

Determining a safe operating zone for drone monitoring of a wind turbine

Wyznaczenie bezpiecznej strefy operowania dronem w trakcie monitorowania turbiny wiatrowej



DOI: 10.15199/62.2024.11.8

Numerical simulations of air flow around the rotating rotor of a working wind turbine were carried out, as well as unmanned aerial vehicle (UAV) flights with recording of flight parameters for a real object. A safe operating zone for the UAV in the immediate vicinity of the wind turbine during its operation was detd. Defining such a zone was part of the prepn. of a system for monitoring the direct technical condition of wind turbine blades during operation using a drone.

Keywords: monitoring HWT, UAV, drone

Jednym z istotnych elementów eksploatacji farmy wiatrowej jest monitorowanie stanu technicznego turbin. Obecnie istnieje wiele metod pozwalających na prowadzenie ciągłego monitoringu umożliwiającego ocenę stanu technicznego turbiny, jednakże najczęściej bez pełnej informacji o powstałych uszkodzeniach. Przedstawiono prace dotyczące wyznaczenia bezpiecznej strefy operowania BSP w bezpośrednim otoczeniu turbiny wiatrowej w trakcie jej pracy. Wyznaczenie takiej strefy stanowi element przygotowania systemu monitorowania bezpośredniego stanu technicznego łopat turbiny wiatrowej w trakcie jej pracy z wykorzystaniem drona.

Słowa kluczowe: monitorowanie turbin wiatrowych, BSP, dron

Produkcja energii elektrycznej z wykorzystaniem turbin wiatrowych stanowi obecnie jeden z dynamicznie rozwijających się obszarów pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych¹⁾. Ciągłe rosnąca liczba turbin wiatrowych, a tym samym rosnący ich udział w produkcji energii elektrycznej zwiększa znaczenie tego źródła energii w bilansie energetycznym²⁾. Jednym z elementów decydujących o opłacalności wykorzystania turbiny wiatrowej do produkcji energii elektrycznej jest utrzymanie jej wysokiej sprawności technicznej, co przekłada się na jej dyspozycyjność, a tym samym na wydajność energetyczną całej farmy wiatrowej³⁾. Jedną z możliwości zwiększenia dyspozycyjności turbiny wiatrowej jest skrócenie czasu wyłączenia turbiny z ruchu ze względu na konieczność wykonania monitoringu stanu technicznego. Dobrym sposobem jest prowadzenie diagno-

styki w trakcie jej pracy. Istnieje wiele metod monitorowania stanu technicznego turbin w trakcie ich pracy, jednak nie dają one pełnej informacji o powstałych uszkodzeniach, a najczęściej informacje o zmianie parametrów pracy lub sygnał o potencjalnym uszkodzeniu⁴⁾. W efekcie pojawia się konieczność wyłączenia turbiny w celu przeprowadzenia inspekcji turbiny i identyfikacji uszkodzenia. Nowe możliwości w diagnostyce stanu technicznego turbin wiatrowych daje wykorzystanie bezałogowych statków powietrznych (BSP)⁵⁾. BSP obecnie najczęściej wykorzystywane są do prowadzenia inspekcji stanu technicznego łopat turbiny⁶⁾. Prowadzone inspekcje wymagają jednak wyłączenia z ruchu.

Celem pracy było wyznaczenie bezpiecznej strefy operowania BSP w bezpośrednim otoczeniu turbiny wiatrowej



Mgr inż. Jędrzej MINDA (ORCID: 0009-0002-8571-1487) w roku 2022 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Jest doktorantem Szkoły Doktorskiej AGH, realizuje doktorat w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska tej uczelni. Aktywnie działa w ramach Studenckiego Koła Naukowego Drone Engineering.



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: minda@agh.edu.pl

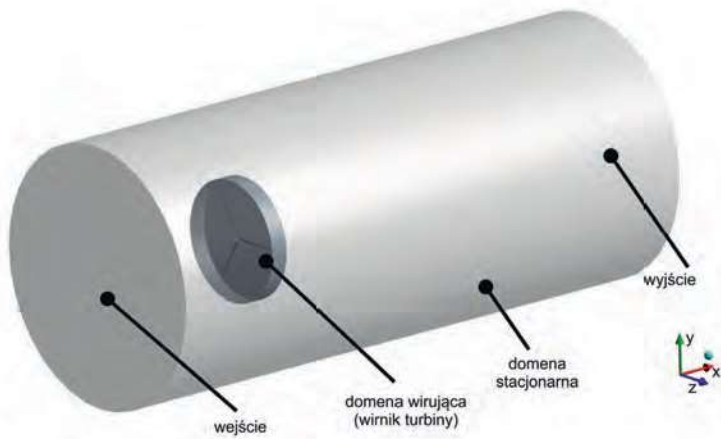


Fig. 1. Computational domain

Rys. 1. Domena obliczeniowa

w trakcie jej pracy, na podstawie symulacji numerycznych oraz badań terenowych z wykorzystaniem BSP.

