Temat nr 8:
Energetyka wiatrowa

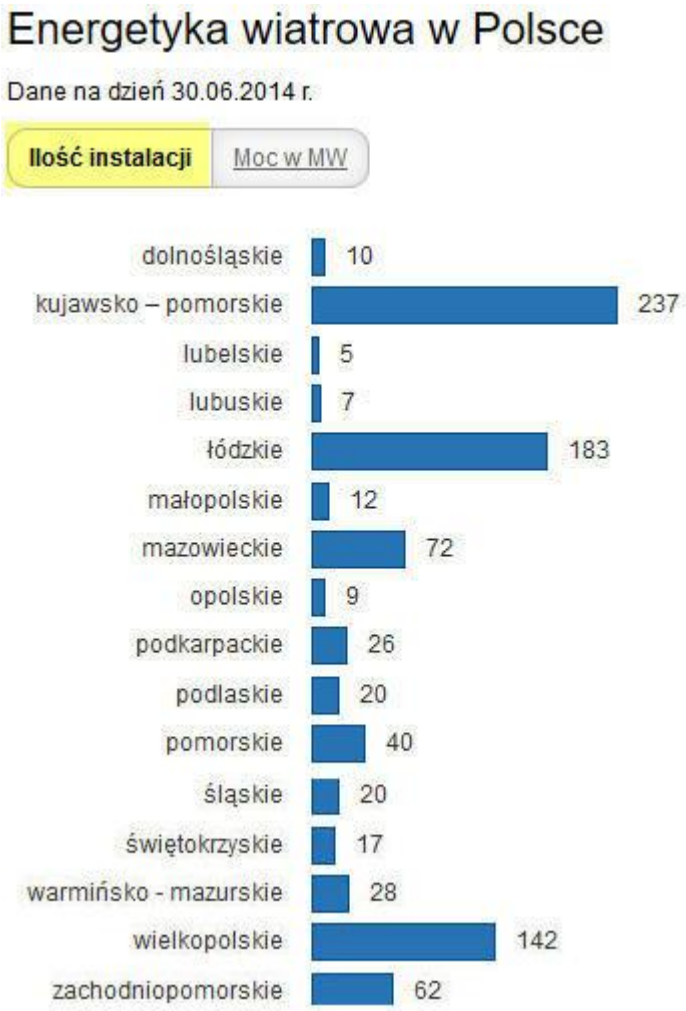
- Energetyka wiatrowa w Polsce i na świecie
- Energia wiatru
- Podstawowe parametry EW
- Rodzaje siłowni wiatrowych
- Elektrownie wiatrowe

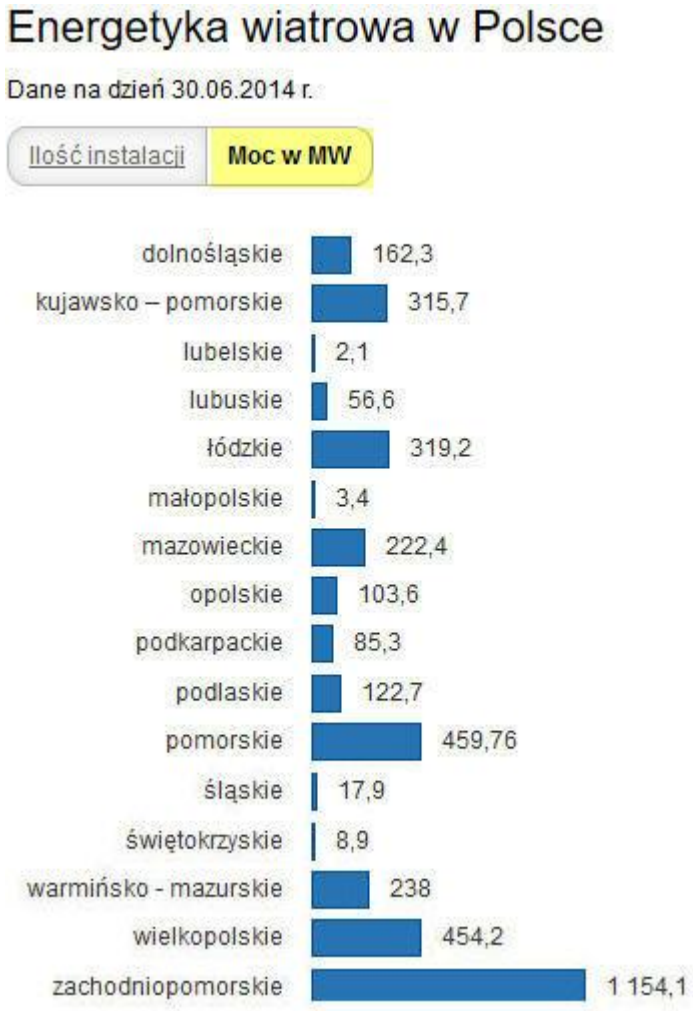
Energetyka wiatrowa w Polsce i na świecie

Pierwszy wiatrak w Polsce postawiono w **1991** roku przy istniejącej już Elektrowni Wodnej w Żarnowcu.
Dziś wiatraków mamy niemal **900**.

Polecam artykuł: Gdzie w Polsce znajdują się farmy wiatrowe i ile wytwarzają energii?, 2014r.
Link do art.: http://serwisy.gazetaprawna.pl/energetyka/artykuly/813200,gdzie-w-polsce-znajduja-sie-farmy-wiatrowe-i-ile-wytwarzaja-energii.html

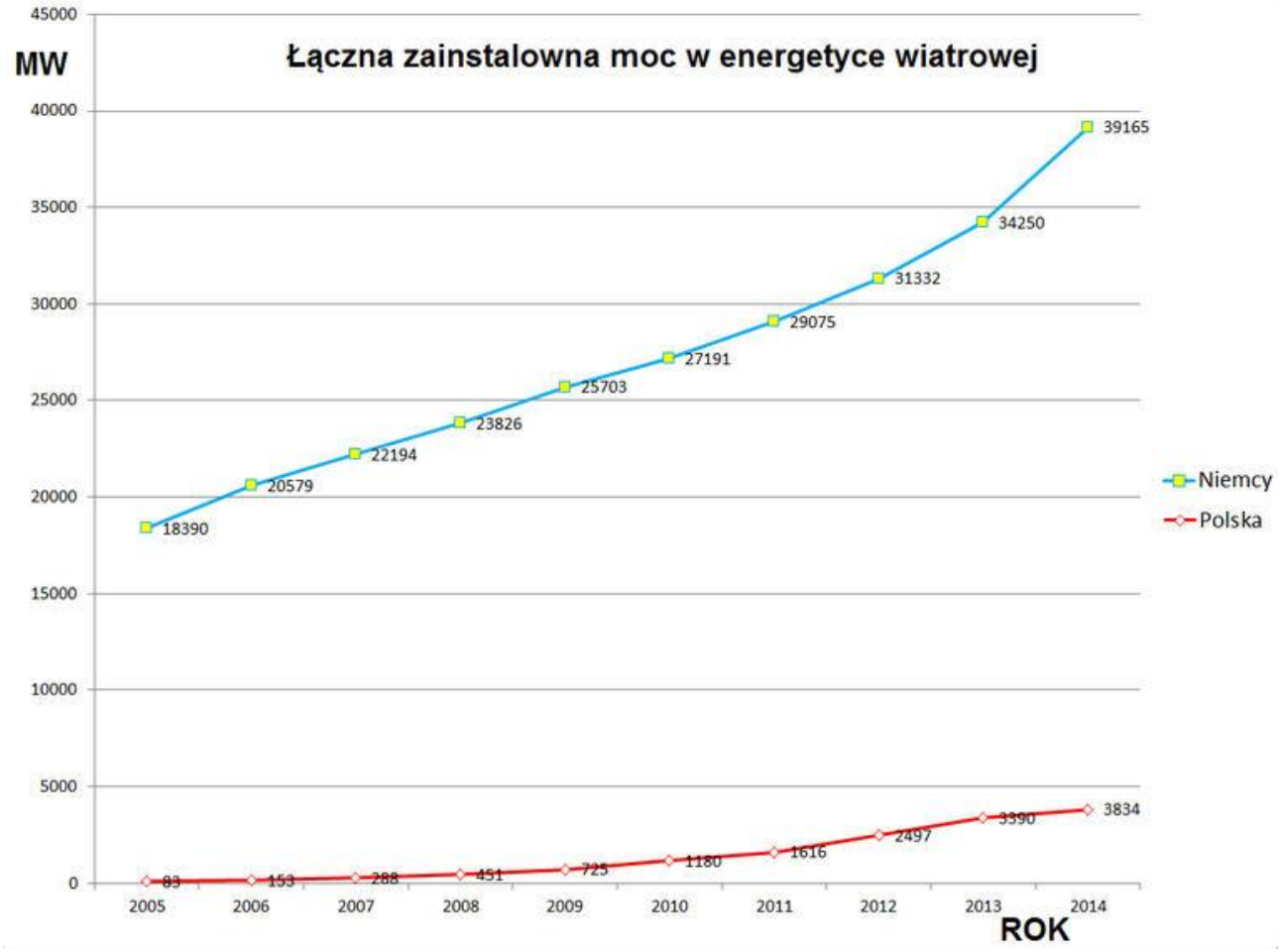
Energetyka wiatrowa w Polsce i na świecie



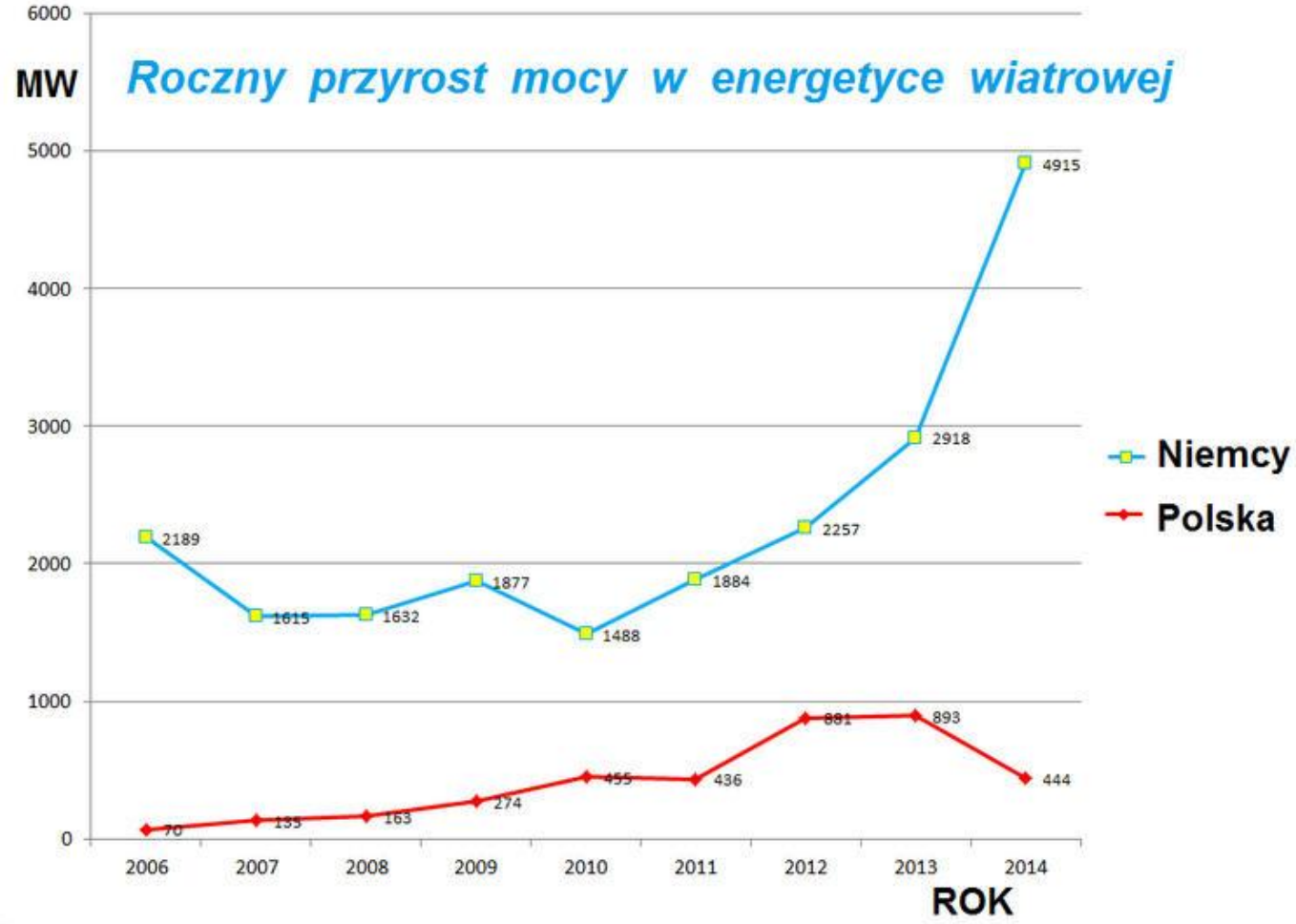


Energetyka wiatrowa w Polsce i na świecie

Porównanie łącznej zainstalowanej mocy w elektrowniach wiatrowych w Polsce i Niemczech do roku 2014 (dane z 2015 r.).



Energetyka wiatrowa w Polsce i na świecie



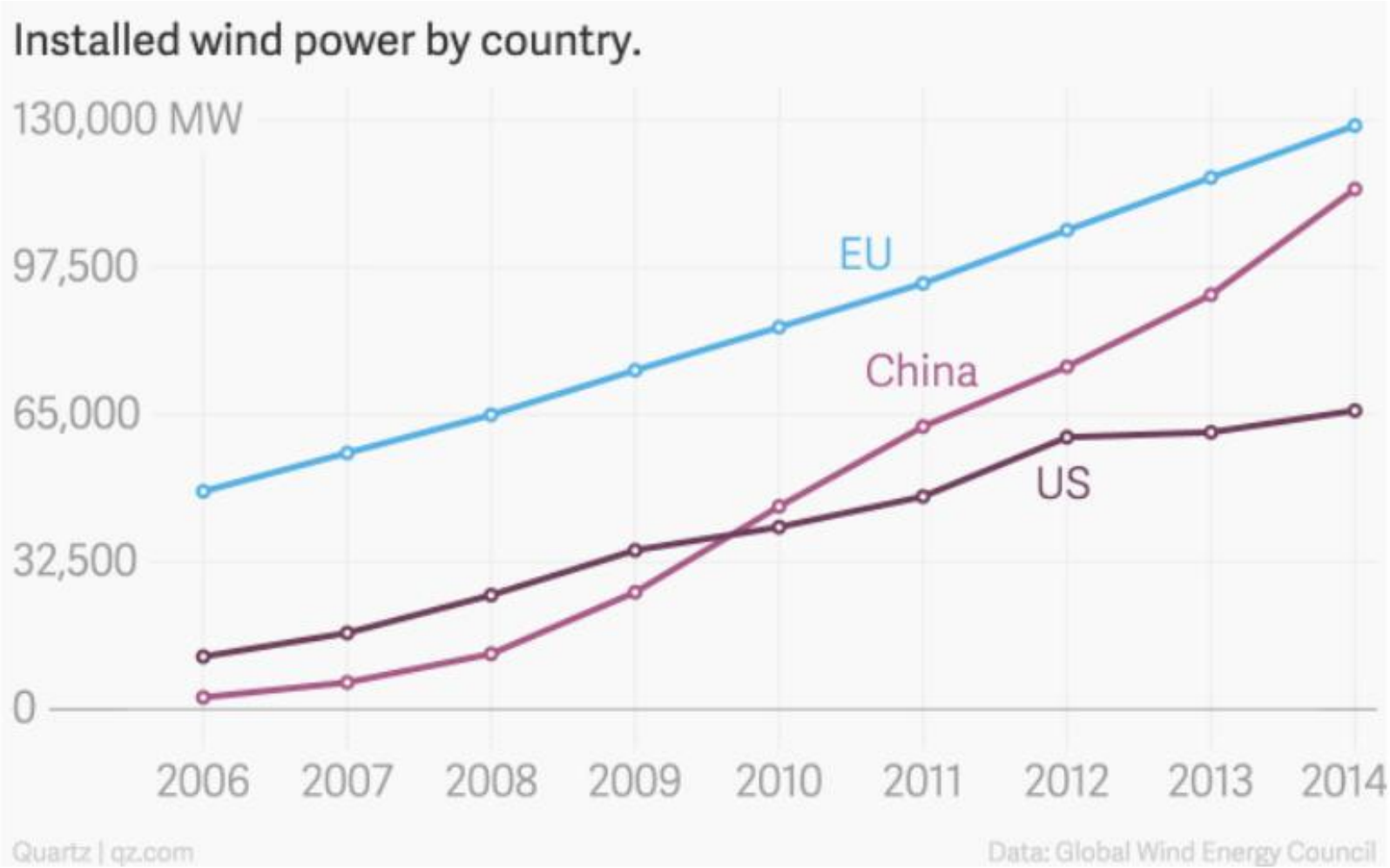
Polska w 2014 r. = przyrost o **444 MW**.
Niemcy w 2014 r. = przyrost o **4915 MW** (w tym postawiono 5279 MW i rozebrano 364 MW), czyli ponad 11 razy więcej niż w Polsce.

Repowering

Niemcy rozbierają część małych elektrowni wiatrowych a w ich miejsce stawiają duże. Taki proces nazywamy **repoweringiem**.

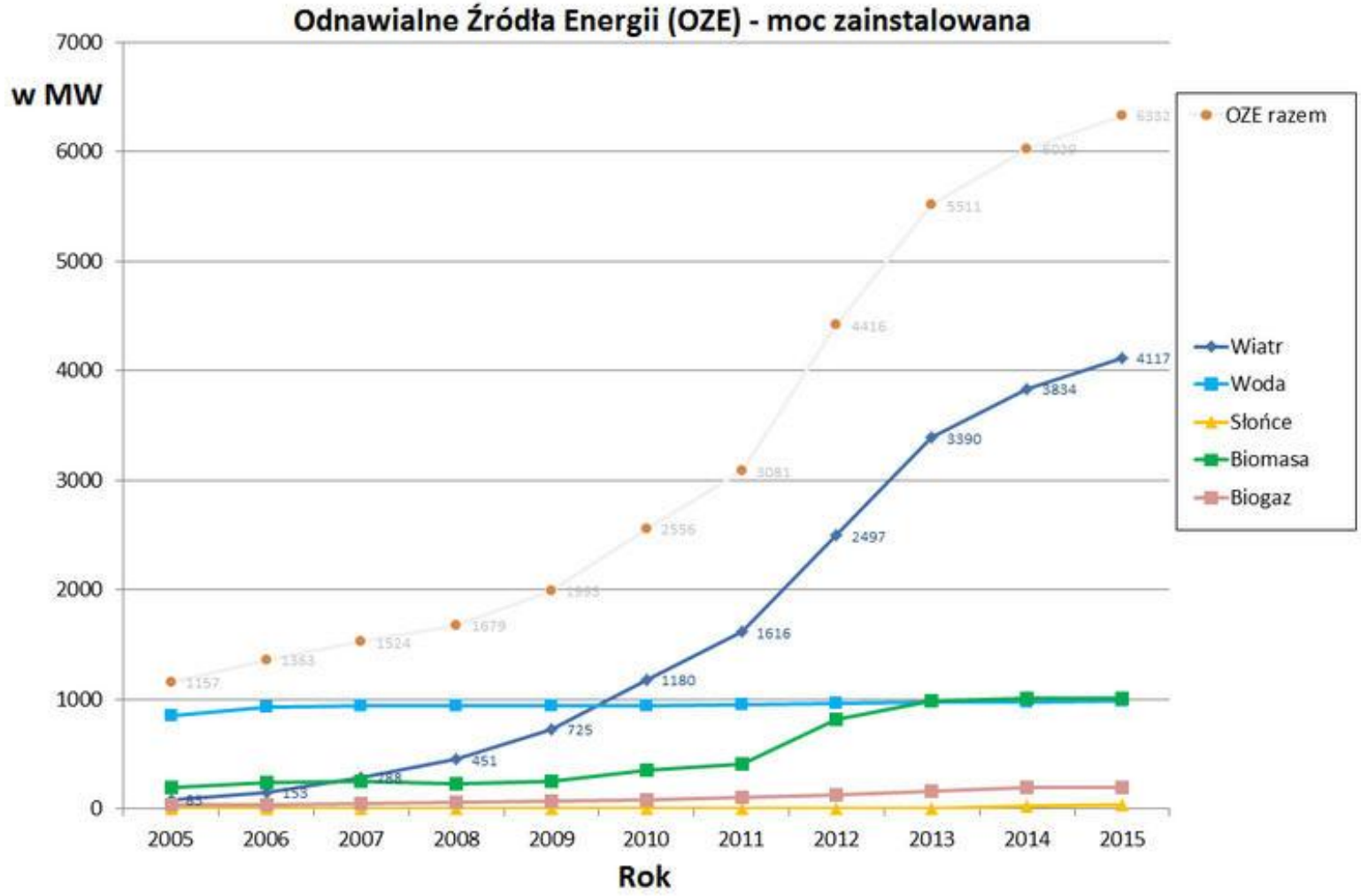
Energetyka wiatrowa w Polsce i na świecie

Zainstalowana moc w energetyce wiatrowej wg państw i regionów:



Energetyka wiatrowa w Polsce i na świecie

Rozwój rynku OZE w Polsce (źródło: ure.gov.pl):



Energetyka wiatrowa w Polsce i na świecie

Rozwój rynku OZE w Polsce (źródło: ure.gov.pl), c.d.

Rodzaj OZE	Moc zainstalowana [MW], wg stanu na 30.06.2015 r.					
	2005 r.	2006 r.	2007 r.	2008 r.	2009 r.	2010 r.
	[MW]	*[MW]*	*[MW]*	*[MW]*	*[MW]*	*[MW]*
Elektrownie na biogaz	31,972	36,760	45,699	54,615	70,888	82,884
Elektrownie na biomasę	189,790	238,790	255,390	231,990	252,490	356,190
Elektrownie wytwarzające e.e. z promieniowania słonecznego	-				0,001	0,033
Elektrownie wiatrowe	83,280	152,560	287,909	451,090	724,657	1 180,272
Elektrownie wodne	852,495	934,031	934,779	940,576	945,210	937,044
Łącznie	1 157,537	1 362,141	1 523,777	1 678,271	1 993,246	2 556,423
wzrost r/r		204,604	161,636	154,494	314,975	563,177

Rodzaj OZE	Moc zainstalowana [MW], wg stanu na 30.06.2015 r.				
	2011 r.	2012 r.	2013 r.	2014 r.	2015 r.
	[MW]	*[MW]*	*[MW]*	*[MW]*	*[MW]*
Elektrownie na biogaz	103,487	131,247	162,241	188,549	191,381
Elektrownie na biomasę	409,680	820,700	986,873	1 008,245	1 008,245
Elektrownie wytwarzające e.e. z promieniowania słonecznego	1,125	1,290	1,901	21,004	35,586
Elektrownie wiatrowe	1 616,361	2 496,748	3 389,541	3 833,832	4 117,421
Elektrownie wodne	951,390	966,103	970,128	977,007	980,323
Łącznie	3 082,043	4 416,088	5 510,684	6 028,637	**6 332,956**
wzrost r/r	525,620	1 334,045	1 094,596	517,953	304,319

Najwyższe wieże elektrowni wiatrowych na świecie:

160 m - kratowy (m.in. w Polsce - Nowy Tomyśl)

140-150 m - kilka firm (konstrukcja mieszana, np: betonowo-rurowa/kratowa)

Zdj. Najwyższa wieża wiatrowa na świecie (stan na 2015 r.) **o wysokości 160 m;** wysokość całkowita konstrukcji do 210 m;
Turbina FL-2,5 MW, rotor 100 m średnicy.

Najwyższe wieże elektrowni wiatrowych na świecie, c.d.

Zdj. **Wieża 141 m** - Nordex 2,4 MW N117.
Dla porównania drzewa poniżej
o wysokości około 20-30m.

Najwyższe turbiny wiatrowe świata - wysokość całkowita (wieża + rotor):

Vestas V164-8MW = **222 m** (wieża 140 m + łopata 82 m)

Fuhrländer FL-2500/100 = **210 m** (wieża 160 m + łopata 50 m)

200-207 m = wielu producentów (turbiny 3-7,5 MW).

Największe rotory elektrowni wiatrowych (średnica):

Samsung S7/171 = **171 m**

Mitsubishi MWT-Sea Angel 7/167 = **167 m**

Vestas V164-8,0 MW = **164 m**

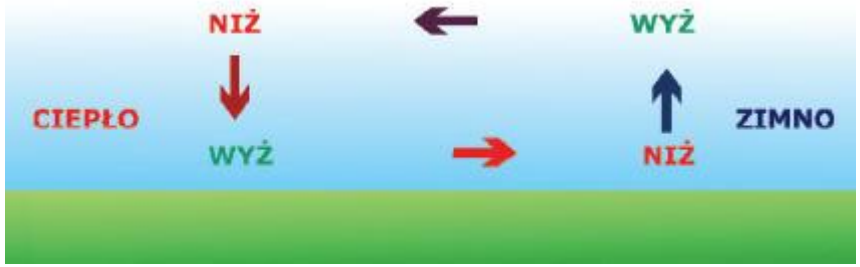
Zdj. Mitsubishi MWT-Sea Angel –
- 7,0 MW/167 - 7,0 MW, rotor 167 m

Zdj. SIEMENS SWT-7.0-154

Wiatr

Wiatr jest efektem przemieszczania się mas powietrza z obszarów o wyższym ciśnieniu, do obszarów o ciśnieniu niższym; a przyczyną wszelkich ruchów powietrza na Ziemi jest **energia słoneczna**.

Lub, inaczej…
Wiatr jest zjawiskiem wynikającym z ruchu cząstek powietrza; powstaje pod wpływem nagrzewania się powierzchni Ziemi w wyniku działania promieniowania słonecznego;
można powiedzieć, że:
energia wiatru jest przekształconą energią Słońca.



Rys. Powstawanie wiatru – przepływ mas powietrza

Wiatr; c.d.

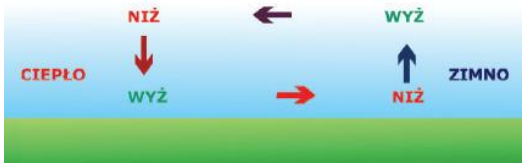
Charakterystyka wiatru

Wiatr powstaje na skutek **różnicy ciśnień i temperatur**,
wieje z różnym natężeniem, z różnych kierunków na **różnych terenach**,
a parametry te **zmieniają się w czasie**.

Ciśnienie atmosferyczne – stosunek wartości siły z jaką słup powietrza atmosferycznego naciska na powierzchnię Ziemi [F/A = N/m2 = Pa]

Niż baryczny – obszar niskiego ciśnienia atmosferycznego; przy przyjściu niżu barycznego można zaobserwować spadek ciśnienia i zmianę innych parametrów (temperatura lub zachmurzenie).

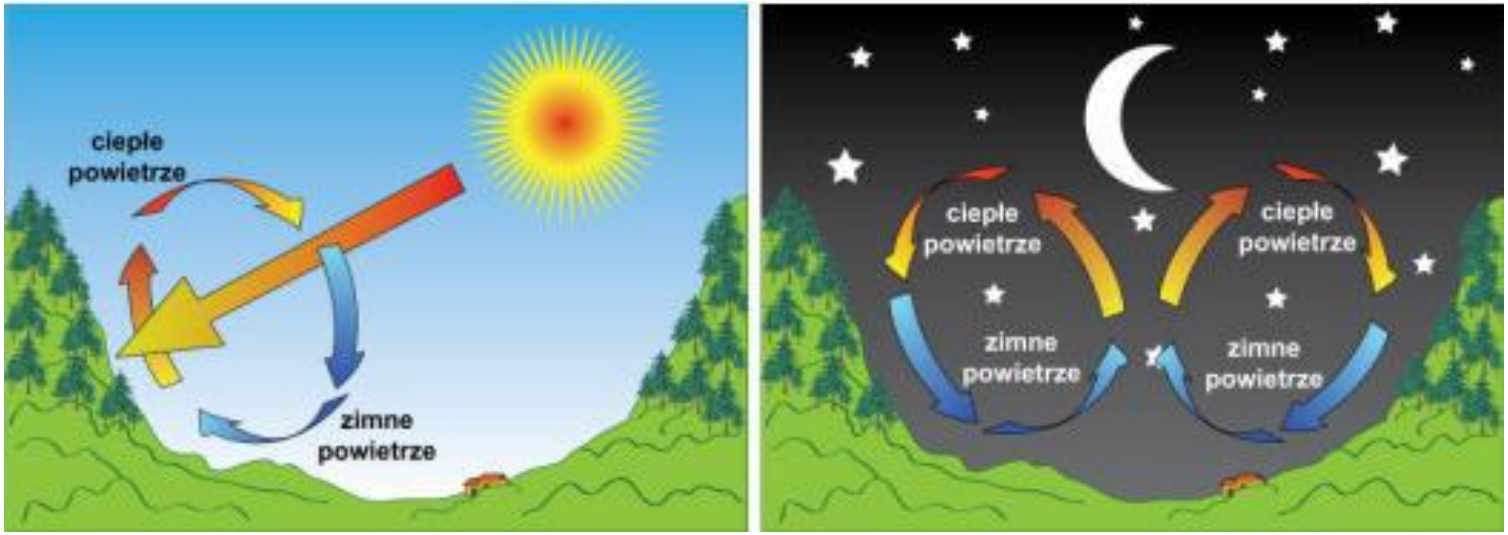
Wyż baryczny – obszar wysokiego ciśnienia atmosferycznego.



