

Morskie farmy wiatrowe

Elementy konstrukcyjne turbin wiatrowych

Prof. dr hab. inż. Wiesław Tarełko
Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny

Morskie farmy wiatrowe stanowią złożone systemy techniczne, w których poszczególne obiekty techniczne (struktury nośne, urządzenia przenoszenia momentu obrotowego, mechanizmy sterowania, instalacje itp.) należą do różnych dziedzin techniki, takich jak np.: energetyka, budowa i eksploatacja maszyn, geologia, meteorologia oraz oceanotechnika. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć:

- turbinę wiatrową, zamieniającą energię kinetyczną strumienia powietrza (wiatru) na energię elektryczną,
- strukturę nośną turbiny,
- infrastrukturę gromadzenia i przesyłania strumienia energii elektrycznej na ląd.

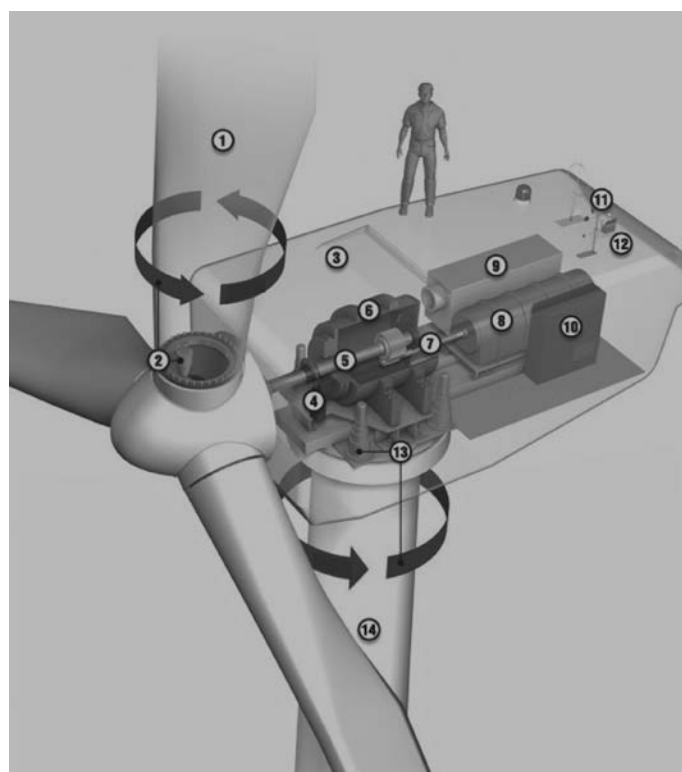
Każde z tych technologicznie zaawansowanych obiektów technicznych składa się z wielu elementów składowych spełniających różnorodne funkcje.

W artykule zaprezentowano wybrane zagadnienia związane z różnymi aspektami najistotniejszych elementów składowych morskich farm wiatrowych, a mianowicie morskimi turbinami wiatrowymi. W szczególności zaś, w artykule przedstawiono elementy konstrukcyjne morskich turbin wiatrowych, zaprezentowano postaci konstrukcyjne ich struktur nośnych oraz infrastrukturę przesyłania energii na ląd. Ponadto omówiono stan aktualny oraz perspektywy rozwoju morskich turbin wiatrowych.

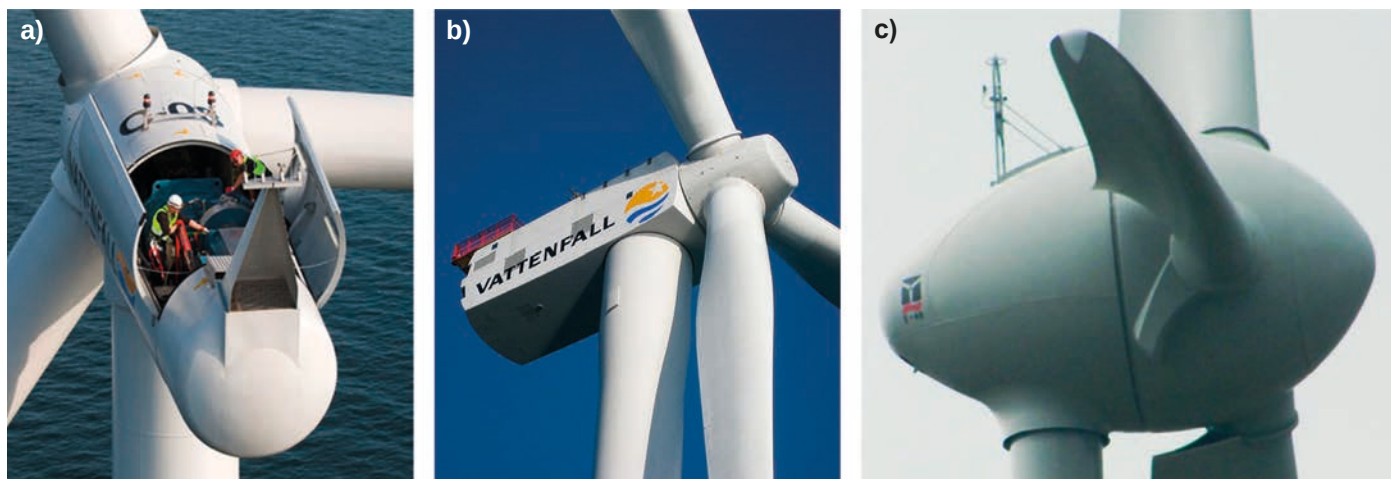
ELEMENTY KONSTRUKCYJNE MORSKICH TURBIN WIATROWYCH

Morska turbina wiatrowa może mieć różną postać konstrukcyjną wynikającą, między innymi z uwarunkowań środowiskowych, meteorologicznych i ekonomicznych. Jednakże w każdej turbinie można wyróżnić grupy elementów składowych spełniających podobne funkcje. Do najważniejszych należy zaliczyć (rys. 1):

- wirnik turbiny składający się z płatów (1), piasty oraz mechanizmu ustawiania płatów (2), gondolę (3), w której są umiejscowione podstawowe zespoły turbiny wiatrowej,
- układ przenoszenia momentu obrotowego składający się z systemu łożyskowania oraz blokowania (4), głównego wału napędowego (5), przekładni (6) oraz wału wyjściowego (7),



Rys. 1. Elementy składowe turbiny wiatrowej według [4]



Rys. 2. Obudowy gondoli morskich turbin wiatrowych w kształcie: walca (a) [6]; prostopadłościanu o zaokrąglonych krawędziach (b) [14]; owalu (c) [3]

- prądnicę (8) wraz z układem sterowania (10) i klimatyzacją (9),
- urządzenia mierzące prędkość i kierunek wiatru, tj. anemometr (11) oraz wiatrowskaz (12),
- system nadążania wirnika turbiny za kierunkiem wiatru (13).

Gondolę stanowi obudowana struktura, wewnątrz której umieszczone są, z wyłączeniem wirnika, elementy składowe turbiny wiatrowej. Wirnik osadzony na obrotowym wale jest usytuowany z przodu gondoli, tj. z kierunku napływającego wiatru. Obudowa gondoli może mieć różny kształt, np. walca, prostopadłościanu o zaokrąglonych krawędziach lub owalu (rys. 2).

