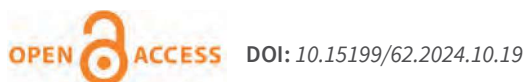


Analysis of the use of a reversible wind turbine to reduce frost stagnation

Analiza wykorzystania rewersyjnej turbiny wiatrowej do redukcji zastoisk mrozowych



A theoretical and exptl. feasibility study of using a reversible wind turbine to reduce frost stagnation caused by radiation frost was presented. The current state of knowledge and research on reducing the neg. impact of frost on crops was discussed. The proposed device, thanks to the electric drive used, was characterized by reduced noise emission compared to wind machines powered by combustion engines, and did not emit harmful substances into the atmosphere from the combustion process. The device can operate both in the energy generation mode and in the air flow forcing mode, and their combination will reduce or eliminate the need for external power supply and reduce operating costs.

Keywords: frost, RES, wind turbines, wind machine

Przedstawiono pierwszy etap prac projektu mającego na celu teoretyczno-doświadczalną analizę możliwości wykorzystania rewersyjnej turbiny wiatrowej do zwalczania zastoisk mrozowych występujących na skutek przymrozków radiacyjnych. Omówiono aktualny stan techniki oraz badania mające na celu zmniejszenie negatywnego oddziaływania przymrozków na uprawy. Zauważono, że obecne rozwiązania oparte na nieodnawialnych źródłach energii (świece dymne, maszyny zasilane generatorami diesla, ogniska) wymagają pracochłonnej obsługi lub są procesami wysokoenergetycznymi zanieczyszczającymi środowisko. Zaproponowano rozwiązanie oparte na wykorzystaniu rewersyjnej turbiny wiatrowej. Urządzenie umożliwia pracę zarówno w trybie generowania energii, jak i trybie wymuszenia przepływu powietrza, a połączenie tych funkcjonalności pozwoli zmniejszyć lub wyeliminować konieczność zastosowania zewnętrznego zasilania i ograniczyć koszty eksploatacyjne.

Słowa kluczowe: przymrozek, OZE, turbina wiatrowa, maszyna wiatrowa

Przymrozek jest naturalnym zjawiskiem występującym na całym świecie, w szczególności w rejonach Ameryki Północnej, RPA, Chin, Japonii, Nowej Zelandii i Europy¹⁻³). Problem dotyczy również terenu Polski, gdzie pierwsze udokumentowane negatywne skutki oddziaływania przymrozków odnotowano już w 1729 r.^{4,5}). Mimo że w porównaniu z innymi obszarami świata ekstremalne zjawiska pogodowe na terenie Polski zdarzają się relatywnie rzadko, a ich intensywność jest stosunkowo mała, to

jednak w ostatnich latach widać istotny wpływ zmian klimatycznych na warunki pogodowe także w naszym kraju. Scenariusze prognozowe zmian klimatycznych zakładają zwiększenie zmienności temperatury o ponad 25%, co wiąże się z możliwością częstszego występowania skrajnych temperatur⁶⁻¹⁰). Definicja przymrozków nie zawsze jest jednoznaczna, najczęściej jednak ten termin dotyczy przypadku przejścia temperatury powietrza w czasie doby przez próg 0,0°C⁶). W Polsce przymrozki wystę-



Mgr inż. Michał SZELKA (ORCID: 0000-0001-7405-5475) ukończył studia I stopnia na Wydziale Górniczym oraz studia II stopnia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Obecnie jest doktorantem szkoły doktorskiej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Jest specjalistą ds. projektowo-konstrukcyjnych w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG w Gliwicach.



Dr hab. inż. Krzysztof KOŁODZIEJCZYK, prof. AGH (ORCID: 0000-0001-9479-7505), w roku 1999 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Jest profesorem w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska tej uczelni. Specjalność – ochrona środowiska, odnawialne zasoby i źródła energii, modelowanie numeryczne, urządzenia sedymentacyjne.

