

Morskie farmy wiatrowe: podstawy energetyki wiatrowej

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

Energia wiatrowa jest jedną z najbardziej znaczących i obiecujących form szybko rozwijających się źródeł pozyskania energii elektrycznej. Nie emituje zanieczyszczeń do otaczającego nas środowiska naturalnego i stanowi znakomitą alternatywę dla energii konwencjonalnej opartej na paliwach kopalnych, takich jak węgiel kamienny i brunatny, ropa naftowa oraz gaz.

W chwili obecnej można zauważyć dość istotne tendencje związane z użytkowaniem energii w skali globalnej, a mianowicie:

- znaczące zmniejszanie się zasobów paliw kopalnych w krajach uprzemysłowionych [14],
- wzrost populacji w świecie do około 9 miliardów do roku 2040 [18],
- wysiłki na rzecz zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego krajów uprzemysłowionych warunkującego ich dalszy rozwój [5].

Zgodnie z prognozami zapotrzebowania na energię niezbędną do wzrostu ekonomicznego zarówno w krajach postindustrialnych, uprzemysłowionych, jak i dopiero teraz przechodzących uprzemysłowienie, popyt na nią dwukrotnie podwoi się do 2030 roku [18]. To oznacza z kolei, że rządy i całe społeczeństwa będą musiały stanąć przed poważnymi wyzwaniami. Takie wyzwania dotyczą Unii Europejskiej (UE), w tym również Polski. W 2009 roku UE wydała Dyrektywę 2009/28/WE o sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych stanowiącej element tzw. pakietu klimatycznego UE [6]. Zgodnie z zawartymi tam regulacjami prawnymi każdy kraj członkowski UE otrzymał własny cel ilościowy na 2020 rok. Dla Polski wynosi on 15%, z celami pośrednimi na lata 2010, 2014, 2016, 2018, przy czym realizacja tego celu jest obowiązkowa, tzn. prawnie wiążąca pod sankcją karną. Ponadto, dyrektywa tworzy ramowy program promowania tego rodzaju energii oraz tworzy mechanizmy współpracy.

W znowelizowanej ustawie „Prawo energetyczne” odnawialne źródła energii zdefiniowano jako źródła wykorzystujące w procesie przetwarzania „energię wiatru, promieniowania słonecznego, aerotermaalną, geotermaalną, hydrotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy, biogazu pochodzącego ze składowisk odpadów, a także biogazu powstałego w procesach odprowadzania lub oczyszczania ścieków albo rozkładu składowanych szczątków roślinnych i zwierzęcych” [22].

W 2013 roku średnia roczna produkcja energii w Polsce wynosiła 160 TWh, z czego ponad 62% przypadało na energię wytwarzaną z węgla kamiennego, zaś ponad 32% na energię wytwarzaną z węgla brunatnego [13]. Udział energii ze źródeł odnawialnych (stan na 30 maja 2013 roku) wynosił 13,937 TWh. Udział poszczególnych źródeł energii odnawialnych przedstawiono w tabl. 1.

Energia elektryczna uzyskana z energii wiatru jest uznawana za ekologicznie czystą, gdyż, pomijając nakłady energetyczne związane z wybudowaniem takiej elektrowni, wytworzenie energii nie pociąga za sobą spalania żadnego paliwa. W 2015 roku całkowita moc elektrowni wiatrowych lądowych i morskich na świecie wynosiła ponad 318 GW [9].

Oczywiste jest, że wiatry wiejące nad morzem są bardziej stabilne i silniejsze, niż wiejące nad lądami. Ponadto, w przeciwieństwie do lądu, wiatry te są silniejsze w porze popołudniowej, kiedy zapotrzebowanie na energię jest zwiększone. Jednakże instalowanie farm wiatrowych na morzu jest obciążone większymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi. Niemniej morskie farmy wiatrowe odznaczają się dość istotnymi zaletami, a mianowicie:

- duża powierzchnia płatów turbiny wiatrowej umożliwia pozyskanie większej energii,
- znaczna odległość usytuowania farm od osiedli ludzkich nie zakłóca ich funkcjonowania.

W artykule zaprezentowano wybrane zagadnienia związane z różnymi aspektami morskich farm wiatrowych. W szczególności zaś przedstawiono rozwój pozyskiwania energii z wiatru w ujęciu historycznym oraz podstawy energetyki wiatrowej po-

Tabl. 1. Instalacje odnawialnych źródeł energii
według Urzędu Regulacji Energetyki (stan na 31 marca 2013 roku)

Rodzaj źródła	Sumaryczna moc zainstalowana [MW]	Liczba instalacji	Ilość energii [MWh]
Elektrownie biogazowe	136,319	207	360 688
Elektrownie biomasowe	876,108	29	629 797
Instalacje fotowoltaiczne	1,289	9	1 810 003
Elektrownie wiatrowe	2644,898	743	2 820 750
Elektrownie wodne	966,236	771	5 126 473

zwalające określić wpływ postaci konstrukcyjnych turbin wiatrowych na ich efektywność pracy. Ponadto dokonano przeglądu istniejących i projektowanych morskich farm wiatrowych.

RYS HISTORYCZNY ROZWOJU ENERGETYKI WIAKROWEJ

Wiatr był wykorzystywany przez starożytnych Egipcjan około 5 tysięcy lat temu [2] jako źródło napędu statków pływających wzdłuż Nilu. Najstarszy znany wiatrak o pionowej osi obrotu, używany w Persji do mielenia ziaren zbóż oraz jako pompa wodna, jest datowany na 3 tysiące lat temu. Łopaty turbiny tworzyły sprasowane wiązki trzciny [1]. Sama turbina o pionowej osi była obmurowana ścianami wykonanymi z cegły wiązanej gliną, które miały otwory umożliwiające dopływ i odpływ wiatru. Schemat takiego wiatraka widzianego z góry przedstawiono na rys. 1.

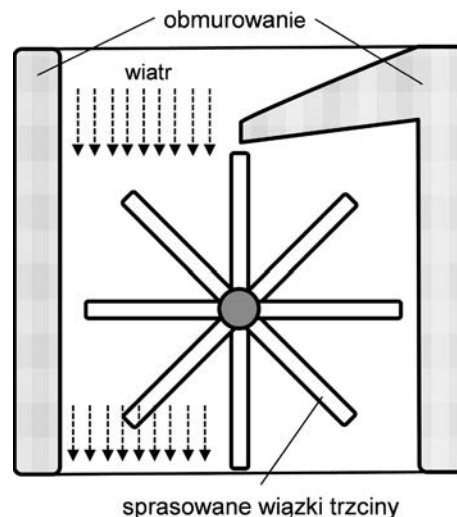
Najstarsze informacje o urządzeniach wiatrowych pochodzenia sumeryjskiego znajdują się w kodeksie Hammurabiego (1750 r. p.n.e.). W hinduskiej księdze Arthasatha of Kantilya (400 r. p.n.e.) opisuje się wiatrak służący do pompowania wody [10]. Najstarsze znane projekty wiatraków pochodzą z prac Herona z Aleksandrii z pierwszego wieku naszej ery. Sporządził on szkice pierwszych wiatraków na wiele wieków przed pojawieniem się materialnych dowodów ich istnienia. W Chinach oraz w krajach basenu Morza Śródziemnego wiatraki istniały już na początku naszej ery. Przez ponad 2500 lat wiatraki miały pionową oś obrotu, dopiero w 1105 roku powstał pierwszy opis wiatraka o poziomej osi obrotu [16].

