

# Wywarzanie energii elektrycznej z wykorzystaniem odnawialnych zasobów energii.

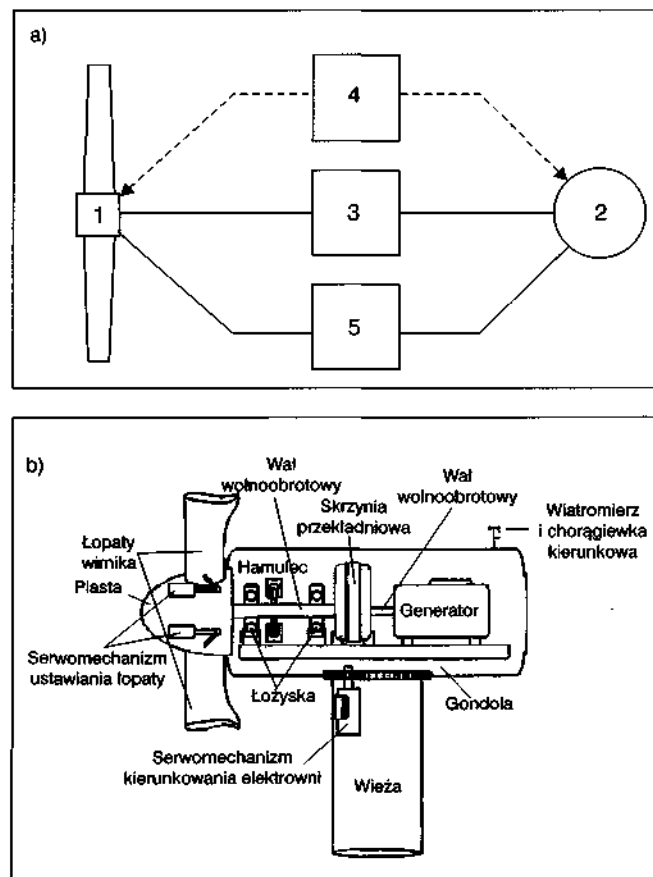
## Wykład drugi. Elektrownie wiatrowe

Autorzy: Prof. nzw. dr hab. inż. Józef Paska, mgr inż. Mariusz Sałek, mgr inż Tomasz Surma

(„Energetyka” – marzec 2005)

Zasadniczymi elementami elektrowni wiatrowych są (rys. 5):

- silnik wiatrowy,
- generator elektryczny,
- przekładnia mechaniczna (może być układ bez przekładni),
- urządzenia do automatycznego sterowania i regulacji,
- urządzenia pomocnicze.



Rys. 5. Podstawowe elementy elektrowni wiatrowej:  
a) schemat funkcjonalny, b) przekrój;  
1 – silnik wiatrowy, 2 – generator elektryczny, 3 – przekładnia mechaniczna, 4 – układ automatycznej regulacji i sterowania, 5 – urządzenia pomocnicze

Silnik wiatrowy jest silnikiem przepływowym, przetwarzającym energię kinetyczną wiatru na pracę mechaniczną [22]. Obecnie są stosowane prawie wyłącznie silniki, których oś zajmuje

podczas pracy położenie równoległe do kierunku wiatru (jest pozioma, ewentualnie nachylona pod kątem 5-10°). Silniki wiatrowe o osi pionowej nie znalazły szerszego zastosowania. Dopiero współcześnie są budowane turbiny wiatrowe (część silnika wiatrowego odbierająca energię wiatru) o osi pionowej, zwane turbinami Darrieusa (od nazwiska autora pierwszego projektu). Składają się one z kilku cienkich, półkoliście wygiętych łopat, które obracają się w płaszczyźnie poziomej (rys. 6). Nie wymagają one budowy wysokich wież oraz wyposażenia w systemy orientacji na wiatr, muszą być jednak wyposażone w silnik pomocniczy, przeznaczony do „rozkrećenia” silnika wiatrowego z wirnikiem typu Darrieusa do prędkości roboczej [1-2].

Silnik wiatrowy o osi poziomej składa się z:

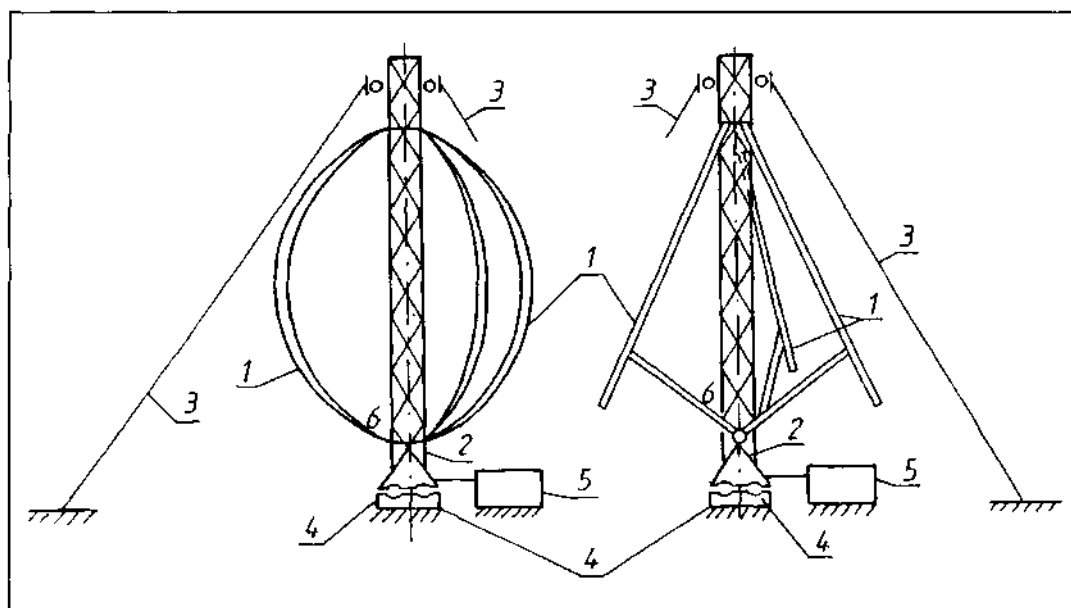
- wirnika utworzonego z układu łopat zamocowanych promieniowo w piaście i osadzonego na poziomym (lub lekko pochylonym) wale,
- wału ułożyskowanego w głowicy osadzonej obrotowo na wieży lub maszcie odpowiedniej wysokości,
- urządzeń kierunkowych do samoczynnego nastawiania wirnika pod wiatr, tj. osią równoległą do kierunku wiatru,
- urządzeń regulacyjnych i sterowniczych,
- zespołu przeniesienia napędu.