*** Adres do korespondencji:**

Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, ul. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: mszelka@agh.edu.pl

pują w dwóch okresach roku: wiosny (wczesne) i jesieni (późne)¹¹⁾, a prawdopodobieństwo ich wystąpienia wynosi: 95–100% w II połowie kwietnia, 70–95% w maju oraz 7–36% w czerwcu¹²⁾. Szczególnie niebezpieczne są późnowiosenne przymrozki^{6, 7, 9)}. Przymrozek umownie dzieli się na trzy typy, ze względu na sposób jego powstania: (*i*) radiacyjny, czyli powstający na skutek wypromieniowania ciepła z podłoża do atmosfery; zjawisko to występuje lokalnie podczas bezchmurnych i bezwietrznych nocy, gdzie grubość mas zimnego powietrza przeważnie nie przekracza 2 m n.p.g.; (*ii*) adwekcyjny, czyli polegający na napływie zimnych mas powietrza (w przypadku Europy, ze strefy polarnej lub subpolarnej), obejmujących duże obszary i (*iii*) radiacyjno-adwekcyjny, czyli łączący napływ zimnych mas powietrza wraz z bezchmurnym niebem, sprzyjającym silnemu wypromieniowaniu⁷⁾. Przymrozek ze względu na wysokość występowania dzieli się na wysoki (wysokość 2 m n.p.g.) oraz na przygruntowy (wysokość 5 cm n.p.g.). Inną metodą podziału przymrozków jest podział ze względu na intensywność zjawiska⁶⁾: 11): łagodne od 0,0 do -2,0°C, umiarkowane od -2,1 do -4,0°C oraz silne, poniżej -4,0°C.

Metody ochrony przed przymrozkami

Przymrozek radiacyjny jest najczęściej występującym rodzajem przymrozku i głównie jego występowaniu poświęcona jest uwaga w literaturze. Również do tego typu przymrozku odnoszą się środki i metody inżynierii rolniczej mającej na celu zmniejszenie jego negatywnego oddziaływania na uprawy^{13, 14)}. Związane jest to również z faktem, że ten rodzaj przymrozku ze względu na swoje charakterystyczne właściwości najbardziej podatny jest na kontrolę^{6, 15)}. W przypadku przymrozku adwekcyjnego, w skrajnym przypadku związanego z silnym chłodnym wiatrem, nie istnieją skuteczne metody ochrony upraw lub nie mają uzasadnienia ekonomicznego^{16–18)}.

Ochrona przed przymrozkami to głównie ochrona¹⁶⁾: (*i*) pasywna, poprzez wybór miejsca, rozpoczęcie prac polowych z opóźnieniem, pielęgnację gleby, dobór odmian roślin odpornych na niskie temperatury^{18, 19)}; (*ii*) aktywna, czyli krycie upraw materiałami ochronnymi, zadymianie, zraszanie, ogrzewanie lub wymuszanie przepływu powietrza i (*iii*) chemiczna, poprzez stosowanie hormonów mających na celu spowolnienie kwitnienia i wegetacji²⁰⁾.

Do najskuteczniejszych metod ochrony przed przymrozkiem zalicza się metody aktywne, jednak przy wykorzystaniu konkretnego rozwiązania należy uwzględnić jego wady, zalety i ograniczenia.

Aktywne metody ochrony

Zadymianie polega na wydzielaniu gęstego, wilgotnego dymu. Dym zwiększa kondensację pary wodnej, dodatkowo ograniczając wypromieniowanie ciepła i może być wytwarzany poprzez rozpalanie ognisk (obornik, trociny, mokra biomasa) lub za pomocą specjalnych urządzeń zadymiających. Do wad rozwiązania należy zaliczyć stosunkowo małą skuteczność, szybkie zanikanie dymu w przypadku niskiego ciśnienia powietrza, pracochłonność, a także aspekty ekologiczne^{17, 21)}.

Ogrzewanie ma na celu podniesienie temperatury w procesie spalania (istnieją również metody oparte na wykorzystaniu energii elektrycznej za pomocą pompy ciepła lub mat podczerwonych^{22, 23)}). Metoda ta różni się od zadymiania tym, że w metodzie zadymiania nie należy doprowadzać do spalania całkowitego (duża ilość dymu, tłący się ogień), natomiast w przypadku ogrzewania wykorzystuje się moc cieplną procesu (wysoka temperatura spalania). W metodzie tej stosuje się świece, ogniska, paleniska, pochodnie oraz nagrzewnice. W większości przypadków spalana materia jest pochodzenia organicznego (np. gałęzie), ale wykorzystywane są również inne paliwa, takie jak węgiel kamienny i brunatny, gaz ziemny, ropa, benzyna lub rzadziej energia elektryczna. W przypadku zastosowania świec szacuje się, że na 1 ha chronionego obszaru należy rozpaść od 200–500 świec, w zależności od intensywności przymrozku. Jedna świeca zapewnia ochronę przez ok. 8 h. Oprócz stacjonarnych rozwiązań typu palenisko i świece istnieją również rozwiązania mobilne, których przykładem są maszyny przeciwprzymrozkowe firmy AGROFROST: Frostbuster lub *pulse jet*^{6, 24, 25)}. Rozwiązanie firmy AGROFROST wykorzystuje proces spalania gazu (30–45 kg) i wymaga podpięcia ciągnika o mocy 50–65 KM, w celu zasilania wentylatorów rozprowadzających ogrzane powietrze do 100 m, co pozwala na ochronę do 10 ha upraw.

