

# *Energetyka Wiatrowa*



## *Energia wiatru – urządzenia i technologie*

**Piotr Grzyski**



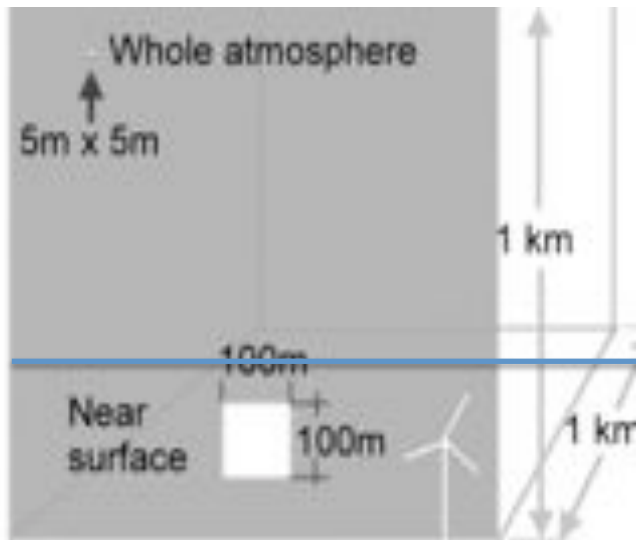
## RAMOWY PLAN PREZENTACJI:

1. Energia wiatru
2. Rodzaje turbin wiatrowych
3. Krzywa mocy oraz rozkład Weibullla
4. Budowa elektrowni wiatrowych
  - a) Główne elementy i podzespoły
  - b) Regulacja mocy
  - c) Generatory stosowane w energetyce wiatrowej
  - d) Przesył energii elektrycznej



# ENERGIA WIATRU

*Wiatr jako jedno z odnawialnych źródeł energii posiada olbrzymi potencjał techniczny, czyli ilość energii możliwej do wytworzenia w ciągu roku.*



**Zapotrzebowanie  
Polski**

170  
TWh

25 %

=

2432  
TWh



## SIŁY AERODYNAMICZNE



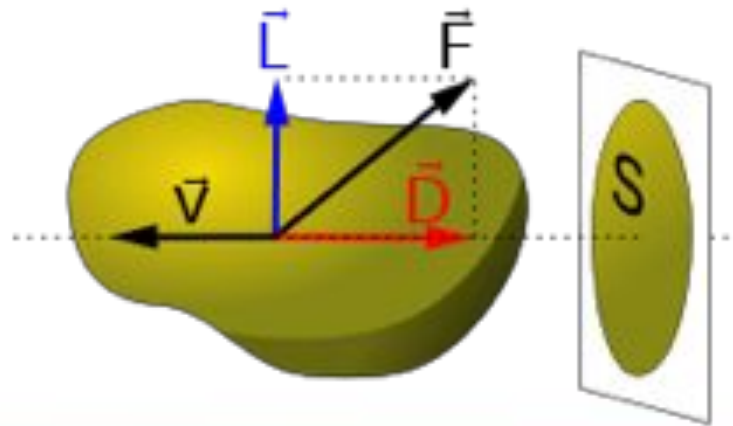
*Najbardziej oczywistym efektem działania wiatru na jakiś obiekt, jest translacja tego ciała, wzdłuż kierunku oddziaływania poruszającego się powietrza.*



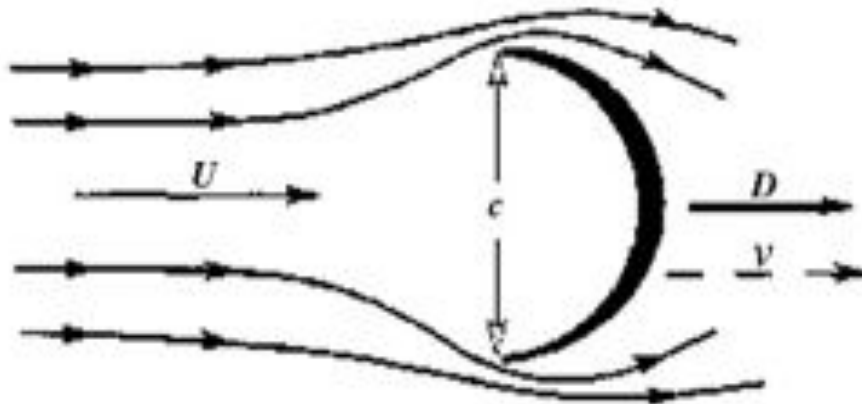
# OPÓR AERODYNAMICZNY (DRAG FORCE)

Opór aerodynamiczny można przedstawić jako sumę wszystkich sił działających na małe elementy powierzchni, wywołanych poprzez ruch ciała w płynie (powietrzu) lub odwrotnie. Powodem powstania w/w sił jest wiele czynników tj.:

- nierównomierny rozkład ciśnienia na powierzchni ciała
- zjawisk hydrodynamicznych w pobliżu jego powierzchni
- występowanie naprężeń stycznych oraz sił tarcia, w formie lepkości, między poruszającymi się, z różnymi prędkościami, warstwami płynu



Obiekt (urządzenie) napędzane wyłącznie oporem aerodynamicznym.



