

# Wykorzystanie dronów w inspekcjach morskich farm wiatrowych OFFSHORE

## Use of drones in offshore wind farm inspections



**Hanna Dzido**

Dr

Katedra Transportu i Logistyki  
Wydział Nawigacyjny  
Uniwersytet Morski w Gdyni

[h.dzido@wn.umg.edu.pl](mailto:h.dzido@wn.umg.edu.pl)

**Streszczenie:** Wraz ze wzrostem globalnych inwestycji w morską energetykę wiatrową i szybkim wdrażaniem technologii wiatrowych w niebezpiecznych środowiskach głębokowodnych, inspekcja eksploatacyjna turbin wiatrowych i związanej z nimi infrastruktury odgrywa ważną rolę w bezpiecznej i wydajnej eksploatacji morskich farm wiatrowych. W ostatnich latach wiele uwagi poświęcono wykorzystaniu bezzałogowych statków powietrznych (BSP) i zdalnie pilotowanych bezzałogowych statków powietrznych (RPA) powszechnie określanych jako „drony”, do zdalnej inspekcji infrastruktury z zakresu OZE (odnawialnych źródeł energii) tj. farm fotowoltaicznych oraz lądowych farm wiatrowych. Drony posiadają znaczący potencjał, aby zmniejszyć nie tylko liczbę operacji lotniczych (zaangażowania statków powietrznych i załóg lotniczych) oraz transportu personelu dokonującego przeglądu i naprawy morskich turbin wiatrowych, ale także ilość ciężkiego sprzętu transportowanego do wykonywania niebezpiecznych prac kontrolnych. Zaangażowanie BSP skraca również czas przestoju elektrowni potrzebny do wykrycia usterek i zebrania informacji diagnostycznych z całej farmy wiatrowej. Korzyści z technologii inspekcji w branży morskiej energetyki wiatrowej opartej na dronach, potwierdzają dotychczasowe testy, a perspektywa rozwoju energetyki morskiej zachęca do dalszych prac z wykorzystaniem BSP. Jednocześnie należy mieć na uwadze, iż każda nieprzewidziana awaria systemu dronowego podczas jego misji może spowodować przerwanie prac kontrolnych (podczas inspekcji), a tym samym ograniczenie energii elektrycznej generowanej przez turbiny wiatrowe. W artykule przedstawiono potencjał dronów w procesie inspekcji farm wiatrowych, w tym morskich, przedstawiono przykładowe modele BSP używane do inspekcji, wskazano sposoby prowadzenia kontroli z użyciem dronów oraz zwrócono uwagę na znaczące obniżenie kosztów procesu eksploatacji morskich farm wiatrowych wskutek ograniczenia wykorzystania lotnictwa załogowego (śmigłowców i załóg lotniczych) oraz eliminacji ryzyka związanego z zaangażowaniem personelu do wykonywania inspekcji elektrowni wiatrowych na morzu. Wskazano również na potencjał bezzałogowych platform pływających w ramach współpracy z BSP w procesie dokonywania inspekcji morskich farm wiatrowych.

**Słowa kluczowe:** Energetyka wiatrowa; Drony; Farmy wiatrowe; Inspekcje dronem; Lotnictwo morskie; Offshore; Analiza ryzyka

**Abstract:** With the increase in global investments in offshore wind energy and the rapid implementation of wind technologies in hazardous deep water environments, operational inspection of wind turbines and related infrastructure plays an important role in the safe and efficient operation of offshore wind farms. In recent years, much attention has been paid to the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and remotely piloted unmanned aerial vehicles (RPAs) commonly referred to as "drones" for remote inspection of renewable energy infrastructure, i.e. photovoltaic farms and onshore wind farms. Drones have significant potential also in offshore wind energy. Inspection with drones allows for to reduce not only the number of flight operations (involvement of aircraft and flight crews) and the transport of personnel carrying out the maintenance and repair of offshore wind turbines. With drones is possible carry the equipment transported for hazardous inspection work. The involvement of UAVs also reduces the plant downtime needed to detect faults and collect diagnostic information from the entire wind farm. The benefits of inspection technology in the offshore wind energy industry based on drones are confirmed by the previous tests, and the prospect of offshore energy development encourages further work with the use of UAVs. At the same time, it should be borne in mind that any unexpected failure of the drone system during its mission may interrupt control works (during inspections), and thus reduce the electricity generated by wind turbines. The article presents the potential of drones in the process of inspecting wind farms, including offshore wind farms, presents examples of UAV models used for inspections, indicates methods of conducting inspections with the use of drones and highlights a significant reduction in the costs of the operation of offshore wind farms as a result of limiting the use of manned aviation (helicopters and flight crews) and the elimination of the risk associated with the involvement of personnel to perform inspections of wind farms at sea. The potential of unmanned floating platforms as part of cooperation with UAV in the process of inspecting offshore wind farms was also indicated.

