

Energetyka wiatrowa - podstawy

Autor: dr inż. Grzegorz Barzyk

**POLITECHNIKA
SZCZECIŃSKA**



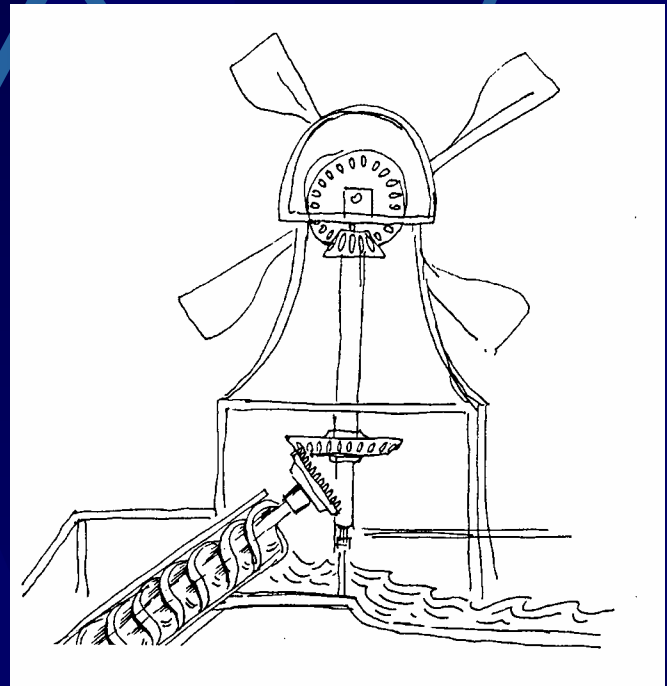
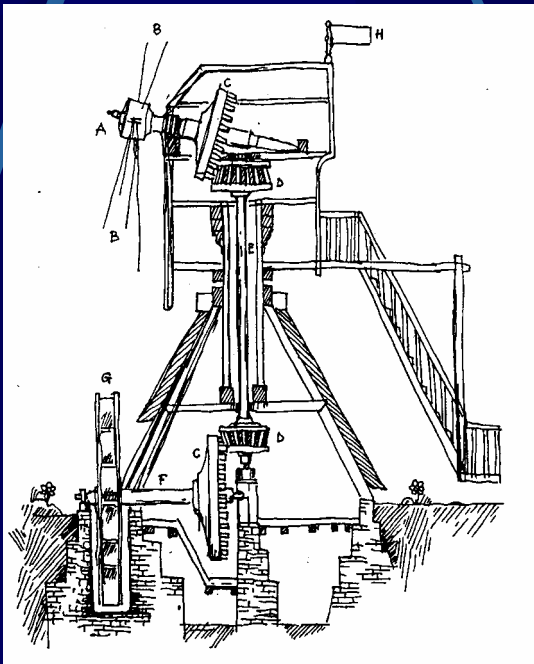
Instytut Elektrotechniki

70-313 SZCZECIN, UL. GEN. WŁ. SIKORSKIEGO 37

TEL. (+48-91) 49 48 73, 49 46 37

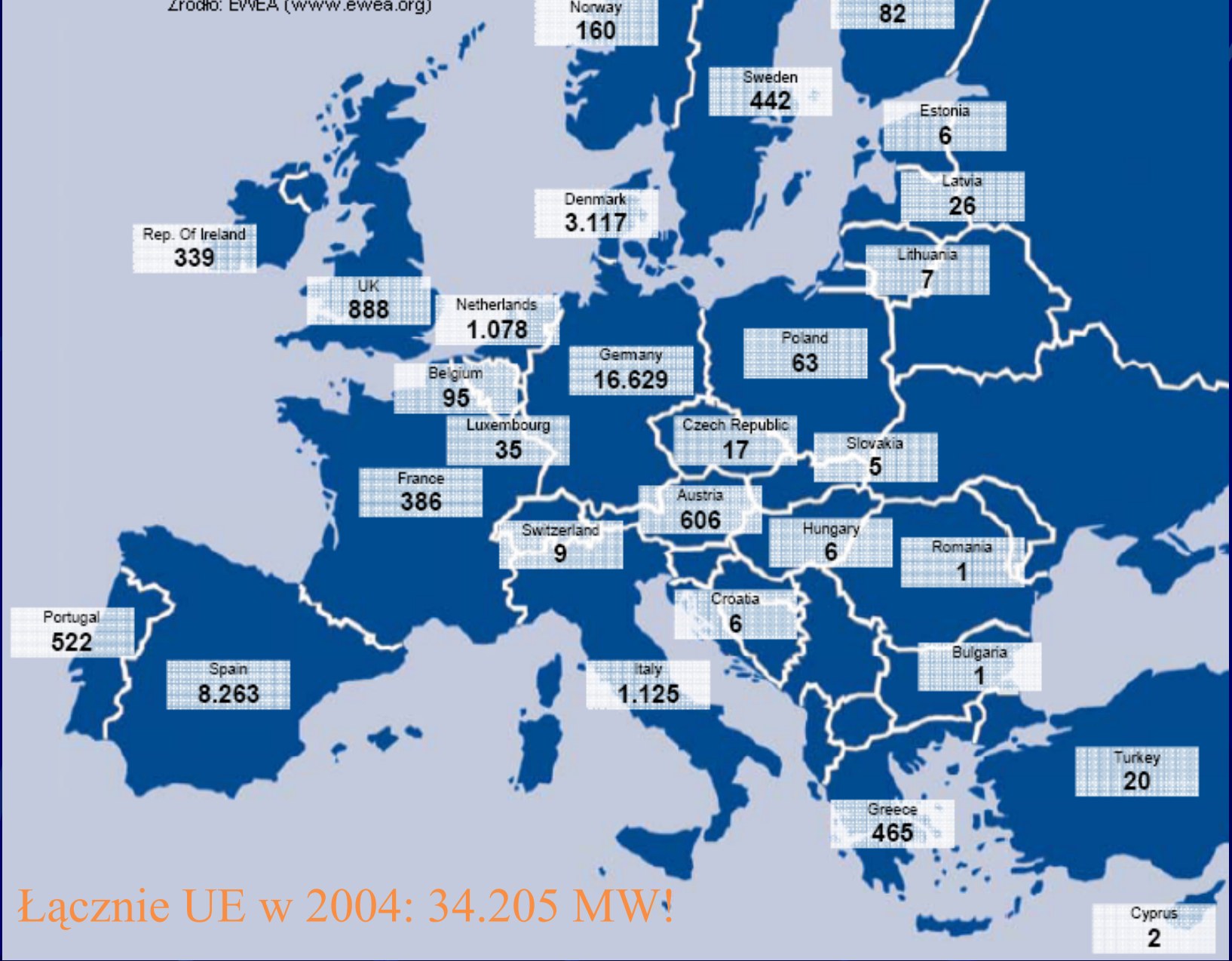
TEL / FAX (+48-91) 33 75 22

Wiatr wykorzystywano już od dawien dawna...



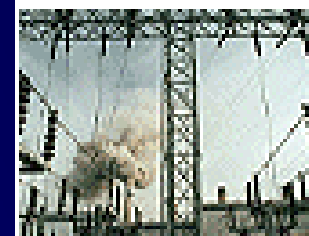
Deklaracja Madrycka z 1994 r., obliguje kraje Unii Europejskiej aby do roku 2010 osiągnęły udział tzw. energii czystej – niekonwencjonalnej, w wysokości 15 % całkowicie produkowanej. Aktualnie (2005r.) udział niekonwencjonalnych źródeł energii w bilansie paliwowo - energetycznym w tych krajach wynosi średnio ok. 7 %. W oparciu o powyższe, Komisja Europejska wydała Białą Księgę “Energia dla przyszłości: odnawialne źródła energii”. Związany z nią plan działań zakłada osiągnięcie do 2010 r. minimum 12 % udziału energii odnawialnej w gospodarce UE.





Łącznie UE w 2004: 34.205 MW!