Wiatr, c.d.

Stoki górskie w dzień szybciej się ogrzewają niż zacienione doliny, ale w nocy szybciej też się schładzają.

Ciepłe powietrze unosi się do góry, bo jest lżejsze, dlatego w górach w dzień wiatr wieje po zboczu w górę, a w nocy od strony zbocza w dół.



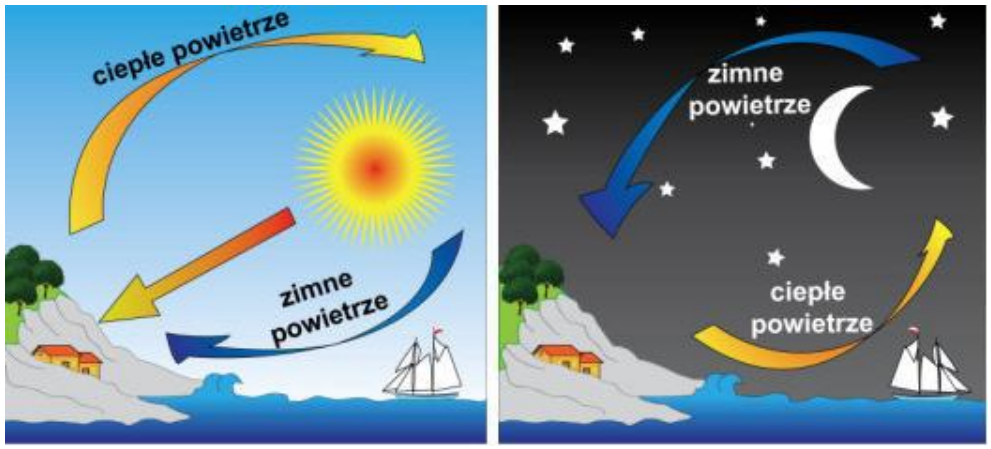
Rys. Powstawanie wiatru w górach

Wiatr, c.d.

U wybrzeży rozkład wiatru również się zmienia w ciągu doby.

W dzień ląd bardzo szybko ogrzewa się od słońca; ciepłe powietrze unosi się do góry, a na jego miejsce napływa chłodne powietrze od morza - jest **to bryza morska**, która przyjemnie chłodzi w upalne dni.

Woda długo się nagrzewa, ale również długo schładza, dlatego w nocy nadal pozostaje ciepła; ląd ochładza się szybciej, dlatego w nocy wiatr wieje od lądu w kierunku morza.



Rys. Powstawanie wiatru nad morzem

Wiatr, c.d.

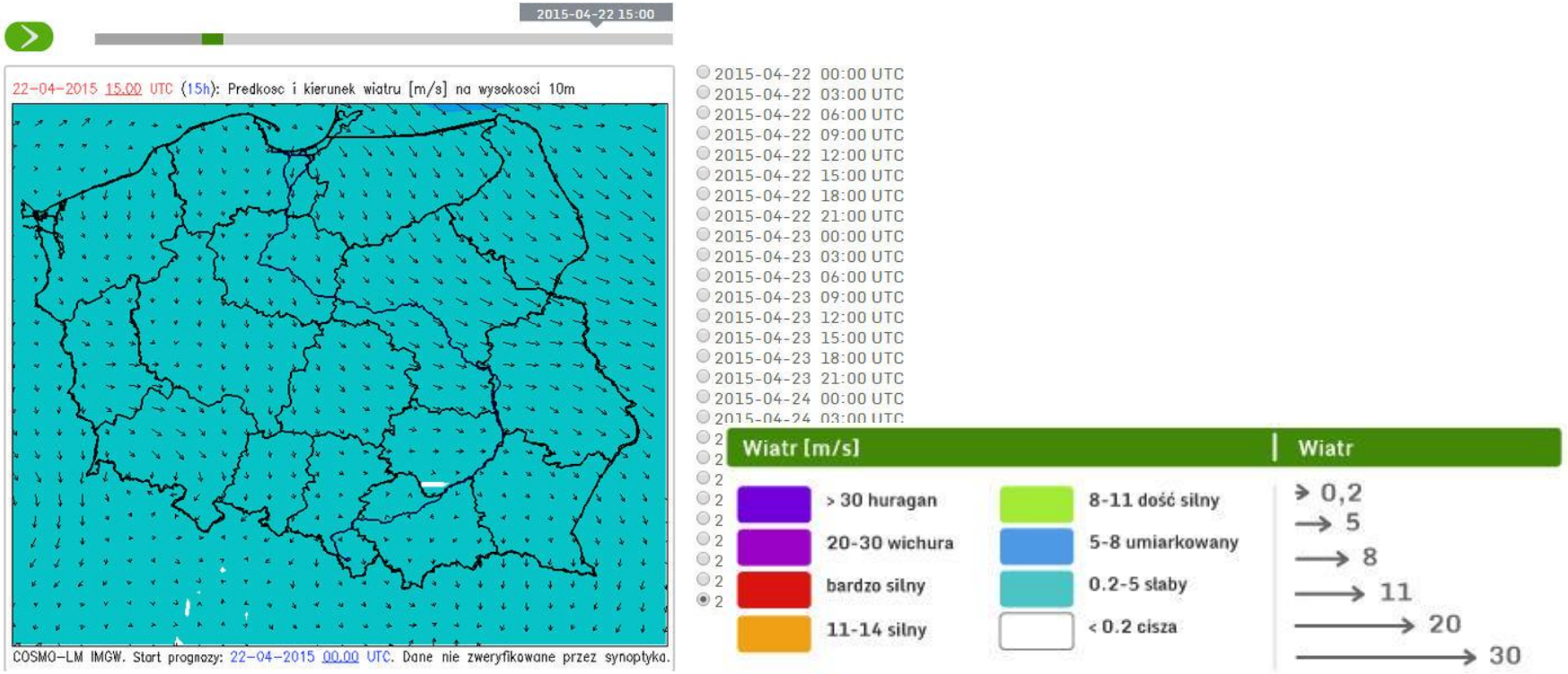
Istotny wpływ na pracę elektrowni wiatrowych (EW) ma **temperatura** i **ciśnienie powietrza**.

Zmniejszenie/zwiększenie temp. powietrza o **15°C**, powoduje wzrost/spadek energii kinetycznej wiatru o ok. **5%**.

Wzrost/spadek ciśnienia o ok. **60 hPa**, powoduje wzrost/spadek energii kinetycznej wiatru o ok. **5%**

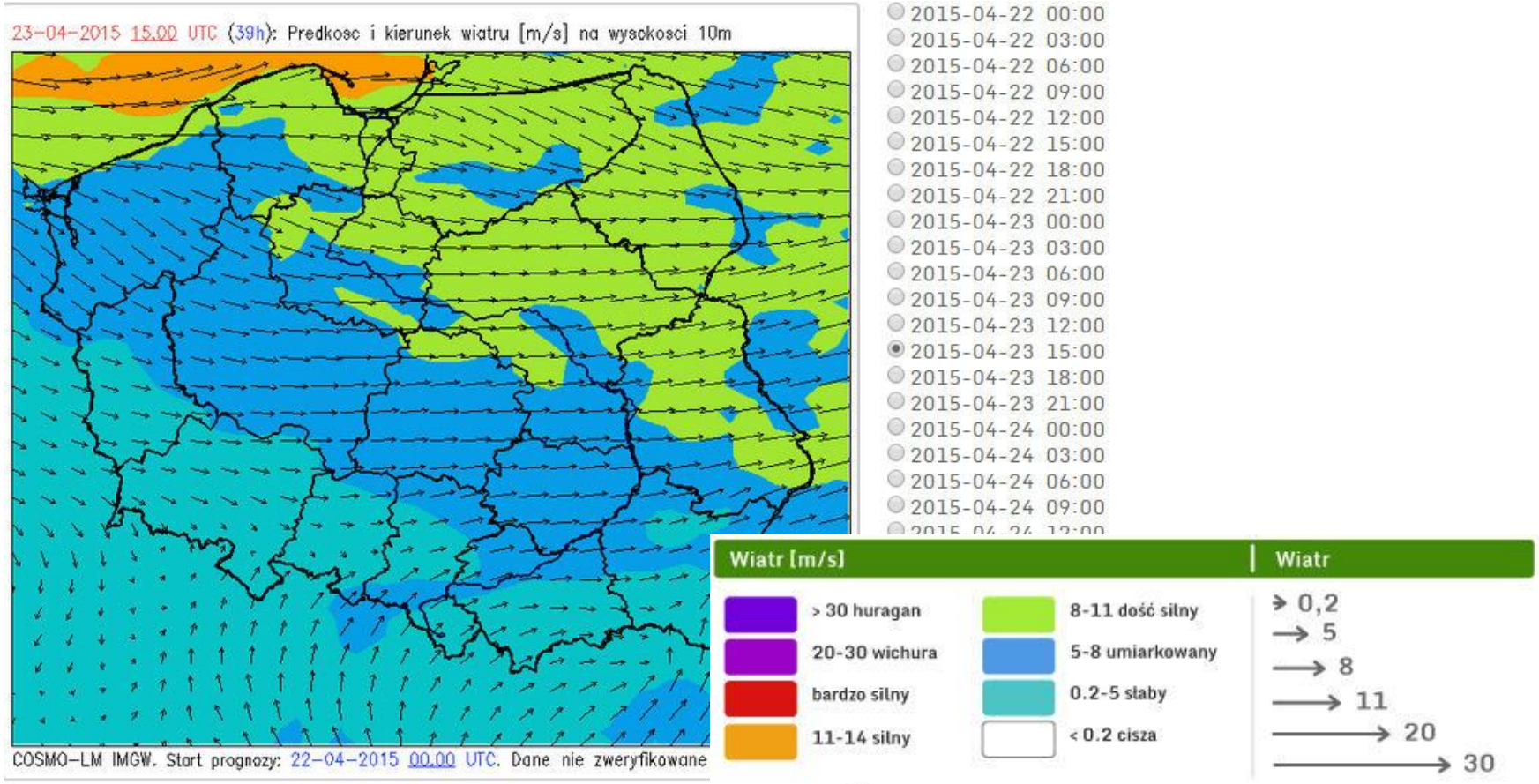
Wiatr, c.d.

Prędkość i kierunek wiatru, podawany w m/s na wysokości 10 m. Jest to prognoza numeryczna – aktualizowana dwa razy na dobę: około 7:00 i 19:00: http://www.pogodynka.pl/polska/wiatr/



Wiatr, c.d.

Prędkość i kierunek wiatru; c.d.



Wiatr, c.d.

Prędkość i kierunek wiatru; c.d.

Dane obserwacyjno-pomiarowe:

http://www.pogodynka.pl/polska/numeryczna

Polska • **Dane obserwacyjno-pomiarowe**

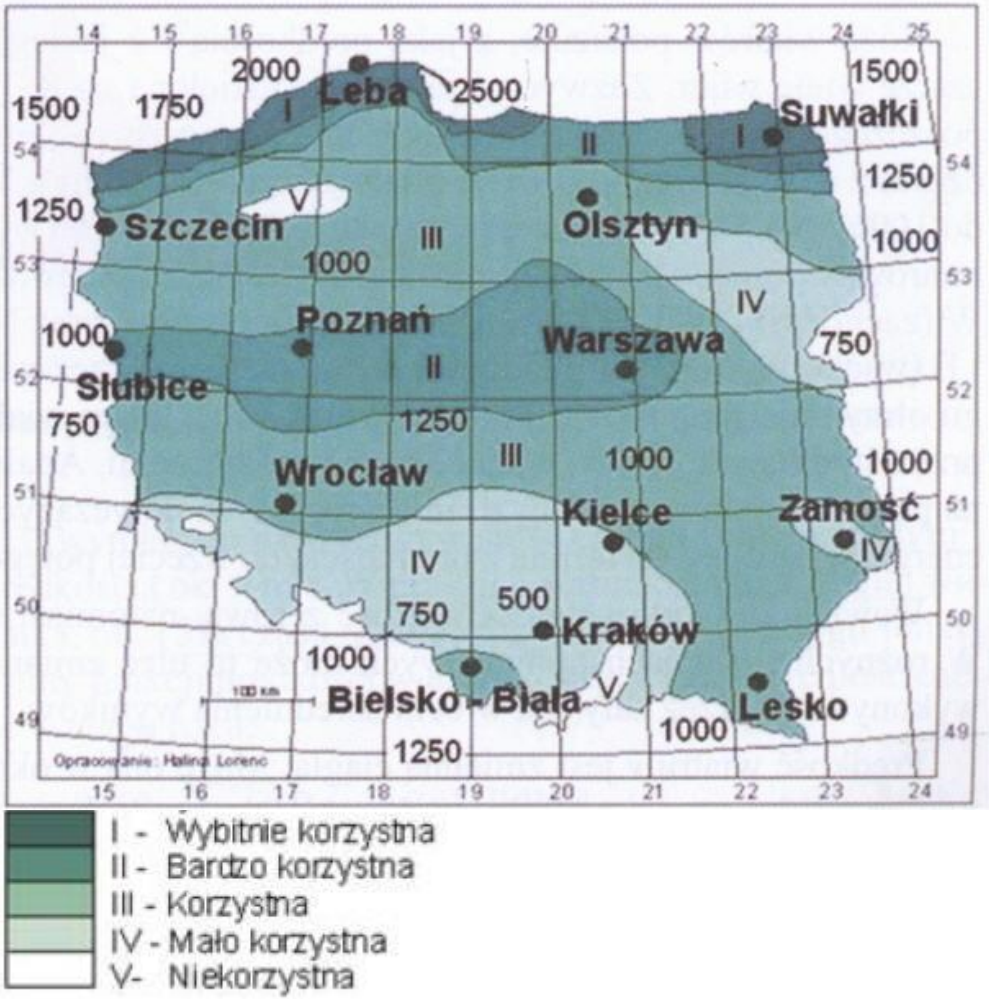
Data pomiaru (UTC): 2015-04-22 09:00:00

Miasto	Ciśnienie	Prędkość wiatru	Kierunek Wiatru	Temperatura	Zachmurzenie
Łeba	1024 hPa	3 m/s		7.9°C	
Elbląg	1001 hPa	1 m/s		10.3°C	
Suwałki	1000 hPa	4 m/s		10.5°C	
Szczecin	1024 hPa	1 m/s		8.6°C	
Chojnice	1003 hPa	2 m/s		11°C	
Toruń	1015 hPa	2 m/s		11.8°C	
Mława	1005 hPa	2 m/s		11.4°C	

- MAPA SYNOPTYCZNA
- WIATR
- ZACHMURZENIE
- KOMENTARZ SYNOPTYKA
- PROGNOZA TEKSTOWA
- ZDJĘCIA SATELITARNE
- **DANE POMIAROWE**
- WARUNKI ŚNIEGOWE
- TEMPERATURY WÓD
- DANE KLIMATYCZNE

Mapa wiatru

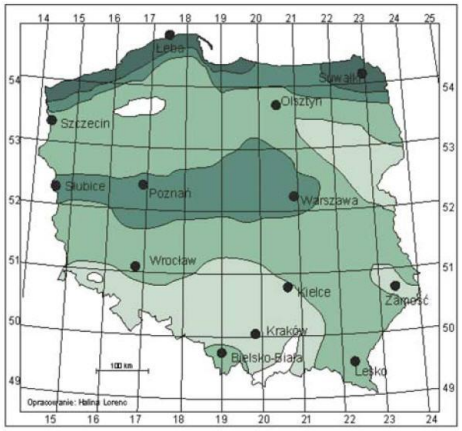
Poprzez wieloletnią obserwację prędkości oraz kierunku wiatru na różnych obszarach kraju tworzy się i wciąż uaktualnia tzw. **mapę wiatrową**, która określa obszary kraju pozwalające na umieszczenie na nich farm wiatrowych.

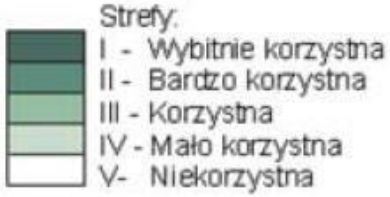


Rys. Klasyfikacja obszaru kraju pod względem możliwości wykorzystania energii wiatru. Liczby na mapie – **energia wiatru** w **kWh/m2rok**, na wysokości **30 m** nad poziomem gruntu, na podstawie pomiarów IMiGW w latach 1971-2000

Lokalizacja elektrowni wiatrowej

Wybrzeże Bałtyku – najkorzystniejszy obszar do lokalizacji EW.





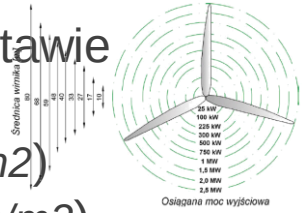
Rozmieszczenie farm wiatrowych na terenie Polski (na niebiesko zaznaczono farmy w budowie)

Aby poznać charakterystykę wietrzności danego obszaru, przeprowadza się przez co najmniej 12 miesięcy pomiary na wysokości 40 lub 50 m.

Lokalizacja elektrowni wiatrowej, c.d.

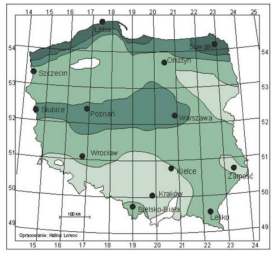
Roczne zasoby energetyczne wiatru, możliwe do wykorzystania w Polsce, ocenia się na ok. **50%** obecnego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Suma energii wiatru w Polsce: na **1 m2** powierzchni wirnika, wynosi : **1.000 – 1.500 kWh/m2rok** (źródło IMGW).



Teoretyczna roczna produkcja energii elektrycznej, w 2004r. (na podstawie pomiarów wiatru):
- siłownia 225 kW: 505 MWh/rok (*D=27 m*; *2.244 kWh/kW; ok. 882 kWh/m2*)
- siłownia 500 kW: 1.022 MWh/rok (*D=40 m; 2.044 kWh/kW; ok. 814 kWh/m2*)
- siłownia 2.000 kW: 5.500 MWh/rok (*D=68 m; 2.750 kWh/kW; ok. 1.515 kWh/m2*)

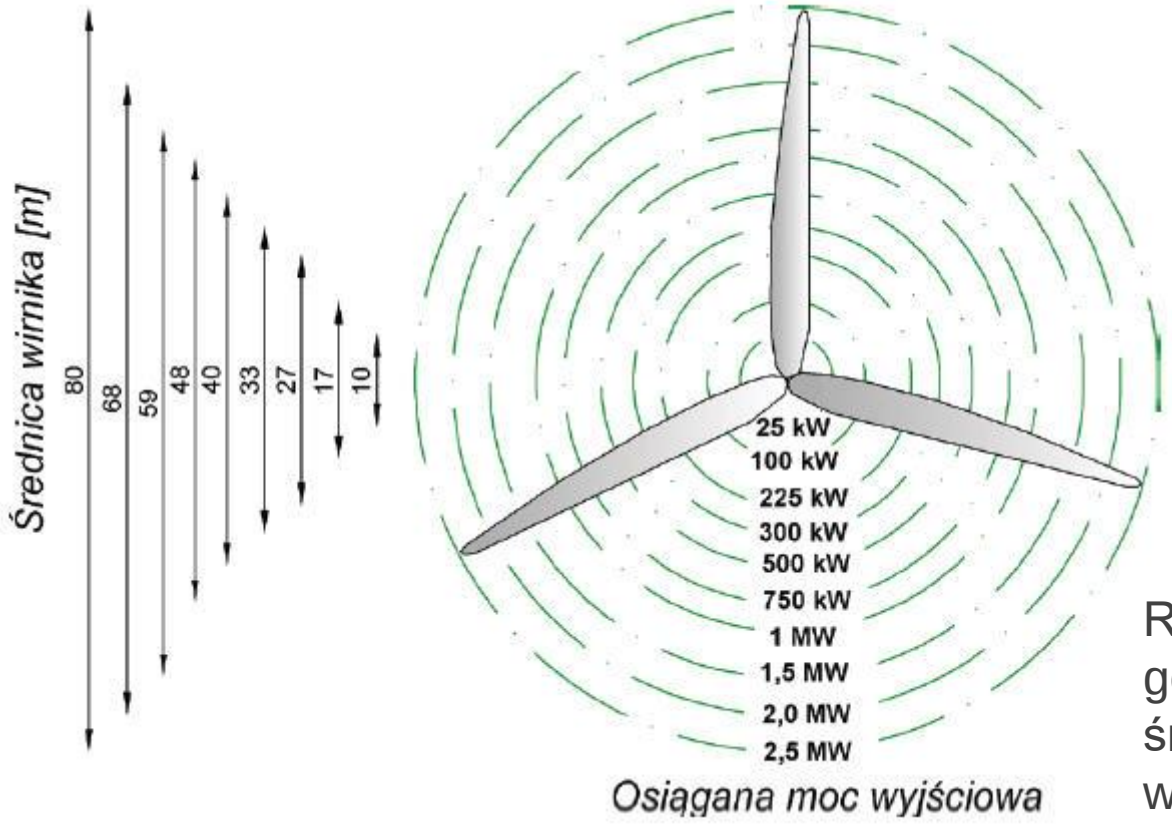
Sprawność układu turbiny wiatrowej i prądnicy, wynosi **od ok. 25%** dla małych elektrowni (np. 3 kW), **do ok. 50%** dla dużych (np. 2.000 kW).



Do celów energetycznych interesujące są dopiero prędkości wiatru **powyżej 4 m/s** (prawie 2/3 kraju posiada korzystne warunki wiatrowe).

Wielkość „wiatraka”

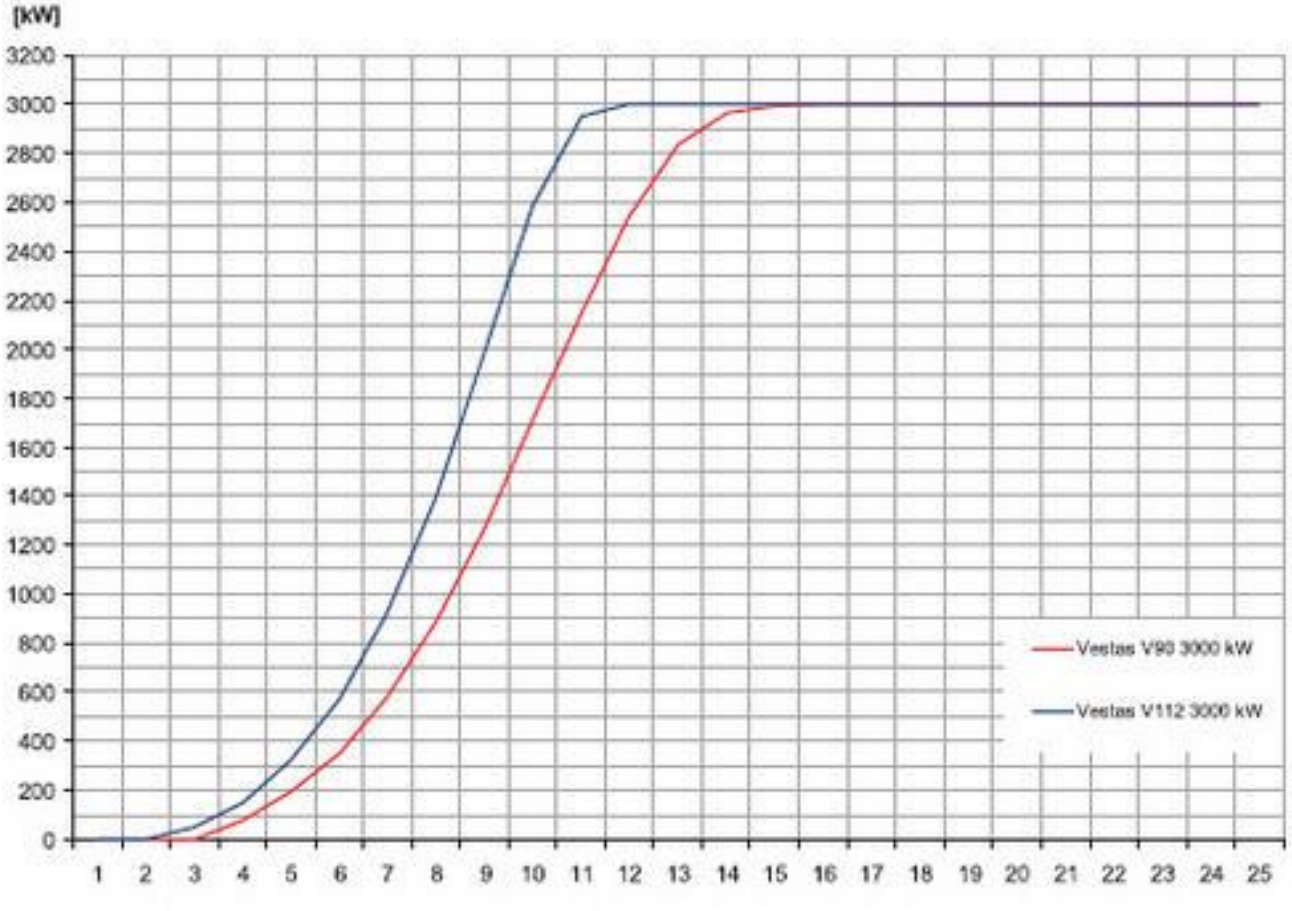
Ze wzrostem powierzchni wirnika, wydajność EW rośnie znacznie szybciej, niż nakłady inwestycyjne i koszty bieżące łącznie.



Rys. Orientacyjna zależność generowanej mocy od średnicy wirników turbiny wiatrowej

Wielkość „wiatraka”, c.d.

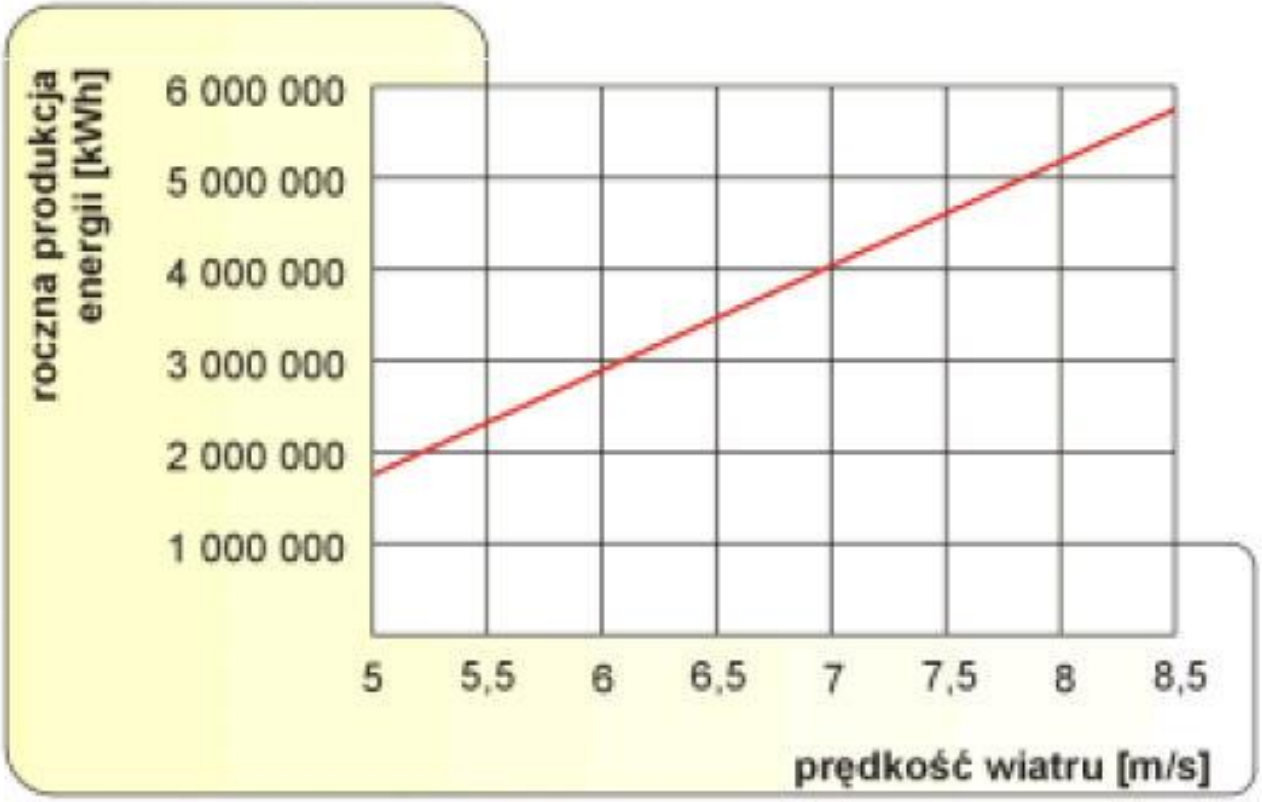
Moc turbiny wiatrowej w zależności od prędkości wiatru:



Rys. Porównanie turbin wiatrowych firmy Vestas, o mocy 3.000 kW, w zależności od średnicy wirnika: V90 – długość łopatek 34 m; V112 – długość 54,6 m.