**Keywords:** Wind energy; Drones; Wind farms; Drone inspections; Aviation, Offshore; Risk analysis

W ostatnich latach technologie morskiej energetyki wiatrowej zyskały powszechną uwagę i doświadczyły szybkiego rozwoju ze względu na wiele zalet jakie oferują. Sytuacja geopolityczna związana z konfliktem rosyjsko – ukraińskim oraz decyzjami społeczności międzynarodowej w kontekście dywersyfikacji źródeł energii (ograni-

czenia uzależnienia poziomu dostaw gazu z Federacji Rosyjskiej), stała się dodatkowym bodźcem dla rozwoju morskich farm wiatrowych offshore.

W 2020 roku w Europie dokonano kolejnych inwestycji w morską energetykę wiatrową – na dziewięciu farmach wiatrowych podłączono do sieci 356 nowych morskich turbin

wiatrowych co przyniosło dodatkowe 2,9 GW mocy. Tym samym całkowita zainstalowana moc morskiej energii wiatrowej Europy wynosi obecnie 25 GW, co odpowiada 5402 turbinom wiatrowym podłączonym do sieci w 12 krajach [7]. Przyglądając się rejonom geograficznym, Morze Północne pozostaje najbardziej ugruntowanym

basenem morskim w Europie, pod względem skumulowanych instalacji morskich turbin wiatrowych z prawie 20 GW (79%) wszystkich morskich mocy wiatrowych w Europie. Pozostałą resztę stanowią Morze Irlandzkie (12%), Morze Bałtyckie (9%) i Ocean Atlantycki (<1%). Światowa Rada Energetyki Wiatrowej (GWEC) szacuje, że do końca 2030 r. całkowita moc morskiej energii wiatrowej na świecie wzrośnie do ponad 234 gigawatów (GW) [3].

W porównaniu z wiatrami na lądzie zasoby wiatru na obszarach morskich są bardziej obfite, silniejsze i więcej bardziej konsekwentnie. Ponadto morskie turbiny wiatrowe, poprzez środowisko w którym pracują względnie są mniej hałaśliwe, a przez to bardziej przyjazne dla środowiska niż ich odpowiedniki na lądzie. Morskie turbiny wiatrowe nie powodują zanieczyszczenia środowiska naturalnego, a wytwarzanie energii nie generuje emisji do atmosfery jakichkolwiek szkodliwych związków, ani żadnych odpadów. Energię

pochodzącą z elektrowni wiatrowych charakteryzuje stały koszt, co wpływa na wzrost konkurencyjności ekonomicznej względem konwencjonalnych źródeł energii.

Podczas działania elektrowni wiatrowej części ruchome ulegają ścieraniu oraz różnym awariom. Koszty związane z eksploatacją (O&M ang. operation i konserwacją ang. maintenance) zarówno lądowych jak i morskich elektrowni wiatrowych, stanowią dużą część całkowitego kosztu cyklu życia tych projektów. Szacuje się, że dla nowych urządzeń udział ten w całkowitych kosztach utrzymania wynosi 10 do 15 procent i zwiększa się wraz ze zużywaniem się turbiny nawet do wartości 35 procent [5]. W przypadku morskich farm wiatrowych dodatkowymi czynnikami są falowania morskie i sól. Ponadto zarówno elementy konstrukcji powyżej poziomu wody jak również elementy zanurzone oraz morskie stacje elektroenergetyczne, wymagają odpowiedniego nadzoru i bieżącego monitorowania ich funk-

