

BADANIA CHARAKTERYSTYK AERODYNAMICZNYCH PROFILÓW KONSTRUKCJI WITOLDA KASPRZYKA

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne nowych typów płatów aerodynamicznych wykonanych według koncepcji polskiego aerodynamika i pilota Witolda Kasprzyka (międzynarodowa nazwa tych profili to Kasper Wings). Dalsza część pracy zawiera wyniki badań charakterystyk aerodynamicznych profili W. Kasprzyka, to znaczy zależności sił oporu, sił nośnych oraz momentów obrotowych od kąta natarcia strugi powietrza na badany płat oraz prędkości powietrza względem płata. Wyniki badań stanowiły podstawę do określenia współczynników oporu, współczynników siły nośnej, współczynników momentu obrotowego oraz doskonałości aerodynamicznej. Badania przeprowadzono na płatach modelowych umieszczonych w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego o zamkniętym obiegu powietrza i zamkniętej przestrzeni pomiarowej. Badane płaty przymocowane były do tensometrycznej trójskładnikowej wagi aerodynamicznej. Wyniki badań przedstawiono w postaci graficznej. Rezultaty badań mogą znaleźć zastosowanie przede wszystkim przy projektowaniu elektrowni wiatrowych, zwłaszcza tych, które mają pionowe osie obrotu oraz przy projektowaniu łopatek maszyn przepływowych.

Słowa kluczowe: charakterystyki aerodynamiczne, profil Kasprzyka

THE RESULTS OF INVESTIGATIONS ON AERODYNAMIC PROFILES OF KASPER WINGS

The constructional solutions of new types of aerodynamic flat surfaces were introduced in publication. It was accomplished according to conception of Polish aerodynamic and aviator Witold Kasprzyk (international name of this plane is the Kasper Wings). Next units of publication contains the results of investigations on aerodynamic profiles of W. Kasprzyk wings then it labels as well as the moments circulating, bearing strengths, dependences of strengths resistance and angle the attack of stream of air on studied flat surface from the speed of air the regard. The scores of audits made up to qualification the basis of coefficients of resistance, the coefficients of bearing strength, coefficients of circulating moment as well as lift/drag ratio aerodynamic. It audits were conducted was on model placed in measuring space of aerodynamic tunnel with closed circulation of air pieces and closed measuring space. The studied flat surfaces be fastened to the deformer, three components aerodynamic pair of scales. The scores of audits were introduced in graphic figure. The results of audits can find first of all use near projecting wind power turbine, especially these which have the perpendicular axes of turn as well as near projecting the blades of fluid flow machine engines.

Keywords: aerodynamic profile characteristics Kasper Wings

1. WPROWADZENIE

Obecnie udział odnawialnych źródeł energii (OZE) w strukturze produkcji energii elektrycznej systematycznie rośnie. Spośród wszystkich OZE największe możliwości ma energetyka wiatrowa, która może rozwijać się na lądzie, wodzie oraz w powietrzu. Wykorzystanie energii przemieszczających się mas powietrza jest obecnie zjawiskiem globalnym, a jednocześnie jest to najszybciej rozwijająca się technologia i gałąź energetyki, jeżeli wziąć pod uwagę roczny przyrost produkcji energii.

Elementem elektrowni wiatrowej przetwarzającym energię wiatru na energię mechaniczną jest koło wirnikowe, które w zależności od typu wirnika może mieć jedną łopatę bądź więcej. Kąt nastawienia łopat względem kierunku napływającego wiatru każdego z tych wirników można regulować lub łopaty można zamocować na stałe bez możliwości regulacji. Koła wirnikowe o stałym kącie nastawienia łopat pod względem konstrukcyjnym są znacznie prostsze i tańsze, lecz wymagają stosowania profili o nagłym spadku współczynnika siły nośnej po przekroczeniu krytycznego kąta natarcia.

Do najważniejszych elementów elektrowni wiatrowej należą łopaty wirnika. Najprostsze z nich to elementy drewniane, inne wykonane są z blachy metalowej płaskiej z usztywnieniami lub z blachy metalowej wygiętej po łuku. Profile lotnicze mogą być metalowe bądź z materiałów kompozytowych czy włókien szklanych wzmocnionych żywicą syntetyczną.

Przykładowe materiały to:

- PPG (polipropylen wzmocniony włóknem szklanym),
- PAG (poliamid wzmocniony włóknem szklanym),
- PAG.AS (poliamid wzmocniony włóknem szklanym – antyelektrostatyczny).

Badając profile lotnicze, można koncentrować się na cechach materiałowych, energetycznych, aerodynamicznych czy szeregu innych równie ważnych. Celem pomiarów może być określenie wpływu liczby łopat, kształtu łopat, kąta natarcia łopaty, chropowatości powierzchni łopat itp. na sprawność konwersji energii wiatru na energię mechaniczną na wale wirnika czy na energię elektryczną powstającą w generatorze.

* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych, kmiue@imir.agh.edu.pl

** Akademia Pedagogiczna w Krakowie, Instytut Techniki, ghpytel@cyf-kr.edu.pl

2. CEL BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie parametrów aerodynamicznych wybranych modeli profili łopatek oraz porównanie wybranych wyników badań i analiz aerodynamicznych dla modeli profili mogących znaleźć zastosowanie w energetyce wiatrowej. Pomiary przeprowadzono na stanowisku badawczym umożliwiającym badania modelowe elementów łopatek wirnika elektrowni wiatrowych pracujących w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

3. STANOWISKA BADAWCZE

Podstawowym stanowiskiem badawczym służącym do badań eksperymentalnych w mechanice płynów jest tunel aerodynamiczny. Ważnym przyrządem pomiarowym w badaniach tunelowych jest waga aerodynamiczna umożliwiająca pomiar sił i momentów działających na badany model.