Część badawcza

Metodyka badań

Przedmiotem prowadzonych badań i analizy było wyznaczenie bezpiecznej strefy poruszania się BSP w trakcie monitorowania stanu technicznego turbiny wiatrowej podczas jej pracy. Bezpieczną strefą będzie przestrzeń otaczająca strefę wykluczoną. Za kształt strefy wykluczonej przyjęto cylinder obejmujący wirnik turbiny wiatrowej i rozciągający się na pewną odległość za wirnik turbiny po stronie zawietrznej.

Wyznaczenie takiej strefy było niezbędnym warunkiem do spełnienia przed podjęciem działań BSP w strefie pracującej turbiny. Bufor wokół pracującego wirnika ma na celu uchronić zarówno BSP, jak i turbinę wiatrową przed uszkodzeniem na skutek kolizji lub utraty stabilności lotu BSP w strefie przemieszczających się łopat turbiny wiatrowej. Dodatkowo, istotnym elementem było wyznaczenie zmian prędkości (podmuchów), na które narażony będzie BSP, nie tylko ze względu na bezpieczeństwo lotu, ale również ze względu na wykonywany w trakcie oblotu pomiar, co może mieć wpływ na jakość materiału zdjęciowego oraz nagrań wykonywanych w trakcie pomiarów.

W celu wyznaczenia bezpiecznej strefy wykonano zarówno symulacje numeryczne przepływu powietrza wokół pracującej turbiny wiatrowej, a dokładnie wirującego wirnika, jak i badania terenowe, obloty z rejestracją parametrów lotu dla rzeczywistego obiektu.

Modelowanie numeryczne pracy turbiny wiatrowej

Zmiany wartości prędkości powietrza wokół turbiny wiatrowej⁷⁻¹⁰, na które narażony będzie BSP przemieszczający się w jej strefie, zostały wyznaczone poprzez wykonanie symulacji numerycznych.

W celu przeprowadzenia analiz CFD (*computational fluid dynamics*) przygotowano geometrię wirnika turbiny wiatrowej o średnicy 126 m, a następnie wykonano symulację numeryczną dla założonych warunków pracy, czyli prędkości napływającego powietrza o wartości $v = 8,9$ m/s. Przyjęta wartość prędkości została ustalona ze względu na wartość prędkości w trakcie pomiarów terenowych. Dodatkowo jest to wartość zbliżona do maksymalnej bezpiecznej prędkości

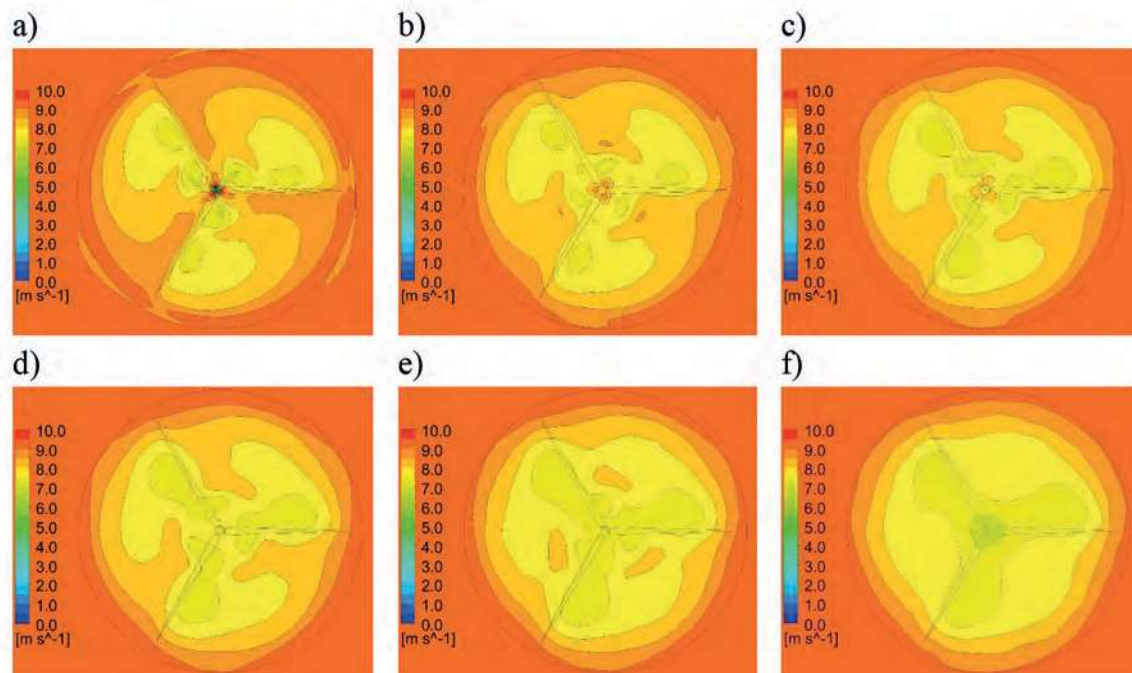


Fig. 2. Average value of velocity in the vertical plane behind the rotor at the distance of: a) 5 m, b) 10 m, c) 15 m, d) 20 m, e) 30 m, f) 50 m, resp.