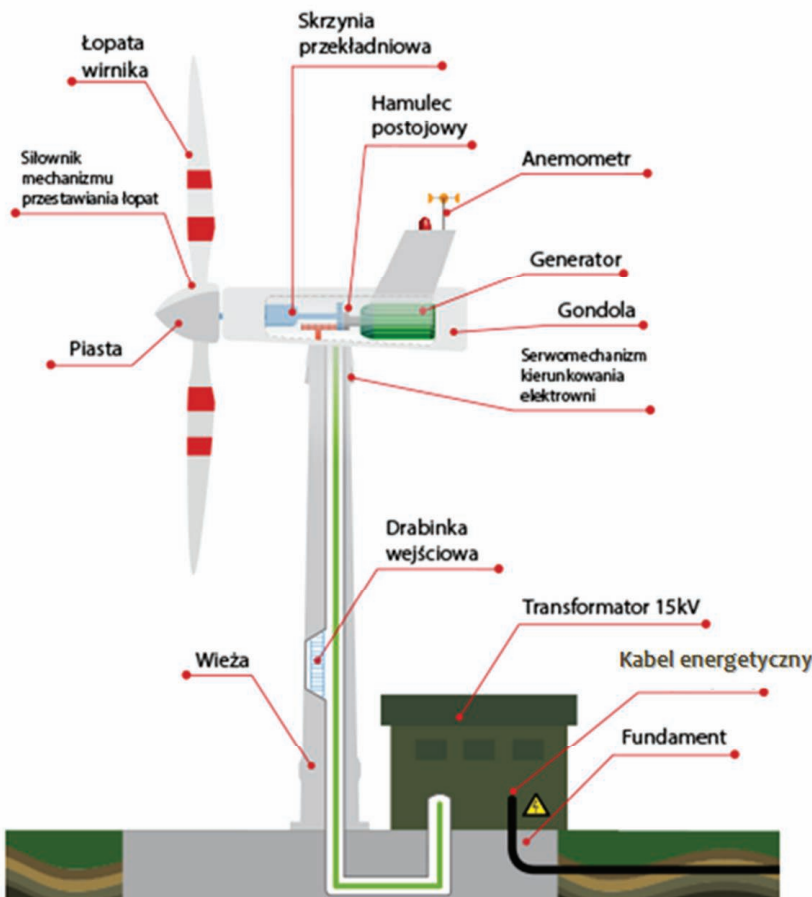
cjonowania [6].

Najczęściej stosowanym rozwiązaniem w procesie inspekcji i napraw morskich elektrowni wiatrowych jest zaangażowanie lotnictwa załogowego śmigłowców HHO (ang. Helicopter Hoist Operation) transportujących personel techniczny.

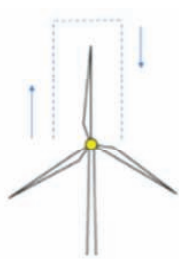
Śmigłowce HHO (ang. Helicopter Hoist Operation) wykorzystywane w operacjach śmigłowcowych z ładunkiem na zaczepie zewnętrznym w ramach zarobkowego transportu lotniczego. Lot HHO oznacza lot śmigłowcem wykonywany zgodnie z zaawizowaniem HHO, w celu ułatwienia transportu osób i/lub ładunku przy użyciu urządzeń dźwigowych śmigłowca (definicje zgodne z Rozporządzeniem Komisji (UE) nr 965/2012 z 5 października 2012 r. ustanawiające wymagania techniczne i procedury administracyjne odnoszące się do operacji lotniczych).

Kontrola wizualna niektórych komponentów, takich jak wieża, łopaty wirnika, piasta i ramy, wymaga bardzo dużych zasobów i często zajmuje dużo czasu. Operacja ta również stanowi poważne zagrożenie dla zdrowia i bezpieczeństwa personelu ją wykonującego, w szczególności w przypadku trudnych warunków pogodowych (np. silny wiatr lub wysokie fale). Aby przeprowadzić pewne prace kontrolne na wewnętrznych elementach gondoli sięgającej na wysokość ok. 80 - 120 m nad poziomem morza, personel musi wspiąć się na wieżę turbiny wiatrowej. W celu sprawdzenia elementów wirnika (łopat i piasty) konieczne jest wykorzystanie lin zwisających od szczytu turbin wiatrowych. Personel pracuje przez kilka godzin na dużych wysokościach (często ponad 100 m) w warunkach morskich, co zdecydowanie zwiększa zagrożenie dla bezpieczeństwa a nawet życia.