Silnik wiatrowy jest charakteryzowany przez wartość wyróżnika szybkobieżności, wyrażającego się zależnością:

$$Z = \frac{u_z}{V} = \frac{r_z \omega}{V} \quad (1)$$

gdzie:

- $u_z$  - prędkość obwodowa końca łopat,
- $V$  - prędkość wiatru,
- $r_z$  - odległość końca łopaty od osi obrotu wirnika,
- $\omega$  - prędkość kątowa wirnika.



Rys. 6. Różne rozwiązania turbin Darrieusa:  
1 - łopaty wirnika, 2 - wał, 3 - odciaż, 4 - podstawa, 5 - generator

W zależności od wartości wyróżnika szybkobieżności silniki wiatrowe dzieli się na:

- wolnobieżne, zwane także turbinami wiatrowymi, o wyróżniku szybkobieżności  $Z \leq 1,5$ ; mają one wirnik o wielu łopatach (12-40) i odznaczają się dużym momentem rozruchowym;
- średnobieżne, o wyróżniku szybkobieżności:  $1,5 < Z \leq 3,5$  i 4-7 łopatach;
- szybkobieżne (śmigłowe) o  $Z > 3,5$ , mające wirniki w kształcie śmigła lotniczego z trzema, dwiema lub jedną łopata; mają one największą sprawność aerodynamiczną, lecz niewielki moment rozruchowy.

Energia i moc wiatru są związane z ruchem masy powietrza. Jeśli wektor prędkości wiatru jest równoległy do powierzchni terenu, a powietrze potraktujemy jako gaz idealny (nie lepki i nieściśliwy) znajdujący się w ruchu laminarnym, to energia masy  $m$  powietrza poruszającego się z prędkością  $v$  jest określona wzorem:

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

Przez powierzchnię  $S$ , zakresloną przez łopaty wirnika silnika wiatrowego, prostopadłą do kierunku wiatru, przepływa strumień powietrza  $m$  [kg/s]

$$\dot{m} = \rho S V \quad (3)$$

gdzie:

$\rho$  ~ gęstość powietrza;

Moc rozwijana przez ten strumień powietrza jest określona wzorem:

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (4)$$

W warunkach normalnych, tzn. w temperaturze  $15^\circ\text{C}$  i przy ciśnieniu 0,1 MPa, gęstość powietrza jest równa  $1,209 \text{ kg/m}^3$ ; a zatem moc jednostkowa wiatru, przypadająca na  $1 \text{ m}^2$  powierzchni prostopadłej do kierunku wiatru, wynosi:

$$p = 0,6 V^3 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (5)$$

Wprowadzenie wirnika silnika wiatrowego w strumień powietrza (wiatru) zaburza jego przepływ. Prędkość przed wirnikiem silnika maleje do wartości  $V - v$ , zaś za wirnikiem do wartości  $V - v_1$ . Wartości zmian prędkości wiatru  $v_1$  i  $v$  nie są sobie równe.

Moc przejmowana przez wirnik silnika wiatrowego jest określona iloczynem siły działającej na wirnik, równej zmianie pędu wiatru oraz prędkości wiatru przed wirnikiem:

$$\begin{aligned} P_w &= F(V - v) = m v_1(V - v) = \rho S(V - v) v_1(V - v) = \\ &= \rho S(V - v)^2 v_1 \end{aligned} \quad (6)$$

Z równania Bernoulliego dla przepływu przed i za wirnikiem silnika wiatrowego można wyliczyć, że  $v_1 = 2v$ , więc:

$$P_w = 2\rho S(V - v)^2 v \quad (7)$$

Stopień wykorzystania przez silnik wiatrowy energii wiatru, zwany sprawnością strumieniową, jest określony stosunkiem mocy przejmowanej przez wirnik  $P_w$  do mocy rozwijanej przez strumień powietrza (wiatr)  $P$ :

$$\eta_s = \frac{P_w}{P} = \frac{2\rho S(V-v)^2 v}{\frac{1}{2}\rho S V^3} = 4 \frac{v(V-v)^2}{V^3} \quad (8)$$

Można wykazać, że sprawność strumieniowa  $\eta_s$  osiąga maksimum przy  $v = 1/3 V$  i jest wówczas równa  $16/27$

$$\eta_{smax} = \frac{16}{27} = 0.5926 \quad (9)$$

co oznacza, że jest możliwe wykorzystanie co najwyżej takiej części (mniej niż 60%) energii kinetycznej powietrza, przepływającego przez wirnik silnika wiatrowego. Powietrze opuszczające łopaty wirnika ma również pewną prędkość, a zatem i energię kinetyczną.