Zraszanie oparte jest na zjawisku wydzielania się energii cieplnej w trakcie zamarzania wody (80 cal/L wody). Dodatkowo powstałe zlodowacenie na powierzchni roślin, np. pąków kwiatów, tworzy warstwę chroniącą roślinę przed ujemną temperaturą (pomiędzy rośliną a zlodowaceniem powstają pęcherzyki powietrza, które akumulują ciepło z procesu zamarzania)^{7, 19)}. Do wad rozwiązania należy zaliczyć wydatek wodny 20–50 m³/ha oraz koszty budowy instalacji. Zbyt mała ilość wody może zamrozić roślinę, natomiast zbyt duża ilość wody może doprowadzić do łamania roślin przez ciężar powstałego lodu. Intensywne wykorzystanie wody w procesie w przypadku niekorzystnego ukształtowania terenu może spowodować powstawanie lokalnych rozlewisk, a nadmierna wilgoć może być



Dr hab. inż. Jarosław TOKARCZYK (ORCID: 0000-0002-8588-0179) ukończył studia, a następnie uzyskał stopnie doktora i doktora habilitowanego na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku profesora w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG w Gliwicach. Specjalność – przemysłowe stosowanie szerokiego spektrum metod obliczeniowych w wirtualnym prototypowaniu złożonych systemów mechanicznych.

przyczyną rozwinięcia m.in. chorób grzybiczych u roślin. W przypadku prawidłowej regulacji instalacji rozwiązanie cechuje się bardzo wysoką skutecznością w stosunku do innych rozwiązań, a instalacja może zostać również wykorzystana w czasie bezprzymrozkowym do nawadniania plantacji. Do istotnych zalet tej metody można również zaliczyć fakt, że rozwiązanie dzięki zastosowaniu inteligentnych sterowników można całkowicie zautomatyzować.

Do mieszania mas powietrza wykorzystywane są specjalnego typu maszyny wiatrowe, helikoptery lub drony^{17, 26)}. Metoda ta jest zalecana w przypadku, gdy nad zimnym powietrzem przy gruncie zalega warstwa cieplejszego powietrza. Różnice temperatur pomiędzy warstwami (inwersja) mogą osiągać nawet 1°C/m¹⁷⁾. Postać konstrukcyjna maszyn wiatrowych na przestrzeni ostatnich 100 lat wielokrotnie podlegała modyfikacji. Obecnie oferowanych jest wiele rozwiązań proponowanych przez światowych producentów, takich jak Tow and blow, Chinook, AYZ Makine, AID, Orchard Rite, Agi Frost Fans, Rath Metaltechnik, Agrofrost, Frostboss, Gener Wind Machines, Fulda Frost i Bouso. Literatura światowa nie porusza problematyki podziału rozwiązań konstrukcyjnych dla maszyn wiatrowych, dlatego też na podstawie dostępnych na rynku urządzeń oraz przeglądu literatury zaproponowano następujący podział ze względu na: (i) sposób zabudowy (mobilne i stacjonarne), (ii) oś obrotu wirnika (pionowa i pozioma), (iii) średnicę wirnika, (iv) zabudowę wirnika, (v) liczbę łopat wirnika oraz (vi) sposób zasilania (np. spalinowy lub elektryczny). Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest wykorzystanie dwu- lub trójłopatowego wentylatora o poziomej osi obrotu o średnicy wirnika 4–7 m w zabudowie stacjonarnej, zasilanego silnikiem spalinowym o mocy rzędu 100–200 KM¹⁷⁾. Klasyczne maszyny wiatrowe wizualnie mogą przypominać turbiny wiatrowe (wirnik umieszczony na wieży), jednak ich zasada działania i funkcja są zgoła odmienne. Według badań¹⁷⁾ wpływ maszyny wiatrowej na badanym terenie na zmniejszenie uszkodzeń kwiatów wyniósł 60% w 1999 r. oraz 37% w 2000 r. Uruchomienie maszyny wiatrowej przyniosło niemal natychmiastowy efekt. Na wysokości 1,5 m, w odległości 30 m (od masztu) temperatura wzrosła o ok. 30% różnicy temperatur mierzonych pomiędzy wysokościami 1,5 i 15 m. Przeprowadzono również eksperyment terenowy wraz z symulacją numeryczną²⁷⁾, w celu oceny zależności funkcjonalnych między wydajnością maszyny wiatrowej a dominującymi procesami fizycznymi zachodzącymi podczas radiacyjnych zdarzeń przymrozkowych. Również w tym przypadku ustalono wzrost temperatury do 50% wartości inwersji (ok. 3°C) na obszarze 3–5 ha na wysokości 1 m. Skuteczność maszyn wiatrowych (jak i popyt rynkowy) w rejonie Ontario zachęciła plantatorów winorośli do zwiększenia powierzchni uprawy winogron typu *vinifera*, wrażliwych na zjawisko przymrozku. W przypadku chronionych upraw (podczas zdarzenia przymrozkowego) nie odnotowano zmniejszenia wielkości plonów, natomiast w przypadku upraw niechronionych plantatorzy