Na całym świecie poczyniono duże postępy w automatyzacji procesu serwisowania farm wiatrowych. Przy obecnym charakterze i skali rozwoju a tym samym zakresie inspekcji farm wiatrowych, oczywistym jest fakt, iż



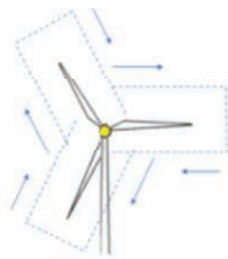
1. Główne elementy elektrowni wiatrowej. Źródło: <https://zielonestrefy.pl/zielone-strefy/odnawialne-zrodla-energii/energia-wiatru/>



**Pozycja łopaty na godzinie 12**



**Pozycja łopaty na godzinie 6**



**Pozycja stała**

2. Inspekcje turbiny wiatrowej na godzinie 12, 6 i w pozycji stałej. Źródło: opracowanie własne

metody obsługi i utrzymania z bezpośrednim udziałem ludzi, będą coraz częściej zastępowane robotami i dronami. Zaangażowanie bezzałogowych statków powietrznych (BSP) do przeprowadzania inspekcji morskich farm wiatrowych stanowi racjonalne i uzasadnione rozwiązanie dla dywersyfikacji ryzyka załogowych operacji lotniczych oraz ograniczenia kosztów. Opłacalność używania BSP do inspekcji będzie się różniła w zależności od liczby dziennej kontroli turbin, liczby personelu wymaganego dla każdej inspekcji oraz czasu pomiędzy poszczególnymi inspekcjami. Przeprowadzone dotychczas inspekcje wykazały, że półautomatyczne drony mogą skontrolować około 12 - 15 turbin wiatrowych dziennie, podczas gdy konwencjonalnymi metodami możliwe jest sprawdzenie do 2 - 3 turbin dziennie. Jeśli proces zostanie w pełni zautomatyzowany, potencjał dronów w inspekcji wzrasta do 20 turbin dziennie. Prace kontrolne morskich farm wiatrowych prowadzone są w okresach dobrej pogody i spokojnego stanu morza. Praktyka branżowa pokazuje, że inspekcje są często przeprowadzane w dwóch odstępach czasowych, raz w roku (zwykle w lipcu) lub dwa razy w roku (zwykle w maju i październiku) [4]. Częstotliwość przeglądów morskich farm wiatrowych zależy od wielu czynników, takich jak m.in.:

- rodzaje systemów lub komponentów zastosowanych w elektrowniach,
- potencjalnych trybach awaryjnych i prawdopodobieństwa ich wystąpienia,

- wpływu awarii na funkcjonalność systemu, dostępności statków serwisowych, dostępności do lokalizacji morskiej,
- warunków pogodowych itp.

Zadania tradycyjnie wykonuje się na dwa sposoby używając „dostępu linowego” lub „kamery naziemnej”. Kontrola dostępu linowego obejmuje dwóch lub więcej pracowników wspinających się na szczyt turbiny wiatrowej i schodzących po każdej łopacie z pomocą lin lub podwyższonych platform w celu zidentyfikowania i wychwylenia defektów. Zagrożeniem stosowania tej metody jest ryzyko wpadnięcia do morza. Podczas inspekcji kamera stoi na łodzi około 70 - 80 m od turbiny wiatrowej i robi zdjęcia elementów. W celu inspekcji morskich turbin wiatrowych wyłącznie z użyciem drona, BSP są transportowane statkiem (np. łodzią) lub helikopterem, a następnie lecą na szczyt turbin wiatrowych z pomocą pilota (operatora BSP). Operacje kontrolne z użyciem dronów w morskich farmach wiatrowych obejmują co najmniej dwóch pracowników, jeden do sterowania dronem (pilot/operator), a drugi do sterowania łodzią (kapitan jednostki pływającej).

Kontrola łopat elektrowni wiatrowej z użyciem drona może być przeprowadzona na trzy sposoby (rys. 2)

- pozycja ostrza na godzinie 12
- podczas inspekcji każda łopata jest ręcznie ustawiona w kierunku do góry. Dron leci manualnie lub automatycznie wzdłuż boków łopaty, obejmując w całości powierzchnię łopaty i utrzymując kamerę w na-

chyleniu 0 stopni, skierowaną pionowo do jej powierzchni. Manewr wykonywany jest z przodu i z tyłu łopaty.

- pozycja łopat na godzinie 6
- w trakcie inspekcji każda łopata jest ręcznie ustawiona w kierunku do dołu. Dron leci manualnie lub automatycznie wzdłuż boków łopaty, utrzymując kamerę w nachyleniu 0 stopni skierowaną pionowo do jej powierzchni.
- pozycja stała
- turbina wiatrowa na czas inspekcji jest ręcznie zatrzymywana w określonej lub losowej pozycji (wyłączając pozycję na godzinie 6 i 12). Dron w trybie automatycznego lotu z misją przelatuje wokół stron łopaty, rejestrując dane wzdłuż powierzchni. Manewr wykonywany jest z przodu i z tyłu łopaty.