Gondola jest osłonięta pokrywą z tworzywa sztucznego, wzmocnionego włóknem szklanym i wyłożona grubą, wewnętrzną izolacją dźwiękochłonną. Umieszczona jest ona na szczycie (topie) struktury nośnej w kształcie wieży oraz ma możliwość obrotowego ustawiania się odpowiednio do kierunku napływającego wiatru. W swojej górnej części gondole większych morskich turbin wiatrowych są wyposażone w platformy stanowiące lądowiska dla helikopterów transportujących obsługę serwisową. Typowe wymiary gondoli zawarte są w granicach 10 do 15 m długości oraz kilku metrów szerokości i wysokości. Ich masa waha się od 150 do 300 t. Jedną z największych projektowanych turbin wiatrowych firmy VESTAS o mocy 8 MW [13] będzie miała gondolę o długości 20 m oraz szerokości i wysokości 8 m. W celu porównania jest to wielkość dwupiętrowego domu, w którym na każdym z trzech poziomów znajduje się 8 pomieszczeń o powierzchni 20 m².

Wirnik osadzony na wale turbiny stanowią płaty, piasta oraz mechanizm ustawiania kąta natarcia płatów. Zadaniem wirnika jest „przechwycenie” energii kinetycznej wiatru, przekształcenie jej w ruch obrotowy, a następnie przekazanie go do prądnicy za pomocą układu przenoszenia momentu obrotowego. Podstawy działania turbiny wiatrowej, w tym oddziaływanie sił aerodynamicznych na wirnik, przedstawiono w [10]. Nowoczesne turbiny wiatrowe morskich farm wiatrowych wykonuje się jako trzypłatowe o poziomej osi obrotu. Obrót wirnika następuje na skutek oddziaływania sił aerodynamicznych, z których jedna jest siłą nośną, zaś druga siłą naporu. Wartość tych sił zależy, między innymi od: charakterystyki profilu płata, kąta naporu

powietrza na płat, powierzchni odcinka płata, parametrów strumienia powietrza.

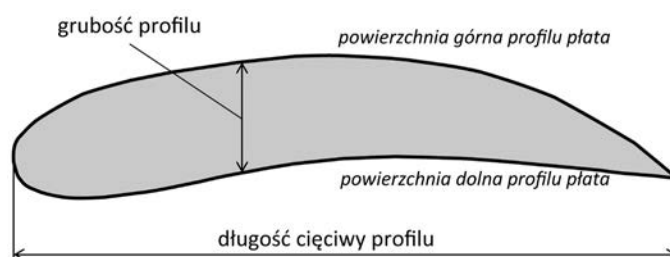
Efektywność tego procesu zależy od kształtu i struktury budowy płata wirnika, które z kolei stanowią kompromis pomiędzy optymalnym profilem aerodynamicznym (pożądana jak najmniejsza grubość profilu) a wytrzymałością na działające obciążenia (pożądana jak największa grubość profilu).

Oprócz kształtu zapewniającego odpowiednie właściwości aerodynamiczne oraz odpowiednią sztywność płat musi spełniać szereg innych właściwości, takich jak:

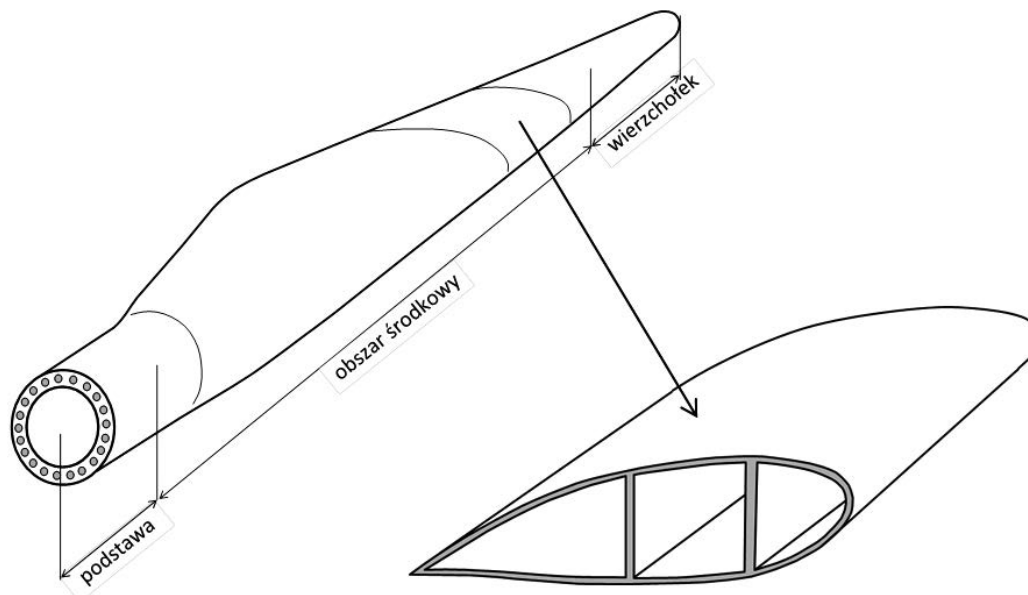
- możliwie mała masa oraz jak największa trwałość,
- niski poziom generowanego hałasu (decydujące znaczenie ma kształt profilu wierzchołka płata),
- odporność na zabrudzenia i oblodzenie (płaty są projektowane tak, aby wytrzymały ewentualny dodatkowy ciężar wynikający z zabrudzenia i oblodzenia),
- odporność na wyładowania atmosferyczne.

Kształt płata określają między innymi następujące parametry (rys. 3): długość cięciwy i grubość profilu płata w jego przekroju poprzecznym oraz skręt profilu względem osi wzdłużnej płata. Wszystkie te parametry są optymalizowane w procesie projektowania kształtu płata.

Profil płata w jego przekroju poprzecznym jest kształtowany w ten sposób, aby stworzyć dwie powierzchnie o różnych długościach (rys. 3). Siła aerodynamiczna wprowadzająca płaty w ruch obrotowy powstaje pod wpływem różnicy ciśnień, jaka wytwarza się po dwóch stronach profilu płata. Różnicę ciśnień uzyskuje się przez ustawienie profilu pod pewnym kątem w sto-



Rys. 3. Parametry określające kształt płata



Rys. 4. Obszary płatów wirnika turbiny wiatrowej rozpatrywane pod względem oddziaływań aerodynamicznych oraz działających obciążeń

sunku do kierunku przepływających strug powietrza, co szczegółowo przedstawiono w [10]. Wypadkowy kierunek strumienia powietrza oddziałującego na poszczególne części płata wirnika jest wypadkową kierunku i prędkości wiatru rzeczywistego oraz kąta ustawienia płatu wirnika względem swojej osi obrotu oraz prędkości transversalnej w danym punkcie płata wirnika.