Dane techniczne stanowiska badawczego przedstawiono w tabeli 1. Zdjęcie i schemat tunelu aerodynamicznego przedstawiono na rysunkach 1 oraz 3, a charakterystykę tunelu, czyli prędkość przepływu ustabilizowanej strugi powietrza w funkcji prędkości obrotowej wentylatora napędzającego przedstawiono na rysunku 2.

Pomiary wykonano za pomocą wagi tensometrycznej trójskładowej. Dane techniczne wagi aerodynamicznej przedstawiono w tabeli 2. Wagę przedstawiono na rysunkach 4–8.

Wagę tę można podzielić na część:

- mechaniczną,
- elektroniczną.

W części mechanicznej wyróżnić można:

- element sprężysty stalowy,
- głowicę do mocowania i obrotu modelu,
- podstawę z osłoną i zabezpieczeniem elementu sprężystego.

Element sprężysty stalowy jest tak ukształtowany, aby odkształcenia pochodzące od trzech składowych obciążeń były wyróżnione na oddzielnych elementach sprężystych,

Tabela 1

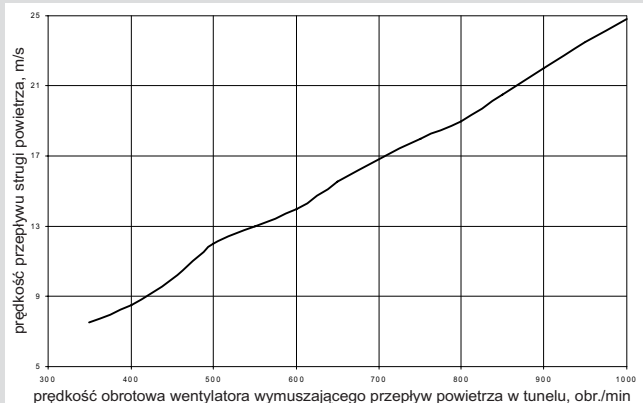
Dane techniczne tunelu aerodynamicznego z zamkniętym obiegiem powietrza

Wymiary przestrzeni pomiarowej (PP)	540 × 375 ÷ 1200
Zakres prędkości średniej strumienia	$W = 0 \div 100$ m/s
Przewężenie ($F_{wlot, PP}/F_{wyl, PP}$)	7,7
Wentylator osiowy	□ 690 mm
Układ regulacji prędkości obrotowej wentylatorów	indywidualny, falownik
Liczba tunelu	$J = 4,2$
Maksymalny przekrój modelu	$F = 100$ cm ² dla przysłon. 5%

na których naklejone są tensometry. Głowica na rysunku 6 mocowana jest do górnej części elementu sprężystego. Wał z uchwytem stożkowym (szybko mocującym) osadzony jest w dwóch łożyskach kulkowych. Ruch obrotowy wału, a zatem i modelu, uzyskujemy od przekładni ślimakowej zamocowanej w głowicy. Oś ślimaka wyprowadzona jest na zewnątrz obudowy, do której zamocowano koło wprawiane w ruch ręcznie. W górnej części głowicy jest podziałka kąтова na wale głównym oraz soczewka umożliwiająca nastawienie żądanego kąta natarcia.