Wśród uszkodzeń farm wiatrowych wykrywanych przez drony należy wskazać:

- pęknięcia zmęczeniowe,
- zmęczenia korozyjne spowodowane rozwojem pęknięć przy jednoczesnym działaniu korozji,
- korozję (jednolitą, zlokalizowaną),
- korozję wżerową prowadzącą do powstawania małych otworów w poszyciu łopat/wieży/gondoli turbin,
- naprężenia cykliczne,
- uszkodzenia mechaniczne,
- ekstremalne obciążenia powodowane wiatrem/falami.

Wraz z przewidywanym wzrostem w nadchodzących latach rynku inspekcji z wykorzystaniem dronów w sektorze morskiej energetyki wiatrowej, technologia ta stanie się bardziej przystępna cenowo, szybsza i łatwiejsza.

Na czas inspekcji drony mogą zawiązać w jednym miejscu i wykonywać wysokiej jakości zdjęcia elementów turbin wiatrowych z różnych pozycji i pod różnymi kątami (rys. 3). Następnie obrazy te mogą być (są) analizowane



3. Platformy zrobotyzowane w procesie inspekcji morskich farm wiatrowych. Źródło: [8]

przez system komputerowy w celu zidentyfikowania wczesnych oznak defektów lub uszkodzeń turbin oraz zidentyfikowania odpowiednich działań konserwacyjnych, aby zapobiec

występowaniu trybów awaryjnych. W tym celu używane są kamery o wysokiej rozdzielczości zainstalowane na pokładzie drona. Dodatkowo mogą być również instalowane czujniki

optoelektroniczne (OE ang. Optoelectronic) pracujące w podczerwieni (IR ang. Infrared) oraz w bliskiej podczerwieni (NIR ang. Near-Infrared), a także hiperspektralne w celu przechwytywania różnych rodzajów danych, w tym wizualnych i termowizyjnych.

Uzyskiwanie wysokiej jakości danych w inspekcjach elektrowni wiatrowych z wykorzystaniem dronów potwierdza wyższą efektywność BSP wobec inspekcji wykonywanych przez personel techniczny. Urządzenia te (drony) mogą latać 3-10 metrów nad łopata i krążyć wokół niej, aby objąć całą powierzchnię turbiny, są często wyposażone w kamerę cyfrową, kamerę termowizyjną lub kombinację obu. Dzięki inspekcji termograficznej można uzyskać dokładniejsze dane dotyczące temperatury na dużych powierzchniach, wad ukrytych, korozji i innych nieprawidłowości. Testy wykazały, jak defekty w kompozytowych łopatach turbiny wiatrowej można wykryć za pomocą drona wyposażonego w kamerę termowizyjną [2]. Oprogra-

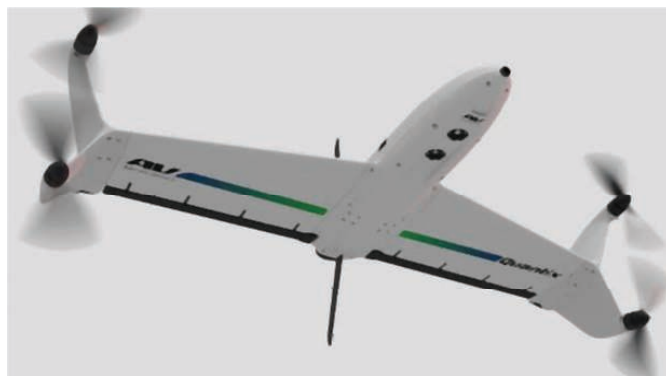
Tab. 1. Metody badań nieniszczących (NDT) turbin wiatrowych