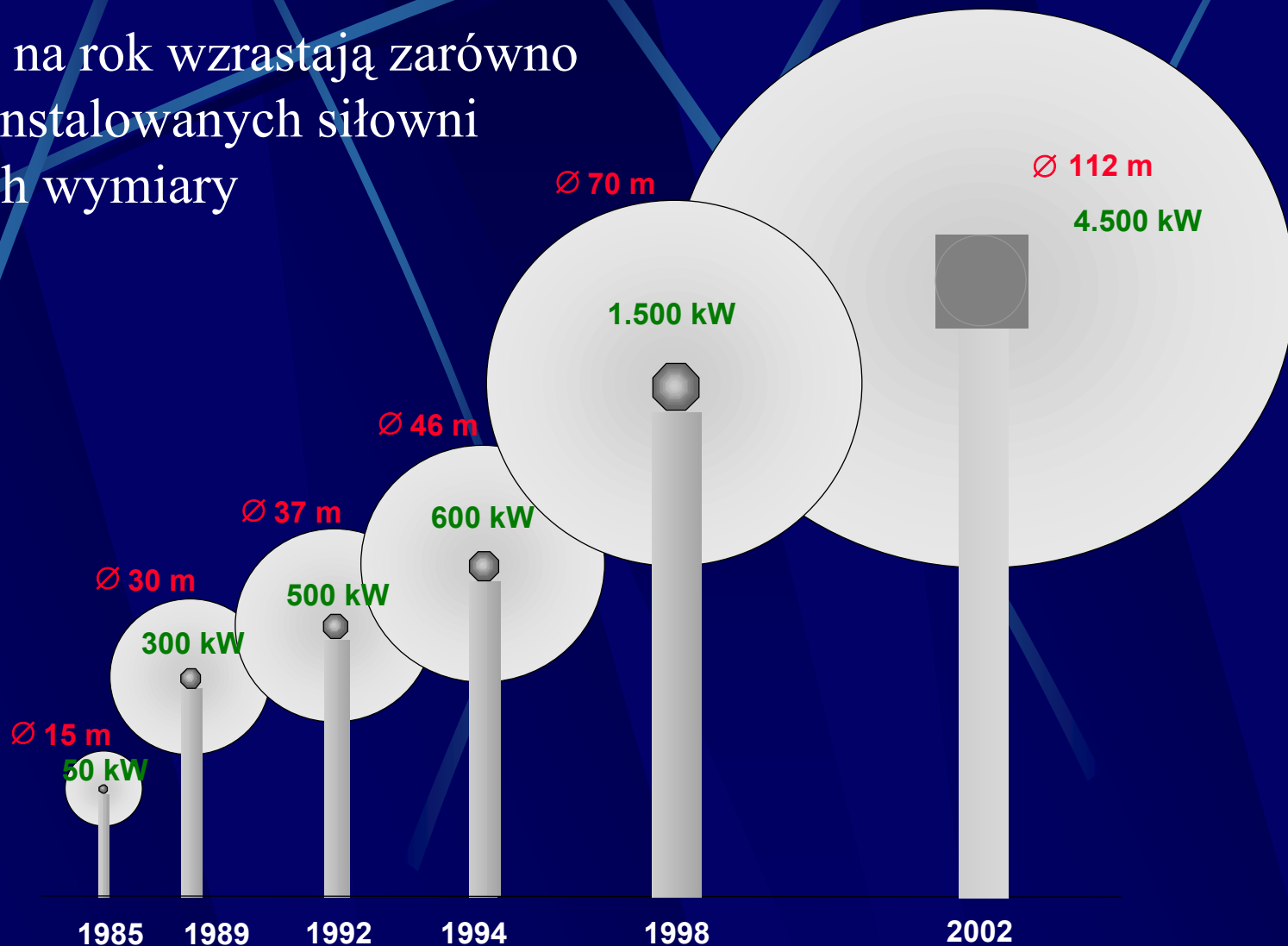
Pozwoli to obniżyć import paliw o 17,4 %, zredukować emisję dwutlenku węgla o ponad 400 mln ton rocznie, a także utworzyć 500 - 900 tys. nowych miejsc pracy. Regionalne zróżnicowanie dla odbiorców cen energii elektrycznej, oznaczające ceny wyższe tam, gdzie jest większa odległość od zakładów wydobywania kopalin (węgla), czy zakładów produkujących energię elektryczną, nasuwa także oczywisty wniosek o pozytywach wynikających z inwestowania w układy konwersji energii niekonwencjonalnej (tzw. czystej), szczególnie na terenach oddalonych od elektrowni przemysłowych. Jedną z najbardziej dynamicznie się w świecie rozwijających gałęzi energetyki niekonwencjonalnej jest energetyka wiatrowa.



Tereny posiadające duży potencjał wietrzności, z reguły położone na obszarach o niskim współczynniku zaludnienia oraz urbanizacji, poprzez budowę nań siłowni wiatrowych, niezaprzeczalnie zyskują również szereg innych istotnych korzyści. Zmiana struktury bilansu energetycznego, aktywizacja terenów słabo zaludnionych, o ubogich glebach lub jako dodatkowa działalność gospodarcza dla wielkoobszarowych producentów rolno-przetwórczej działalności stanowią tylko ich wybiórczą część. Atutem siłowni wiatrowych jest nie tylko brak emisji pyłów, ale również możliwość zapewnienia energii elektrycznej - bez konieczności budowy linii przesyłowych (m.in. pola elektromagnetyczne) tam, gdzie nie ma dostatecznej ilości i wielkości elektrowni zawodowych.



Z roku na rok wzrastają zarówno
moce instalowanych siłowni
jak i ich wymiary



Wzrasta przez to ich znaczenie, tym bardziej że energia wiatru możliwa będzie do wykorzystania dłużej aniżeli tradycyjne paliwa typu węgiel czy ropa naftowa



Specjaliści szacują, że obecnie powszechnie źródła wystarczą ludzkości na około 50 lat, a potem?...

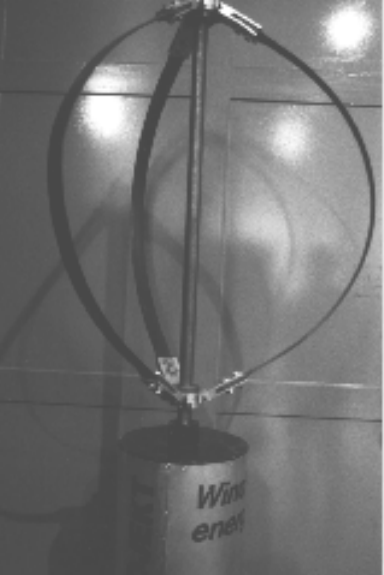
Zdaniem ekspertów z EC BREC/IBMER, krajowy potencjał techniczny źródeł energii odnawialnej wynosi w skali roku ponad 2500PJ. Stanowi to około 60% krajowego zapotrzebowania na energię pierwotną. Moc siłowni wiatrowych zainstalowanych w świecie osiągnęła ponad 40000 MW, a roczne obroty rynku związanego z tym przemysłem rzędu 5 mld USD.



Czas więc by poznać podstawy dziedziny
mogącej dla wielu stanowić przyszłość...

Rodzaje turbin

- poziomej osi obrotu – HAWT Horizontal Axis Wind Turbines
- pionowej osi obrotu – VAWT Vertical Axis Wind Turbines



Darrieus



Dwupłatowy



Monopter



Wiatrak tzw. amerykański



Wiatrak grecki



Darrieus klas.

O poziomej osi obrotu HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine

- układ klasyczny.

Można tak nazwać układ turbiny, która posiada tradycyjne "śmigło" o ilości łopatek zależnej od wizji projektanta.

Układy te są zwykle trójłopatowe, choć spotyka się nawet 2 i 1 łopatek wirniki.

W przypadku gdy chcemy aby wirnik posiadał duży moment startowy należy zwiększyć ilość łopatek.



O poziomej osi obrotu HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine

Przykładem tego typu mogą być amerykańskie wiatraki napędzające pompy wodne - posiadają one nawet kilkanaście łopat.

Na tym rozwiązaniu wzoruje się duńska firma WINDMISSION. Na zdjęciu obok znajduje się wiatrak tej firmy o mocy 4kW i średnicy wirnika 3,8 m. Na stronie internetowej tej firmy można znaleźć informacje dotyczące obliczeń parametrów wirnika, oraz technologii wykonania łopat.



O poziomej osi obrotu HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine

Wirniki tradycyjne można również podzielić pod względem ustawienia wirnika względem wiatru w stosunku do położenia masztu. Brzmi to może zawile, ale chodzi o to czy wirnik znajduje się przed, czy za masztem (w stosunku do wiejącego wiatru). W terminologii angielskiej nazywane jest to up-wind i down-wind.

Na zdjęciu obok znajduje się właśnie wirnik typu down-wind, który jest ustawiony za masztem.

Nie jest to zbyt popularne rozwiązanie gdyż należy liczyć się ze stratami spowodowanymi częściowym (choć chwilowym) zacieleniem wirnika przez konstrukcję masztu.



O poziomej osi obrotu HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine

Łopaty turbiny wiatrowej ACOWIND A-63 obracają się wokół osi poziomej, obracając się wokół walców – wirników. Wirniki napędzane są w sposób wymuszony przez silniki elektryczne i obracają się ze zmienną prędkością. Pozwala to na najbardziej optymalne "dostrojenie się" do dowolnej prędkości wiatru.



Turbina ta wykorzystuje zjawisko Magnusa polegające na powstaniu siły bocznej na obracającym się walcu lub bryle kulistej, zanurzonych w strumieniu gazu lub cieczy, gdy ma miejsce względne przemieszczenie obracającego się ciała w stosunku do strumienia.

O poziomej osi obrotu HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine

Spotyka się wiele rozwiązań wiatraków typu HAWT
Najczęstszy i najbardziej widoczny podział to ilość płatów...



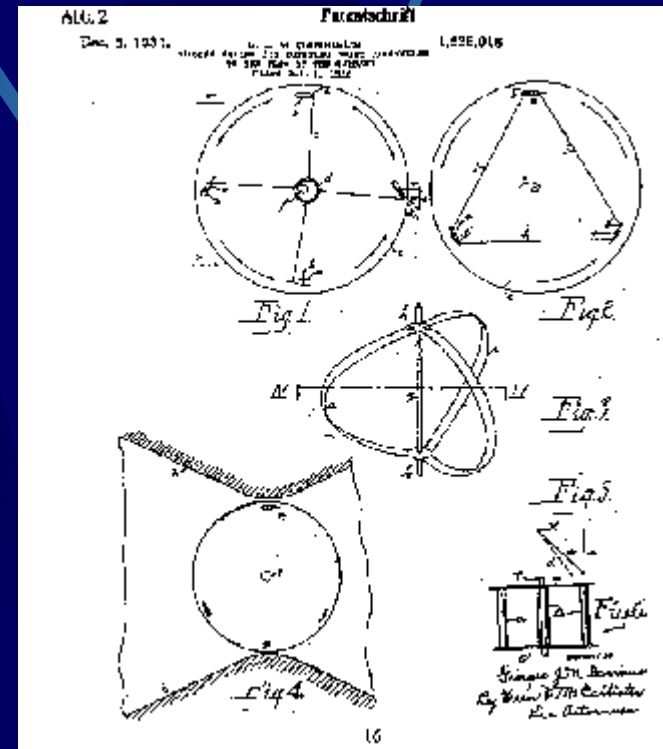
O pionowej osi obrotu – VAWT Vertical Axis Wind Turbines

Czyli turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu.

Prace nad tego typu turbinami nie postępowały w takim tempie jak nad turbinami typu HAWT.

W porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami stanowią one niewielki procent obecnych instalacji.

W 1931 Francuz Darrieus opatentował wirnik który jest obecnie nazywany od jego nazwiska.



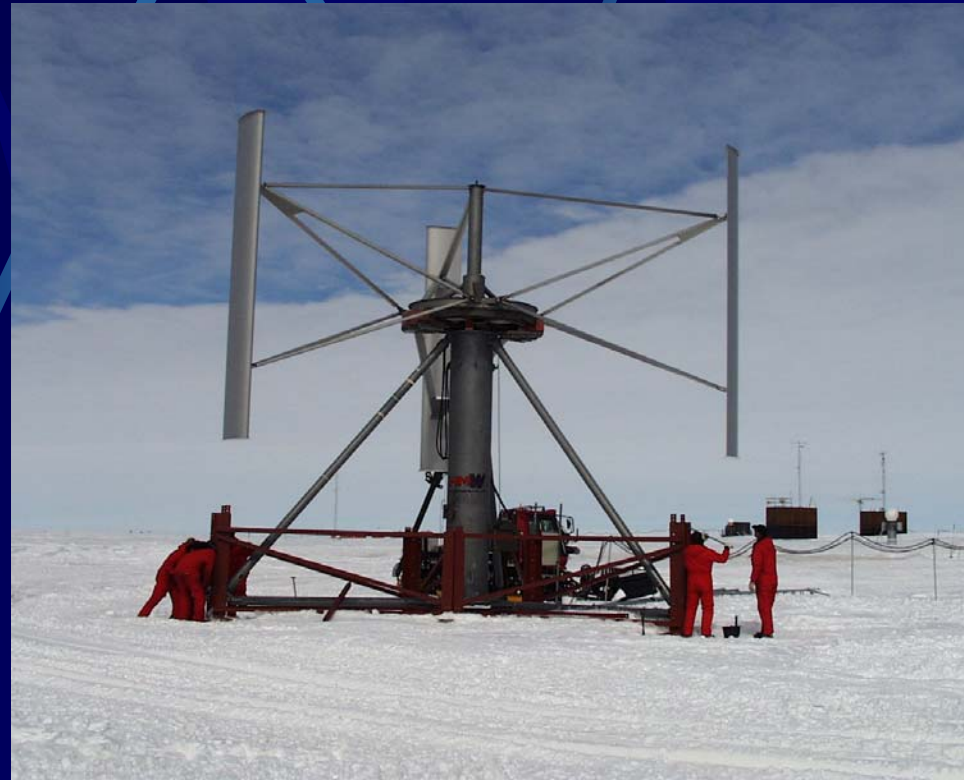
O pionowej osi obrotu – VAWT Vertical Axis Wind Turbines

Z wszelkiego rodzaju publikacji wynika, że wirnik tego typu ma praktycznie zerowy moment startowy, w związku z czym konieczne jest wstępne napędzenie. Przykładem rozwiązania tego problemu jest zdjęcie obok ukazujące wirnik Darrieus'a wyposażony w dwa pomocnicze wirniki Savoniusa. Jest to dość nietypowe rozwiązanie - zwykle do tego celu wykorzystuje się silnik elektryczny.



O pionowej osi obrotu – VAWT Vertical Axis Wind Turbines

Inną odmianą wirnika Darrieusa jest H-Darrieus (H-rotor) o kształcie litery "H". Na zdjęciu przedstawiony jest wiatrak Willy o mocy 20 kW. Umieszczono go w stacji Polarnej w Antarktyce "Georg von Neumayer" ($70^{\circ}37'S$, $8^{\circ}22'W$)



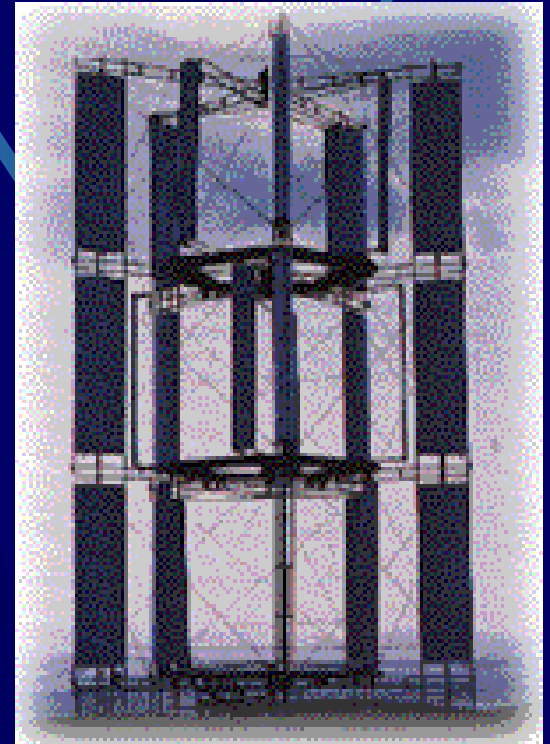
O pionowej osi obrotu – VAWT Vertical Axis Wind Turbines

W laboratorium aerodynamicznym uniwersytetu w Saratowie wykonano wiatrak tego typu o średnicy 1,9m długości łopat 2m i wysokości masztu 5,5m. Daje on podobno 1,5 kW, a charakteryzuje się silną zależnością momentu startowego od stosunku cięciwy (szerokości) łopat do średnicy wirnika.



O pionowej osi obrotu – VAWT Vertical Axis Wind Turbines

Stosowane są również odmiany z ruchomym zawieszeniem łopat, lub tak jak w wypadku wiatraka „Windstar” (o mocach 25 i 50 kW uzyskiwanych z powierzchni 58 i 116 m²) zespoły o większej ilości łopat.



O pionowej osi obrotu – VAWT Vertical Axis Wind Turbines

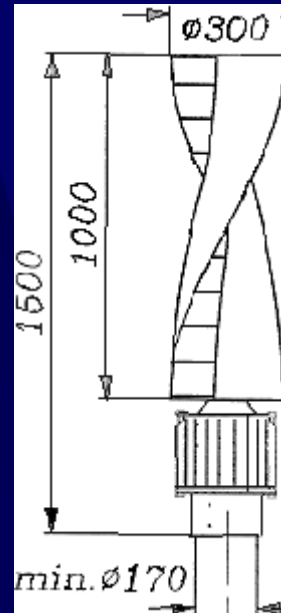
Wspomniana już wcześniej turbina Savoniusa jest najprostszym technologicznie rozwiązaniem idei VAWT. W celu zmniejszenia różnic w momencie startowym w zależności od położenia wirnika względem kierunku wiatru, montuje się zespoły obrócone względem siebie o 90 stopni (zdjęcie.obok).



O pionowej osi obrotu – VAWT Vertical Axis Wind Turbines

Istnieją "wariacje" na temat tej turbiny np. "świderkowe" turbiny fińskiej firmy WINDSIDE.

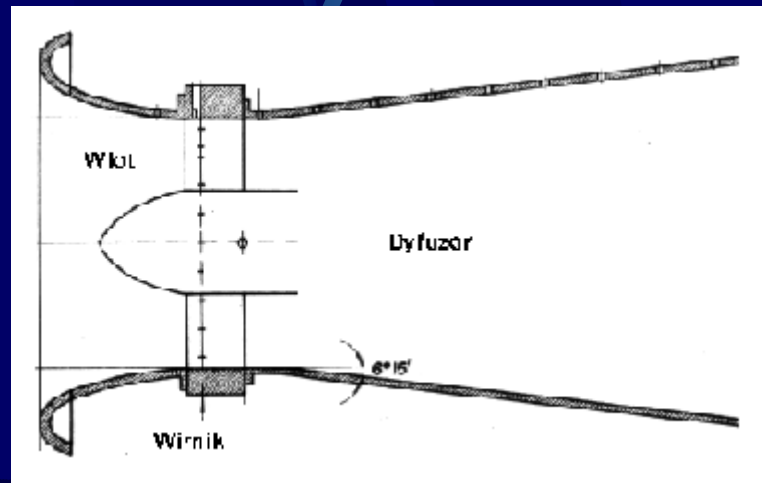
Atutem akcentowanym przez producenta jest zdolność do przetrwania silnych wiatrów, oraz wykorzystanie siły wiatru nawet od 1,5 m/s !!! Dodatkowo turbiny tego typu nie generują prawie żadnych dźwięków (w odróżnieniu od np. tradycyjnych wiatraków - gdzie końcówki łopat poruszają się z szybkością 250 km/h [dane dla wirnika 22m przy 60 obr./min.]



Wiatraki wyposażone w dyfuzor - Diffuser Augmented Wind Turbine

Turbiny o osi poziomej wyposażone w dyfuzor. Zgodnie z prawem Bernoulliego dotyczącym zachowania się ośrodka (np. gazu) w rurze w której występują zmiany średnicy zmienia się również prędkość przepływu gazu. W związku z tym jeśli tradycyjny wirnik zabudujemy w tunelu (a dokładnie w jego przewężeniu) będzie on wirował w powietrzu przepływającym szybciej niż wiatr poza tym tunelem. Dzięki temu da więcej energii niż wirnik bez otunelowania.

Badania nad tym zjawiskiem były już prowadzone w latach 50-tych. Aby uzyskać pożądany efekt długość otunelowania musiała być ok 5-7 razy większa niż średnica wirnika.