Rys. 1. Tunel aerodynamiczny z zamkniętym obiegiem powietrza

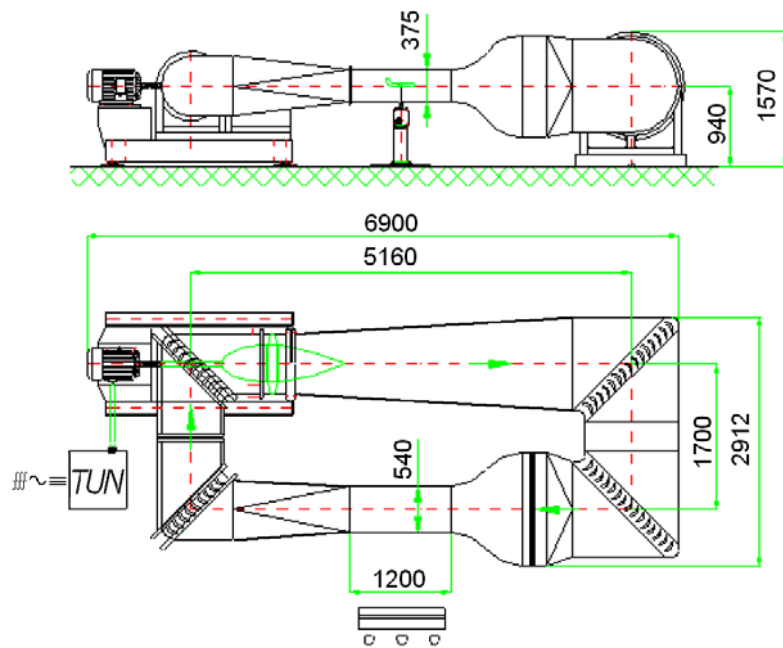


Rys. 2. Charakterystyka tunelu aerodynamicznego z zamkniętym obiegiem powietrza

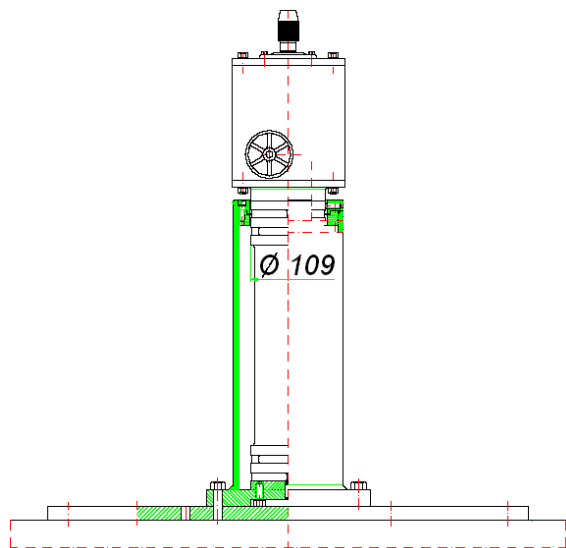
Tabela 2

Dane techniczne wagi tensometrycznej

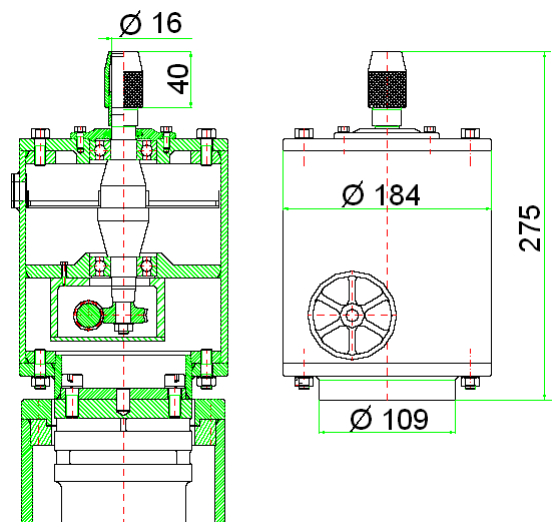
Waga aerodynamiczna	tensometryczna 3- składowa
Zakresy pomiaru sił i momentu:	
Siła oporu opływu P_x	+0 ÷ 200 N odczyt jest w dwóch podzakresach: 1) – 0 ÷ 19,99 N, z rozdzielczością 0,01 N 2) 0 ÷ 199,9 N, z rozdzielczością 0,10 N
Siła nośna P_z	± 0 ÷ 200 N odczyt jest w dwóch podzakresach: 1) – 0 ÷ 19,99 N, z rozdzielczością 0,01 N, 2) 0 ÷ 199,9 N, z rozdzielczością 0,10 N
Moment M_y	± 0 ÷ 2 N·m, z rozdzielczością 0,001 N·m
Zakres zmiany kąta nastawienia α	± 360°



Rys. 3. Schemat tunelu aerodynamicznego z zamkniętym obiegiem powietrza



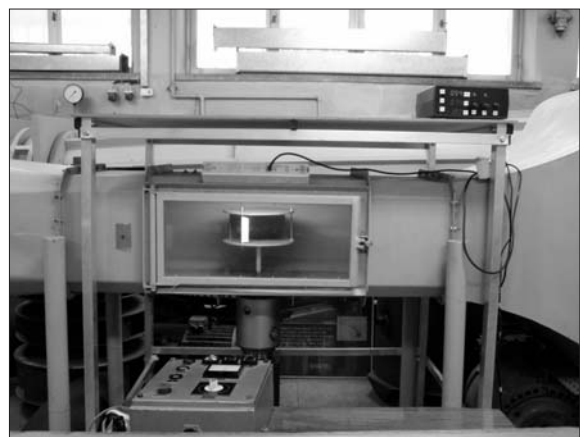
Rys. 4. Waga aerodynamiczna tensometryczna 3- składnikowa



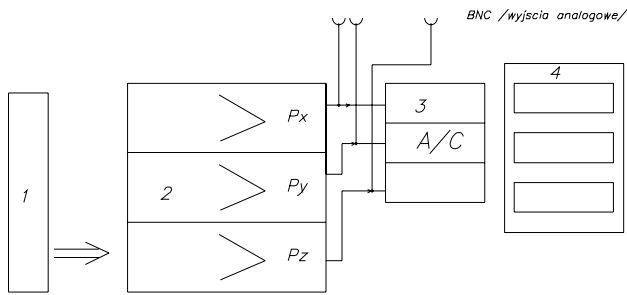
Rys. 6. Głowica do mocowania i obrotu modelu



Rys. 5. Waga aerodynamiczna tensometryczna



Rys. 7. Profil umieszczony w przepływającej strudze powietrza



Rys. 8. Schemat blokowy wagi aerodynamicznej

Część elektroniczna składa się z dwóch zasadniczych podzespołów:

- 1) przetwornika sił i momentu (tensometryczny) na wielkość elektryczną (napięcie),
- 2) wzmacniacza parametryczny i przetwornika A/C z czterema polami odczytowymi.

Przetwornik sił i momentu wykonany jest z metalu w postaci walca, w którym wykonano odpowiednie wydrążenia w celu wyselekcjonowania odpowiednio dużych odkształceń mierzonych za pomocą naklejonych tensometrów foliowych.

Schemat blokowy części elektronicznej tensometrycznej wagi aerodynamicznej przedstawiono na rysunku 8.

Elementy wagi to:

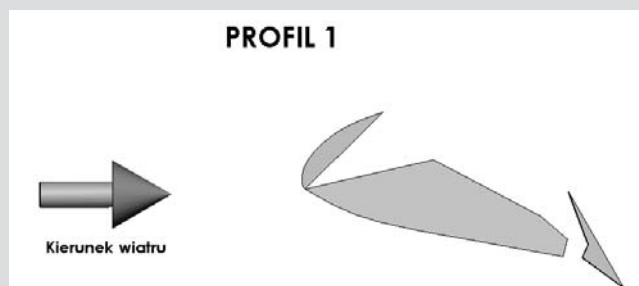
- 1 – przetwornik sił i momentu,
- 2 i 3 – kanały wzmacniaczy parametrycznych,
- 3 – przetwornik A/C (3 kanały),
- 4 – pola odczytowe.