NDT	Zalety	Wady
Badania ultradźwiękowe UT (ang. Ultrasonic Testing)	<ul style="list-style-type: none"> <li>wysoka czułość</li> <li>wykrywanie wad powierzchni</li> <li>informacja o głębokości defektów</li> <li>powtarzalne wykrywanie wad</li> <li>możliwość czystości trybu</li> <li>niska złożoność sygnałów</li> <li>kontrola na żądanie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>wymaga rozległej wiedzy technicznej</li> <li>wymaga przygotowania powierzchni</li> <li>trudności w sprawdzaniu nieregularnych kształtów</li> <li>wysoka penetracja</li> <li>czasochłonne</li> <li>krótkoterminowa inspekcja terenowa</li> <li>potrzebny jest nadzór</li> <li>wysokie tłumienie sygnału</li> </ul>
Emisja akustyczna AE (ang. Acoustic Emission)	<ul style="list-style-type: none"> <li>wysoka czułość</li> <li>wysoki stosunek sygnału do szumu (SNR)</li> <li>lokalizacja wady</li> <li>potrafi wykryć awarie na wczesnym etapie</li> <li>kontrola pasywna i eksploatacyjna</li> <li>przenośna lub wysoce zautomatyzowana praca</li> <li>możliwość dostosowania do bezprzewodowych sieci czujników</li> <li>nie jest potrzebny nadzór</li> <li>zakres częstotliwości jest daleki od zaburzeń obciążenia</li> <li>długoterminowa inspekcja terenowa</li> <li>brak konieczności demontażu i czyszczenia próbki</li> <li>wymaganych jest kilka punktów dostępu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>niepowtarzalne wydarzenie</li> <li>oparte na wydarzeniach</li> <li>wymagana jest bardzo wysoka częstotliwość próbkowania</li> <li>brak wyników ilościowych dotyczących rozmiaru i głębokości</li> <li>wysokie tłumienie sygnału</li> </ul>
Światłowody (ang. Fibre optics)	<ul style="list-style-type: none"> <li>wysoka czułość</li> <li>brak tłumienia na długich dystansach</li> <li>mały rozmiar i niewielka waga</li> <li>wysokie możliwości multipleksowania</li> <li>odporność na zakłócenia elektromagnetyczne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>niepraktyczne dla dużych farm wiatrowych</li> <li>wymaga szczególnej dbałości o bezpieczną instalację</li> <li>podatność na uszkodzenia fizyczne</li> <li>czułość termiczna</li> </ul>
Badania termograficzne TT (ang. Thermographic Testing)	<ul style="list-style-type: none"> <li>kontrola na dużą skalę</li> <li>pełne pokrycie w krótkim czasie</li> <li>może być używany w niedostępnych miejscach</li> <li>wymagany jest dostęp z jednej strony</li> <li>nie jest wymagane żadne szczególne bezpieczeństwo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ograniczone do wad powierzchniowych lub przypowierzchniowych</li> <li>obsługa ręczna i kosztowna</li> <li>trudne w użyciu na obracających się ostrzach</li> <li>trudne do wykrycia uszkodzenia wnętrza</li> <li>opiera się na regularnych inspekcjach</li> <li>krótkoterminowa inspekcja terenowa</li> <li>potrzebny jest nadzór</li> </ul>
Badania radiograficzne RT (ang. Radiographic Testing)	<ul style="list-style-type: none"> <li>informacja o głębokości defektów</li> <li>nadaje się do złożonych konstrukcji i różnych materiałów</li> <li>kontrola na dużą skalę</li> <li>pełne pokrycie w krótkim czasie</li> <li>obrazy 2D i 3D</li> <li>dobra wrażliwość na kontrast</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>obsługa ręczna (kosztowna), potrzebny jest nadzór</li> <li>wymagany jest dwustronny dostęp</li> <li>trudne w użyciu na obracających się ostrzach</li> <li>zagrożenia dla zdrowia i bezpieczeństwa</li> <li>opiera się na regularnych inspekcjach</li> <li>krótkoterminowa inspekcja terenowa</li> </ul>

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [1]



4. Dron kwadrokopter, model Matrice 300 RTK. Źródło: <https://enterprise.dji-ars.pl/inspekcje-turbin-wiatrowych-z-wykorzystaniem-dronow-zwieksza-wydajnosci-i-niezawodnosci-farm-wiatrowych/>



5. Dron ze skrzydłem stałym, model Quantix. Źródło: <https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/sprzet/quantix-przemyslowy-dron-od-aerovironment/g53xj9z>

mowanie fotogrametryczne do wykrywania defektów łopat turbin wiatrowej na podstawie zdjęć lotniczych wykonywanych przez drona stanowi element budowania biblioteki danych, które następnie można oznaczyć metatagami i wykorzystywać do skonstruowania trójwymiarowego modelu ostrza łopaty z dokładnością trudną do osiągnięcia metodami ręcznymi.

Najpowszechniejsze metody badań nieniszczących NDT (ang. Non-Destructive Testing) możliwe do wykonania z użyciem BSP w trakcie inspekcji turbin wiatrowych również morskich zostały przedstawione w tabeli 1 [1].