Maksymalną moc silnika wiatrowego określa się z zależności (7) przy uwzględnieniu (9):

$$P_{wmax} = \frac{8\pi d^2 \rho V^3}{27} = 0,9308 \rho d^2 V^3 \quad (10)$$

gdzie:

$d$  - średnica koła zakreślanego przez łopaty wirnika silnika wiatrowego.

Moc, którą silnik wiatrowy może przekazać napędzanemu urządzeniu (generatorowi, kamieniom młyńskim, pompie), zwana mocą użyteczną, jest jeszcze mniejsza na skutek strat aerodynamicznych, które powstają wskutek:

- tarcia powietrza o powierzchnię łopat,
- wyrównywania się ciśnienia powietrza po obu stronach łopat,
- zawirowania strumienia powietrza za wirnikiem,
- niewykorzystania środkowej części wirnika,
- częściowego odpływu powietrza na zewnątrz wirnika i wirowych zaburzeń strug powietrza za wirnikiem,
- wzajemnego oddziaływania łopat (w wirnikach wielołopatowych) oraz strat mechanicznych (tarcie w łożyskach, straty w przekładniach).

Odzwierciedleniem tych strat jest sprawność aerodynamiczna  $\eta_s$  oraz sprawność mechaniczna  $\eta_m$ .

$$P_u = \eta_s \eta_m P_{wmax} \quad (11)$$

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.

W elektrowni wiatrowej silnik wiatrowy napędza generator elektryczny, którym może być prądnica bocznikowa prądu stałego, generator synchroniczny lub asynchroniczny.

Najprostszy jest układ z prądnicą bocznikową prądu stałego. Uzyskuje się stałe napięcie w sieci przy różnych prędkościach wiatru dzięki regulacji wzbudzenia

Współczesne elektrownie wiatrowe o mocach ponad 100 kW są zwykle wyposażone w generatory asynchroniczne lub synchroniczne i na ogół współpracują z siecią energetyki zawodowej. W elektrowniach o mocach 100-300 kW bywają stosowane generatory 6- lub 8-biegunowe, połączone z silnikiem wiatrowym przekładnią łańcuchową lub zębatą. Przy wyższych mocach 500-1000 kW rezygnuje się z przekładni i używa generatorów synchronicznych, z wystającymi biegunami (300 biegunów przy 20 obr/min). Generator jest najczęściej lokalizowany wraz z silnikiem wiatrowym na szczycie wieży, rzadziej na poziomie terenu. ]

Moc elektrowni wiatrowej na zaciskach generatora wyraża się zależnością:

$$P_e = \eta_g P_u = \eta_g \eta_s \eta_m P_{wmax} = \eta_g \eta_s \eta_m \eta_e P, \quad (12)$$

gdzie:

$\eta_g$  – sprawność generatora.

Łączna sprawność silnika wiatrowego i prądnicy  $\eta_g \eta_s \eta_m$  zawiera się w przedziale 0,4–0,8; zatem:

$$P_e = (0,237 + 0,474)P \quad (13)$$

czyli sprawność elektrowni wiatrowej (zespołu wiatrowego) mieści się w granicach od 23,7% do 47,4%. Przewiduje się możliwość uzyskania większych sprawności.

W przypadku turbozespołów wiatrowych niezwykle ważne są systemy służące do automatycznej regulacji mocy wyjściowej. Generalnie można mówić o regulacji aktywnej lub o samoczynnej regulacji prędkości obrotowej oraz ustawienia wirnika turbozespołu w kierunku wiatru. Samoczynne ustalenie punktu pracy turbozespołu wiatrowego polega na zastosowaniu takiego profilu łopat wirnika, który powoduje utykanie wirnika przy dużych prędkościach wiatru. Natomiast regulacja aktywna polega na wymuszonej zmianie kąta ustawienia łopat wirnika i kierunku ustawienia gondoli w zależności od siły i kierunku wiatru.

Zabiegi te mają na celu przede wszystkim utrzymywanie stałego poziomu mocy wyjściowej i zapewnienie wymaganych parametrów jakościowych energii elektrycznej oddawanej do sieci elektroenergetycznej. Poszczególne metody wykorzystywane do regulacji mocy przedstawiono poniżej.

### **Regulacja przez tzw. przeciąganie (ang. *Stall Regulation*)**

Regulacja mocy tego typu polega na wykorzystaniu charakterystyki aerodynamicznej łopat wirnika, czyli należy do najprostszych metod pasywnych. Przy pewnej prędkości wiatru za łopatom wirnika zaczynają się tworzyć turbulencje i następuje tzw. przeciągnięcie (utykanie) łopat. Zwiększanie się prędkości wiatru powoduje, że coraz większa część łopaty utyka. Moc pobierana przez wirnik zmniejsza się, co z kolei pozwala na utrzymywanie względnie stałej mocy wyjściowej (rys. 7). Łopaty są oczywiście odpowiednio ukształtowane i są na stałe

zamocowane w piaście wirnika.