W [3] podano, że do Europy pomysł wykorzystania wiatraków do mielenia zboża przynieśli Krzyżowcy powracający ze swoich krucjat prowadzonych od XI do XIII wieku w Palestynie. Ze względu na inną konstrukcję wczesnych wiatraków europejskich trudno jednoznacznie stwierdzić, czy były one inspirowane wiatrakami bliskowschodnimi, czy też powstawały niezależnie. Tę drugą tezę mogą potwierdzić dwa następujące fakty:

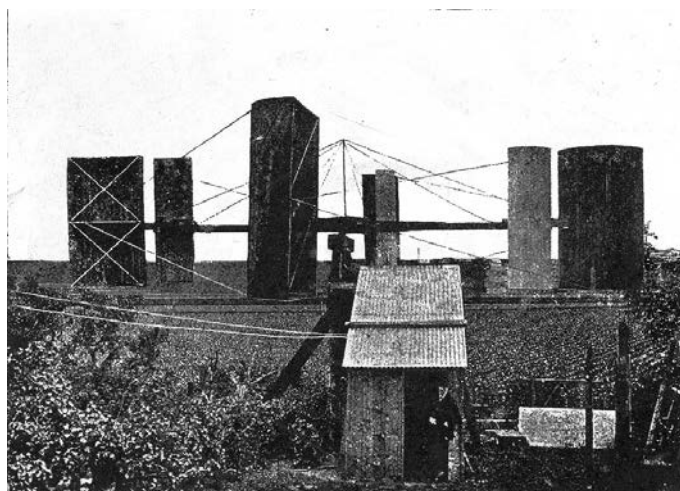
- najstarsza wzmianka o wiatrakach w Europie zawarta w liście *Umum Molenolinum Venticum*, który napisano w 833 r. n.e. w Anglii [10],
- najstarszy znany w Europie wizerunek młyna w postaci inicjału pierwszej strony angielskiego psalterza z 1270 roku z Canterbury, przechowywany obecnie w nowojorskim muzeum [11].

We Francji w 1105 roku powstał pierwszy opis wiatraka o poziomej osi obrotu, który jako bardziej wydajny upowszechnił się w XIV wieku i wyparł model perski. Pierwsza wzmianka odnosząca się do wiatraków na ziemiach polskich dotyczy zezwolenia na jego budowę wydanego zakonnikom z Białego Boku przez księcia Wsława z Rugii w 1271 roku [16].

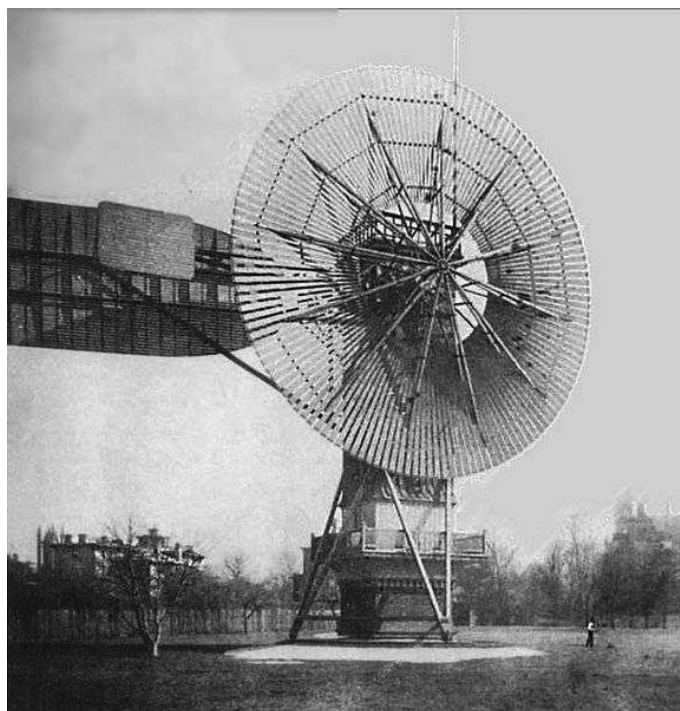
Duże czteroskrzydłowe wiatraki pojawiły się w VIII wieku w Europie. Holendrzy za ich pomocą odwadniali polde-ry. Rozkwit technologii pozyskania energii z wiatru nastąpił w XVI wieku. Ocenia się, że już w 1850 roku całkowita moc zainstalowanych w Europie młynów napędzanych wiatrem wynosiła 1 TW [11]. W związku z pojawianiem maszyn parowych na przełomie XIX i XX wieku nastąpił spadek zainteresowania świata wykorzystaniem energii wiatru. Zaprzesano ulepszać i wznosić nowe siłownie wiatrowe.



Rys. 1. Schemat wiatraka perskiego sprzed 3 tysięcy lat



Rys. 2. Turbina wiatrowa Jamesa Blytha [23]



Rys. 3. Turbina wiatrowa Charlesa F. Brusha [4]

Pierwszą turbinę wiatrową przeznaczoną do wytwarzania energii elektrycznej (rys. 2) skonstruował w 1887 roku (opatentował w 1891 roku) szkocki wynalazca James Blyth [17]. Użytkując energię wykorzystał do oświetlenia swojego domu.

Parę miesięcy później w 1888 roku Charles F. Brush zbudował w Stanach Zjednoczonych pierwszą samoczynnie działającą siłownię wiatrową o mocy 12 kW produkującą energię elektryczną. Turbina Brusha miała 144 łopat, a jej średnica wynosiła 17 metrów (rys. 3). Czasopismo *Scientific American* chwalać Brusha, ostrzegało swoich czytelników, aby nie popełniali błędu zakładając, że oświetlenie zasilane przez wiatr „jest tanie, ponieważ wiatr nic nie kosztuje. Dokładnie odwrotnie, koszt elektrowni jest tak duży, że nie jest w stanie zrekompensować taniości napędu mocy”. Tym niemniej Brush dowiódł, że wiatr może być źródłem energii elektrycznej (nie można odnaleźć źródła odwołania).