oprócz znacznych strat w owocach odnotowali również utraty całych roślin w 2005 r.^{28–30)}. Należy jednak zauważyć, że istotnymi parametrami wpływającymi na stopień ochrony są: wielkość maszyny, moc silnika, kąt wirnika ustalony względem płaszczyzny, ukształtowanie terenu, rodzaj chronionej uprawy, siła i kierunek wiatru, wysokość zalegania cieplejszego powietrza oraz siła inwersji, które mogą wpłynąć na stopień zmniejszenia uszkodzeń roślin. W przypadku braku wystąpienia zjawiska inwersji lub gdy cieplejsze powietrze zalega poza zasięgiem maszyny wiatrowej, urządzenia nie spełnią swojej funkcji. Dotyczy to również przypadku wystąpienia silnego przymrozku adwekcyjnego związanego z dużą prędkością wiatru¹⁹⁾.

Proponowane rozwiązanie – rewersyjna turbina wiatrowa

Wymienione aktywne metody w głównej mierze cechują się wykorzystaniem nieodnawialnych źródeł energii związanych ze spalaniem materii (olej napędowy, brykiet, koks i świece dymne) lub wydatkowaniem dużych ilości wody. Proponowane rozwiązanie zakłada niwelację oddziaływania przymrozku radiacyjnego metodą aktywną za pomocą odnawialnych źródeł energii. Prowadzone prace dotyczą możliwości wykorzystania rewersyjnej turbiny wiatrowej jako narzędzia do mieszania górnych (cieplejszych) warstw powietrza z zimniejszymi dolnymi warstwami (przygruntowymi). Konstrukcja klasycznej maszyny wiatrowej i turbiny wiatrowej może być interpretowana przez niewprawionego obserwatora jako tożsame urządzenie (rys. 1). Istnieją jednak kluczowe różnice między tymi konstrukcjami, w szczególności w zakresie budowy wirnika. W przytoczonym przez autorów podziale maszyn wiatrowych ze względu na położenie osi wirnika (pionowa i pozioma), do maszyn o osi poziomej zaliczono wszystkie urządzenia o kącie odchylenia osi



