Joachim Otte, Jarosław Dziuba
Politechnika Śląska
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Badania wpływu geometrii obudów spiralnych na sprawność statyczną wentylatorów promieniowych

W analizach charakterystyk pracy wentylatorów rozróżnia się przyrost ciśnienia całkowitego i przyrost ciśnienia statycznego. Przyrost ciśnienia statycznego jest bezpośrednio przyrostem użytkowym i obecnie obserwuje się coraz wyraźniej kierunek oceniania wentylatorów pod względem przyrostu ciśnienia statycznego i sprawności statycznej.

Szczególnie zaobserwować to można w zastosowaniach wentylatorów energetycznych. Ponieważ pod względem wymaganych parametrów pracy oczekuje się uzyskania coraz większych przyrostów ciśnienia, stosowane są wentylatory o stosunkowo małych wyróżnikach szybkobieżności, które z kolei najczęściej mają niższą sprawność statyczną.

Obecnie w literaturze przedmiotu [1], [2], [3] metody projektowania wentylatorów nakierowane są wyłącznie na uzyskanie wysokich sprawności całkowitych. Zdecydowanie też więcej troski i badań poświęcono w literaturze wirnikom wentylatorów.

Obudowa spiralna jest wprawdzie, obok wirnika, drugim podstawowym elementem konstrukcyjnym wentylatora promieniowego, niemniej w literaturze technicznej zauważyć można brak wystarczająco kompletnych danych dotyczących optymalnego doboru geometrii obudowy spiralnej (spirali zbiorczej, kolektora spiralnego) bądź też wpływu zmian cech geometrycznych na charakterystyki pracy wentylatorów.

W niniejszym artykule przedstawiona jest próba oceny wpływu zmian cech geometrycznych obudowy spiralnej na charakterystyki pracy wentylatora promieniowego, w tym szczególnie na sprawność statyczną. Powstała ona podczas opracowywania tematu badawczego 7 T07C 004 15, pt. „Badania wpływu geometrii obudów spiralnych na sprawność statyczną wentylatorów promieniowych", zleconego przez Komitet Badań Naukowych [4].

Uwzględniając fakt, że przepływ w obudowie spiralnej ma charakter przepływu przestrzennego, nieustalonego, zdecydowano się określić wpływ geometrii obudowy na charakterystyki pracy wentylatora na drodze badań eksperymentalnych.

Zasadniczym celem, który starano się uzyskać jest określenie zasad projektowania obudów spiralnych uwzględniających kryterium wysokiej sprawności statycznej.

Wielkości charakteryzujące przepływ w obudowie spiralnej o przekroju prostokątnym

W wentylatorach promieniowych bezpośrednio za wirnikiem znajduje się odpowiednio ukształtowana przestrzeń obudowy spiralnej (spirali zbiorczej, kolektora spiralnego) o stałej szerokości B.

Głównym zadaniem obudowy spiralnej jest zbieranie gazu wypływającego z wirnika i kierowanie go do przewodu tłocznego powodując po drodze zamianę energii kinetycznej strumienia gazu na ciśnienie. Przepływ gazu w obudowie spiralnej jest w swej istocie niezmiernie złożony, stąd też bez badań eksperymentalnych nie dałoby się określić wiarygodnych wniosków odnośnie do optymalnych cech konstrukcyjnych. Istotną pomocą przy prowadzeniu eksperymentu jak i przy formułowaniu wniosków są zależności wynikające z analizy uproszczonego modelu przepływu w obudowie spiralnej.

Jeżeli rozpatrzyć wirnik i obudowę spiralną jako samoistne elementy o własnej charakterystyce pracy, to powstaje zagadnienie określenia warunków pracy i ich skojarzenia. Ogólnie przyjmuje się, że warunek dobrego skojarzenia wirnika z obudową spiralną zachodzi wówczas, gdy prędkości bezwzględne określone na promieniu tuż za wirnikiem będą jednakowe, rozpatrując osobno przepływ w wirniku i w obudowie spiralnej.

Innymi słowy, dobre skojarzenie zapewnia jednakowe prędkości na całym obwodzie (tuż za wirnikiem), gdyż wtedy przejście płynącego czynnika z kanałów międzyłopatkowych wirnika do obudowy spiralnej odbywa się bez zakłóceń i związanych z tym strat. Warunek ten może zachodzić tylko dla jednego punktu pracy wentylatora. W związku z tym obudowy spiralne tak się projektuje, aby był on spełniony w znamionowym punkcie pracy. Pomijając składową promieniową prędkości, warunek (teoretyczny) dobrego skojarzenia zapisać można wzorem:

$$c_{2u} = c_{3u} \tag{1}$$

który po przekształceniach i uwzględnieniu zależności geometrycznych sprowadzić można do równości:

$$\overline{B}\ln\left(1+2\overline{A}\right) = \frac{\Pi \cdot \varphi \cdot \eta}{\psi} \tag{2}$$

gdzie:
B — względna szerokość spirali zbiorczej,
A — względne rozwarcie spirali zbiorczej,
φ — liczba wydajności,
η — sprawność całkowita wentylatora,
ψ — liczba przyrostu ciśnienia całkowitego.