Energia użyteczna

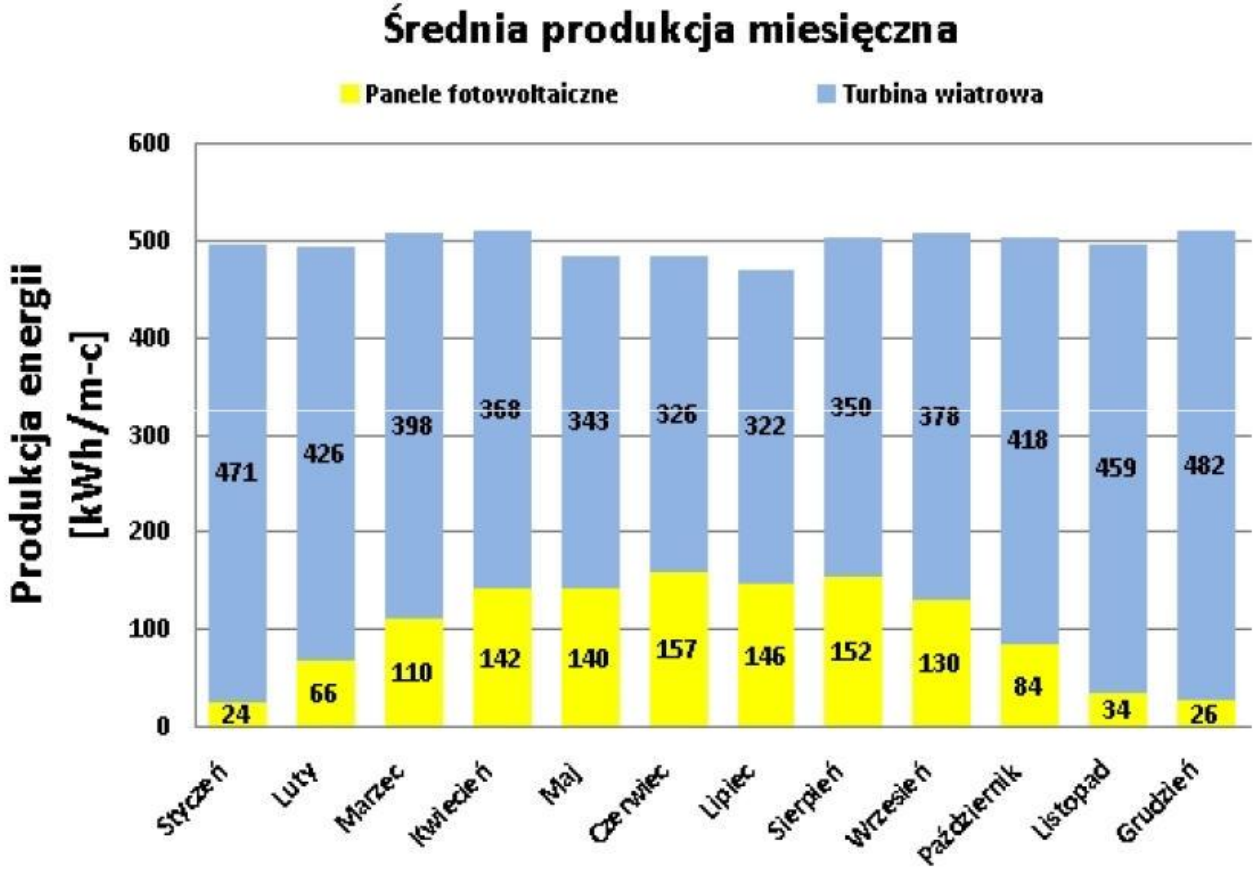
Przykładowa roczna produkcja energii elektrycznej w EW, w zależności od średniorocznej prędkości wiatru :



Rys. Wykres dla elektrowni: GW Wind Energy 1.5s. **1.500 kW** (1,5 MW)

Energia użyteczna; c.d.

Przykładowa roczna produkcja energii elektrycznej w EW i instalacji fotowoltaicznej w poszczególnych miesiącach roku:

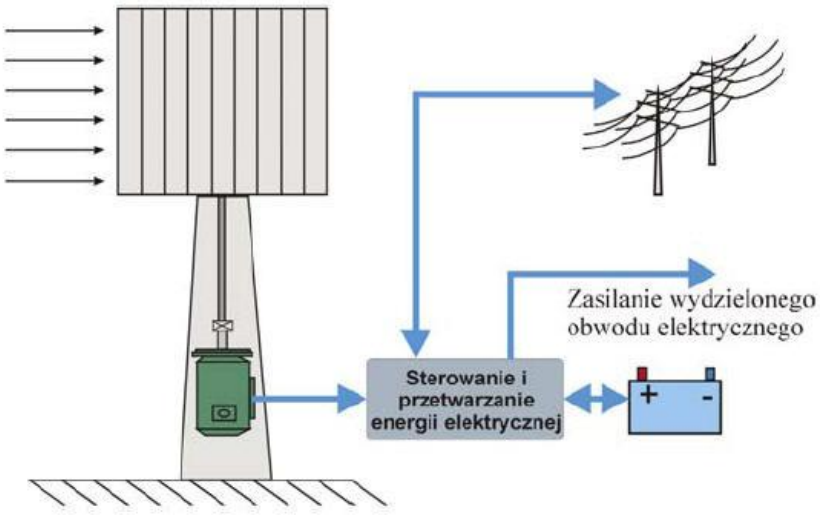


Orientacyjna ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez turbinę WHI-500 (**3 kW**) i instalacji fotowoltaicznej o mocy **1,26 kWp**

Zastosowanie „wiatraków”

Najczęściej spotykane siłownie wiatrowe (zwane wiatrakami) wykorzystywane są do produkcji energii elektrycznej.
Mogą one współpracować z siecią energetyki zawodowej lub być układami autonomicznymi.

Innym zastosowaniem, nadal niedocenianym w Polsce, jest ich wykorzystanie do pompowania wody – np. do nawadniania pól lub osuszania gruntów.

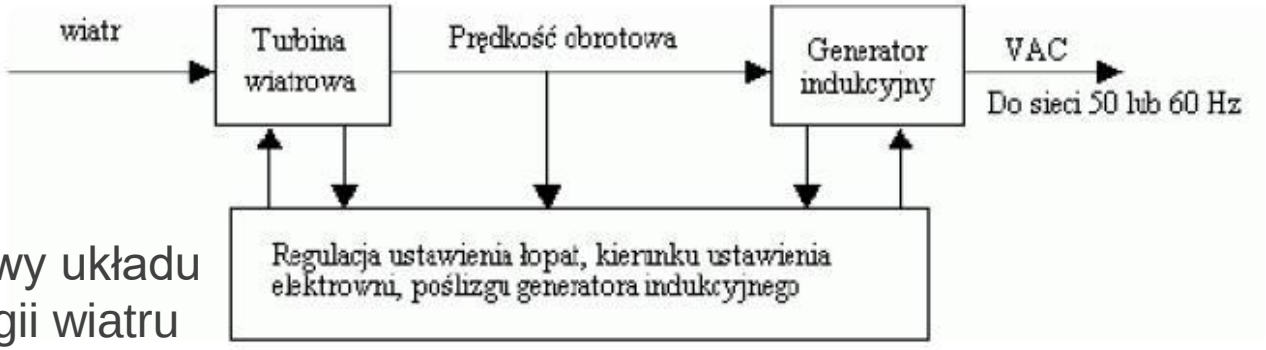


Rys. Koncepcja wykorzystania energii elektrycznej z EW

Zastosowanie „wiatraków”, c.d.

Podstawowym elementem każdej siłowni wiatrowej jest wirnik. Umożliwia on zamianę energii kinetycznej ruchu cząstek powietrza w energię mechaniczną – ruch obrotowy wirnika. Następnie ruch obrotowy przekazywany jest do urządzeń wykonawczych (generator prądu elektrycznego, pompa itd.).

Najczęściej, wirniki wykonane są jako trzypłatowe, z włókna szklanego wzmocnionego poliestrem. W niektórych rozwiązaniach stosuje się zmianę kąta ustawienia łopat wirników (0-80°), realizowaną przez siłowniki hydrauliczne.

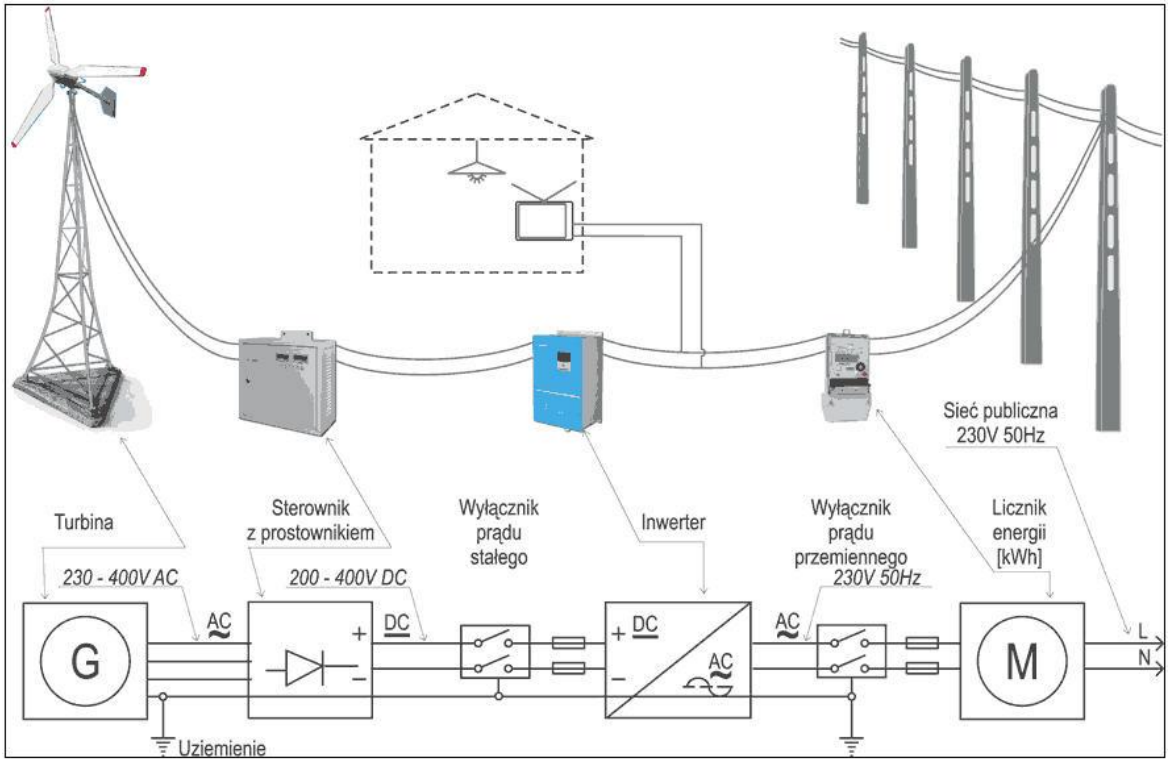


Rys. Schemat blokowy układu konwersji energii wiatru

Zastosowanie „wiatraków”, c.d.

Prędkość obrotowa turbiny zależy od prędkości wiatru.

Żeby zapewnić napięcie zmienne o odpowiedniej, niezmiennej wartości częstotliwości i amplitudy, musimy mieć pośredni obwód prądu stałego i falownik (inwerter).



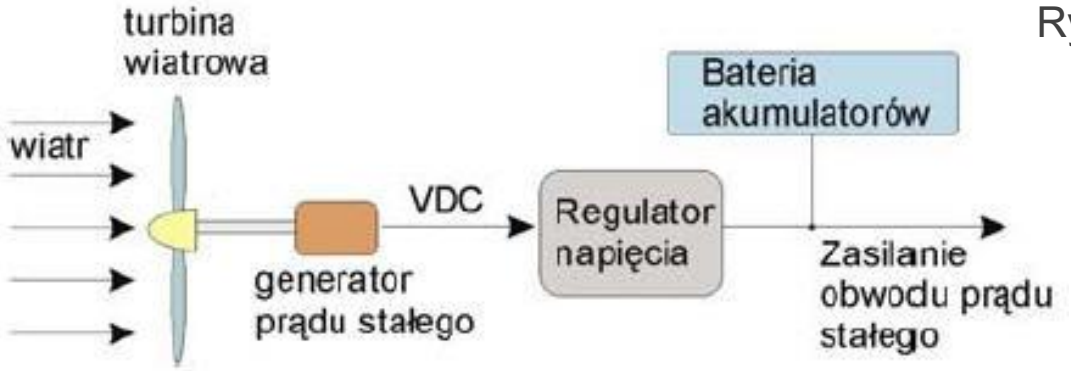
Zastosowanie „wiatraków”, c.d.

Inwerter jest „mózgiem” całego systemu. Nie tylko przetwarza prąd stały na prąd przemienny, ale nadaje mu taką charakterystykę, jaka w danej chwili występuje w sieci elektroenergetycznej, tj. reguluje napięcie i częstotliwość prądu do takich parametrów, jakie aktualnie ma prąd w sieci.

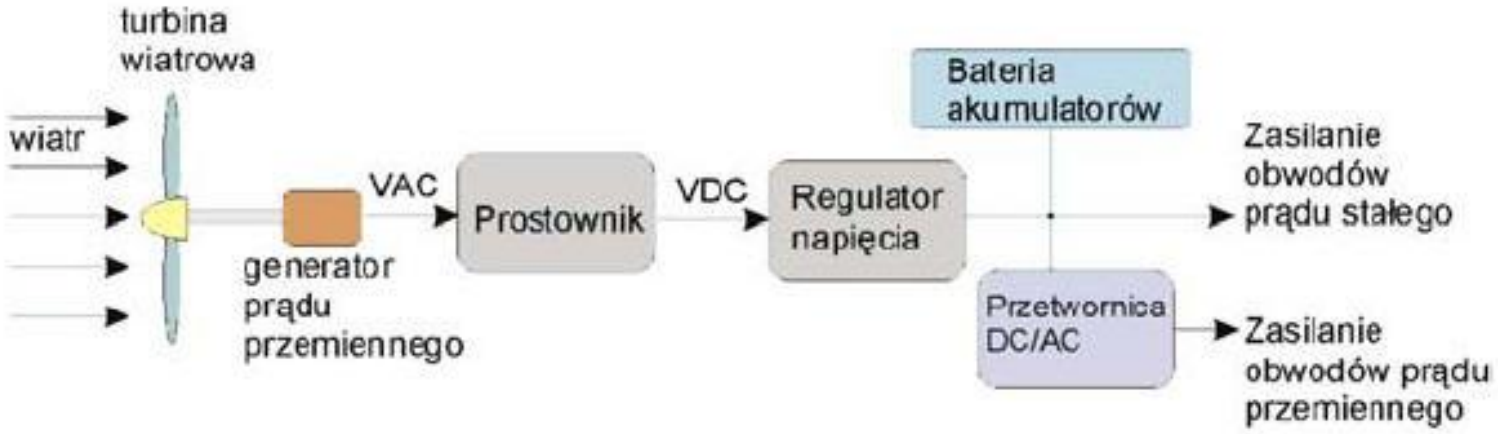
Taka synchronizacja jest konieczna dla bezproblemowego działania urządzenia, ale przede wszystkim wymagana przez zakład energetyczny dla bezpieczeństwa funkcjonowania sieci elektroenergetycznej.

Rys. Zasada generacji energii elektrycznej

Zastosowanie „wiatraków”, c.d.

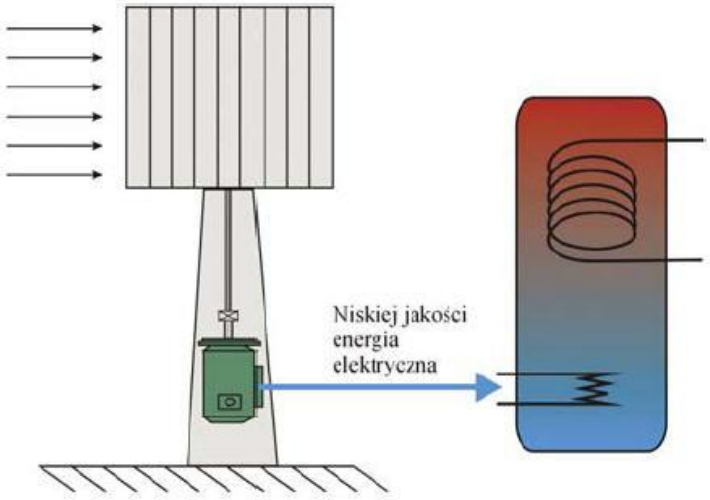


Rys. Układ autonomiczny z prądnicą prądu stałego (generator prądu stałego)

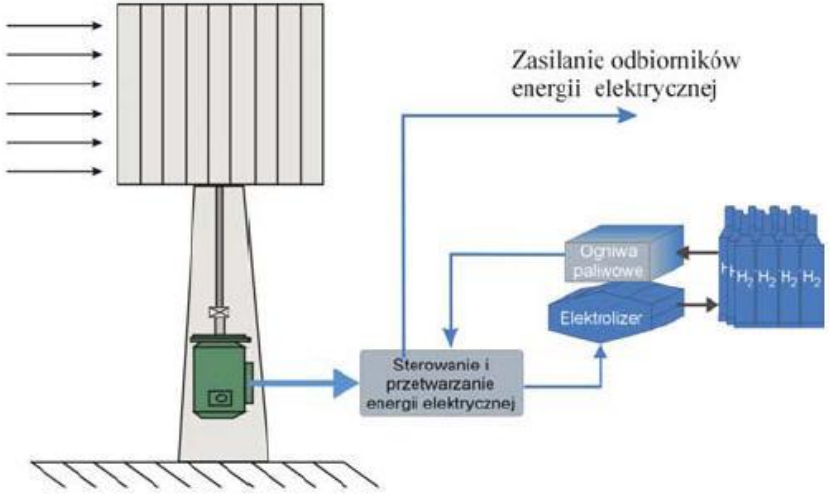


Rys. Układ autonomiczny z prądnicą prądu zmiennego

Zastosowanie „wiatraków”, c.d.

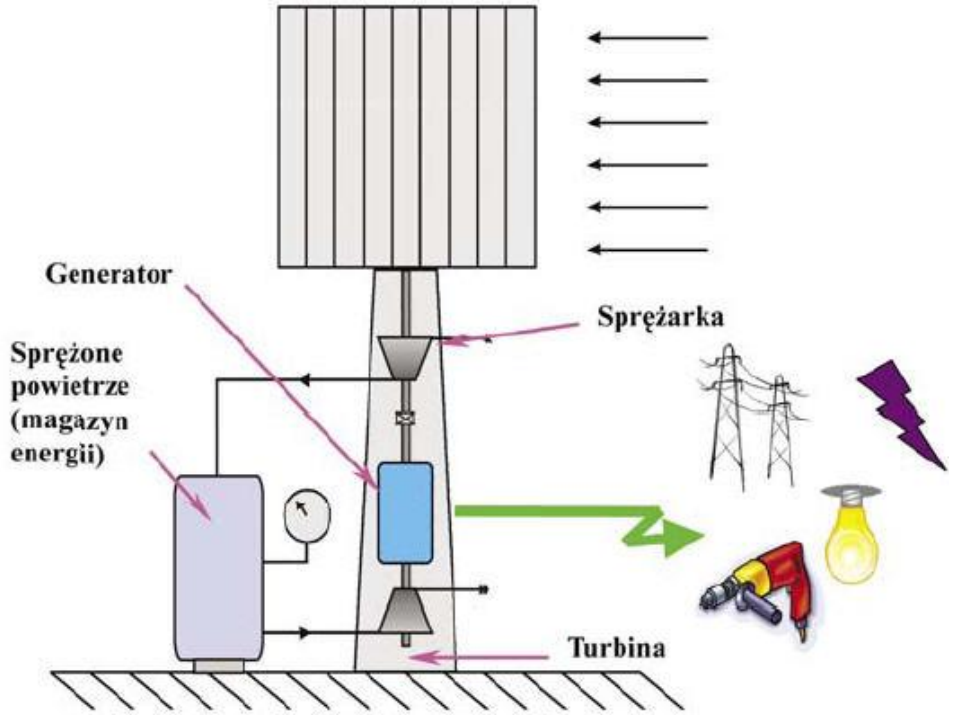


Rys. Koncepcja zamiany energii wiatru na cieplną



Rys. Koncepcja z magazynowaniem nadwyżek energii elektrycznej w wodorze

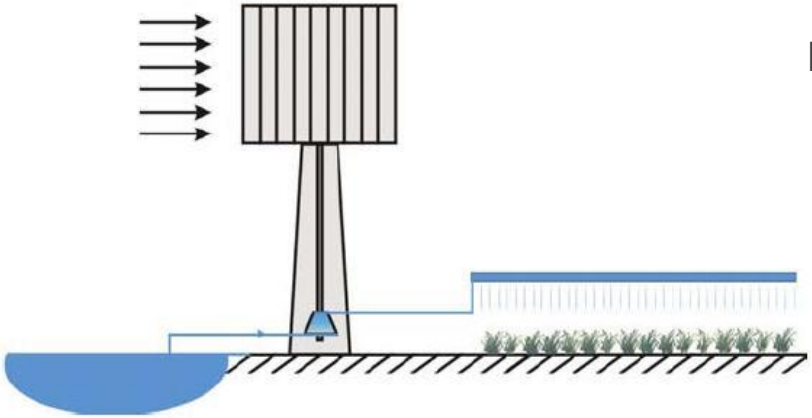
Zastosowanie „wiatraków”, c.d.



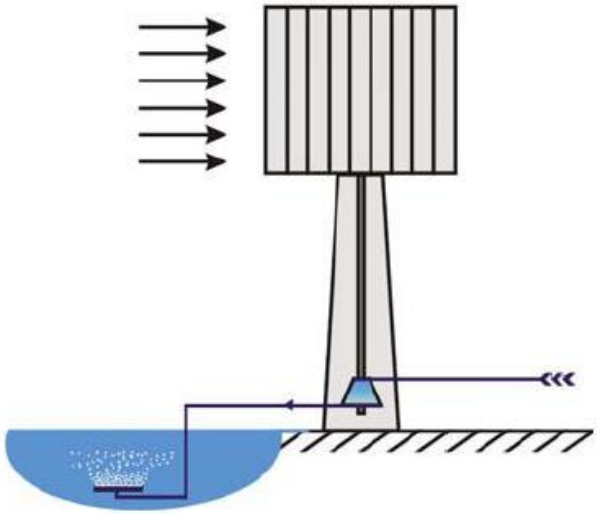
Rys. Koncepcja z magazynowaniem nadwyżek energii elektrycznej w sprężonym powietrzu

Zastosowanie „wiatraków”, c.d.

Zamiana energii wiatru na mechaniczną:



Rys. Koncepcja systemu do przepompowywania wody, nawadniania pół



Rys. Koncepcja napowietrzania jeziora

Możliwości wykorzystania siłowni i mikrosiłowni wiatrowych

- produkcja energii elektrycznej na skalę lokalną bądź krajową
- podświetlanie tablic informacyjnych i reklamowych nocą – konstrukcje VAWT (z pionową osią obrotu) nie wymagają wysokich masztów
- miejsca, gdzie wieją ekstremalnie silne wiatry: górskie chaty, nadmorskie pensjonaty – morze i góry to miejsca gdzie wiatr może osiągać duże prędkości; turbiny o pionowej osi obrotu doskonale sprawdzają się w takich warunkach i dzięki nim osiągają o wiele lepsze parametry niż ma to miejsce w warunkach normalnych
- dachy budynków, wieżowców – symulacje komputerowe pokazują ok. 30% zwiększenie prędkości wiatru kilka metrów nad dachem w porównaniu do przepływu bez obecności budynku; daje to ponad dwukrotny wzrost mocy uzyskanej dzięki usadowieniu turbiny w takim miejscu – zagęszczenie linii wiatru,

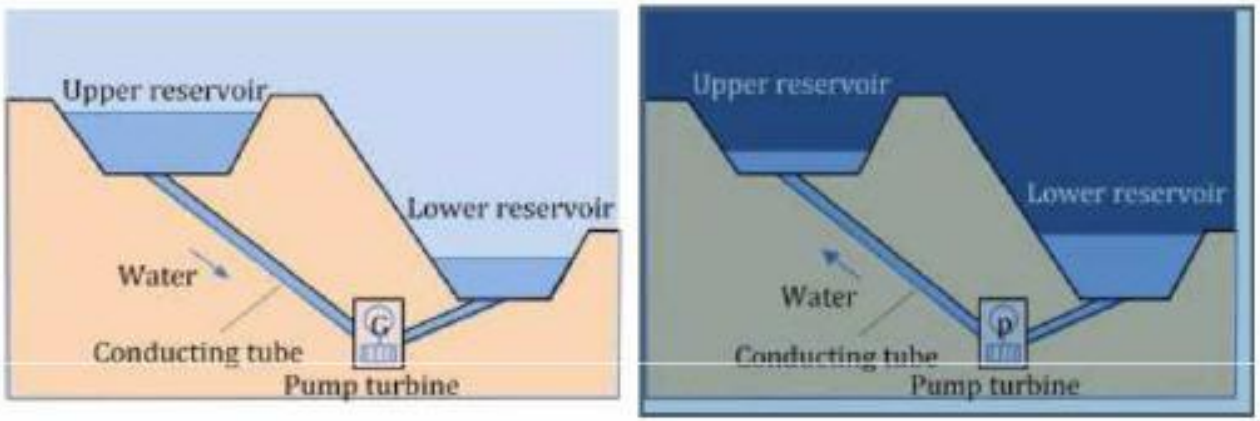
Możliwości wykorzystania siłowni i mikrosiłowni wiatrowych, c.d.

- balkony i tarasy
- domy jednorodzinne, ogrody, altanki
- morskie znaki nawigacyjne
- rolnictwo – zasilanie elektryczne maszyn i urządzeń gospodarczych
- zasilanie pomp melioracyjnych
- hodowla ryb, zasilanie urządzeń do napowietrzania i rekultywacji zbiorników wodnych
- podgrzewanie wody

Magazynowanie energii wiatru

Elektrownie wodne

Elektrownie wodne i wodne szczytowo-pompowe są najlepszym i najtańszym sposobem gromadzenia (magazynowania) energii produkowanej przez elektrownie wiatrowe.



Rys. Schemat działania elektrowni wodnej szczytowo-pompowej

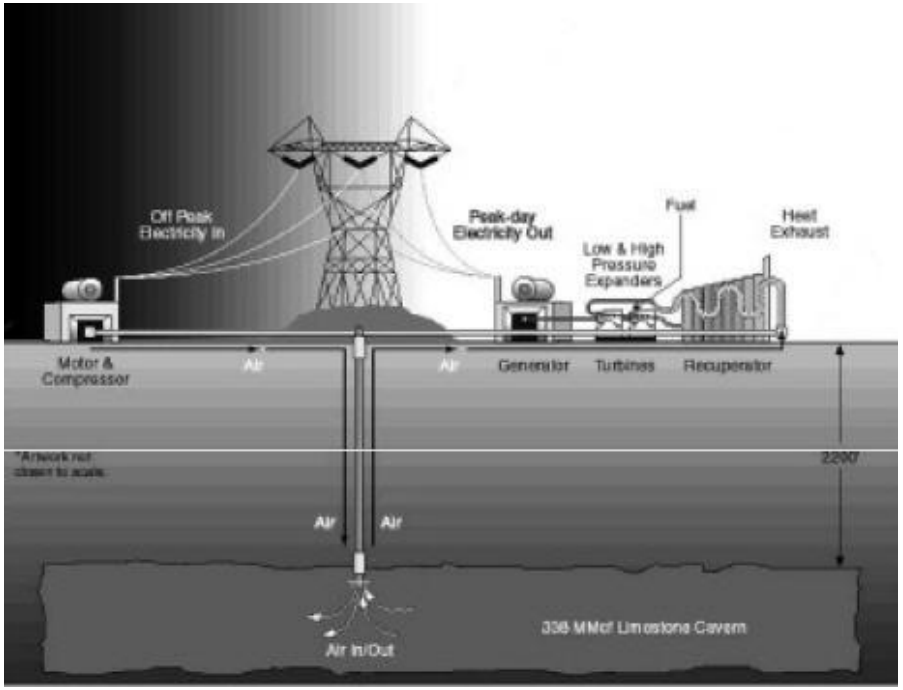
Magazynowanie energii wiatru, c.d.