Pionierem energetyki wiatrowej był również duński naukowiec Poul la Cour (1846-1908). Wykorzystywał on energię generowaną przez turbiny do procesu elektrolizy i wytwarzania wodoru, który był wykorzystywany do oświetlenia szkoły w Askov. La Cour założył Stowarzyszenie Elektrowni Wiatrowych oraz wydawał pierwsze na świecie czasopismo dotyczące energii elektrycznej pozyskiwanej z energii wiatru – *The Journal of Wind Electricity* [7]. La Cour zajmował się także badaniem aerodynamiki turbin wiatrowych. Wykazał, że znacznie wydajniejsze dla generatorów elektrycznych są wirniki o kilku łopatach niż turbiny wielołopatkowe. Duński inżynier Johannes Juul, jeden z pierwszych studentów la Cour’a, został w 1950 roku pierwszym konstruktorem siłowni wiatrowej z generatorem prądu przemiennego. W 1957 roku zbudował na wybrzeżu Gedser w Danii elektrownię wiatrową, której założenia techniczne do dziś są uważane za nowoczesne. Siłownia o mocy 200 kW miała trójłopatowy wirnik zwrócony przodem do wiatru, generator asynchroniczny, mechanizm ustawiania kierunku, hamulce aerodynamiczne oraz regulację mocy poprzez zmianę kąta natarcia łopat [12].

W 1951 roku Brytyjska firma John Brown & Company rozpoczęła produkcję turbin wiatrowych, których techniczną kontynuacją są współcześnie budowane siłownie wiatrowe. Turbiny tej firmy, zainstalowane na szkockich wyspach Orkady [19], jako pierwsze podłączono do ogólnodostępnej sieci energetycznej.

I jeszcze dwie ciekawostki związane z historią wiatraków. W najbardziej znanej powieści Cervantesa *Don Kichot* musiał wnieść opłatę za „trzydzieści lub więcej olbrzymów” mimo zapewnień Sancho Pansy, że „najpewniej były one wiatrakami”. Potyczka spowodowała, że nobliwy rycerz Cervantesa upadł i dał początek wyrażeniu frazeologicznemu „walka z wiatrakami”. Natomiast Jan Matejko umieścił czteroskrzydłowy wiatrak w lewym górnym rogu swojego najsłynniejszego obrazu „Bitwa pod Grunwaldem”.

PODSTAWY ENERGETYKI WIATROWEJ

Ładowe i morskie turbiny wiatrowe mają różnorodne postaci konstrukcyjne i w związku z tym różną efektywność pracy. Najistotniejszy jest ich podział na:

- turbiny o poziomej osi obrotu (ang. *Horizontal Axis Wind Turbines* HAWT),
- turbiny o pionowej osi obrotu (ang. *Vertical Axis Wind Turbines* VAWT).

W istniejących i projektowanych morskich farmach wiatrowych są stosowane wyłącznie turbiny o poziomej osi obrotu. Wynika to z faktu, że efektywność ich działania jest zdecydowanie wyższa. W związku z tym dalsze rozważania będą dotyczyły tego rodzaju turbin.

W każdej turbinie wiatrowej następuje zamiana energii kinetycznej przepływającego przez nią strumienia powietrza na energię mechaniczną. Istnieje szereg wskaźników technicznych pozwalających określić efektywność wykorzystania tej energii. Do najważniejszych należy zaliczyć wskaźniki określone przez Alberta Betza¹:

- limit Betza,
- współczynnik mocy turbiny.

Czynniki wpływające na efektywność pracy turbiny wiatrowej

Zgodnie z postulatem Betza, idealnie zaprojektowana turbina wiatrowa podczas swojej pracy spowolni strumień powietrza do 1/3 jego pierwotnej wartości i pozyska z niego 16/27 (59,3%) energii kinetycznej (rys. 4). Wartości 16/27 lub 0.593 nazywane są limitem Betza [8].

W praktyce, osiągalna sprawność turbiny wiatrowej wynosi około 45%. Przyczyną są straty pojawiające się na różnych elementach składowych turbiny, np. płatach wirnika.

Drugim wskaźnikiem charakteryzującym efektywność wykorzystania energii wiatru przez turbinę wiatrową jest współczynnik mocy C_p zdefiniowany jako stosunek mocy odebranej przez turbinę P_w do całkowitej mocy zawartej w strumieniu powietrza:

$$C_p = \frac{P_w}{P} \quad (1)$$

gdzie:

C_p – współczynnik mocy, specyficzny dla danej postaci konstrukcyjnej turbiny wiatrowej,

P_w – moc mechaniczna uzyskiwana z wiatru,

P – moc całkowita zawarta w strumieniu powietrza.

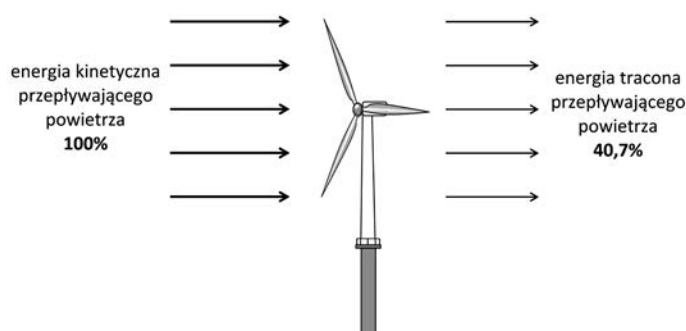
Ogólnie rzecz ujmując, moc turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu, przez płaty której przepływa strumień powietrza, zależy od (rys. 5):

- objętości roboczej części wirnika turbiny V ,
- masy przepływającego powietrza m ,
- prędkości przepływającego powietrza v .

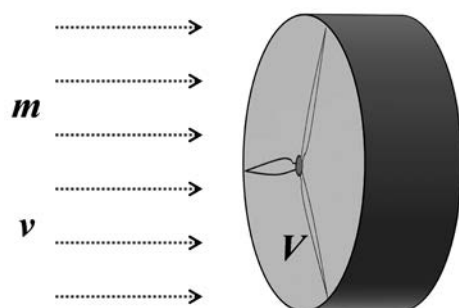
Przepływająca masa powietrza m o danej prędkości przepływu v generuje energię kinetyczną:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2)$$

¹ Albert Betz (1885-1968) – niemiecki fizyk uważany za pioniera energetyki wiatrowej. W 1910 roku opublikował pracę naukową na temat teoretycznych granic najlepszego wykorzystania energii wiatru w silnikach wiatrowych a w 1926 roku opublikował książkę o wykorzystaniu energii wiatru w wiatrakach i młynach.