Fig. 1. Wind machine (left), wind turbine (right)^{31, 32)}

Rys. 1. Maszyna wiatrowa (z lewej), turbina wiatrowa (z prawej)^{31, 32)}

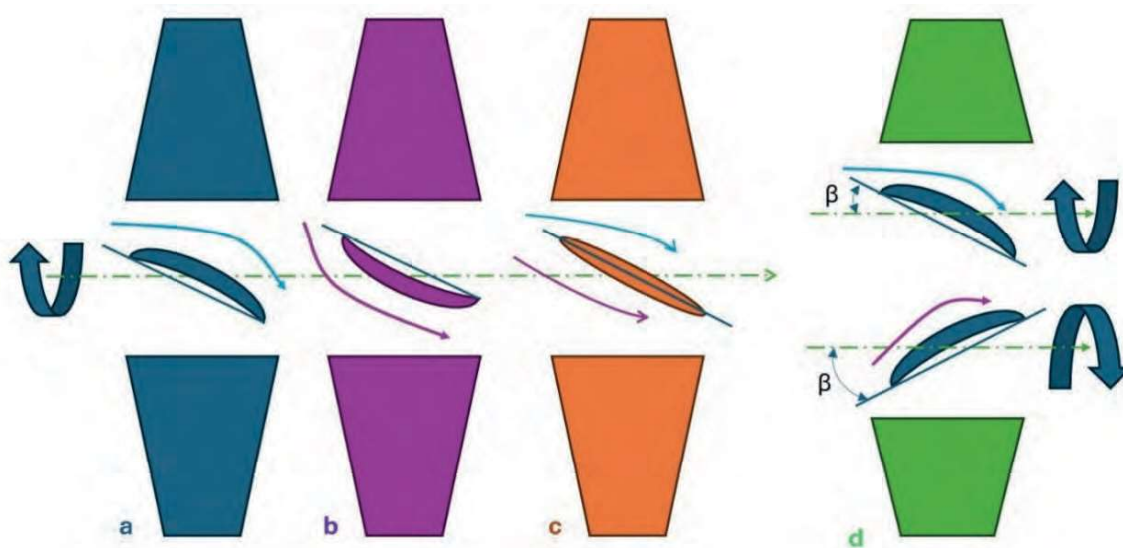


Fig. 2. Blade profile configuration for wind turbine (a), a fan (b) and enabling operation in both modes: symmetrical (c) and with adjustable angle of attack β with change in direction of rotation (d)

Rys. 2. Konfiguracja profilu łopaty: dla turbiny wiatrowej (a), wentylatora (b) oraz umożliwiającego pracę w obu trybach: symetrycznym (c) i przy regulowanym kącie natarcia β wraz ze zmianą kierunku obrotów (d)

wirnika względem płaszczyzny horyzontalnej, różne od płaszczyzny wertykalnej. To odchylenie od osi poziomej pozwala na skierowanie cieplejszych górnych warstw powietrza w kierunku zimniejszych dolnych warstw przygruntowych, natomiast w przypadku turbiny wiatrowej w większości przypadków opisywane odchylenie osi wirnika nie występuje lub mieści się w granicy kilku stopni. Najistotniejszą cechą różniącą obie konstrukcje jest jednak sama konstrukcja wirnika, a uściślając – łopata wirnika. W przypadku turbiny wiatrowej wirnik ma za zadanie odebrać energię strugi wiatru, spowalniając ją. Dzieje się tak, gdyż wysokociśnieniowa strona płata (łopaty) skierowana jest w stronę przepływającego powietrza, przekierowując go tak, aby aerodynamiczny moment obrotowy działał wraz z obrotem wirnika, a siła ciągu działała w kierunku przepływu. W przypadku gdy wirnik maszyny wiatrowej ma za zadanie oddać energię wiatru, niskociśnieniowa strona płata jest skierowana w stronę przepływającego powietrza, natomiast profil łopaty przekierowuje przepływ, wykorzystując moment mechaniczny w kierunku obrotu, tworząc ciąg w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu. W przypadku tego samego kierunku obrotu wirnika w obu trybach wymagane jest odwrócenie ugięcia profilu łopaty (rys. 2). Rozwiązanie to wymusza zastosowanie dwóch typów wirników przeznaczonych do każdego trybu pracy. Analizując możliwe rozwiązania, należy uwzględnić również alternatywne rozwiązania konstrukcyjne wirnika. Pierwszym z nich jest zastosowanie symetrycznego profilu łopaty umożliwiającego pracę w obu trybach, kosztem sprawności układu. Druga propozycja oparta jest na znanym i sprawdzonym rozwiązaniu stosowanym w elektrowniach szczytowo-pompowych (Żarnowiec, Porąbka-Żar, Solina-Myczkowice, Żydowo,

Niedzica). Elektrownia wodna Żarnowiec wyposażona jest w 4 turbiny typu Francisa o znamionowej mocy 179 MW w trybie pracy generatora (doprowadzana woda napędza wirnik) oraz 200 MW w trybie pracy pompowej (zasilony energią elektryczną wirnik dzięki zmianie kierunku obrotowego i ustawienia łopatek przetłacza wodę na wyższy poziom)³³. Pozytywne doświadczenia związane z wdrożeniem odwracalnych hydrozespołów w elektrowniach szczytowo-pompowych pozwala postawić hipotezę, że rozwiązanie rewersyjnej turbiny wiatrowej ma techniczne i ekonomiczne uzasadnienie.