Sprężone powietrze

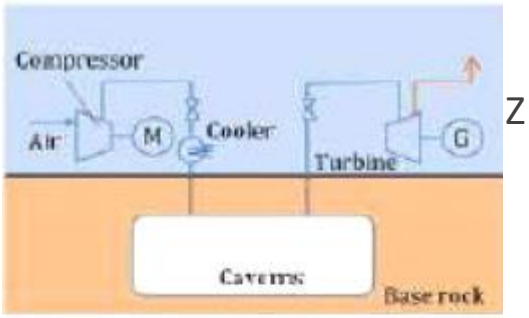
- potencjalnie bardzo wysoka sprawność
- dosyć duża „gęstość objętościowa” przechowywania energii – 10 krotnie większa niż w potencjale wodnym
- możliwość wykorzystania sprężonego powietrza w procesach technologicznych i do napędu maszyn czy urządzeń
- magazynowanie sprężonego powietrza w zbiornikach lub w istniejących obiektach, np.: grotach lub sztolniach
- w zastosowaniach praktycznych sprężone powietrze jest wykorzystywane do „doładowania” turbinowych elektrowni gazowych

Magazynowanie energii wiatru, c.d.

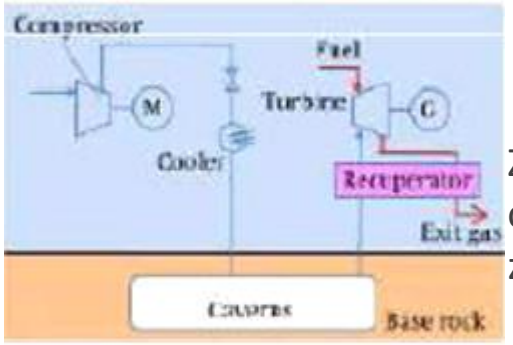
Sprężone powietrze, c.d.



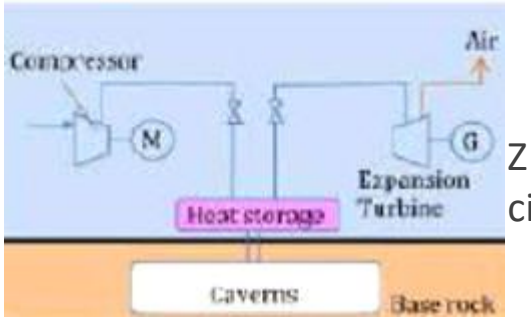
Rys. Elektrownia szczytowa wykorzystująca sprężone powietrze



Z turbiną powietrzną



Z turbiną gazową i odzyskiwaniem ciepła ze spalin



Z magazynowaniem ciepła

Magazynowanie energii wiatru, c.d.

Wodór jako środek magazynowania energii EW

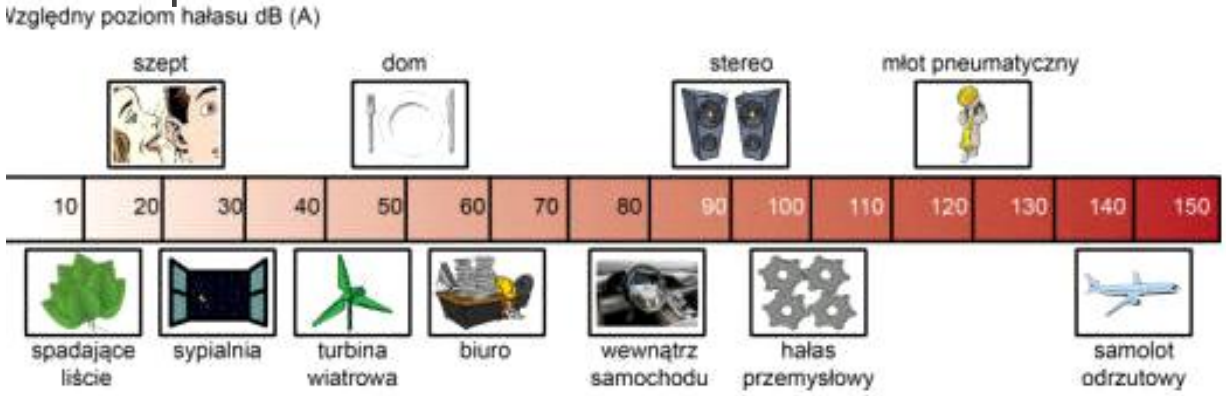
- duże trudności magazynowania wodoru: bardzo duża objętość na jednostkę energii, przenikalność wodoru przez struktury krystaliczne
- wysokie koszty transportu wodoru
- stosunkowo wysokie koszy produkcji wodoru metodami elektrolitycznymi
- możliwość użycia wodoru do produkcji paliw węglowodorowych
- tanie ogniwa paliwowe – znacznie polepszyłyby efektywność zastosowania wodoru jako środka magazynowania energii.

Oddziaływanie energetyki wiatrowej na otoczenie

Stanowisko ekologów i niektórych mieszkańców w pobliżu siłowni wiatrowych:

- **hałas** – generowany głównie przez obracające się łopatki wirnika, jako np.: pulsującego dźwięku, brzęczenia, świstu (ok. 37,9 dB w odległości 500 m); problemem jest głownie **monotonność dźwięku** i jego długotrwałe oddziaływanie na psychikę człowieka;

Przeciwdziałanie – odpowiednio duża strefa ochronna wokół elektrowni (ok. 500 m od masztu elektrowni), która zależy również od ukształtowania terenu w pobliżu elektrowni



Rys. Hałas powodowany przez różne źródła dźwięku.

Oddziaływanie energetyki wiatrowej na środowisko, c.d.

- **cień** – odbijanie promieni słonecznych od łopat wirnika i okresowego przesłaniania słońca przez łopaty (zmęczenie osób wrażliwych na ten efekt);

Przeciwdziałanie – odpowiednia lokalizacja elektrowni i „zasłonięcie” wirnika drzewami posadzonymi wokół elektrowni

- **ptaki** – większość kolizji ptaków z turbinami wiatrowymi zdarza się w nocy, o zmierzchu lub przy złej pogodzie; liczba kolizji jest stosunkowo niewielka w porównaniu do liczby ptaków, które giną w kolizjach w ruchu drogowym lub zderzeniach z liniami energetycznymi;

Przeciwdziałanie – przy planowaniu należy dokładnie rozpoznać i uwzględnić tereny lęgowe i żerowiska ptaków

Oddziaływanie energetyki wiatrowej na środowisko, c.d.

- **ryby** – nawodne EW mają korzystny wpływ na rozwój życia biologicznego w morzu: żeglowanie i połowy są zabronione wewnątrz i wokół farm wiatrowych; obszary te mogą stać się miejscami rozrodu wielu gatunków ryb
- **krajobraz** – turbiny wiatrowe są konstrukcjami, które wyróżniają się na tle krajobrazu (indywidualne odczucie estetyki przez każdego człowieka)
- **zakłócenia odbioru TV** – zdarza się, że mieszkańcy w pobliżu farm wiatrowych skarżą się na zakłócenia odbioru programów telewizyjnych
- **zakłócenia w sieci elektroenergetycznej** – częste wyłączanie i załączanie EW powoduje częste zmiany mocy i parametrów prądu w sieci
- **obszary Natura 2000** – ograniczeniem dla rozwoju energetyki wiatrowej są obszary ochrony przyrody (obszary Natura 2000 stanowią ok. 11,5% obszaru kraju)

Oddziaływanie energetyki wiatrowej na środowisko, c.d.

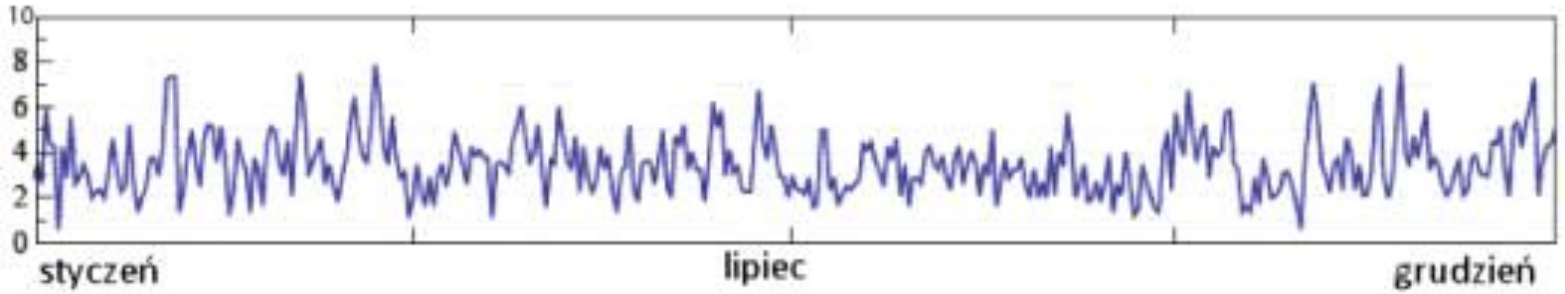
Cicha ŚMIERĆ – Wiatraki ZABIJAJĄ ludzi !
Link do artykułu: http://nowa-stepnica.x25.pl/2011/11/18/cicha-smierc-wiatraki-zabijaja-ludzi/

Spis treści:
Oddziaływanie turbin wiatrowych na organizmy żywe.
Minimalna odległość zabudowań od turbiny wiatrowej.
Reakcje chorobowe osób mieszkających w pobliżu farm wiatrowych – przykłady z relacji.
Wykaz publikacji naukowych wraz ze streszczeniami w języku polskim.

Podstawowe parametry wiatru

Podstawowym parametrem energii wiatrowej jest :

- prędkość wiatru
- powtarzalność
- kierunek wiatru
- szorstkość terenu



Rys. Przykładowy rozkład prędkości wiatru w ciągu roku

Podstawowe parametry wiatru, c.d.

Prędkość wiatru.
Jest **najmniejsza przy ziemi** i **wzrasta wraz z wysokością** (funkcja potęgowa - **wykładnicza**) - ulega zmianom dziennym, miesięcznym i sezonowym.

Wielkość energii wiatru w zależności od wysokości:

$$E_h = E_o \left(\frac{h}{h_o} \right)^{3\alpha}$$

Eh - energia wiatru obliczona dla wysokości h,
Eo - energia wiatru na wysokości ho,
ho - wysokość usytuowania wiatromierza dla pomiarów prędkości wiatru Vo,
h - wysokość, dla której oblicza się energię wiatru Eh,
α - wykładnik potęgowy zależny od klasy szorstkości terenu, określony na drodze doświadczalnej.

Usytuowanie gondoli turbozespołu wiatrowego na wysokości **160 m** nad poziomem gruntu umożliwi zwiększenie energii wiatru **od 35% do 45%** w odniesieniu do takiego samego turbozespołu umieszczonego na wysokości **100 m.**

Podstawowe parametry wiatru, c.d.

Prędkość wiatru, c.d.

Silniki wiatrowe (turbiny wiatrowe), umieszcza się na wysokości od kilku, kilkunastu, do ponad 100 m – im wyżej, tym turbiny wykorzystują większą prędkość wiatru.
Optymalna średnia prędkość wiatru do wykorzystania energetycznego wynosi od ok. **4 do 25 m/s** [4 do 25 x 3600s/1h x 1km/1000m = 4 do 25 x **3,6** = = **14,4 do 90 km/h**].
W Polsce wiatry wieją najczęściej z prędkością **4-6 m/s** [**14,4–21,6 km/h**].

Minimalna prędkość wiatru (**cut-in**) – prędkość załączenia, przy której rozpoczyna się produkcja energii (ok. 4 m/s); im niższa tym lepiej

Maksymalna prędkość – wyłączenia (**cut-out**) – dopuszczalna prędkość wiatru, po przekroczeniu której może dojść do mechanicznego uszkodzenia turbiny wiatrowej (ok. 25 m/s, czyli ok. 90 km/h)

Podstawowe parametry wiatru, c.d.

Prędkość wiatru – skala Beauforta (prędkość wiatru w stopniach):

Prędkość wiatru w			Nazwa wiatru	Wpływ wiatru na		
stopniach	m/s	węzłach		wodę	ląd	jachty
0	0,0 – 0,2	1	Cisza	Tafla wody lustrzana	Bezruch powietrza	Żagle zwisają
1	0,2 – 1,5	1 – 3	Powiew	Drobna, łuskowata fala, zmarszczki	Dym unosi się prawie pionowo	Żagle na wiatr stoją dobrze
2	1,6 – 3,3	4 – 6	Słaby wiatr	Drobna, krótka fala o szklistych grzbietach	Odczuwalny powiew na twarzy	Dobry wiatr do żeglowania
3	3,4 – 5,4	7 – 10	Łagodny wiatr	Krótka fala o szklistych grzbietach, sporadycznie pojawia się piana	Wiatr porusza liście	Jachty lekko pochylają się
4	5,5 – 7,9	11 – 15	Umiarkowany wiatr	Małe fale z pianą na grzbietach, słychać plusk	Wiatr porusza gałązki	Bardzo dobry wiatr do żeglowania
5	8,0 – 10,7	16 – 21	Dość silny wiatr	Umiarkowana fala, gęste białe grzebienie na falach, poszum morza	Wiatr porusza większe gałęzie	Tylko większe jachty niosą pełne żagle
6	10,8 – 13,8	22 – 27	Silny wiatr	Tworzą się grzywacze, wysoka fala, szum morza	Wiatr porusza grube gałęzie	Jachty refują nieco żagle, wiatr zaczyna grać na wantach
7	13,9 – 17,1	28 – 33	Bardzo silny wiatr	Piana układa się w równoległe pasma, głośny szum morza	Wiatr porusza cieńsze pnie	Jachty refują przednie lub/i tylne żagle
8	17,2 – 20,7	34 – 40	Sztorm	Wysokie, długie fale, pasma piany wzdłuż kierunku wiatru	Wiatr ugina pnie	Jachty zarefowane
9	20,8 – 24,4	41 – 47	Silny sztorm	Fale i pasma piany, urywany ryk morza	Wiatr unosi drobne przedmioty	Jachty niosą żagle sztormowe
10	24,5 – 28,4	48 – 55	Bardzo silny sztorm	Morze białe od piany, fale przelewają się, ryk morza	Wiatr łamie gałęzie i drzewka	W kursie bajdewind jachty nie posuwają się
11	28,5 – 32,6	56 – 63	Gwałtowny sztorm	Wiatr zrywa wierzchołki fal, pył wodny	Wiatr łamie pnie drzew	1/3 żagli sztormowych
12	>32,6	>63	Huragan	Kipiel wodna, huk morza, ograniczona widzialność	Wiatr niszczy budynki	Jachty nie niosą żagli

Podstawowe parametry wiatru, c.d.

Powtarzalność
Jest to suma godzin, podczas których w ciągu roku wieje wiatr z określoną prędkością.

Powtarzalność decyduje o ekonomicznej zasadności budowania elektrowni wiatrowej – budowa jest opłacalna przy powtarzalności ok. **2.000 h/rok** (ok. 23%), lub większej.

Inwestycja w farmę wiatrową z dofinansowaniem – potrzebne są badania roczne wietrzności terenu, na którym ma stanąć turbina wiatrowa.

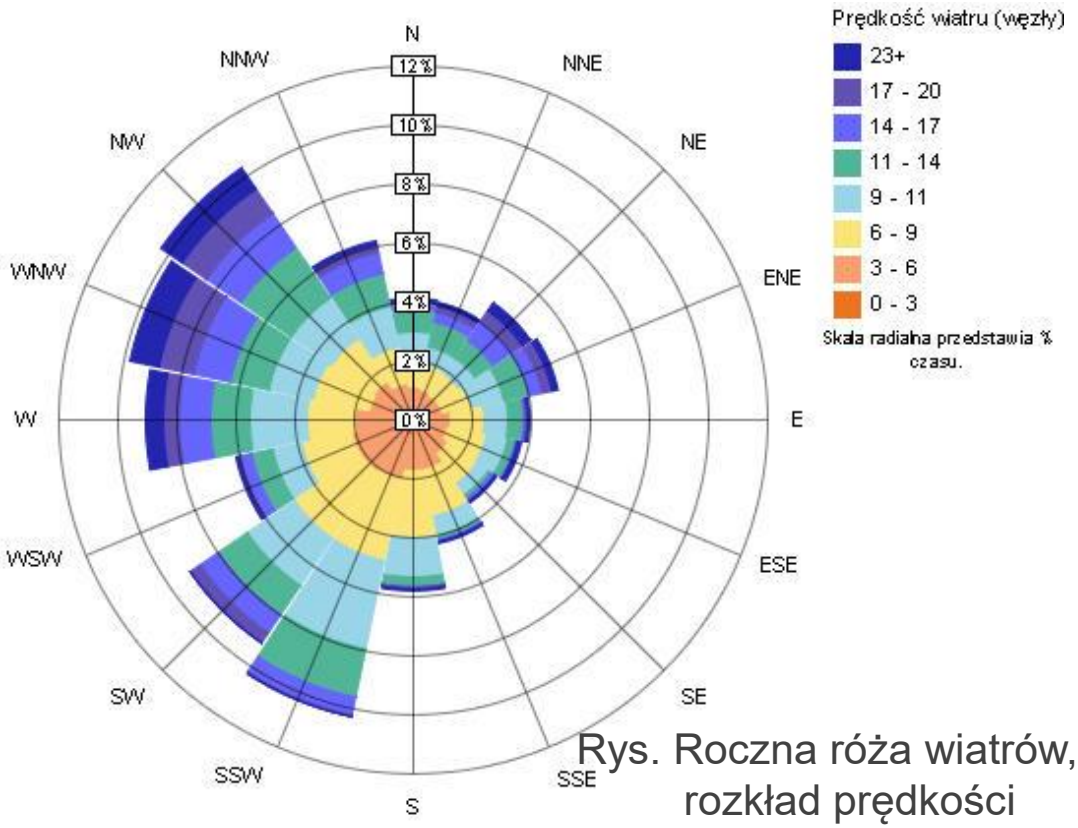
Podstawowe parametry wiatru, c.d.

Kierunek wiatru

W turbinach wiatrowych nastawianych automatycznie lub samoczynnie na kierunek wiatru, ma on znaczenie gównie ze względu na proces sterowania siłownią wiatrową.

Róża wiatrów

Róża wiatrów, jest **graficznym przedstawieniem siły i kierunku** wiejącego wiatru, używanym często w meteorologii.



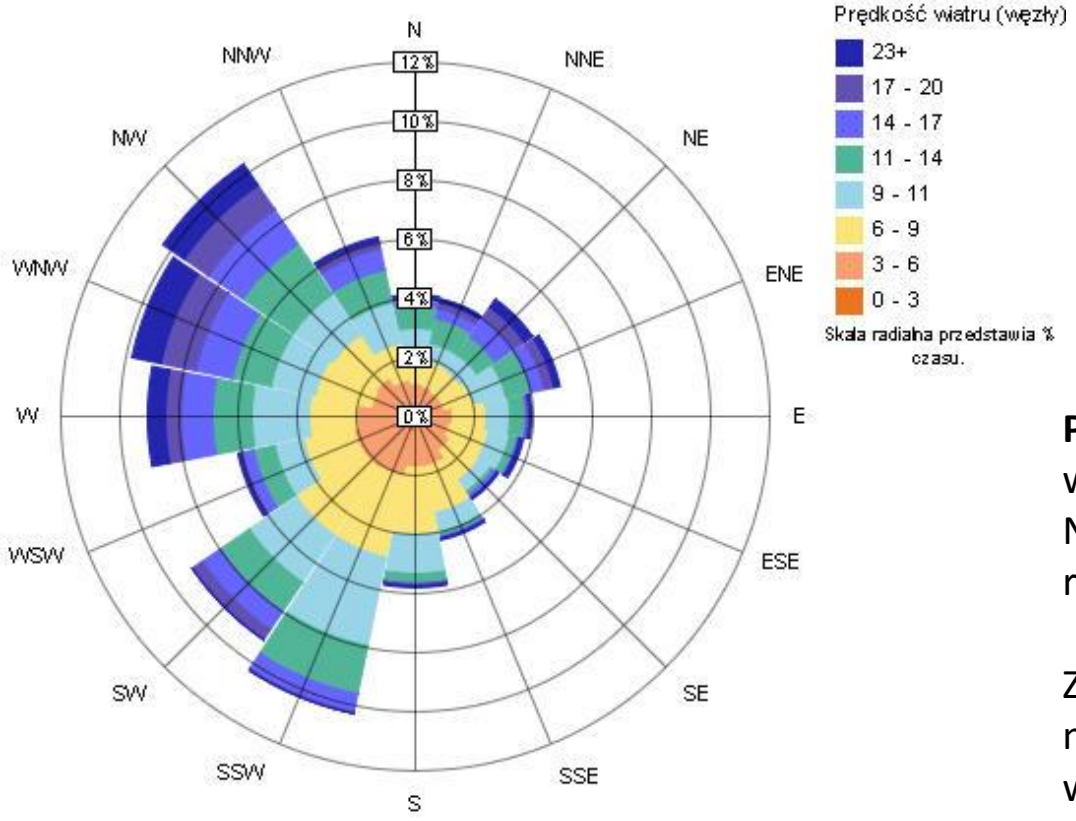
Rys. Roczna róża wiatrów, rozkład prędkości

Wykresie przedstawia częstotliwość występowania (w %) i siła wiatru (prędkość) z poszczególnych kierunków.
Im dalej od środka wykresu, tym częstotliwość wiatru z tego kierunku jest większa.

Każdy promień jest podzielony na odcinki w różnych kolorach odpowiadające różnym zakresom siły wiatru (prędkości).

Długość poszczególnych promieni oznacza, przez jaki procent czasu wiatr wieje z tych kierunków.

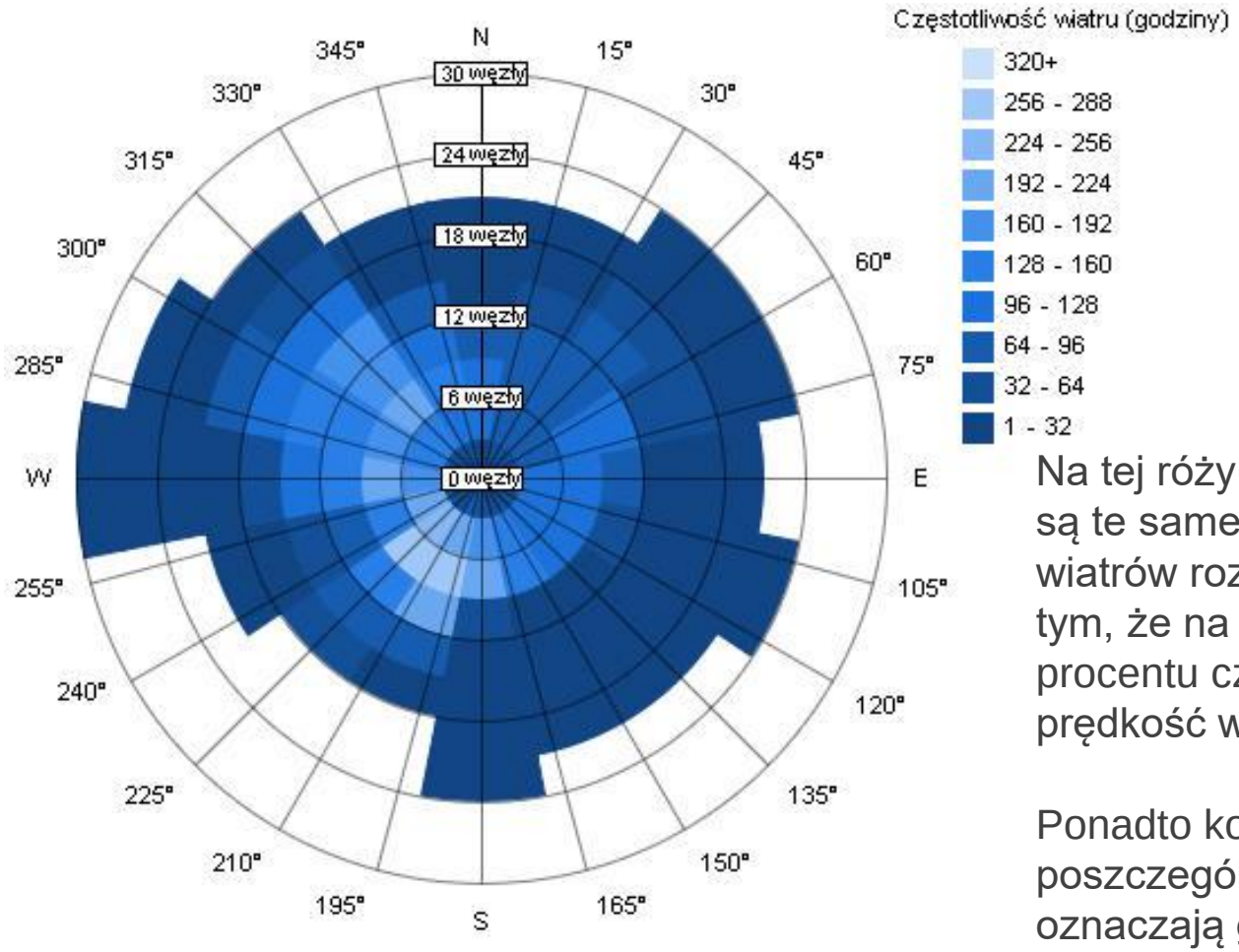
Róża wiatrów, c.d.



Przykładowa róża wiatrów:
wiatr wieje najczęściej z kierunków NW i SSW (ponad 10% czasu w ciągu roku).

Z kierunku SSW wiatr wieje z kolei najczęściej z prędkością 6–9 i 9–11 węzłów (kolor żółty i jasnoniebieski).

Róża wiatrów, c.d.



Rys. Roczna róża wiatrów – rozkład częstotliwości

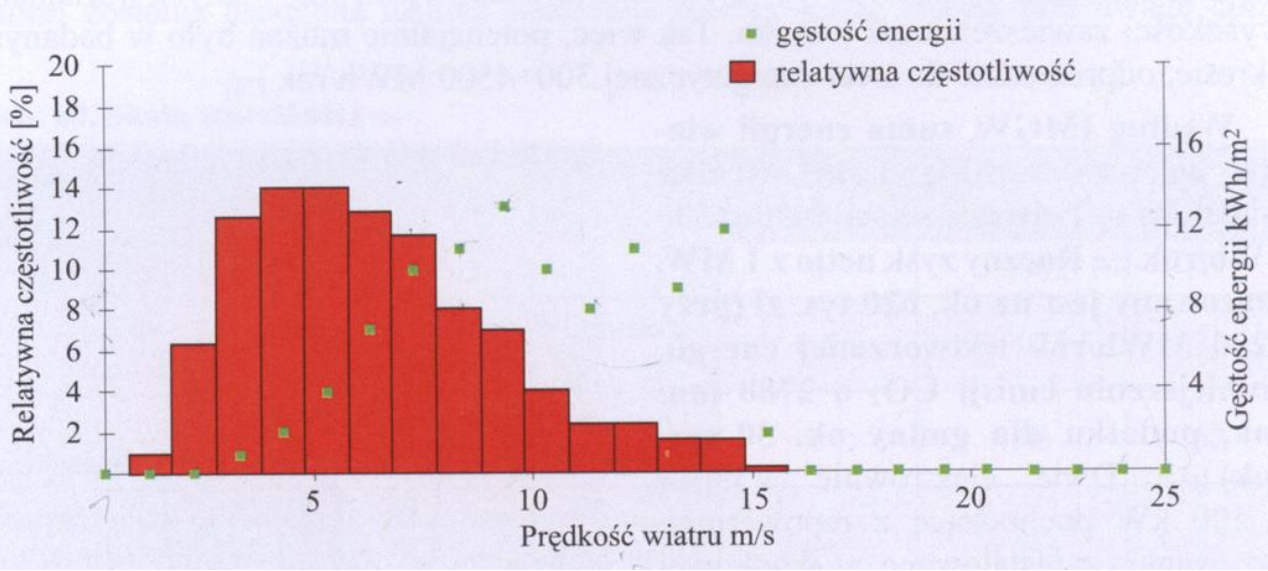
Na tej róży wiatrów przedstawione są te same dane co na róży wiatrów rozkładu prędkości, poza tym, że na skali radialnej zamiast procentu czasu jest przedstawiona prędkość wiatru.

Ponadto kolorowe odcinki poszczególnych promieni oznaczają godziny, a nie prędkość wiatru.

Gęstość prawdopodobieństwa

Prędkość wiatru jest zmienną ciągłą i w określonych przedziałach czasu może wynosić od 0 do np. 50 m/s. Dlatego, żadnej prędkości nie można przyporządkować konkretnej wartości prawdopodobieństwa.

Żeby określić szacunkową ilość energii wiatru używa się pojęcia: rozkład gęstości prawdopodobieństwa, gęstość energii, funkcji zmiennej losowej prędkości wiatru.



Rys. Procentowy rozkład prędkości wiatru i gęstości energii na danym terenie

Gęstość prawdopodobieństwa, c.d.

