



Article citation info:

Baworski, A., Garbala, K., Czech, P., Witaszek, K. Estimation of the ability to use a mass of air from a moving vehicle in wind turbine propulsion. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2015, **88**, 5-17. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2015.88.1.

Adam BAWORSKI¹, Krzysztof GARBALA², Piotr CZECH³, Kazimierz WITASZEK⁴

ESTIMATION OF THE ABILITY TO USE A MASS OF AIR FROM A MOVING VEHICLE IN WIND TURBINE PROPULSION

Summary. This work presents division and classification of wind turbines according to the location of the axis of rotation and generated power. The work introduces applications of the wind turbines in electric energy generation with their direct development. The paper discusses indicators and exploitation parameters that characterize particular types of wind rotators. Dimension and construction factors, as well as work parameters, have been analyzed in order to choose the optimal rotator in the road infrastructure application. The aim of the analysis was to conduct further investigation to restore a mass of air from passing vehicles.

Keywords: wind turbine; renewable energy; Savonius rotor.

¹ ZSM CKP nr 2 in Białystok, Broniewskiego 14 Street, 15-959 Białystok, Poland, e-mail: adambawor@wp.pl

² AC S.A. Centrum Badawczo – Rozwojowe, 42 Pułku Piechoty 50 Street, 15-181 Białystok, Poland.

ZSM CKP nr 2 in Białystok, Broniewskiego 14 Street, 15-959 Białystok, Poland,

e-mail: krzysztofgarbala@tlen.pl

³ Faculty of Transport, The Silesian University of Technology, Krasińskiego 8 Street, 40-019 Katowice, Poland, tel. (+48 32) 6034230, piotr.czech@polsl.pl

⁴ Faculty of Transport, The Silesian University of Technology, Krasińskiego 8 Street, 40-019 Katowice, Poland, tel. (+48 32) 6034152, kazimierz.witaszek@polsl.pl

OCENA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA PĘDU MAS POWIETRZA OD JADĄCYCH POJAZDÓW DO NAPĘDU TURBINY WIATROWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono podział i klasyfikację turbin wiatrowych według położenia osi obrotu i wytwarzanej mocy. Zaprezentowano ich zastosowanie w wytwarzaniu energii elektrycznej z ukierunkowanym ich rozwojem. Omówiono wskaźniki i parametry eksploatacyjne charakteryzujące poszczególne typy wirników wiatrowych. Przeanalizowano te wielkości oraz czynniki konstrukcyjne i parametry pracy w celu wyboru optymalnego wirnika do zastosowania w infrastrukturze drogowej. Dalsze badania mają na celu odzyskanie energii ruchu mas powietrza od przejeżdżających pojazdów.

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa; energia odnawialna; rotor Savoniusa.

1. WPROWADZENIE

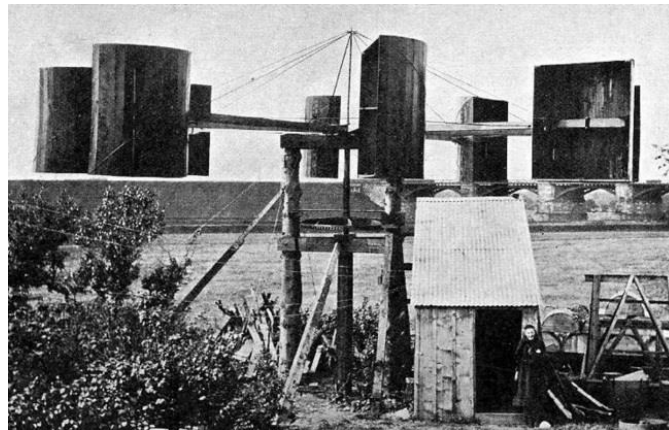
W ostatnich dwóch dziesięcioleciach następuje zdynamizowane zainteresowanie pozyskiwaniem energii z odnawialnych źródeł zarówno przez firmy, jak i indywidualnych użytkowników. Do tego wzrostu przyczynia się wiele czynników, a wśród nich jeden najważniejszy – ekonomiczny. Mają tutaj udział też ustawy towarzyszące energetyce odnawialnej. Ostatnio taką ustawą jest Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (DzU, 2015, poz. 478). Promuje ona małe instalacje dla indywidualnych odbiorców do mocy 3 kW (najbardziej uprzywilejowane). Istnieje tutaj możliwość odsprzedaży wyprodukowanej nadwyżki energii elektrycznej dla zakładu energetycznego po preferencyjnych cenach. Należy też nadmienić, że istnieją konstrukcje wykorzystujące energetykę odnawialną jako rozproszone niezależne źródło energii. Przykładowe zastosowanie jest w infrastrukturze drogowej – panele fotowoltaiczne, często połączone w układ hybrydowy z turbiną wiatrową na terenach niezurbanizowanych w konwencjonalną sieć energetyczną. Dodatkowym czynnikiem pobudzającym zainteresowanie ekoenergią jest postawa społeczeństwa po ostatnich awariach elektrowni atomowej w Japonii [1÷4].