Na płat wirnika turbiny wiatrowej oddziałują cyklicznie zmienne obciążenia pochodzące między innymi od sił aerodynamicznych, grawitacji oraz odśrodkowych. Wartość tych sił zmienia się w różnych obszarach płatów wirnika. Obciążenia aerodynamiczne pochodzą od działania siły nośnej oraz siły naporu na poszczególne części płata. Ich wartość zależy w głównej mierze od prędkości wiatru, prędkości obrotowej wirnika, gładkości powierzchni zewnętrznej płata, kąta naporu oraz kąta ustawienia osi wirnika turbiny w stosunku do kierunku wiatru.

W płatach wirników nowoczesnych turbin wiatrowych wyróżnia się trzy obszary, które są rozpatrywane pod względem oddziaływań aerodynamicznych oraz działających obciążeń (rys. 4).

Podstawa płatu jest obszarem przejściowym pomiędzy kołowym przyłączem a pierwszym profilem wywołującym oddziaływanie aerodynamiczne. Przyłącze jest mocowane do łoża obrotowego piasty za pomocą połączeń śrubowych. Zakończony jest kołnierzem, który stanowi integralną część strukturalną płata. Kołnierz ten może mieć wmontowane szpilki mocujące lub zawierać otwory do montażu śrub mocujących.

Z punktu widzenia oddziaływań aerodynamicznych podstawa płata jest najmniej efektywna, co prowadzi do zmniejszenia długości cięciwy jego profilu. Natomiast przenosi ona największe obciążenia i z tego względu ma największy przekrój poprzeczny. Najistotniejszy, z punktu widzenia oddziaływań aerodynamicznych, jest obszar środkowy płata. Jego profil powinien być tak ukształtowany, aby stosunek siły nośnej do siły naporu był jak największy. Z tego względu profil powinien mieć jak najmniejszą grubość, na jaką pozwala jego wytrzymałość strukturalna. Profil wierzchołka płata powinien być również

tak ukształtowany, aby stosunek siły nośnej do siły naporu był jak największy. Z drugiej zaś strony obszar ten generuje hałas, co z kolei wymaga specjalnego ukształtowania profilu płata uwzględniającego zmniejszenie wywoływanego hałasu.

Większość płatów nowoczesnych turbin wiatrowych jest wykonana z kompozytów polimerowych, takich jak włókna szklane umacniane żywicą epoksydową. Do wzmocnienia struktury płata są używane włókna węglowe lub poliestry. Tego rodzaju kompozyty charakteryzują się przy tym wytrzymałością porównywalną z wytrzymałością metali i ich stopów. Biorąc jednak pod uwagę ich mniejszy ciężar właściwy, charakteryzują się one większą wytrzymałością względną, będącą stosunkiem wytrzymałości mechanicznej do ciężaru właściwego. Relatywnie mały ciężar płatów jest ważny z punktu widzenia ich montażu oraz zmniejszenia obciążenia piasty wirnika. Lżejsze płaty są tańsze w produkcji i transporcie oraz mogą być stosowane przy silniejszych wiatrach na większych wysokościach. Płaty wykonane z polimerowych materiałów kompozytowych są też bardziej odporne na korozję spowodowaną np. kwaśnymi deszczami oraz drobnymi uszkodzeniami mechanicznymi.

Płat wirnika turbiny wiatrowej składa się z dwóch głównych części: dźwigara ciągnącego się przez całą jego długość oraz zewnętrznej warstwy powłokowej. Dźwigary wytwarza się z kompozytów zawierających zorientowane włókna szklane. Są one odpowiedzialne za wytrzymałość i sztywność płata.

Typowy proces wytwarzania płatów polega na wykonaniu dwóch pełnowymiarowych połówek płata z wykorzystaniem technologii próżniowej infuzji żywicy¹. Następnie obie połówki są łączone z sobą wokół dźwigara lub innych wewnętrznych elementów strukturalnych (rys. 4). Na uzyskaną strukturę nakładana jest warstwa powłokowa rodzaju „sandwich” [1].

¹ Technologia próżniowej infuzji żywicy polega na wytwarzaniu podciśnienia pomiędzy ‘workiem próżniowym’ a formą, dzięki czemu ułożone tkaniny ulegają kompresji i znacznie zmniejszają objętość. Zapewnienie swobodnego przenikania żywicy przez strukturę laminatu osiąga się poprzez zastosowanie odpowiedniego materiału przekładkowego w postaci tkaniny z włókna jednokierunkowego lub specjalnej siatki.

Dodatkowo, w płyty wirnika mogą być „wbudowane” elementy instalacji odgromowej oraz sygnalizacyjnej. W pierwszym przypadku, na najbardziej narażonym na uderzenia pioruna wierzchołku płyta, jest montowany specjalny receptor wykonany ze stali nierdzewnej. Przejmuje on uderzenie pioruna, zaś jego wyładowanie w postaci prądu jest odprowadzane przez miedziany przewód do piasty, a następnie do uziemienia. W drugim przypadku, na samym wierzchołku płyta są instalowane sygnalizacyjne światła koloru czerwonego ostrzegawcze dla samolotów. Błysk tego światła następuje tylko w pionowym górnym położeniu płyta.

Płyty wirników turbin morskich farm wiatrowych o mocy powyżej 5 MW mają powyżej 60 m długości oraz 5 m szerokości w ich najszerszym miejscu. W zależności o technologii wykonania ich masa wynosi od 15 do 25 t.

Firma Siemens wyprodukowała morską turbinę wiatrową Quantum Blade o mocy 6 MW [15]. Jej płyty o długości 75 m wykonano z jednego kawałka włókna szklanego bez jakichkolwiek połączeń. Zastosowanie tego rodzaju technologii sprawia, że są one niezwykle wytrzymałe i efektywne. Efektywność to także zasługa lekkości płytów – ich masa wynosi 25 t. Gdyby wykonano je ze standardowych materiałów, byłyby cięższe o ponad 20%.

Istotnym elementem składowym wirnika turbiny morskich farm wiatrowych jest piasta. W jej wnętrzu są usytuowane łoża obrotowe, na których osadza się płyty oraz mechanizm obrotowego ustawiania płyt w celu uzyskania odpowiedniego kąta natarcia. W przedniej swojej części, tj. od strony naporu wiatru, piasta ma sferyczną obudowę w postaci kołpaka.

W środku piasty znajdują się fundamenty do mocowania elementów mechanizmu obrotowego ustawiania płyt oraz inne systemy wspomagające działanie piasty. Do tych ostatnich należy system smarowania łoża obrotowego, system monitorowania stanu pracy elementów piasty oraz systemy sterowania nastawami mechanizmów piasty.