Znając rozkład gęstości energii w funkcji prędkości wiatru i moc turbiny w funkcji prędkości, można wyznaczyć ilość energii jaką ona wyprodukuje w ciągu roku :

$$E_T = 8760 \cdot \sum_{v=0}^{v=25} P_T(v) \cdot f(v) \quad [\text{kWh}]$$

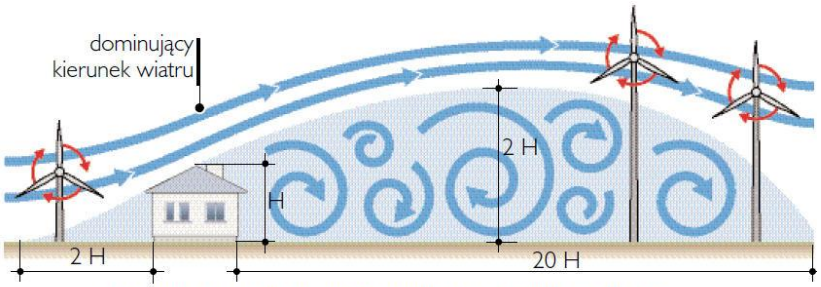
E_T – energia wyprodukowana przez turbinę [kWh]
P_T – moc turbiny wiatrowej w funkcji prędkości wiatru
v- prędkość wiatru
8760 – liczba godzin w roku (365 dni x 24 h)

Warunki energetyczne w miejscu lokalizacji EW

Żeby określić warunki energetyczne w sąsiedztwie elektrowni wiatrowej, niezbędne jest rozpoznanie szeregu czynników, jak np.: **forma terenu**, **przeszkody terenowe**, **szorstkość podłoża**.

Nawet na wysokości 1 km ponad poziomem ziemi, wiatr jest zakłócany przez ukształtowanie terenu. Im bliżej powierzchni, tym zakłócenia są większe.

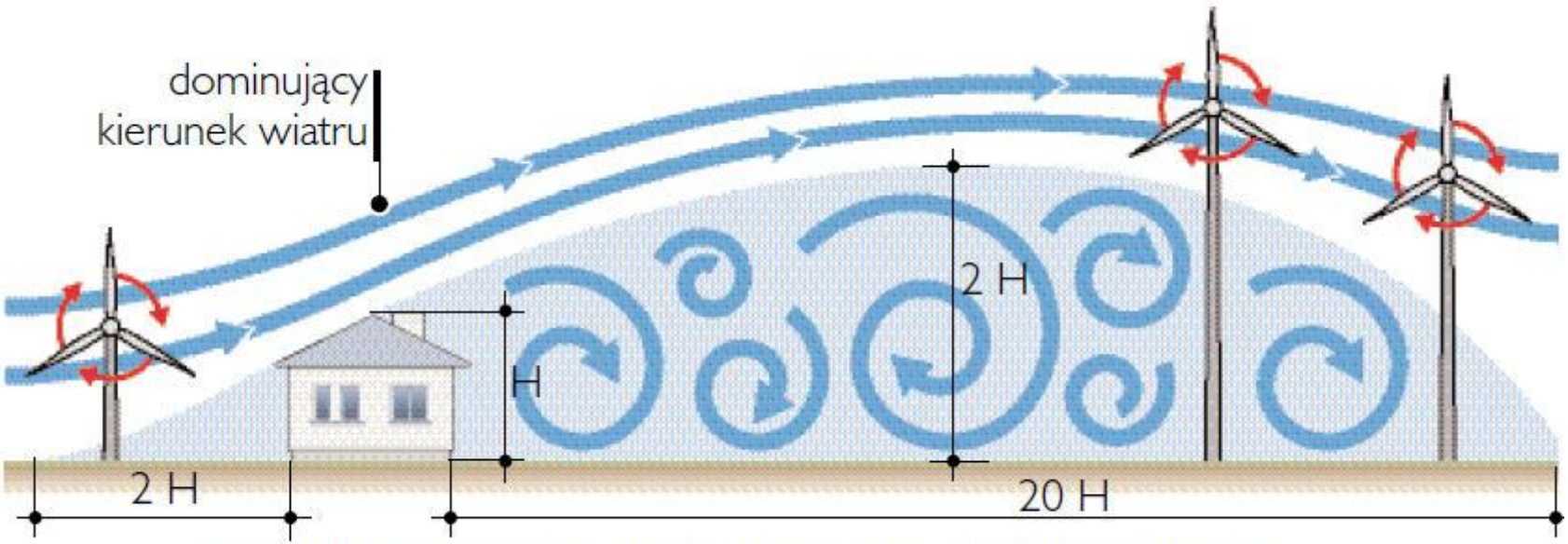
Rodzaj powierzchni i jej ukształtowania, stopień zabudowy, mają wpływ na prędkość wiatru – większe przeszkody np. budynki, ujemnie wpływają na przepływ wiatru.



ZASADY UMIESZCZANIA PRZYDOMOWYCH ELEKTROWNI WIATROWYCH

Warunki energetyczne w miejscu lokalizacji EW, c.d.

Każdy obiekt znajdujący się w odległości do 1 km od turbiny,
którego wysokość stanowi co najmniej 25% wysokości wieży tej turbiny,
ma negatywny wpływ na jej produktywność



ZASADY UMIESZCZANIA PRZYDOMOWYCH ELEKTROWNI WIATROWYCH

Warunki energetyczne w miejscu lokalizacji EW, c.d.

Szorstkość ternu

Ma wpływ na rozkład prędkości wiatru w funkcji wysokości. Im większa szorstkość, tym większy wzrost prędkości wraz z wysokością.

Przypisanie terenu do odpowiedniej klasy szorstkości, pozwala określić optymalną wysokość wieży, na której zostanie osadzona turbina wiatrowa.

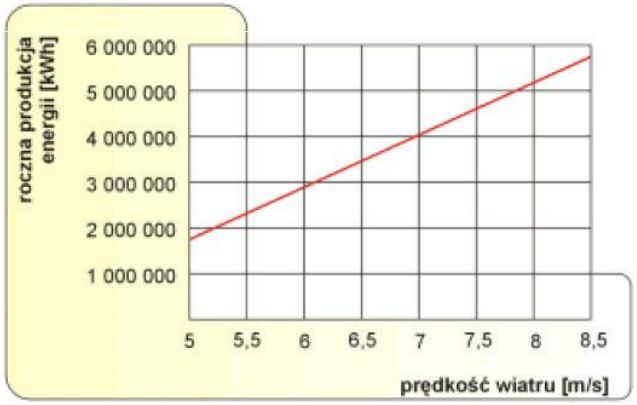
Warunki energetyczne w miejscu lokalizacji EW, c.d.

Skala szorstkości:

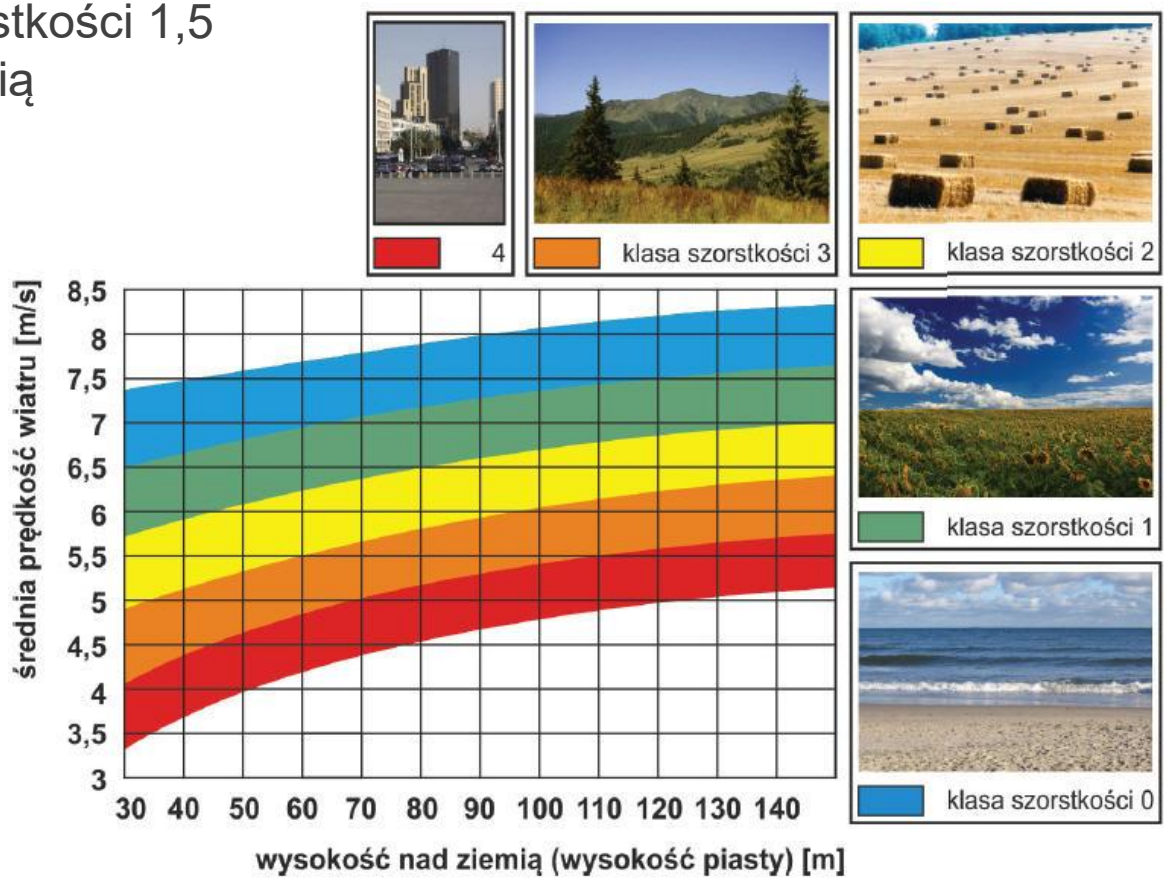
klasa szorstkości	Energia (%)	Rodzaj terenu
0	100	Powierzchnia wody
0,5	73	Całkowicie otwarty teren np. betonowe lotnisko, trawiasta łąka itp.
1	52	Otwarte pola uprawne z niskimi zabudowaniami (pojedynczymi).Tylko lekko pofalowane teren.
1,5	45	Tereny uprawne z nielicznymi zabudowaniami i 8 metrowymi żywopłotami oddalonymi od siebie o ok. 1250 metrów.
2	39	Tereny uprawne z nielicznymi zabudowaniami i 8 metrowymi żywopłotami oddalonymi od siebie o ok. 500 metrów.
2,5	31	Tereny uprawne z licznymi zabudowaniami i sadami lub 8 metrowe żywopłoty oddalone od siebie o ok. 250 metrów.
3	24	Wioski , małe miasteczka , tereny uprawne z licznymi żywopłotami , las lub pofałdowany teren.
3,5	18	Duże miasta z wysokimi budynkami.
4	13	Bardzo duże miasta z wysokimi budynkami i drapaczami chmur.

Warunki energetyczne w miejscu lokalizacji EW, c.d.

Wzrost prędkości wiatru wraz z wysokością, jako funkcja **szorstkości terenu** (przykładowa aproksymacja). Założony punkt odniesienia to: średnią prędkość wiatru 5,5 m/s dla klasy szorstkości 1,5 na wysokości 30 m nad ziemią



Rys. Wykres dla elektrowni: GW Wind Energy 1.5s.
1.500 kW (1,5 MW)



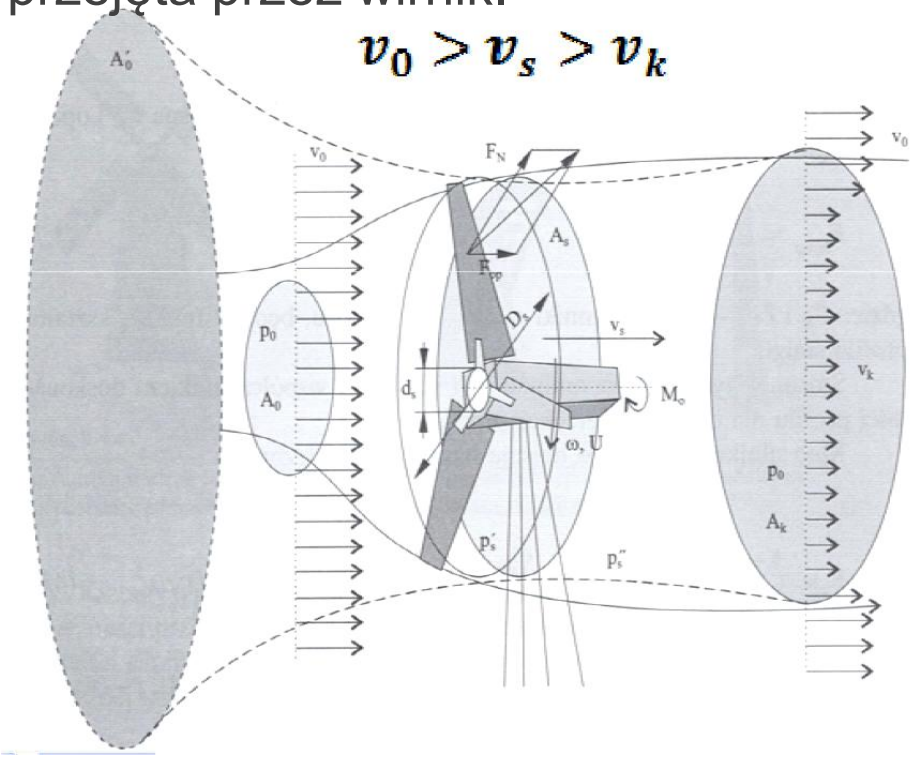
Wiatr jako źródło energii

Energia niesiona przez wiatr jest proporcjonalna do jego prędkości w **trzeciej potędze**. Przechodząc przez wirnik silnika wiatrowego prędkość wiatru ulega zmniejszeniu od prędkości początkowej v_0 do końcowej v_k. Część energii zostaje przejęta przez wirnik.

v_s - średnia prędkość wiatru przechodzącego przez wirnik

$$v_s = (v_0 + v_k)/2$$

v_0, v_k - średnia prędkość wiatru przed i za wirnikiem



Rys. Schemat przepływu wiatru przez turbinę wiatrową

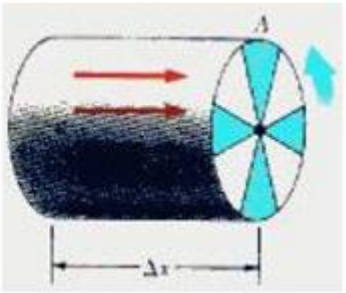
Energia wiatru

Energia wiatru zależy od czasu występowania poszczególnych prędkości wiatru jak również od gęstości powietrza.

Gęstość powietrza wiąże się ściśle m.in. z jego wilgotnością oraz ciśnieniem statycznym, które wywołane jest ciśnieniem barometrycznym. Z uwagi na złożoność zależności związku gęstości, wilgotności oraz ciśnienia powietrza przyjmuje się najczęściej wartość średnią gęstości. W warunkach Polski, **ρ = 1,26 kg/m3**.

Energia kinetyczna strugi powietrza: **E** [J=Ws]:

$$E = \frac{m\ v^2}{2} \Rightarrow E = \frac{\rho A t v^3}{2}$$



m – masa powietrza [kg]
ρ - gęstość powietrza [kg/m3]
v – prędkość powietrza [m/s]
t – czas [s]
A – powierzchnia zakreślona przez wirnik [m2]

Energia wiatru, c.d.

Wydajność siłowni wiatrowej: E_{EW} [Ws/rok lub kWh/rok]:

$$E_{EW} = E_T \times \eta$$

E_T – energia wiatru [kWh/rok]
η – sprawność całkowita (wirnik, przekładnia, generator)

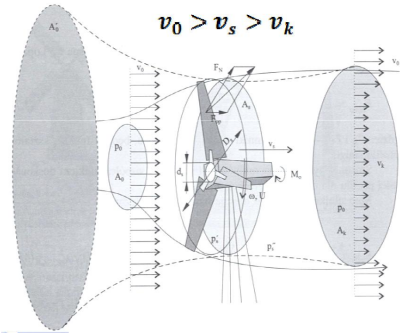
Sprawność zamiany energii kinetycznej wiatru na elektryczną w siłowni wiatrowej, nie przekracza **40-50%** i w dużym stopniu zależy od rozwiązań konstrukcyjnych, prędkości wiatru oraz lokalizacji siłowni.

Moc wiatru P [W]:

$$P = \frac{\rho A v^3}{2}$$

Moc użyteczna Pu [W], wytwarzana w silniku wiatrowym, przejęta od strumienia powietrza, wynika z różnicy energii kinetycznej powietrza przed i za wirnikiem:

$$P_u = \frac{\rho}{4}\left(v_0^2 - v_k^2\right)\left(v_0 + v_k\right) A$$

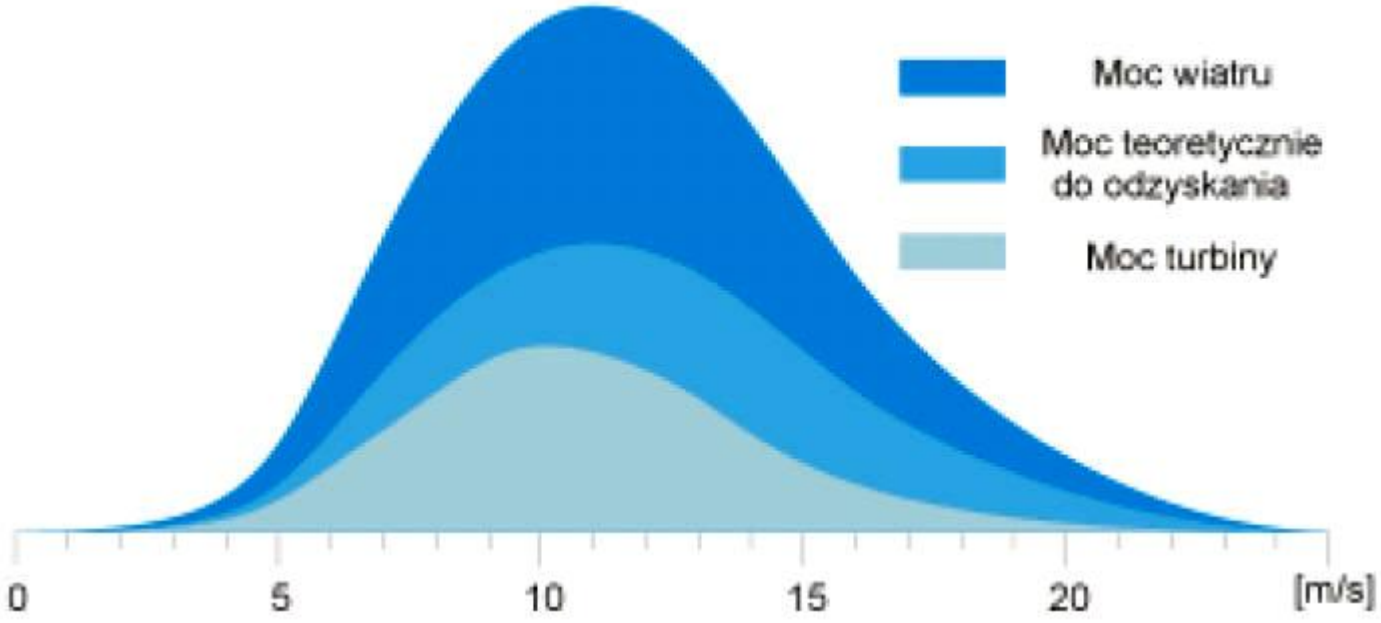


Moc elektrowni wiatrowej P_{EW} [W]:

$$P_{EW} = P_u \times C_p \times N_g \times N_b$$

Cp – współczynnik efektywności (0,35 dla dobrych projektów)
Ng – efektywność generatora (85% i więcej dla nowoczesnych generatorów)
Nb – efektywność skrzyni biegów/kierunku: ok. 95% (im wyższa tym lepsza)

Prawo Betz'a:
Maksymalna teoretyczna sprawność konwersji mocy wiatru na moc mechaniczną wynosi **59,3%**. Oznacza to, że idealnie skonstruowana turbina wiatrowa, podczas swojej pracy, odzyska z wiatru 59% energii w nim zawartej.
Moc wiatru zmienia się proporcjonalnie do trzeciej potęgi jego prędkości.

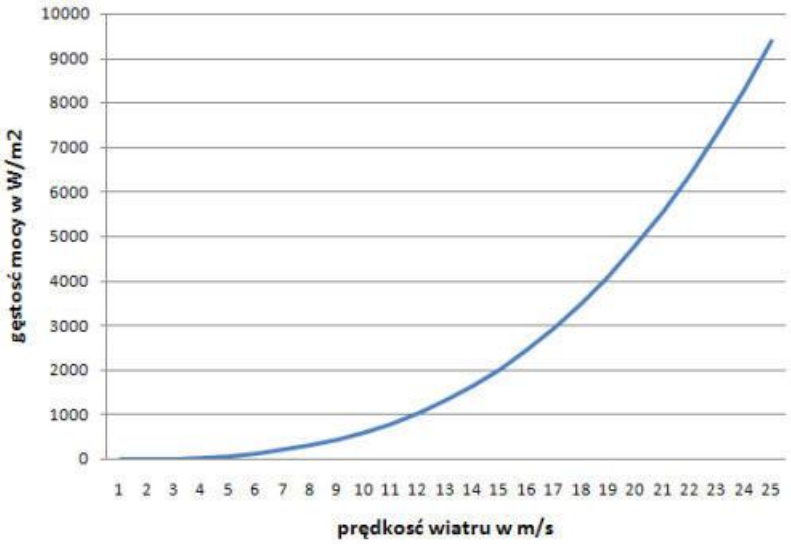


Moc elektrowni wiatrowej

Moc wyjściowa elektrowni wiatrowej zmienia się wraz ze zmianą prędkości wiatru – do trzeciej potęgi:
2-krotny wzrost prędkości wiatru, wytwarza **8-krotnie większą moc** !!!

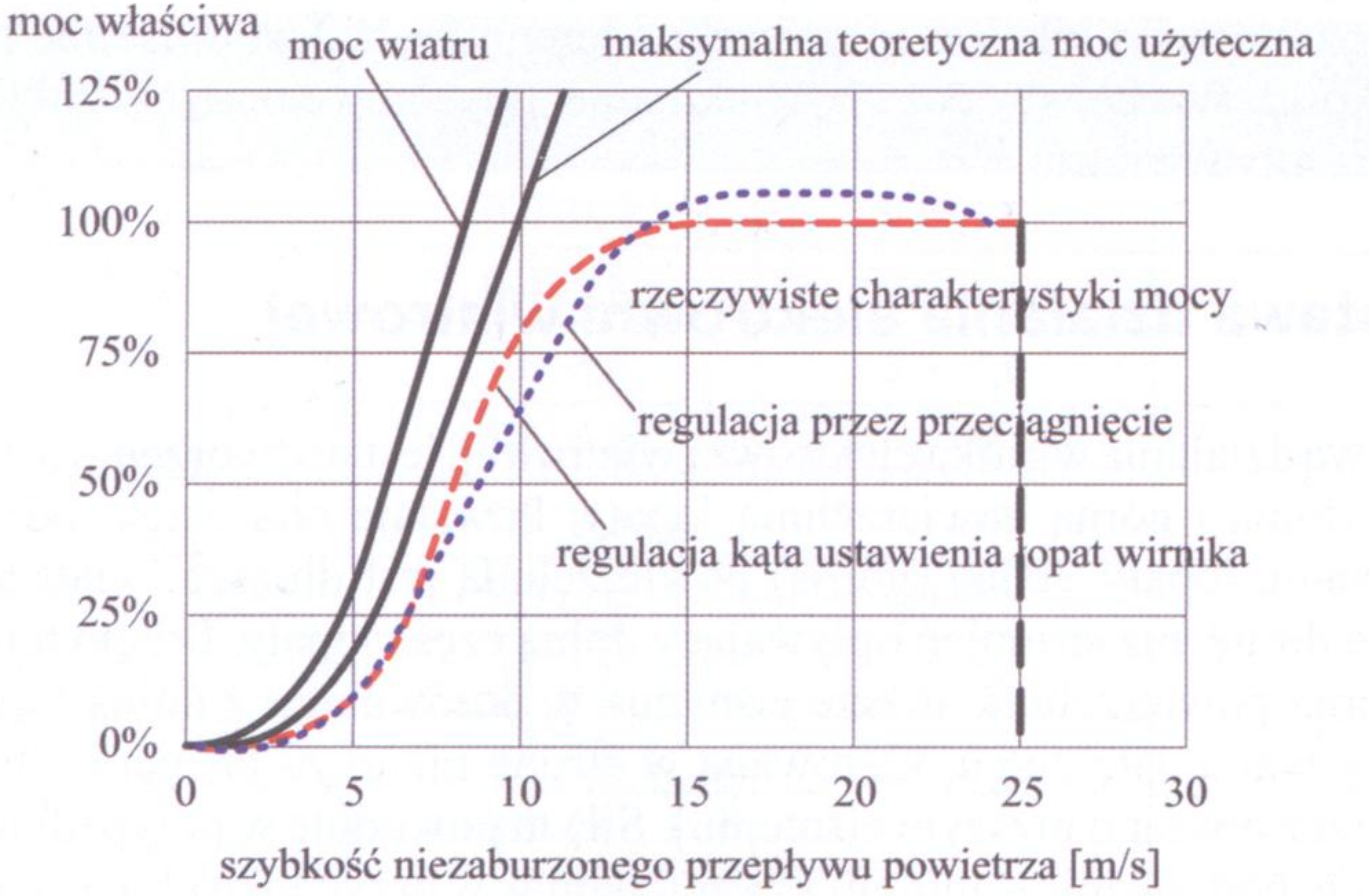
Krzywa mocy pozwala określić ilość wyprodukowanej energii elektrycznej, na podstawie średnich prędkości wiatru (z pomiarów).
Im krzywa mocy jest bardziej stroma i osiąga maksimum przy jak niższej prędkości wiatru, tym lepiej.

$$E_T = 8760 \cdot \sum_{v=0}^{v=25} P_T(v) \cdot f(v) \quad [\text{kWh}]$$



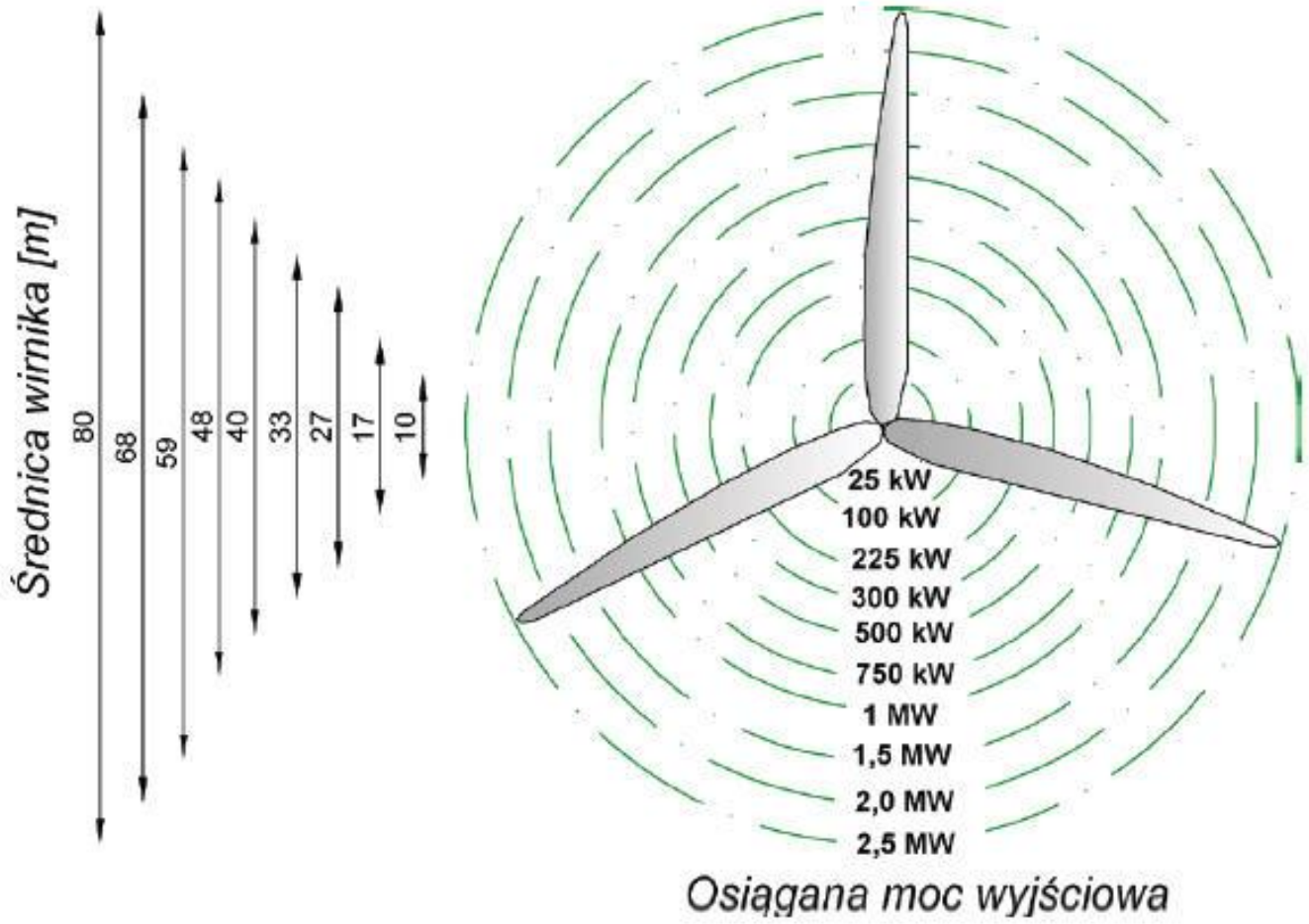
Rys. Zależność mocy wiatru od jego prędkości

Moc elektrowni wiatrowej, c.d.



