

Pozyskiwanie i przetwarzanie energii odnawialnej. Cz. 2

Jan Górzyński

1. Wykorzystanie energii wody

1.1. Zasady wykorzystania energii wody

Energia wody występująca w przyrodzie, która może być wykorzystana do celów energetycznych, to energia mórz i oceanów oraz wód śródlądowych. Podstawowe znaczenie dla energetyki ma wykorzystanie energii wód śródlądowych, ponieważ energia mórz i oceanów jak dotychczas jest wykorzystywana w niewielkim stopniu i nie liczy się w bilansie energii zużywanej na świecie. Energia wód śródlądowych jest wynikiem obiegu wody w przyrodzie uruchamianego działaniem energii słonecznej, co ilustruje rys. 1.

Zależności umożliwiające określenie energii strumienia wody otrzymujemy na podstawie równania Bernoulliego

$$\frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} + g_z h = \text{const} \quad (1)$$

Zapisując równanie energii strumienia wody dla punktów A i B (rys. 2), otrzymujemy strumień energii wody możliwy do uzyskania z określonego strumienia objętości wody

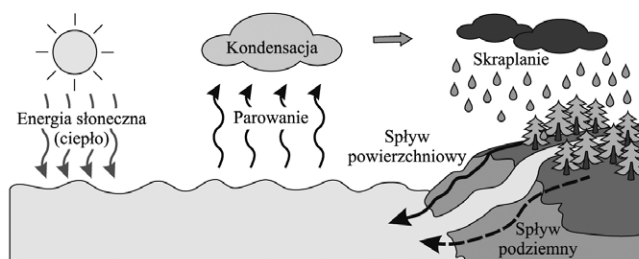
$$\dot{E} = \dot{V} \rho g_z \left[(h_A - h_B) + \frac{P_A - P_B}{\rho g_z} + \frac{w_A^2 - w_B^2}{2g_z} \right] \quad (2)$$

gdzie: w – prędkość przepływu wody; g_z – przyspieszenie ziemskie; p – ciśnienie wody, ρ – gęstość wody, \dot{V} – strumień objętościowy przepływu wody.

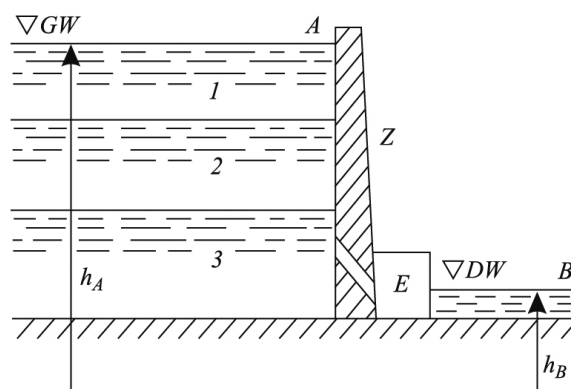
Energia wody śródlądowej jest przetwarzana na energię elektryczną w elektrowniach (siłowniach) wodnych (hydroelektrowniach). W elektrowniach wodnych wykorzystuje się głównie energię potencjalną wynikającą z różnicy wysokości położenia (spadu wody), to znaczy uwzględnia się jedynie pierwszy człon we wzorze (2), czyli różnicę ($h_A - h_B$) poziomów wody dostarczanej do siłowni i odpływającej z siłowni. Pozostałe dwa człony równania (2) są zwykle pomijalnie małe.

Podstawowe wielkości decydujące o rozmiarach siłowni wodnej to strumień objętościowy wody \dot{V} i spad wody określony różnicą wysokości położenia ($h_A - h_B$). Przy czym różnica ta pomniejszona o opory przepływu Δh_r wody dostarczanej do siłowni nosi nazwę *spadu użytecznego*, który wyraża się wzorem $H_u = h_A - h_B - \Delta h_r$.

Moc elektrowni wodnej P jest określana przede wszystkim przez strumień objętości przepływającej wody oraz spad użyteczny



Rys. 1. Ilustracja obiegu wody w przyrodzie i powstawania energii spadku wody



Rys. 2. Koncentracja spadku wody przy zastosowaniu zapory:

E – elektrownia; Z – zapora; 1 – warstwa retencyjna; 2 – warstwa energetyczna; 3 – warstwa martwa; DW – dolna woda; GW – górna woda [71]

$$P = \dot{V} \rho g_z H_u \eta_e \quad (3)$$

gdzie: η_e – sprawność energetyczna elektrowni wodnej.

Sprawność elektrowni wodnej zależy od sprawności najważniejszych urządzeń biorących udział w przetwarzaniu energii wody na energię elektryczną: turbiny, generatora i systemu transformacji wytwarzanego prądu na napięcie sieciowe. Sprawność tę zapisuje się wzorem

$$\eta_e = \eta_t \eta_g \eta_{tr} \quad (4)$$

gdzie: η_t – sprawność turbiny; η_g – sprawność generatora; η_{tr} – sprawność transformacji napięcia.

Obliczeniowy strumień objętościowy \dot{V} wody w odniesieniu do pojedynczej turbiny wodnej jest określany jako przełyk turbiny, a w przypadku elektrowni jako przełyk elektrowni. Przełyk elektrowni ma decydujący wpływ na rozmiary elektrowni wodnej i wszystkich związanych z nią urządzeń hydrotechnicznych.

Warunkiem uzyskania elektrowni o jak największej mocy na danym cieku wodnym jest uzyskanie dużego spadu H_n , dlatego często doprowadza się do spiętrzenia górnego poziomu wody przez budowę zapór. Mimo dużych kosztów inwestycji hydrotechnicznych i długiego czasu ich realizacji, w przypadkach gdy istnieją sprzyjające warunki (np. duże zasoby przepływającej wody i korzystne warunki hydrologiczne), podejmowana jest budowa elektrowni wodnych.

