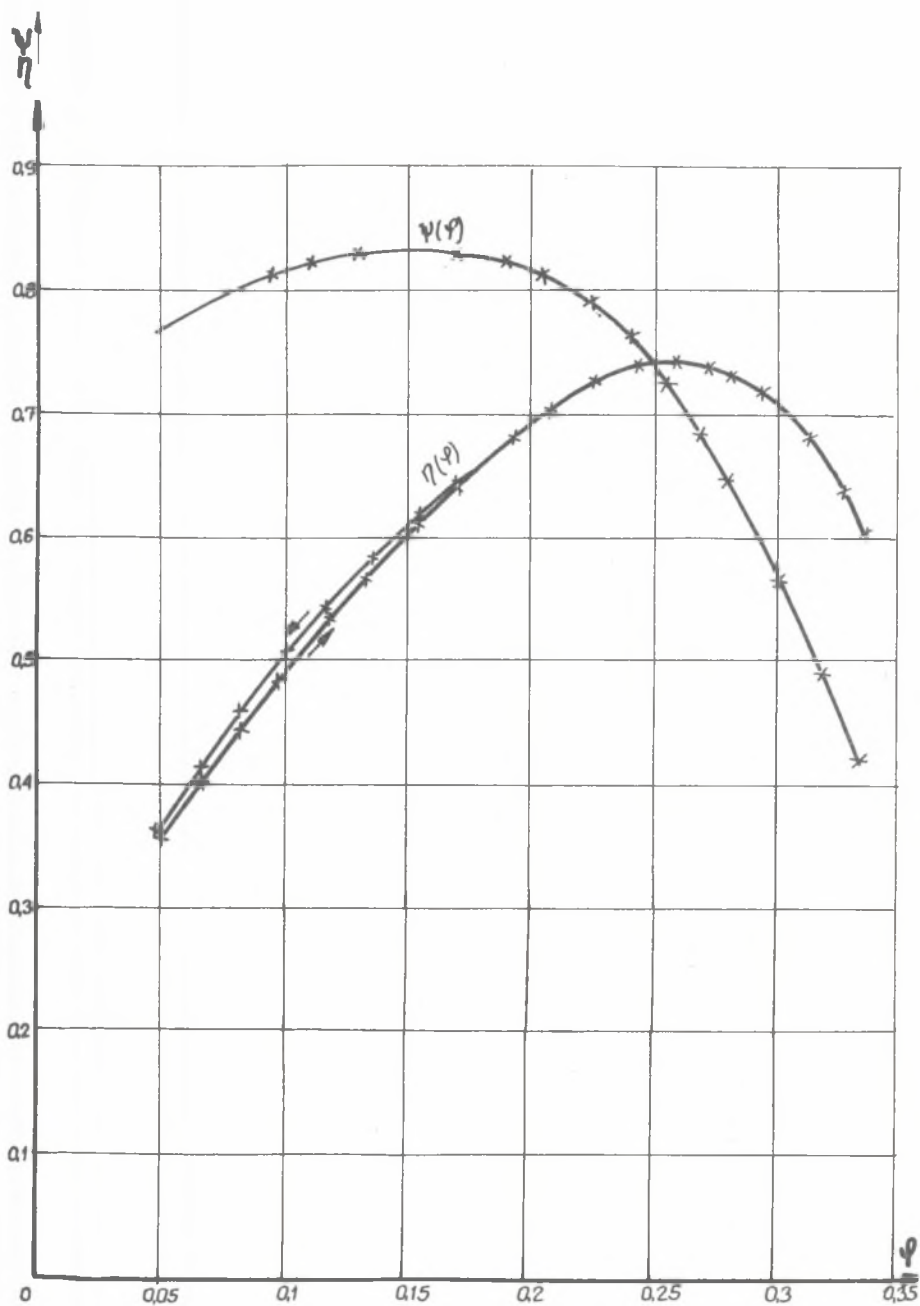
Rys. 5. Charakterystyka przepływowa. Wirnik nr 31



Rys. 6. Charakterystyka bezwymiarowa. wirnik nr 42



Rys. 7. Charakterystyka bezwymiarowa. Wirnik nr 40



Rys. 8. Charakterystyka przepływowa. Wirnik nr 24

Badane wirniki przedstawiają szeroki zakres kątów i stosunków średnic oraz szerokości, stosowanych często w budowie wentylatorów. Uzyskane doc jednoznaczne wyniki na tak szerokim zakresie geometrii wirników pozwala na pewne uogólnienie niniejszego kryterium.

Wartości wspólczynnika obciążenia D_{sp} wyliczono teoretycznie z geometrii wirnika, natomiast liczb Rosby'ego R_0 obliczono, przyjmując wartości φ_0 z pomiaru.

Niniejsze wyniki badan potwierdzają slusznoc, że na uwarstwienie czynnika w kanale midzyopatkovym wpływ ma gradient liczby Richardsona oraz dyfuzorowoc kanału. Tam, gdzie wartości te przekraczają pewne granice występuje oderwanie, które objawia się w postaci histerezy charakterystyki.

LITERATURA

- [1] Balje O.E.: A flow model for centrifugal compressor rotors. Transaction of the ASME Nr 1, January 1978.
- [2] Radwanski Jan: Stabilnoc charakterystyk wentylatorów promieniowych. Zeszyty Naukowe Politechniki lskiej, seria 2-66, 1978.
- [3] Komraus Leon: Prace studialne - rozpoznanie wstępne, pomiary charakterystyk przepływowych produkowanych wentylatorów. Praca O.B.R. "Barowent" nr 321/III - niepublikowana.
- [4] Polok Justyn: Stabilnoc charakterystyk wentylatorów promieniowych. Etap V - "Badanie k wirnikowych", praca O.B.R. "Barowent" nr 369/III - niepublikowana.

КРИТЕРИЙ СТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Резюме

В статье приводятся результаты исследований гистерезиса характеристики радиальных вентиляторов. В теоретической части излагаются явления происходящие в относительном течении по межлопаточным каналам, вводится понятие чисел Рихардсона и Росби. Опираясь на результаты исследований, определено критерий стабильности характеристики, как функции нагрузки и числа Росби.

STABILITY CRITERION OF CENTRIFUGAL VENTILATOR CHARACTERISTICS

Summary

The paper contains the research results of characteristics hysteresis of a centrifugal ventilator. The theoretical part includes the phenomena occurring in the relative flow through the blade channels. This has been presented by introducing the notions of Richardson and Rosby numbers. Basing on the research results, stability criterion of the characteristics has been defined as a function of load and Rosby number.