Rys. Zakres pracy i moc generowana przez małą EW

Podstawowe parametry



Rys. Orientacyjna zależność generowanej mocy od średnicy wirnika turbiny wiatrowej

Moc elektrowni wiatrowej, c.d.

Wielkość Instalacji		Roczny uzysk energii w MWh				
wirnik	moc	$V = 5$ m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s
30 m	200 kW	320	500	670	820	950
40 m	500 kW	610	970	1360	1730	2050
55 m	1000 kW	1150	1840	2570	3280	3920
65 m	1500 kW	1520	2600	3750	4860	5860
80 m	2500 kW	2380	4030	5830	7700	9220
120 m	5000 kW	5300	9000	13 000	17 000	20 000

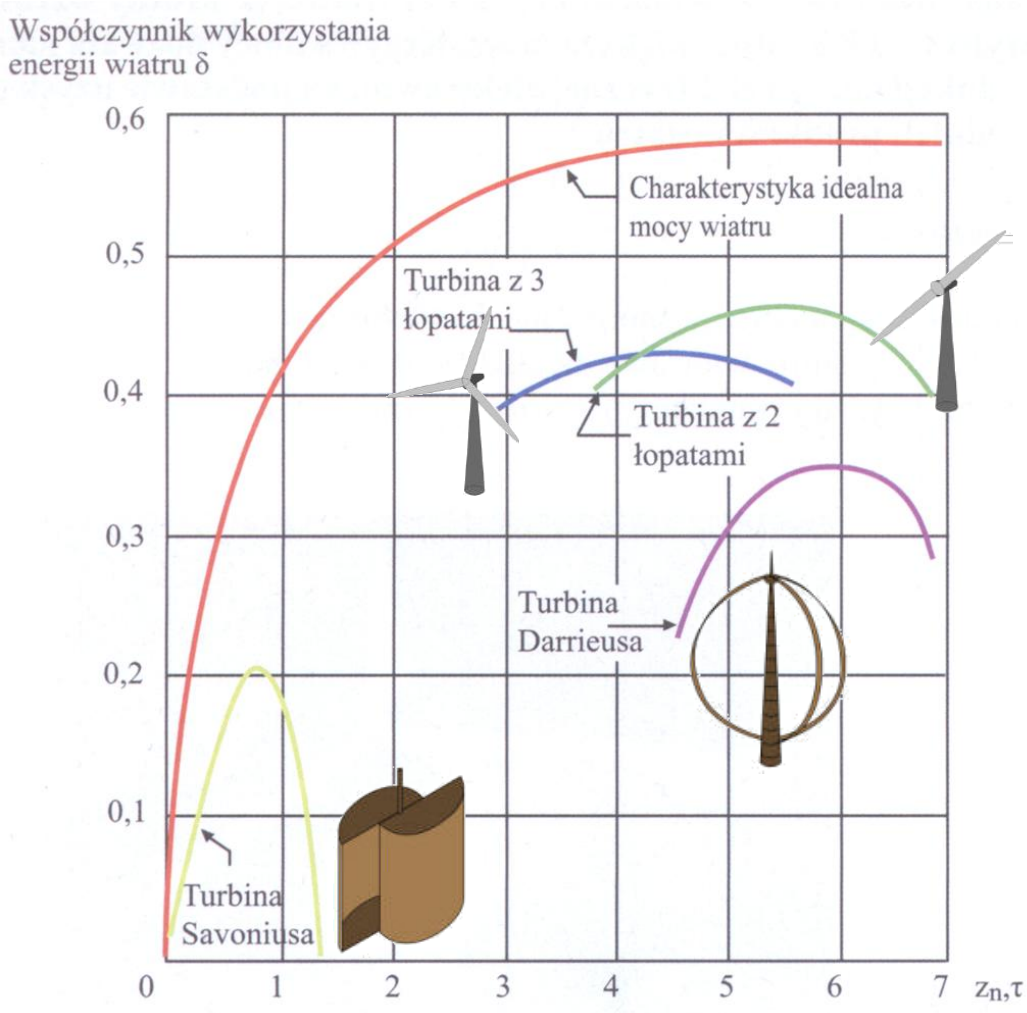
Tab. Roczny uzysk energii EW w różnych instalacjach i przy różnych prędkościach wiatru na wysokości osi wirnika.

Porównanie parametrów „wiatraków”

Moc użyteczna - zależy od:

- powierzchni omiatanej przez wirnik silnika
- prędkości wiatru
- sprawności aerodynamicznej
- **współczynnika wykorzystania wiatru (efektywności)** – stosunek energii kinetycznej wykorzystanej w wiatraku, do całkowitej energii wiatru; wynosi od **0,3** do ok. **0,4** (największy posiadają silniki wiatrowe wyposażone w 2 i 3 łopaty)
- **współczynnika momentu obrotowego** – stosunek momentu obrotowego do energii wiatru
- **wyróżnika szybkobieżności** - stosunek prędkości obwodowej końca łopatki do prędkości wiatru

Porównanie parametrów wiatraków, c.d.



Rys. Charakterystyki pracy elektrowni wiatrowych – współczynnik wykorzystania energii wiatru w funkcji wyróżnika szybkobieżności

Podział siłowni wiatrowych – moc :

- mikroelektrownie wiatrowe – o mocy **poniżej 100 W**
- małe elektrownie wiatrowe – o mocy **od 100 W do 50 kW**
- duże elektrownie wiatrowe - w praktyce, **powyżej 100 kW**

Podział siłowni wiatrowych – moc

Mikroelektrownie wiatrowe (poniżej 100 W)

Używa się ich najczęściej do ładowania baterii akumulatorów stanowiących zasilanie obwodów wydzielonych – w miejscach, gdzie sieć elektroenergetyczna nie występuje lub względy zewnętrzne wskazują konieczność wykorzystania innego źródła energii.

Takie elektrownie można wykorzystać do zasilania przez akumulatory części oświetlenia domu: pojedynczych lamp, a nawet poszczególnych pomieszczeń czy urządzeń.

Podział siłowni wiatrowych – moc

Małe elektrownie wiatrowe (od 100 W do 50 kW)

Elektrownie z tej grupy mogą zapewniać energię elektryczną w pojedynczych gospodarstwach domowych, a nawet w małych firmach.

W warunkach przydomowych najpopularniejsze są elektrownie 3-5 kW. Moc takich elektrowni, wspomagana energią zmagazynowaną w akumulatorach, wystarczy do zasilania oświetlenia, układów pompowych, sprzętu i urządzeń domowych.

Podział siłowni wiatrowych – moc

Duże elektrownie wiatrowe (powyżej 100 kW)

Stosowane są przede wszystkim do wytwarzania prądu, który sprzedaje się do sieci elektroenergetycznej. Mogą również zasilać dom.

Taka elektrownia musi spełniać szczegółowe wymagania lokalnego operatora sieci - potrzebna jest jego zgoda na przyłączenie do sieci.

Podział siłowni wiatrowych – wysokość

Ilość energii elektrycznej produkowanej w elektrowni wiatrowej zależy głównie od prędkości wiatru. Ta z kolei zależy od wielu czynników – zarówno klimatycznych, jak i związanych na przykład z wysokością usytuowania wiatraka (im jest on wyżej, tym większa produkcja energii).

Współczesne duże elektrownie wiatrowe osadza się na wieżach 70-, 80-, a nawet 100- czy 120-metrowych.
Małe siłownie wiatrowe najczęściej mają za podstawę maszty od 1,5 m (na dachach), do 15-20 m nad poziomem gruntu.

Podział siłowni wiatrowych – położenie osi obrotu

Podstawowym kryterium podziału elektrowni wiatrowych jest położenie osi obrotu wirnika :

- **z poziomą osią obrotu HAWT** (ang. Horizontal Axis Wind Turbines); najpopularniejsze – ponad 95% stosowanych rozwiązań
- **z pionową osią obrotu VAWT** (ang. Vertical Axis Wind Turbines).

Podział siłowni wiatrowych – inne kryteria :

- sposób wykorzystania produkowanej energii: siłownie energetyczne i siłownie mechaniczne (np. pompowe)
- liczbę płatów wirnika – elektrownie jedno-, dwu-, trzy-, cztero- i wielopłatowe
- usytuowanie wirnika względem kierunku wiatru i masztu (w elektrowniach typu HAWT): dowietrzne (ang. up-wind) oraz odwietrzne (ang. down-wind);
- szybkobieżność – silniki wolnobieżne (np. karuzelowe, rotorowe, świderkowe), średniobieżne (np. wielopłatowe) i szybkobieżne (silniki śmigłowe, elektrownie wiatrowe)

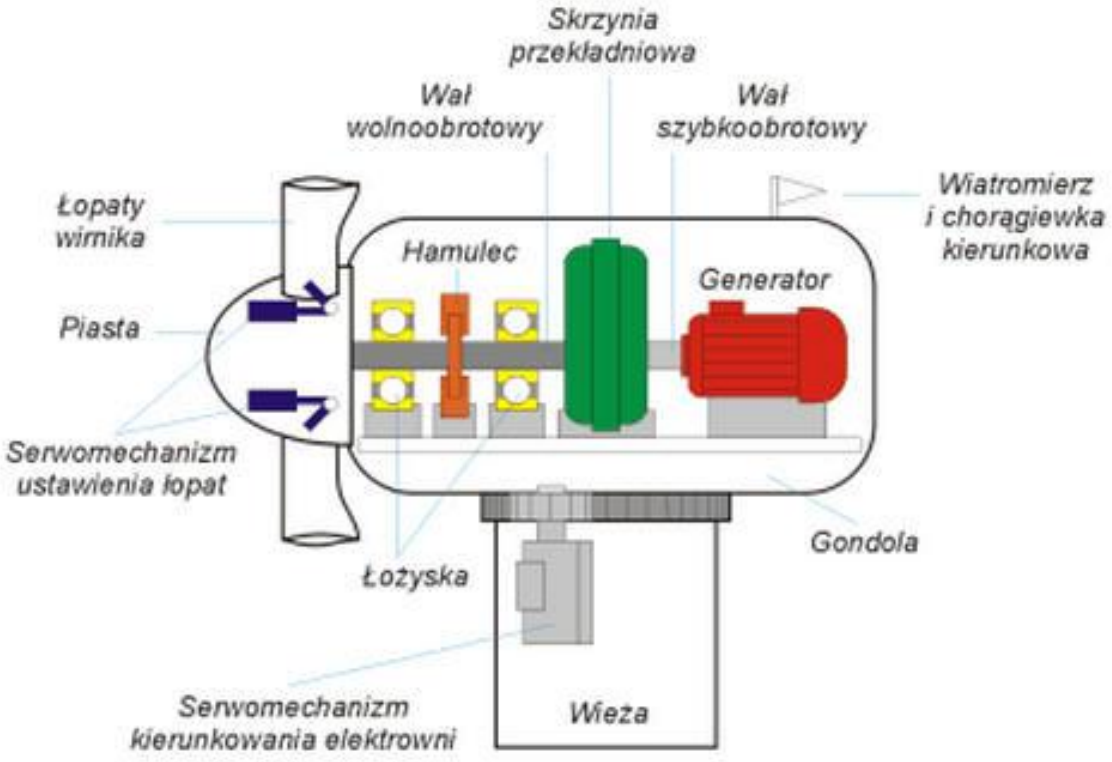
Wśród najpopularniejszych maszyn – typu **HAWT** – ponad 90 % obecnie stosowanych to trójpłatowe urządzenia typu up-wind służące głównie do wytwarzania energii elektrycznej

Podział siłowni wiatrowych – inne kryteria c.d.

Wirnik typu down-wind (odwietrznie); wirnik ustawiony tyłem do wiatru

Wirnik typu up-wind (dowietrznie); wirnik ustawiony przodem do wiatru

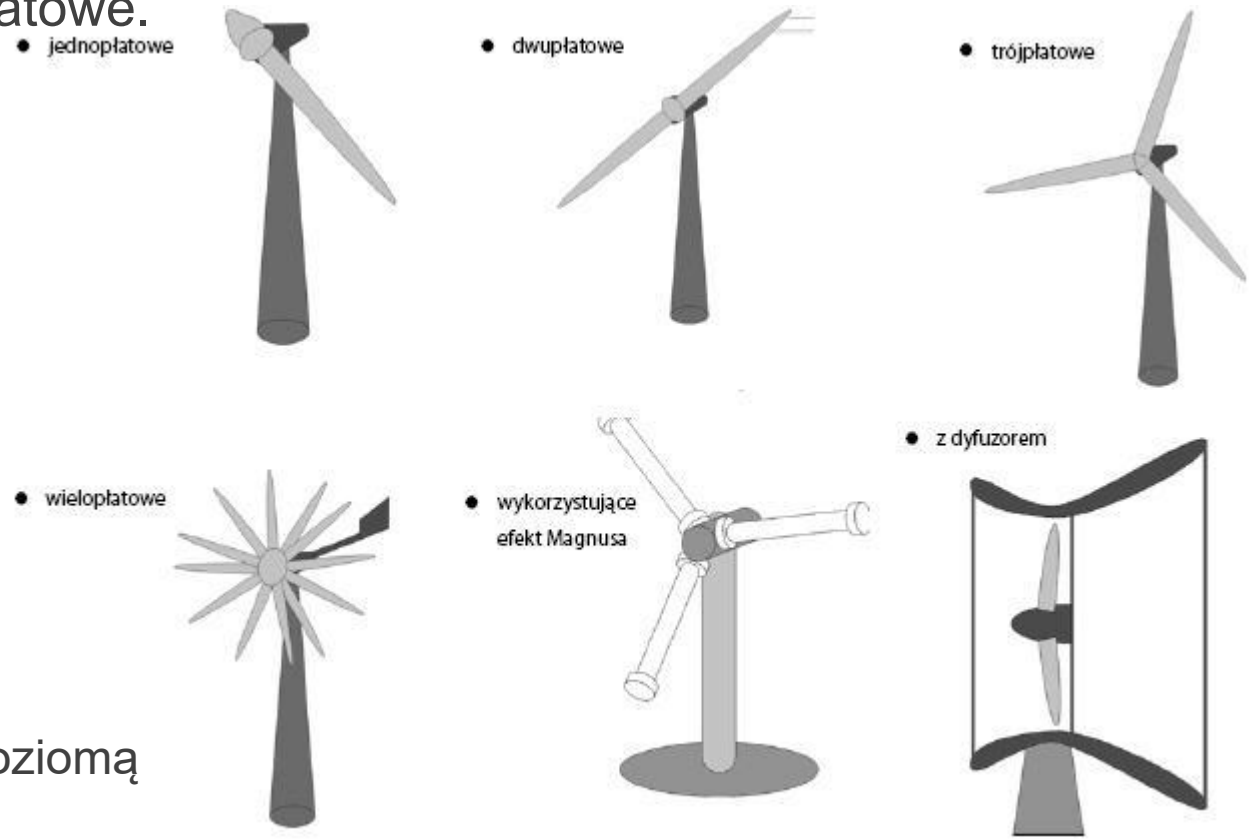
Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT)



Rys. Uproszczony schemat budowy siłowni wiatrowej dużej mocy (podobna konstrukcja dla wszystkich tego typu wiatraków)

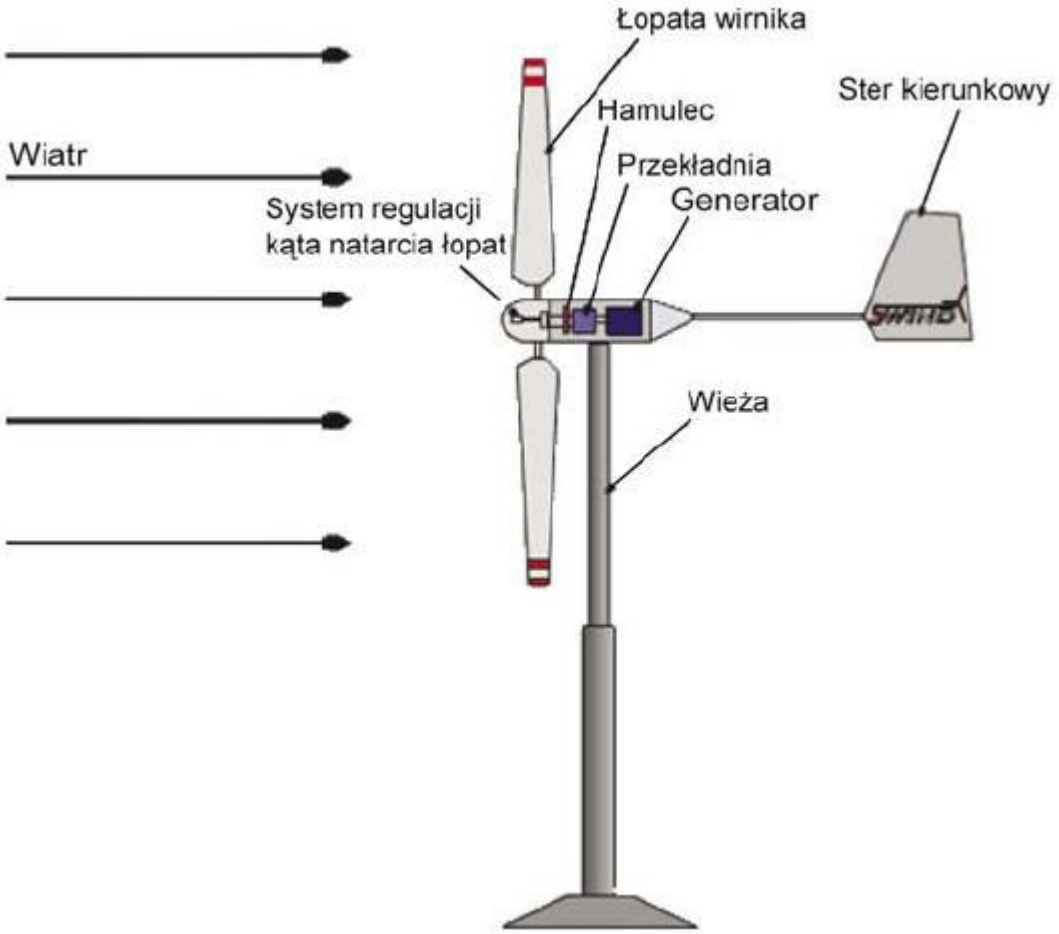
Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

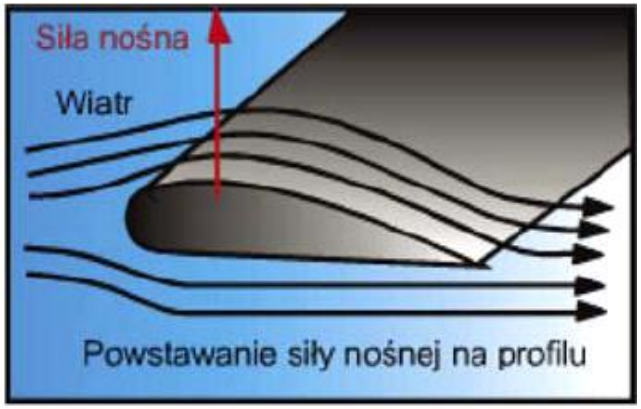
Siłownie wiatrowe typu HAWT buduje się najczęściej wyposażając w wirniki trójpłatowe. Występują również konstrukcje dwupłatowe, jednopłatowe i wielopłatowe.



Rys. Rodzaje turbin z poziomą osią obrotu

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

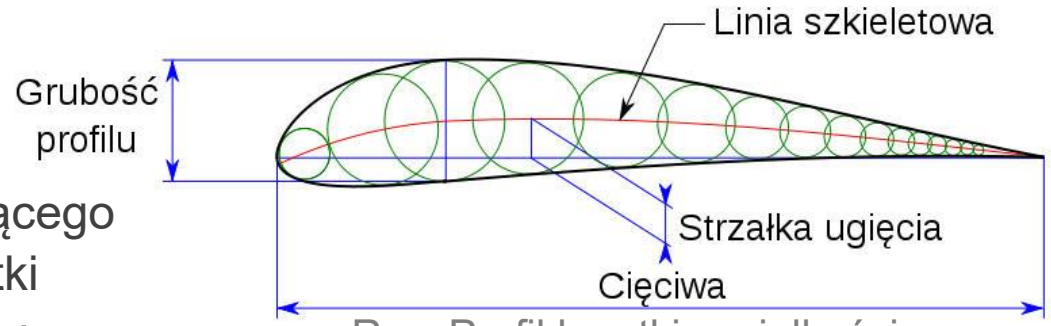




Rys. Zasada działania siłowni z wirnikiem o osi poziomej

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Łopata wirnika :



Rys. Profil łopatki – wielkości geometryczne

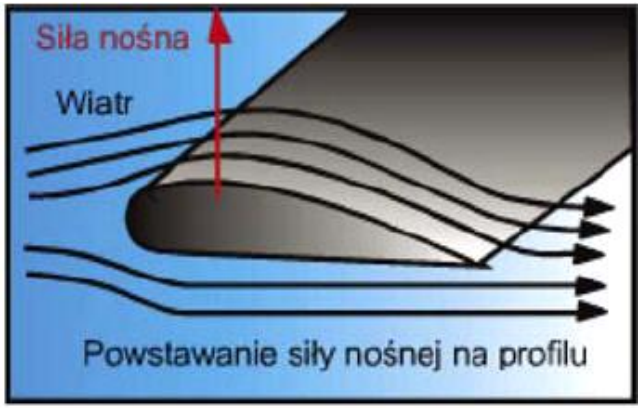
- **cięciwa -** długość odcinka łączącego dwa skrajne punkty profilu łopatki
- **linia szkieletowa profilu** – linia łącząca środki okręgów wpisanych w profil lotniczy
- **strzałka ugięcia** – maksymalne ugięcie linii szkieletowej od cięciwy profilu
- **grubość profilu** – największa odległość pomiędzy dolnym a górnym konturem profilu mierzona prostopadle do cięciwy
- **grubość względna** – stosunek grubości profilu do cięciwy
- **środek parcia profilu** – punkt leżący na przecięciu linii działania wypadkowej siły aerodynamicznej z cięciwą
- **nosek** - najbardziej wysunięta część profilu
- **ostrze** - punkt profilu najbardziej wysunięty do tyłu

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Siła nośna

Jest to siła, która wywołuje ruch obrotowy wirnika elektrowni wiatrowej.

Powstaje analogicznie do siły nośnej utrzymującej samolot w powietrzu.



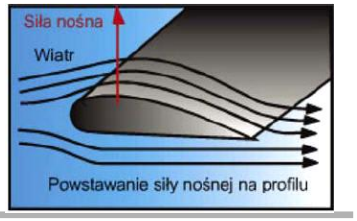
Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Siła nośna; c.d.

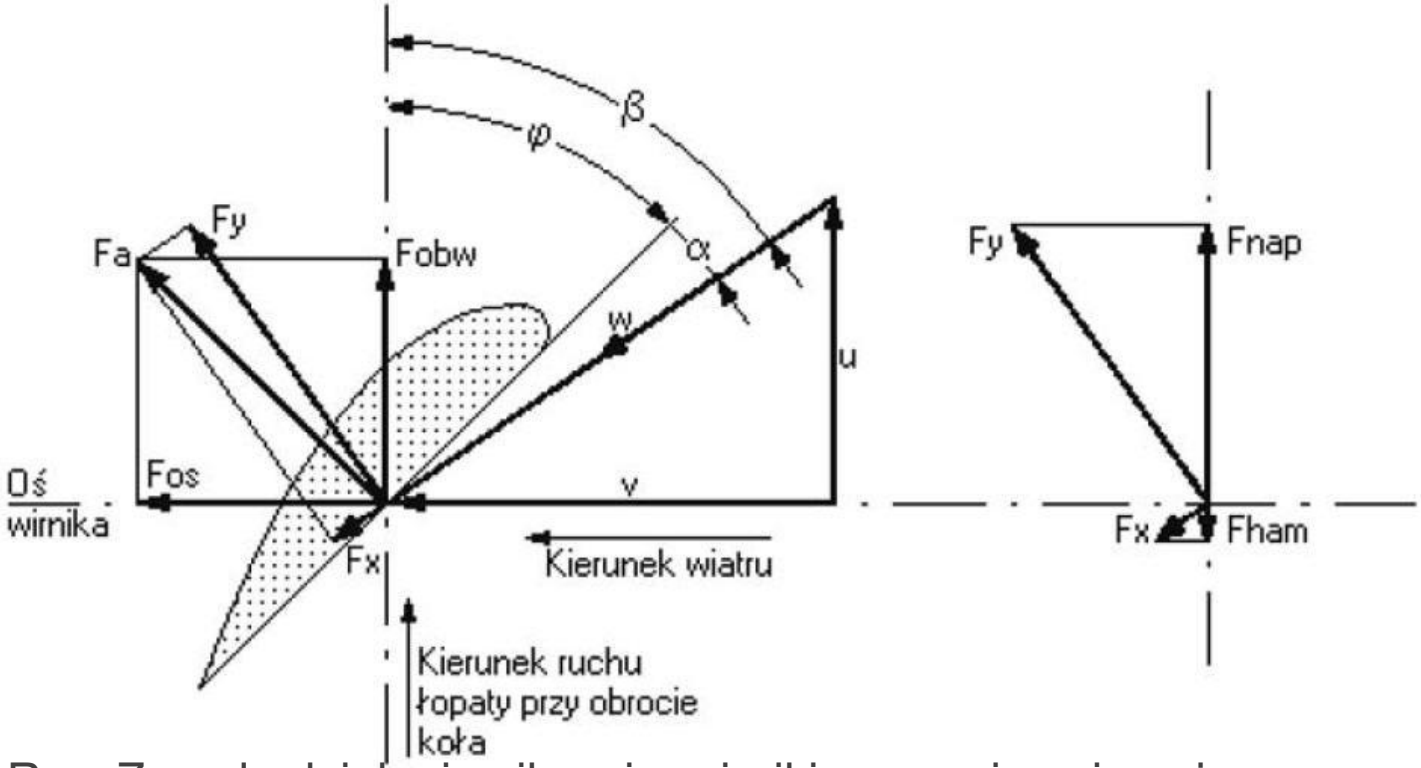
Powietrze opływające górną część skrzydła ma większą drogę do pokonania, a więc porusza się szybciej, dzięki czemu ciśnienie jest mniejsze niż na dolnej części skrzydła - tworzy to siłę nośną, która działając na skrzydło utrzymuje samolot w powietrzu.
Jest ona prostopadła do kierunku wiatru (*prędkość względna **w***).

Ta sama siła, która utrzymuje w powietrzu samolot powoduje, że wirnik elektrowni wiatrowej obraca się na wietrze.

Wartość siły nośnej zależy od powierzchni skrzydła, gęstości powietrza i jego prędkości oraz od kształtu skrzydła.



Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

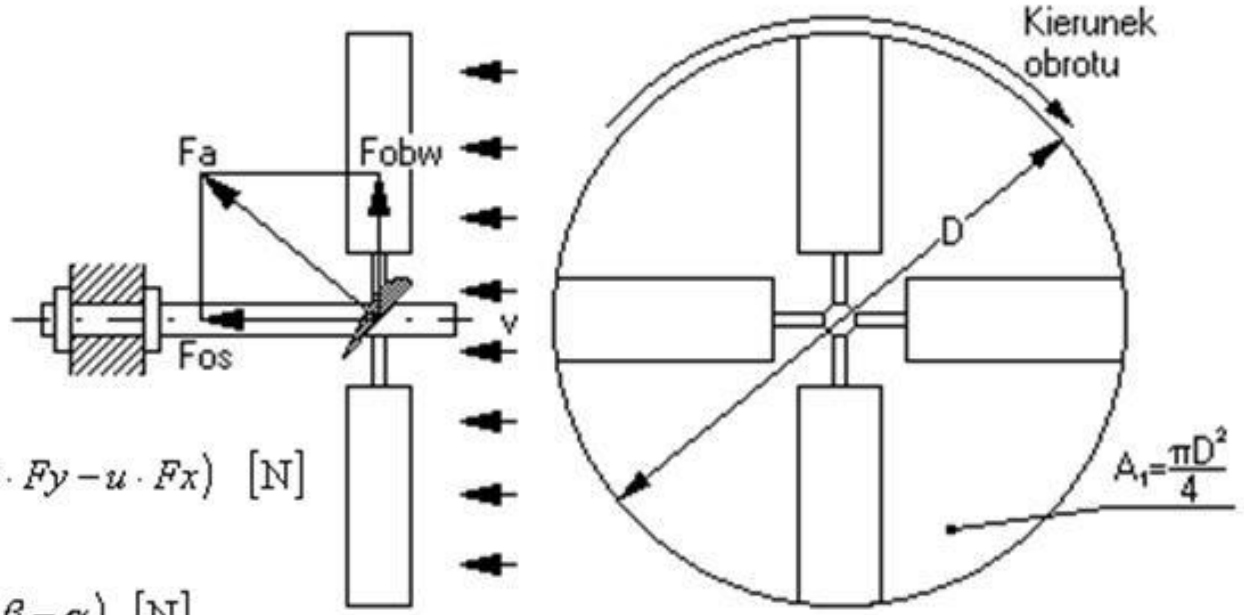


Rys. Zasada działania siłowni z wirnikiem o osi poziomej

Fa – siła aerodynamiczna; Fy – siła nośna; Fx – siła oporu
v- prędkość wiatru; u – prędkość strumienia powietrza wynikająca z ruchu obrotowego wirnika (prędkość obwodowa); w – wypadkowy wektor ruchu powietrza opływającego łopatkę (prędkość wypadkowa - względna); α – kąt natarcia; β - kąt napływu prędkości względnej

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Siła aerodynamiczna ***Fa*** może być rozłożona na składową styczną do płaszczyzny obrotów wirnika ***Fobw*** i normalną ***Fos*** (osiową). Składowa styczna powoduje obrót, a składowa normalna wywołuje nacisk osiowy, który jest przejmowany przez łożyska.



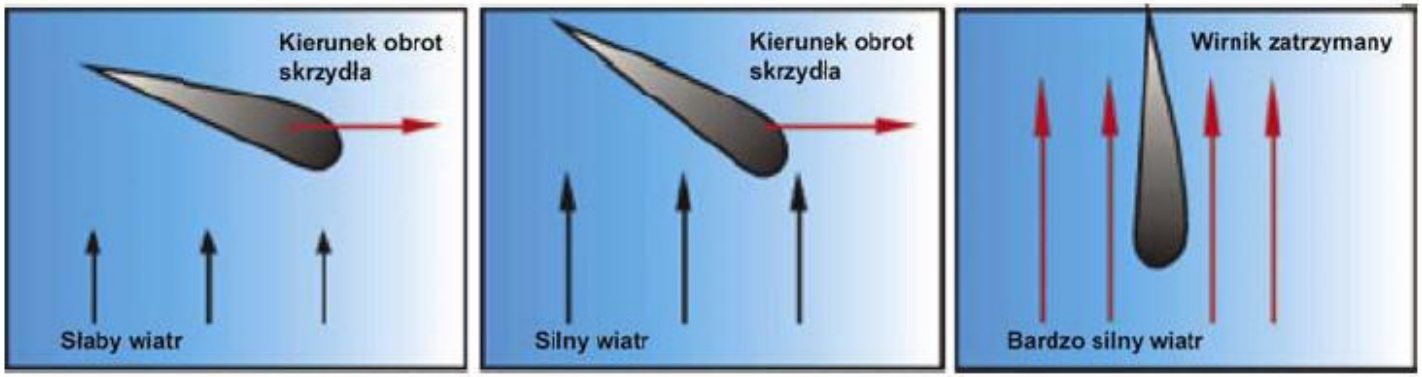
$$Fobw = Fnap - Fham = \frac{1}{w} \cdot (v \cdot Fy - u \cdot Fx) \quad [\mathrm{N}]$$

$$Fos = Fa \cdot \cos(\beta - \alpha) \quad [\mathrm{N}]$$

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Dla zwiększenia wykorzystania energii wiatru oraz regulacji prędkością obrotową wirnika stosuje się **systemy regulacji kąta natarcia łopat.**

Inne rozwiązanie - **systemem zmiany ustawienia płaszczyzny turbiny (wirnika) względem wiatru**. Jest on również jednym z elementów bezpieczeństwa skutecznie ograniczającym obroty wirnika w sytuacji, gdy siła wiatru jest bardzo duża. Wraz ze wzrostem siły wiatru następuje zmiana położenia wirnika względem wiatru - cały wirnik ustawia się „bokiem do wiatru".

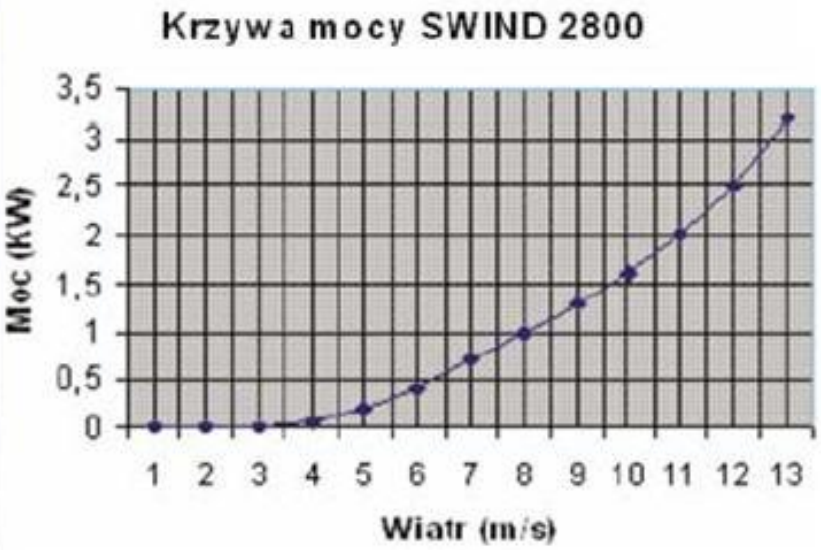


Rys. System regulacji kata natarcia łopat.

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań, c.d.

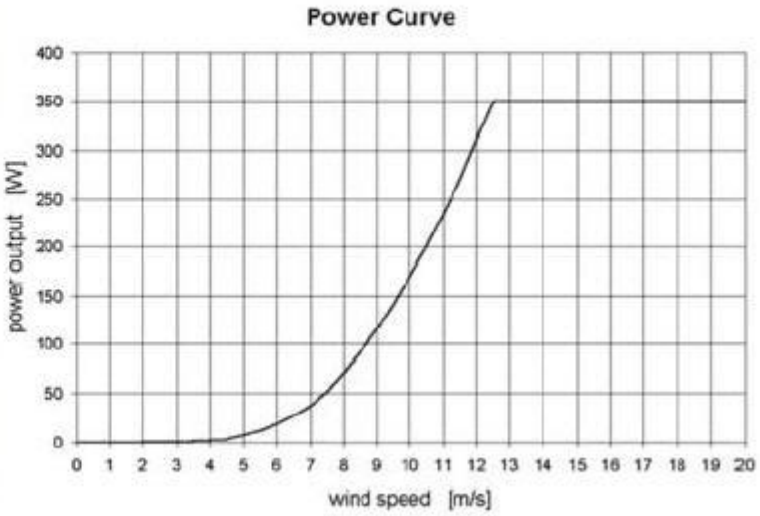
Wirniki **trójłopatowe** – najczęściej stosowane w siłowniach dużej, średniej i małej mocy.



Zdj. Trójpłatowa siłownia wiatrowa SWIND 2800

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań, c.d.



Zdj. Mikrosiłownia SUPERWIND 350, np. może być montowana na większych łodziach lub żaglówkach morskich do zasilania instalacji elektrycznej, nawigacji itd.

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań c.d.

	SWIND 2800	SWIND 6000	SUPERWIND 350
Moc znamionowa	3,0 kW	6 kW	350 W
Średnica wirnika	3,5 m	4,8 m	1,20 m
Wirnik	3 łopaty	3 łopaty	3 łopaty
Prądnica	generator synchroniczny trójfazowy, prąd przemienny	generator synchroniczny trójfazowy, prąd przemienny	generator 12 VDC / 24 VDC
Nominalna prędkość wiatru	12 m/s	12,5 m/s	12,5 m/s
Masa gondoli z wirnikiem	ok. 80 kg	ok. 210 kg	ok. 11,5 kg
Ustawianie do wiatru	ster kierunkowy	ster kierunkowy	ster kierunkowy

Tab. Dane techniczne

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań, c.d.

Wirniki **dwułopatowe** – rozwiązanie to redukuje koszty produkcji oraz obniża masę wirnika. Wymaga jednak większej prędkości obrotowej, aby uzyskać moc wyjściową porównywalną z maszyną trójpłatową, co w połączeniu z większym hałasem i mniej harmonijnym wyglądem zdecydowało o słabnącej popularności tego rozwiązania.

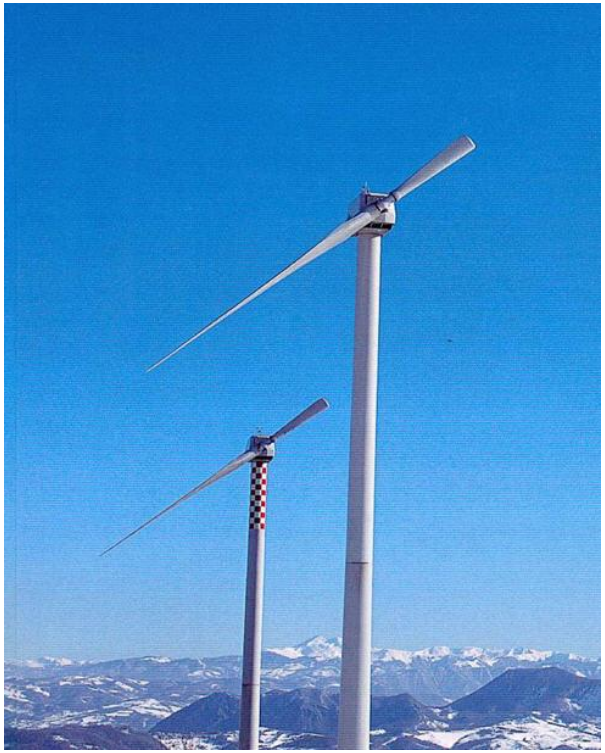
Zdj. Elektrownia wiatrowa 3.0 MW WTS80-3/1 Näsudden II Sztokholm

Konstrukcja	pozioma
Moc max.	3000 kW
Wys. wieży	78 m
Średnica wirnika	80 m
Liczba łopat	2
Prędkość wirnika	14 - 21 obr/min
Min. prędkość wiatru	6 m/s
Optymalna prędkość	14 m/s
Prędkość wyłączenia	25 m/s
System kontroli mocy	zmienny kąt natarcia łopatek
Masa głowicy	162 000 kg
Kąt uniesienia łopat	8 stopni

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań, c.d.

Wirniki **jednopłatowe** – bardzo rzadko spotykane, wymagają jeszcze większych prędkości obrotowych i są głośniejsze niż dwupłatowe. Zaletą - są niższe koszty.



Zdj. Turbiny wiatrowe z wirnikiem jednopłatowym

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań, c.d.

Wirniki **wielołopatowe** – nie znajdują zastosowania w zawodowej energetyce, ale jako dodatkowe źródło energii elektrycznej dla domu lub mechanicznej (napęd pomp wodnych) sprawdzają się znakomicie. Ich największymi zaletami są: **rozruch już przy bardzo słabym wietrze**, duży moment obrotowy oraz prostota konstrukcji (płaty nie mają specjalnych profili aerodynamicznych), i **niska cena** w porównaniu z elektrowniami o dwóch lub trzech śmigłach.

Zdj. Wiatraki wolnobieżne, wielołopatowe

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań - Wirniki wielołopatowe c.d.

Przykładowy wiatrak wielopłatowy o mocy 5 kW:

Średnica wirnika: 5,5 m, co daje współczynnik wytworzonej energii do powierzchni zakreślanej przez wirnik **0,21 kW/m2** co nie jest imponującą wartością - mniejszą od osiąganej przez przeciętne konstrukcje 3 płatowe o tej samej mocy (od 0,26, do 0,36 kW/m2 w przypadku małych aerogenratorów).

Ale, wirnik wielopłatowy rozpoczyna produkcję energii już przy wietrze rzędu **2,1 m/s**, podczas gdy dobre wirniki trzypłatowe dopiero przy wiatrach w granicach 3-4 m/s. Moc nominalną aerogenerator typu T550 osiąga przy prędkości wiatru **12 m/s**, co jest wartością porównywalną do nominalnej prędkości wiatru dla turbin 3 płatowych.

Zdj. Elektrownia wiatrowa T550

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań - wirniki **wielołopatowe** c.d.

	T 330	T 460	T 550	T 780
Moc znamionowa	1 kW	3 kW	5 kW	10 kW
Średnica wirnika	330 cm	460 cm	550 cm	780 cm
Wirnik wielopłatowy	36	42	48	48
Prędkość rozruchu	2,1 m/s	2,1 m/s	2,1 m/s	2,1 m/s
Nominalna prędkość wiatru	11,6 m/s	11,6 m/s	12 m/s	12 m/s
Ustawianie do wiatru	ster kierunkowy	ster kierunkowy	ster kierunkowy	ster kierunkowy

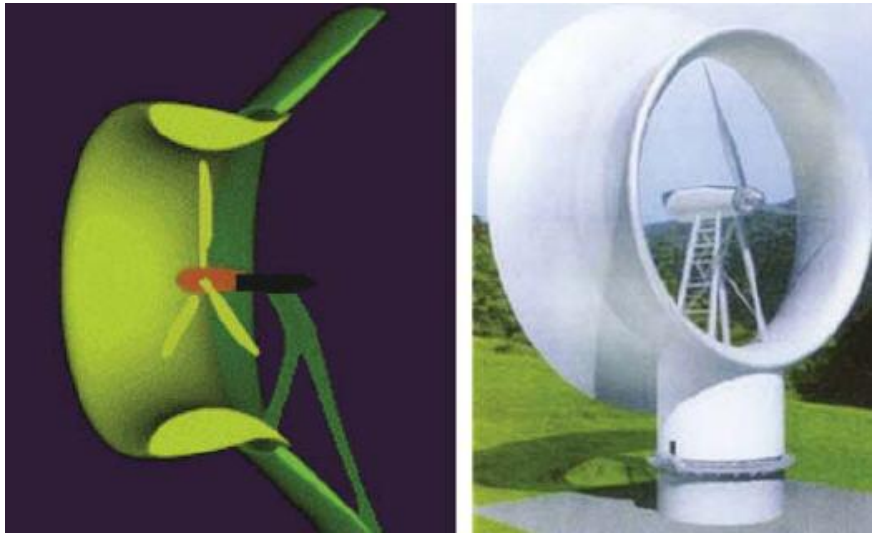
Tab. Parametry siłowni wiatrowej typ T

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań - wirnik z **dyfuzorem**

Jeśli tradycyjny wirnik zabudujemy w tunelu, a dokładniej w jego przewężeniu, będzie on wirował w powietrzu przepływającym szybciej niż wiatr poza tym tunelem. Dzięki temu możliwe będzie otrzymanie większej ilości energii niż bez otunelowania wirnika.

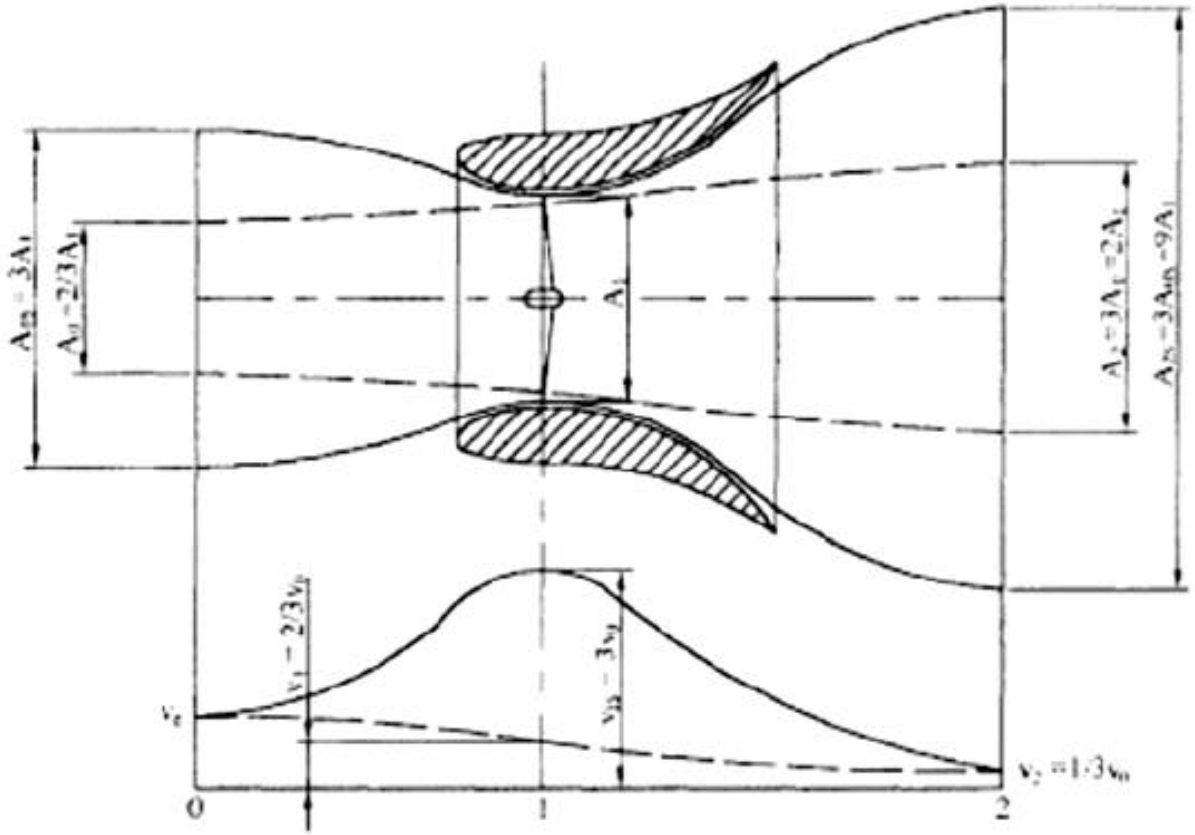
Zgodnie z prawem Bernouliego - w rurze (tunelu), w której występują zmiany średnicy, zmienia się również prędkość przepływu gazu.



Zdj. Turbina wiatrowa z dyfuzorem

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań – wirnik **z dyfuzorem** c.d.



Rys. Zasada działania dyfuzora

Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań – wirnik z dyfuzorem c.d.

- wiatraki z dyfuzorem uzyskują ok. 3-krotnie większą moc w porównaniu do wiatraków o tych samych rozmiarach, ale nieotunelowanych (bo powietrze w przewężeniu znacznie zwiększa swoją prędkość przepływu)
- szybkie obroty śmigła – mniejsze przełożenie miedzy nim a prądnicą
- małe rozmiary – zwiększają sztywność konstrukcji
- bezpieczeństwo – obudowa chroni otoczenie w przypadku rozerwania wirnika
- uzasadnione ekonomicznie zastosowanie przy niskich prędkościach wiatru – mogą być stosowane praktycznie na terenie całego kraju, również na terenach o nienajlepszych warunkach wiatrowych
- mogą pracować przy prędkości wiatru <4 m/s
- niższy koszt inwestycji – można stosować turbiny o mniejszych średnicach i na niższych wieżach

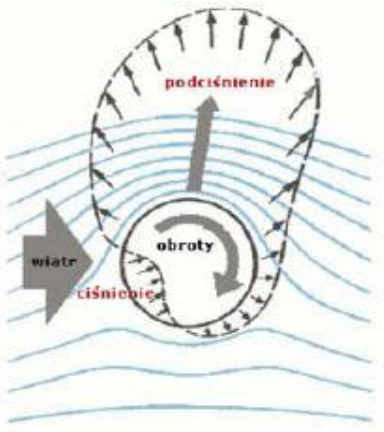
Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań - Wykorzystanie **efektu Magnus,a**

Podczas opływu powietrza dookoła obracającego się walca kołowego, o osi prostopadłej do kierunku wiatru, powstaje siła poprzeczna do wiatru skierowana od strony, po której wiatr i obrót mają kierunki przeciwne, ku stronie, po której kierunki wiatru i obrotu są zgodne. Zjawisko to jest znane jako „zjawisko Magnusa".

Obracający się w strumieniu powietrza walec powodujący zjawisko Magnusa może osiągnąć współczynnik siły nośnej nawet 10.

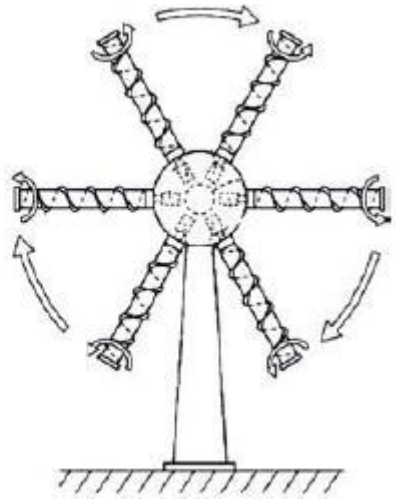
Końce walca zaopatrzone są w wystające ponad jego powierzchnię krążki, uniemożliwiające wyrównywanie się ciśnień po obu stronach cylindra (aby zapobiec powstawaniu oporu indukcyjnego), oraz nadanie walcowi szybkości obwodowej około czterokrotnie większej niż szybkość wiatru.



Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań - Wykorzystanie **efektu Magnus,a, c.d.**

- wyższa sprawność przy małych prędkościach wiatru
- większa odporność na wiatry o zbyt dużej prędkości
- wirnik obraca się 3 razy woniej niż w konwencjonalnych rozwiązaniach: mniejszy hałas i większe bezpieczeństwo dla ptaków



Rys. Siłownie wiatrowe wykorzystujące efekt Magnus'a

Startowa prędkość wiatru	3 m/sek.
Zatrzymanie przy prędkości wiatru	25 m/sek.
Nominalna prędkość wiatru	12 m/sek.
Rotor elektrowni, średnica	56 m
Powierzchnia napływu	2463 m^2
Prędkość obrotowa	3 - 6,1 obr/min
Ilość wirników	3
Regulacja prędkości wirników	płynna
Wieża	Rurowa , stożkowa, stalowa
Wysokość do głowicy	60 m
Przekładnia napędowa	Hydroobjętościowa (hydrauliczna)
Generator	Asynchroniczny 4 biegunowy
Moc nominalna	1000 kW
Napięcie	690 V
Regulacja	Mikroprocesorowy sterownik programowalny
Układ orientacji	Akcyjny z jednym silnikiem napędowym
Ciężar	Wieża 80 t Platforma (gondola) 40 t Rotor elektrowni 38 t
Układ bezpieczeństwa	Pasywny, bez hamulców

Rys. Siłownia wiatrowa ACOWIND A-63

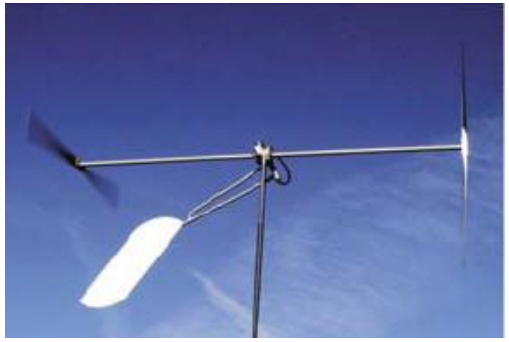
Siłownie wiatrowe z poziomą osią obrotu (HAWT) c.d.

Przykłady rozwiązań – inne…

Turbina typu Energy Ball

Układ siłowni z dyfuzorem

Układ siłowni 3-płatowych



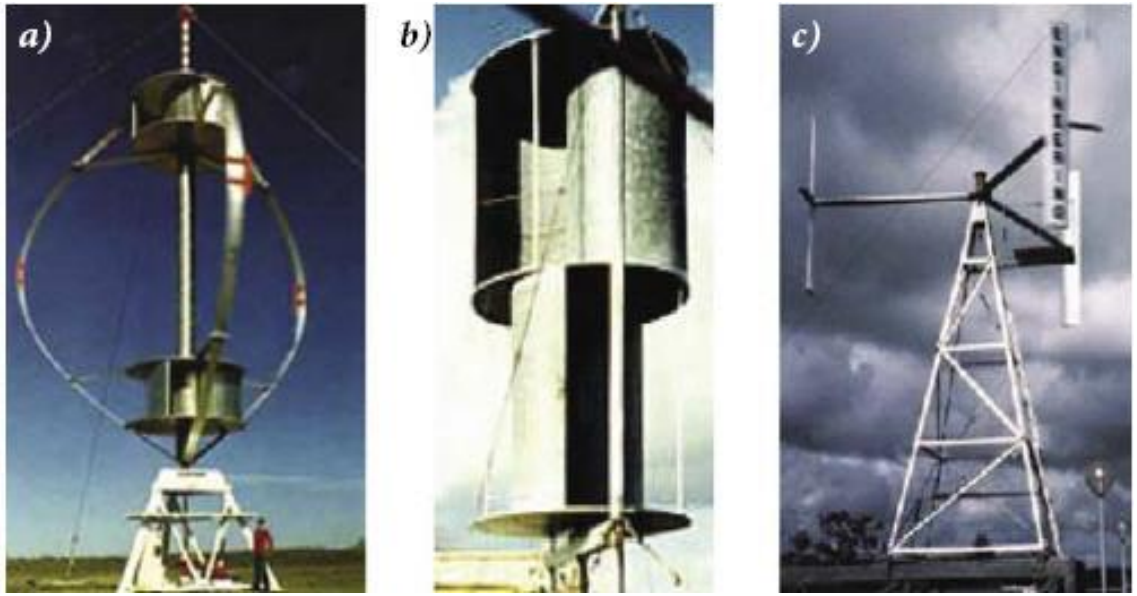
Z podwójnym wirnikiem

Układ siłowni bębnowych

Siłownia z 7 turbinami

Siłownie wiatrowe o pionowej osi obrotu (VAWT)

Silniki typu VAWT stanowią niewielką część pracujących obecnie instalacji. Większość konstrukcji bazuje na trzech podstawowych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Są to silniki **Savonius'a**, **Darrieus'a** oraz **rotory typu H**.



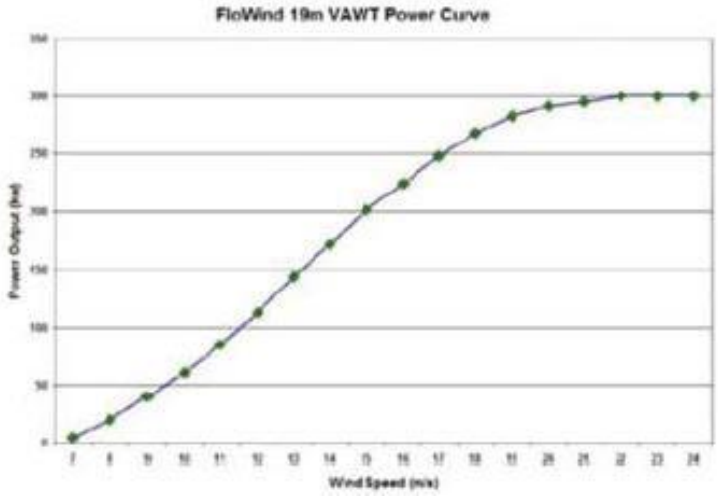
Zdj. a) wirnik Darrieus'a sprzęgnięty z dwoma wspomagającymi wirnikami Savonius'a; b) silnik wiatrowy Savonius'a; c) turbina o wirniku w kształcie H.

Siłownie wiatrowe o pionowej osi obrotu (VAWT), c.d.

Przykłady rozwiązań – Wirnik **Darrieus'a**

Wirnik tego typu ma praktycznie zerowy moment startowy – konieczne jest wstępne napędzanie turbiny, np. napęd elektryczny.

Wirnik Darrieus'a wyposażony w dwa pomocnicze wirniki Savonius'a - jest to dość nietypowe rozwiązanie zapewniające uzyskanie odpowiedniego momentu napędowego przy starcie turbiny.

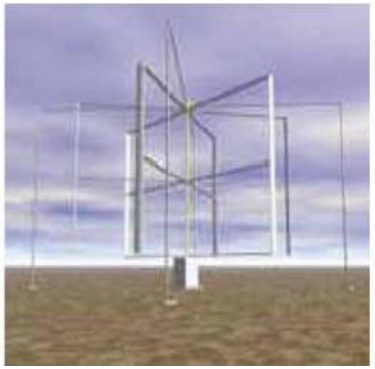


Zdj. Turbina wiatrowa z pionową osią obrotu o wysokości 19m produkcji firmy FloWind, wykorzystująca silnik Darrieus'a

Siłownie wiatrowe o pionowej osi obrotu (VAWT), c.d.

Przykłady rozwiązań – Wirnik typu **H**

Są to silniki wiatrowe wytwarzające moment napędowy w wyniku siły nośnej powstającej na profilu płata lotniczego. W zasadzie, rotor typu H można potraktować jako wycinek wirnika Darrieus'a. Istnieją rozwiązania z dwoma, trzema, czterema i pięcioma płatami. Wielkości turbin z rotorem typu H obejmują konstrukcje mikro (moc rzędu kilkudziesięciu wat) do konstrukcji o mocach rzędu kilkudziesięciu kilowat.