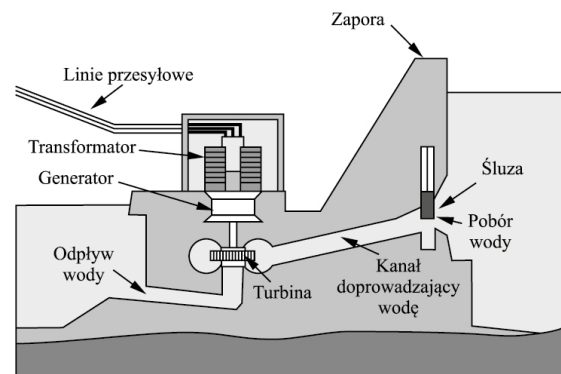
1.2. Rodzaje elektrowni wodnych

Elektrownie wodne charakteryzują się znaczną różnorodnością rozwiązań technicznych ze względu na konieczność dostosowania do istniejących warunków terenowych. W zależności od sposobu gospodarowania przepływem wody i współpracy z systemem elektroenergetycznym rozróżnia się trzy grupy elektrowni wodnych: przepływowe, zbiornikowe i szczytowo-pompowe. Tylko elektrownie przepływowe i zbiornikowe stanowią źródła energii. Elektrownie pompowe służą do pośredniego akumulowania energii elektrycznej. Z kolei zależnie od wielkości spadu elektrownie wodne mogą być niskospadowe, średnospadowe i wysokospadowe. Wielkość spadu ma decydujący wpływ na rodzaj zastosowanej turbiny i w konsekwencji na rozwiązanie techniczne obiektu.

Elektrownie przepływowe wykorzystują ciągły przepływ wody cieku wodnego bez zbiornika do magazynowania wody. W Polsce elektrownie przepływowe są zwykle niskospadowe z wykorzystaniem niewielkiego spiętrzenia wody przez zapory ziemne. Pojemność zbiornika przed zaporami spiętrzającymi jest niewielka i zapewnia wyrównywanie przepływu jedynie przed nierównomiernością spowodowaną bieżącymi opadami.

Elektrownie zbiornikowe (rys. 3) wymagają zwykle budowy zapór i zbiorników betonowych. Są budowane w miejscach, gdzie ukształtowanie terenu to umożliwia. Głównym zadaniem zbiorników jest gromadzenie wody w okresach niskiego obciążenia systemu elektroenergetycznego lub istnienia dużych przepływów wody. Mogą spełniać funkcje wyrównywania przepływów w systemie dobowym, tygodniowym, sezonowym, rocznym, również funkcję zabezpieczenia przeciwpowodziowego.

W elektrowniach szczytowo-pompowych górny zbiornik jest napełniany wodą podawaną ze zbiornika dolnego przy wykorzystaniu w tym celu energii elektrycznej pobieranej z systemu elektroenergetycznego w czasie, gdy jest ona najtańsza, czyli podczas niskiego obciążenia systemu, w tzw. dolinie nocnej. Ze względu na łatwość włączenia do pracy elektrownie szczytowo-pompowe są projektowane i wykorzystywane do pracy interwencyjnej, czyli w okresach szczególnie dużego wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną, co ma miejsce w godzinach przedpołudniowych i w szczycie wieczornym. W tych elektrowniach stosowane są agregaty prądotwórcze z możliwością pracy odwracalnej, podczas napełniania zbiornika górnego także pracują jako pompy oraz jako turbiny



Rys. 3. Schemat elektrowni wodnej zbiornikowej

napędowe generatorów energii elektrycznej w okresach, kiedy jest wymagana natychmiastowa praca interwencyjna.

Energia elektryczna wytwarzana w elektrowniach szczytowo-pompowych w Polsce nie jest postrzegana jako energia uzyskiwana ze źródła odnawialnego, ponieważ do pracy pompowej elektrownie tego typu wykorzystują energię elektryczną wytwarzaną w zdecydowanej większości w elektrowniach ciepłych opalanych węglem, czyli paliwem nieodnawialnym.

Od wielkości spadu zależy rodzaj zastosowanych w elektrowni turbin wodnych. W obiektach zainstalowanych w Polsce w siłowniach niskospadowych (do 15 m spadu) są wykorzystywane turbiny Kaplana o budowie śmigłowej, w średnospadowych (15–50 m) – turbiny Francisca zbliżone konstrukcyjnie do pomp diagonalnych, w wysokospadowych (powyżej 50 m) – również turbiny Francisca o budowie zbliżonej do pomp wirowych o dużej wydajności. W Polsce w elektrowniach szczytowo-pompowych najwyższy spad zastosowano w elektrowni Młoty, w której zainstalowano pompoturbiny o spadzie 260 m. Szczegóły konstrukcyjne różnego rodzaju turbin omówiono obszernie w pracy [71].

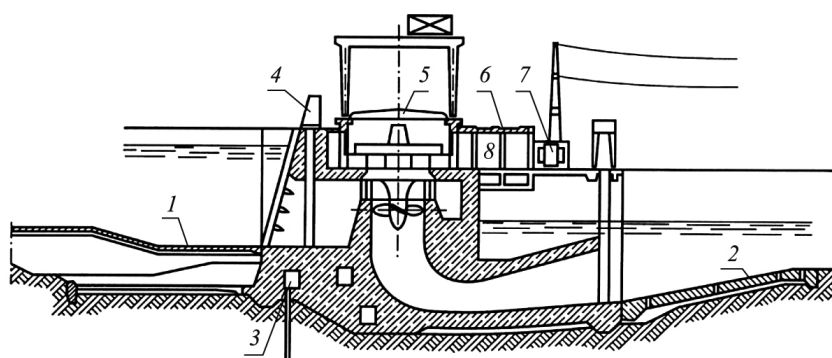
Według [71] sprawność cyklu w elektrowniach szczytowo-pompowych wynosi $\eta = 0,70-0,77$, co oznacza, że z 1 kWh energii elektrycznej pobranej przez pompy w okresie szczytowego obciążenia systemu elektroenergetycznego otrzymuje się 0,70–0,77 kWh energii elektrycznej przekazanej z powrotem do systemu.