W celu opracowania najkorzystniejszej konstrukcji wirnika (na podstawie wstępnych obliczeń analitycznych oraz symulacji numerycznych^{34, 35}) za pomocą programów Inventor, AnsysFluent, Qblade) dla trzech założeń: wirnik dla obu trybów pracy, wirnik z łopatami o profilu symetrycznym oraz wirnik umożliwiający zmianę kąta natarcia łopat, opracowano wytyczne do budowy prototypu maszyny wiatrowej o wstępnie założonych parametrach: średnica wirnika 600–800 mm, liczba łopat wirnika 2–5, oś wirnika pozioma (w zakresie -45 – 65°), typ napędu/generatora elektryczny BLDC, trójfazowy, moc napędu/generatora 100–500 W i napięcie napędu/generatora 12–40 V.

Proponowany prototyp pozwoli na walidację obliczeń i symulacji metodami doświadczalnymi, gdzie zaplanowane są badania na trzech stanowiskach (rys. 3): (i) w tunelu aerodynamicznym z zamkniętym obiegiem powietrza, wyposażonym w wagę aerodynamiczną (trójskładnikową), umożliwiającą pomiar sił (nośnej oraz oporu) i momentów działających na badany profil łopaty, (ii) w tunelu aerodynamicznym z otwartym obiegiem powietrza o wymiarach przestrzeni pomiarowej $1200 \times 1200 \times 2500$ mm, wraz z wyposażeniem umożliwiającym zdalny pomiar prędkości

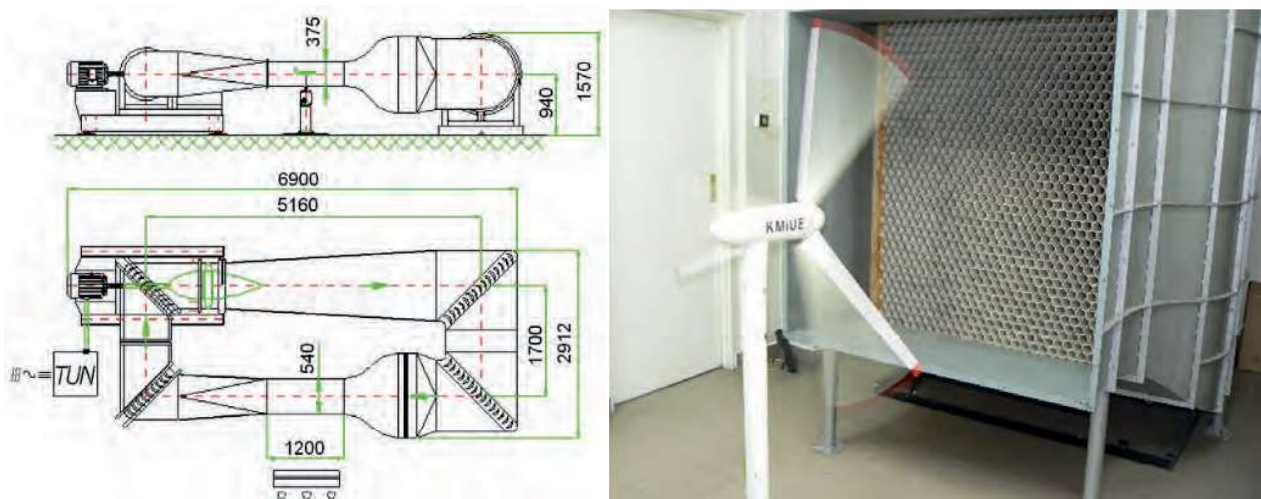


Fig. 3. Test stands: closed (left) and open (right) airflow^{36, 37)}

Rys. 3. Stanowiska badawcze z obiegiem powietrza^{36, 37)}: zamkniętym (z lewej), otwartym (z prawej)

obrotowej i momentu obrotowego na wale wirnika i (iii) na stanowisku do badania wentylatorów typu E (wentylator bez obudowy), umożliwiające określenie wydajności wentylatora oraz zasięgu strugi powietrza.

Podsumowanie

W dobie zmian klimatycznych oraz deklaracji krajów członkowskich UE dotyczących zmniejszenia wykorzystania nieodnawialnych źródeł energii, należy poszukiwać alternatywnych rozwiązań w kontekście ograniczenia zużycia energii, jak i samych źródeł jej wytwarzania. Zaprezentowane rozwiązanie w postaci rewersyjnej turbiny wiatrowej, której głównym zadaniem jest niwelacja szkodliwych skutków oddziaływania przymrozków radiacyjnych, może być również wykorzystane w okresie bezprzymrozkowym (stanowiącym większą część roku), do produkcji zielonej energii. Urządzenie dzięki zastosowaniu napędowi elektrycznemu cechuje się obniżoną emisją hałasu w stosunku do maszyn wiatrowych zasilanych silnikami spalinowymi, a także nie emituje do atmosfery szkodliwych substancji z procesu spalania. W kolejnych etapach pracy przewidywane jest przeprowadzenie analizy ekonomicznej tego rozwiązania w kontekście wyprodukowanej energii elektrycznej, w zależności od lokalizacji i parametrów urządzenia (wysokość maszty, średnica wirnika).