Wyrażenie z lewej strony równania wiąże zasadnicze wielkości określające geometrię obudowy spiralnej, może być więc nazwana liczbą charakterystyczną geometrii obudowy spiralnej.

$$K = \overline{B}\ln\left(1 + 2\overline{A}\right) \tag{3}$$

Po prawej stronie równania (2) występują liczby charakteryzujące przepływ pod względem aerodynamicznym, stąd też wielkość

$$\vartheta = \frac{\Pi \cdot \varphi \cdot \eta}{\psi} \tag{4}$$

może być nazwana liczbą charakterystyczną kinematyki przepływu w obudowie spiralnej.

Kryteria oceny geometrii obudów spiralnych wentylatorów

Kryteria energetyczne

Pod względem energetycznym wyznacznikiem przyrostu ciśnienia w wentylatorze jest przyrost ciśnienia całkowitego Δp_c. Uwzgledniając rodzaj energii można wielkość przyrostu ciśnienia całkowitego przedstawić jako sumę przyrostu energii potencjalnej ciśnienia oraz energii kinetycznej. Stąd też zachodzi równość

$$\Delta p_c = \Delta p_s + \frac{1}{2}\rho\left(c_2^2 - c_1^2\right) \tag{5}$$

gdzie:
Δp_c — przyrost ciśnienia statycznego,
ρ — gęstość czynnika,
c_1 — prędkość na wlocie do wentylatora,
c_2 — prędkość na wylocie z wentylatora.

Zauważyć należy, że prędkość można powiązać z wydajnością i przekształcony wzór uzyska postać

$$\Delta p_c = \Delta p_s + \frac{1}{2}\rho \dot{V}^2\left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2}\right) \tag{6}$$

gdzie:
V — wydajność,
S_1 — pole przekroju na wlocie do wentylatora,
S_2 — pole przekroju na wylocie z wentylatora.

W zależności od kształtowania się względem siebie wielkości S_1 i S_2, przyrost ciśnienia statycznego może być mniejszy, równy lub większy od przyrostu ciśnienia całkowitego. Przyrost ciśnienia statycznego jest bezpośrednio użytkowym i coraz częściej oceniane są możliwości wentylatorów pod względem przyrostu ciśnienia statycznego.

Zasadniczym kryterium oceny wentylatora pod względem energetycznym jest sprawność całkowita wyrażona wzorem

$$\eta = \frac{\dot{V}\,\Delta p_c}{N} \tag{7}$$

gdzie:
V — wydajność,
N — moc wentylatora.

Pod względem własności użytkowych technicznym kryterium oceny wentylatora będzie sprawność statyczna

$$\eta_s = \frac{\dot{V}\,\Delta p_s}{N} \tag{8}$$

Ponieważ badania różnych spiral przeprowadzone są przy tych samych wirnikach, wobec tego porównanie sprawności całkowitych i statycznych wentylatorów wskaże jednoznacznie na wpływ geometrii obudowy.

Kryteria kosztowe

Wysokość kosztów wytworzenia wentylatora lub dmuchawy jest, oczywiście, problemem producenta, niemniej z punktu widzenia projektanta można podjąć rozważania opierając się na pewnych wskaźnikach.

Względną miarą oceny kosztów w przypadku wentylatora promieniowego może być powierzchnia obudowy spiralnej. Jeżeli zgodnie z rysunkiem 1 ekwiwalentna średnica spirali wynosi

$$D_e \cong D_2 + 1.25\,A \tag{9}$$

gdzie:
A — rozwarcie spirali, średnicę zaś wirnika określimy przez liczbę średnicy δ

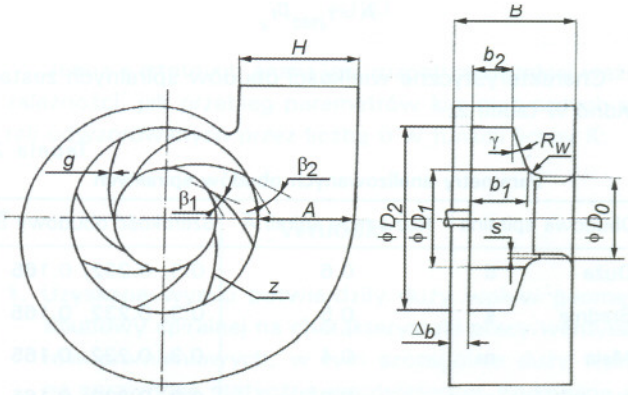
$$D_2 = 0.9488\,\delta\,\dot{V}^{0.5}\left(\frac{\Delta P_c}{\rho}\right)^{-0.25} \tag{10}$$

to powierzchnia obudowy spiralnej wentylatora

$$S = \frac{\pi}{2}\left(\overline{D}_e^2 + 2\overline{BD}_e\right)\cdot D_2^2 \tag{11}$$