Mechanizm obrotowego ustawiania płyt steruje mocą turbiny poprzez ustawianie odpowiedniego kąta natarcia. Obrót ten może być realizowany za pomocą napędu hydraulicznego lub elektrycznego. W pierwszym przypadku do obrotu płyt są wykorzystywane liniowe siłowniki hydrauliczne sterowane za pomocą regulacyjnych zaworów proporcjonalnych przetwarzających elektryczny sygnał sterujący. Siłowniki są montowane do piasty na czopach obrotowych oraz zamocowane do tarczy obrotowej łoża obrotowego, na którym są zamocowane płyty. W drugim przypadku do obrotu płyt wykorzystywane szybkoobrotowe silniki elektryczne, które za pośrednictwem przekładni redukcyjnej składającej się z zębniaka współpracującego z zewnętrznym lub wewnętrznym uzębieniem łoża powodują jego obrót. Kąt obrotu łoża jest określany za pomocą enkodera absolutnego² zamontowanego na silniku elektrycznym. Podstawowe metody regulacji mocy turbiny wiatrowej poprzez ustawianie odpowiedniego kąta natarcia za pomocą mechanizmu obrotowego ustawiania płyt przedstawiono w [10].

Obudowa piasty zabezpiecza wymienione elementy piasty przed działaniem różnych czynników środowiskowych, takich

jak deszcz, śnieg czy zanieczyszczenia znajdujące się w powietrzu oraz umożliwia dostęp do wnętrza piasty dla personelu obsługującego. W przypadku największych turbin obudowa piasty może osiągać średnicę 5 m. Masa typowych wirników morskich turbin wiatrowych o mocy 5 MW waha się od 90 do 150 t, zaś ich średnica wynosi od 120 do 150 m.

Następnym istotnym elementem morskich turbin wiatrowych jest układ przenoszenia momentu obrotowego. Postać konstrukcyjna tego układu zależy od rodzaju zastosowanych prądnic. W przypadku zastosowania prądnic wysokoobrotowych w skład układu wchodzi przekładnia multiplikująca. Natomiast w przypadku zastosowania prądnic niskoobrotowych z magnesami trwałymi eliminuje się konieczność stosowania przekładni. To drugie rozwiązanie jest nazywane napędem bezpośrednim (ang. *direct drive*).

W znakomitej większości morskich farm wiatrowych jest stosowany układ z przekładnią multiplikującą, zadaniem której jest zwiększenie uzyskanej z wirnika turbiny prędkości obrotowej do prędkości najbardziej efektywnej pracy prądnicy. Oprócz przekładni w skład takiego układu wchodzi główny wał napędowy, systemy łożyskowania oraz blokowania wału, a także systemy wspomagające pracę układu.

Zadaniem głównego wału napędowego jest przekazanie momentu obrotowego z wirnika turbiny do przekładni. Na swoich końcach wał jest łożyskowany w dwóch oddzielnie zamontowanych łożyskach. Wirnik jest połączony z wałem za pomocą sztywnego sprzęgła kołnierowego. Z reguły główny wał napędowy ma współosiowo rozmieszczony wewnętrzny otwór umożliwiający przesyłanie sygnałów i nastaw sterujących oraz wykonanie przemieszczeń nastawników hydraulicznego lub elektrycznego mechanizmu obrotowego ustawiania płyt sterujących mocą turbiny.

System łożyskowania podtrzymuje wirnik turbiny oraz przekazuje jego obciążenia do podstawy gondoli. Stosuje się kilka rodzajów łożyskowania. Najbardziej rozpowszechnionym sposobem jest zastosowanie na obu końcach wału kombinacji baryłkowych łożysk tocznych (przejmujących również obciążenia wzdłużne) z walcowymi łożyskami samonastawnymi. Przekładnia multiplikująca zwiększa uzyskaną z wirnika turbiny prędkość obrotową (5 do 25 obr/min) do prędkości najbardziej efektywnej pracy prądnicy wynoszącej około 1500 obr/min. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest zastosowanie trzystopniowej przekładni, której pierwszy stopień stanowi przekładnia planetarna, zaś dwa następne stanowią czołowe przekładnie walcowe o zębach śrubowych. Podobnie jak w przypadku głównego wału napędowego, również główny wał przekładni może mieć współosiowo rozmieszczony wewnętrzny otwór umożliwiający przesyłanie sygnałów i nastaw sterujących oraz wykonanie przemieszczeń nastawników mechanizmu obrotowego ustawiania płyt.

Zatrzymanie pracy wirnika w przypadku zagrożenia (np. zbyt silnego wiatru) następuje w wyniku ustawienia odpowiedniego kąta natarcia za pomocą mechanizmu obrotowego ustawiania płyt. Dodatkowo w tylnej części przekładni są montowane hamulce tarczowe, których klocki są dociskane za pomocą siłownika hydraulicznego do zamontowanej na wale tarczy.

W skład systemów wspomagających pracę układu przenoszenia momentu obrotowego wchodzi układ smarowania prze-

² Enkoder absolutny jest cyfrowym przetwornikiem kąta obrotu, który ukazuje kąt obrotu w stosunku do jednorazowo ustalonego położenia i zachowuje wskazanie nawet, jeżeli nastąpi obrót przetwornika przy braku zasilania.

kładni i łożysk oraz ewentualnie układ klimatyzacji elementów układu (nagrzewanie przed pracą w przypadku niskiej temperatury oraz chłodzenie w przypadku wysokiej).

Prądnice przekształcają energię mechaniczną otrzymaną z układu przenoszenia momentu obrotowego w energię elektryczną. Wał prądnicy jest połączony z wałem wyjściowym przekładni za pomocą sprzęgła, którego zadaniem jest kompensacja ewentualnych przemieszczeń względnych obu wałów.

W turbinach morskich farm wiatrowych są stosowane wysokoobrotowe prądnice asynchroniczne lub synchroniczne napędzane za pośrednictwem przekładni multiplikującej, a także wolnoobrotowe prądnice synchroniczne bez przekładni. Zastosowanie w turbinach wiatrowych zmiennej prędkości obrotowej do napędu prądnicy umożliwia optymalne wykorzystanie energii wiatru i daje większy uzysk energii. Wymagane jest jednak sterownie kątem natarcia płatów wirnika.

Najczęściej są stosowane asynchroniczne generatory indukcyjne pierścieniowe podwójnie zasilane z uzwojonym wirnikiem. W zasadzie jest to silnik elektryczny, tylko pracujący w odwrotnym cyklu przetwarzania energii – z wymuszonych obrotów wału na energię elektryczną. Wirnik prądnicy jest połączony z obwodami zewnętrznymi za pomocą pierścieni ślizgowych. Przetwornica częstotliwości, zainstalowana w obwodzie wirnika, podaje do obwodu wirnika napięcie o regulowanej częstotliwości. Umożliwia to regulację prędkości obrotowej w zakresie około $\pm 30\%$ synchronicznej prędkości obrotowej.

Prądnica może pracować w trybie podsynchronicznym oraz nadsynchronicznym. W pierwszym przypadku moc przepływa z sieci przez przetwornicę częstotliwości, obwód wirnika i stojan z powrotem do sieci. Energia elektryczna jest doprowadzona do sieci przez stojan, dzięki czemu bilans energii jest dodatni. W drugim przypadku moc jest dostarczana przez stojan w około 80% do sieci, a jej reszta przepływa przez obwód wirnika i przetwornicę częstotliwości. Sprzężenie zwrotne pomiędzy przetwornicą częstotliwości a prądnicą zapewnia dostrojenie częstotliwości prądnicy do częstotliwości sieci zarówno w trybie podsynchronicznym, jak i nadsynchronicznym.

W niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych turbin wiatrowych są stosowane prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi, zarówno wysokoobrotowe napędzane za pośrednictwem przekładni multiplikującej, jak i wolnoobrotowe bez przekładni. Ze względu na zmienną częstotliwość prądu oba rozwiązania wymagają stosowania przekształtników energoelektronicznych³ w obwodzie stojana oraz układu regulacji wzbudzenia w obwodzie wirnika.

W najnowszych rozwiązaniach wysokoobrotowych prądnic synchronicznych preferuje się stosowanie wzbudzenia magnesami trwałymi. Takie rozwiązanie eliminuje układ niezbędny do regulacji prądu wzbudzenia oraz pierścienie ślizgowe wraz z układem szczotek. Prądnice synchroniczne charakteryzują się tym, że ich prędkość obrotowa musi dokładnie odpowiadać częstotliwości prądu w sieci energetycznej. Podczas zmian momentu obrotowego zmienia się jedynie kąt pomiędzy polem elektromagnetycznym wirnika i stojana, zaś prędkość obrotowa pozostaje taka sama. Spotyka się różne rozwiązania, ale najczęściej do wirnika jest doprowadzony przez pierścienie prąd,

³ Przekształtnik energoelektroniczny jest to układ przekształcania czasowego przebiegu prądu elektrycznego (częstotliwość oraz wartość napięć i natężeń prądów).

który przepływając przez uzwojenia wytwarza pole elektromagnetyczne. Źródłem ruchomego pola jest napędzany obracający się wirnik. W uzwojeniach stojana indukuje się siła elektromotoryczna i prądnica staje się źródłem energii elektrycznej.

Napęd bezpośredni znacznie upraszcza konstrukcję turbin wiatrowych poprzez wyeliminowanie przekładni mechanicznych. Ponadto, zmniejsza masę turbin, równocześnie zwiększając jej niezawodność (mniejsza liczba części) oraz zmniejszając zakresy obsługi. Wymaga jednak zastosowania synchronicznych napędów z magnesami trwałymi pracujących z niewielkimi prędkościami obrotowymi o znacznej średnicy wałów i stojanów ze względu na konieczność wbudowania dużej liczby biegunów magnetycznych.

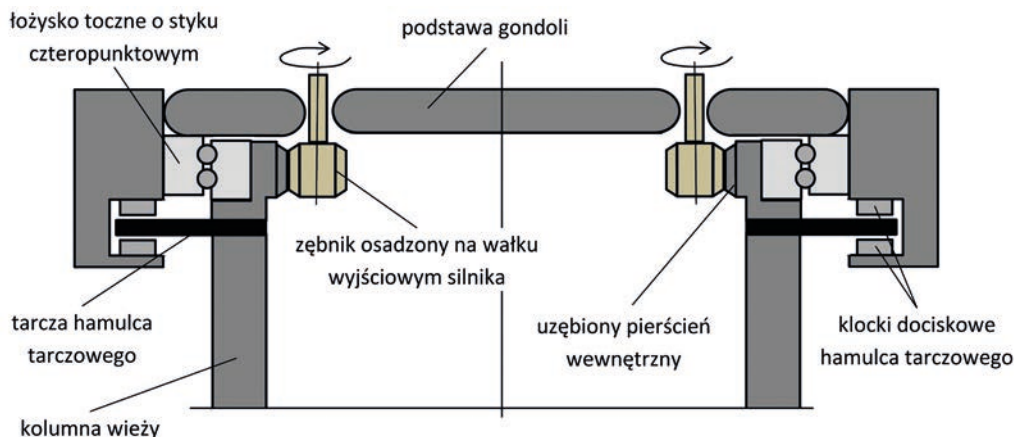
Turbiny wiatrowe z napędem bezpośrednim różnią się nieco z punktu widzenia sterowania od turbin wiatrowych z przekładniami. Oba podejścia opierają się na regulacji kąta natarcia płata i kąta odchylenia osi wirnika turbiny (gondoli) względem kierunku wiatru. Parametry wyjściowe prądnicy są regulowane tak, aby zapewnić wymagane napięcie i częstotliwość prądu w sieci elektrycznej przetwornika mocy i transformatora. Pierwsze na świecie turbiny bezprzekładniowe wyprodukowane przez firmę Siemens Energy o mocy 6 MW i średnicy wirnika 154 m [8] rozpoczęły pracę na terenie morskiej elektrowni wiatrowej w Danii.

Każdy z zaprezentowanych rodzajów prądnic ma swoje zalety, ale także i wady. Podstawową zaletą asynchronicznych generatorów podwójnego zasilania jest współpraca ze znacznie mniejszymi modułami konwerterów, co umożliwia zmniejszenie kosztów zakupu [12]. Taki konwerter musi wytworzyć strumień magnetyczny tylko do wirnika generatora, ponieważ stojan maszyny dwuuzwojeniowej jest podłączony bezpośrednio do sieci energetycznej. Skutkuje to bardzo wysokim współczynnikiem sprawności energetycznej układu przy jego pracy z dużą prędkością.

Ze względu na to, że prądnice pracują z bardzo wysokimi prędkościami obrotowymi, to wymagane jest zastosowanie mechanicznej przekładni multiplikującej. Ponadto sprawność energetyczna tego rodzaju generatorów spada radykalnie przy prędkościach obrotowych niższych od nominalnej ze względu na to, że wirnik zaczyna pobierać moc czynną. Ogranicza to zakres dopuszczalnych prędkości pracy turbiny i nabiera szczególnego znaczenia w przypadku potrzeby jej funkcjonowania przy niższych i zmiennych prędkościach wiatru.

Prądnice z magnesami trwałymi również mogą pracować przy dużych prędkościach obrotowych uzyskiwanych za pośrednictwem przekładni multiplikującej. Jednakże są one relatywnie droższe od indukcyjnych. Wadą ich jest również pewna trudność z regulacją i ustawieniem poziomu napięcia wyjściowego.

System nadążania za kierunkiem wiatru jest w istocie rzeczy mechanizmem obracania gondoli, tj. ustawiania turbiny (osi wirnika) do kierunku napływu wiatru. Gondola jest połączona z wieżą za pośrednictwem łożyska tocznego o styku czteropunktowym. Łożysko na swoim wewnętrznym pierścieniu ma zamontowany pierścień o uzębieniu wewnętrznym, którego zęby współpracują z mechanizmem ustawiania gondoli. Zmiana położenia może być realizowana za pomocą zamontowanych w podstawie nośnej gondoli silników elektrycznych lub silników hydraulicznych (rys. 5). W obu przypadkach na ich wałkach wyjściowych są zamocowane zębniaki współpracujące



Rys. 5. Schemat systemu nadążania za kierunkiem wiatru turbiny wiatrowej

z uzębieniem wewnętrznym pierścienia. Z reguły w turbinach morskich farm wiatrowych w podstawie nośnej gondoli jest zamontowanych od 6 do 8 silników. Czas włączenia, czas trwania i kierunek obrotów silnika są regulowane przez system czujników kierunku wiatru oraz odpowiednie oprogramowanie.