2. EWOLUCJA TURBIN WIATROWYCH

Energia wiatrowa była i jest najwcześniej, oprócz spalania drewna, eksploatowaną przez ludzi energią odnawialną. Na początku zaprzęgnięto energię wiatru do napędu statków i łodzi. Pierwszy opis użycia wiatraków do pompowania wody powstał około 400 roku p.n.e. w Indiach i Persji [5].

Największą rolę energia wiatru odgrywała w XVI wieku, a w 1850 roku ogólna moc młynów napędzanych wiatrem wynosiła w przybliżeniu 1 TW. Pod koniec XIX wieku rozwój maszyny parowej spowodował wyparcie napędu wiatrowego z wielu dziedzin życia gospodarczego [6].

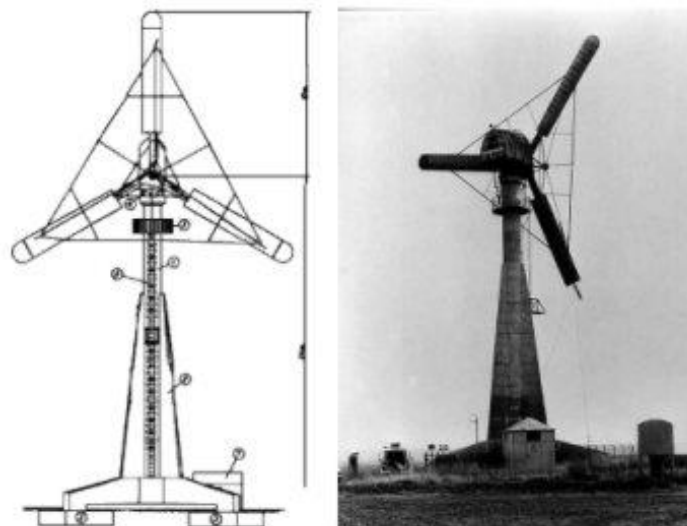
Pierwsza elektrownia wiatrowa powstała w lipcu 1887 roku i była napędzana turbiną o pionowej osi obrotu. Wynalazł ją szkocki konstruktor James Blyth, a służyła ona do ładowania akumulatorów w jego domu letniskowym w Marykirk (Szkocja). Na przedstawionej fotografii (rys. 1) widoczne są podobieństwa z konstrukcjami wiatraków pionowych [7, 8].



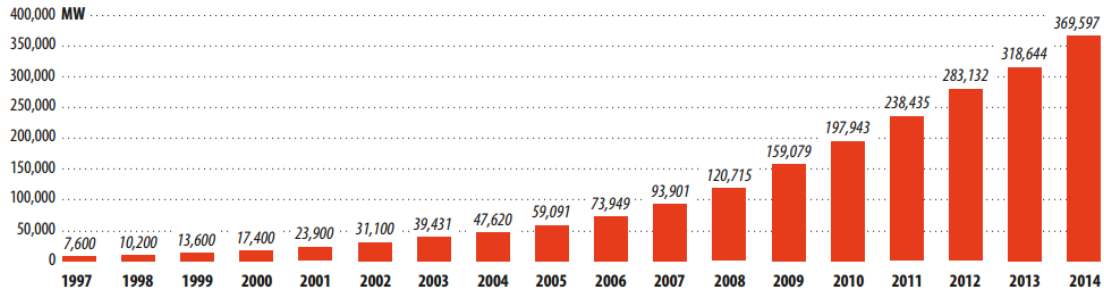
Rys. 1. Elektrownia wiatrowa Jamesa Blytha sfotografowana w 1891 roku [6]