Wzmacniacze parametryczne wykonano w oparciu o wzmacniacze dające możliwość wzmocnienia sygnału $0 \div 10\,000$ razy.

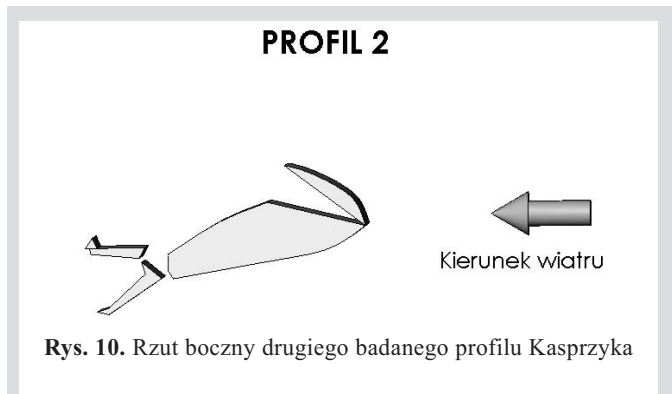
4. BADANE PROFILE AERODYNAMICZNE

Podstawowym modelem badawczym w serii badań eksperymentalnych weryfikujących profile lotnicze Kasprzyka były dwa modele przedstawione na rysunkach 9 oraz 10. Prace modelowe Kasprzyka i prace teoretyczne innych badaczy potwierdziły możliwość uzyskania profili wirowych o współczynniku siły nośnej dziesięciokrotnie większym od profili dotychczas opracowanych. Pozwala to na ponadtrzykrotne obniżenie prędkości startu i lądowania samolotów, a nawet umożliwia ich lądowanie pionowe. Istotne jest to, że można je zastosować w elektrowniach wiatrowych.

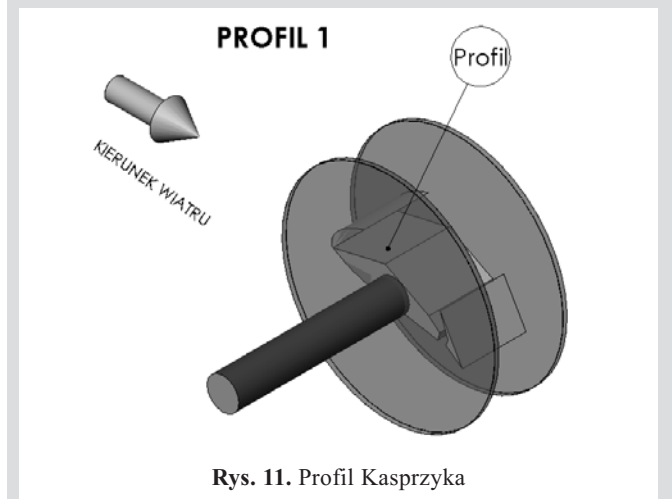
Profile po zamontowaniu przedstawiają rysunki 11–16.



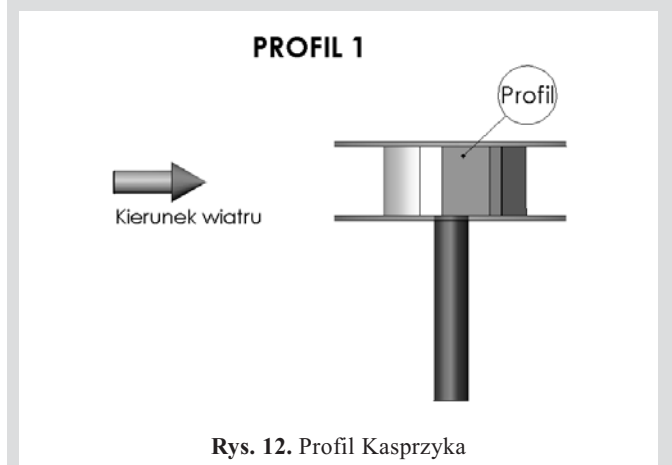
Rys. 9. Rzut boczny pierwszego badanego profilu Kasprzyka



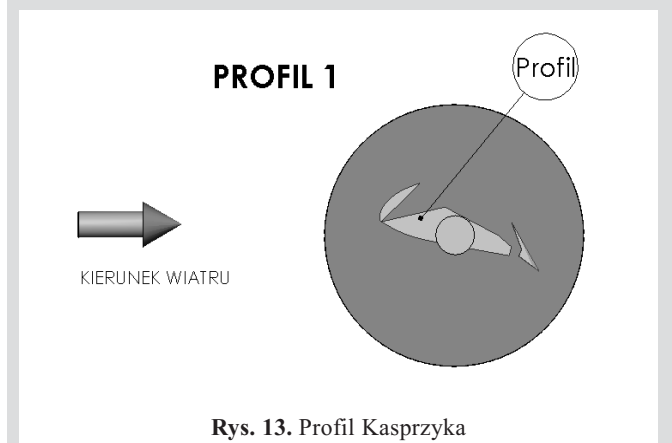
Rys. 10. Rzut boczny drugiego badanego profilu Kasprzyka