Rys. 2. Wartość średnia prędkości w płaszczyźnie pionowej za wirnikiem w odległości odpowiednio: a) 5 m, b) 10 m, c) 15 m, d) 20 m, e) 30 m, f) 50 m

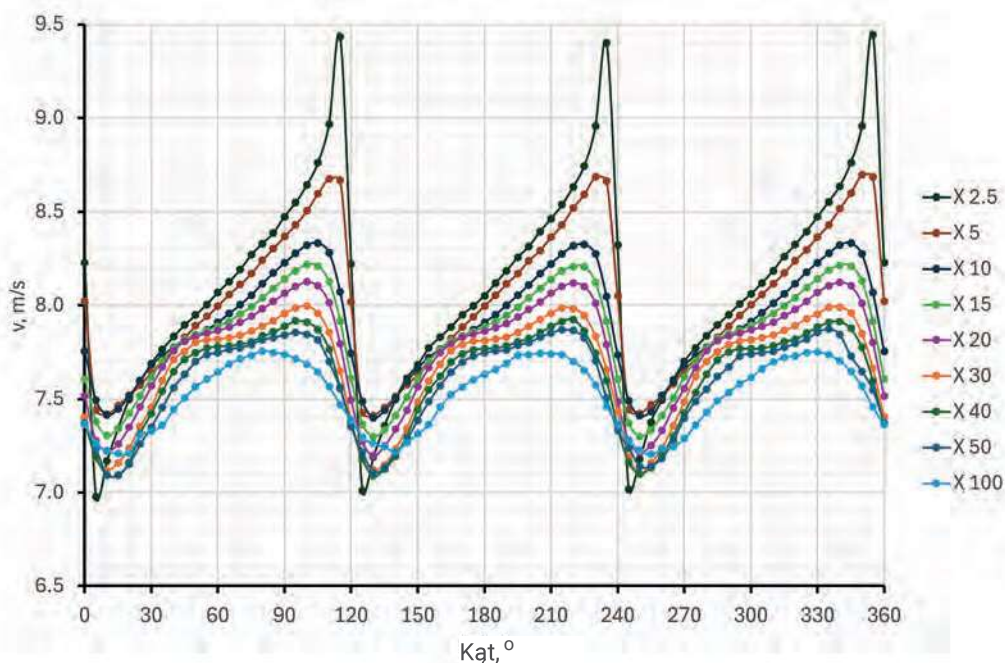


Fig. 3. The value of velocity in a plane offset by X m from the rotational plane of the wind turbine rotor at points distributed on a circle of radius $R = 40$ m with centre aligned with the rotor rotation axis

Rys. 3. Wartość prędkości w płaszczyźnie odsuniętej o X m od płaszczyzny wirowania wirnika turbiny wiatrowej w punktach rozmieszczonych na okręgu o promieniu $R = 40$ m ze środkiem ustawionym w osi wirowania wirnika

lotu, zalecanej przez producenta BSP wykorzystywanego w trakcie pomiarów. Symulacje numeryczne zostały wykonane w aplikacji Ansys FLUENT. Obliczenia przeprowadzono dla uproszczonego układu, w symulacji został uwzględniony tylko wirnik turbiny wiatrowej, bez wieży oraz gondoli. Uproszczenie takie wynikało z celu analizy, czyli wyznaczenia rozkładu prędkości czynnika opływającego turbinę w strefie operowania BSP. Strefa ta została wyznaczona na wysokości gondoli wzdłuż poziomej prostej równoległej do płaszczyzny przemieszczania się łopaty wirnika. Na rys. 1 została przedstawiona geometria domeny obliczeniowej wraz z zaznaczonymi miejscami przypisania warunków brzegowych. Założona prędkość wirowania wirnika wynosiła $n = 9,22$ rpm, dla której współczynnik szybkobieżności wynosił $\lambda = 6,8$. Czynnikiem przepływającym było powietrze o temp. 20°C . Analiza została wykonana jako stała w czasie z domeną wirującą, obejmującą przestrzeń wirnika. Przestrzeń obliczeniowa została podzielona elementami *polyhedra*, w efekcie uzyskany model składał się z ponad 6 mln elementów.