## Rodzaje dronów używanych w inspekcjach farm wiatrowych

Bezzałogowe statki powietrzne, możliwe do zastosowania przy operacji inspekcji farm wiatrowych można ogólnie podzielić na trzy rodzaje urządzeń latających: jednowirnikowych, wielowirnikowych i wielowirnikowych ze skrzydłem stałym.

- Multirotor lub multicopter

- to rodzaj drona, który składa się z trzech wirników (znanych jako trikoopter), czterech wirników (kwadrokopter), sześciu wirników (heksakopter) lub ośmiu wirników (oktokopter).

Kwadrokoptery są najpopularniejszymi i najszerzej stosowanymi dronami wielowirnikowymi, ponieważ zapewniają najlepszą równowagę między unoszeniem, kontrolą, zwrotnością i kosztem. Drony wielowirnikowe to najtańszy rodzaj dronów na rynku, jednak wymagają dużo energii do działania, a ich wytrzymałość i szybkość jest ograniczona. Przy obecnej technologii akumulatorów drony wielowirnikowe są w stanie latać tylko przez około 20 do 30 minut na raz, niosąc lekki ładunek kamery.

- Dron ze stałym skrzydłem
- rodzaj drona zaprojektowanego z jednym sztywnym skrzydłem, takim jak samolot, które zapewnia unoszenie, a nie pionowymi wirnikami podnoszącymi. Drony stałopłaty potrzebują energii tylko do

poruszania się do przodu, ale nie do zawisu w powietrzu, przez co są znacznie wydajniejsze niż drony wielowirnikowe, są również w stanie pokonywać duże odległości i mapować duże obszary. Niemniej jednak ich główne wady to wysoki koszt i niemożność wykonania zawisu w jednym miejscu.

- Dron jednowirnikowy - posiadający tylko jeden wirnik, który utrzymuje maszynę w górze, i wirnik ogonowy, który kontroluje kierunek lotu. Może zawisać z dużym ładunkiem (np. lotniczy skaner laserowy LIDAR) lub mieć mieszankę zawisu z dużą wytrzymałością lub szybkim lotem do przodu. Drony jednowirnikowe to skomplikowane urządzenia, a ich obracające się ostrza mogą być niebezpieczne. LIDAR (od ang. akronimu, utworzonego od wyrażenia: Light Detection and Ranging) jest to metoda pomiaru odległości poprzez oświetlenie celu światłem laserowym i pomiar odbicia za pomocą czujnika. Pod względem trudności w użyciu drony jednowirnikowe plasują się pomiędzy wielowirnikowcami a dronami stałopłatowymi.



6. Dron jednowirnikowy, model TD112-G. Źródło: <https://tianda.en.made-in-china.com/product/YN-dxutarheVy/China-12kg-Load-Full-Autonomous-Single-Rotor-Oil-Power-Plant-Protection-Drone.html>

## Wnioski

Wraz ze wzrostem liczby instalowanych elektrowni morskich w celu zwiększenia mocy morskiej energii wiatrowej na świecie, podejmo-

wane są prace badawczo-rozwojowe dla obniżenia uśrednionego kosztu energii, aby morska energetyka wiatrowa była bardziej konkurencyjna i atrakcyjna dla inwestorów. Eksploatacja i konserwacja (O&M) stanowią dużą część całkowitego kosztu cyklu życia i są najdłuższą fazą rozwoju projektów morskiej energetyki wiatrowej. W związku z tym skrócenie czasu, kosztów obsługi i utrzymania stanowi najwyższy priorytet dla operatorów, producentów oraz firm ubezpieczeniowych w sektorze morskiej energetyki wiatrowej. Według niektórych badań wysokie wydatki na O&M morskich farm wiatrowych wynikają głównie z ograniczonego dostępu do infrastruktury turbin w celu kontroli i konserwacji. Aby pokonać bariery dostępności i obniżyć koszty, w ostatnich latach w branży morskiej energetyki wiatrowej wiele uwagi poświęcono wykorzystaniu dronów i technologii zdalnego wykonywania inspekcji. Oprócz potwierdzonej optymalizacji kosztów, ograniczenia zagrożenia dla ludzi i załogowych statków powietrznych wykorzystywanych do misji na morzu, zaletą jest fakt, że drony mogą zmniejszyć zapotrzebowanie na ciężki sprzęt do podnoszenia do wykonywania zadań kontrolnych. Drony inspekcyjne wyposażone w potężną kamerę cyfrową zdolną do przechwytywania obrazów lotniczych w wysokiej rozdzielczości z wieży, gondoli, łopat wirnika i połączeń śrubowych stanowią doskonałe rozwiązanie dla dywersyfikacji ryzyka inspekcji z bezpośrednim udziałem człowieka. Obrazy i dane zebrane przez BSP można analizować za pomocą techniki uczenia maszynowego (ang. machine learning) w celu tworzenia algorytmów służących wykrywaniu wczesnych oznak degradacji i identyfikowania odpowiednich działań konserwacyjnych, aby zapobiec występowaniu trybów awaryjnych i przestojów w pracy elektrowni wiatrowych. Dzięki temu drony mogą skrócić czas potrzebny na wykrycie usterek i zebranie informacji diagnostycznych ze wszystkich turbin wiatrowych.