W celu uniknięcia obciążenia zmiennego działającego na mechanizm obracania gondoli w systemie nadążania za kierunkiem wiatru są zamontowane hydrauliczne hamulce tarczowe. Ich zadaniem jest utrzymywanie, ustalonej w wyniku zadziałania mechanizmu, pozycji gondoli w stosunku do kierunku wiatru. Nawet w przypadku obracania gondoli (nadążanie za kierunkiem wiatru może odbywać się co kilka minut z obrotem wynoszącym kilka stopni) hamulce muszą być cały czas aktywne. System nadążania jest wyposażony w urządzenie do odwijania kabla, zapewniające automatyczne odwiniecie kabla w przypadku, gdy turbina wiatrowa będzie nadmiernie obrócona.

Praca każdego zespołu konstrukcyjnego turbin morskich farm wiatrowych jest wspierana szeregiem systemów i urządzeń wspomagających, takich jak: system chłodzenia, system przeciwpożarowy, systemy hamowania i blokowania wirnika oraz mechanizmu obracania gondolą, anemometry mierzące prędkość i kierunek wiatru, wewnętrzna wciągarka serwisowa, zasilacz awaryjny UPS (ang. *uninterruptible power supply*).

POSTACI KONSTRUKCYJNE STRUKTUR NOŚNYCH TURBIN

Struktura nośna podtrzymuje gondole turbiny wraz z wszystkimi wbudowanymi lub zamocowanymi do niej elementami składowymi turbin. Zapewnia ona równocześnie dostęp do gondoli oraz jest zamontowane w niej wyposażenie elektryczne i sterujące funkcjonowaniem turbiny. Z reguły jest to wieża o przekroju koła składająca się z kilku lub kilkunastu połączonych z sobą stalowych segmentów. Wzdłuż swojej wysokości wieże zwężają się ku górze, osiągając średnicę od 4 do 5 m, podczas gdy średnica podstawy wynosi około 6 m.

Wieże morskich farm wiatrowych mogą osiągać 80 m wysokości. Ich masa waha się od 200 ÷ 400 t, z czego 90% ich masy stanowi stalowa blacha oraz kołnierze przyłączy. Podczas projektowania wież bierze się pod uwagę wytrzymałość zmęczeniową jej konstrukcji oraz największe dopuszczalne obciąże-

nia wywołane czynnikami środowiskowym (siły pochodzące od naporu wiatru oraz działania fal morskich). Ponadto, parametry konstrukcji są tak dobierane, aby zapewnić częstość drgań własnych wykluczającą możliwość powstania zjawiska rezonansu oraz wyboczenia.

W niektórych rozwiązaniach, szczególnie w przypadku stosunkowo wysokich wież, ich struktura nośna jest wykonana z betonowych lub betonowo-stalowych segmentów.

Do podstawowych elementów składowych wież morskich farm wiatrowych zalicza się:

- środki dostępu dla personelu obsługującego oraz wyposażenie ratownicze,
- tłumik drgań harmonicznnych,
- oświetlenie wewnętrzne,
- część infrastruktury przesyłania energii elektrycznej.

Środki dostępu do gondoli powinny umożliwiać bezpieczne dojście personelu obsługującego. Do tego celu w każdej wieży są zainstalowane schody wykonywane z profili aluminiowych. Jednakże w większości wież podtrzymujących turbiny o większych mocach są stosowane dodatkowo windy osobowe mające udźwig od 2,4 do 5,0 kN i poruszające się z prędkością około 20 m/min.

Wewnątrz wieży są umocowane specjalne aluminiowe lub stalowe platformy z podłogą antypoślizgową zapewniające możliwość odpoczynku dla personelu obsługującego oraz zabezpieczającego przed upadkiem narzędzi obsługowych. Ponadto, w każdej wieży znajduje się zestaw zawierający środki ratownicze, np. środki sygnalizacyjne (pochothane ręczne, rakie ty spadochronowe, pławki dymne), racje żywnościowe oraz pojemniki z wodą pitną minimum na 3 dni.

W niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych wież są stosowane tłumiki drgań instalowane na ich szczycie mające za zadanie zmniejszenie obciążenia działającego na strukturę nośną. Z reguły są to tłumiki hydrauliczne, których częstotliwość drgań własnych jest tak dobrana, aby w największym stopniu zmniejszyć wpływ obciążeń zmiennych pochodzących od sił aerodynamicznych działających na wirnik turbiny. Tłumiki mają również za zadanie zmniejszenie obciążeń chwilowych pojawiających się podczas zatrzymywania pracy turbiny.

Oświetlenie wewnętrzne wieży umożliwia bezpieczne przemieszczanie się personelu obsługującego z wieży do gondoli w obu kierunkach.

Wewnątrz wieży jest rozmieszczona część infrastruktury przesyłania energii elektrycznej omawianej w następnym punkcie artykułu.

INFRASTRUKTURA PRZESYŁANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Istotnym elementem składowym morskich farm wiatrowych jest infrastruktura przesyłania energii elektrycznej, do której zalicza się całe wyposażenie i okablowanie służące podłączeniu turbin wiatrowych do sieci. Schemat układu przesyłania oraz konwersji energii na ląd przedstawiono na rys. 6.

W celu uzyskania maksymalnej wydajności przesyłowej linii energetycznej pracującej na dużych odległościach niezbędne jest stosowanie bardzo wysokich napięć. Największym wyzwaniem jest zintegrowanie systemu przesyłowego sieci morskich z systemem przesyłania energii na lądzie. Obecnie energia generowana przez morskie farmy wiatrowe jest przesyłana na ląd za pomocą technologii HVAC (ang. *High Voltage Alternating Current*), tj. przesyłanie energii elektrycznej z wykorzystaniem prądu zmiennego przy odpowiednio wysokim napięciu. Przykładowo, duński producent VESTAS do swojej projektowanej turbiny wiatrowej o mocy 8 MW podaje następujące parametry przesyłanego prądu: częstotliwość 50 Hz, napięcie znamionowe 33 ÷ 35 lub 66 kV [13].

Jednakże wraz z oddaleniem się morskich farm wiatrowych od wybrzeża technologia ta staje się coraz mniej atrakcyjna ze względu na zwiększające się straty w przesyłaniu energii. Z tego względu bardziej obiecującą w przesyłaniu energii staje się technologia HVDC (ang. *High Voltage Direct Current*), tj. przesyłanie energii elektrycznej z wykorzystaniem prądu stałego