Podstawową zaletą tego rodzaju regulacji jest brak zbyt wielu części ruchomych oraz dodatkowych elektrohydraulicznych układów sterowania i regulacji kąta ustawienia łopat wirnika, co znacznie upraszcza konstrukcję turbosespołu wiatrowego, a przez to przyczynia się do zwiększenia jego niezawodności. Natomiast jej podstawową wadą jest mniejsza efektywność zamiany mocy, niestabilność mocy wyjściowej w czasie powstawania turbulencji oraz pogorszenie parametrów jakości energii. Regulacja ta jest zazwyczaj stosowana w turboszespołach wiatrowych o mniejszych mocach z generatorami indukcyjnymi i stałą prędkością obrotową.

### **Regulacja przez tzw. aktywne przeciąganie (ang. *Active Stall Regulation*)**

Bardziej zaawansowaną odmianą opisaną wyżej metody regulacji mocy jest regulacja typu *active stall*, w której oprócz wykorzystywania charakterystyki aerodynamicznej łopat istnieje również możliwość zmiany kąta ich ustawienia względem napływającego wiatru, ale tylko w dość ograniczonym zakresie. Pozwala to na uzyskanie mniejszej zmienności mocy wyjściowej przy dużych prędkościach wiatru, co pozytywnie wpływa na jakość wytwarzanej energii elektrycznej m.in. dzięki ograniczaniu emisji migotania.

### **Regulacja przez zmianę kąta ustawienia łopat wirnika (ang. *Pitch Regulation*)**

Jest to metoda aktywna, która polega na zmianie kąta natarcia wiatru na łopaty wirnika przez zmianę kąta ich ustawienia.

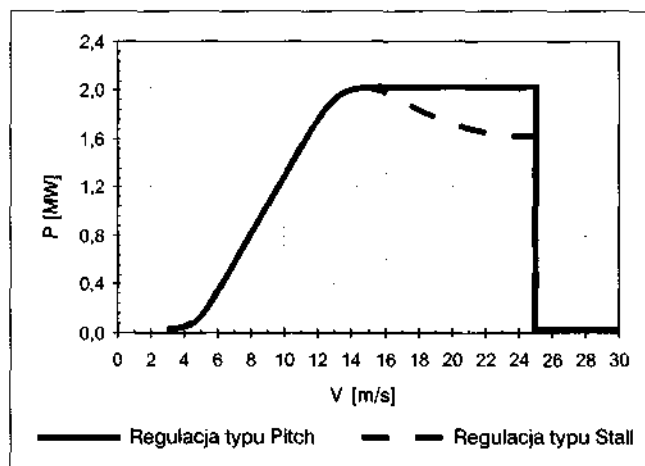
Pozwala to na utrzymywanie stałej prędkości obrotowej wirnika. Układ automatycznej regulacji na podstawie informacji o prędkości wiatru i wielkości generowanej mocy powoduje zmianę kąta ustawienia łopat wirnika względem kierunku natarcia wiatru. Łopaty wirnika są przestawiane za pomocą serwomechanizmów o ułamki stopnia. Dzięki temu utrzymywana jest stała prędkości obrotowa wirnika, co bezpośrednio wpływa na stabilność i efektywność pracy turbosespołu oraz na zmniejszenie poziomu hałasu.

Dodatkowo w przypadku wystąpienia zbyt dużej prędkości wiatru grożącej zniszczeniem turbosespołu istnieje możliwość hamowania aerodynamicznego poprzez ustawienie łopat w tzw. chorągiewkę. Układ regulacji kąta ustawienia łopat znajduje się w piaście wirnika. Każda z łopat jest regulowana za pomocą oddzielnego siłownika hydraulicznego. Regulacja tego typu wpływa na wielkości sił nośnych i hamujących działających na poszczególne łopaty. Natomiast istotną wadą, w porównaniu z innymi metodami regulacji, jest istnienie znacznej ilości ruchomych części w konstrukcji turbosespołu, co prowadzi do zwiększenia awaryjności turbosespołu oraz zmniejszenia jego dyspozycyjności.

Regulacja tego typu jest również stosowana w turboszespołach z generatorami o zmiennej prędkości obrotowej.

W takim przypadku regulacja polega na zastosowaniu układu jednocześnie śledzącego zmiany prędkości obrotowej wirnika, prędkości generatora oraz kąta ustawienia łopat wirnika. W przypadku gwałtownego zwiększenia się prędkości wiatru układ zwiększa obroty generatora i jednocześnie zmniejsza kąt ustawienia łopat, co w efekcie powoduje zmniejszenie obrotów wirnika. Skutkiem tych zabiegów jest wyeliminowanie wahań mocy (rys. 7) i utrzymywanie dobrych parametrów jakości energii oddawanej do sieci oraz znaczące

ograniczenie przeciążeń konstrukcyjnych wirnika.



Rys. 7. „Krzywa mocy” turbozespołu wiatrowego o mocy znamionowej 2 MW

### **Regulacja przez zmianę ustawieniem gondoli w kierunku wiatru (ang. *Yaw Control*)**

Metoda ta polega na automatycznie regulowanym obrocie całej gondoli, a co za tym idzie na zmianie osi obrotu wirnika prostopadłe w kierunku napływającego wiatru. Regulacja ta może być zrealizowana za pomocą układu śledzącego i dodatkowego napędu silnikowego lub też w sposób samoczynny. Aktywna regulacja gondoli jest stosowana głównie w dużych turbozespołach wiatrowych, gdzie odpowiednio sterowany silnik obracając się ustawia gondolę w kierunku wiatru. W ten sposób można utrzymywać na stałym poziomie moc wyjściową turbozespołu. Jednak jest to regulacja bardzo wolno reagująca na zmianę kierunku wiatru. Natomiast regulacja pasywna za pomocą specjalnej chorągiewki kierunkowej jest stosowane przede wszystkim w turbozespołach o mniejszych mocach.