Rys. 4. Schemat ilustrujący limit Betza do turbiny wiatrowej



Rys. 5. Schemat ilustrujący czynniki wyznaczania mocy turbiny wiatrowej

gdzie:

E_k – energia kinetyczna przepływającej masy powietrza,

m – masa przepływającego powietrza,

v – prędkość strumienia wiatru.

Moc P_w zawartą w strumieniu powietrza o prędkości v_w i uzyskaną w wyniku działania energii kinetycznej w danym czasie można wyrazić jako:

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m} v_w^2 \quad (3)$$

gdzie:

P_w – moc zawarta w strumieniu powietrza,

$\dot{m} = \frac{dm}{dt}$ – strumień masy powietrza.

Z kolei strumień masy powietrza $\dot{m}$ wyrażono zależnością:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho F v_w^3 \quad (4)$$

gdzie:

ρ – gęstość powietrza,

F – pole przekroju poprzecznego strumienia powietrza.

Podstawiając (4) do równania (3) uzyskuje się zależność:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho F v_w^3 \quad (5)$$

Otrzymane równanie pozwala określić wszystkie podstawowe czynniki wpływające na moc turbiny wiatrowej, a mianowicie:

- prędkość przepływającego przez turbinę powietrza,
- powierzchnię, jaką zajmuje wirnik turbiny wiatrowej podczas pracy (w praktyce będzie to powierzchnia określona przez pole zakreslane przez płat turbiny),
- gęstość powietrza.

Decydujący wpływ na ilość uzyskiwanej energii ma prędkość wiatru (v_w występuje w trzeciej potęgze). Mianem wiatru określa się ruch powietrza, który jest opisany wektorem o określonej wielkości (prędkość wiatru) i zwrocie (kierunek wiatru). Wektor ten jest odniesiony do punktu na powierzchni Ziemi. Stan, w którym powietrze znajduje się w bezruchu określa się mianem ciszy (ang. *calm*). Określenie „cisza” określa jednoznacznie, że wiatr nie występuje, co oznacza zerową prędkość ruchu powietrza, a tym samym utratę sensu logicznego pojęcia kierunku wiatru. Na niektórych akwenach wiatr może osiągać siłę huraganu (ang. *hurricane*) i wiać z tą siłą bardzo długo. Oczywiście jest, że prędkość wiatru zależy w głównej mierze od położenia geograficznego turbiny wiatrowej, jej oddalenia od lądu oraz wysokości, na której umiejscowiona jest piasta wirnika turbiny. W tym ostatnim przypadku im wyższa wieża, tym większa prędkość wiatru na wysokości piasty wirnika. Kierunek wiatru oznacza kierunek, z którego wiatr wieje.

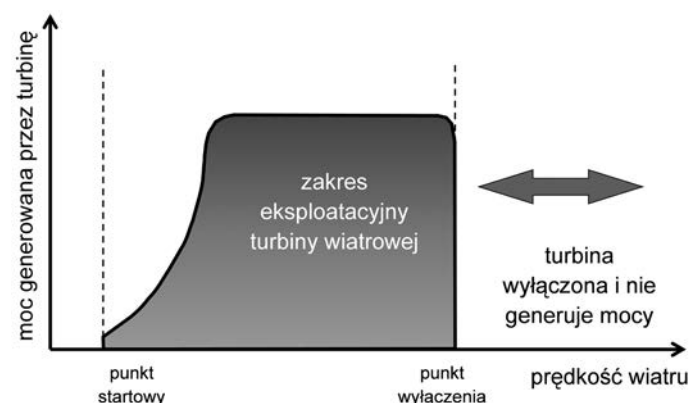
Każda turbina wiatrowa ma swoją własną krzywą mocy, czyli graficzne zobrazowanie zmiany wartości produkcji energii elektrycznej w funkcji prędkości wiatru. Krzywa mocy zależy od rodzaju turbiny, przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych poszczególnych elementów turbiny, systemu regulacji itp. Każda krzywa mocy ma kilka charakterystycznych punktów (rys. 6):

- punkt startowy (ang. *cut on speed*), w którym wiatr osiąga prędkość powodującą obracanie się płatów wirnika i zależnie od rodzaju turbiny prędkość ta wynosi od 3 do 5 m/s,
- punkt wyłączenia (ang. *cut off speed*), przy którym następuje zatrzymanie turbiny ze względu na zagrożenie uszkodzenia i zależnie od rodzaju turbiny prędkość ta wynosi od 23 do 27 m/s,
- zakres eksploatacyjny turbiny (ang. *turbine power operating range*) zawierający prędkości wiatru, przy której turbina może poprawnie pracować.

Idealna krzywa mocy powinna być w swojej wznoszącej części maksymalnie stroma i swoją moc nominalną powinna osiągać przy stosunkowo najmniejszej wartości prędkości wiatru.

Powierzchnia, jaką zajmuje wirnik podczas pracy ma również istotny wpływ na uzyskiwaną moc przez turbinę wiatrową. Dwukrotne zwiększenie promienia wirnika spowoduje czterokrotne zwiększenie ilości dostarczonej energii.

Najmniej istotny wpływ na moc turbiny wiatrowej ma gęstość powietrza. Jak powszechnie wiadomo, zimne powietrze ma gęstość większą niż ciepłe. A zatem zimą można uzyskać



Rys. 6. Krzywa mocy turbiny wiatrowej

z wiatru nieco więcej energii. Podobnie ma się sprawa z wysokością nad poziomem morza. Im wyżej tym gęstość powietrza jest większa. Jednakże zmiany gęstości nie są na tyle duże, żeby miały istotne znaczenie. Wiadomo, że nad wodą powietrze jest bardziej wilgotne i dzięki temu ma większą gęstość. Z tego względu jest zasadne stawianie farm wiatrowych na morzu.

Efektywność pracy turbiny

Jak już wspomniano, osiągalna sprawność turbiny wiatrowej wynosi około 45% i podstawowy wpływ na to ma postać konstrukcyjna turbiny. Jednym z czynników charakteryzującym jej postać konstrukcyjną jest wartość współczynnika mocy C_p turbiny wiatrowej określonego zależnością (1). Wartość tego współczynnika zależy od wielu różnych czynników, m.in. od:

- punktu pracy określonego przez tzw. współczynnik szybkoobrotowości,
- liczby płatów turbiny,
- wielkości powstającej siły aerodynamicznej.