źródło: „Wind Turbines” Erich Hau



Moc dostarczona do urządzenia jest produktem prędkości oraz oporu aerodynamicznego:

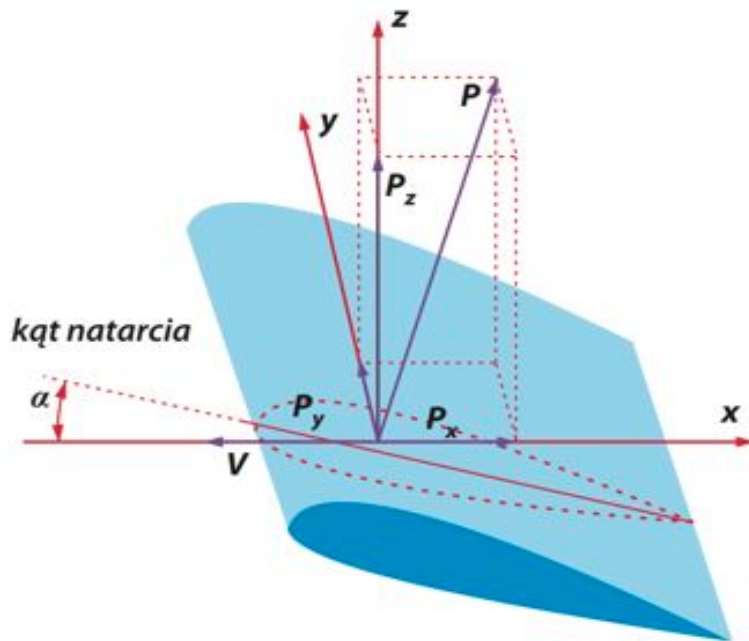
$$P = F_D l v = C_D q A_p v = \left[ \frac{1}{2} \rho (U - v)^2 \right] C_D c l v$$

gdzie,

- $P$  - moc uzyskana z wiatru ( $W$ )
- $F_D$  - opór aerodynamiczny na jednostkę długości ciała ( $N/m$ )
- $l$  - długość obiektu ( $m$ )
- $v$  - prędkość obiektu ( $m/s$ )
- $C_D$  - współczynnik oporu, zależny od geometrii obiektu
- $q$  - ciśnienie dynamiczne =  $0,5\rho V_r^2$  ( $N/m^2$ )
- $V_r$  - prędkość względna ( $m/s$ )
- $\rho$  - gęstość powietrza ( $kg/m^3$ )
- $A_p$  - powierzchnia rzutu ciała ( $m^2$ )
- $c$  - szerokość obiektu ( $m$ )
- $U$  - prędkość stabilnego przepływu powietrza ( $m/s$ )

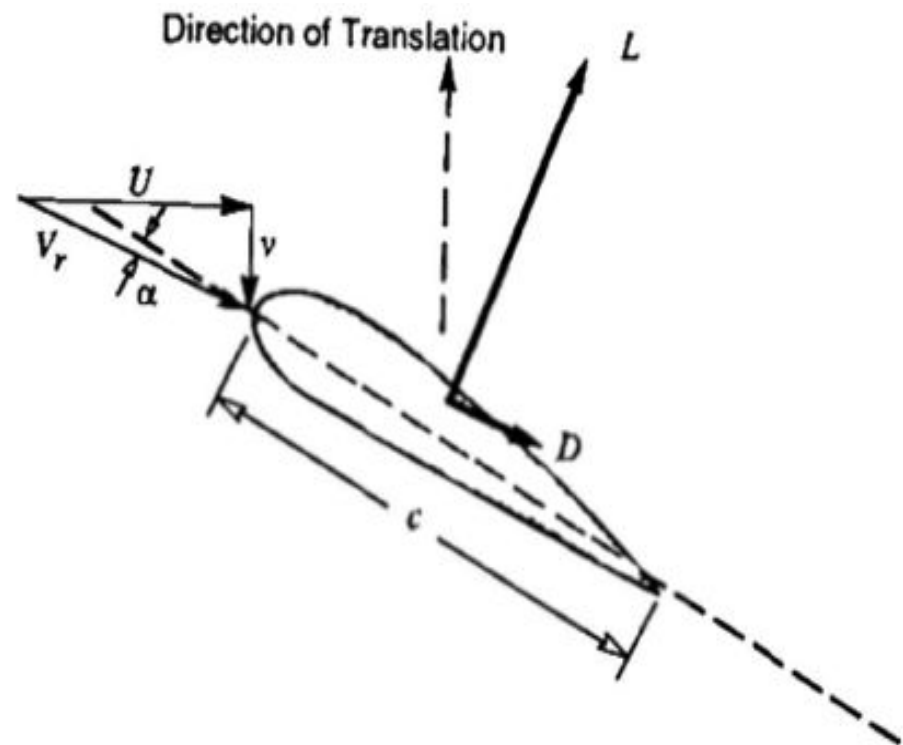


# SIŁA NOŚNA (LIFT FORCE)



$$F_D = \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_D c$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_L c$$