Idea przedstawionego rozwiązania może również znaleźć zastosowanie w innych nieoczyszczonych obszarach, takich jak: zmniejszenie stresu cieplnego u krów pastwiskowych w okresie letnim³⁸⁾, osuszanie plonów przed żniwami, zmniejszenie zapylenia na terenach poprzemysłowych i naśnieżanie stoków narciarskich, co tylko zwiększa atrakcyjność urządzenia. W kontekście celu naukowego w przypadku konstrukcji turbin wiatrowych, jak i samych wentylatorów (zwykłego zastosowania) istnieje wiele

badan i publikacji, jednakże w przypadku maszyn wiatrowych zwalczających przymrozki w kontekście ich projektowania i doboru urządzeń literatura światowa jest nieliczna³⁹⁾, a w literaturze krajowej można znaleźć trzy publikacje⁴⁰⁻⁴²⁾ dotyczące projektu celowego realizowanego na terenie kraju, jak również wyniki prac przeprowadzonych w latach 80. XX w. na terenach SZD Brzezna i Sadu Doświadczalnego Przybroda. Opisywane rozwiązanie konstrukcyjne oraz badania mają innowacyjny charakter i pozwolą na poszerzenie wiedzy dotyczącej konstrukcji urządzeń wiatrowych przy wykorzystaniu nowoczesnych narzędzi, których wyniki zostaną zwalidowane na stanowiskach badawczych.

Otrzymano: 11-09-2024

Zrecenzowano: 15-09-2024

Zaakceptowano: 04-10-2024

Opublikowano: 21-10-2024

LITERATURA

- [1] UN Climate Change Protocol, Glasgow, <https://ukcop26.org/>, dostęp 23 sierpnia 2024 r.
- [2] L. Parker, T. Pathak, S. Ostojka, *Sci. Total Environ.* 2021, **762**, 143971, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143971.
- [3] C.K. Augspurger, *Ecology* 2013, **94**, 41.
- [4] A. Rojecki (red.), *Wyjątki ze źródeł historycznych o nadzwyczajnych zjawiskach hydrologiczno-meteorologicznych na ziemiach polskich w wiekach od X do XVI*, WKT, Warszawa 1965 r.
- [5] S. Namaczyńska, *Kronika klęsk elementarnych w Polsce i w krajach sąsiednich w latach 1648-1696. Zjawiska meteorologiczne i pomory*, Lwów 1937 r.
- [6] C. Radomski, *Postępy Nauk Roln.* 1968, nr 1, 109.
- [7] W. Treder, *Metody oraz koszty ochrony drzew pestkowych przed przymrozkami wiosennymi*, <https://ipwdn.inhort.pl/add/article/195.pdf>, dostęp 23 sierpnia 2024 r.
- [8] A.J. Szczapiński, K. Bojkowska, D. Kozar, S. Lewko, A. Stasiewicz, *Ostrzeżenia meteorologiczne w wybranych polskich miastach w 2021 roku*, *Geoprzestrzeń*, nr 7, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań 2023, ISBN 978-83-7986-456-0.
- [9] S. Wieteska, *Acta Univer. Lodzensis Folia Oeconomica* 2001, **259**, 143.
- [10] A. Doroszewski, i in., *Acta Agrophys.* 2013, **20**, nr 2, 269.
- [11] Z. Bielec-Bąkowska, K. Piotrowicz, *Prace Stud. Geograf.* 2011, **47**, 77.