W 1957 roku Johannes Juul zbudował na wybrzeżu Gedser w Danii elektrownię wiatrową, której założenia techniczne do dziś są uważane za nowoczesne (rys. 2). Elektrownia o mocy 200 kW miała trójłopatowy wirnik zwrócony przodem do wiatru, generator asynchroniczny, mechanizm ustawiania kierunku, hamulce aerodynamiczne oraz regulację mocy przez zmianę kąta natarcia łopatek [7, 8].

Coraz liczniejsze doniesienia literaturowe dotyczące energetyki wiatrowej wskazują na zdynamizowane zainteresowanie tym typem pozyskiwania energii. Należy przy tym zaznaczyć, że dzięki ulepszeniom technologicznym i konstrukcyjnym zmniejszyły się koszty budowy typowych elektrowni budowanych współcześnie. Przez to energia wiatrowa stała się atrakcyjniejszym źródłem energii. Ponadto stanowi ona czystą i łatwo dostępną alternatywę dla tradycyjnych źródeł. Wykorzystanie energii wiatru w latach dziewięćdziesiątych pod względem tempa rozwoju jest porównywalne z rozwojem informatyki. Szacuje się, że w ostatniej dekadzie wzrost ten wynosił 85% (rys. 3) [9].



Rys. 2. Pierwsza elektrownia wiatrowa zbudowana wg współczesnych założeń konstrukcyjnych [7, 8]



Rys. 3. Globalna moc turbin wiatrowych [9]

3. KINEMATYKA TURBINY WIATROWEJ

Podstawowym parametrem charakteryzującym turbinę wiatrową jest jej współczynnik mocy C_p , czyli stosunek mocy turbiny do teoretycznej mocy zawartej w wietrze. Współczynnik mocy turbiny zależy w głównej mierze od typu turbiny wiatrowej, jak również od parametrów konstrukcyjnych, do których można zaliczyć liczbę płatów wirnika i ich profil. Zależy on również od prędkości obrotowej rotora i chwilowej prędkości wiatru [10, 11].

Moc odebrana z wiatru wynosi:

$$P_{ow} = \frac{\rho}{4} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \cdot A_1 \quad (1)$$

gdzie:

- A_1 – powierzchnia zakreślana przez wirnik w m^2 ,
- A_2 – powierzchnia strugi powietrza za wirnikiem w m^2 ,
- V_1 – prędkość wiatru przed wirnikiem turbiny w m/s,
- V_2 – prędkość wiatru za wirnikami turbiny w m/s,
- ρ – gęstość powietrza w kg/m^3 .

Moc zawarta w wietrze (powierzchniowa gęstość mocy na jednostkę czasu) jest równa:

$$P_{zw} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot V_1^3 \quad (2)$$

Stosunek mocy odebranej przez turbinę do mocy zawartej w wietrze wynosi:

$$\frac{P_{ow}}{P_{zw}} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) = C_p \quad (3)$$

Stosunek ten znany jest pod pojęciem współczynnika mocy Betza C_p . Został on określony przez Alberta Betza w 1919 roku [14].