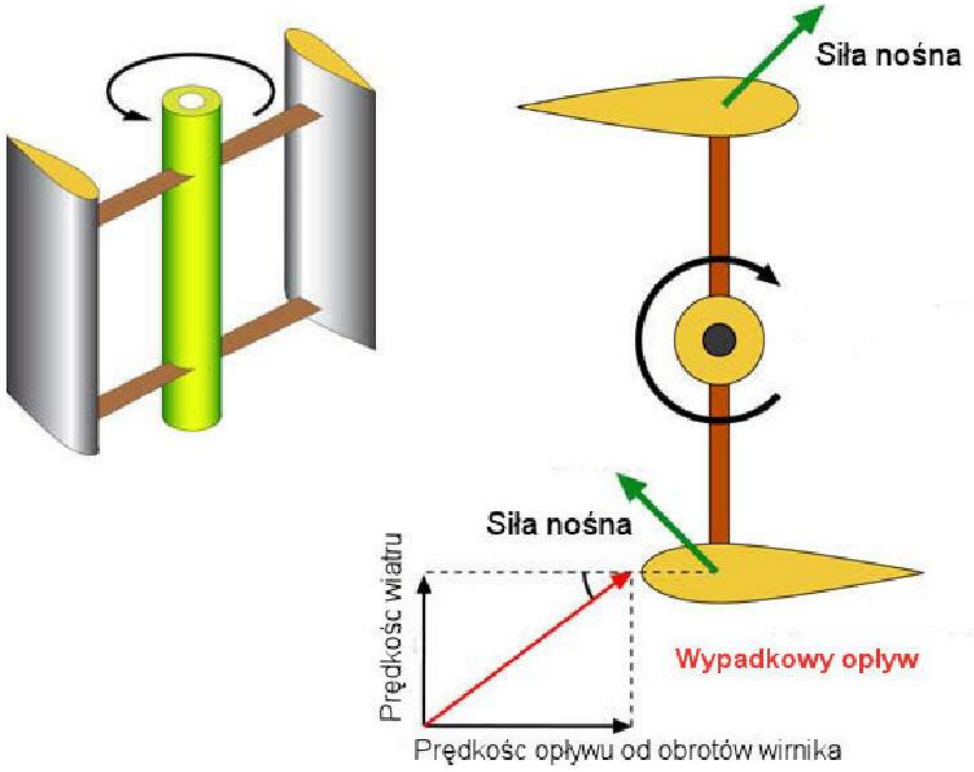


Zdj. Turbina wiatrowa z pionową osią obrotu typu H

Siłownie wiatrowe o pionowej osi obrotu (VAWT), c.d.

Silnik Darrieus'a i typu H

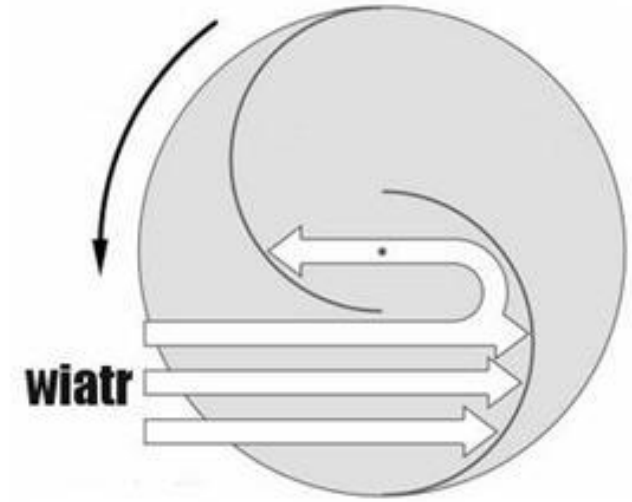
Silnik Darrieus'a i typu H, są urządzeniami wykorzystującymi siłę nośną powstająca w wyniku przepływu powietrza wokół profilu o odpowiednim kształcie.



Rys. Zasada powstawania siły nośnej, która w efekcie generuje moment napędowy w silniku Darrieus'a jak również w rotorach typu H.

Siłownie wiatrowe o pionowej osi obrotu (VAWT), c.d.

Przykłady rozwiązań – Wirnik **Savonius'**a
Jest to urządzenie o bardzo prostej budowie. Silnik Savonius'a charakteryzuje się niewielką sprawnością przetwarzania energii wiatru na energię użyteczną. Mimo to, są stosowane ze względu na **niezawodność**, **prostotę konstrukcji** oraz **niskie koszty wytworzenia**.



Zdj. Zasada działania silnika Savoniusa

Siłownie wiatrowe o pionowej osi obrotu (VAWT), c.d.

Przykłady rozwiązań – inne

Modyfikacja turbiny typu T

Turbina świderkowa

Turbina z „kieszeniami chwytającymi wiatr”

Zalety i wady siłowni z wirnikiem typu HAWT i VAWT

Konstrukcje o poziomej osi obrotu (HAWT)

Zalety:

- posiadają wyższą sprawność od turbin o pionowej osi obrotu
- estetyczny i harmonijny wygląd
- duża sprawność wykorzystania energii wiatru

Wady:

- wysoki poziom emitowanego hałasu ze względu na wysoką prędkość obrotową
- wymagają mechanizmu, który przy bardzo silnym wietrze ogranicza obroty turbiny
- wymagają mechanizmu „naprowadzania na wiatr”

Zalety i wady siłowni z wirnikiem typu HAWT i VAWT, c.d.

Konstrukcje o pionowej osi obrotu (VAWT)

Zalety:

- jednakowa praca niezależna od kierunku wiatru – nie wymagają mechanizmu „ustawiania na wiatr”, a więc uproszczona konstrukcja mechaniczna oraz sterowanie
- możliwość łatwego montażu na obiektach – nie jest konieczne budowanie wysokich masztów
- możliwość montażu na dachach budynków, słupach, istniejących konstrukcjach masztów, itp., również jako konstrukcje przenośne
- cicha praca – nawet przy maksymalnej prędkości obrotowej
- odporność na silny wiatr – **nie wymaga zatrzymania** nawet przy wietrze o prędkości 40 m/s – kształt wirnika zapewnia aerodynamiczne ograniczenie prędkości obrotowej,

Zalety i wady siłowni z wirnikiem typu HAWT i VAWT, c.d.

Konstrukcje o pionowej osi obrotu (VAWT), c.d.

Zalety c.d.:

- stosunkowo wysoka czułość na małe prędkości obrotowe – turbina o mocy 2,5 kW jest w stanie wytworzyć rocznie ok. 1.800 kWh energii elektrycznej, przy prędkości wiatru 2,5 m/s
- odporność w warunkach zimowych na pokrycie szadzią, szronem czy lepkim śniegiem – dzięki niewielkiej średnicy i niskiej prędkości obrotowej, nie powoduje dużych niebezpiecznych drgań
- bezobsługowa praca zespołu prądotwórczego – brak połączeń ślizgowych
- stosunkowo niski koszt w porównaniu z klasycznym wiatrakiem o poziomej osi obrotu
- estetyczny wygląd – podczas pracy wrażenie cyklicznej zmiany kształtu, daje nowe możliwości umieszczenia reklam czy też wykorzystania jako element scenografii i krajobrazu

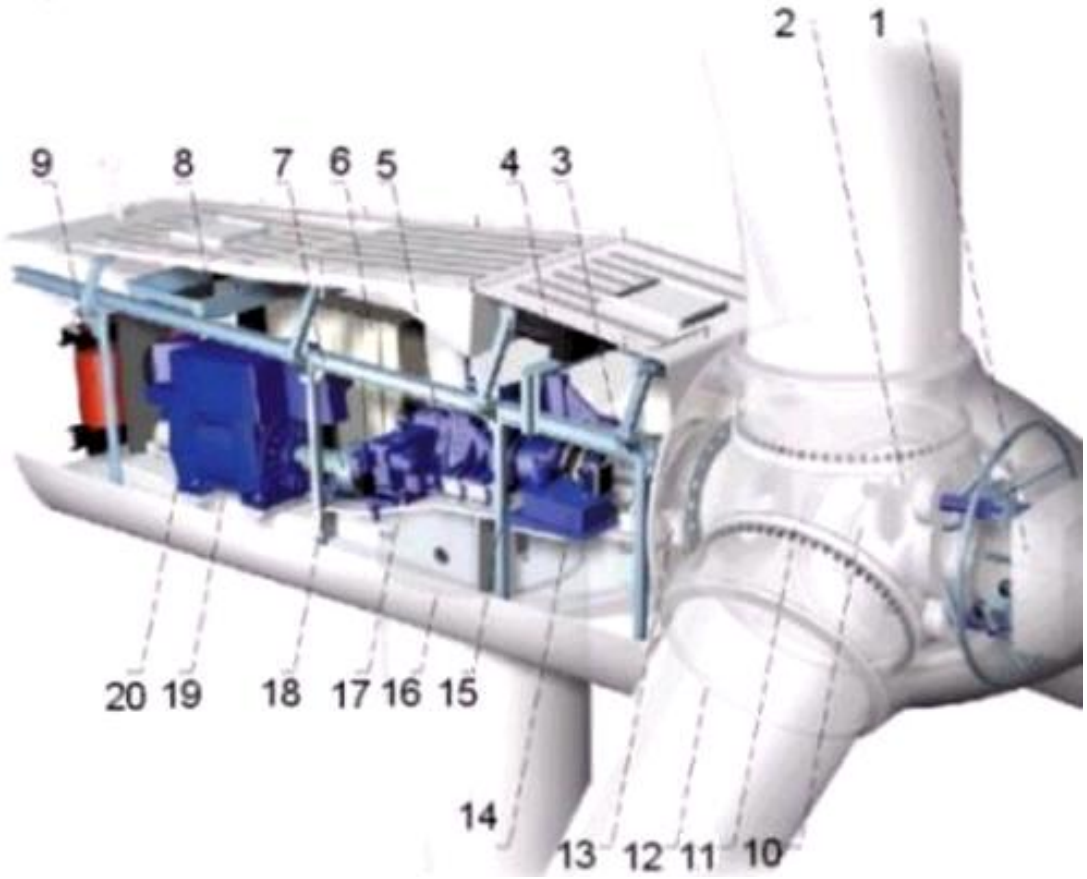
Zalety i wady siłowni z wirnikiem typu HAWT i VAWT, c.d.

Konstrukcje o pionowej osi obrotu (VAWT), c.d.

Wady:

- niska sprawność, aby wytworzyć taką samą ilość energii, co tradycyjne turbiny wymagają znacznie większych gabarytów,
- ze względu na niewielką prędkość obrotową potrzebny jest generator wolnobieżny lub przekładnia, której zastosowanie zmniejsza dodatkowo sprawność urządzenia i przyczynia się do zwiększenia emisji hałasu.

Budowa elektrowni wiatrowej (model V80-2.0MW firmy Vestas)



1) kontroler (sterownik piasty),
2) mechanizm ustawiania łopat,
3) główny wał, 4) chłodnica oleju,
5) przekładnia,
6) wieloprocesorowy układ sterowania, 7) hamulec postojowy,
8) dźwig dla obsługi - serwisowy,
9) transformator, 10) piasta wirnika
11) łożysko łopaty, 12) łopata
13) układ hamowania wirnika – blokowania wirnika,
14) układ hydrauliczny, 15) tarcza układu hamowania wirnika, 16) pierścień układu kierunkowania, 17) rama 18) koła zębate układu kierunkowania, 19) generator, 20) chłodnica generatora powłok przymocowanych do belki nośnej.

Zasada działania elektrowni wiatrowej

Wirnik osadzony jest na wale wolnoobrotowym – najczęściej wirnik obraca się z prędkością: **15-30 obr/min**

Przekładnia (skrzynia przekładniowa), zwiększa je 50-cio krotnie, do **1.500 obr/min**. Stopień przełożenia przekładni, zależy od typu zastosowanej w elektrowni wiatrowej prądnicy. Stosuje się również rozwiązania bez przekładni.

Wału szybkoobrotowego, połączony jest z wałem generatora (prądnicy).

Jako generatory, stosuje się najczęściej **prądnice asynchroniczne**.

W elektrowniach dużej mocy stosuje się najczęściej napęd bezpośredni, zmieniając ilość par biegunów maszyny asynchronicznej.

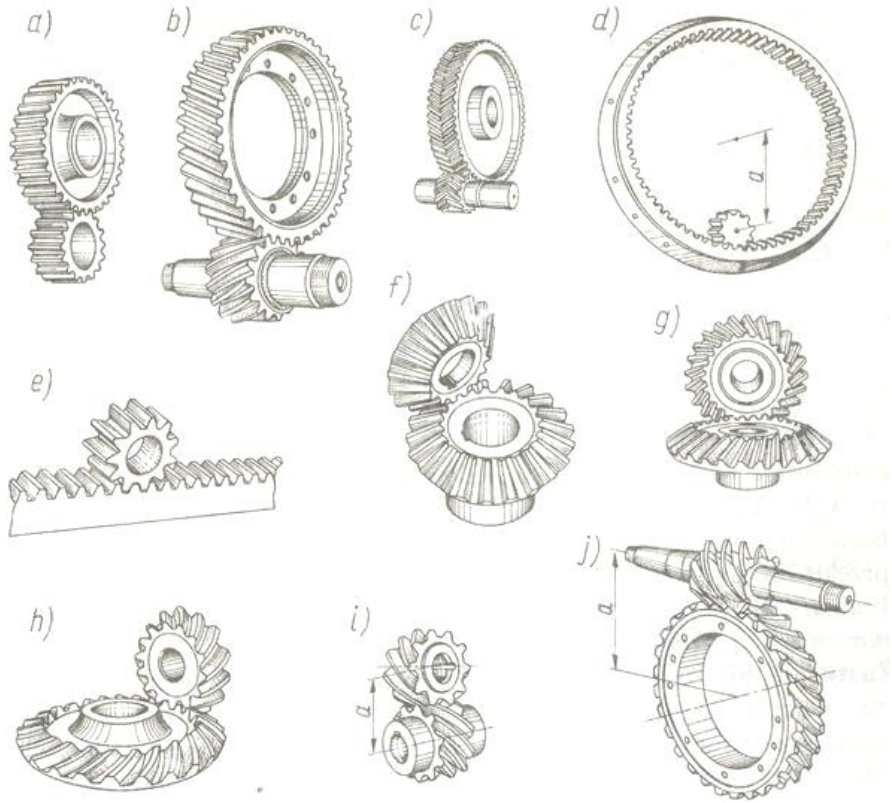
Zasada działania elektrowni wiatrowej, c.d.

Całe wyposażenie elektrowni znajduje się w gondoli.
Za pomocą silników i przekładni zębatej, gondola może się obracać, tym samym optymalnie ustawiać wirnik w kierunku wiatru.

Gondola osadzona jest na szczycie wieży, wykonanej najczęściej z rury stalowej, rzadziej w formie kratownicy.

Zasada działania elektrowni wiatrowej, c.d.

Przekładnie

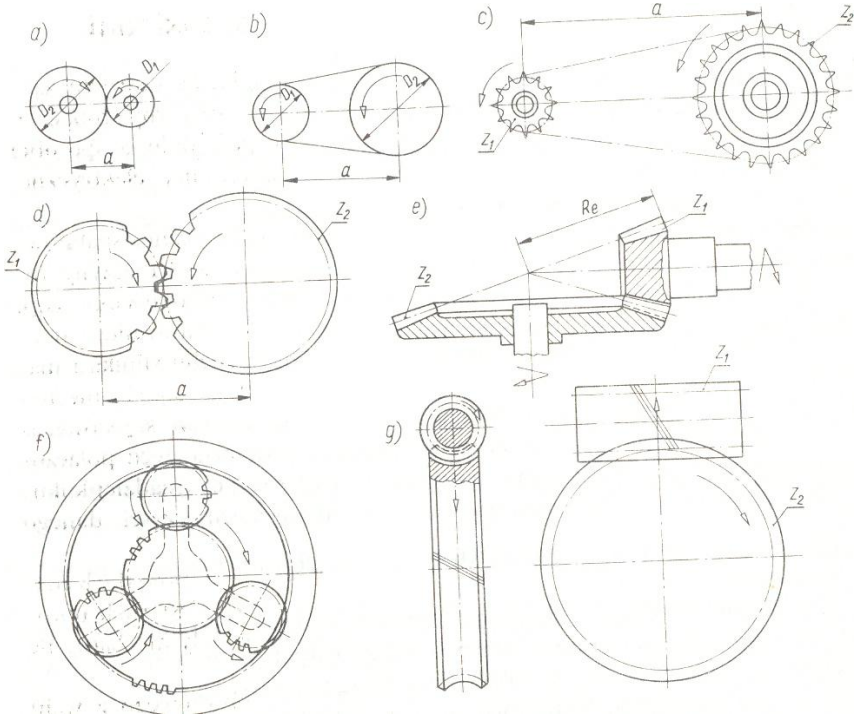


Przekładnie zębate:
- walcowe o zazębieniu zewnętrznym, składające się z kół walcowych o zębach prostych, skośnych i daszkowych (rys. a, b, c),
- zębatkowe (rys. e),
- o zazębieniu wewnętrznym (rys. d),
- stożkowe, składające się z kół stożkowych o zębach prostych (rys. f), skośnych (rys. g) lub krzywoliniowych (rys. h),
- śrubowe (rys. i) i ślimakowe (rys. j).

Rys. Przekładnie zębate: a-d) walcowe, e) zębatkowa, f-h) stożkowe, i) śrubowa, j) ślimakowa

Zasada działania elektrowni wiatrowej, c.d.

Przekładnie c.d.



Rodzaje przekładni mechanicznych: a) cierna, b) pasowa, c) łańcuchowa, d-g) przekładnie zębate (d – walcowa, e – stożkowa, f – planetarna, g – ślimakowa).

Prędkość kątowa, obrotowa i obwodowa:
ω – prędkość kątowa [rad/s]
n – prędkość obrotowa [obr/min]

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30}$$

$$v_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n_1}{60}$$

Przełożenie
Przełożeniem kinematycznym przekładni nazywa się stosunek prędkości kątowej koła czynnego (napędzającego) do prędkości kątowej koła biernego (napędzanego).

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

System sterowania i zabezpieczeń

Turbiny wiatrowe wyposażone są w systemy zabezpieczeń,
np. aerodynamiczny system hamowania: awaryjnego i postojowego.

Do zatrzymania turbiny stosowany jest zwykle hamulec tarczowy.

System sterowania, pobiera dane do analiz, monitoruje stan siłowni
i odpowiednio steruje jej pracą.

Regulacja mocy oddawanej

Regulacja mocy oddawanej przez elektrownię wiatrową, ma na celu wytworzenie żądanego poziomu mocy przy satysfakcjonującej jakości energii elektrycznej i minimalizacji przejściowych przeciążeń mechanicznych wirnika oraz wału łączącego wirnik z generatorem (co wpływa na wydłużenie czasu pracy elektrowni).

Koncepcje pracy siłowni wiatrowej:

- ze stałą prędkością obrotową
- ze zmienną prędkością obrotową

Dopasowanie prędkości obrotowej turbiny i kierunku ustawienia do wiatru - regulacja: **aktywna** lub **pasywna** (samoczynna).

Regulacja mocy oddawanej, c.d.

Regulacja przez ustawienie elektrowni w kierunku wiatru (Yaw Control)

Polega na obrocie gondoli, tym samym również wirnika elektrowni, względem kierunku napływającego wiatru. Realizowana w sposób:

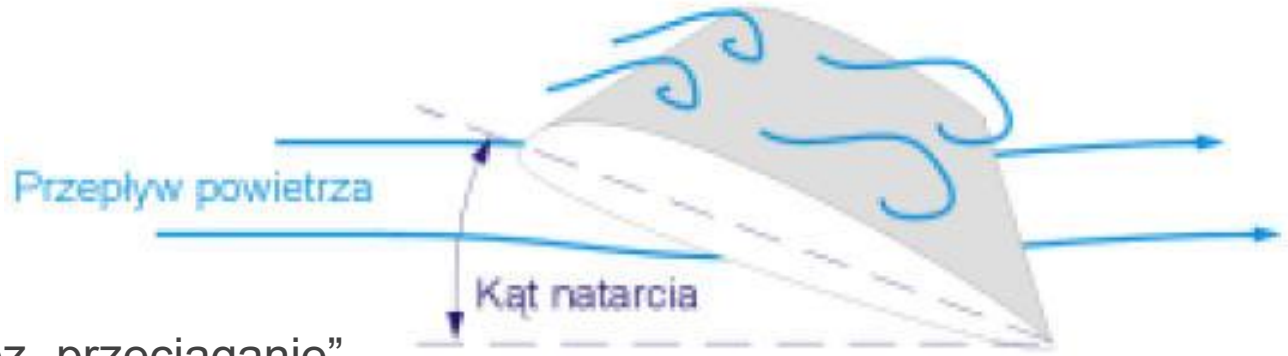
- aktywny – silnik kierunkowy, poprzez pierścień układu kierowania zmienia ustawienie gondoli; ponieważ moc elektrowni zależy od powierzchni zarysu wirnika, odsunięcie siłowni od głównego kierunku wiatru powoduje zmniejszenie użytecznej powierzchni zarysu wirnika i ograniczenie oddawanej mocy

- pasywny – realizowane przez chorągiewkę kierunkową na gondoli; wirnik ustawia się samoczynnie na wprost kierunku wiatru – optymalnie do kierunku wiatru

Regulacja mocy oddawanej, c.d.

Regulacja przez „przeciąganie” (Stall Regulation)

Jeśli pochylimy skrzydło do tyłu – szybkość strumienia powietrza na górze skrzydła wzrośnie, co spowoduje wzrost siły nośnej. Ale, po przekroczeniu pewnego kąta natarcia (umowny kąt zawarty między cięciwą profilu łopatki wirnika, a kierunkiem strumienia powietrza), zwanego krytycznym, nastąpi oderwanie strug powietrza na górnej części skrzydła, co prowadzi do zaniku siły nośnej. Zjawisko to nosi nazwę **przeciągania**, lub czasami używane określenie: „**utknięcie**”.



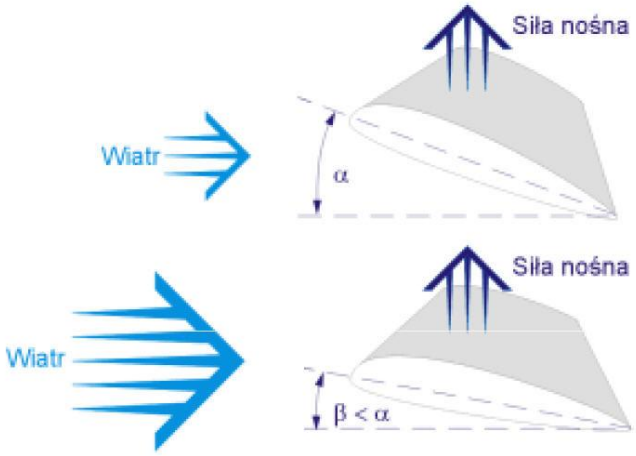
Rys. Regulacja przez „przeciąganie”

Regulacja mocy oddawanej, c.d.

Regulacja przez zmianę kąta ustawienia łopat (Active Pitch Regulation)

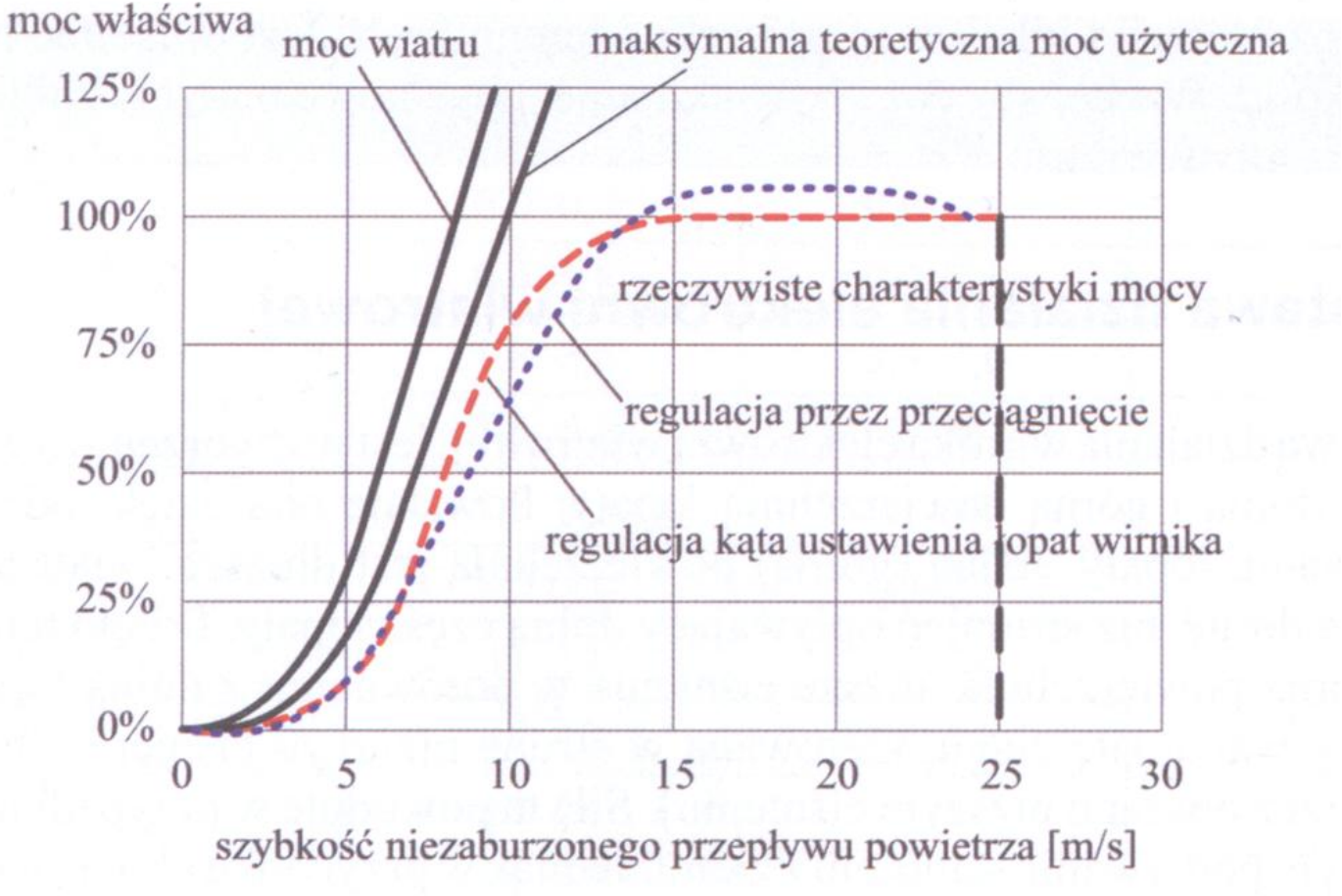
Jest to aktywna regulacja mocy, realizowana przez zmianę kąta natarcia łopat. Wielkości sił nośnych i hamujących, działających na łopaty wirnika, zmieniają się w zależności od prędkości wiatru i oddawanej mocy.

Taki sposób regulacji pozwala na utrzymywanie stałej prędkości obrotowej wirnika. Jest również stosowana w siłowniach o zmiennej prędkości obrotowej turbiny.



Rys. Regulacja przez zmianę kąta natarcia

Regulacja mocy oddawanej, c.d.



Rys. Charakterystyka pracy turbiny wiatrowej - regulacja

Regulacja mocy oddawanej, c.d.

Regulacja przez zmianę prędkości obrotowej generatora

Polega na równoczesnym kontrolowaniu zmian prędkości obrotowej wirnika i generatora, oraz kąta natarcia łopat wirnika.

Ma na celu eliminację fluktuacji wytwarzanej mocy i ochronę elementów konstrukcji siłowni podczas nagłych powiewów wiatru.

Regulacja przez zmianę obciążenia (Load Control)

Polega na zmianie rezystancji, stanowiącej obciążenie generatora. Przenosi się w ten sposób punkt pracy siłowni z jednej charakterystyki mechanicznej na inną – bardziej korzystną, dla aktualnych prędkości i kierunku wiatru.

Regulacja mocy oddawanej, c.d.

Regulacja lotkami łopat wirnika (Aileron Control)

Polega na zmianie charakterystyki aerodynamicznej łopat, przez zmianę ustawienia tzw. „lotek” (jak w skrzydle samolotu).

Obecnie, rzadko spotykany rodzaj regulacji – powszechnie stosowany w pierwszych turbinach wiatrowych.

Systemy energetyki odnawialnej

Temat nr 8; 19.01.2016:
Energetyka wiatrowa

Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej: www.psew.pl

Mapa odnawialnych źródeł energii w Polsce:
http://www.ure.gov.pl/uremapoze/mapa.html

mgr inż. Krzysztof Gnyra
tel. 602 231 407
e-mail: kgnyra@gmail.com