1.3. Znaczenie elektrowni wodnych

Elektrownie wodne (poza pompowymi) są obiektami, które oprócz wytwarzania energii elektrycznej spełniają inne funkcje w gospodarce kraju:

- wpływają na stabilizację stosunków wodnych i chronią przed powodzią;
- są źródłem wody pitnej i przemysłowej;
- służą do prowadzenia gospodarki rybnej i nawadniania terenów rolniczych;
- poprawiają komunikację (przeprawy drogowe i kolejowe);
- tworzą nowe tereny rekreacyjne.

Elektrownia zbiornikowa, która pracuje jako szczytowa, nie wyrównuje wahań przepływów poniżej elektrowni, a nawet je



Rys. 4. Przekrój elektrowni wodnej we Włocławku na Wiśle [71]: 1, 2 – umocnienie płytami betonowymi; 3 – drenaż; 4 – czyszczarka; 5 – ruchome elementy nad generatorami; 6 – most drogowy; 7 – transformator; 8 – pomieszczenie dla obsługi

powiększa. Dlatego na rzekach buduje się kaskady elektrowni wodnych, to znaczy ciąg elektrowni położonych w stosunkowo małych odległościach na tej samej rzece. W takiej kaskadzie pierwsza elektrownia pracuje jako szczytowa, a ostatnia jako wyrównawcza.

W Polsce powstała koncepcja budowy kaskady na Wiśle. Z przewidywanych w tej kaskadzie elektrowni wybudowano dotychczas stopień wodny i elektrownię zbiornikową Włocławek (rys. 4). Przewiduje się budowę dalszych siedmiu elektrowni między Tczewem a Wyszogrodem. Długość dolnej kaskady Wisły wynosiłaby 319 km, a łączna moc zainstalowana 1340 MW.

Elektrownie wodne o mocach poniżej 5 MW są zaliczane do tzw. małej energetyki. Do małej energetyki zalicza się również turbiny napędowe w tartakach i młynach. Zadaniem małych elektrowni wodnych polega na zasilaniu w energię elektryczną obszarów niepodłączonych do sieci, podwyższaniu napięcia w końcowych odcinkach sieci elektroenergetycznej i zwiększaniu niezawodności zasilania obszarów wiejskich.

Energetyka wodna zapewnia dostawę energii elektrycznej w sposób przyjazny dla środowiska naturalnego, a zastępując energię wytwarzaną z paliw kopalnych, wpływa na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do środowiska.

Podwyższenie poziomu zwierciadła wód przez zapory powoduje jednak podniesienie poziomu wód gruntowych i niekiedy stwarza konieczność budowy odwodnień. Nie można również wykluczyć awarii zapór wodnych.

2. Wykorzystanie energii wiatru

2.1. Budowa i działanie siłowni wiatrowej

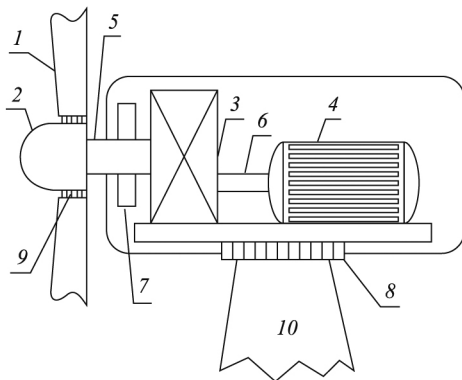
Siłownia (elektrownia) wiatrowa to zespół urządzeń wytwarzających energię elektryczną dzięki wykorzystaniu energii strumienia wiatru. Przemianę energii wiatru w energię mechaniczną zapewnia silnik wiatrowy (turbina wiatrowa). Wyróżnia się kilka typów silników wiatrowych, między innymi są to silniki: karuzelowe, bębnowe, śmigłowe i wielołopatowe. W Polsce najczęściej spotyka się silniki śmigłowe

trójłopatowe (rys. 5) i przedstawiony tu krótki opis budowy siłowni wiatrowej dotyczy takiej właśnie siłowni. Podstawowymi członami tworzącymi zespół prądotwórczy siłowni są: silnik (turbina) wiatrowy i generator energii elektrycznej, zwykle połączone za pośrednictwem przekładni mechanicznej. Przekładnia zapewnia zwiększenie prędkości obrotowej siłowni (wynoszącej zazwyczaj 15–20 obr./min) na prędkość umożliwiającą optymalną pracę generatora (często jest to 1500 obr./min). Podstawowym elementem silnika wiatrowego są łopaty zamocowane do piasty i osadzone na wale – stanowią wirnik siłowni. Silnik wiatrowy zapewnia wykorzystanie energii wiatru do wytwarzania energii mechanicznej, która w postaci momentu obrotowego na wale jest przekazywana do napędu generatora wytwarzającego energię elektryczną. Wał z systemem łożysk jest umieszczony w gondoli osadzonej obrotowo na wieży lub maszcie o odpowiedniej wysokości, z systemem do samoczynnego ustawiania wirnika w stosunku do kierunku wiatru wraz z urządzeniami regulacyjnymi i sterowniczymi oraz przekładnią przenoszącą napęd na generator.

Podstawowe elementy tworzące siłownię wiatrową ilustruje schemat przedstawiony na rys. 6. Oprócz zespołu prądotwórczego niezbędnymi elementami siłowni wiatrowej są: fundament, wieża, drabina wejściowa, wyjście do sieci elektroenergetycznej, serwomechanizm kierunkowania siłowni, gondola, wiatromierz, hamulec postojowy, siłownik mechanizmu przestawiania łopat. Najczęściej spotykane są wirniki trójłopatowe z łopatami wykonanymi z włókna szklanego wzmocnionego poliestrem. W piaście wirnika znajduje się serwomechanizm pozwalający na ustawianie kąta nachylenia łopat. Gondola siłowni jest mocowana na wieży o odpowiedniej wysokości, ma możliwość obrotu o 360 stopni i zawsze jest ustawiana w kierunku pod wiatr. Obrót gondoli zapewnia mechanizm kierunkowania siłowni z silnikiem napędowym i przekładnią zębatą. Ponadto w gondoli są instalowane: transformator napięcia, system osadzania układu wirującego wewnątrz gondoli, układy smarowania oraz hamulec zapewniający zatrzymanie wirnika.