A z uwzględnieniem powyższych zależności wyniesie

$$S = \sqrt{2}K_S\,\dot{V}\left(\frac{\Delta P_c}{\rho}\right)^{-0.5} \tag{12}$$



Rys. 1. Schemat układu przepływowego wentylatora promieniowego

Z powyższego wynika liczba kryterialna powierzchni obudowy wentylatora

$$K_S = \left(\overline{D}_e^2 + 2\overline{B}\overline{D}_e\right) \cdot \delta^2 \qquad (13)$$

która pozwala porównać różne rozwiązania konstrukcyjne.

W podobny sposób można uzyskać wskaźnik (liczbę) objętości zajmowanej przez obudowę spiralną

$$K_V = \overline{D}_e^2 \overline{B} \delta^3 \qquad (14)$$

Liczby kryterialne K_S i K_V pozwalają na porównawczą analizę różnych wentylatorów pod kątem zapotrzebowanej powierzchni obudowy spiralnej i objętości obudowy. W sposób względny można więc oceniać wymienione walory wentylatorów.

Występującą tu liczbę średnicy można wyrazić przez inne liczby charakterystyczne

$$\delta = \varphi^{-\frac{1}{2}} \psi^{\frac{1}{4}} \qquad (15)$$

Geometria badanych wentylatorów modelowych

Dla potrzeb analizy wykonano dwa wirniki typu wysokociśnieniowego o stosunku średnic $\nu = D_0/D_2 = 0.4$. Zasadniczą różnicę w geometrii tych wirników przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Różnice w geometrii łopatek wirników 82 i 83

Wirnik	82	83
Typ łopatek	zagięte do tyłu	zagięte do przodu
Kąt łopatki β_2 [°]	45	76
Liczba łopatek z	14	18

Wirniki te kojarzono do pracy z czterema obudowami spiralnymi. Ukształtowano je jako spirale logarytmiczne o różnym rozwarciu spirali A, gdzie:

$$A = r_{s360} - r_2$$

Charakterystyczne wielkości obudów spiralnych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Parametry analizowanych obudów spiralnych

Obudowa spiralna		Rozwarcie spirali $\overline{A}$	Szerokość obudowy $\overline{B}$
Duża	d	0.6	0.3, 0.232, 0.165
Średnia	s	0.5	0.3, 0.232, 0.165
Mała	m	0.4	0.3, 0.232, 0.165
Najmniejsza	n	0.3	0.3, 0.232, 0.165

Z powyższego wynika, że liczba K w trakcie badań przyjmowała wartości z zakresu K — od 0.095 do 0.24.

Program badań

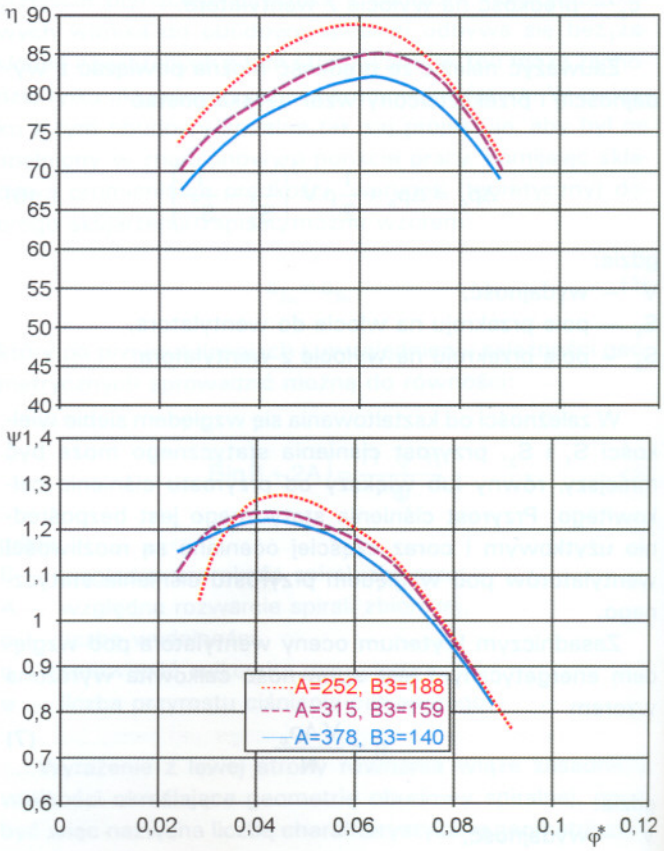
W celu określenia wpływu geometrii obudów spiralnych na sprawność statyczną i całkowitą wentylatorów promieniowych zrealizowano program badań eksperymentalnych, skupiając się w pierwszej kolejności na badaniach charakterystyk pracy. Badania przeprowadzono w laboratorium Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Badania dwóch różniących się od siebie wirników, kojarzonych z czterema obudowami, które z kolei mogły mieć jeszcze trzy różne szerokości, dały w efekcie 24 pełne pomiary charakterystyk.

