

Turbina wiatrowa VAWT – pomiar sił naporu łopaty w tunelu aerodynamicznym

Waldemar Fedak, Wojciech Gancarski, Stanisław Anweiler, Adam Niestony, Roman Ulbrich

1. Wprowadzenie

W debacie zrównoważonego rozwoju krytykowane były teorie za niewystarczające wykorzystanie procesów wytwarzania energii na poziomie lokalnym. Przed globalnym sektorem wytwarzania energii stoją dwa główne wyzwania oparte na wykorzystaniu paliw kopalnych: wysokich emisji gazów cieplarnianych (GHG) i skończonej ilości paliw kopalnych, co prowadzi do wzrostu cen w perspektywie długoterminowej. Dzięki technologii odnawialnych źródeł energii wyzwania te mogłyby zostać zrealizowane. Obecnie oferują one efektywne kosztowo i w zrównoważony sposób wytwarzanie energii elektrycznej dla dużych systemów, jak również do małych wyspowych systemów zaopatrzenia w energię. Pomimo oczywistych zalet systemów energii odnawialnej dla małych systemów, ich realizacja przebiega raczej powoli. Jedną z głównych przeszkód jest brak wiedzy na temat istniejącego techniczno-ekonomicznego potencjału odnawialnych źródeł energii w tych systemach. Wydatki na autonomiczne układy zasilania (AUZ) są bardzo małe w porównaniu z kosztem dużych instalacji, formalności związane z instalacją są ograniczone do minimum, oferują niezależność energetyczną, także niezawodność dzięki nowoczesnym rozwiązaniom oraz dodatkowo uczucie proekologiczne [3]. Celem autonomicznych systemów zasilania, jest zaopatrzenie w energię elektryczną budynków, klatek schodowych, magazynów i instalacji oświetleniowych małych osiedli. Turbiny wiatrowe typu karuzelowego wydają się być najbardziej optymalnym rozwiązaniem dla autonomicznych układów zasilania.


2. Metody badawcze

Od kilku lat można zaobserwować wzmożone badania nad wydajnością, niezawodnością stosowanych w systemach AUZ turbin. W literaturze można znaleźć obszernie publikacje na temat badań tunelowych profilów łopat [2] w turbinach typu H rotor. Badania te pozwalają określić, jak zmiana wartości prędkości wiatru wpływa na wartości i kierunek rozkładu sił działających na profil łopaty z zależności od kąta jej obrotu. Dzięki temu możliwe jest określenie, jaką skutecznością aerodynamiczną charakteryzuje się badany obiekt.

Na podstawie podobnych badań w artykule [1] przeprowadzono szereg obliczeń i symulacji sił stycznych, momentu obrotowego oraz mocy, jaką generuje jedna łopata czy cały rotor. Przeprowadzone badania umożliwiają ustalenie optymalnego ustawienia łopat pod względem kierunku wiatru, tak aby zwiększyć wydajność konstrukcji i efektywność odbioru mocy z wiejącego wiatru. Określona wartość momentu pozwala na

Streszczenie: Artykuł przedstawia badania łopaty turbiny wiatrowej VAWT typu karuzelowego w tunelu aerodynamicznym. Przedstawia rodzaj i budowę tunelu, sposób pomiaru, a także układ pomiarowy do pomiaru siły naporu hydrodynamicznego. Zamieszczono również wyniki pomiarów sił działających na łopatę turbiny wiatrowej. Kluczowym aspektem jest przełożenie sił współrzędnych układu pomiarowego na siły powodujące obrót turbiny, czyli siły styczne i normalne turbiny.

Słowa kluczowe: turbina karuzelowa, tunel aerodynamiczny siłownia wiatrowa

 **Abstract:** The article presents research on a wind turbine blade VAWT in a wind tunnel. It presents the type and construction of the tunnel, the measurement method as well as the measuring system for measuring the hydrodynamic thrust force. It also presents the results of measurements of forces acting on the wind turbine blade. The key aspect is the transfer of the coordinate forces of the measurement system to the forces that cause the turbine to turn, that is, tangential and normal forces of the turbine.

Keywords: rotary turbine, wind tunnel, wind turbine

dobranie odpowiedniego generatora prądu tak, aby moment zaczepowy, to znaczy wartość, przy której możliwe jest pokonanie wewnętrznych oporów generatora oraz konstrukcji, umożliwił start turbiny. Im mniejszy jest ten moment, tym mniejsza jest potrzebna wartość prędkości wiatru i w związku z tym większy przedział prędkości, przy której turbina generuje moc.