Rys. 5. Elektrownia wiatrowa w Pucku [w6]



Rys. 6. Schemat budowy siłowni wiatrowej: 1 - łopaty; 2 - piasta; 3 - przekładnia mechaniczna; 4 - generator energii elektrycznej; 5 - wał wolnoobrotowy; 6 - wał szybkoobrotowy; 7 - hamulec; 8 - mechanizm kierowania siłowni; 9 - mechanizm ustawiania łopat; 10 - wieża

Według [86] oraz [w6] siłownie wiatrowe są budowane jako przydomowe lub przemysłowe, a zakres mocy pozwala je rozpatrywać jako siłownie mikro, małe i duże. Mogą być lokalizowane na lądzie lub morzu. Do zastosowań przydomowych, budowanych na potrzeby własne użytkowników, wykorzystywane są mikrosiłownie (o mocy do 100 W). Najczęściej są stosowane do ładowania baterii akumulatorów stanowiących zasilanie obwodów wydzielonych, wykorzystywane są także do zasilania części oświetlenia domu: pojedynczych lamp, a nawet poszczególnych pomieszczeń czy urządzeń.

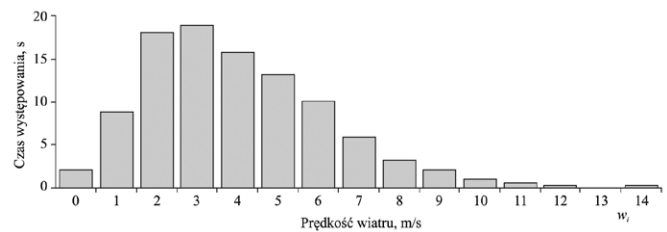
Małe siłownie wiatrowe – o mocy od 100 W do 50 kW mogą zapewnić energię elektryczną w pojedynczych gospodarstwach domowych, a nawet w małych przedsiębiorstwach. W instalacjach przydomowych najczęściej są wykorzystywane siłownie 3–5 kW do zasilania oświetlenia, do napędu układów pompowych, sprzętu i wyposażenia domowego. Jako przydomowe siłownie wiatrowe określany jest zespół urządzeń służący do wytwarzania i magazynowania energii elektrycznej przeznaczonej do wykorzystania w jednym lub kilku budynkach mieszkalnych, najczęściej są ustawiane bezpośrednio w pobliżu odbiorców energii.

Duże siłownie wiatrowe to zwykle obiekty przemysłowe o mocy powyżej 50 kW (najczęściej o mocy znacznie większej) przystosowane do produkcji i sprzedaży energii elektrycznej. W odniesieniu do takich siłowni niezbędne jest uzyskanie zgody na przyłączenie do sieci elektroenergetycznej po spełnieniu wymagań stawianych przez operatora sieci.

2.2. Cechy charakterystyczne wiatru

Energia wiatru jest to energia kinetyczna przemieszczania się mas powietrza wywołana nierównoważonym rozkładem ciśnienia atmosferycznego w różnych miejscach na Ziemi. Jest pochodzenia słonecznego, stanowi około 1% energii słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi.

Wiatr, rozumiany jako składowa pozioma ruchu powietrza względem powierzchni Ziemi, jest wynikiem nierównomiernego (zmiennego w cyklu dobowym) dopływu energii



Rys. 7. Przykładowy histogram prędkości wiatru dla danej lokalizacji $p(w_i)$

promieniowania słonecznego w zależności od szerokości geograficznej oraz ruchu obrotowego Ziemi względem własnej osi. Nierównomierne nagrzewanie powierzchni powoduje różnice temperatury, które z kolei wywołują ruchy konwekcyjne w atmosferze, prowadzące do różnic ciśnienia w różnych miejscach powierzchni Ziemi, a to z kolei powoduje ruch powietrza w dolnej warstwie atmosfery, czyli wiatr. Ponadto istotny wpływ na ruch mas powietrza i jego złożoność mają różnice zdolności nagrzewania i ochładzania się powierzchni lądów (pól i lasów), mórz i oceanów, a także różnice nachylenia powierzchni Ziemi względem kierunku padania promieniowania słonecznego. Na powstający w wyniku tych oddziaływań charakterystyczny układ krążenia powietrza w troposferze nakładają się siły Coriolisa, wywołane ruchem obrotowym Ziemi, zakrzywiające toru ruchu mas powietrza.

Z punktu widzenia energetyki wiatrowej interesuje nas energia wiatru w strefie przyziemnej, której wysokość nad poziomem terenu zależy od charakteru podłoża, ukształtowania terenu i od wielu innych czynników. Powstające w strefie przyziemia zaburzenia atmosfery wpływają w sposób istotny na prędkość wiatru i zmiany kierunku ruchu powietrza w stosunku do jego strumienia głównego, nazywane strukturą wiatru.

Prędkość wiatru jest wielkością, która zmienia się w sposób przypadkowy, dlatego można ją opisać tylko w sposób statystyczny. Najbardziej wiarygodnie można scharakteryzować przebieg zmian prędkości wiatru na podstawie pomiarów. Na rys. 7 przedstawiono przykładowy rozkład (histogram) prędkości wiatru dla określonej lokalizacji, wykonany na podstawie pomiarów.

Histogram przedstawia prawdopodobieństwo $p(w_i)$ wystąpienia wiatru o prędkości w_i w funkcji prędkości w_i , które jest określone stosunkiem czasu $\tau(w_i)$ wystąpienia wiatru o prędkości w_i do całkowitego czasu τ_R w ciągu roku, co można zapisać jako

$$p(w_i) = \frac{\tau(w_i)}{\tau_R} \quad (5)$$

gdzie: w_i – prędkość wiatru w i -tym pomiarze ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) w m/s; $\tau_i = \tau(w_i)$ – czas występowania wiatru o prędkości w_i ; τ_R – całkowity rozpatrywany okres, zwykle rok ($\tau_R = 8760$ h).