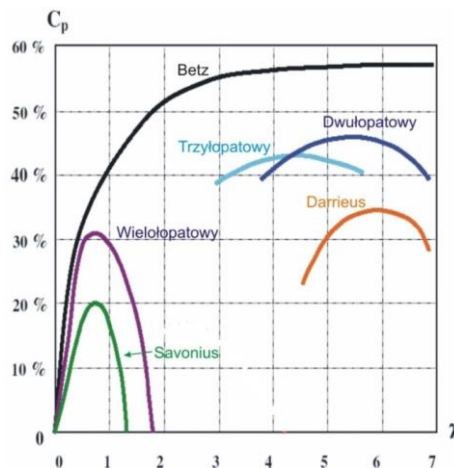
Ze względu na straty w praktyce rzeczywisty współczynnik C_p jest zwykle mniejszy od wartości teoretycznej. Na rys. 4 przedstawiono przebieg współczynnika C_p w funkcji szybkobieżności λ , określonej zależnością (4), dla danego typu turbin.

$$\lambda = \frac{0,5D \cdot \omega}{V_1} \quad (4)$$

gdzie:

ω – prędkość kątowna wirnika turbiny,
 D – średnica wirnika turbiny.

Najlepiej wykorzystuje energię wiatru turbina wiatrowa dwułopatowa o poziomej osi obrotu. Jej sprawność aerodynamiczna C_p mieści się w granicach 46%. Najniższą sprawnością charakteryzuje się turbina o pionowej osi obrotu Savoniusa. Wykorzystuje ona energię wiatru w około 20% [11, 12].



Rys. 4. Zależność przebiegu współczynnika mocy C_p od szybkobieżności λ turbin wiatrowych [10]

4. PODZIAŁ I KLASYFIKACJA TURBIN WIATROWYCH

Istnieją dwa podstawowe kryteria podziałów turbin wiatrowych (silników wiatrowych): ze względu na moc turbiny wiatrowej oraz na położenie osi obrotu.

4.1. Podział turbin wiatrowych ze względu na moc turbiny wiatrowej

Mikroturbiny – ich moc wynosi do 100 W. Wykorzystuje się je do oświetlenia i ładowania akumulatorów jachtów, oświetlenia na polach biwakowych, w altankach. Stosowane są w nich instalacje niskonapięciowe i jest to najczęściej rozproszone źródło energii niepodłączone do sieci energetycznej. Ostatnio buduje się je w układach hybrydowych razem z panelami słonecznymi [13].

Małe turbiny – ich moc sięga 30 KW. Montują je indywidualni inwestorzy na własny użytek w celu zasilenia własnych odbiorników prądu. W związku z tym, że turbiny są włączone do sieci energetycznej, nadmiar energii może być sprzedawany do zakładu energetycznego [14].

Duże turbiny – ich moce sięgają do kilku megawatów. Obecnie największą moc ma turbina wiatrowa firmy VESTAS – 8 MW, zainstalowana w Danii (rys. 5). Tego typu turbiny są zgromadzone w zespołach tworzących tzw. farmy wiatrowe. Są one włączone w sieć energetyczną i całą wytworzoną energię przekazują do zakładów energetycznych. W krajach, które pierwsze zaczęły wytwarzać energię na masową skalę, istnieją systemy zarządzania

wytwarzaniem energii elektrycznej polegające na współpracy z elektrowniami konwencjonalnymi (węglowymi, atomowymi) [15].



Rys. 5. Turbina trójłatowa firmy Vestas o mocy 8 MW [15]

4.2. Podział turbin wiatrowych ze względu na położenia osi obrotu wirnika

4.2.1. Turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu

Konstrukcja ta jest najbardziej rozpowszechniona i kojarzona z energetyką wiatrową. W tym rozwiązaniu najczęściej są stosowane rotory z trzema łopatom zamocowane na maszcie. Spotyka się konstrukcje zarówno z jedną, jak i dwiema łopatom. Wykazują się one wysokim wskaźnikiem szybkobieżności i dużą sprawnością aerodynamiczną [12, 16].