Niemniej jednak wszystkie te badania dotyczą łopat o przekroju skrzydła, w literaturze brak jest kompletnych badań dla kształtu profilu łopaty, który jest przedmiotem niniejszego artykułu. Znane są jedynie wartości współczynnika oporu powietrza dla strony wklęsłej oraz wypukłej. To oczywiście za mało, aby precyzyjnie wyznaczyć wartość siły działającej na łopatę, a w następstwie przeniesionej na ramiona czy oś turbiny.

Turbina wiatrowa to urządzenie które jest projektowane i budowane do długotrwałego i niezawodnego działania w zmiennych warunkach obciążenia wiatrem. Wyznaczenie trwałości zmęczeniowej elementów takiej konstrukcji jest



Rys. 1. Widok tunelu aerodynamicznego od strony wentylatora

długim i skomplikowanym procesem, którego pierwszym etapem jest wyznaczenie wartości i rozkładu ciśnienia na powierzchni łopaty, wywołanego działaniem wiatru. Z powodu braku pełnych badań przeprowadzonych na tym profilu łopaty proces obliczeń już na początku może być obarczony dużym błędem. Wobec tego uzyskane wyniki badań w tunelu będą punktem odniesienia do prowadzonych symulacji komputerowych i ustalenia poprawności zastosowanych metod i wzorów obliczeniowych.

Tunele aerodynamiczne są to wysoko zaawansowane urządzenia do badania wzajemnego oddziaływania ciał stałych i płynów lub gazów znajdujących się we względnym ruchu wobec siebie. Zdjęcie przykładowego tunelu przedstawiono na rys. 1. Pozwalają eksperymentalnie zweryfikować opracowane teorie, a także poznać nowe zjawiska. Tunele aerodynamiczne coraz częściej wykorzystuje się – oprócz badań nad kształtem pojazdów drogowych i lotniczych – do badań nad optymalizacją profili łopat wentylatorów, turbin i pomp. Coraz częściej do badań przepływów wykorzystuje się symulacje komputerowe. Są prostsze i tańsze oraz gwarantują szybsze wyniki, jednak badania numeryczne nie wyprą całkowicie badań eksperymentalnych z powodu występujących w badaniach numerycznych uproszczeń i warunków brzegowych. Badania eksperymentalne pozwalają nam zweryfikować poprawność badań numerycznych. W tym celu konieczne jest zbudowanie odpowiedniego co do wielkości tunelu aerodynamicznego z komorą pomiarową, komorą wyrównawczą, urządzeniem prostującym strugę powietrza, tzw. laminatorem, i urządzeniem pomiarowym do pomiaru siły naporu oraz pozycjonowaniem kąta obrotu badanej łopaty.

Bardzo istotne jest zastosowanie odpowiedniego wentylatora zapewniającego wystarczającą siłę ciągu, a co za tym idzie – odpowiednio dużą prędkość strugi powietrza w tunelu. Wentylator powinien posiadać możliwość regulacji siły ciągu za pomocą zmiany prędkości obrotowej wirnika lub za pomocą zmiany ustawienia łopat kierownicy wirnika. Aby tunel, jako narzędzie badawczo-pomiarowe, spełnił swoje zadanie przeprowadzenia prac badawczych sprawnie i w czasie w miarę możliwym do zaakceptowania, należy niektóre czynności



Rys. 2. Widok tunelu aerodynamicznego od strony panelu kontrolnego – widok wyświetlaczy wagi i obrotnicy łopaty

zautomatyzować: pracę rejestratorów i urządzeń nastawczych regulujących kąt ustawienia badanej łopaty i prędkość obrotową wirnika wentylatora.

Do realizacji tych zadań służą komputer lub odpowiednio zaprogramowany mikrokontroler (rys. 2).

Parametry podstawowe tunelu aerodynamicznego:

- przekrój tunelu: 1 m²; możliwość zmniejszenia przekroju tunelu do 0,36 m²;
- prędkość strugi powietrza: 1–20 m/s;
- moc wentylatora: 5,5 kW;
- długość tunelu: 6 m;
- konfuzor: I – zbieżność 3/2, II – zbieżność 5/2.