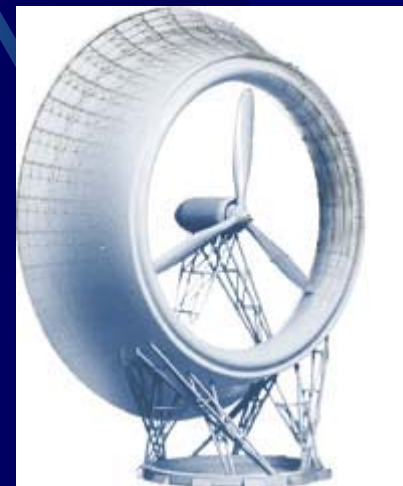


Wiatraki wyposażone w dyfuzor - Diffuser Augmented Wind Turbine

W latach 70-tych w zakładach Grummana badano wirniki tego typu i odkryto, że obecność szczeliny w dyfuzorze (w płaszczyźnie tunelu) powoduje wzrost sprawności takiego wirnika.



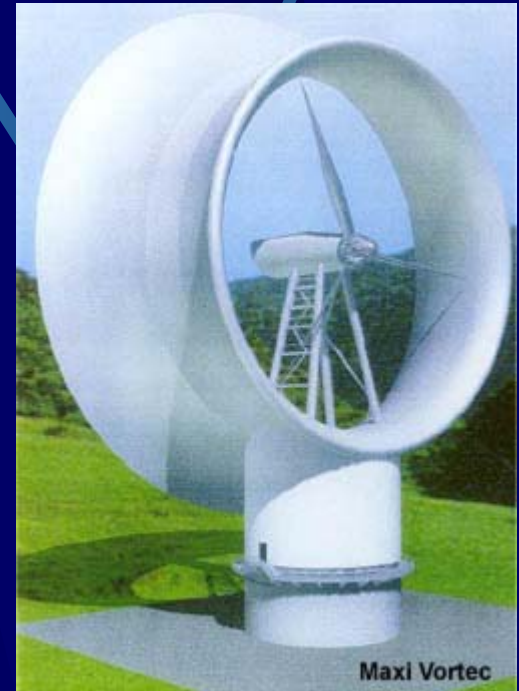
Zwężający się wlot powoduje wzrost prędkości przepływu przed wirnikiem, a szczelina w dyfuzorze która znajduje się za wirnikiem powoduje dodatkowo powstanie strefy podciśnienia powodując dodatkowo przyrost prędkości przepływu powietrza przez wirnik.



Wiatraki wyposażone w dyfuzor - Diffuser Augmented Wind Turbine

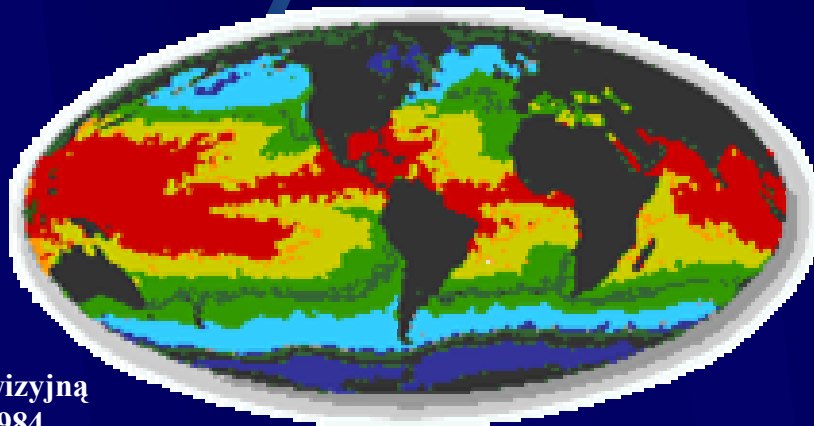
Komercyjne rozwiązanie o nazwie Maxi Vortec ma 54 m średnicy wirnika i daje 3,5 MW energii. Daje to ok $1,5\text{kW/m}^2$ co jest bardzo wysokim współczynnikiem. Prędkość obrotowa wirnika wynosi 27 obr./min. , przekładnia 45:1 (!). Dla tych samych rozmiarów wirnik tradycyjny miałby ok. 1-1,5 MW

W porównaniu do zwykłego rotora turbiny firmy Vortec mają ok. 3 razy większą wydajność.



W zależności od swych aktualnych właściwości fizycznych, masy powietrza odpowiednio wznoszą się i opadają. Jest to wynikiem posiadania przez nie różnej gęstości oraz temperatury, zmiennej zależnie od nagrzewania się lub ich schładzania.

Efekt takiego przemieszczania się warstw powietrza, zawierającego drobiny o określonych wartościach, energię kinetyczną, potencjalną oraz masę, obserwowany oraz odczuwany jest jako wiatr.



Zdjęcie wykonane kamerą termowizyjną z satelity NASA, NOAA-7, lipiec 1984

Dlaczego się kręci czyli wstęp do teorii wiatru

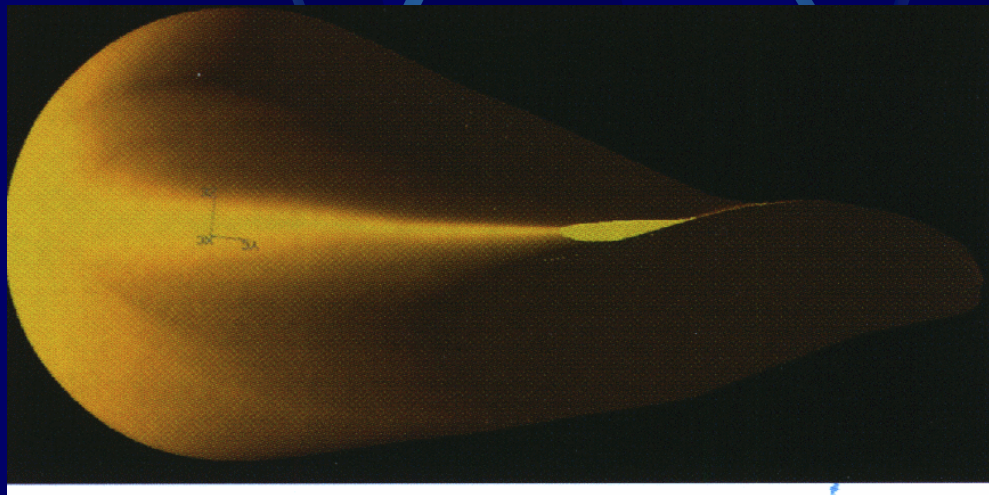
Fakt obracania się rotora siłowni wiatrowej na wskutek oddziaływania siły wiatru, spowodowany jest wytwarzaniem się różnic ciśnienia pomiędzy górną i dolną powierzchnią płata wirnika. Profil płata został skonstruowany tak by stworzyć dwie powierzchnie o różnych długościach.



Dlaczego się kręci czyli wstęp do teorii wiatru

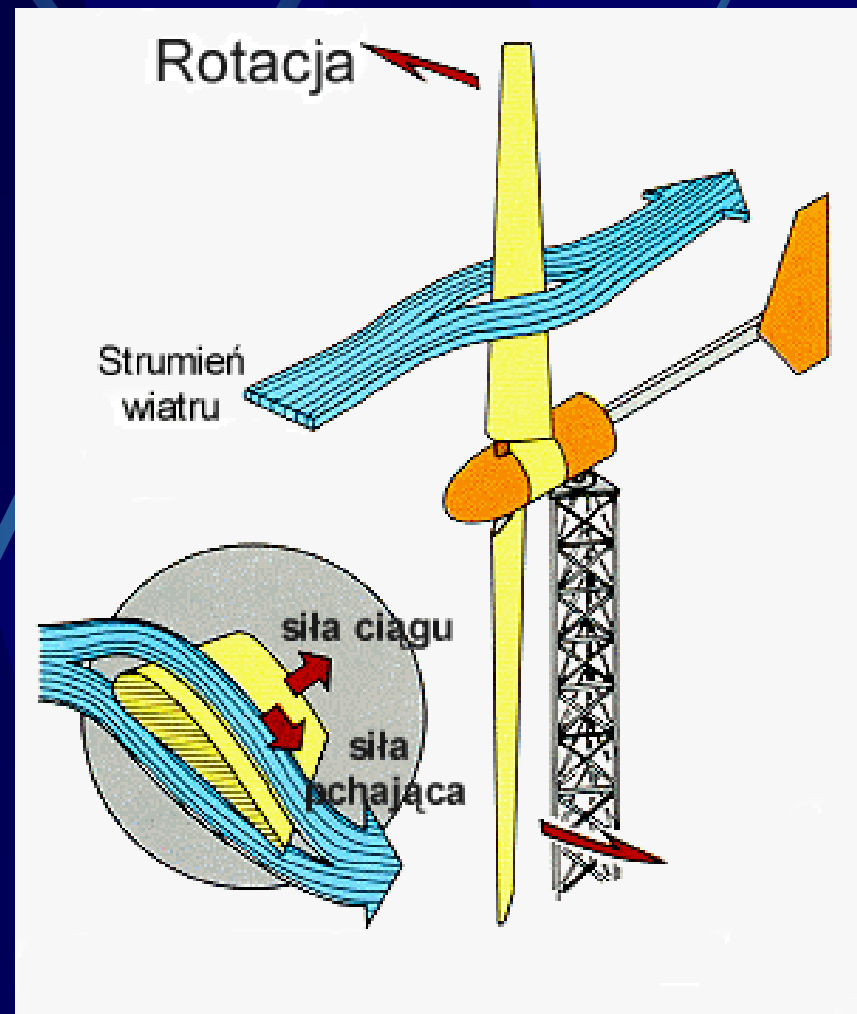
Profil płata został skonstruowany tak by stworzyć
dwie powierzchnie o różnych długościach.