### **Regulacja przez zmianę rezystancji obciążenia (ang. *Load Control*)**

Regulacja ta polega na zmianie rezystancji uzwojenia wirnika generatora. W ten sposób punkt pracy turbozespołu wiatrowego zostaje przeniesiony z jednej charakterystyki pracy na inną, bardziej korzystną dla danych warunków zewnętrznych. Zmiana rezystancji może zostać dokonana poprzez włączenie w obwód wirnika generatora dodatkowej rezystancji za pomocą pierścieni ślizgowych. W celu zmiany rezystancji mogą być również wykorzystane przetworniki energoelektroniczne, które również muszą być włączone w obwód wirnika.

### **Regulacja lotkami łopat wirnika (ang. *Aileron Control*)**

Metoda regulacji za pomocą lotek była stosowana w pierwszych, prostych konstrukcjach turbozespołów wiatrowych. Natomiast w chwili obecnej jest spotykana sporadycznie jedynie w starszych konstrukcjach, które w niewielkiej liczbie są jeszcze eksploatowane. Regulacja ta polega na zmianie charakterystyk aerodynamicznych łopat wirnika przez zmianę ustawienia tzw. lotek, podobnie jak to ma miejsce w przypadku układów sterowniczych stosowanych w samolotach.

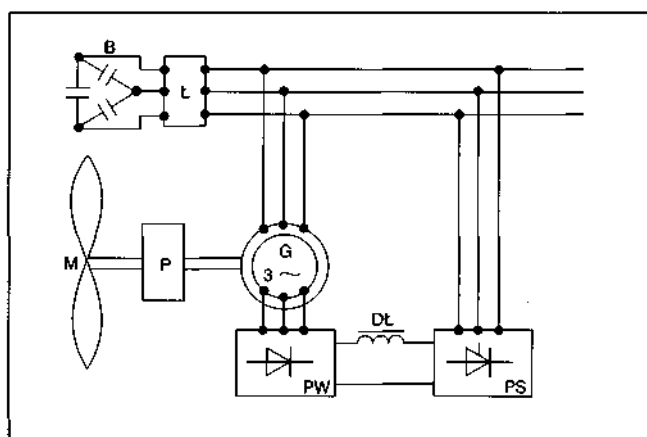
Opierając się na informacjach zawartych powyżej można stwierdzić, że najlepszą metodą regulacji mocy generowanej przez duże turbospoły wiatrowe, z punktu widzenia współpracy elektrowni wiatrowych z systemem elektroenergetycznym i jakości wytwarzanej przez nie energii elektrycznej, jest regulacja typu *pitch*.

Polega ona na zmianie kąta ustawienia łopat wirnika w zależności od kierunku i siły wiatru. Natomiast najczęściej stosowanymi metodami regulacji mocy w pracujących obecnie turbospołach wiatrowych jest regulacja typu *active stall* stosowana w połączeniu ze stałą dwustopniową prędkością obrotową wirnika oraz regulacja typu *pitch* w połączeniu ze zmienną prędkością obrotową wirnika turbospołu wiatrowego.

Zasadniczym problemem przy pracy elektrowni wiatrowych jest uwzględnienie w dynamice elektrowni zmian prędkości wiatru (krótko-, średnio- i długotrwałych wahań), szczególnie wahań krótkotrwałych (szkwałów), które mogą powodować gwałtowne zmiany elektrycznych wielkości wyjściowych: mocy, napięcia, częstotliwości [36].

W elektrowniach o zmiennej prędkości kątowej silnika wiatrowego są stosowane zazwyczaj generatory indukcyjne z wirnikami pierścieniowymi. Mogą one pracować w układach z regulowanymi rezystorami, kaskadą dwóch przekształtników w obwodach wirników lub jako maszyny podwójnie zasilane. Układ z rezystorami jest nieekonomiczny (energia tracona wskutek poślizgu jest zamieniana na ciepło), układ z maszyną podwójnie zasilaną wymaga zastosowania bezpośredniego przemiennika częstotliwości (cyklokonwertora) i może być stosowany raczej w siłowniach średnich i dużych mocy; natomiast układ z kaskadą przekształtników w obwodzie wirnika (rys. 8) może mieć duże znaczenie praktyczne w przypadku niezbyt dużych mocy (jak np. w Polsce). Jeżeli oba przekształtniki PW i PS są sterowane, to możliwa jest praca generatorowa w zakresie prędkości pod-synchronicznych i nadsynchronicznych.

Przy zastosowaniu niesterowanego przekształtnika PW w obwodzie wirnika układ będzie pracował generatorowo jedynie przy prędkościach nadsynchronicznych.



Rys. 8. Schemat ideowy elektrowni wiatrowej z asynchroniczną kaskadą zaworową, współpracującą z siecią energetyki zawodowej:  
M – silnik wiatrowy, P – przekładnia, G – prądnica asynchroniczna,  
PW – przekształtnik wirnikowy, PS – falownik, B – bateria kondensatorów, Ł – łącznik (np. tyrystorowy), DŁ – diawik

Podstawowe dane najbardziej znanych elektrowni wiatrowych świata zawiera tabela 5.