źródło: „Wind Turbines” Erich Hau

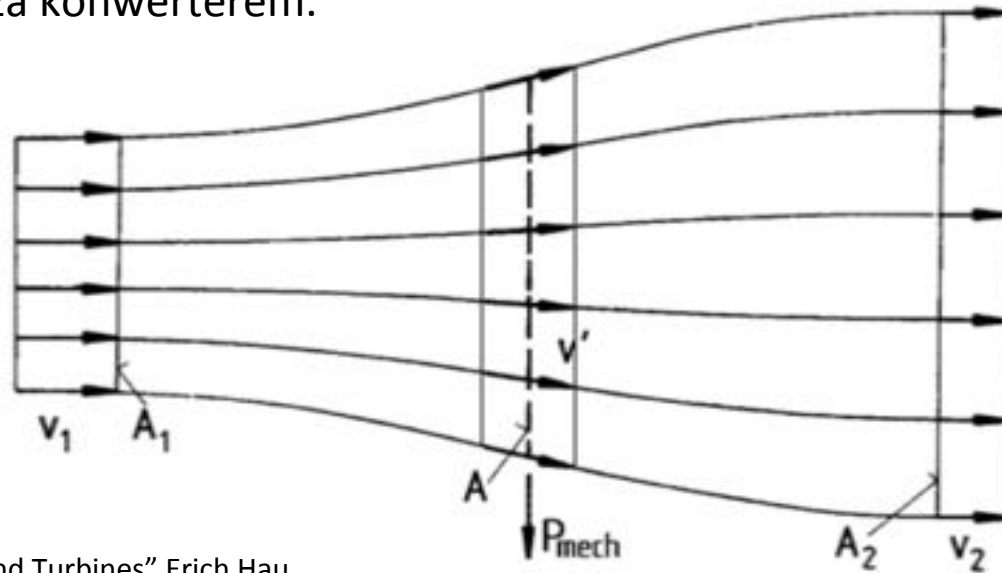


# PARAMETRY WYDAJNOŚCI

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2$$

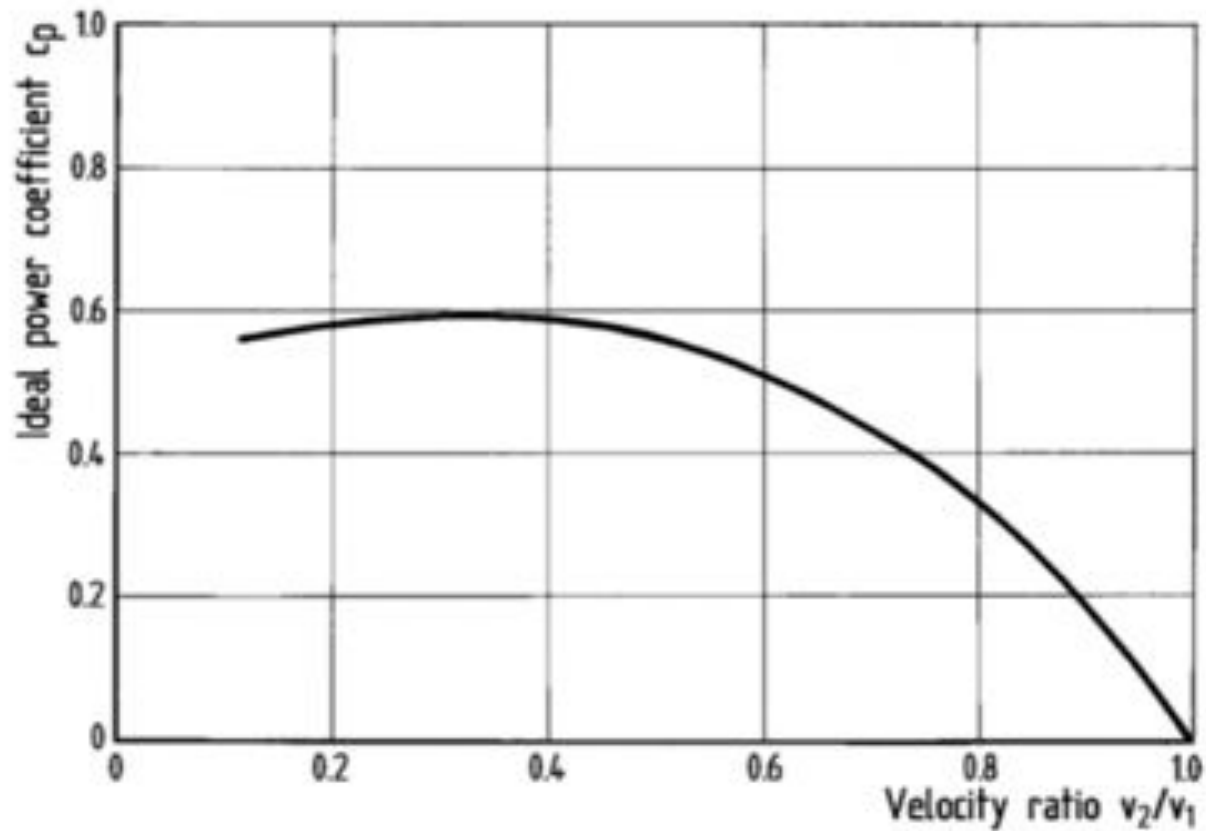
$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3)$$