Analiza wyników badań i wnioski

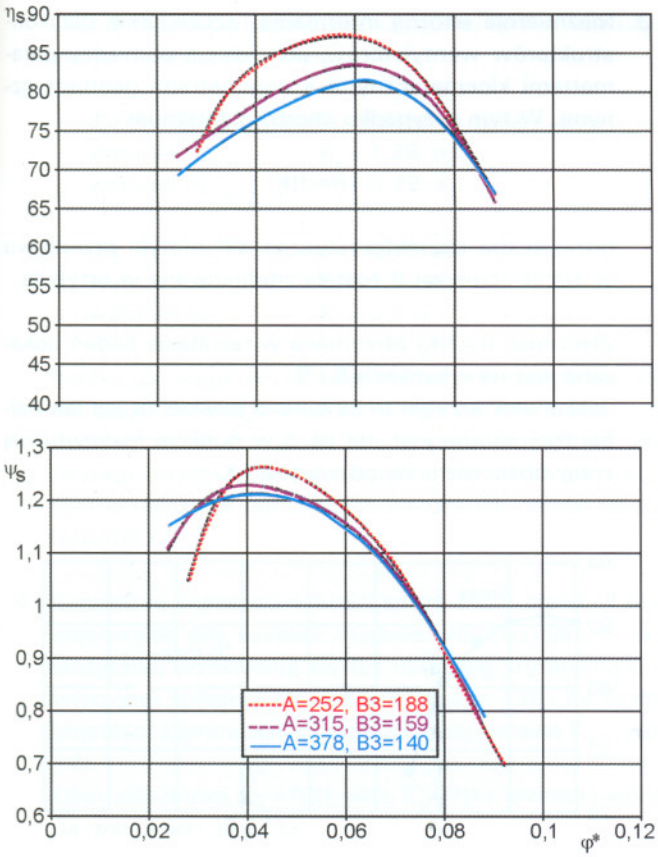
Zakres analizy

Zebrane wyniki pomiarów modelowych wentylatorów promieniowych stanowią dobrą podstawę do analizy i wyciągnięcia wniosków i uogólnień. Najpełniejsze spektrum pomiarowe uzyskano w przypadku wentylatorów z wirnikami nr 82 (łopatki zagięte do tyłu) i nr 83 (łopatki zagięte do przodu). Pomocne przy wyciąganiu wniosków odnośnie do wpływu geometrii obudowy spiralnej na sprawność wentylatora jest zestawienie charakterystyk pracy przy K = const.

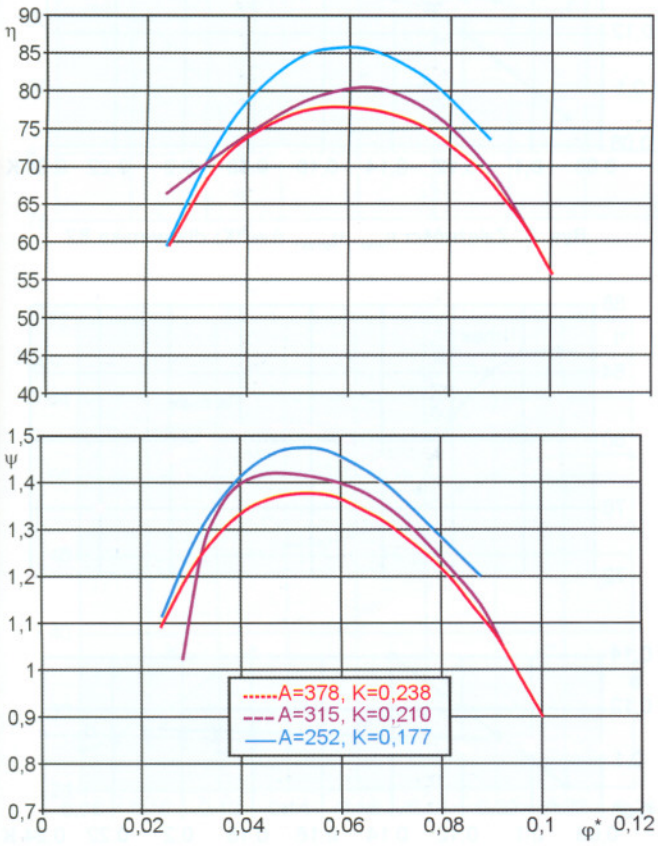
Liczba K jest liczbą charakteryzującą geometrię obudowy, głównie pod względem wielkości. Przykładowo na rysunkach 2 i 3 przedstawiono charakterystyki statyczne i całkowite uzyskane dla wirnika 82, przy trzech różnych spiralach o tej samej liczbie K.