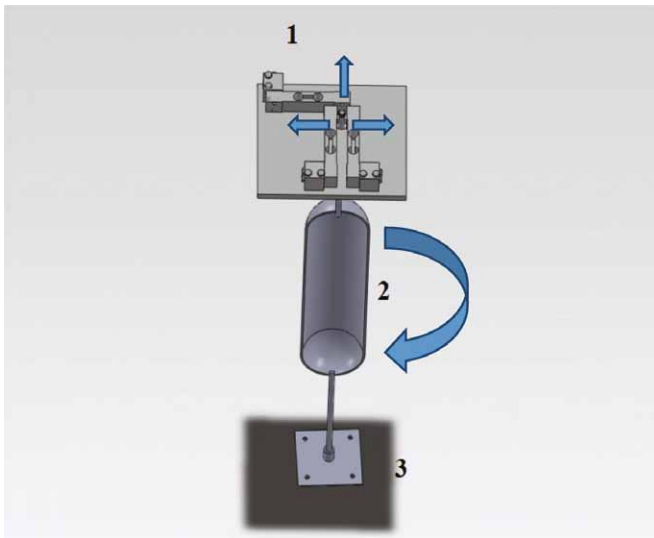
3. Układ pomiarowy

Celem układu (rys. 3) jest:

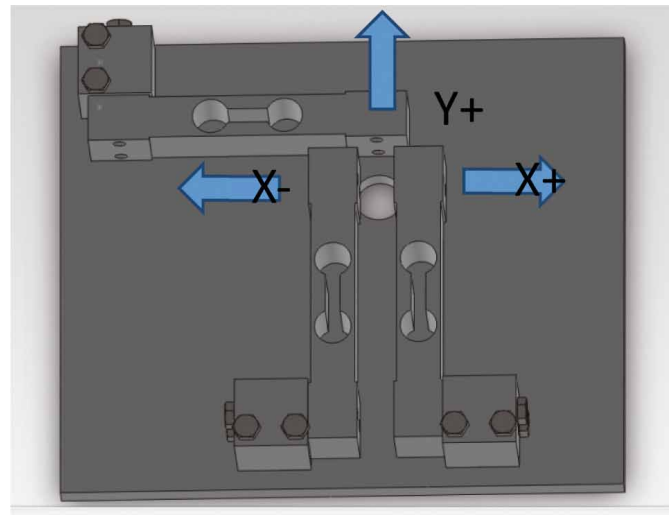
- pomiar siły naporu na badaną powierzchnię, wywołanej naporem powietrza w tunelu aerodynamicznym (rys. 4);
- pomiar siły naporu w zależności od kąta ustawienia badanej powierzchni względem kierunku przepływu strugi powietrza. (rys. 5);

gdzie:

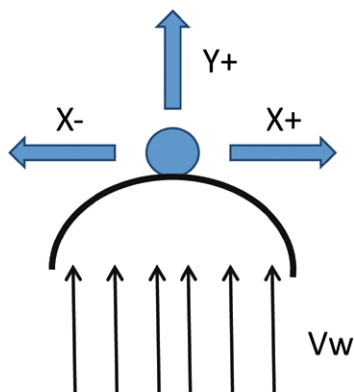
- $x+$, $x-$, $y+$ – to kierunki działania mierzonych sił;
- V_w – kierunek naporu strugi powietrza.



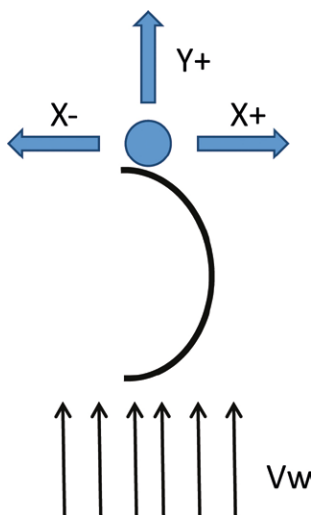
Rys. 3. Układ pomiarowy łopaty turbiny wiatrowej w tunelu aerodynamicznym: 1 - tensometryczny układ pomiarowy; 2 - badana łopata; 3 - urządzenie do obrotu łopaty



Rys. 6. Widok układu pomiarowego - mostki tensometryczne



Rys. 4. Pomiar siły naporu na obiekt



Rys. 5. Pomiar siły naporu powietrza w zależności od kąta ustawienia

Budowa układu pomiarowego

Układ pomiarowy (rys. 6) składa się z trzech mostków tensometrycznych 640-C3-15 kg-03M6 o zakresie pomiarowym 150 N i działce pomiarowej 0,0002 N. Tensometry zamocowane są na wspólnej podstawie w ustawieniu co 90° względem siebie.