Rys. 11. Profil Kasprzyka

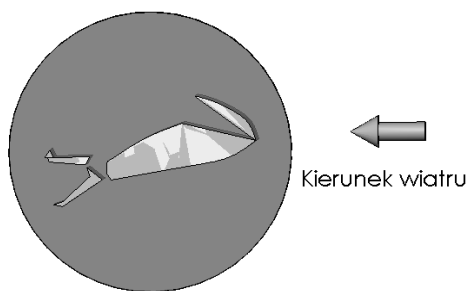


Rys. 12. Profil Kasprzyka



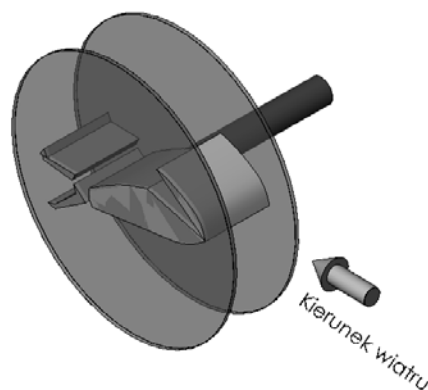
Rys. 13. Profil Kasprzyka

PROFIL 2



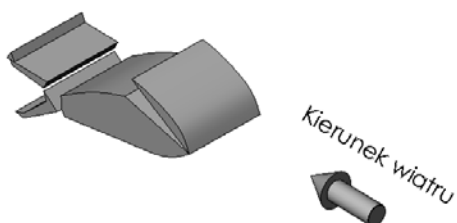
Rys. 14. Profil Kasprzyka

PROFIL 2



Rys. 16. Profil Kasprzyka

PROFIL 2



Rys. 15. Profil Kasprzyka

5. METODYKA POMIARÓW

Pomiary wykonane zostały w zamkniętym tunelu aerodynamicznym za pomocą wagi tensometrycznej. Badania przeprowadzono dla czterech prędkości przepływającej strugi powietrza: 5, 10, 15 i 20 m/s. W przestrzeni pomiarowej umieszczono model profilu łopatki możliwej do wykorzystania w wirniku elektrowni wiatrowej. Jest on połączony

z zespołem sterująco-rejestrującym, który dokonuje pomiaru momentu obrotowego i sił działających na profil łopatkowy. Pomiar momentu dokonywany jest za pomocą tensometrów naklejonych na belce poddanej wyginaniu. Sygnał w postaci napięciowej z tensometrów, po odpowiednim wzmacnieniu przez wzmacniacze operacyjne jest przetworzony w przetworniku A/C. Sygnał odwzorowujący wielkość momentu wyprowadzony jest na zewnątrz w postaci napięciowej.

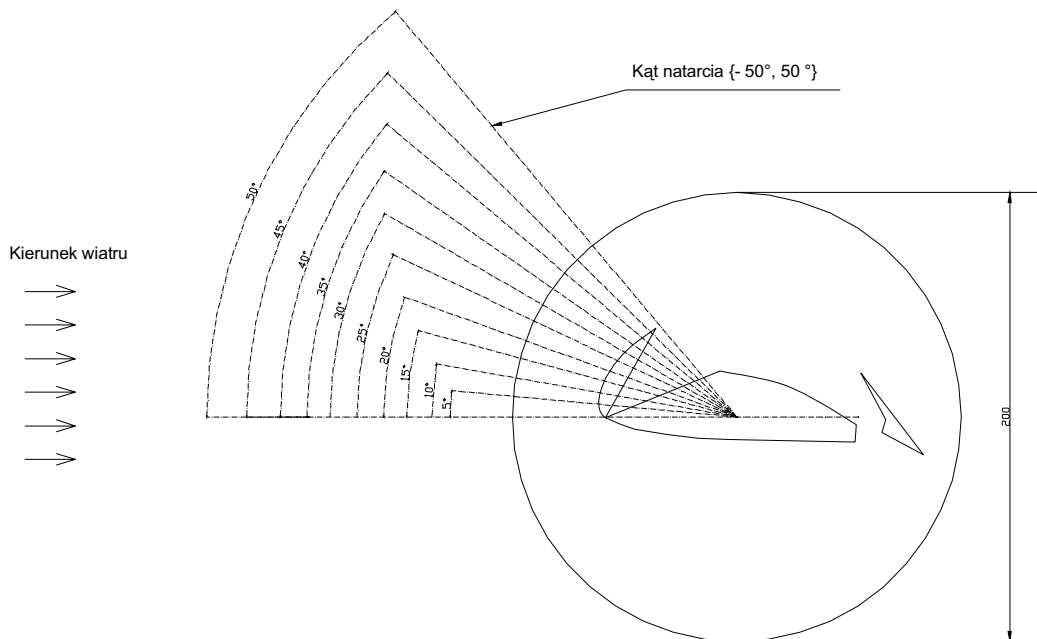
Wielkości, które były wyznaczone:

- siła nośna P_y ,
- siła oporu P_x ,
- moment obrotowy M_o .

Znając wartości sił działających na profil, możemy wyznaczyć zależność pomiędzy siłami P_y i P_x a kątem natarcia, prędkością strugi powietrza i kształtem łopatek

Pomiar przeprowadzono dla wartości kąta natarcia z zakresu od -50° do $+50^\circ$ (rys. 17).

Maksymalny błąd pomiaru określony przez producenta wagi tensometrycznej wynosi $\pm 0,07\%$.