Rys. 2. Charakterystyki wentylatora nr 82 dla K = 0,175

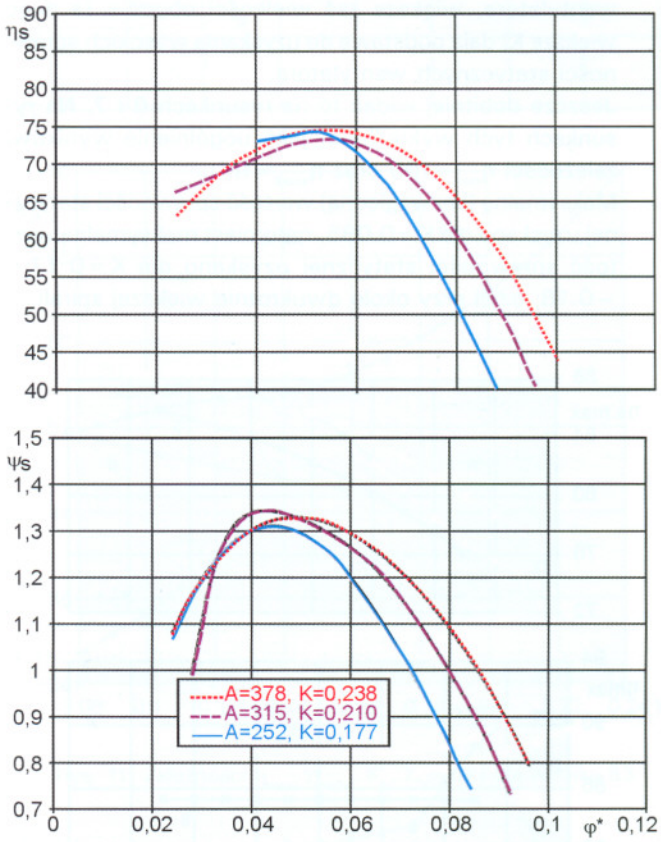


Rys. 3. Charakterystyki wielkości statycznych wentylatora, nr 82 dla K = 0,175



Rys. 4. Charakterystyki wentylatora nr 83 dla B = 104 mm

Kolejne zestawienie charakterystyk przy B = const, a więc przy stałej szerokości i zmiennym rozwarciu pozwoliło na określenie wpływu ukształtowania przekroju obudowy na sprawność. Dla przykładu na rysunkach 4 i 5 pokazano, jak mocno może się różnić charakterystyka całkowita i statyczna wentylatora nr 83.



Rys. 5. Charakterystyki wielkości statycznych wentylatora nr 83 dla B = 104 mm

Bardzo ważnym materiałem do analizy jest zebranie na jednym wykresie maksymalnych wartości sprawności całkowitej i sprawności statycznej w funkcji liczby charakterystycznej K. Można wtedy pokusić się o wykreślenie zależności

$$\eta_{max} = f(K)$$

oraz

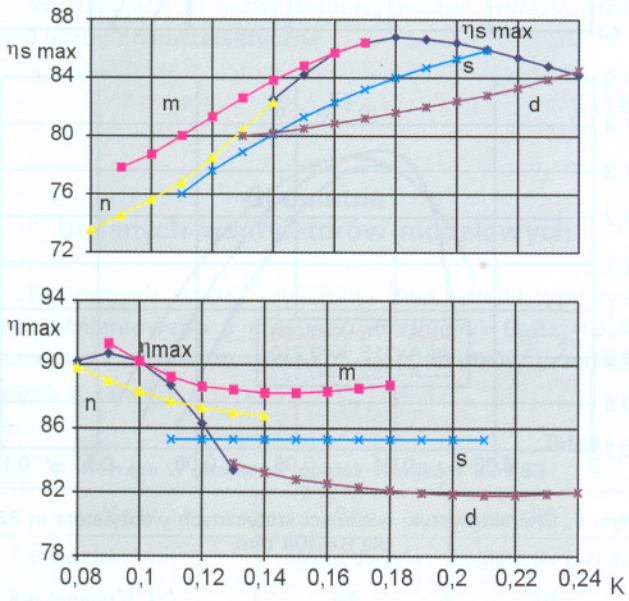
$$\eta_{smax} = f(K)$$

Jedną z istotnych analiz jest rozpatrzenie takiej ważnej zależności, jak przebieg parametrów kinematycznych spirali odwzorowanych przez liczbę ϑ w funkcji liczby K.