Układ znajduje się poza przestrzenią pomiarową tunelu aerodynamicznego.

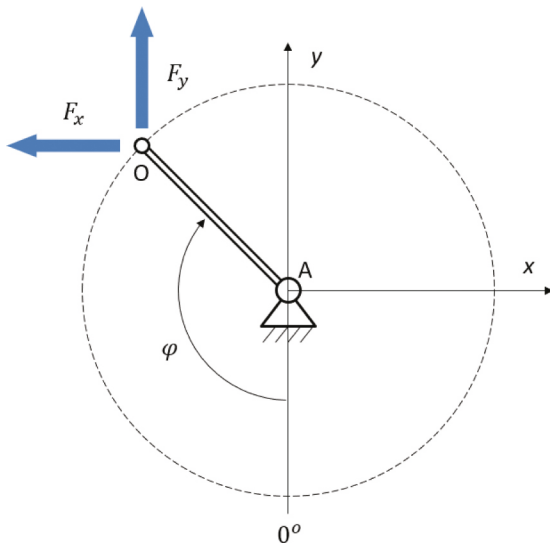
Obiekt badany w tunelu aerodynamicznym zamocowany jest do osi w postaci pręta okrągłego o średnicy 8 mm. Średnica pręta powinna być jak najmniejsza w celu minimalizacji błędów pomiarowych pochodzących od systemu mocowania. Dolna część osi zamocowana jest w specjalnym łożysku przegubowym, umożliwiającym swobodny obrót wokół własnej osi, nie powodując jednocześnie przesunięć. Łożysko to zostanie zamocowane poza przestrzenią pomiarową tunelu.

Zasada działania

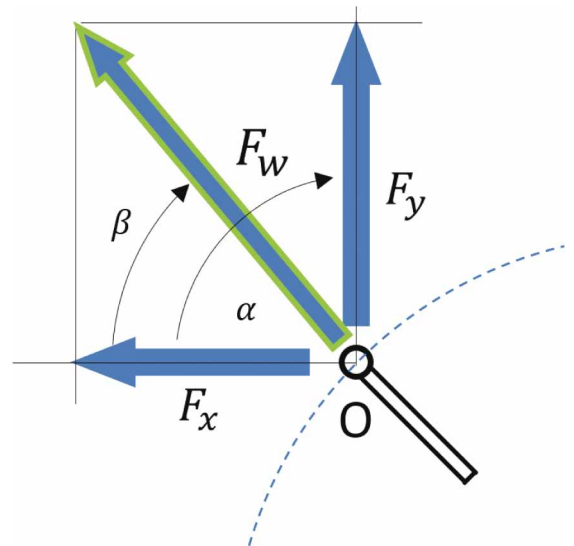
Po zmontowaniu układu pomiarowego w dowolnym tunelu aerodynamicznym niezbędne jest jedynie dopasowanie długości osi górnej i dolnej do wysokości tunelu. Siły, jakie powstaną podczas pomiaru na badanej powierzchni, spowodują wychylenie osi i jej nacisk na odpowiedni tensometr. Mostki tensometryczne podłączone są do interfejsu, a za jego pośrednictwem do komputera, gdzie rejestrowana będzie siła wywierana na tensometry. Jeżeli wystąpi siła $x+$, $y+$, to zostanie to zarejestrowane, a program może wyliczyć siłę składową. Siła ta będzie rejestrowana, a następnie poddana obróbce w celu wizualizacji wyników i ich analizie.

4. Wyniki

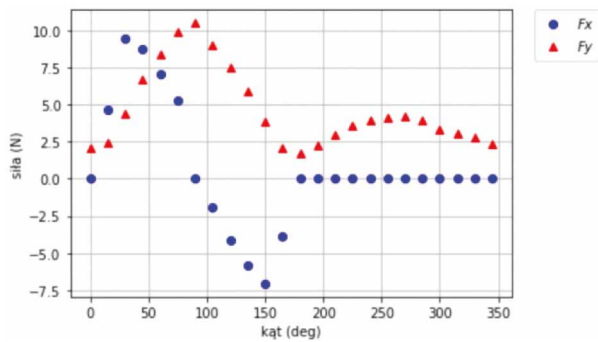
Pomiar sił wykonano w układzie współrzędnych X i Y w zależności od kąta obrotu łopaty, wartość zmierzonych sił F_x i F_y odczytano w jednostce gram. Dzięki zastosowanemu