Wyniki badań

Rozkład prędkości w strefie operowania BSP

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano rozkład prędkości w strefie wirnika, który przedstawiono na rys. 2 w postaci rozkładów konturowych w płaszczyznach pionowych

umieszczonych za wirnikiem, odsuniętych wzdłuż osi X o odpowiednio 5, 10, 15, 20, 30 i 50 m. Z zamieszczonych rozkładów widać, że wraz ze wzrostem odległości od wirnika zmiany prędkości ujednorodniały się, ze stopniowo zanikającym cieniem aerodynamicznym od pojedynczych łopat. Analizując rozkład prędkości, istotne jest określenie zmian jej wartości, na które narażony będzie BSP. Analizując rozkłady przedstawione na rys. 2, ustalono, że obszary o największej zmienności występowały w odległości ok. $2/3$ od osi wirnika. W celu zobrazowania zmian prędkości, na które narażony będzie BSP sporządzono wykres (rys. 3) zmian wartości prędkości w punktach rozmieszczonych na okręgu o promieniu $R = 40$ m, ze

środkiem ustawionym w osi X wirnika w płaszczyznach odsuniętych o odpowiednio 2,5, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 i 100 m od płaszczyzny wirowania wirnika. Z zamieszczonych na rys. 3 wykresów wynika, że zgodnie z oczekiwaniem zmiany prędkości malały wraz z odległością od wirnika. Maksymalna zmiana prędkości wynosiła 2,5 m/s i znajdowała się w odległości 2,5 m od wirnika; jednocześnie należy się spodziewać, że wraz ze zbliżaniem się do łopaty wartość zmiany będzie coraz większa. Przemieszczający się w tej płaszczyźnie BSP byłby narażony na zmiany prędkości 7,0–9,5 m/s, natomiast w płaszczyźnie oddalonej o 40 m od wirnika zmiany prędkości mieściłyby się w zakresie 7,0–7,9 m/s.

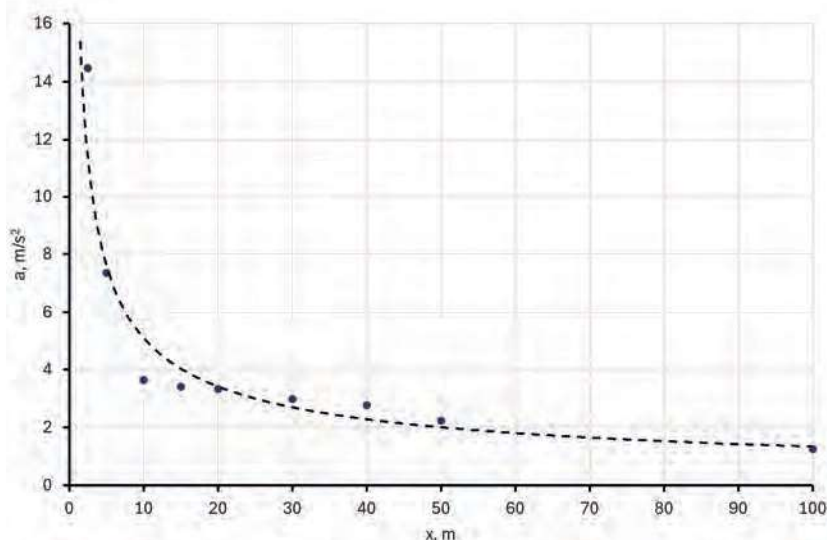


Fig. 4. Maximum acceleration of air movement experienced by the BSP in the vicinity of the turbine

Rys. 4. Maksymalne przyspieszenia ruchu powietrza doznawane przez BSP w pobliżu turbiny

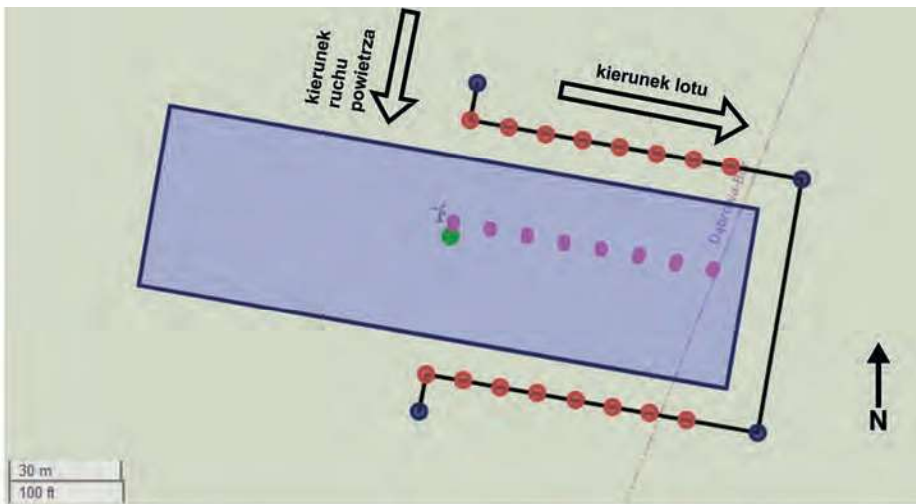


Fig. 5. Flight plan; blue rectangle – excluded zone, green point – centre of turbine column, purple points – camera lens aiming points (blade surface), red points – hover points, black line – flight trajectory

Rys. 5. Plan lotu; niebieski prostokąt – strefa wykluczona, zielony punkt – środek słupa turbiny, fioletowe punkty – punkty kierowania obiektywu kamery (powierzchnia łopat), czerwone punkty – miejsca zawisów, czarna linia – trajektoria lotu

Na podstawie rozkładu prędkości wyznaczono także rozkład przyspieszeń strug powietrza oddziałujących na BSP wykonujący zawis (rys. 4). W dużej odległości od turbiny maksymalne przyspieszenia utrzymywały się na poziomie ok. 1 m/s^2 , stopniowo wzrastały do 4 m/s^2 w odległości 10 m, następnie bardzo szybko wzrastały do ponad 14 m/s^2 , zbliżając się do płaszczyzny wirowania turbiny.