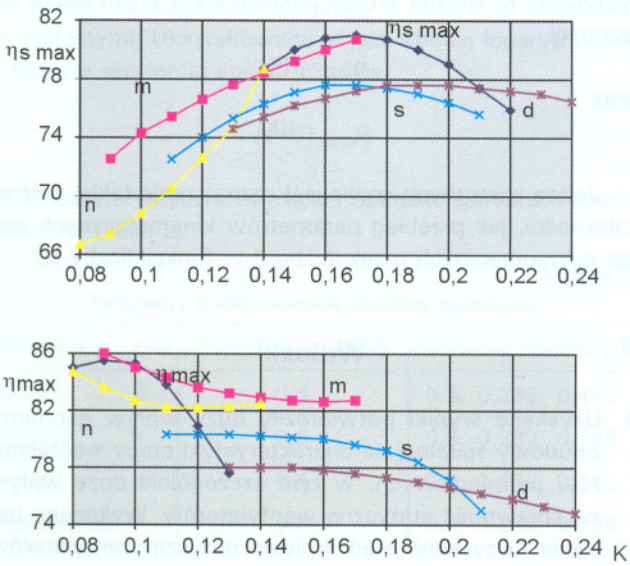
Wnioski

1. Uzyskane wyniki potwierdziły duży wpływ geometrii obudowy spiralnej na charakterystyki pracy wentylatorów promieniowych, w tym szczególnie duży wpływ na sprawność statyczną wentylatorów. Wykonane badania i uzyskane stąd wnioski dotyczą wentylatorów wysokociśnieniowych, których znamionowy wyróżnik szybkobieżności mieści się w granicach $\sigma = 0.17 - 0.23$.

2. Badania potwierdziły, że kryteria maksymalnej sprawności całkowitej wentylatora η i maksymalnej sprawności statycznej η_s prowadzą do uzyskania zasadniczo różnych geometrii obudów spiralnych. I tak relatywnie mniejsze wielkości obudów (mniejsze wartości liczby K) pozwalają uzyskać wysokie sprawności całkowite wentylatora, większe zaś wielkości obudów (a więc większe K) dają podstawę do uzyskania wysokich sprawności statycznych wentylatora.
Jeszcze dobitniej widać to na rysunkach 6 i 7. Na rysunkach tych wykreślono, jako uogólnienie wyników, zależności $\eta_{max} = f(K)$ oraz $\eta_{smax} = f(K)$.
Maksymalną (bezwzględną) wartość sprawności statycznej uzyskano dla K = 0.095, natomiast maksymalną wartość sprawności statycznej uzyskano dla K = 0.17—0.18, czyli przy około dwukrotnie większej spirali.



Rys. 6. Zależności η_{max}, $\eta_{smax} = f(K)$ dla wirnika 82



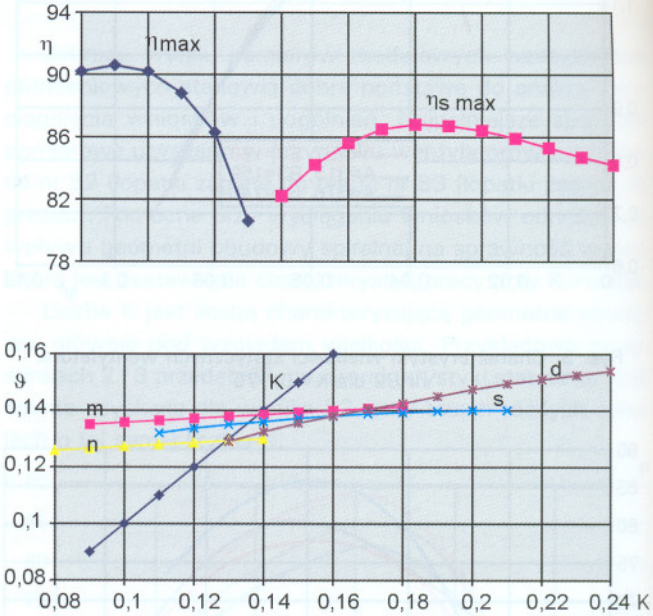
Rys. 7. Zależności η_{max}, $\eta_{smax} = f(K)$ dla wirnika 83

3. Niezmiernie istotną informacją, szczególnie dla konstruktorów wentylatorów, jest relacja pomiędzy parametrami kinematycznymi a parametrami geometrycznymi. W tym przypadku chodzi o zależność