Jednocześnie pomimo wszystkich potencjalnych korzyści, technologia kontroli morskich turbin wiatrowych z użyciem dronów wciąż pozostaje na etapie rozwoju i konieczne są dalsze badania w celu zidentyfikowania potencjalnych luk technologicznych, możliwości i przyszłych wymagań technologii w zakresie sprzętu, oprogramowania oraz danych gromadzonych w trakcie procesu przygotowania i prowadzenia inspekcji. Wskaźnik awaryjności dronów jest znacząco niższy niż w lotnictwie załogowym. Aby zidentyfikować, przeanalizować i złagodzić ryzyko, a także obniżyć koszty utrzymania związane z awarią dronów dedykowanych do inspekcji morskich farmach wiatrowych, konieczne jest opracowanie metodologii, które będą w stanie określić niezawodność drona zarówno na poziomie systemu, jak i jego komponentów. Niezawodność, która jest definiowana jako prawdopodobieństwo bezawaryjnego funkcjonowania systemu przez określony czas w zaprojektowanym środowisku, jest kluczowym wskaźnikiem wydajności systemów dronów. Zapewnienie dostępności dronów w trybie misji jest wyzwaniem, ponieważ każda nieprzewidziana awaria systemu drona podczas jego lotu może spowodować przerwanie prac inspekcyjnych, a tym samym znaczne ograniczenie energii elektrycznej wytwarzanej przez turbiny wiatrowe. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Bouzid, O.M., In-Situ Health Monitoring for Wind Turbine Blade Using Acoustic Wireless Sensor Networks at Low Sampling Rates, Ph.D. Thesis, Newcastle University, Newcastle, UK, 2013
- [2] Galleguillos, C.; Zorrilla, A.; Jimenez, A.; Diaz, L.; Montiano, Á.L.; Barroso, M.; Viguria, A.; Lasagni, F. Thermographic nondestructive inspection of wind turbine blades using unmanned aerial systems. *Plast. Rubber Compos.* 2015, 44, s. 98-103

- [3] Global Wind Energy Council (GWEC). Global Offshore Wind Report 2020, <https://gwec.net/global-offshorewind-report-2020/> (dostęp 15 January 2022)
- [4] Karyotakis, A. On the Optimisation of Operation and Maintenance Strategies for Offshore Wind Farms. Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University College London, London, UK, 2011.
- [5] Problemy eksploatacyjne elektrowni wiatrowych, <https://swiatoze.pl/problemy-eksploatacyjne-elektrowni-wiatrowych/>
- [6] Raport o oddziaływaniu na środowisko dla zmiany decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach dla przedsięwzięcia Morska Farma Wiatrowa MFW Bałtyk II, Tom II, Sekcja 4, Warszawa, styczeń 2021 r., s.6
- [7] Wind Europe, Raport Offshore Wind in Europe. Key trends and statistics 2020, luty 2021, s. 6
- [8] Shafiee M., Zhou Z., Mei L., Dinmohammadi F., Karama J., Flynn D., Unmanned Aerial Drones for Inspection of Offshore Wind Turbines: A Mission-Critical Failure Analysis,
- [9] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, Dz. Urz. UE L 328/82
- [10] Europejska strategia na rzecz energii z morskich źródeł odnawialnych, [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/pl/document/EPRS\\_ATA\(2022\)698909](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/pl/document/EPRS_ATA(2022)698909)
- [11] P. Meinschmidt, J. Aderhold, Thermographic Inspections of Rotor Blades, ECNDT, 2006.
- [12] Strategia UE na rzecz morskiej energii odnawialnej, listopad 2020, <https://ec.europa.eu>