Badania w warunkach rzeczywistych

Głównym celem badań terenowych było określenie wpływu zaburzeń przepływu powietrza wywoływanych

przez ruch łopat turbiny wiatrowej na zachowanie się BSP^{11, 12)}. Na przeprowadzone testy składał się przelot w pobliżu łopat turbiny wiatrowej oraz kilka przelotów kontrolnych w różnych warunkach. Plan właściwego przelotu testowego przedstawiono na rys. 5. Lot odbył się na wysokości 120 m od poziomu terenu (punktu startu). Po stronie zawietrznej BSP znajdował się ok. 41 m za płaszczyzną ruchu łopat. Badania zostały wykonane z wykorzystaniem BSPYuneeec H850-RTK. Prędkość wiatru na wysokości lotu wynosiła ok. 6,3 m/s.

Podczas inspekcji łopat turbiny wiatrowej BSP przemieszczał się między kolejnymi punktami, aby wykonywać zdjęcia łopat. Punkty te były rozłożone na wysokości gondoli turbiny. BSP wykonywał zawis w każdym punkcie na czas przynajmniej jednego obrotu wirnika turbiny, po czym przemieszczał się do kolejnego punktu. Inspekcja rozpoczynała się w osi wirnika od strony nawietrznej, BSP kierował się na zewnątrz obwodu wirnika, po czym przelatywał na stronę zawietrzną i kierował się do osi obrotu wirnika, gdzie kończył inspekcję (rys. 5).

Podobny plan lotu, ale na mniejszej wysokości, bez obecności przeszkód mogących wprowadzać zaburzenia przepływu powietrza potraktowano jako jeden z przelotów kontrolnych. Do innych należały zawis z dala od turbiny oraz loty w innej lokalizacji (zawis oraz nalot fotogrametryczny).

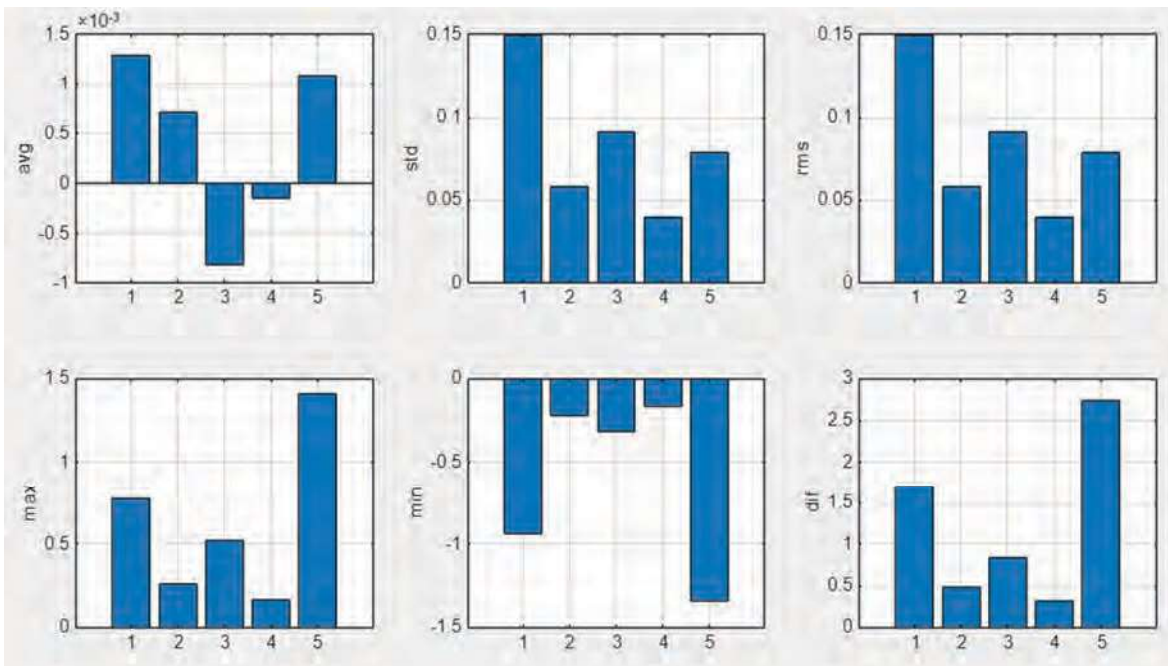


Fig. 6. Angular velocity statistics in rad/s for the pitch axis; test numbers: 1 – test proper, 2 – test below the blades, 3 – hover near the turbine, 4 – hover at another location, 5 – photogrammetric raid at another location