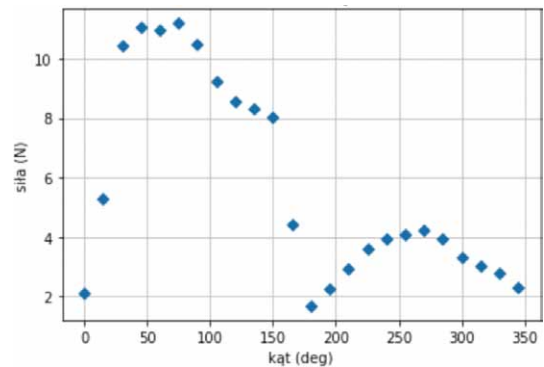
Rys. 7. Pomiar sił w zależności od kąta położenia łopaty



Rys. 9. Wykres sił dla pojedynczej łopaty turbiny H-rotor [6]



Rys. 8. Wykres sił działających na łopate



Rys. 10. Wykres siły wypadkowej wywołanej działaniem wiatru na łopate

systemowi obrotowemu łopaty jest możliwość zasymulować obrót profilu wokół osi obrotu turbiny, przedstawiony na rys. 7.

Wartość i kierunek zmierzonych sił, działających na badany model łopaty, przedstawiono na rys. 8.

Widać na nim wyraźny wzrost wartości w pierwszej ćwiartce, gdzie dla osi Y osiąga ona maksimum dla wartości kąta 90 stopni, co jest zrozumiałe, ponieważ powierzchnia łopaty jest w tym miejscu największa, zaś najmniejszą możemy zaobserwować dla wartości kąta 180 stopni, gdzie profil jest ustawiony bokiem do kierunku działania wiatru. Jak można było się spodziewać, część wypukła profilu łopaty stawia mniejszy opór, wobec czego wartości sił również będą mniejsze. W przypadku sił działających wzdłuż osi X widzimy przesunięcie o 90 stopni w stosunku do osi Y, istotniejsze jest jednak to, że w zakresie kąta od 0 do 90 ma ona znak dodatni (czyli kierunek na zewnątrz osi turbiny), a w zakresie od 90 do 180 znak ujemny – (kierunek do osi turbiny). Może to świadczyć o występowaniu siły nośnej takiej jak w przypadku skrzydła samolotu, która na początku wywołuje siłę odśrodkową, a następnie hamuje turbinę.

Do wyznaczenia siły wypadkowej można zastosować dwa równania dla wyznaczenia wektora:

- dla trójkąta prostokątnego

$$F_w = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (1)$$

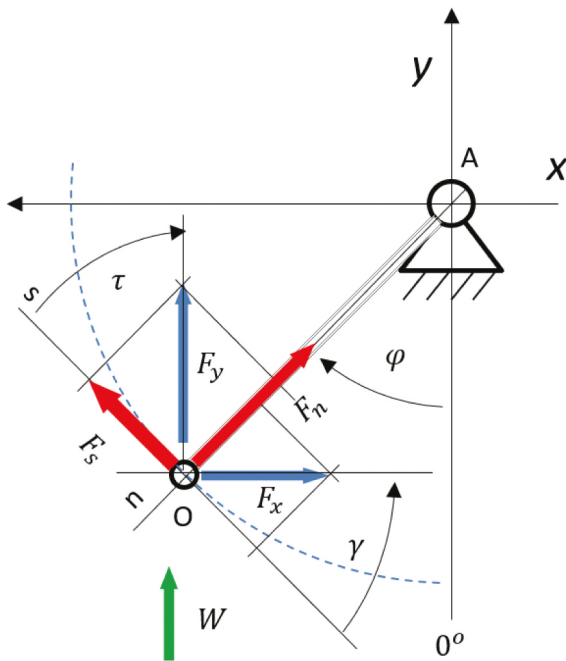
- dla równoległoboku

$$F_w = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 - 2F_xF_y\cos\alpha} \quad (2)$$

Ponieważ zastosowany układ pomiarowy pozwala nam mierzyć siły występujące pod kątem 90 stopni względem siebie (rys. 9), to możemy zastosować wzór 1. Obliczoną wartość siły wypadkowej przedstawiono na wykresie (rys. 10).

Na podstawie pomiarów można również wyznaczyć wartości siły stycznej działającej pod kątem prostym do osi obrotu turbiny oraz siły normalnej do osi turbiny.

Według przedstawionego schematu (rys. 11), siła styczna jest sumą rzutów sił F_x i F_y na oś s , natomiast siła normalna jest sumą rzutów sił F_x i F_y na oś n .