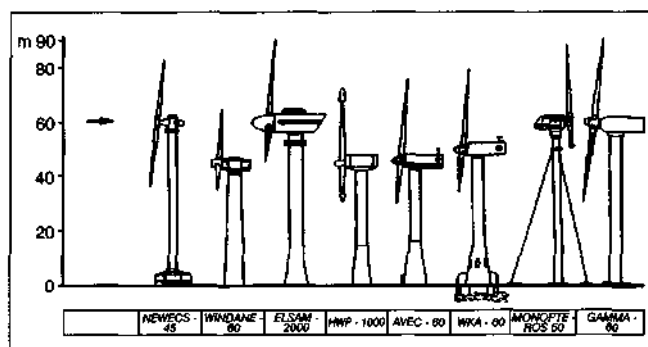
Tabela 5

Charakterystyka najbardziej znanych elektrowni wiatrowych świata [1]

Cecha charakterystyczna	Nazwa	Kraj	Średnica wirnika, m	Moc, MW	Liczba instalacji
Największe średnice wirnika	GROWIAN-1*	Niemcy	100,4	3	1
	MOD-2	USA	91,6	2,6	5
Największe moce	WTS-4	USA	78	4,0	1
	WTS-3	Szwecja	78	3,0	1
Typ Darrieusa	ALCOA	USA	25×37	0,5	2
	WANT	Kanada	24×36	0,23	1
Jednołopatowe	Sylt	Niemcy	25	0,25	1
	Bremenhaven (MONOPTEROS)	Niemcy	48	0,37	1

\* Po krótkim okresie pracy elektrownia została zatrzymana.

Natomiast na rysunku 9 przedstawiono sylwetki europejskich elektrowni wiatrowych o mocach rzędu megawatów. W tabeli 5 podano ich charakterystykę. Nakłady inwestycyjne na budowę tych elektrowni wynoszą 2500-5000 euro/kW, zaś jednostkowe koszty wytwarzania energii elektrycznej ocenia się na 0,15-0,20 euro/(kWh).



Rys. 9. Europejskie elektrownie wiatrowe o mocach rzędu MW

W ostatnich latach na świecie zainstalowano 21630 MW w elektrowniach wiatrowych. W 2001 r. wytworzono na świecie 46656 GWh energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych. Elektrownie wiatrowe są często pogrupowane w tzw. farmach wiatrowych, stanowiących zespoły wielu współpracujących turbozespołów wiatrowych, zainstalowanych na indywidualnych wieżach. Nie zawsze wszystkie jednostki są identyczne, ale przynajmniej tworzą kilka jednakowych grup. Często mają wspólne elementy, jak np. transformatory wiążące elektrownie wiatrowe z siecią elektroenergetyczną. Zwykle są centralnie sterowane i zajmują obszar o znacznej średniej prędkości wiatru.

W Stanach Zjednoczonych moc zainstalowana elektrowni wiatrowych w roku 2004 wyniosła 6374 MW, z czego na samą Kalifornię przypadło 5042 MW. Kalifornijskie farmy wiatrowe są zlokalizowane na trzech przełęczach górskich: Altamont Pass na północny wschód od San Francisco, Tehachapi Pass na północny wschód od Los Angeles, San Geronio Pass na wschód od Los Angeles oraz Solano County i Pacheco Pass na północny wschód od San Francisco.

Tabela 6

## Charakterystyka europejskich elektrowni wiatrowych o mocy rzędu MW [14]

Nazwa elektrowni	Średnica wirnika, m	Moc, kW	Typ wirnika	Typ prądnicy	Rok uruchomienia	Producent
NEWECS-45	45	1000	2a	S + PS	1986	FDD-Stork (NL)
WINDANE-40	40	750	3a	A	1986	DWT (DK)
ELSAM-2000	61	2000	3a	A	1987	ELSAM (DK)
HWP-1000	55	1000	3a	S/A	1989	HOWDEN (GB)
AWEC-60	60	1200	3a	A + K	1989	ASINEL/IER (E) UNION FENOSA
WKA-60	60	1200	3a	S + PS	1989	MAN (D)
MONOPTEROS-60	56	640	1b	S + PS	1989	MBB (D)
GAMMA-60	60	1500	2c	S + PS	1989	ENEL/ENEA (I)

2a - dwupłatowy z piastą sztywną, 1b - jednopłatowy z piastą przegubową, 2c - dwupłatowy z piastą wahliwą; S - synchroniczna, A - asynchroniczna, PS - obwód pośredniczący prądu stałego, K - kaskada zaworowa; NL - Holandia, DK - Dania, GB - Wielka Brytania, E - Hiszpania, D - Niemcy, I - Włochy

Farma wiatrowa Altamont Pass zajmuje obszar o charakterystycznym lejkowatym kształcie, co powoduje zwiększenie prędkości wiatru od 7 do 13,5 m/s. Łączna moc farmy wynosi 548,38 MW, a produkcja energii elektrycznej w roku 1998 wyniosła 637 GWh.

Farma wiatrowa Tehachapi Pass jest zlokalizowana na wysokości 1524 m. Położona na wysokości 1070 m pustynia Mojave powoduje, że unoszące się gorące powietrze zderza się na wysokości 1500 m z zimnym powietrzem oceanicznym. W efekcie powstaje stale wiejący wiatr o prędkości od 6 do 9 m/s. Farma ma moc zainstalowaną 605 MW i produkuje ok. 1200 GWh energii elektrycznej (w 1998 r.).