Rys. 6. Statystyki prędkości kątowej w rad/s dla osi *pitch*; numery testów: 1 – test właściwy, 2 – test poniżej łopat, 3 – zawis w okolicy turbiny, 4 – zawis w innej lokalizacji, 5 – nalot fotogrametryczny w innej lokalizacji

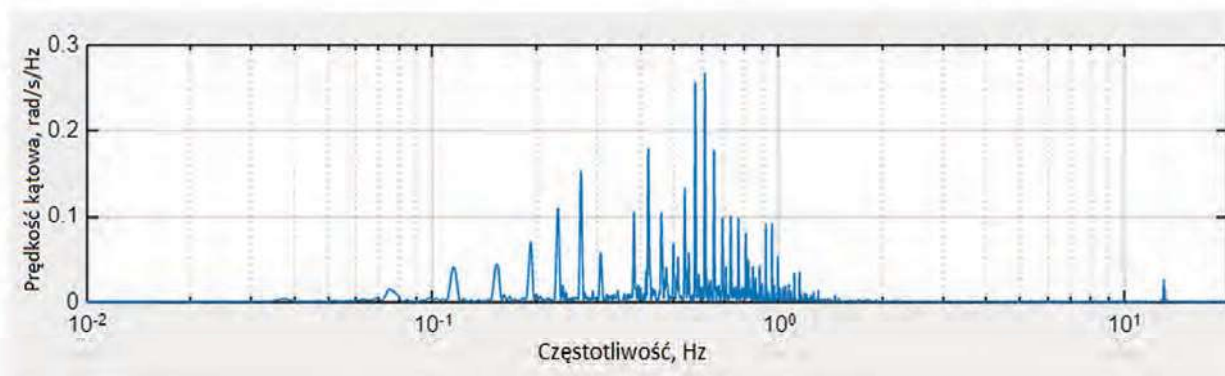


Fig. 7. Angular velocity spectrogram for the pitch axis during the actual test

Rys. 7. Spektrogram prędkości kątowej dla osi *pitch* w czasie testu właściwego

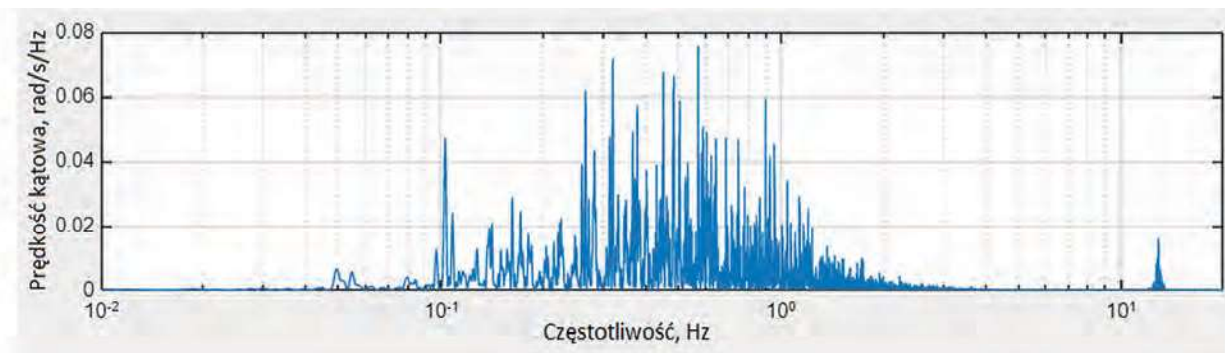


Fig. 8. Angular velocity spectrogram for the pitch axis during the test below blade

Rys. 8. Spektrogram prędkości kątowej dla osi *pitch* w czasie testu poniżej topat

Podczas każdego lotu BSP zgromadził duży zestaw danych, spośród nich do analizy wybrano prędkości kątowe w układzie powiązanim z BSP¹³⁾. Dane zapisywane były z częstotliwością 250 Hz dla osi *pitch*, *yaw* i *roll*¹⁴⁾. BSP zwrócony był przodem do kierunku wiatru, powinien więc kompensować zmiany jego prędkości ruchem głównie w osi *pitch*. Również podczas innych lotów, BSP przyspieszając i zwalniając, poruszał się głównie w tej osi. Wyznaczono podstawowe statystyki, takie jak średnia prędkość kątowa, odchylenie standardowe, wartość skuteczna, wartości skrajne oraz amplituda (rys. 6). Jak można było się spodziewać, przy dłuższym locie wartość średnia prędkości kątowej była bardzo bliska zeru, zatem odchylenie standardowe i wartość skuteczna dla każdego sygnału były prawie równe. Odchylenie standardowe dla lotu testowego było wyższe niż dla lotów kontrolnych o ponad połowę. Różnica między największą a najmniejszą prędkością kątową dla lotu testowego okazała się mniejsza niż dla nalotu fotogrametrycznego, ale większa niż dla pozostałych lotów kontrolnych. Wykonano także analizę przyspieszeń kątowych jednak różnice w wynikach były mniej wyraźne. Odchylenie standardowe przyspieszenia kątowego było największe dla zawisu w okolicy turbiny.