gdzie  $v_1$  i  $v_2$  to prędkości powietrza, a  $A_1$  i  $A_2$  to przekroje poprzeczne, odpowiednio przed i za konwerterem.



źródło: „Wind Turbines” Erich Hau

Wykres współczynnika mocy „ $C_p$ ” w zależności od stosunku prędkości przed i za turbiną.



źródło: „Wind Turbines” Erich Hau



## Wyróżnik szybkobieżności łopatki – TSR (Tip Speed Ratio)

$$\lambda_s = \frac{u_e}{U}$$

gdzie

$u_e$  - chwilowa prędkość liniowa końca łopatki (m/s)



Zależność wartości wyróżnika szybkobieżności łopat od ich ilości.



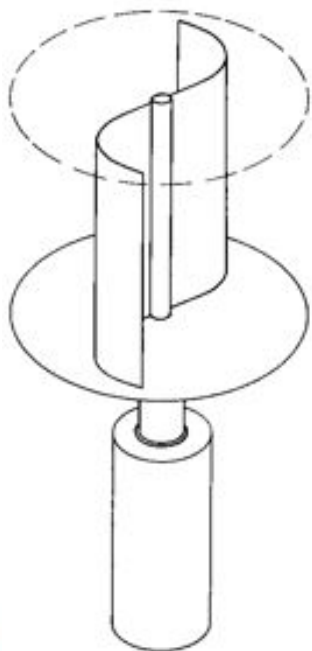
Należy również pamiętać że poziom hałasu emitowanego przez turbinę wzrasta wraz ze wzrostem wartości TSR.



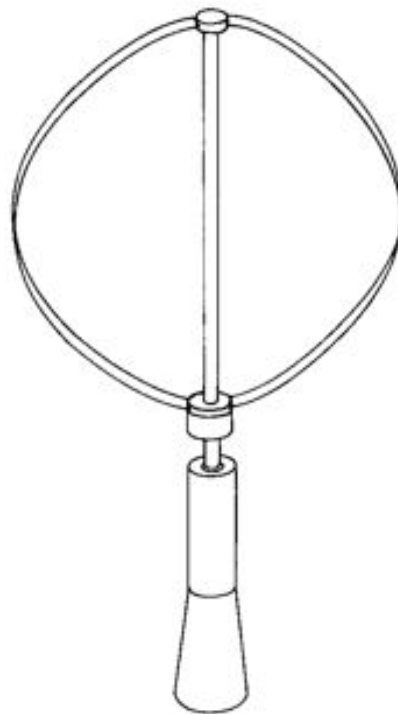
# RODZAJE TURBIN WIATROWYCH:

Turbiny o pionowej osi obrotu:

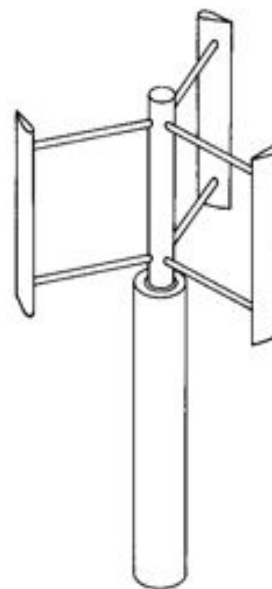
Savonius-Rotor



Darrieus-Rotor



H-Rotor



Wymienione rozwiązanie posiadają wiele wspólnych zalet jak:

- prosta budowa
- brak zapotrzebowania na mechanizmy zmiany kierunku
- cicha praca
- odporność na duże prędkości wiatru
- rozpoczynają pracę przy niższych prędkościach wiatru, niż turbiny o poziomej osi obrotu



Są one jednak zrównoważone przez szereg wad takich jak:

- niski próg TSR
- niska sprawność
- brak kontroli mocy wyjściowej przez sterowanie łopatkami
- ograniczone możliwości startowe





# TURBINY O POZIOMEJ OSI OBROTU

W przypadku turbin z poziomą osią obrotu, konstrukcje rozróżnia się według ilości zastosowanych łopatek w wirniku:

- jednopłatowe
- dwupłatowe
- trzypłatowe
- wielopłatowe



fot: [www.blog.odnawialne-firmy.pl](http://www.blog.odnawialne-firmy.pl)



fot: [spinoff.nasa.gov](http://spinoff.nasa.gov)