Rozpowszechnione są również wiatraki wielołopatowe – powyżej ośmiu łopat. Charakteryzują się niskim współczynnikiem szybkobieżności, działają przy małych podmuchach wiatru i mają wysoki moment napędowy (rys. 6). Nie mają one zastosowania do wytwarzania energii elektrycznej, ale są wykorzystywane do napędów pomp wody (przykładowo na amerykańskich preiach). Konieczne jest tu wprowadzenie urządzenia do nastawiania wiatraka na wiatr. Tego typu konstrukcje muszą mieć zabezpieczenia przeciw zniszczeniu konstrukcji przy dużych prędkościach wiatru. W starych rozwiązaniach były to hamulce aerodynamiczne, a w nowszych realizuje się to przez układy automatyczne – zmiana kąta natarcia lub ustawienia gondoli prostopadle do wektora prędkości wiatru. Orientacyjnie można powiedzieć, że przedział pracy komercyjnych turbin wiatrowych trzyłopatowych wynosi od 4 m/s do 25 m/s prędkości wiatru [12, 16].



Rys. 6. Turbina wielołopatowa Renewable Energy Solutions Australia Holdings Ltd [17]

Innym przedstawicielem silników wiatrowych o poziomej osi obrotu jest wirnik wykorzystujący efekt Magnusa. Można tutaj nadmienić, że w Polsce jest jedna działająca konstrukcja wykonana przez zakład z Bielska-Białej, zainstalowana w Pagórkach koło Elbląga (rys. 7). Ten typ turbiny obecnie nie ma komercyjnego zastosowania w przemysłowym wytwarzaniu energii [18].



Rys. 7. Turbina wykorzystująca efekt Magnusa zainstalowana w Pagórkach [18]

4.2.2. Turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu

Przedstawiony na rys. 8 rotor wynaleziony przez S.J. Savoniusa cechuje się prostą konstrukcją, lecz ma niski współczynnik mocy C_p . Istotną zaletą tej turbiny jest praca wirnika bez hałasu oraz bardzo prosta konstrukcja. Turbina Savoniusa opiera się na wykorzystaniu siły parcia wiatru i siły nośnej, cechuje się dużym momentem startowym. Najlepszym rozwiązaniem jest turbina Savoniusa o dwóch łopatkach. Większa liczba łopatek wpływa na moment startowy i obniża sprawność aerodynamiczną [19, 20].



Rys. 8. Turbina Savoniusa [21]

W 1931 roku francuski konstruktor Darrieus opatentował rotor nazwany od jego nazwiska wirnikiem H-Darrieus (rys. 9). Turbina Darrieusa ma dwie lub trzy długie, cienkie łopaty w kształcie pętli C, łączące się na górze i dole osi obrotu, albo łopaty proste, równoległe do osi obrotu. Turbina ma dobrą sprawność aerodynamiczną, natomiast do jej wad należy praktycznie zerowy moment rozruchowy [22].

Inną odmianą turbiny Darrieusa jest H-rotor (rys. 10). W produkcji energii największy udział ma zewnętrzna część wirnika, a środek ma bardzo małe znaczenie. W przypadku turbiny Darrieusa odległość łopaty od osi obrotu jest maksymalna – cała łopata znajduje się w maksymalnej odległości od osi obrotu. Rozwiązanie to nie przyjęło się powszechnie, ponieważ łopaty wirnika wraz z ruchem obrotowym stale zmieniają kąt natarcia w stosunku do wiejącego wiatru. Inną wadą tej konstrukcji jest fakt, że podczas obrotu jedna łopata zawsze wytwarza opór rzeczywisty, co jest nieuniknione, ale ma wpływ na pracę wirnika i ostatecznie sprawność oraz generowaną moc [22].

Najmniejszym zainteresowaniem cieszą się silniki karuzelowe, które charakteryzują się niskim współczynnikiem sprawności w stosunku do pozostałych turbin o pionowej osi obrotu. Znalazły one zastosowanie do napędu wiatromierzy (rys. 11) oraz reklam [22].

Zdzisław Pawlak w 1985 roku opatentował dwustopniową przepływową turbinę o pionowej osi obrotu. Charakteryzuje się ona wieloma zaletami, takimi jak: wysoka sprawność aerodynamiczna, cicha praca, duży moment obrotowy przy rozruchu, praca bez względu na zmiany kierunku wiatru, równomierna praca przy wiatrach porywistych. Strumień powietrza poprzez nieruchome łopatki kierownic zostaje skierowany na wewnętrzny wirnik turbiny. Zmniejszenie przekroju w czasie przepływu zwiększa prędkość wirnika. Równomiernie rozmieszczone na obwodzie kierownice umożliwiają pracę niezależnie od kierunku wiatru [26].