Podstawowym parametrem charakteryzującym losowo zmianę danej wielkości jest jej średnia wartość w określonym

czasie. W przypadku prędkości wiatru są to średnioroczne prędkości charakteryzujące dany obszar, będące efektem wieloletnich pomiarów. Istnieją możliwości rozszerzenia lokalnych danych klimatycznych (z uwzględnieniem rzeźby terenu) na tereny przyległe do kilku kilometrów. Średnią miesięczną i średnią roczną prędkość wiatru oblicza się na podstawie wyników pomiarów według wzoru

$$w_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \quad \text{lub} \quad w_{sr} = \int_0^{\infty} wp(w)dw \quad (6)$$

gdzie: n – liczba pomiarów w danym okresie (miesiąc, rok); w_i – prędkość wiatru w i -tym pomiarze.

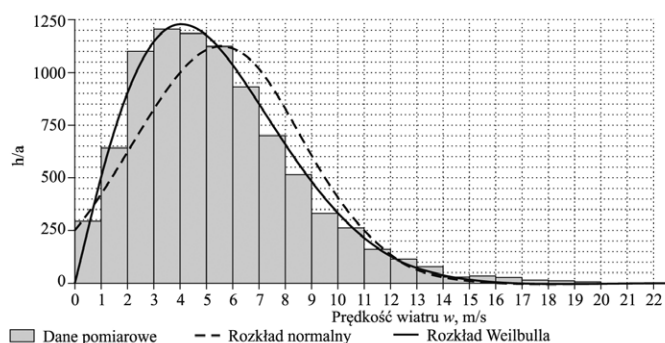
W analizach wykorzystania energii wiatru oprócz znajomości średniej prędkości wiatru dla rozpatrywanego miejsca niezbędna jest również informacja o rozkładzie prędkości w ciągu roku i średnich miesięcznych oraz częstości występowania określonej prędkości. W celu bliższego scharakteryzowania zmienności prędkości wiatru posługujemy się najczęściej rozkładem Weibulla $p(w)$, który stanowi dobre przybliżenie rozkładu prędkości rzeczywistej wiatru, potwierdzone wieloletnim stosowaniem do modelowania rozkładu prędkości. Rozkład Weibulla dla danej średniorocznej prędkości wiatru, określający gęstość prawdopodobieństwa $p(w)$ wystąpienia wiatru o danej prędkości, wyraża relacja [83]

$$p(w) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{w}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{w}{\beta}\right)^{\gamma}\right] \quad (7)$$

gdzie: γ – parametr kształtu rozkładu; β – parametr skali.

Rozkład Weibulla wyrażony równaniem (7) przedstawia zależność oczekiwanej liczby godzin występowania wiatru z określoną prędkością w . Mając prawdopodobieństwo $p(w)$ wystąpienia wiatru o prędkości w oraz wykorzystując wzór (7), można określić czas $\tau(w)$ występowania takiej prędkości wiatru.

Na rys. 8 przedstawiono, wg [86], histogram prędkości wiatru dla Łeby wraz z naniesionym rozkładem Weibulla.



Rys. 8. Histogram prędkości wiatru dla Łeby i zastosowanie rozkładu Weibulla [86]

Opracowanie rozkładu Weibulla opiera się na danych pomiarowych otrzymanych dla wystarczająco długiego okresu. Rozkład ten zależy od parametru kształtu γ i od parametru skali β , zależnego z kolei od średniej prędkości wiatru. Dla danej lokalizacji parametry rozkładu γ i β są wyznaczane przez dostosowanie wyników obserwacji do rozkładu danego wzorem (7). Niezbędna jest również ocena klasy szorstkości α terenu wykonywana dla danego miejsca na podstawie map topograficznych i lotniczych.

Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na energię mas powietrza na danym obszarze jest pionowy profil prędkości wiatru w warstwie przyziemnej, na który wpływa tarcie zewnętrzne związane z rodzajem terenu oraz pionowa wymiana pędu, którą określa stan równowagi pionowej powietrza, nazywany gradientem termicznym.

Prędkość wiatru wzrasta wraz z wysokością. Jeśli pomiary prędkości wiatru zostały wykonane na wysokości innej niż wysokość zainstalowania rozpatrywanej siłowni wiatrowej, to wówczas stosuje się wzór korekcyjny. Najczęściej jest wykorzystywana zależność podana w [86]

$$w(h_2) = w(h_1) \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\alpha} \quad (8)$$

gdzie: h_1, h_2 – wysokość; $w(h_1), w(h_2)$ – prędkość wiatru odpowiednio na wysokościach h_1, h_2 ; α – parametr zależny od szorstkości gruntu, najczęściej przyjmuje się wartość 1/7 [Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki (laboratorium)]. Ocena szorstkości terenu dla danej lokalizacji jest wykonywana na podstawie map topograficznych i lotniczych.