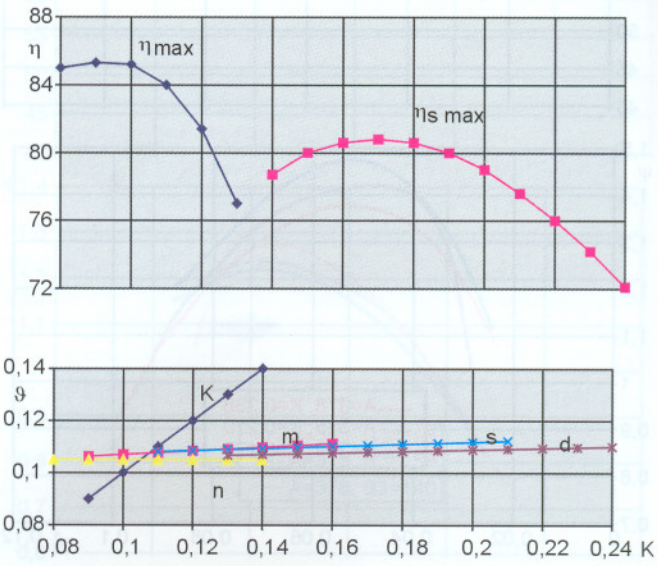
$$\vartheta = f(K)$$

gdzie liczba charakterystyczna kinematyki przepływu w spirali zbiorczej ϑ została zdefiniowana w artykule.

Zależność $\vartheta = f(K)$ otrzymana w rezultacie badań pokazana jest na rysunkach 8 i 9.
Jakkolwiek krzywe te są bardzo płaskie, to jednak najbardziej istotne jest, na ile ϑ w punkcie maksymalnej sprawności różni się od wartości K.



Rys. 8. Zależności η_{max}, η_{smax}, $\vartheta = f(K)$ dla wirnika 82



Rys. 9. Zależności η_{max}, η_{smax}, $\vartheta = f(K)$ dla wirnika 83

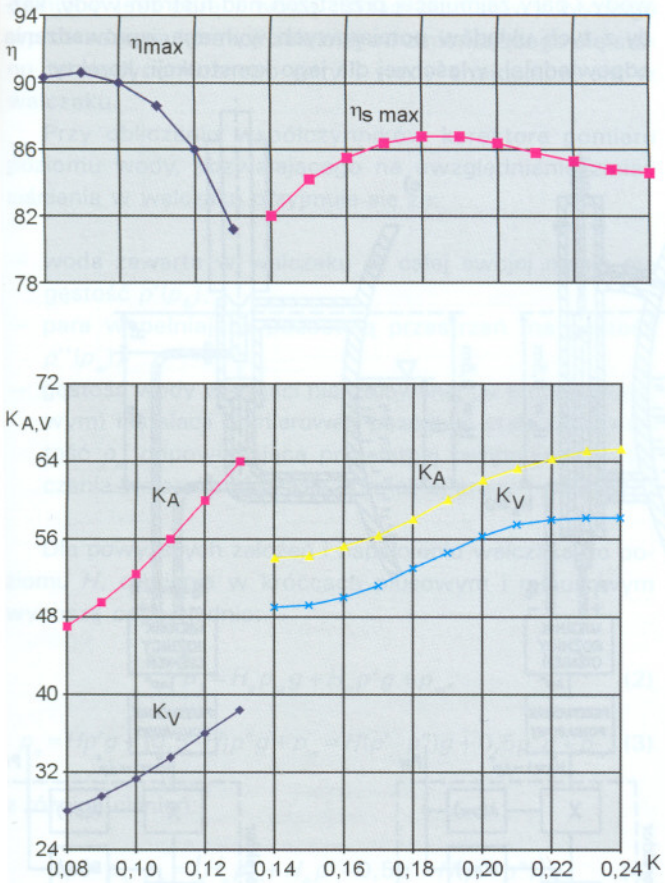
Dla punktu maksymalnej (bezwzględnie) sprawności uzyskano następujące relacje:

— dla wirnika 82 (łopatki zagięte do tyłu)
warunek η_{smax}: $K_p = 1.28\ \vartheta_p$
warunek η_{max}: $K_p = 0.78\ \vartheta_p$