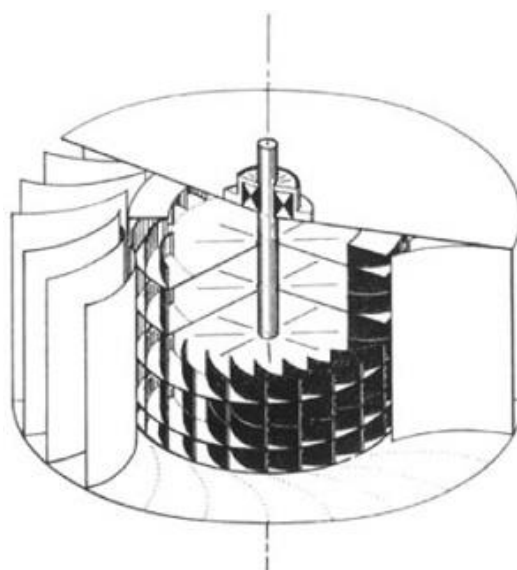
Rys. 9. Turbina Darrieusa [23]



Rys. 10. Turbina H-Darrieusa [24]



Rys. 11. Turbina karuzelowa [25]



Rys. 12. Szkic turbiny Pawlaka [26]

5. KONCEPCJA WYKORZYSTANIA TURBINY WIATROWEJ W ODZYSKU ENERGII Z MAS POWIETRZA OD PRZEJEŹDZAJĄCYCH POJAZDÓW

Po dokładnej analizie rozwiązań konstrukcyjnych oraz typów turbin wiatrowych przystąpiono do weryfikacji i wyboru optymalnego wirnika do zastosowania w infrastrukturze drogowej mającej na celu odzyskanie pędu mas powietrza od przejeżdżających pojazdów.

W tablicy 1 przedstawiono cechy użytkowe i własności eksploatacyjne poszczególnych typów turbin wiatrowych. Pozwoli to na wybór optymalnego wirnika do dalszych badań.

Tab. 1

Cechy użytkowe i własności eksploatacyjne poszczególnych typów turbin wiatrowych

Typ turbiny	Współczynnik mocy C_p max	Wskaźnik szybkości λ max	Układ nastawienia na wiatr	Układ zabezpieczający przed nadmierną prędkością	Minimalna prędkość wektora wiatru [m/s] powodująca ruch turbiny	Stosunek uzyskiwanej mocy [kW] do materiału użytego do budowy wirnika z 3,6 m ² przy prędkości wiatru 5,6 m/s	Odporność na oszronienie i szadź (niewyważenie dynamiczne)	Rodzaj konstrukcji	Uwagi
H-Darrieusa	0,4	5,8	brak	brak	2,8	0,211	nieodporna	skomplikowana	wymaga rozruchu
Darrieusa	0,37	5,9	brak	brak	3	0,85	nieodporna	skomplikowana	
Savoniusa	0,21	0,7	brak	brak	1,8	0,0223	odporna	prosta	
Karuzelowa	0,1	0,5	brak	brak	1,6÷2,5		odporna	prosta	
Trójłopatowe	0,42	4,2	wymagany	wymagany	4	2,6	nieodporna	skomplikowana	
Wielołopatowe	0,3	0,7	wymagany	wymagany	2	0,412	odporna	skomplikowana	
Magnusa	0,4		wymagany	brak		0,76	nieodporna	skomplikowana	wymaga rozruchu

Po porównaniu danych zawartych w tabeli 1 optymalnym wirnikiem do zastosowania w infrastrukturze drogowej jest turbina Savoniusa. Za jej wyborem przemawia wiele zalet, takich jak:

1. prosta budowa,
2. brak układów do ustawiania na wiatr,
3. możliwość wykorzystania do pracy zburzonych przepływów mas powietrza,
4. odporność na oblodzenie i oszronienie,
5. cicha praca,
6. możliwość pracy do prędkości wektora wiatru 80 m/s, brak układów zabezpieczających typu hamulce bezpieczeństwa,
7. mała prędkość rozruchowa przy prędkości wektora wiatru około 2 m/s.