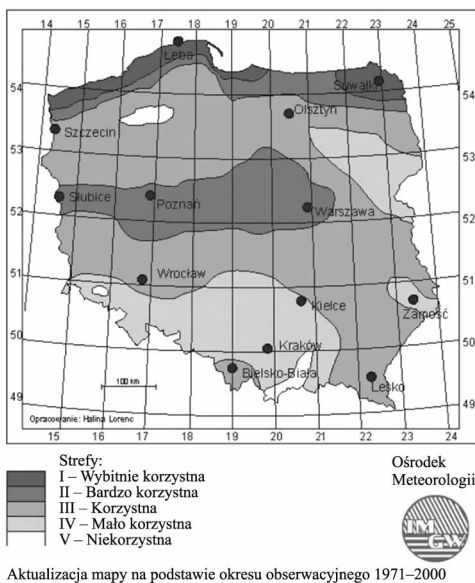
2.3. Ocena energetyczna wiatru

2.3.1. Strefy energetyczne wiatru

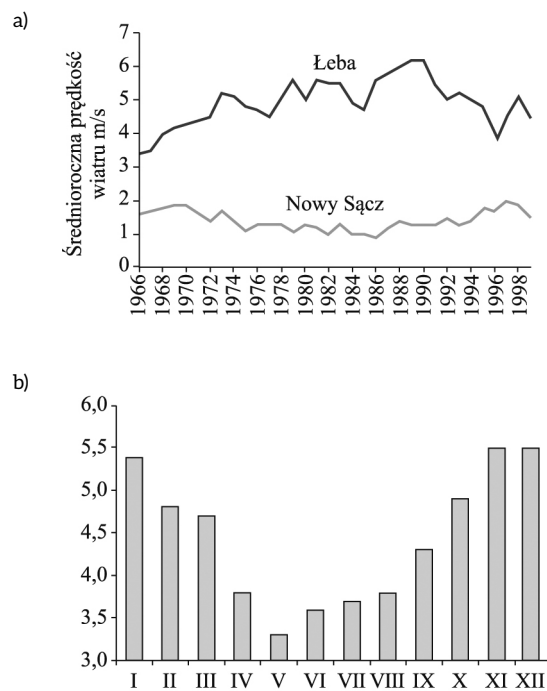
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMiGW) dokonał ogólnej oceny przydatności prędkości wiatru do wykorzystania energetycznego dla całego obszaru kraju [77]. Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w latach 1966–1989 na wysokości 30 m nad poziomem gruntu i większej wyróżniono zostały strefy energetyczne wiatru, które zaznaczono na mapie przedstawiającej mezoskalową rejonizację Polski z punktu widzenia zasobów wiatru w ciągu roku (rys. 9). Wydzielono pięć rejonów o różnych zasobach energii, zapewniając wstępną ocenę przydatności danego obszaru kraju do ewentualnej budowy siłowni wiatrowych. Z mapy tej wynika, że ok. 30% powierzchni kraju ma umiarkowanie korzystne warunki do wykorzystania wiatru jako odnawialnego źródła energii.

W Polsce rejonami uprzywilejowanymi pod względem zasobów wiatru są: środkowe, najbardziej wysunięte na północ, części wybrzeża od Koszalina po Hel, rejon wyspy Wolin, Suwalszczyzna, środkowa Wielkopolska i Mazowsze, Beskid Śląski i Żywiecki, Bieszczady i Pogórze Dynowskie.

Na rys. 10 przedstawiono wg [w6] przebieg średnich rocznych wartości prędkości wiatru w dwóch miejscowościach, leżących w zupełnie skrajnych strefach wiatrowych kraju: Łeba i Nowy Sącz.



Rys. 9. Strefy energetyczne wiatru w Polsce wg IMiGW [77]



Rys. 10. Średnie prędkości wiatru: a) roczne dla dobrych warunków wiatrowych (Łeba) i słabych (Nowy Sącz) w latach 1966–1989 (według [w6]); b) miesięczne dla Helu w latach 1951–1975 [w6]

2.3.2. Sprawność przemiany energii wiatru w energię elektryczną

Prędkość wiatru jest podstawową wielkością, która wpływa decydująco na moc i efektywność energetyczną i ekonomiczną siłowni wiatrowej. Strumień energii kinetycznej \dot{E} , czyli moc strumienia wiatru napływającego na pole powierzchni S zataczane przez wirnik siłowni, wyraża się wzorem

$$\dot{E} = \frac{\dot{G}w^2}{2} = \frac{S\rho w^3}{2} \quad (9)$$

gdzie: \dot{G} – masowy strumień powietrza napływającego na pole powierzchni zataczanej przez wirnik; w – prędkość przepływu powietrza; ρ – gęstość powietrza; S – pole powierzchni zataczanej przez łopaty wirnika siłowni wiatrowej.

Wymaga podkreślenia, że zgodnie ze wzorem (9) moc strumienia wiatru jest proporcjonalna do trzeciej potęgi prędkości wiatru. Świadczy to o podstawowym znaczeniu prędkości wiatru z punktu widzenia jego energetycznego wykorzystania.

Stosuje się również pojęcie gęstości mocy e_w strumienia wiatru

$$e_w = \frac{\dot{E}}{S} = \rho \frac{w^3}{2} \quad (10)$$

Należy także mieć na uwadze, że zmiany gęstości powietrza, związane ze zmianą warunków atmosferycznych, mogą znacząco wpływać na energię wiatru.

Energia masowego strumienia \dot{G} wiatru według wzorów (9) i (10) wyraża jedynie potencjalne możliwości energii wiatru pozostające do wykorzystania, gdyby prędkość wiatru za wirnikiem spadła do zera, co oczywiście fizycznie nie jest możliwe. Prędkość wiatru za wirnikiem zmniejsza się jedynie do pewnej wartości w_0 , dlatego strumień energii pobierany przez łopaty turbiny wiatrowej jest proporcjonalny do różnicy kwadratów prędkości powietrza przed i za wirnikiem turbiny, co wyraża następująca zależność [56]:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \dot{G}(w^2 - w_0^2) \quad (11)$$

gdzie: w – prędkość powietrza napływającego na wirnik; w_0 – prędkość powietrza odpływającego.

Po przekształceniu zależności (11) moc mechaniczna pobierana przez wirnik silnika wiatrowego wyraża się wzorem

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \left(\rho S \frac{w + w_0}{2} \right) (w^2 - w_0^2) = \frac{1}{2} \rho S w^3 \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{w_0}{w} \right) \left[1 - \left(\frac{w_0}{w} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Uwzględniono, że strumień masowy \dot{G} powietrza jest określony przy średniej prędkości wiatru $0,5(w + w_0)$.

Najczęściej moc mechaniczna pobierana przez łopaty wirnika silnika wiatrowego jest przedstawiana za pomocą wyrażenia

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho S w^3 \eta_p \quad (13)$$

gdzie współczynnik η_p wykorzystania energii wiatru (nazywany też sprawnością strumieniową albo współczynnikiem Betza)

zależy tylko od stosunku prędkości przed i za wirnikiem turbiny, zgodnie ze wzorem

$$\eta_p = \frac{\dot{E}}{P_{\max}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{w_0}{w} \right) \left[1 - \left(\frac{w_0}{w} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Współczynnik ten osiąga wartość maksymalną $\eta_{p,\max}$ przy prędkości wiatru $w = 3w_0$, co można łatwo wykazać, przyrównując pochodną η_p względem stosunku w_0/w do zera. Obliczona zgodnie z równaniem (14) maksymalna wartość współczynnika wykorzystania energii wiatru (czyli przy $w = 3w_0$) wynosi $\eta_{p,\max} = 0,593$ i jest nazywana limitem Betza.