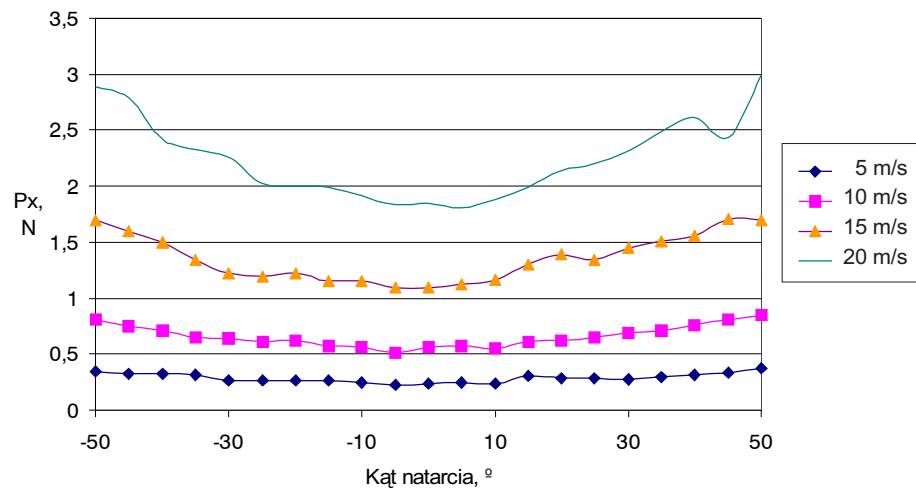
Rys. 17. Zakres pomiarowy badanego profilu Kasprzyka

6. WYNIKI BADAŃ

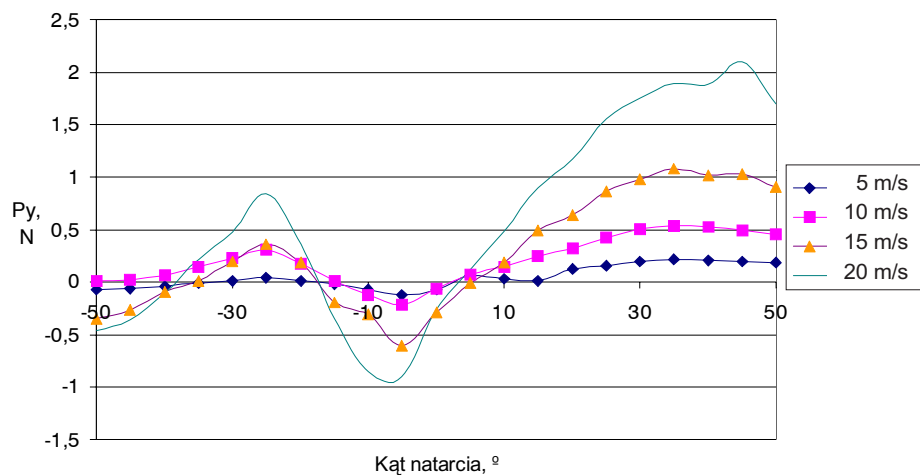
Wyniki badań siły nośnej, siły oporu oraz wartości momentu obrotowego zaprezentowano w funkcji zmiany kąta na-

tarcia. Na podstawie pomiarów siły nośnej i oporu wyznaczono stosunek P_y/P_x . Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 18–25.

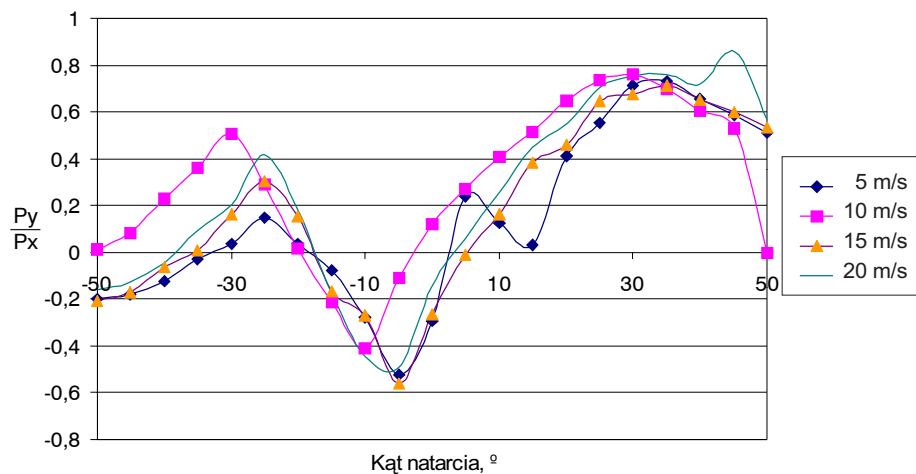
Profil Kasprzyka oznaczony symbolem I



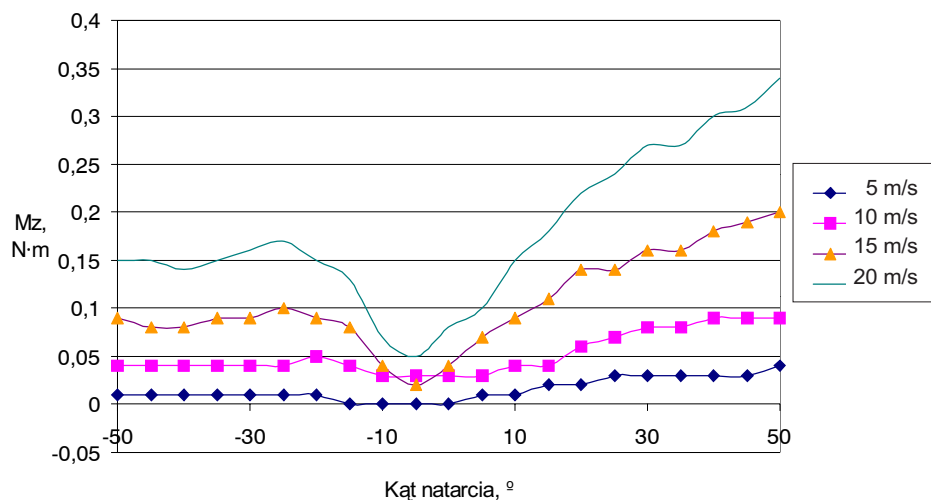
Rys. 18. Wartości siły oporu w funkcji kąta nachylenia łopatek względem kierunku przepływu strugi powietrza, mierzone przy prędkości wiatru 5, 10, 15, 20 m/s