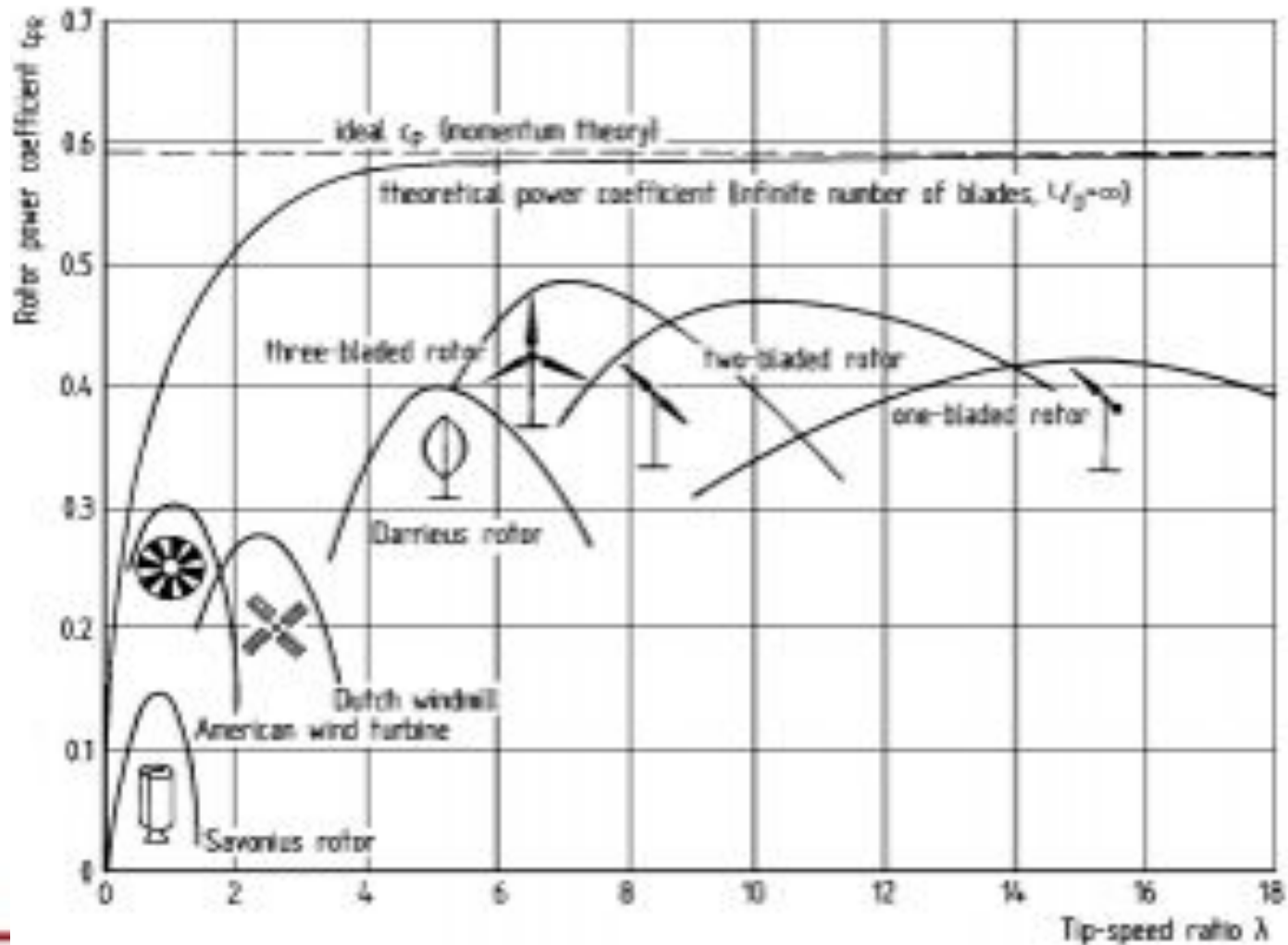


fot: [hungrybeast.abc.net.au](http://hungrybeast.abc.net.au)



fot: [news.cnet.com](http://news.cnet.com)

Porównanie współczynników sprawności w stosunku do TSR dla różnych turbin wiatrowych.