Struga wiatru omiatając powierzchnię dłuższą (górną część płata)
oraz krótszą (dolną część płata)
wytwarza odpowiednio ciśnienie niższe oraz wyższe



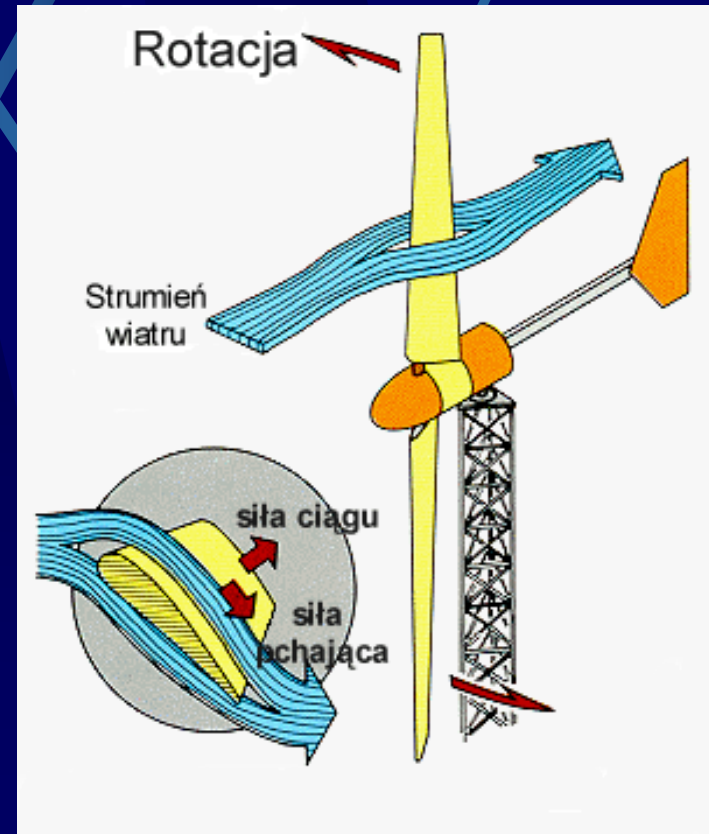
Dlaczego się kręci czyli wstęp do teorii wiatru

Występująca różnica ciśnień powoduje w efekcie powstanie ciągu aerodynamicznego skierowanego w stronę ciśnienia niższego (efekt wyrównywania się ciśnień). Powstały ciąg aerodynamiczny oddziałuje dynamicznie z płatem wirnika, który zaczepiony za pośrednictwem piasty „ustępuje” powstałemu naciskowi obrotem centralnie osadzonego wału



Dlaczego się kręci czyli wstęp do teorii wiatru

Różnica ciśnień wytwarza siłę ciągu kierowaną w stronę niższego ciśnienia (łopata zostaje zassana przez obszar o niższym ciśnieniu). Siła ta powoduje w przypadku skrzydeł samolotowych poderwanie samolotu z ziemi. Jednak w przypadku elektrowni wiatrowej bardziej zależy nam na ruchu obrotowym śmigła, a minimalizowaniu siły ciągu, która dąży do wyrwania rotora z gondoli. Siła popychająca łopatę do ruchu obrotowego jest wynikiem dążenia do wyrównania ciśnień. Powietrze szybciej przepływa nad górnym płatem niż dolnym wytwarzając siłę popychającą łopatę do ruchu obrotowego.



Poruszające się powietrze o określonej masie posiada wymierna energie kinetyczna.:

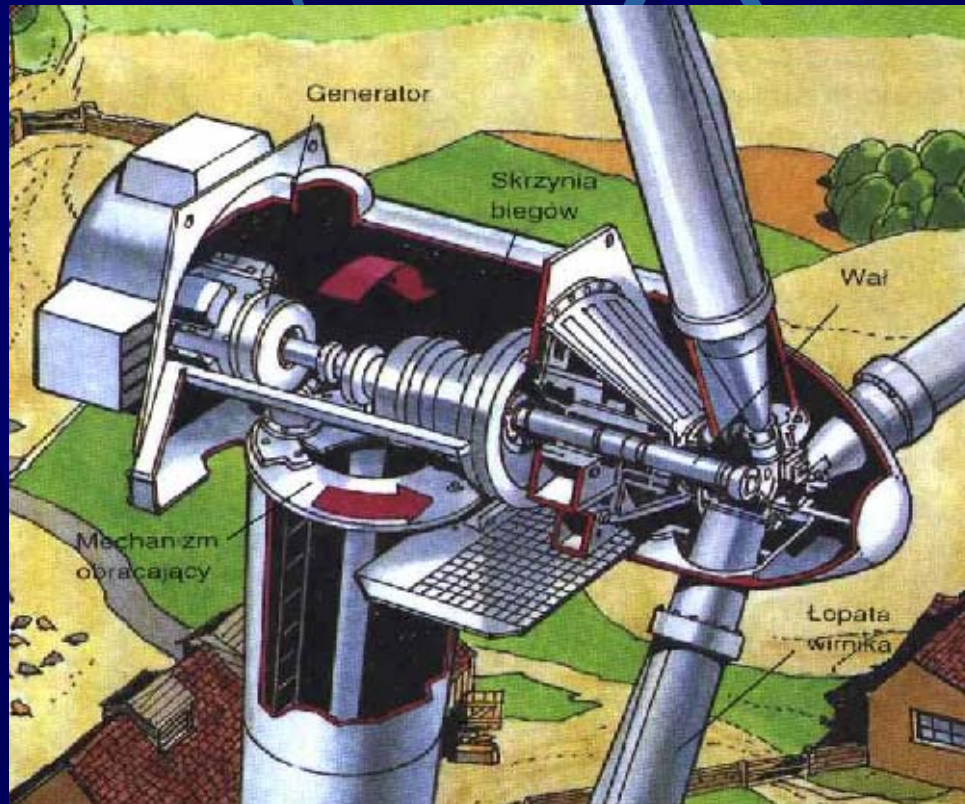
$$E_K = \frac{mv^2}{2}$$

gdzie:

m = masa [kg]

v = prędkość [m/s]

Turbiny wiatrowe przetwarzają tę energię kinetyczną na energię użyteczną w postaci energii elektrycznej za pośrednictwem rotora umieszczonego na wale połączonym z generatorem energii elektrycznej.



Jak obliczyć moc generowaną przez siłownię wiatrową - teoria

Rotor turbiny obracając się zmniejsza prędkość wiatru od niezaburzonej (przed turbiną) v_1 do zredukowanej (za turbiną) v_2 .

Różnica w prędkościach wiatru jest miarą przetworzonej energii kinetycznej obracającej rotorem oraz podłączonego generatora energii elektrycznej.

Moc teoretyczna turbiny wiatrowej jest opisana równaniem

$$P = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \eta \cdot A \cdot v_1^3}{2}$$

gdzie:

P - moc [W]

ρ - gęstość powietrza [kg/m^3] (około $1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$ na poziomie morza)

c_p - współczynnik mocy

η - sprawność mechaniczna/elektryczna

A - powierzchnia wirnika [m^2]

v_1 - prędkość wiatru – niezaburzona przed wirnikiem [m/s]

Teoretyczne maksimum współczynnika mocy w warunkach idealnych wynosi $16/27=0.593$ lub innymi słowy 59.3% zawartości energii w strumieniu napływającego powietrza może zostać wykorzystana w turbinie.

W warunkach rzeczywistych współczynnik mocy nie osiąga nawet wartości 0.5.

Jest to spowodowane istnieniem strat aerodynamicznych turbiny wiatrowej.

Współczynnik mocy c_p osiąga swe maksimum gdy prędkość v_2 za wirnikiem stanowi $1/3$ prędkości v_1 z przodu rotora.

Turbiny wiatrowe usytuowane w farmach wiatrowych, produkują z uwagi na interferencję strug powietrza odpowiednio mniej energii, aniżeli wynikałoby to z sumy algebraicznej mocy wszystkich turbin liczonych pojedynczo.

Odpowiednio dobrane odległości pomiędzy turbinami (teoretycznie $5 \times D$, gdzie D - średnica rotora) umożliwiają zmniejszenie wykorzystania liczonej w podany sposób energii wiatru jedynie o 10%.

Otrzymana wartość określa nam moc strumienia powietrza w polu wirnika. Oczywiście nie jest możliwe wykorzystanie jej całej (możliwe tylko w przypadku prostopadłej ściany na drodze wiatru). Tak więc musimy dodać jeszcze kilka zmiennych do otrzymania praktycznego wzoru

Moc turbiny:

$$P = 0.5 \times \rho \times A \times C_p \times V^3 \times N_g \times N_b$$

gdzie:

P = moc w watach (746 wat = 1 KM) (1,000 wat = 1 kW)

ρ = gęstość powietrza (1.225 kg/m³ na poziomie morza)

A =powierzchnia zakreślana przez wirnik, prostopadła do wiatru (m²)

C_p = współczynnik efektywności (0.59 {Betz limit} jest max teoretycznym, 0.35 dla dobrego projektu)

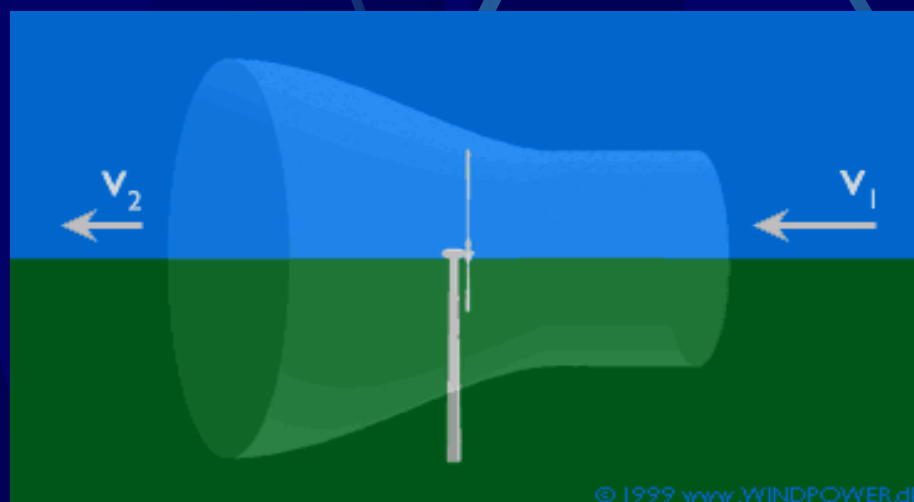
V = prędkość wiatru w metrach/sek

N_g = efektywność generatora (50% dla alternatora samochodowego, 85% i więcej dla nowoczesnych generatorów)

N_b = efektywność skrzyni biegów/kierunku - (im wyższa tym lepsza - 95% jest O.K.)