W warunkach rzeczywistych, ze względu na straty mechaniczne i aerodynamiczne, dla współczesnych, najczęściej stosowanych trójłopatowych turbin wiatrowych o poziomej osi obrotu, udaje się osiągnąć wartości η_p niewiele przekraczające 0,4.

Według [93] sprawność ($\eta_m \eta_a$) silnika wiatrowego jest wynikiem strat mechanicznych i aerodynamicznych, powodowanych przez:

- tarcie powietrza opływającego powierzchnie łopatek;
- wyrównywanie ciśnienia powietrza po obu stronach łopatek;
- zawirowania strumienia powietrza za wirnikiem;
- niemożliwość energetycznego wykorzystania środkowej części wirnika;
- ubytek strumienia powietrza na zewnątrz wirnika;
- straty energii w wyniku wzajemnego oddziaływania łopatek (w silnikach wielołopatowych);
- straty energii mechanicznej w wyniku tarcia w elementach układu wirującego.

Wymienione wyżej straty są wyrażane przez sprawność aerodynamiczną η_a i mechaniczną η_m .

Sprawność przemiany energii wiatru w energię elektryczną otrzymywaną na wyjściu generatora można zdefiniować wzorem

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{E}} \quad (15)$$

gdzie: P_e – moc elektryczna otrzymywana na wyjściu z generatora energii elektrycznej; \dot{E} – moc strumienia wiatru napływającego na wirnik określona wzorem (9).

Wzór (15) można przekształcić, uwzględniając sprawność silnika wiatrowego, sprawność mechaniczną i aerodynamiczną silnika oraz sprawność (mechaniczną i elektryczną) generatora

$$\eta_e = \frac{P_{\max}}{\dot{E}} \cdot \frac{P_w}{P_{\max}} \cdot \frac{P_{wg}}{P_w} \cdot \frac{P_e}{P_{wg}} = \eta_p (\eta_a \eta_m) \eta_t \eta_g \quad (16)$$

gdzie: η_p – współczynnik wykorzystania energii wiatru przez silnik wiatrowy; η_a – sprawność aerodynamiczna silnika wiatrowego; η_m – sprawność mechaniczna silnika wiatrowego; η_t – sprawność mechaniczna przekładni prędkości obrotowej wału; η_g – sprawność generatora (z uwzględnieniem strat

mechanicznych i elektrycznych); P_{\max} – teoretycznie maksymalna moc wiatru przekazywana do silnika wiatrowego; P_w – moc na wale wirnika za silnikiem wiatrowym; P_{wg} – moc na wale wirnika przed generatorem; P_e – moc elektryczna otrzymywana na wyjściu z generatora energii elektrycznej.

Moce największych silników wiatrowych są rzędu kilku megawatów, jednak optymalne pod względem ekonomicznym są agregaty wiatrowe o mocy 200–400 kW i średnicy wirnika 30–40 m.

2.4. Charakterystyka mocy siłowni wiatrowej

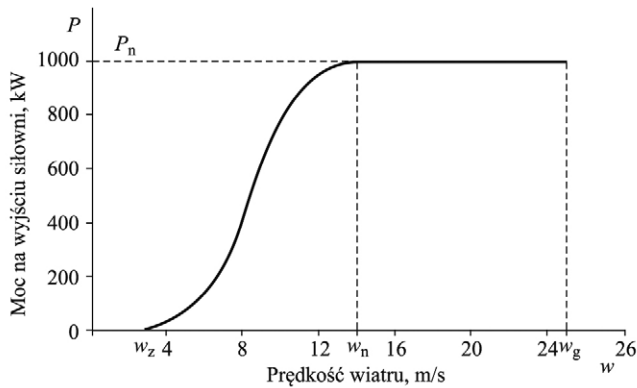
Współczesne siłownie wiatrowe są projektowane i budowane, biorąc pod uwagę określoną prędkość wiatru, charakterystyczną (szacowaną) dla danej lokalizacji, ustalaną na podstawie odpowiednich informacji dla danego terenu. Możliwe do wykorzystania prędkości wiatru mieszczą się w zakresie 4–25 m/s. Załączanie siłowni następuje przy prędkości 2–6,5 m/s (prędkość startu w_s), a najwyższą sprawność energetyczną siłownie uzyskują przy nominalnej prędkości wiatru w_n , której wartość jest ustalana w zakresie 9–15 m/s, natomiast przy prędkości powyżej 25 m/s następuje wyłączenie (prędkość wyłączenia w_w). Przy prędkościach wiatru poniżej nominalnej układ sterowania dąży do zapewnienia jak najwyższej sprawności. Nie buduje się siłowni na większe prędkości wiatru niż 15 m/s, ponieważ występują one bardzo rzadko. Przy prędkościach wiatru większych niż 15 m/s, czyli w zakresie 15–25 m/s, konieczne jest wytracanie mocy, aby chronić siłownię przed uszkodzeniem. Przy prędkościach powyżej 25 m/s następuje wyłączenie silnika wiatrowego przez zadziałanie odpowiedniego układu regulacji, w który każda siłownia wiatrowa musi być zaopatrzona.

Podstawową charakterystykę pracy siłowni wiatrowej stanowi krzywa mocy $P(w)$, która przedstawia przebieg mocy siłowni w zależności od prędkości napływu wiatru w ustalonym zakresie prędkości. Przebieg krzywej mocy zależy od rozwiązań konstrukcyjnych turbiny, rodzaju zastosowanej mechaniki, typu turbiny, rodzaju płatów wirnika czy systemu regulacji. Przy regulacji przez zmianę kąta nastawienia łopatek krzywa mocy ma przebieg pokazany na rys. 11. Przebieg krzywej pozwala na określenie mocy nominalnej oraz prędkości wiatru w charakterystycznych punktach pracy siłowni.