Moce elektrowni zlokalizowanych w San Geronio Pass, Salano County i Pacheco Pass wynoszą kolejno 614 MW, 236 MW i 16 MW.

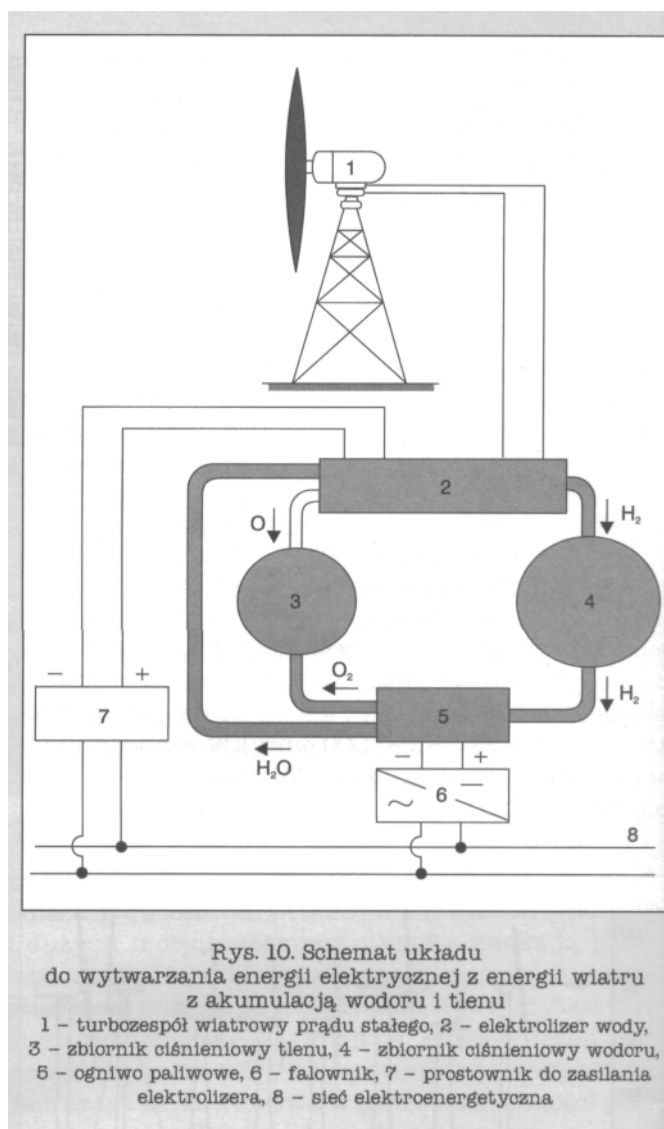
Jednostkowe koszty wytwarzania energii elektrycznej wynoszą obecnie ok. 7 cent/(kWh), podczas gdy w nowoczesnej elektrowni węglowej wynoszą ok. 5 cent/(kWh). Amerykański Departament Energetyki ocenia, że w czasie najbliższych 30 lat koszty energii elektrycznej z energii wiatru zostaną obniżone do ok. 3,5 cent/(kWh). Przewiduje się, że będzie to możliwe dzięki:

- zwiększeniu mocy jednostkowych (ale bez przekroczenia granicy, przy której pojawiają się trudności konstrukcyjne);
- produkowaniu elektrowni wiatrowych w długich, typowych seriach;
- wydłużeniu czasu eksploatacji, co najmniej do 30 lat;
- zwiększeniu rocznego czasu wykorzystania mocy zainstalowanej do ok. 3000 h (obecnie nie przekracza on zwykle 1500 h).

Trzeba podkreślić, że nawet najliczniejsze farmy wiatrowe nie mogą całkowicie wyeliminować elektrowni konwencjonalnych. Przyczyniają się one do oszczędności paliwa i stanowią uzupełnienie klasycznych nośników energii. Największe efekty daje kompleksowe wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, np. instalacja wiatrowa ze słoneczną i biomasową.

Największą inwestycją w Polsce jest farma elektrowni wiatrowych w miejscowości Zagórze w gminie Wolin. Farma składa się z piętnastu dużych turbin wiatrowych o mocy 3 MW każda. Średnica wirnika wynosi 80 m. Jest on umieszczony na wysokości 78 m. Dzięki tej

inwestycji moc elektryczna elektrowni wiatrowych w Polsce zwiększyła się dwukrotnie i wyniosła w 3003 roku 59,6 MW.



Dla zapewnienia ciągłości dostawy energii elektrycznej i lepszego wykorzystania korzystnych warunków wiatrowych elektrownie wiatrowe pracujące na potrzeby wydzielonej grupy odbiorców wyposaża się w akumulatory energii elektrycznej oraz silniki rezerwujące (np. spalinowe zespoły prądotwórcze).

Efektywną wydaje się koncepcja przedstawiona na rysunku 10, zgodnie z którą w okresach wietrznych następuje elektrolityczny rozkład wody na wodór i tlen, akumulacja tych produktów w zbiornikach ciśnieniowych, a następnie wytwarzanie z nich energii elektrycznej za pomocą ogniw paliwowych w okresach bezwietrznych.