Poza analizą statystyk dla prędkości kątowych wykonano także analizę w dziedzinie częstotliwości metodą Lomb i Scargle'a. Na spektrogramach (rys. 7 i 8) widoczne jest maksimum globalne dla częstotliwości ok. 0,57 Hz oraz mniejsze, choć wyraźne maksimum dla częstotliwości 13 Hz (częstotliwość ta była stała dla każdego lotu). Obserwowano

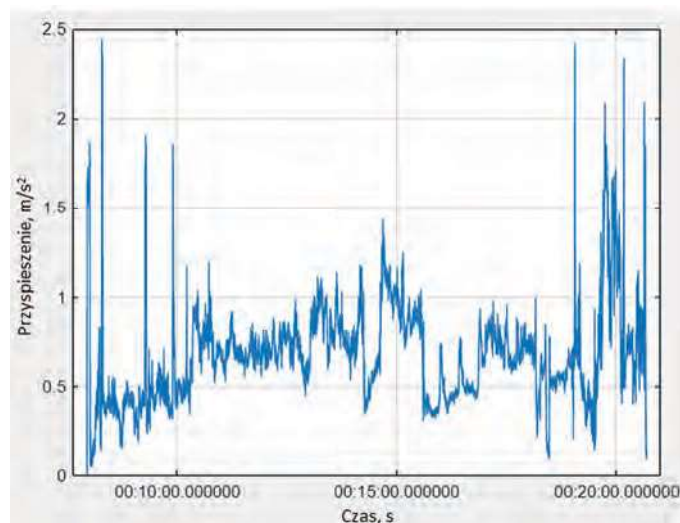


Fig. 9. UAV total acceleration

Rys. 9. Przyspieszenie wypadkowe BSP

ogólnie większe wartości dla spektrum z testu właściwego niż dla lotów kontrolnych.

Dodatkowo w celu oszacowania wielkości bezpiecznej strefy zmierzono przyspieszenia BSP podczas lotu. Odczyt z wszystkich osi akcelerometru został poddany filtracji filtrem dolnoprzepustowym o częstotliwości odcięcia 5 Hz, uprzednio odejmując składową stałą od osi pionowej. Następnie obliczono przyspieszenie wypadkowe z 3 osi (rys. 9). Maksymalne przyspieszenie wyniosło 2,44 m/s² dla chwilowego impulsu, a przeciętne podczas dłużej trwającego przyspieszania (2 s) ok. 1,6 m/s².

Omówienie wyników

W wynikach badań terenowych widoczna była wyraźna różnica pomiędzy lotem testowym a lotami kontrolnymi. Była ona zauważalna przede wszystkim w odchyleniu standardowym pomiarów prędkości kątowej w osi *pitch* wykonanych przez pokładowy żyroskop (było ono o ponad połowę większe niż dla innych lotów). Odchylenie standardowe prędkości kątowej było tu użyteczną miarą ze względu na to, że podczas zawisu BSP wykonywał drobne, oscylacyjne ruchy, prędkość zmieniała znak. Można było spodziewać się średniej równej ok. 0, co zaobserwowano. Odchylenie standardowe można interpretować jako miarę wielkości tych oscylacji. Ważnymi parametrami były też wartości maksymalne i minimalne, ale były one mocno podatne na przypadkowe podmuchy wiatru, tak też się mogło stać w przypadku długiego nalotu fotogrametrycznego (prawdopodobieństwo ich wystąpienia rosło wraz z czasem lotu).

Można wykluczyć, że zaobserwowanie wyraźnie większych korekt pozycji było spowodowane czymś innym, niż obecnością zaburzeń przepływu powietrza wywołanych przez łopaty turbiny wiatrowej. Nie zaobserwowano takiego efektu ani dla lotu testowego o tym samym przebiegu na niższej wysokości, ani dla lotu na podobnej wysokości, ale o innym przebiegu, ani też dla zawisów.