Leistung, welche wir mit einem Windrade von D m Durchmesser bei einer Windgeschwindigkeit v m/sec dem Winde entziehen können, ist demnach

$$L_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} v^3 \cdot \frac{D^2 \pi}{4} \text{ mkg/sec}$$



Prawo Betza

Jak obliczyć moc generowana przez siłownię wiatrowa - teoria

Rzeczywiste ukształtowanie powierzchni gruntu, jego pofałdowanie, budowle, drzewa, wszystko to ma wpływ na fluktuacje mas powietrza oraz związane z nimi turbulencje. Laminarny przepływ strugi wiatru zostaje zaburzony poprzez wszystkie przeszkody naturalne lub sztuczne. Efekt ten stał się podstawą do określenia parametru zwanego **szorstkością**. Wartość szorstkości (klasa szorstkości) jest tym większa im wyższe oraz z większym wpływem na zaburzenie przepływu wiatru są przeszkody.

Klasę szorstkości danego terenu określa się na podstawie dostępnych danych empirycznych zebranych z masztów pomiarowych lub na podstawie obserwacji (przybliżone wartości). Parametr ten wykorzystywany jest celu właściwej predykcji zachowania się oraz występowania wiatru o określonej prędkości

Skala szorstkości

Klasa	Szorstkość długość [m]	Energia (%)	Rodzaj terenu
0	0.0002	100	Powierzchnia wody
0.5	0.0024	73	Całkowicie otwarty teren np. betonowe lotnisko, trawiasta łąka itp.
1	0.03	52	Otwarte pola uprawne z niskimi zabudowaniami (pojedynczymi). Lekko pofalowany teren.
1.5	0.055	45	Tereny uprawne z nielicznymi zabudowaniami i 8 metrowymi żywopłotami oddalonymi od siebie o ok. 1250 metrów.
2	0.1	39	Tereny uprawne z nielicznymi zabudowaniami i 8 metrowymi żywopłotami oddalonymi od siebie o ok. 500 metrów.
2.5	0.2	31	Tereny uprawne z licznymi zabudowaniami i sadami lub 8 metrowe żywopłoty oddalone od siebie o ok. 250 metrów.
3	0.4	24	Wioski, małe miasteczka, tereny uprawne z licznymi żywopłotami, las lub pofalowany teren.
3.5	0.8	18	Duże miasta z wysokimi budynkami.
4	1.6	13	Bardzo duże miasta z wysokimi budynkami i drapaczami chmur.

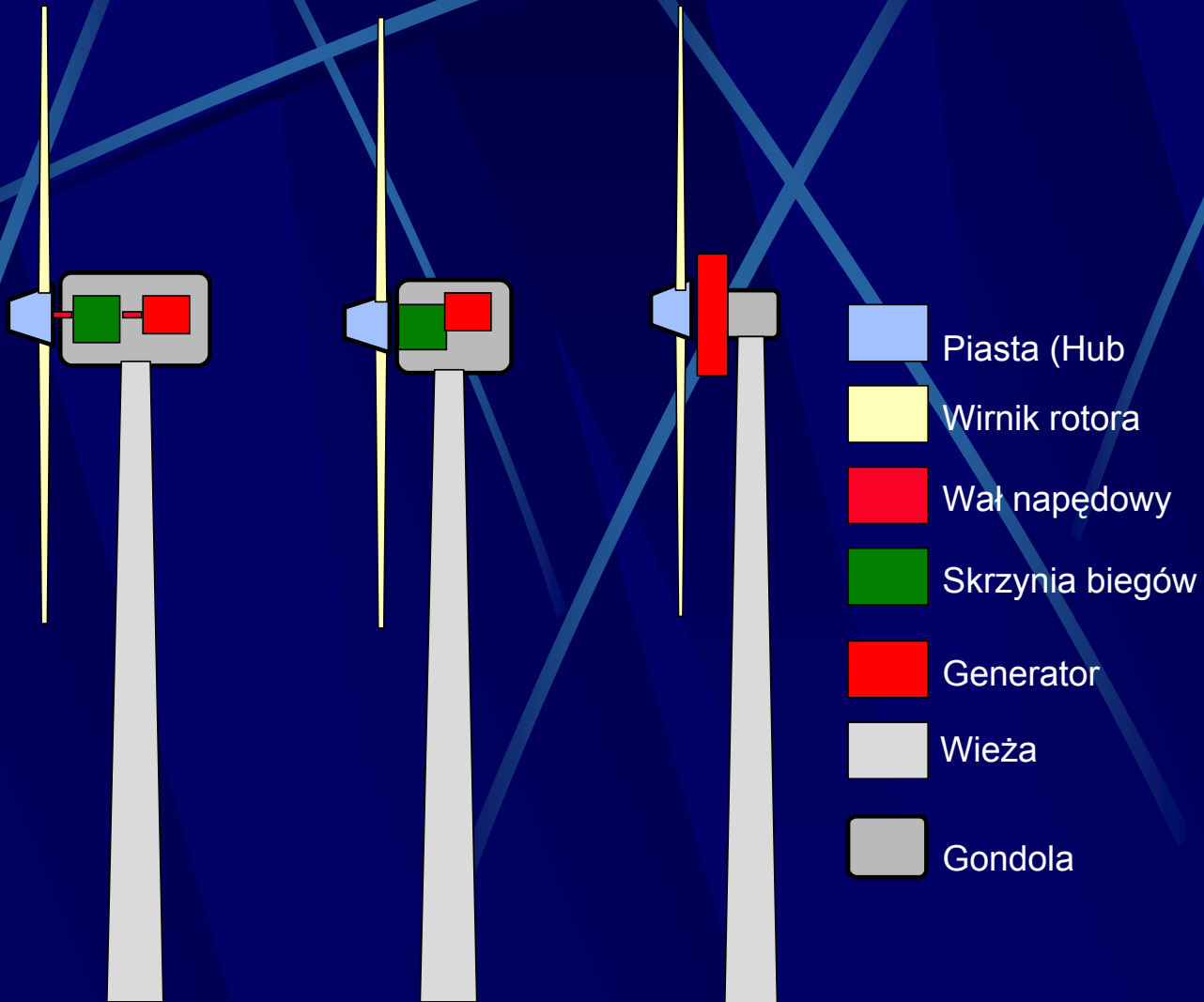
Dane o szorstkości terenu służą do aproksymacji parametrów żądanej lokalizacji w stosunku do parametrów lokalizacji znanej. Najpopularniejszymi programami do takich obliczeń są: WAsP, WindPro



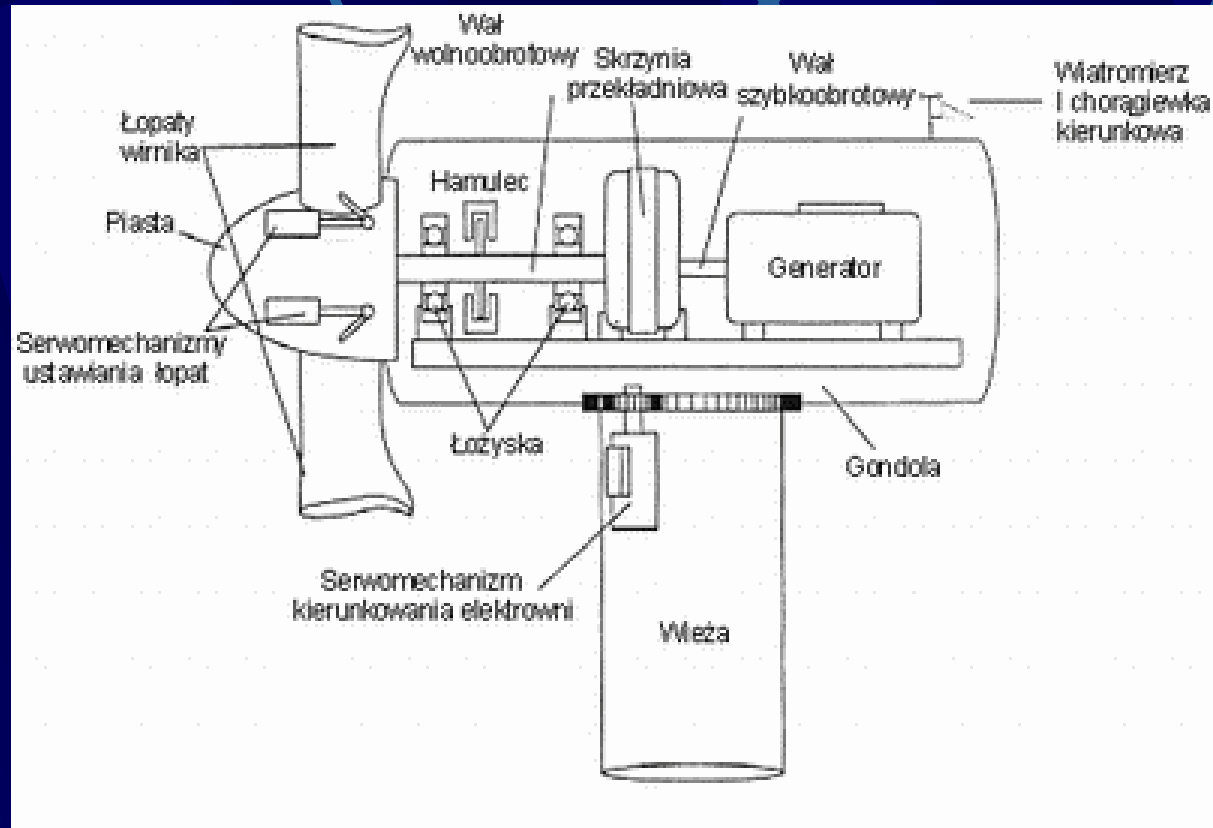
Jak obliczyć moc generowaną przez siłownię wiatrową - teoria