W turbinach wiatrowych pracujących ze zmienną prędkością obrotową optymalny punkt jej pracy powinien zapewniać jak największą uzyskiwaną moc. Zależy on od współczynnika szybkoobrotowości λ (ang. *tip speed ratio*), który wyraża stosunek prędkości transwersalnej końca płata wirnika do prędkości wiatru:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \quad (6)$$

gdzie:

λ – współczynnik szybkoobrotowości,

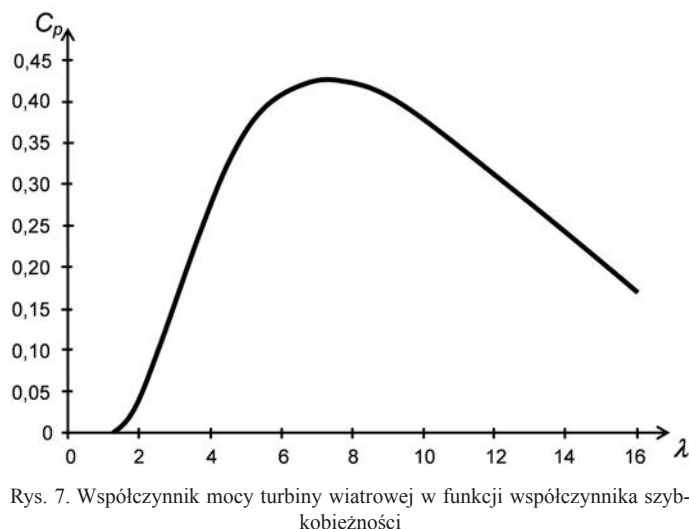
ω – prędkość kątowa wirnika turbiny,

R – odległość końca płata wirnika od osi obrotu.

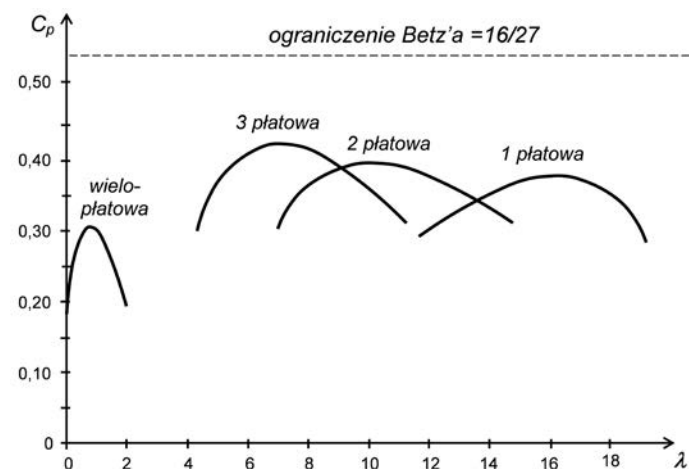
Typowy kształt współczynnika mocy C_p turbiny wiatrowej w funkcji współczynnika szybkoobrotowości λ przedstawiono na rys. 7.

W celu uzyskania największej wartości współczynnika mocy C_p turbiny wiatrowej należałoby uzyskać odpowiedni stosunek prędkości kątowej ω wirnika turbiny do prędkości wiatru v_w . A to z kolei zależy od liczby płatów turbiny n . Obowiązuje przy tym zasada: im mniejsza liczba płatów n , tym większa prędkość kątowa ω wirnika turbiny przy zadanej prędkości wiatru v_w . Turbiny wiatrowe napędzają prądnice wymagające stosunkowo dużych prędkości obrotowych (750 ÷ 3600 obr/min). Z tego względu wirniki powinny mieć jak największe prędkości obrotowe celem obniżenia masy przekładni napędzających prądnice. Na tę zasadę nakładają się pewne ograniczenia wynikające z generowanego hałasu, obciążenia wirnika i geometrii płatów. Wykresy współczynnika mocy C_p w funkcji współczynnika szybkoobrotowości λ przy danej postaci konstrukcyjnej turbiny i różnej liczby płatów wirnika n przedstawiono na rys. 8.

W turbinie jednopłatowej jej płat może być przytwierdzony do piasty turbiny pojedynczym przegubem, co umożliwia dodatkowe jego ruchy w innych płaszczyznach. Takie rozwiązanie obniża obciążenie konstrukcji płata oraz zmniejsza masę wirnika. Jednakże, taki wirnik wymaga skomplikowanej konstrukcji piasty. Jedną z przeszkód instalowania tego rodzaju turbin jest wysoki poziom hałasu wirnika powodowany stosunkowo dużą prędkością transwersalną wierzchołka płatu oraz nierównomierność obciążenia wirnika.



Rys. 7. Współczynnik mocy turbiny wiatrowej w funkcji współczynnika szybkoobrotowości

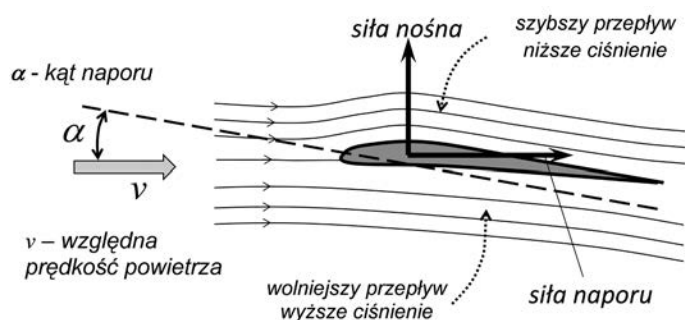


Rys. 8. Wykresy współczynnika mocy w funkcji współczynnika szybkoobrotowości przy danej postaci konstrukcyjnej turbiny i różnej liczbie płatów wirnika

Turbina dwupłatowa jest bardziej sprawna od turbiny jednopłatowej i ma zwiększoną równomierność obciążenia wirnika. Jednakże działanie dynamiczne takiego wirnika wymaga dodatkowych wysiłków technicznych, tj. zastosowania podatnej piasty, jako pewnego rodzaju amortyzatora. To z kolei zwiększa koszt całkowity turbiny. Ponadto, prędkość transwersalna wierzchołka płata w dalszym ciągu jest stosunkowo wysoka, powodując podwyższony poziom hałasu.

W turbinach mających więcej niż trzy płaty pojawiają się inne problemy. Z jednej strony większa liczba płatów wymaga zastosowania większej ilości drogich materiałów, co zwiększa koszt całej turbiny. Z drugiej zaś strony zwiększona liczba płatów wymusza zmniejszenie ich grubości, co powoduje zmniejszenie ich masy. Z kolei, mniejsza grubość płatów czyni je mniej wytrzymałymi na zginanie, a tym samym bardziej wrażliwymi na uszkodzenia.

Nowoczesne morskie turbiny wiatrowe z reguły wykonuje się jako trzypłatowe. Oczywiście nie są one doskonałe, ale pozwalają uniknąć problemów, np. związanych z wytrzymałością płatów. Ich sprawność jest bardzo duża, a przy tym nie są aż tak kosztowne. Ponadto, turbiny te są mniej uciążliwe dla środowiska ze względu na mniejszą hałaśliwość niż turbiny jedno i dwupłatowe.