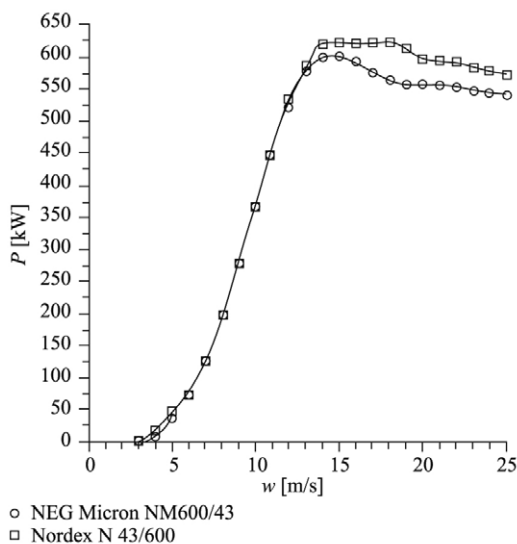
Rzeczywistą krzywą mocy uzyskuje się na podstawie pomiarów. Na rys. 12 przedstawiono przykład krzywej mocy dla wybranych dwóch siłowni wiatrowych [w7] o mocy nominalnej 600 kW przy regulacji, podczas której oprócz wykorzystywania charakterystyki aerodynamicznej łopatek istnieje również ograniczona możliwość zmiany kąta ich ustawienia względem napływającego wiatru.

Regulacja mocy siłowni wiatrowych odbywa się przez zmianę kąta nastawienia łopatek wirnika oraz zmianę kierunku napływu strumienia wiatru na wirnik przez obrót osi gondoli.

Regulacja przez zmianę kąta nastawienia łopatek wirnika w przypadku zbyt dużej prędkości wiatru ma na celu zmniejszenie momentu napędowego wirnika. Natomiast przy mniejszej prędkości wiatru działanie układu regulacji prowadzi do zwiększenia momentu napędowego. Zastosowanie zmiennej



Rys. 11. Krzywa mocy i charakterystyczne punkty pracy siłowni wiatrowej: P_n – moc nominalna, w_z – prędkość załączania, w_n – prędkość nominalna, w_g – prędkość graniczna (wyłączenia) [w7]



Rys. 12. Krzywa mocy wybranych siłowni wiatrowych: NEG Micron NM600/43 i Nordex N 43/600 [w7]

prędkości obrotowej w siłowniach wiatrowych umożliwia optymalne wykorzystanie energii wiatru i zapewnia w danych warunkach większy uzysk energii.

Regulacja przez zmianę kierunku ustawienia osi obrotu wirnika turbiny odbywa się w taki sposób, aby zapewnić ukośny napływ wiatru na pole zakreślane przez wirnik, czego wynikiem jest zmniejszenie powierzchni użytecznej zarysu wirnika i tym samym zmniejszenie mocy siłowni. Zmniejszenie mocy jest tym większe, im większe jest odchylenie osi obrotu wirnika od kierunku napływu wiatru. Przy prostokątym do osi obrotu wirnika kierunku napływu wiatru moc urządzenia spada do zera.

2.5. Możliwości wykorzystania mocy zainstalowanej siłowni wiatrowej

Ze względu na zmienność prędkości wiatru silniki wiatrowe przez większość czasu w ciągu roku nie pracują z pełną

dostępną mocą. Najwyższą efektywność wykorzystania energii wiatru uzyskują siłownie zainstalowane w szczególnie dogodnych warunkach wiatrowych.

Możliwości wykorzystania mocy zainstalowanej danej siłowni wiatrowej charakteryzuje współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej

$$\sigma = \frac{P_{sr}}{P_n} \quad (17)$$

gdzie: P_n – moc zainstalowana (nominalna) siłowni wiatrowej; P_{sr} – średnia moc danej siłowni uzyskana w rozpatrywanym czasie (zwykle w ciągu roku).

W pracy [47] przedstawiono analizę możliwości wykorzystania mocy siłowni wiatrowej o mocy 160 MW w warunkach wiatrowych na terenie Polski. Pełne (w 100%) wykorzystanie mocy siłowni wiatrowej miałyby miejsce w sytuacji, gdyby pracowała cały rok z mocą nominalną (zainstalowaną). To znaczy produkcja energii wyrażona w kWh byłaby równa mocy nominalnej elektrowni, wyrażonej w kW, pomnożonej przez liczbę godzin w ciągu roku. Tę wielkość energii przyjęto jako poziom odniesienia i w stosunku do niej określono stopień wykorzystania mocy elektrowni przy różnej średniorocznej prędkości wiatru.

Analizie poddano w szczególności istotny w warunkach wiatrowych Polski przedział średniorocznych prędkości wiatru od 4 m/s do 6 m/s. Poniżej średniej prędkości 4 m/s budowa siłowni wiatrowej nie ma uzasadnienia ekonomicznego, natomiast prędkość 6 m/s wg [47] to największa średnioroczna prędkość spotykana na terenie Polski. Dla obszarów, gdzie średnioroczna prędkość wiatru mieści się w przedziale od 4 m/s do 6 m/s, oszacowany stopień wykorzystania mocy nominalnej mieści się w granicach od 7% do około 25%. Przy prędkości wiatru 3 m/s stopień wykorzystania mocy wynosiłby zaledwie 2%, a przy wietrze o średniej prędkości 12 m/s (nie spotykanej na obszarze Polski) oszacowany stopień wykorzystania mocy wynosiłby 64%. W analizach dotyczących wykorzystania energii wiatru w danej lokalizacji należy zalecać konieczność uwzględnienia współczynnika σ wykorzystania mocy zainstalowanej. ■

Bibliografia dostępna pod linkiem: nis.com.pl/bibliografia.html

Fragment pochodzi z książki:

Efektywność energetyczna w działalności gospodarczej, Jan Górzyski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017