# KRZYWA MOCY

*Charakterystyką mocy siłowni wiatrowej jest krzywa mocy (ang. power curve), która jest graficznym zobrazowaniem zmiany wartości produkowanej mocy w funkcji prędkości wiatru. Jest ona zależna od konstrukcji wirnika, kształtu łopat, zamontowanych układów sterujących czy głównych podzespołów.*

*Kształt krzywej zależy od:  **$v^3$  wiatru oraz średnicy wirnika***

**Idalna krzywa = stroma, z maksimum dla możliwie niskich wartości prędkości wiatru**

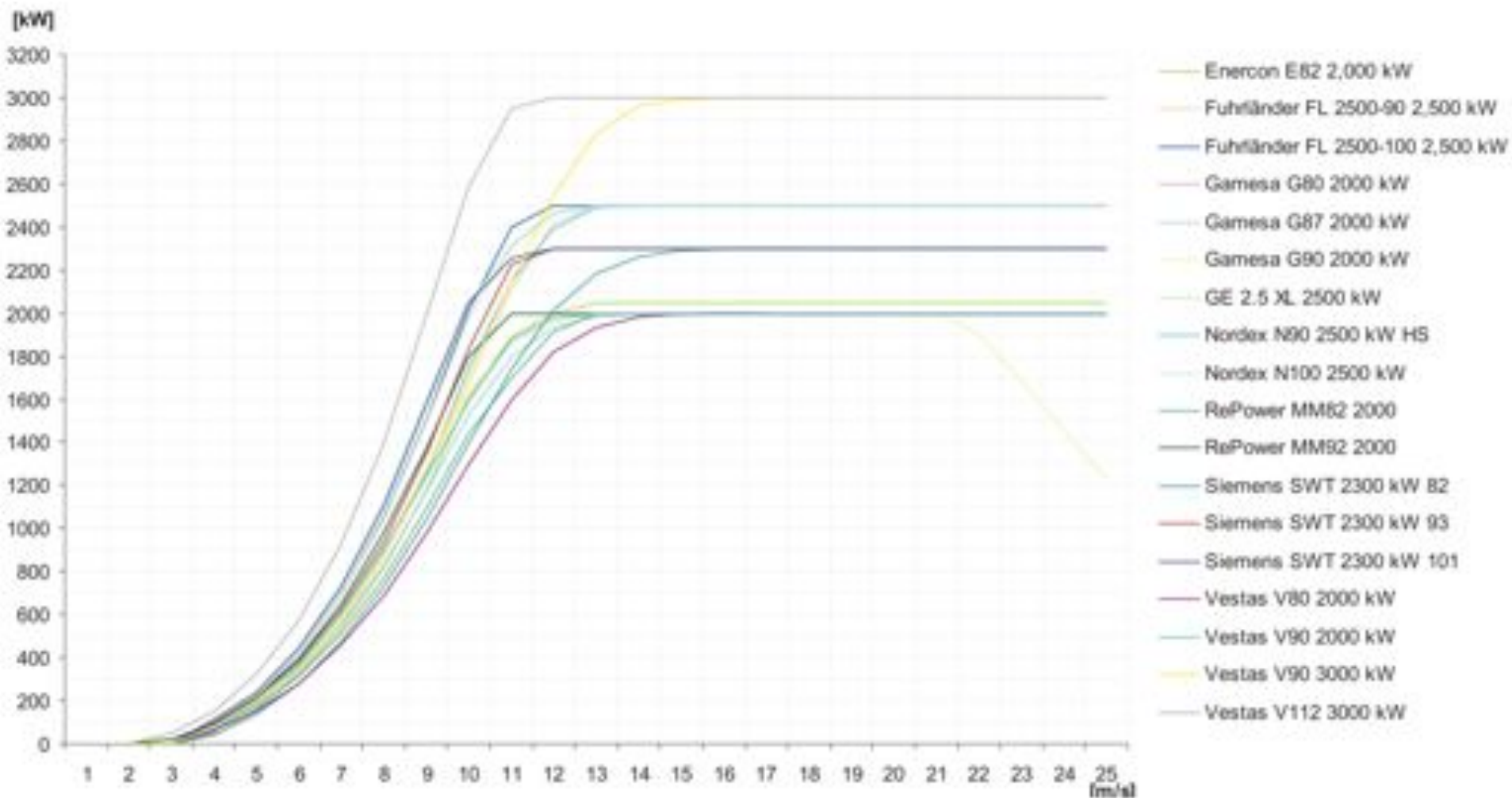


Na wykresie krzywych mocy wyróżnić można kilka charakterystycznych punktów :

- punkt prędkości startu (*ang. cut on*) – prędkość wiatru przy, której następuje rozruch wirnika i powstanie momentu mechanicznego na głównym wale (zależenie od rodzaju turbiny jest to przedział od 2 – 4 m/s)
- punkt prędkości nominalnej – prędkość wiatru, przy której siłownia wiatrowa osiąga swoją moc znamionową (zazwyczaj jest to przedział w granicach 11 -16 m/s)
- punkt prędkości wyłączenia (*ang. cut off*) – prędkość wiatru, przy której konieczne jest zatrzymanie turbiny ze względów bezpieczeństwa (23 – 27 m/s)



Krzywe mocy dla turbin wiatrowych- zestawienie 18 różnych producentów (gęstość pow. = 1,225 kg/m<sup>3</sup>)





# ROZKŁAD WEIBULLA

*Zmienność wartości średniej prędkości wiatru jest trudna do przewidzenia, jednak dzięki wykorzystaniu odpowiednich rozkładów prawdopodobieństwa możliwe jest jej określenie w przybliżeniu.*