Budowa turbiny wiatrowej

Stosowane rozwiązania techniczne siłowni typu HAWT



Budowa współczesnej turbiny wiatrowej typu HAWT - przekładniowej

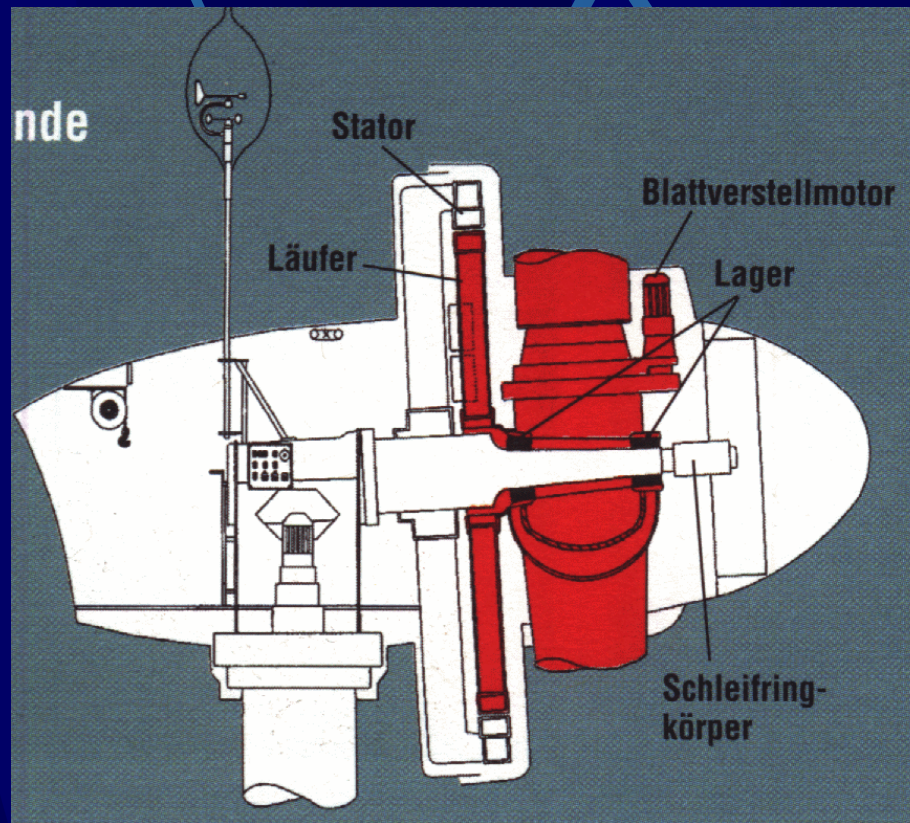




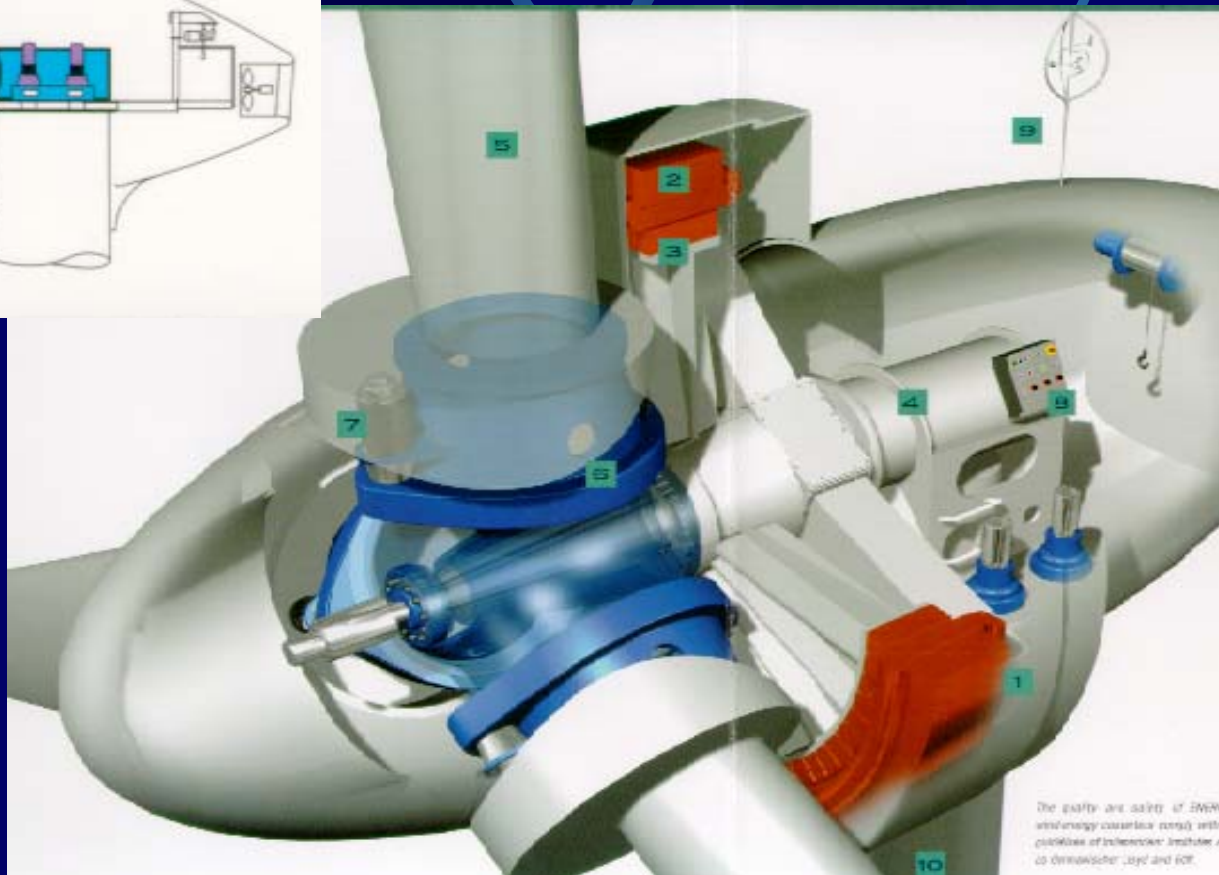
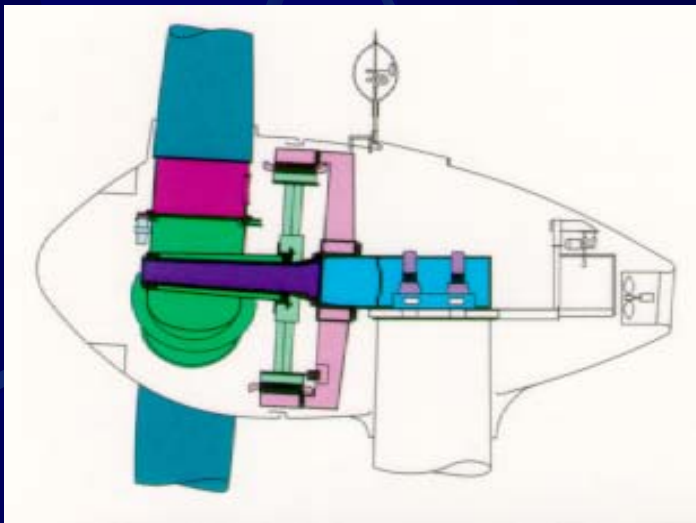
Przekrój gondoli siłowni firmy Vestas

Budowa turbiny wiatrowej

Budowa współczesnej turbiny wiatrowej typu HAWT - bezprzekładniowej



Bezprzekładniowa turbina wiatrowa z wolnoobrotowym wielopolowym generatorem synchronicznym

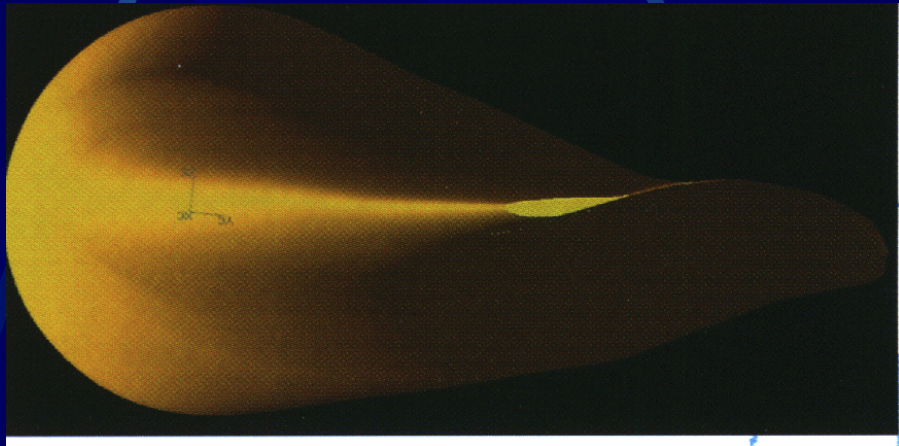


Przekrój gondoli siłowni firmy Enercon

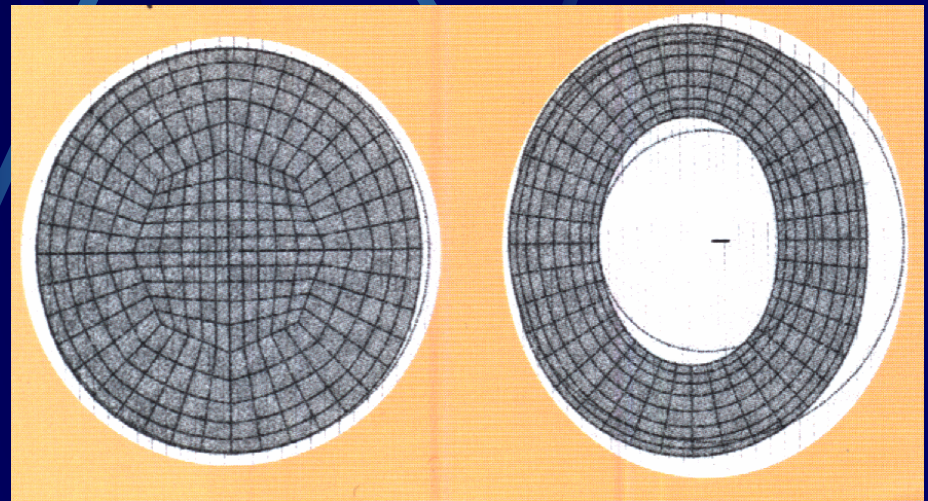


Wzrost wielkości turbin oraz ich mocy, to efekt korzystania przez projektantów z najnowszych technologii, różnych dziedzin...