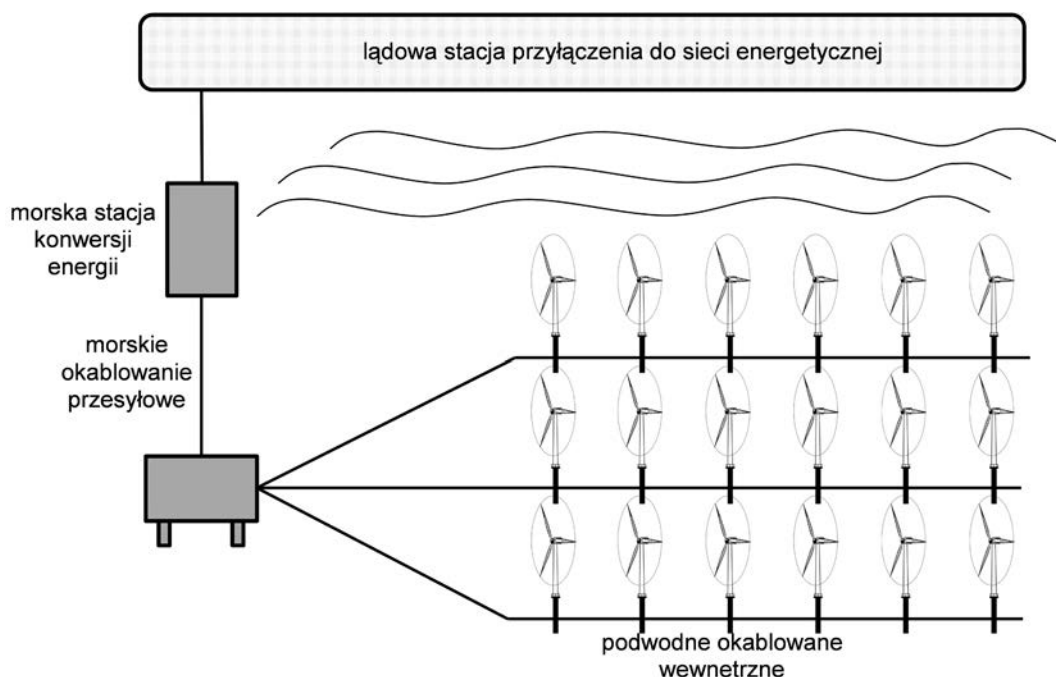
przy odpowiednio wysokim napięciu. Technologia ta zapewnia możliwość pełniejszej kontroli i zarządzania strumieniem energii elektrycznej oraz niskie straty energii na przesył. Dzisiejsze technologie pozwalają między innymi na przesyłanie energii na duże odległości nawet do 600 km z minimalnymi stratami, a mniejsze przekroje podwodnych kabli zmniejszają koszty budowy morskich farm wiatrowych.

Z reguły morska turbina wiatrowa wytwarza prąd o napięciu znamionowym 630 V. Każda turbina jest zaopatrzona w transformator oraz w rozdzielnicę, które umożliwiają podłączanie jej do podwodnego okablowania wewnętrznego farmy wiatrowej, stanowiącej sieć wewnętrzną farmy wiatrowej średniego napięcia. Jej głównym zadaniem jest przesyłanie strumienia energii elektrycznej z poszczególnych turbin. Wszystkie kable są podłączone do morskiej stacji transformatorowej, z której za pomocą podwodnego kabla wysokiego napięcia skumulowany strumień energii elektrycznej jest przesyłany na ląd.

Morska stacja transformatorowa jest wyposażona, między innymi w:

- rozdzielnicę, której złącza kumulują energię elektryczną średniego napięcia z poszczególnych turbin oraz przekazują ją jako energię elektryczną wysokiego napięcia do brzegowej stacji odbiorczej,
- transformator mocy przetwarzający energię elektryczną średniego napięcia w energię elektryczną wysokiego napięcia,
- awaryjny agregat prądotwórczy wraz z baterią akumulatorów zabezpieczający zasilanie urządzeń sterujących nastawami turbiny,
- urządzenia zabezpieczające w przypadku przeciążenia sieci energetycznych.

Najczęściej napięcie znamionowe sieci wewnętrznej turbin farmy wiatrowej wynosi 33 kV, natomiast sieci przesyłowej 132 kV. Poszczególne zespoły morskiej stacji transformatorowej



Rys. 6. Schemat układu przesyłania oraz konwersji energii

są umieszczane w specjalnej nadwodnej wielopoziomowej platformie na wysokości około kilkunastu metrów powyżej poziomu morza, ustawionej na strukturze podobnej jak posadowione turbiny. Wysokość nadwodnej platformy waha się od kilku do kilkunastu metrów, zaś jej powierzchnia może osiągać do 1000 m². Przykładowo, morska farma wiatrowa Sheringham usytuowana na Morzu Północnym (88 turbin o mocy łącznej 317 MW) składa się z dwóch morskich stacji transformatorowych o masie 900 t każda wyposażonych w cztery transformatory mocy produkcji ABB, każdy o mocy 90 MVA [5].

Całkowita długość okablowania wewnętrznego, jak i okablowania przesyłowego, może być rzędu kilkudziesięciu kilometrów. Kable podmorskie muszą spełniać szereg dość istotnych wymagań. Po pierwsze muszą być odporne na korozję oraz ścieranie powodowane przez prądy morskie i fale, a także wytrzymałe na wysokie ciśnienia panujące na dużej głębokości. Po drugie muszą odznaczać się odpowiednią wytrzymałością mechaniczną na obciążenia występujące podczas ich układania na dnie morskim.

Istotne zagrożenie dla kabli podmorskich farm wiatrowych może stanowić działalność ludzka na morzu, np. kotwiczenie statków lub wleczenie sieci rybackich po dnie. Z tego względu najlepszym rozwiązaniem jest zakopanie kabla pod powierzchnią dna morskiego. Z reguły kable sieci wewnętrznej farmy wiatrowej, jak i kabel przesyłowy, są zakopywane na głębokości od 3 do 5 m.

Morskie kable podwodne są bardziej kosztowne aniżeli ich lądowe odpowiedniki. Kable sieci wewnętrznej farmy wiatrowej, jak i kabel przesyłowy, mogą być wykonywane jako jedno, dwu i trzyrdzeniowe. Obecnie preferuje się stosowanie kabli trzyrdzeniowych, których rdzenie są aluminiowe lub miedziane. Wewnątrz kabli umieszcza się kilka przewodów światłowodowych, zadaniem których jest zabezpieczenie układów elektrycznych oraz przesyłanie informacji sterującej. Kable sieci wewnętrznej mogą mieć średnice dochodzącą do kilkunastu centymetrów.

Z reguły kable podmorskie średniego i wysokiego napięcia mają izolację wykonaną z polietylenu usieciowanego XLPE (ang. *cross-linked polyethylene*), takiego, jaki stosuje się do produkcji rur w instalacjach grzewczych.

MORSKIE TURBINY WIATROWE – STAN AKTUALNY ORAZ PERSPEKTYWY ROZWOJU

Zgodnie z danymi przedstawionymi w [11] przez Europejskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej EWEA na koniec 2013 roku średnia moc morskich turbin wiatrowych zainstalowanych w Europie wynosiła około 4 MW. Pomiędzy 1 stycznia a 31 grudnia 2013 roku podłączono do sieci energetycznej 418 nowych turbin na 13 farmach wiatrowych o całkowitej mocy 1567 MW, tj. 34% więcej niż w roku poprzedzającym.