Rys. 11. Schemat obliczania sił stycznych i normalnych do osi turbiny

Stąd wartości sił stycznych i normalnych wyznaczamy ze wzorów:

$$F_s = F_x \cos \gamma + F_y \cos \tau \quad (3)$$

$$F_n = F_x \sin \gamma + F_y \sin \tau \quad (4)$$

Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 12. Zgodnie z przewidywaniami maksymalne wartości siła styczna osiąga dla kąta φ równego 90 stopni oraz 270 stopni, gdzie kierunek wiatru jest równoległy, natomiast siła normalna jest największa dla kąta φ równego 0 stopni oraz 180 stopni, kiedy łopata jest ustawiona na kierunku działania wiatru na oś turbiny. Dla 0 jest ona dociągana do osi, a dla 90 stopni odciągana od osi.

Wyznaczona siła styczna pozwoliła na obliczenie momentu, jaki jest wytwarzany wokół punktu A na ramieniu OA. Rozkład i wartość momentu wyznaczono według wzoru (5) i przedstawiono na rys. 13.

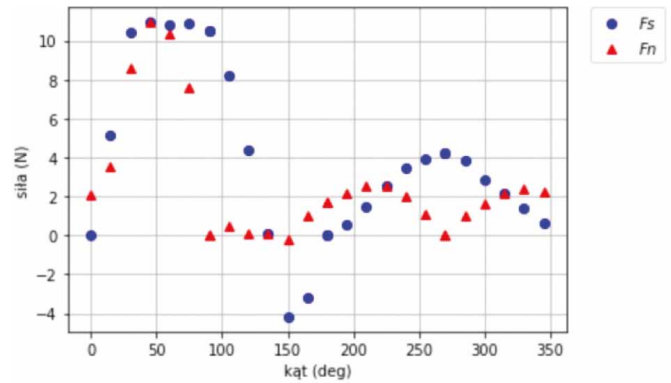
$$M = F_s \cdot r \quad (5)$$

Jak można zauważyć, ma on taki sam przebieg jak siła styczna.

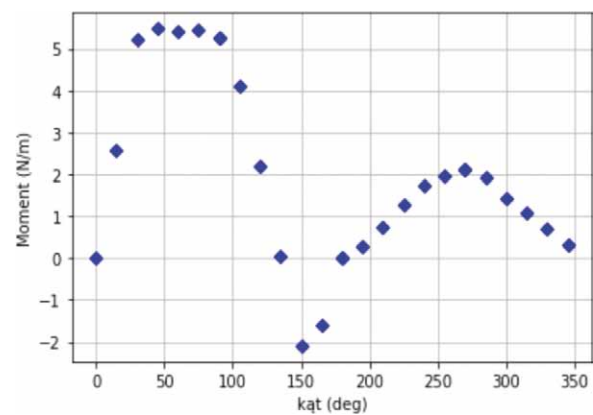
5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono budowę układu pomiarowego do wyznaczania sił działających na pojedynczą łopatę oraz metodę pomiarową i wyniki dla łopaty turbiny karuzelowej o zadanym kształcie.

Wartość efektywna łopaty w turbinie zależy od różnicy wielkości naporu hydrodynamicznego na łopatę w zależności od ustawienia do wiatru. Gdy wielkość naporu na stronę wklęsłą



Rys. 12. Rozkład siły stycznej i normalnej do osi obrotu turbiny



Rys. 13. Rozkład momentu

jest odwrotnie proporcjonalna w stosunku do strony wypukłej, efektywność łopaty, a zarazem całej turbiny rośnie, czyli im większy napór na stronę wklęsłą, a mniejszy na stronę wypukłą.

Literatura

- [1] AUGUSTYN M., RYŚ J.: *Kinematyka i moment napędowy turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu*. 2007.
- [2] RYŚ J., AUGUSTYN M.: *Badania eksperymentalne łopaty o przekroju dwuspójnym turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu – kinematyka i moment napędowy turbiny*, 2012.
- [3] FEDAK W., ANWEILER S., ULBRICH R., JAROSZ B.: *The Concept of Autonomous Power Supply System Fed with Renewable Energy Sources, Journal of Sustainable Development of Energy „Water and Environment Systems”* 5(4)/ 2017, pp 579–589.

Waldemar Fedak, Wojciech Gancarski, Stanisław Anweiler, Adam Niesłony, Roman Ulbrich – Politechnika Opolska

artykuł recenzowany