*W energetyce wiatrowej najczęściej wykorzystuje się rozkład prawdopodobieństwa Weibulla. Metoda nazwę zawdzięcza szwedzkiemu profesorowi Waloddiemu Weibullowi*





Rozkład bazuje na poniższym równaniu:

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$$

gdzie symbole oznaczają:

- $f(v)$  - częstość pojawiania się prędkości wiatru o wartości prędkości  $v$
- $k$  - parametr kształtu
- $A$  - parametr skali



W celu wyznaczenia wartości prawdopodobieństwa pojawienia się wiatru o prędkości  $v$ , wykorzystuje się skumulowaną postać rozkładu Weibulla  $F(v)$ , wyrażoną poniższym równaniem:

$$F(v) = e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$$

*Parametr  $k$ , odpowiadający za kształt rozkładu, charakteryzuje zmienność prędkości wiatru w stosunku do uśrednionej wartości prędkości wiatru za badany okres.*

**Mała zmienność**

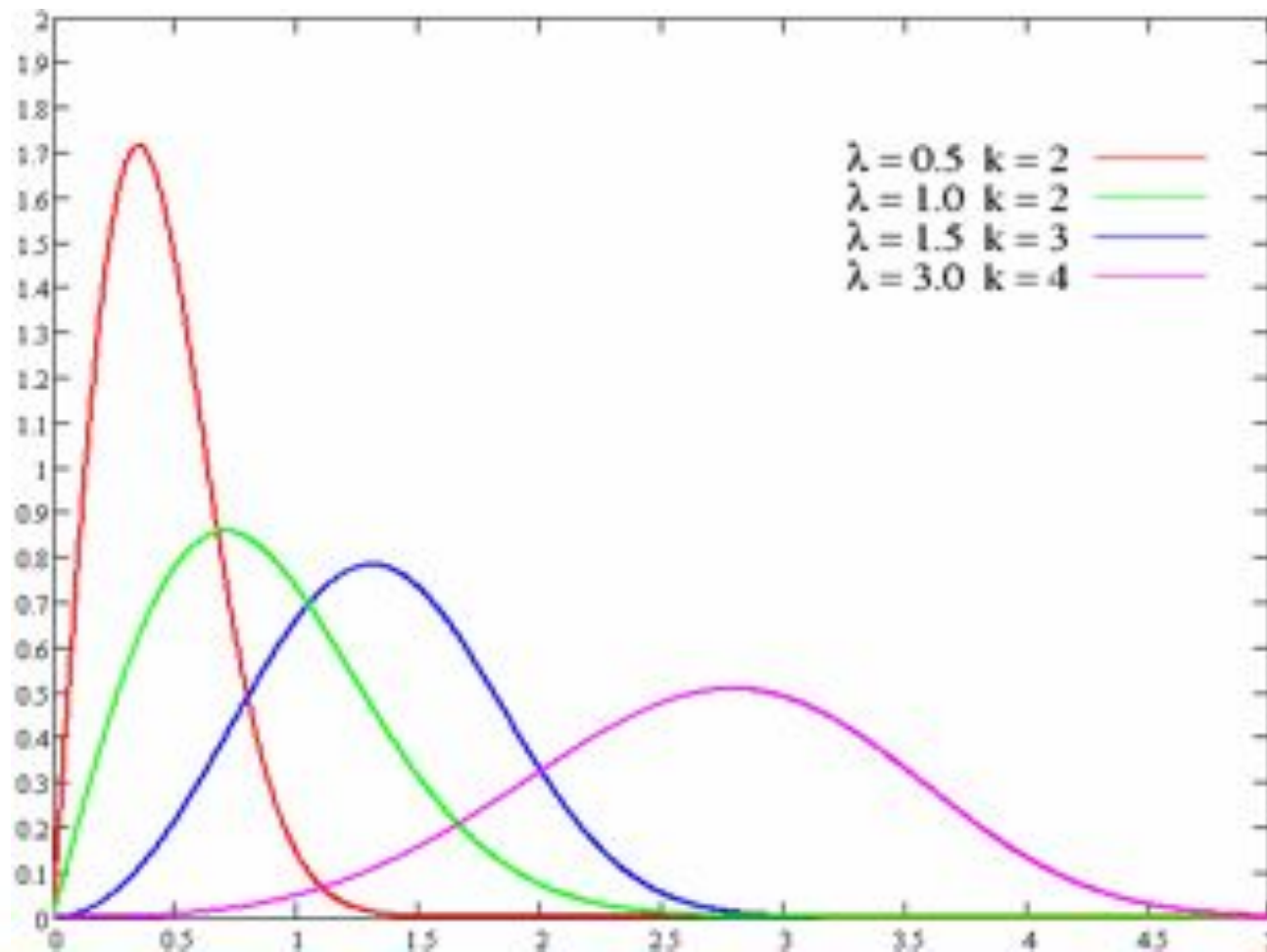
**$k = 2,5 - 3$**

**Duża zmienność**

**$k = 1,5 - 1,25 - 1,0$**



## Przykładowy rozkład Weibulla.

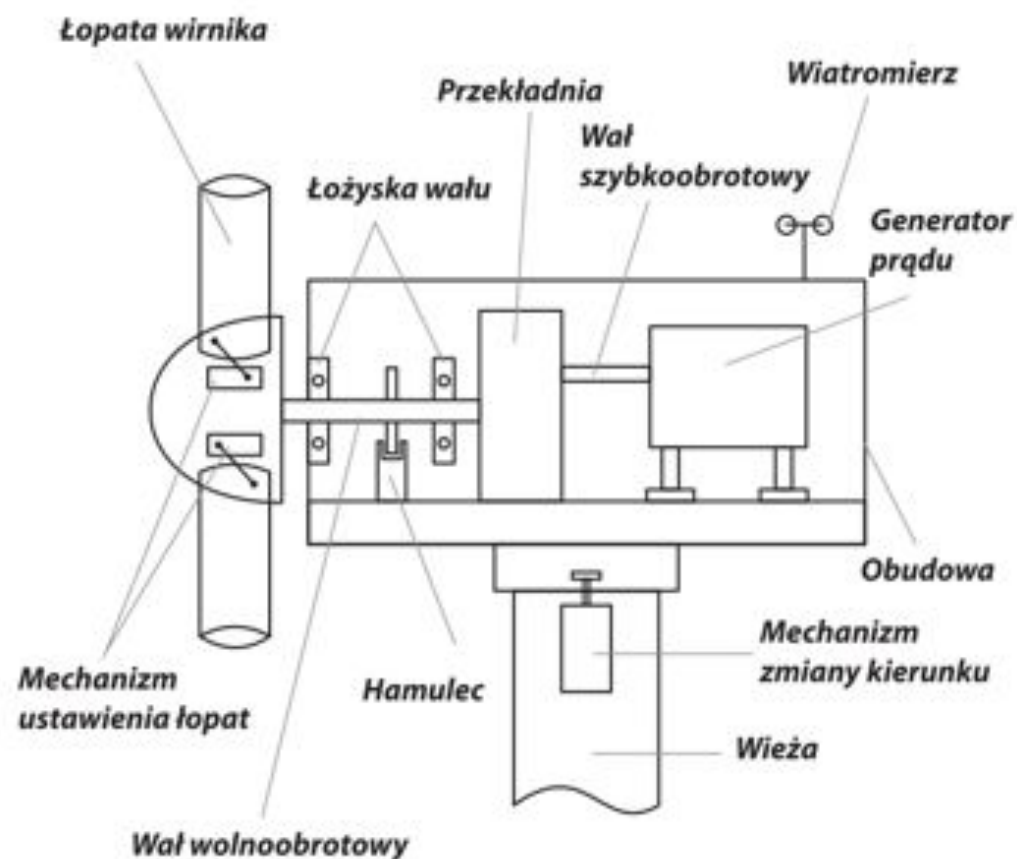


# BUDOWA ELEKTROWNI WIATROWYCH

*Wszystkie elektrownie wiatrowe, o poziomej osi obrotu składają się z czterech głównych elementów, nie wliczając układu sterowania oraz infrastruktury elektrycznej, które razem tworzą system turbiny wiatrowej tj.*