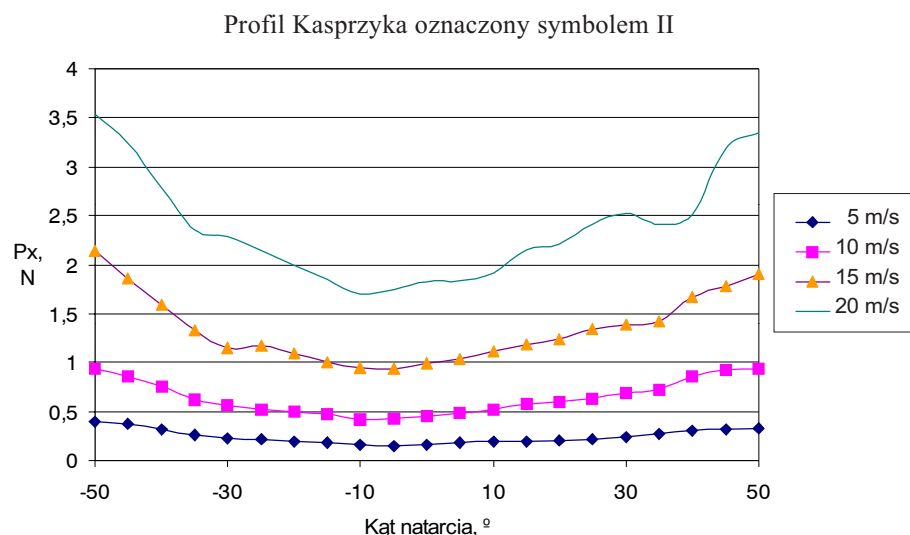
Rys. 19. Wartości siły nośnej w funkcji kąta nachylenia łopatek względem kierunku przepływu strugi powietrza, mierzone przy prędkości wiatru 5, 10, 15, 20 m/s



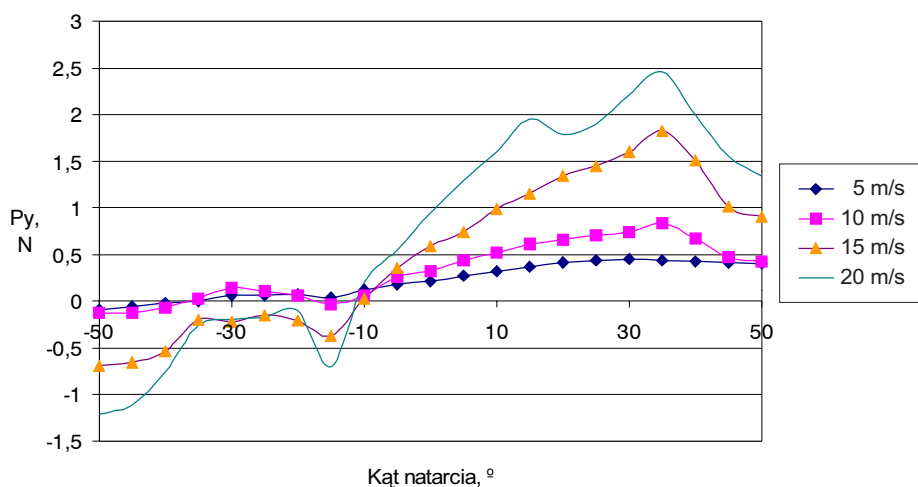
Rys. 20. Wartości P_y/P_x w funkcji kąta nachylenia łopatek względem kierunku przepływu strugi powietrza, mierzone przy prędkości wiatru 5, 10, 15, 20 m/s



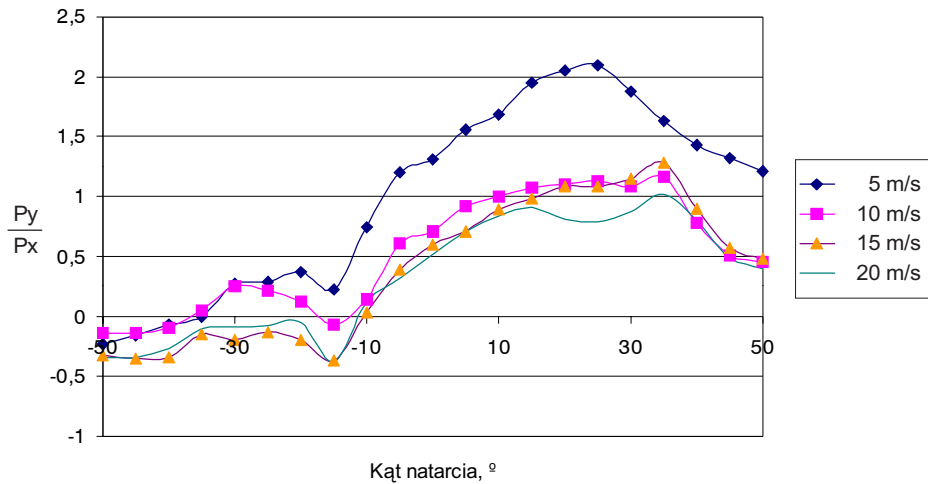
Rys. 21. Wartości momentu siły w funkcji kąta nachylenia łopatek względem kierunku przepływu strugi powietrza, mierzone przy prędkości wiatru 5, 10, 15, 20 m/s