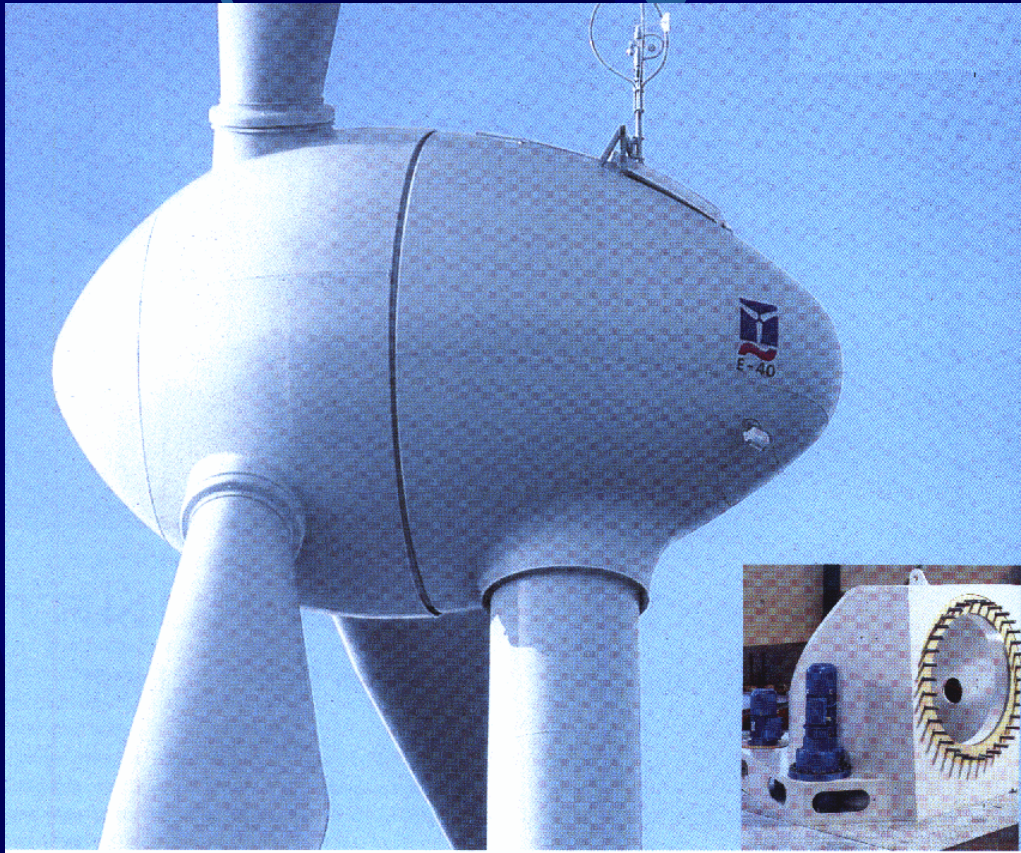
Producenci poszczególnych komponentów siłowni wiatrowych, w procesie ich wytwarzania korzystają z najnowszych osiągnięć biotechnologii, i tak np. podglądając aerodynamikę skrzydeł ważki skonstruowano geometrię płatów wirnika:



Zauważywszy zaś, że źdźbła trawy mimo ich wąskich przekrojów mogą być bardzo długie, wykorzystano tę wiedzę do projektowania wież siłowni wiatrowych....



Czy natomiast kształt gondoli nie przypomina kropli wody?
- Powinien!

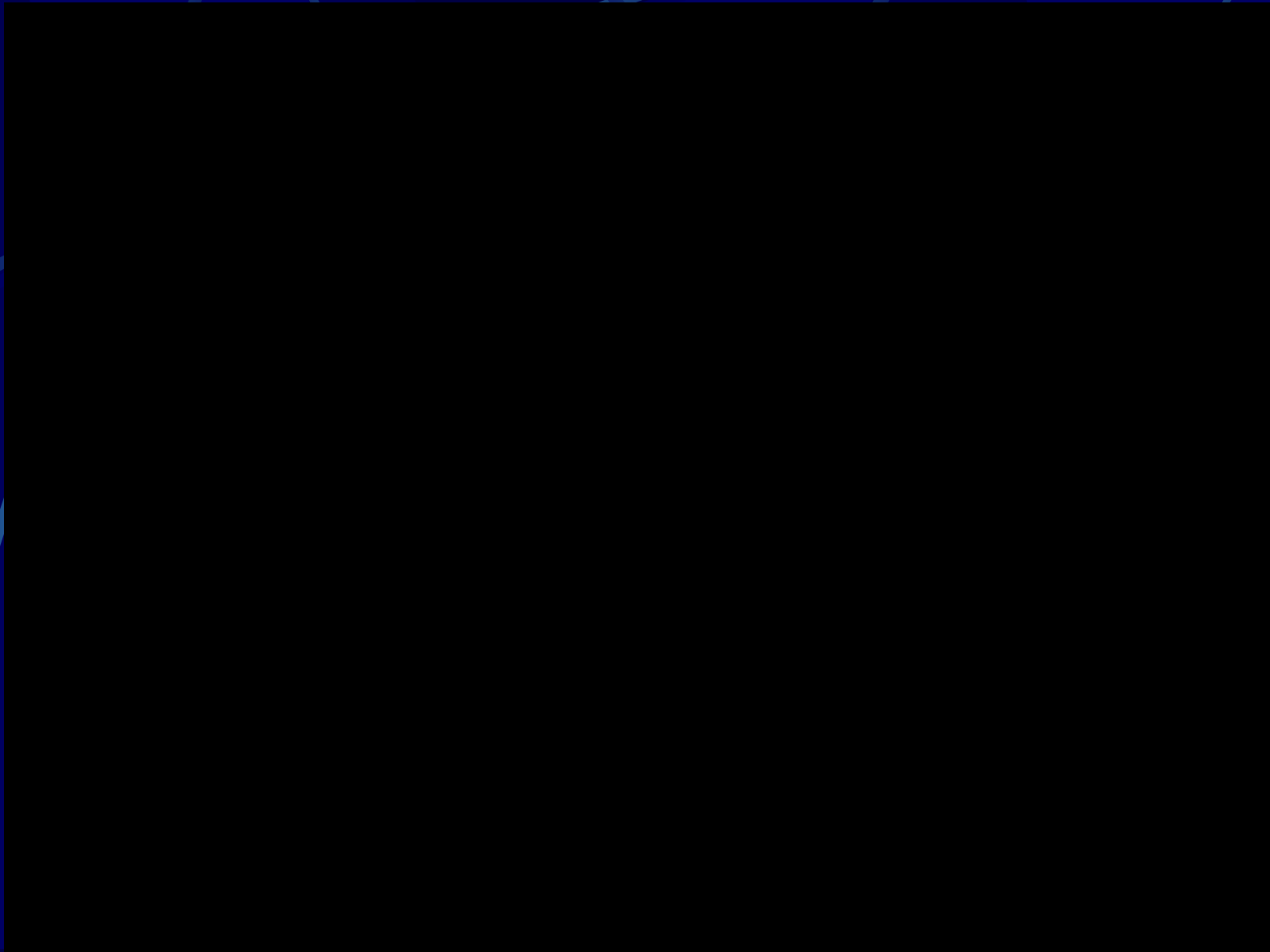


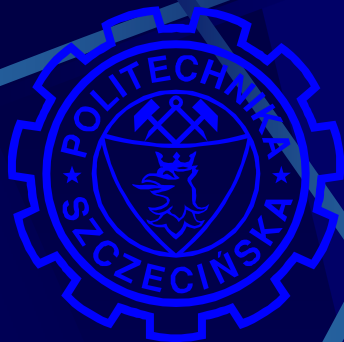
Oznacza to, że nowoczesne turbiny wiatrowe charakteryzują się nowymi, bardziej doskonałymi parametrami tak aerodynamicznymi jak i elektrycznymi, zaś narosłe uprzedzenia winny zostać zmienione



HAŁAS, PTAKI, WYPADKI DROGOWE
ZAKŁÓCENIA RADIOWE, WPŁYW NA
ORGANIZMY... TURYSTYKA







Energetyka wiatrowa - podstawy

Autor: Grzegorz Barzyk

**POLITECHNIKA
SZCZECIŃSKA**



Instytut Elektrotechniki

70-313 SZCZECIN, UL. GEN. WŁ. SIKORSKIEGO 37

TEL. (+48-91) 49 48 73, 49 46 37

TEL / FAX (+48-91) 33 75 22