## LITERATURA

- [1] Bogdanienko J.: Odnawialne źródła energii. PWN, Warszawa 1989
- [2] Boyle G. (Ed.): Renewable Energy. Power for a Sustainable Future. Oxford University Press, Oxford 1996
- [3] Devins D.: Energy: its Physical Impact on the Environment. John Wiley and Sons, New York 1983
- [4] Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market. Official Journal of the European Union, L 283/33
- [5] Directive 2003/54/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 concerning common rules of internal market in electricity and repealing Directive 96/92/EC. Official Journal of the European Union, L 176 15.7.2003
- [6] Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market. Final Version - 23.07.2003
- [7] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady nr 3003/91/WE z dnia 16 grudnia 2002 r. w sprawie poprawy efektywności wykorzystania energii w budynkach (Directive on the Energy Performance of Buildings)
- [8] Energy for Tomorrow's World - Acting Now. WEC Statement 2000
- [9] European Commission: Green Paper - Towards a European strategy for the security of energy supply. Brussels 2001
- [10] Gajer M.: Wybrane zagadnienia optymalizacji i doboru turbin elektrowni wiatrowych. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 2, 2003
- [11] Garstka J; Oceany i morza źródłem energii elektrycznej. Gospodarka Paliwami i Energią, Nr 6, 1986
- [12] Hau E.: Die zweite Generation. Europäische Windkraftanlagen der Megawatt-Klasse. Energie, No 9, 1987
- [13] Jarzębski Z.M.: Energia słoneczna. Konwersja fotowoltaiczna. PWN, Warszawa 1990
- [14] Kaiser H.: Wykorzystanie energii słonecznej. Wyd. AGH, Kraków 1995
- [15] Kowalska-Bundz A.: Analiza i ocena regulacji prawnych w Polsce i w Niemczech pod kątem wspierania rozwoju generacji rozproszonej. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”, Kozienice, 10-13 marca 2004
- [16] Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk R.: Elektrownie. WNT, Warszawa 1990
- [17] Lorenc H.: Struktura i zasoby energetyczne wiatru w Polsce. IMIGW, Warszawa 1996
- [18] Lorenc H.: Współczesne tendencje zmian prędkości i zasobów energii wiatru w Polsce. Ogólnopolskie Forum Odnawialnych Źródeł Energii, Warszawa, listopad 2002
- [19] Manwell J. E., McGowan J. G., Rogers A. L.: Wind Energy Explained - Theory Design and Application. John Wiley & Sons, Chichester (England) 2002
- [20] Miszczak M., Waszkiewicz Cz.: Energia słońca, wiatru i inne. Instytut Wydawniczy „Nasza Księgarnia”, Warszawa 1988.
- [21] Paska J.: Odnawialne źródła energii. Problemy, Nr 11, 1987
- [22] Paska J: Renewable Bnergies in World's Energy Balance. Archiwum Energetyki, Nr 3-4, 1993.
- [23] II Polityka ekologiczna Państwa. Ministerstwo Środowiska, 2000 r. [www.mos.gov.pl](http://www.mos.gov.pl)
- [24] Polityka ekologiczna państwa na lata 2003-2006 z uwzględnieniem perspektywy na lata 2007-2010. Rada Ministrów, 2003

- [25] Poręba S., Barć W, Gajda A., Jaworski W.: Rynek zielonej energii. Biuletyn Miesięczny PSE, 1/2001
- [26] Prawo ochrony środowiska. Dz. U. Nr 62, poz.627 z dnia 27 kwietnia 2001
- [27] Projekt Polityki Klimatycznej Polski. Ministerstwo Środowiska 2003 r. [www.mos.gov.pl](http://www.mos.gov.pl)
- [28] Pluta Z-- Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej. OWPW, Warszawa 2000
- [29] Pluta Z.: Słoneczne instalacje energetyczne. OWPW, Warszawa 2003
- [30] Regulation (EC) No 1228/2003 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2003 on conditions for access to the network for cross-border exchanges in electricity. Official Journal of the European Union, L 176 15.7.2003
- [31] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców. Dz. U. Nr 85, poz. 957
- [32] Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 30 maja 2003 w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych źródeł energii oraz energii elektrycznej wytwarzanej w skojarzeniu z wytwarzaniem ciepła. Dz. U. Nr 104, poz. 971
- [33] Różycki M.: Elektrownia wiatrowa z indukcyjną maszyną pierścieniową. *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 4-5, 1990
- [34] Smolec W: O możliwościach wykorzystania energii słonecznej w Polsce. *Energetyka*, Nr 8, 1987
- [35] Spójna polityka strukturalna rozwoju obszarów wiejskich i rolnictwa z dnia 13 lipca 1999 r., [www.ib-mer.waw.pl](http://www.ib-mer.waw.pl)
- [36] Staniszewski A.: Zarys elektrowni. WPW, Warszawa 1983
- [37] Statystyka elektroenergetyki polskiej 2002. Agencja Rynku Energii SA, Warszawa 2003
- [38] Strategia rozwoju energetyki odnawialnej. Ministerstwo Ochrony Środowiska. Warszawa, wrzesień 2000
- [39] Strategia zrównoważonego rozwoju Polski do roku 2035. Ministerstwo Środowiska. Monitor Polski Nr 8 z dnia 11 marca 1999 r. Poz. 96
- [40] Ustawa Prawo energetyczne z dnia 10 kwietnia 1997 r. wraz z późniejszymi zmianami, [www.ure.gov.pl](http://www.ure.gov.pl)
- [41] Ustawa z dnia 26 lipca 2002 r. o ratyfikacji Protokołu z Kioto do Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu. Dz. U. 2002 nr 144, poz. 1207
- [42] World Energy Outlook. OECD/IEA, Paris 2000
- [43] Założenia polityki energetycznej państwa. Minister Gospodarki, 2000