Rys. 9. Schemat ilustrujący powstanie siły nośnej

Obrót wirnika turbiny wiatrowej następuje na skutek oddziaływania sił aerodynamicznych, których jedną jest siłą nośną, zaś druga siłą naporu. Wartość tych sił zależy od:

- charakterystyki profilu płata,
- kąta naporu powietrza na płat (nazywanego kątem napływu lub natarcia),
- powierzchni odcinka płata,
- parametrów strumienia powietrza.

Profil płata skonstruowano tak, aby stworzyć dwie powierzchnie o różnych długościach (rys. 9). Wykorzystuje się w ten sposób pośrednio równanie Bernoulli'ego, wynikające z zastosowania zasady zachowania energii. Jest ono wynikiem analizy energii mechanicznej w płynach, tj. energii kinetycznej, energii potencjalnej oraz pracy wykonanej z udziałem tych energii i pozwala zrozumieć zjawiska mechaniczne zachodzące w płynach. Ogólnie rzecz ujmując, w zgodzie z tym równaniem można powiedzieć, że w czasie przepływu płynu, suma ciśnienia statycznego i dynamicznego jest stała wzdłuż każdej linii przepływu.

W odniesieniu do płata turbiny wiatrowej siła aerodynamiczna wprowadzająca wirnik 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 stosunku do kierunku przepływającego strumienia powietrza (rys. 9). Wypadkowa siła aerodynamiczna ma dwie składowe. Składowa nośna jest prostopadła do wypadkowego kierunku wiatru, natomiast składowa oporowa tworzy opór równoległy do wypadkowego kierunku wiatru.

Powietrze opływające górną część płata ma większą drogę do pokonania, zatem porusza się szybciej, dzięki czemu ciśnienie jest mniejsze niż na dolnej jego części. Występująca różnica ciśnień powoduje w efekcie powstanie siły nośnej skierowanej w stronę ciśnienia niższego (efekt wyrównywania się ciśnień) i równocześnie prostopadłej do kierunku przepływu powietrza. Powstała siła oddziałuje dynamicznie z płatem wirnika, który umocowany w piaście powoduje obrót centralnie osadzonego wału.

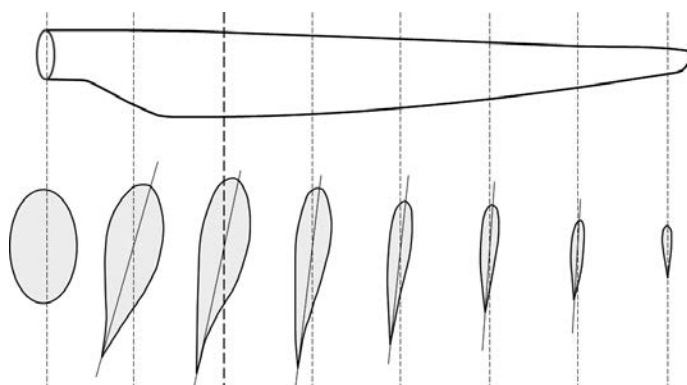
Wartości obu składowych siły aerodynamicznej, tj. siły nośnej i siły naporu zależą od kształtu profilu i są funkcją kąta natarcia wiatru na płatek wirnika.

Wypadkowy kierunek strumienia powietrza oddziałującego na płyty wirnika jest inny niż kierunek wiatru przed turbiną, z wyjątkiem sytuacji, gdy wirnik jest nieruchomy. Dzieje się tak, ponieważ wirnik wraz z płatkami wykonuje ruch obrotowy.

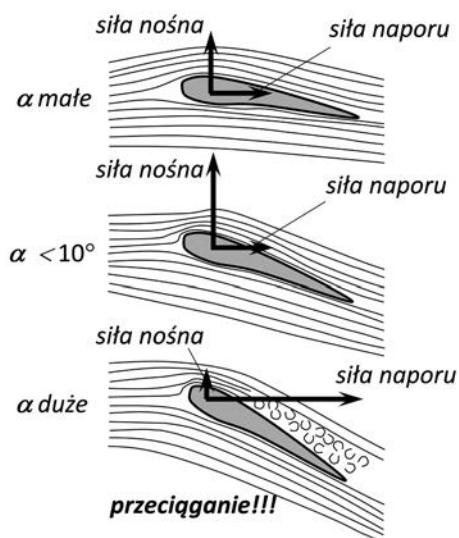
Zatem kierunek natarcia płata turbiny α względem strumienia wiatru będzie wypadkową kierunku i prędkości wirnika względem wiatru rzeczywistego oraz kąta ustawienia płatu wirnika względem swojej osi obrotu oraz prędkości transversalnej w danym punkcie płata wirnika. Jeżeli miejsce zamocowania płata w wirniku turbiny przyjmie się za punkt odniesienia, to wzdłuż długości płata od miejsca jego zamocowania w piaście aż do jego wierzchołka strumień powietrza będzie opływał płat pod coraz to większym kątem. Dlatego płat wirnika musi być odpowiednio ukształtowany (skręcony), aby utrzymać optymalne kąty naporu powietrza na całej jego długości (rys. 10).

Kiedy kąt natarcia płata turbiny α względem strumienia wiatru staje się zbyt duży, to struga powietrza odrywa się od grzbietu płata i wówczas zmniejsza się lub zanika siła nośna (rys. 11). Zjawisko to nosi nazwę przeciągnięcia (ang. *stall*). Przeciągnięcie może być wywołane, kiedy powierzchnia płata wirnika turbiny wiatrowej nie jest wystarczająco równomierna i gładka. Nawet niewielkie wgłębienie w powierzchni płata może wystarczyć, by wywołać turbulencję na jego grzbiecie, nawet w przypadku, gdy kąt natarcia jest stosunkowo mały.

Jak już wspomniano moc turbiny wiatrowej zależy od powierzchni pola zakreślanego przez płat turbiny oraz kąta natarcia strumienia powietrza na płat turbiny. Odsunięcie osi wirnika turbiny od głównego kierunku wiatru powoduje zmniejszenie



Rys. 10. Ukształtowanie płata turbiny wiatrowej w kierunku wzdłużnym



Rys. 11. Schemat ilustrujący powstawanie zjawiska przeciągnięcia

użytecznej powierzchni pola określanego przez płat turbiny i ograniczenie oddawanej mocy. Natomiast zbyt mały kąt natarcia nie zapewni odpowiedniej siły nośnej, zaś zbyt duży może spowodować istotne zmniejszenie lub jej zanik. W celu uzyskania najodpowiedniejszych parametrów strumienia powietrza zarówno oś wirnika oraz kąt ustawienia płatów turbiny wiatrowej powinny być odpowiednio ukierunkowane w stosunku do napływającego strumienia wiatru.