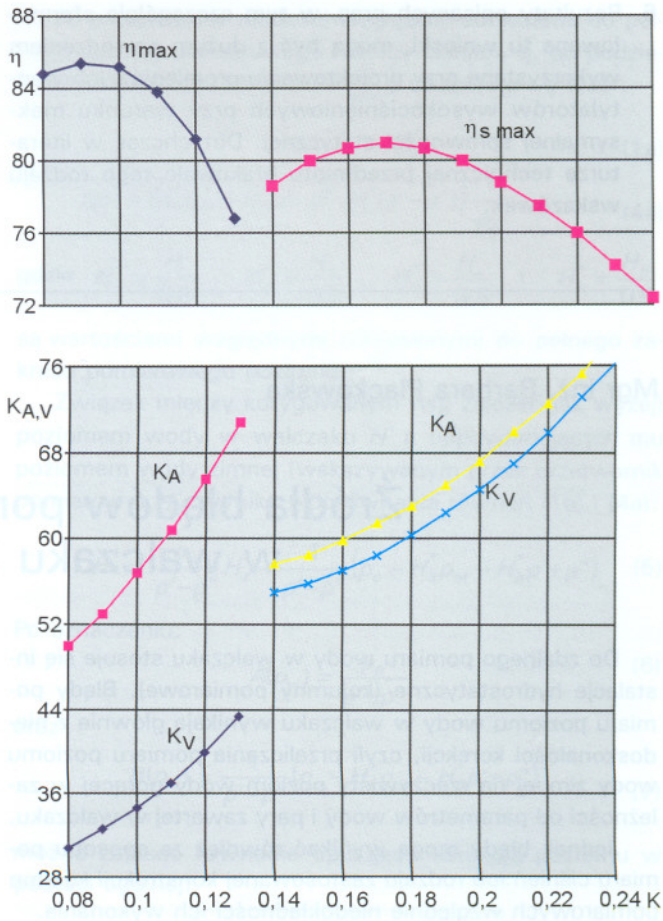
— dla wirnika 83 (łopatki zagięte do przodu)
warunek η_{smax}: $K_p = 1.54\ \vartheta_p$
warunek η_{max}: $K_p = 0.9\ \vartheta_p$

Indeks „p" sugeruje, że takie relacje powinny zachodzić dla projektowanego znamionowego punktu pracy.
Jednoznacznie powyższe relacje potwierdzają, że aby uzyskać wysokie sprawności tak całkowite jak i statyczne należy w odmiennych kierunkach odejść od zależności (2).

4. Generalnie większe wielkości spiral, które powinny być stosowane, aby uzyskać większe wartości sprawności statycznej przekładają się też na liczbę kryterialną powierzchni spiralnej obudowy K_A (wzór 13) i na liczbę objętości zajmowanej przez obudowę spiralną K_V (wzór 14).
Obie zależności $K_A = f(K)$ oraz $K_V = f(K)$ przedstawiono na rysunkach 10 i 11.

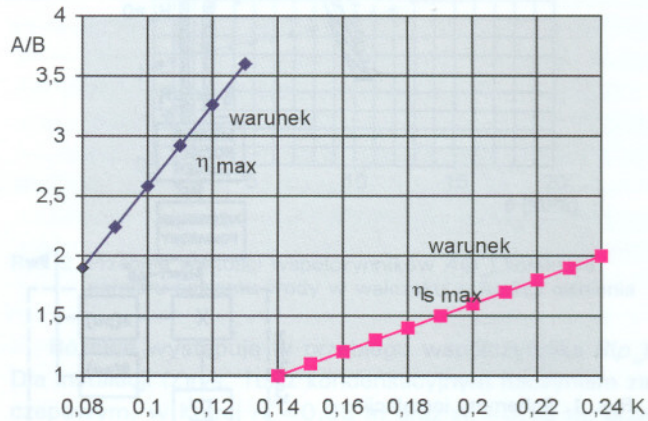


Rys. 10. Zależności η_{max}, η_{smax}, K_A, $K_V = f(K)$ dla wirnika 82



Rys. 11. Zależności η_{max}, η_{smax}, K_A, $K_V = f(K)$ dla wirnika 83

5. Ukształtowanie przekroju poprzecznego obudowy spiralnej na wylocie, czyli stosunek A/B w trakcie badań przyjmował wartości z zakresu 1—3,6.
Wprawdzie w badaniach stwierdzono, że wpływ ukształtowania okna wlotowego A/B nie był decydujący, to jednak zauważono, że maksymalne wartości sprawności całkowitej uzyskiwano z reguły przy większych wartościach A/B (z reguły A/B > 2).
Większe wartości sprawności statycznej otrzymywano z reguły przy stosunkach A/B < 2. Powyższe prawidłowości pokazano na rysunku 12.



Rys. 12. Zależność A/B = f(K)

6. Rezultaty opisanych prac, w tym szczególnie sformułowane tu wnioski, mogą być z dużym powodzeniem wykorzystane przy projektowaniu promieniowych wentylatorów wysokociśnieniowych przy warunku maksymalnej sprawności statycznej. Dotychczas w literaturze technicznej przedmiotu brakowało tego rodzaju wskazówek.

LITERATURA

[1] Eck B.: Ventilatoren. Springer Verlag, 1972

[2] Tuliszka E.: Sprężarki, dmuchawy i wentylatory. Warszawa 1969

[3] Kuczewski St.: Wentylatory. WNT, Warszawa 1978

[4] Temat Badawczy 7 T07C 004 15: Badania wpływu geometrii obudów spiralnych na sprawność statyczną wentylatorów promieniowych. Gliwice 2000