- [12] Cz. Koźmiński, B. Michalska, [w:] *Klimatyczne zagrożenia rolnictwa w Polsce*, (red. Cz. Koźmiński, B. Michalska, J. Leśny), Wyd. Nauk. Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin 2010.
- [13] P. Miškulin, *Protection Systems for Late Spring Frosts in Permanent Orchards*, Bachelor's Thesis, Univer. J.J. Strossmayer in Osijek, Osijek, Croatia, 2019.
- [14] E. Atam, S.W. Hong, A. Arteconi, *Energies* 2020, **13**, 378.
- [15] K. Ciešlar, *FOTON* 2010, **108**, Wiosna, 15.
- [16] V. Tadić, K. Gligorević, Z. Mileusnić, R. Miodragović, M. Hajmiler, D. Radočaj, *AgriEngineering* 2023, **5**, 2079, <https://doi.org/10.3390/agriengineering504012>.
- [17] A.C. Ribeiro, J.P. De Melo-Abreu, R.L. Snyder, *Agric. Forest Meteorol.* 2006, **141**, nr 2-4, 71.
- [18] R.L. Snyder, J.P. De Melo-Abreu, S. Matulich, *Frost Protection: Fundamentals, Practice and Economics*, t. 2; Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2005.
- [19] R.L. Snyder, *Principles of frost protection*, University of California, Davis, CA, 2000.
- [20] <https://www.sadownictwo.com.pl/przymrozek-20-04-2017r-ogrzewanie-sadu>, dostęp 29 sierpnia 2024 r.
- [21] B. Drepper, B. Bamps, A. Gobin, J. Van Orshoven, *Environ. Evid.* 2022, **11**, 29.
- [22] D. Masse, *Microw. J.* 2010, **53**, 45.
- [23] E. Atam, A. Arteconi, *Energy Procedia* 2017, **141**, 155.
- [24] S. Sito, M. Skendrović Babojelić, B. Šket, J. Vodopivc, M. Šket, V. Kušec, M. Milodanović, *Glas. Zašt. Bilja* 2014, **37**, 53.
- [25] R.G. Evans, A.S. Alshami, *Trans. ASABE* 2009, **52**, 331.
- [26] C. Hickey, E. Smith, P. Knox, *UGA Cooperative Extension Bull.* 2018, nr 4, 1490.
- [27] V.W.J. Heusinkveld i in., *Agric. For. Meteorol.* 2020, **282**, 107868.
- [28] M.C. Battany, *Agric. For. Meteorol.* 2012, **157**, 39.
- [29] A.C. Ribeiro, J.P. De Melo-Abreu, R.L. Snyder, A. Mahmood, N.A. Buttar, S. Yuan, *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2018, **11**, 21.
- [30] <https://agifrostfans.com/wind-machines-for-crop-protection/>, dostęp 23 sierpnia 2024 r.
- [31] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Po%C5%82czyno,_farma_wiatrowa_-_panoramio_%282%29.jpg, dostęp 23 sierpnia 2024 r.
- [32] J. Tokarz, L. Hryckiewicz, *Energetyka* 2003, **8**, 509.
- [33] A. Drwięga, M. Szelka, A. Turewicz, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019, **261**, 012007.
- [34] M. Szelka, A. Drwięga, J. Tokarczyk, M. Szyguła, K. Szewerda, M. Banaś, K. Kołodziejczyk, K. Kędzia, *Energies* 2023, **16**, 542, <https://doi.org/10.3390/en16010542>.
- [35] S. Gomuła, S. Pytel, P. Słaboński, K. Pytel, *Mechanics* 2005, **24**, nr. 3, 173.
- [36] <https://kseiuos.imir.agh.edu.pl/laboratoria>, dostęp 23 sierpnia 2024 r.
- [37] <https://ekrowa.pl/wiedza/woda-wiatr-czas-i-krowa-to-wszystko-czego-potrzebujesz-aby-sch%C5%82odzic-krowy-w-lecie>, dostęp 23 sierpnia 2024 r.
- [38] W. Wenye, H. Yongguang, Y. Shuo, M. Kangqian, Z. Xiaoyong, L. Pingping, *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2015, **8**, nr 5, 43.
- [39] P. Frąckowiak, *Maszyna wiatrowa do ochrony upraw ogrodniczych przed przymrozkami*, zad. 9.1, Raport z prac badawczych, PIMR Poznań, 2005.
- [40] J. Szczepaniak, *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 2005, **50**, nr 3, 31.
- [41] J. Szczepaniak, T. Pawłowski, J. Rutkowski, R. Grzechowiak, J. Mac, *Maszyna wiatrowa do ochrony upraw ogrodniczych przed przymrozkami*. Zad 1, 2 i 3. Raport z prac badawczych, PIMR Poznań, 2005.
- [42] J. Rutkowski, J. Szczepaniak, *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 2005, **50**, nr 3, 49.

Od 75 lat
poszerzamy
Twoje
horyzonty



WYDAWNICTWO
SIGMA-NOT 