W pierwszym przypadku ustawienie turbiny w kierunku strumienia wiatru polega na obrocie gondoli turbiny i tym samym osi obrotu wirnika względem kierunku napływającego wiatru (ang. *yaw control*). Może być ono zrealizowane w sposób aktywny lub pasywny. W morskich turbinach wiatrowych jest stosowany tylko sposób aktywny wykorzystujący specjalny mechanizm ustawienia turbiny w odpowiednim kierunku. Do regulacji mocy turbiny nie jest on wykorzystywany, ponieważ przy ustawieniach wirnika pod zbyt ostrym kątem do strumienia powietrza występuje nierównomierne obciążenie płatów wirnika.

W drugim przypadku ustawienie kąta płata turbiny polega na jego obrocie względem osi obrotu płata za pomocą specjalnego mechanizmu, dzięki czemu zmienia się kąt natarcia. Wartość siły nośnej powodująca ruch obrotowy jest zmieniana, co powoduje zmianę uzyskiwanej mocy. Regulacja mocy odbywa się w całym zakresie eksploatacyjnym turbiny wiatrowej (rys. 6). Przy małych prędkościach wiatru wirnik pracuje z takimi nastawami kąta natarcia płatów, aby uzyskać z zastanego wiatru maksymalną moc. Przy prędkości większej od nominalnej regulacja powoduje utrzymanie mocy z elektrowni na stałym poziomie. Po przekroczeniu punktu wyłączenia mechanizm nastawy kąta ustawia płaty równolegle do kierunku wiatru. Dzięki temu dochodzi do zatrzymania turbiny i jej blokady za pomocą hamulców.

Dla odbiorców energii elektrycznej jest istotne, aby energia pochodząca z elektrowni wiatrowych miała odpowiednią jakość (m.in. stałość wartości prądu i napięcia). Podstawowym problemem jest zapewnienie stałej mocy elektrowni w czasie podmuchów wiatru. W morskich farmach wiatrowych stosuje się trzy podstawowe metody regulacji mocy turbin:

- pasywna metoda regulacji mocy poprzez oderwanie strugi powietrza (ang. *stall control*),
- aktywna metoda regulacji mocy poprzez zmianę kąta natarcia (ang. *pitch control*),
- aktywna metoda regulacji mocy poprzez przestawianie płatów w stronę oderwania strugi (ang. *stall active*).

W morskich farmach wiatrowych wykorzystujących pierwszą z metod płaty wirnika nie obracają się wokół własnej osi. Natomiast kształt płatów jest tak dobrany, aby przy prędkości powietrza większej od nominalnej nastąpiło oderwanie strugi powietrza od powierzchni płatów, czyli pojawiło się zjawisko przeciągnięcia. W ten sposób następuje zmniejszenie siły nośnej, przeciwdziałając wzrostowi mocy turbiny. Po przekroczeniu nominalnej prędkości wiatru uzyskiwana moc oscyluje względem jej wartości nominalnej.

W układzie regulacji mocy turbiny wiatrowej poprzez zmianę kąta natarcia płaty wirnika turbiny są obracane wokół osi obrotu. Składowa siły nośnej powodująca ruch obrotowy wirnika jest zmieniana, co powoduje zmianę uzyskiwanej przez turbinę

mocy. Regulacja tego rodzaju odbywa się w całym zakresie eksploatacyjnym turbiny (rys. 6). Przy małych prędkościach wiatru wirnik pracuje z takimi nastawami płatów, aby uzyskać maksymalną moc. Przy prędkości wiatru większej od nominalnej, regulacja powoduje utrzymanie mocy turbiny na stałym poziomie. Przy prędkości wiatru odpowiadającej punktowi wyłączenia (rys. 6) układ regulacji kąta natarcia ustawia płaty wirnika równolegle do kierunku wiatru. Dzięki temu następuje zatrzymanie pracy wirnika.

W aktywnej metodzie regulacji mocy poprzez przestawianie płatów w stronę oderwania strugi płaty wirnika turbiny są również obracane wokół osi obrotu. Przy małych prędkościach wiatru płaty wirnika ustawia się tak, aby uzyskać jak największą moc turbiny. Przy prędkości powyżej nominalnej następuje obrót płatów w kierunku przeciwnym niż w przypadku aktywnej metody regulacji mocy poprzez zmianę kąta natarcia. Kąt natarcia jest zwiększany tak, aby nastąpiło oderwanie strugi powietrza i wytracenie części energii strumienia wiatru.

Morskie farmy wiatrowe – stan aktualny oraz perspektywy rozwoju

Na koniec 2013 roku w jedenastu krajach europejskich funkcjonowało 69 farm wiatrowych, w których zainstalowano i podłączono do sieci energetycznych 2080 morskich turbin wiatrowych produkujących łącznie 6562 MW energii elektrycznej [20]. Ich średnia moc osiągnęła wartość 485 MW, tj. 78% więcej niż w roku poprzedzającym. Dziesięć największych europejskich farm wiatrowych znajdujących się w eksploatacji przedstawiono w tabl. 2.

Oddana do eksploatacji w 2012 roku London Array to aktualnie największa działająca morska farma wiatrowa na świecie. Jej moce wytwórcze 175 turbin o mocy 3,6 MW produkują łącznie 630 MW energii elektrycznej. Natomiast największa projektowana morska farma wiatrowa ma być zlokalizowana na Morzu Północnym w strefie spłylenia Dogger Bank, gdzie głębokość morza waha się w przedziale od 18 do 63 metrów. Do 2020 roku ta farma wiatrowa miała uzyskać moc 9 GW z możliwością zwiększenia do 13 GW, jednakże z różnych względów postanowiono zmniejszyć skalę projektu z ośmiu farm do sześciu z łączną mocą 7,2 GW.

W celu porównania:

- największa współcześnie chińska elektrownia wodna „Trzy przełomy” na rzece Jangcy ma łączną moc 22,5 GW,
- największa współcześnie japońska elektrownia jądrowa Kashiwazaki-Kariwa ma łączną moc 8 GW,
- największa w Polsce, a zarazem największa na świecie opalana węglem brunatnym, elektrownia w Bełchatowie ma łączną moc 5298 MW, co stanowi około 19% mocy zainstalowanej w polskiej energetyce.