Należy nadmienić, że tego typu wirnik charakteryzuje się niską sprawnością aerodynamiczną (współczynnik mocy C_p), wynoszącą około 0,2. Choć turbina pozioma z wirnikiem trójłopatowym ma bardzo wysoki współczynnik C_p , wynoszący 0,5, ma bardzo dużą wadę, jeśli chodzi o zastosowanie do odzysku pędu mas powietrza od przejeżdżających pojazdów. Musi mieć ster kierunku, czyli układ do nastawiania wirnika na wiatr, a zburzone masy pędu powietrza spowodują wystąpienie zjawisk żyroskopowych w turbinie, czyli obrót dookoła osi układu nastawiania na wiatr. Rezultatem tego po przejeździe pojazdu będzie szukanie przez turbinę prostopadłego wektora prędkości wiatru do wirnika. Korzystnym rozwiązaniem mogłaby być turbina typu H-Darrieusa. Ma ona wysoki współczynnik mocy C_p , wynoszący 0,4, i dużo zalet, jak wirnik Savoniusa. Jej wadą jest zasada działania oparta na wykorzystaniu siły nośnej, co może spowodować spadek jej sprawności przy turbulentnym przepływie pędu powietrza. Również nie jest ona odporna na niewyważenie dynamiczne spowodowane np. oblodzeniem. Turbiny Darrieusa i Magnusa nie nadają się w tym przypadku, gdyż charakteryzują się zerowym momentem rozruchowym. Turbiny karuzelowe mają niską sprawność aerodynamiczną, równą 0,12. Wirniki wielołopatowe mają wady tego samego typu co wirniki trójłopatowe.

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy cech konstrukcyjnych i właściwości użytkowych różnych typów turbin wiatrowych do zastosowania przy odzysku pędu mas powietrza od przejeżdżających pojazdów można sformułować następujące wnioski końcowe:

1. Przeprowadzona wstępna analiza typów turbin w sposób przejrzysty pozwoliła wybrać najkorzystniejszy wirnik do badań nad odzyskiem pędu mas powietrza od przejeżdżających pojazdów.
2. Optymalnym wirnikiem mającym dużo korzystnych czynników do zastosowania przy odzysku pędu mas powietrza od przejeżdżających pojazdów jest wirnik Savoniusa, nad którym będą prowadzone dalsze badania w tym kierunku.
3. Wirnik trójłopatowy mimo wysokiego współczynnika C_p nie nadaje się do tego celu z uwagi na zjawiska żyroskopowe spowodowane w układzie nastawiania na wiatr od przepływu turbulentnych mas powietrza.
4. Turbiny Darrieusa i Magnusa nie nadają się w tym przypadku, gdyż charakteryzują się zerowym momentem rozruchowym.