Nie można przełożyć wprost przeprowadzonych pomiarów na prędkość wiatru ani na bezpieczeństwo BSP. Faktem jednak jest, że wychylenie się BSP bez wydania takiego polecenia było spowodowane działaniem układu kontroli lotu w wyniku przemieszczenia się go poprzez pewne zaburzenie (w tym wypadku zmianę prędkości wiatru). Układ kontroli lotu dobrze radził sobie z korygowaniem wiatru o stałej prędkości, był zdolny do dokładnego utrzymania zadanej pozycji przez dobranie odpowiedniego kąta pochylecia i mocy silników. Kiedy prędkość wiatru zmieniała się w nieprzewidywalny sposób, układ kontroli lotu potrzebował czasu na wykonanie korekty, podczas której BSP został wytracony z zadanej pozycji na pewną odległość. Taki ruch mógł się odbyć też w kierunku przeciwnym do ruchu powietrza, jeśli np. prędkość wiatru nagle się zmniejszyła. Było to szczególnie groźne zjawisko, kiedy BSP wykonywał zawis za obracającymi się łopatami turbiny wiatrowej.

Podsumowanie

Bazą do wyznaczenia bezpiecznej strefy są wyniki symulacji CFD, wnioski z badań terenowych oraz dokumentacja BSP. Symulacje CFD wykazały, że przy zadanych warunkach wietrznych oraz geometrycznych prędkość powietrza w zaburzonej strudze wynosi 7–9,5 m/s. W dokumentacji BSP maksymalna zalecana prędkość pozioma określona jest

na 10 m/s. Kierując się jedynie tymi wartościami, można by uznać, że lot w strudze zaburzonej przez turbinę jest bezpieczny, ale inne wyniki temu przeczą. Przyspieszenia powietrza w odległości poniżej 10 m od wirnika osiągają wartości dużo większe od przyspieszeń, do korekty których zdolny jest BSP. W zakresie odległości 10–100 m przyspieszenia powietrza utrzymują się na poziomie porównywalnym z przyspieszeniami możliwymi do uzyskania przez BSP. W tym zakresie wykonano też badania terenowe, zmierzono ruchy BSP znacząco większe niż przy lotach testowych, choć niewpływające na bezpieczeństwo lotu. Można zatem wnioskować, że skoro warunki w zakresie 10–100 m są podobne, a zachowanie się BSP w jednym z punktów tego zakresu nie stwarzało zagrożenia, cały ten zakres można uznać za bezpieczny, natomiast zakres do 10 m należy uznać za strefę wykluczoną ze względu na to, że warunki wewnątrz niej gwałtownie się zmieniają i nie można dobrze przewidzieć zachowania się tam BSP. Podsumowując, za strefę bezpiecznej operacji (do celów wykonywania inspekcji) dla badanego BSP oraz badanej turbiny wiatrowej podczas jej pracy można przyjąć przestrzeń z wykluczeniem cylindra o wysokości przynajmniej 10 m obejmującego wirnik turbiny i rozciągającego się na stronę zawietrzną turbiny. Należy pamiętać, że wynik ten jest osiągnięty przy konkretnych założeniach, a analiza dotyczy jedynie warunków wietrznych, poza którymi na BSP mają wpływ też zakłócenia elektromagnetyczne oraz inne niedoskonałości systemu. Wykluczona strefa oczywiście powinna być powiększona o odpowiedni margines bezpieczeństwa, biorąc pod uwagę inne czynniki.

Praca wykonana w ramach działalności statutowej WIMiR AGH.

Otrzymano: 20-09-2024

Zrecenzowano: 23-09-2024

Zaakceptowano: 05-10-2024

Opublikowano: 20-11-2024

LITERATURA

- [1] O. Summerfield-Ryan, S. Park, *Ecol. Econ.* 2023, **210**, 107841.
- [2] R. Wiser i in., *Land-based wind market report: 2023 edition*, US Department of Energy, 2023.
- [3] D. Chan, J. Mo, *Energy Procedia* 2017, **110**, 328.
- [4] M.L. Hossain, A. Abu-Siada, S.M. Mueen, *Energies* 2018, **11**, 1309.
- [5] K. Kołodziejczyk, J. Minda, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 12, 1405.
- [6] W. Li, W. Zhao, J. Gu, B. Fan, Y. Du, *Remote Sens.* 2022, **14**, 3113.
- [7] M.J. Churchfield, S. Lee, J. Michalakes, P.J.A. Moriarty, *J. Turbul.* 2012, **13**, N14.
- [8] M. Calaf, C. Meneveau, J. Meyers, *Phys. Fluids* 2010, **22**, 015110.
- [9] R.J.A.M. Stevens, C. Meneveau, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2017, **49**, 311.
- [10] H. Asmuth i in., *Renew. Energy* 2022, **191**, 868.
- [11] B.H. Wang, D.B. Wang, Z.A. Ali, B. Ting, H. Wang, *Meas. Control* 2019, **52**, 731.
- [12] F. Noca, T. Bujard, G. Visvaratnam, G. Catry, N. Bosson, *AIAA Aviation 2021 Forum* (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Virtual Event, 2021). doi: 10.2514/6.2021-2577.
- [13] H. Liang, S.-C. Lee, W. Bae, J. Kim, S. Seo, *Drones* 2023, **7**, 202.
- [14] B. Ruzgienė, *J. Measurement Eng.* 2014, **2**, nr 2, 95.