Farmy wiatrowe zaczęły powstawać również w pobliżu naszej morskiej strefy ekonomicznej. Nie uwzględniając oddanej w 2008 roku do eksploatacji szwedzkiej farmy Lillgrund [15] usytuowanej w cieśninach duńskich, w 2011 roku na otwartych akwenach Morza Bałtyckiego oddano do eksploatacji niemiecką farmę wiatrową EnBW Baltic 1 z 21 turbinami o łącznej mocy

Tabl. 2. Największe eksploatowane farmy wiatrowe Europy

Nazwa farmy wiatrowej	Morska strefa ekonomiczna	Liczba turbin [szt.]	Moc turbin [MW]	Łączna moc farmy [MW]	Data oddania do eksploatacji [rok]
London Array	Zjednoczone Królestwo	175	3,6	630	2012
Greater Gabbard	Zjednoczone Królestwo	140	3,6	504	2012
Anholt	Dania	111	3,6	400	2013
BARD Offshore 1	Niemcy	80	5,0	400	2013
West of Duddon Sands	Zjednoczone Królestwo	108	3,6	389	2014
Walney	Zjednoczone Królestwo	102	3,6	367	2011 (faza 1) 2012 (faza 2)
Thorntonbank	Belgia	6 48	5,0 6,2	325	2009 (faza 1) 2012 (faza 2) 2013 (faza 3)
Sheringham Shoal	Zjednoczone Królestwo	88	3,6	315	2012
Thanet	Zjednoczone Królestwo	100	3,0	300	2010
Lincs	Zjednoczone Królestwo	75	3,6	270	2013

48,3 MW [15]. Farmę tę zlokalizowano w odległości 16 km od wybrzeża w okolicy półwyspu Darss. W 2013 roku na północ od wyspy Rugia uruchomiono farmę wiatrową Baltic 2 z 80 turbinami wiatrowymi o łącznej mocy 288 MW [15]. Obecnie największą działającą farmą wiatrową na otwartych wodach Bałtyku jest farma o nazwie Rødsand II o łącznej mocy 207 MW [15] oddana do eksploatacji w 2010 roku.

Polska ma jeden z najwyższych potencjałów w zakresie wykorzystania energii wiatru na Bałtyku ze względu na bardzo korzystne warunki wietrzne. W październiku 2014 roku Polskie Sieci Elektroenergetyczne zawarły ze spółką Elektrownia Wiatrowa Baltica-3 umowę o przyłączenie morskiej farmy wiatrowej Baltica do sieci przesyłowej. Warunki przyłączenia farmy o mocy zainstalowanej 1045 MW [21] wydano w 2012 roku. Samo przyłączenie morskiej farmy wiatrowej Baltica będzie realizowane w pięciu etapach i ma być zakończone do końca 2030 roku.

PODSUMOWANIE

Pozyskiwanie energii z wiatru ma swoją długą historię od czasów pierwszych cywilizacji do czasów obecnych. W ostatnim okresie rozwój energetyki wiatrowej był wspomagany rozwojem teorii umożliwiającej określenie najistotniejszych czynników wpływających na efektywność pracy turbin wiatrowych. To z kolei umożliwiło projektować, budować i eksploatować turbiny o coraz większych mocach, w tym na morzu w znacznym oddaleniu od brzegu, gdzie wiatry są silniejsze.

W Europie nastąpił znaczny rozwój morskiej energetyki wiatrowej, o czym może świadczyć liczba oraz moc eksploatowanych oraz projektowanych morskich farm wiatrowych. Wyraźnym liderem w tej dziedzinie jest Wielka Brytania, m.in. dzięki uruchomieniu wielu nowych morskich farm wiatrowych, w tym obecnie największej London Array oraz projektowanej Dogger Bank. Moce tych farm są porównywalne z największymi elektrowniami wodnymi, jądrowymi i opalanymi materiałami kopalnymi.

LITERATURA

1. 7 Ancient Wonders of Green Design & Technology: <http://webecoist.momtastic.com/2009/01/25/ancient-green-architecture-alternative-energy-design/>
2. Ancient Egyptian Boat-building: http://www.solarnavigator.net/ancient_egyptian_boat_building.htm
3. Bedkowski A. A Brief History of Wind Power. <http://www.sassweb.ca/3bb3/volume1-0/features-volume1-0/a-brief-history-of-wind-power>
4. Brush C. F. : Significance to Renewable Energy. http://users.humboldt.edu/omara/project_chahine.html
5. Chevalier J. M.: Security of energy supply for the European Union. European Review of Energy Markets. Volume 1, Issue 3, November 2006.
6. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/72/WE z dnia 13 lipca 2009 r. dotycząca wspólnych zasad rynku wewnętrznego energii elektrycznej i uchylająca dyrektywę 2003/54/WE. <http://www.ure.gov.pl/pl/prawo/prawo-wspolnotowe/dyrektywy>
7. Elektrownie wiatrowe. Poul la Coure. <http://bacon.umcs.lublin.pl/~asmigiel/histoia/poul-la-coure/>
8. Energetyka wiatrowa. Prawo Betz'a. http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/inzynieria_srodowiska/c_odnaw_zrodla_en/files/prawo_betza.htm
9. Global Wind Statistics 2013. <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/>
10. Historia energetyki wiatrowej na świecie. http://energiaiwiatr.w.interia.pl/historia_swiat.htm
11. Historia energetyki wiatrowej na świecie. Prace o ekorozwoju. <http://ekorozwoj.wordpress.com/2012/08/>
12. Historia wykorzystania energii wiatru. <http://www.wiatracyk.cba.pl/historia.html>
13. Kierunki Rozwoju Odnawialnych Źródeł Energii. <http://www.eip-cz-pl.eu/cz/files/>
14. Laherrere J. Oil and gas: what future? Groningen annual Energy Convention. 2006. <http://oilcrisis.com/laherrere/groningen.pdf>
15. Offshore wind. <http://www.4coffshore.com/windfarms>

16. Pomirski J.: Siłownie wiatrowe. Magazyn instalatora. Nr 10 (170). 2012. <http://instalator.pl/archi/2012/mi10%28170%29/70.pdf>
17. Price T. J.: James Blyth – Britain's first modern wind power engineer. *Wind Engineering* 29 (3). 2005: 191-200.
18. Przegląd NATO. Wzrost liczby ludności – podstawowe wyzwanie XXI wieku. Czy technika może złagodzić. <http://www.nato.int/docu/review/>
19. That's HAWT- MV. History. <https://sites.google.com/site/thatshawtmv/history>
20. 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/>
21. Umowa o przyłączenie morskiej farmy wiatrowej Baltica o mocy 1045,5 MW do sieci przesyłowej. Polskie Sieci Elektroenergetyczne. <http://www.pse-operator.pl/index.php?dzid=14&did=1966>.
22. Ustawa z dnia 26 lipca 2013 roku o zmianie ustawy – Prawo energetyczne oraz niektórych innych ustaw. http://orka.sejm.gov.pl/proc7.nsf/ustawy-/946_u.htm
23. Week 18 – 'windmill' designed and built by James Blyth, 1891. <http://stratharchives.tumblr.com/post/85511105886/week-18-windmill-designed-and-built-by-james>
24. Yergin D.: *The Quest*. W poszukiwaniu energii. Kurhaus Publishing, 2013.