References

1. Smil V. 2000. *Energies: An illustrated guide to the biosphere and civilization*. Cambridge, USA: MIT Press.
2. Hills R.L. 1993. *History of Windmill Technology. Power from Wind*. Cambridge, USA: Cambridge University Press.
3. D'Ambrosio M., M. Medaglia. May 2010. „Vertical Axis Wind Turbine History. Technology and Applications”. Master thesis in energy engineering, Halmstad: Högskolan.
4. Price T.J. 2005. „James Blyth – Britain's first modern wind power pioneer”. *Wind Engineering* 29 (3): 191-200.
5. Elektrownie wiatrowe. „Historia wykorzystania energii wiatru”. [In Polish: Wind power plants. “The history of wind energy”]. Available at: <http://www.wiatracyk.cba.pl/historia.html>.
6. Elektriker Johannes Juul opfandt lavvoltskomfuret og blev far til den 145 odern vondmølle: En Dansk vind elektriker 2011.
7. Sztuba W., B. Marcinkowski. Listopad 2011. *Energetyka wiatrowa w Polsce. Raport*. [In Polish: *Wind energy in Poland*. Report. November 2011].
8. Kiwierowicz-Mogilnicka E., K. Mogilnicki, K. Garbala. 2010. *Zagrożenia w budowie i eksploatacji turbin wiatrowych*. [In Polish: *Risks in the construction and operation of wind turbines*]. Białystok: Wyższa Szkoła Ekonomiczna w Białymstoku.
9. GWEC. „Global Wind Report 2014”. Available at: <http://www.gwec.net>.
10. Randall D.G. 1966. *Betz introduction to the theory of flow machines*. Oxford, UK: Oxford Pergamon Press.
11. Uracz P., B. Karolewski. 2006. „Modelowanie turbin wiatrowych z wykorzystaniem charakterystyk współczynnika mocy”. [In Polish: “Modeling of wind turbines using the characteristics of the power factor”]. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych* 59. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej.
12. Jagodziński W. 1959. *Silniki wiatrowe*. [In Polish: *Wind turbines*]. Warszawa: PWT.
13. McGowan J.G., J.F. Manwell, A.L. Rogers. 2002. *Theory, Design and Application, Wind Energy Explained*. Hoboken, USA: John Wiley&Sons Inc.

14. Królikowski S., B. Walczak, A. Wójcik, A. Aftański. 2012. „Elektrical energy in the future. A Vision of 2050”. *Acta Energetica* 3: 85-99.
15. Vestas. Available at: <http://vestas.com/>.
16. Augustyn M., J. Ryś. 2007. „Kinematyka i moment napędowy turbiny wiatrowej o pionowej osi wirnika”. [In Polish: “Kinematics and the drive torque of the wind turbine with vertical axis of the rotor”]. *Czasopismo Techniczne Mechanika* 104 (1-M): 3-17.
17. Renewable Energy Solutions Australia Holdings Ltd. (RESA). Available at: <http://www.resau.com.au/>.
18. Zaskiewicz Jerzy. „Moje wędrówki”. [In Polish: “My journey”]. Available at: <http://www.mojewendrowki.eu/>.
19. Savonius S.J. 1926. *The wing-rotor in theory and practice*. Helsingfors.
20. Savonius S.J. 1931. „The Savonius rotor and its applications”. *Mechanical Engineering* 35 (5): 333-337.
21. WordlessTech. Available at: <http://wordlesstech.com/>.
22. Garbala Krzysztof. 2014. „Wpływ cech konstrukcyjnych wiatrowej turbiny Savoniusa na jej własności eksploatacyjne”. Rozprawa doktorska, Katowice, Polska: Wydział Transportu, Politechnika Śląska. [In Polish: “The impact of the design features of a wind turbine Savonius on its running propertie”. PhD thesis].
23. Wikipedia. „Turbina Darrieusa na Wyspach Magdaleny (Zatoka Świętego Wawrzyńca)”. [In Polish: “Darrieus wind turbine on the Magdalen Islands (Gulf of St. Lawrence)”]. Available at: https://pl.wikipedia.org/wiki/Turbina_Darrieusa#/media/File:Darrieus-windmill.jpg.
24. Wikipedia. „Turbina Darrieusa tzw. wersja H-Darrieusa”. [In Polish: “Darrieus wind turbine called. version of the H-Darrieusa”]. Available at: https://pl.wikipedia.org/wiki/Turbina_Darrieusa#/media/File:Windgenerator_antarktis_hg.jpg.
25. Aparatura kontrolno-pomiarowa KOMPART-POMIAR S.C. [In Polish: Instrumentation KOMPART-MEASUREMENT S.C.]. Available at: <http://kompart-pomiary.pl/>.
26. P 251710. *Poprzeczna dwustopniowa turbina przepływowa*. Pawlak Z. Zgłoszenie patentowe. 1985. [In Polish: *The lateral two-stage turbine flow*. Patent Application].

Received 26.10.2014; accepted in revised form 20.06.2015



Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License