Turbiny do europejskich farm wiatrowych są wytwarzane przez kilku producentów. W odniesieniu do uzyskiwanej mocy największy udział ma Siemens wynoszący około 60%. Następny w kolejności jest Vestas (23%), Senvion (REpower) (8%), BARD (6%), WinWind oraz General Electric z odpowiednio 0,8% i 0,5% uzyskiwanej mocy [11]. Natomiast w odniesieniu

do liczby zainstalowanych morskich turbin wiatrowych (stan na koniec 2013 roku) udziały te wynoszą odpowiednio: Siemens – 1249 turbin (60%); Vestas – 574 turbiny (27%); Senvion (REpower) – 92 turbiny (4%); BARD – 80 turbin (3%); General Electric – 23 turbiny (1%) oraz WinWind – 18 turbin (0,8%).

Niemiecka firma Siemens wyprodukowała turbinę wiatrową Quantum Blade o mocy 6 MW [8]. Średnica wirnika turbiny jest niemal dwukrotnie większa od rozpiętości skrzydeł największego Airbusa. Powierzchnia płatów sięga 18 600 m² i jest porównywalna z powierzchnią dwóch boisk piłkarskich. Masa jednego płatu turbiny Quantum Blade wynosi 25 t. Cała konstrukcja wraz z płatami wirnika i gondolą ma łączną masę około 350 t.

Największe aktualnie turbiny wiatrowe są udostępniane przez niemiecką firmę Senvion. Firma ta wyposażyla morską farmę wiatrową Thornton Bank, która znajduje się u wybrzeży Belgii, w turbiny REpower 6M o mocy 6,15 MW [7].



Rys. 7. Projekt największej na świecie morskiej turbiny wiatrowej firmy Sway [9]



Rys. 8. Projekt turbiny Windpower o pionowej osi obrotu [2]

Tabl. 1. Lista największych projektowanych i testowanych morskich turbin wiatrowych

Producent	Nazwa turbiny	Moc turbiny	Data udostępnienia na rynku	Średnica wirnika	Stan rozwoju
AMSC	SeaTitan	10,0 MW	2012	190 m	testy
Sway Turbine	ST10	10,0 MW	2012	164 m	testy
Areva	M5000	8,0 MW	2015	180 m	projekt
Vestas	V164-8.0 MW	8,0 MW	2014	164 m	testy
Samsung	S7.0-171	7,9 MW	2013	171 m	testy
Senvion	REpower 6.2M	6,2 MW	2015	226 m	projekt
Siemens	SWT-6.0-154	6,0 MW	2012	154 m	testy

Rozwiązania konstrukcyjne tej turbiny bazują na wcześniej opracowanym podejściu zakładającym przyjazność obsługi, wykorzystanie stosowanych w poprzednich wersjach elementów składowych, łatwości transportu oraz ukierunkowaniu na energetykę morską dużych farm wiatrowych.

Duński producent VESTAS przedstawił plany budowy 8 MW turbiny wiatrowej 164-8.0 MW[®] IEC S do wykorzystania w morskich farmach wiatrowych, która ma 187 m wysokości z płatami o długości 80 m [13]. Zdaniem producenta uzyskany stosunek pomiędzy 164 m średnicą wirnika a 8 MW generatorem jest odpowiedni do warunków wietrznych panujących nad Morzem Północnym.

Norweska firma Sway zaprojektowała i zbuduje największą na świecie turbinę wiatrową [9]. Będzie ona miała moc 10 MW, 162,46 m wysokości, a długość płatów wirnika wyniesie 145,5 m. Płaty wirnika są montowane w postaci „A-ramy” (rys. 7), tj. struktury z zewnętrzną oprawą kołową wspomagającą ich zamocowanie.

Obecnie największym problemem rozwoju morskich turbin wiatrowych jest niestabilność wieży, która rośnie wraz z jej wysokością. W projekcie Windpower [2] pominięto ten problem, ponieważ środek ciężkości konstrukcji znajduje się blisko podstawy turbiny. Będzie to turbina o pionowej osi obrotu, której zasada działania jest odwróceniem ruchu spadającego skrzydła klonu zawierającego jego nasiono (rys. 8). Płaty turbiny będą wykonywać ruch obrotowy, podobnie jak spadające z klonowych drzew skrzydłaki, z których dzieci często robią sobie „noski”. Pierwsza turbina nowej generacji miała stanąć na morzu w 2014 roku.

PODSUMOWANIE

Morskie farmy wiatrowe stanowią złożone systemy techniczne, w których poszczególne ich komponenty należą do różnych dziedzin techniki. Każde z tych technologicznie zaawansowanych komponentów składa się z wielu elementów składowych spełniających różnorodne funkcje. Jednakże najistotniejszymi z nich są morskie turbiny wiatrowe, bowiem od przyjętych ich rozwiązań konstrukcyjnych zależy efektywność pracy morskich farm wiatrowych. Wzrost ich efektywności nastąpił głównie dzięki zwiększeniu mocy turbin wiatrowych. Stały się one większe i wyższe oraz coraz bardziej oddalone od brzegu.

LITERATURA

1. Brzostek A., Kaczmar J. W.: Rola tworzyw sztucznych w uzyskiwaniu energii ze źródeł odnawialnych. http://www.tworzywa.pwr.wroc.pl/pdf/artykuly/article_Mechanik2005_energia_ze_zrodel_odnawialnych.pdf
2. Energia z wiatru. 7 najbardziej niesamowitych turbin wiatrowych. http://i-inzynier.pl/index.php/page/articles.html/_/inzynieria-srodowiska/energia-z-wiatru-7-najbardziej-niesamowitych-t-r39
3. Large commercial wind turbines. www.wind-energy-the-facts.org/
4. News and Information about Wind Generator Technologies and Innovations. <http://www.alternative-energy-news.info/technology/wind-power/wind-turbines/>
5. Nowoczesne rozwiązania dla elektrowni wiatrowych i przesyłu energii. http://www.05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/wind_broszura_pl.pdf
6. Offshore wind farm Lillgrund in the Oresund between Malmö and Copenhagen. http://www.siemens.com/press/en/presspicture/?press=/en/presspicture/2009/renewable_energy/ere20080806-02.htm
7. REpower 6M. <http://www.repower.de/>
8. Siemens D6 platform – 6.0-MW direct drive wind turbine. <http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/platform%20brochures/D6-Offshore-Platform-brochure-English-Feb2014-WEB.pdf>
9. Sway turbine reveals details about its 10MW offshore design. <http://www.windpowerengineering.com/design/sway-turbine-reveals-details-10mw-offshore-design/>
10. Tarelko W.: Morskie farmy wiatrowe: podstawy energetyki wiatrowej. *Inżynieria Morska i Geotechnika* nr 2/2015.
11. The European offshore wind industry – key trends and statistics 2013. A report by the European Wind Energy Association. <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/>
12. Turbiny wiatrowe – wichry przemian. <http://www.controlengineering.pl/menu-gorne/artykul/article/turbiny-wiatrowe-wichry-przemian/>
13. V164-8.0 MW[®] at a Glance. http://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines/v164-8_0-mw#
14. Vattenfall REpower 5M offshore wind turbine. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vattenfall_REpower_5M_offshore_wind_turbine.jpg
15. World's longest wind turbine blade. <http://www.siemens.com/press/en/presspicture/pictures-photonews/2012/pn201204.php>