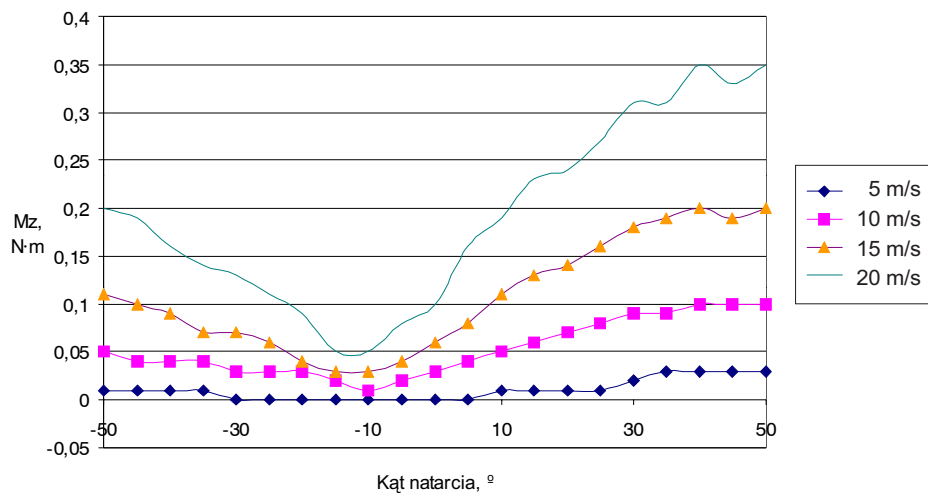
Rys. 22. Wartości siły oporu w funkcji kąta nachylenia łopatek względem kierunku przepływu strugi powietrza, mierzone przy prędkości wiatru 5, 10, 15, 20 m/s



Rys. 23. Wartości siły nośnej w funkcji kąta nachylenia łopatek względem kierunku przepływu strugi powietrza, mierzone przy prędkości wiatru 5, 10, 15, 20 m/s



Rys. 24. Wartości P_y/P_x w funkcji kąta nachylenia łopatek względem kierunku przepływu strugi powietrza, mierzone przy prędkości wiatru 5, 10, 15, 20 m/s



Rys. 25. Wartości momentu siły w funkcji kąta nachylenia łopatek względem kierunku przepływu strugi powietrza, mierzone przy prędkości wiatru 5, 10, 15, 20 m/s

7. WNIOSKI Z POMIARÓW

- Dla profili Kasprzyka I siła nośna rośnie łagodnie w mierzonym przedziale kąta nachylenia profilu względem kierunku przepływu strumienia powietrza od -5° dla profilu Kasprzyka I oraz -15° dla profilu Kasprzyka II. Dla kątów nachylenia z przedziału $30^\circ \div 40^\circ$ siła ta ma wartości maksymalne. Dalszy wzrost kąta natarcia powoduje zmniejszenie wartości siły nośnej.
- Dla wartości maksymalnych siły nośnej profil Kasprzyka I uzyskuje wartości o ok. 60% większe niż profil Kasprzyka II.
- Wartości siły oporu mierzonej dla profili są porównywalne. Profil Kasprzyka I osiąga mniejsze wartości siły oporu niż profil Kasprzyka II. Różnica jest niewielka, przy wartościach maksymalnych jest równa $-0,4$ N.
- Profil Kasprzyka I uzyskuje dla wartości maksymalnych siły oporu wartość o około 10 % większe niż profil Kasprzyka II.

- Dla profilu Kasprzyka I stosunek P_y/P_x osiąga wartości o 100 % większe niż dla profilu Kasprzyka II dla odpowiadających sobie prędkości przepływu strugi powietrza.
- Dla mniejszych prędkości stosunek P_y/P_x osiągają wartości większe, czyli wraz ze wzrostem prędkości strugi powietrza maleje wartość P_y/P_x .
- Wartość momentu siły dla obydwu badanych profili są zbliżone

8. PODSUMOWANIE

Dostosowując wybór elektrowni wiatrowej do naszych potrzeb, możemy kierować się m.in. następującymi parametrami:

- średnicą wirnika, m;
- powierzchnią zataczaną przez łopaty wirnika, m^2 ;
- prędkością obrotową łopaty wirnika, obr./min;

- sposób regulacji łopat wirnika;
- wysokością wieży, m;
- prędkością rozruchu, m/s;
- prędkością nominalną, m/s;
- prędkością wyłączenia, m/s;
- krzywą mocy;
- typem generatora;
- obecnością mechanizmu skręcającego;
- obecnością przekładni.

Kierując się sposobem regulacji łopat wirnika, mamy możliwość wyboru nastawienia łopat wirnika względem

kierunku wiatru metodą Pitch Control, Stall Control, bądź łopaty możemy zamocować na stałe bez możliwości regulacji. Każde z tych rozwiązań jest możliwe, natomiast wybór konkretnego rozwiązania powinien być poprzedzony wszechstronną analizą aerodynamiczną, energetyczną i ekonomiczną.

Na zakończenie warto zwrócić uwagę, iż w okresie ciągle wzrastających cen energii elektrycznej oraz zmniejszających się w katastrofalnym tempie zasobów naturalnych konwencjonalnych surowców energetycznych na zainteresowanie powinny zasługiwać wszelkie działania zmierzające do polepszenia sprawności urządzeń energetycznych.