- fundament
- maszt
- gondola
- wirnik







# WIRNIK

*Wirnik jest jednym z najistotniejszych elementów turbiny wiatrowej, ponieważ od jego konstrukcji zależy sprawność konwersji energii kinetycznej wiatru.*



Fot. S. Archiwum grupy Martifer

fot: Archiwum grupy Martifer

6,5 -35,4 %  
całkowitej masy  
elektrowni

Podzespoły:

- piasta



- łopaty





# WIRNIK JEDNOPIŁATOWY

## Zalety:

- bardzo prosta konstrukcja
- łatwe wyhamowanie

## Wady:

- bardzo duże momenty skręcające oraz momenty bezwładności
- silne wibracje
- konieczność zastosowania przeciwwagi
- Wysoki TSR = duży hałas

## Zastosowanie:

*Obszary o bardzo dużych  
średniorocznych prędkościach  
wiatru, przy ograniczonych  
zmianach jego kierunku.*



fot: [www.blog.odnawialne-firmy.pl](http://www.blog.odnawialne-firmy.pl)



# WIRNIK DWUPŁATOWY

## Zalety:

- prosta konstrukcja
- łatwe sterowanie kątem natarcia łopat

## Wady:

- bardzo duże, zmienne momenty skręcające oraz momenty bezwładności
- silne wibracje
- Wysoki TSR = duży hałas

## Zastosowanie:

*Rzadko stosowane.  
Lokalizacje jak w przypadku  
jednopłatowych.*



# WIRNIK TRÓJPŁATOWY

## Zalety:

- stała wartość momentu obrotowego
- konstrukcja odporna na podmuchy
- ułatwiony obrót głowicy

## Wady:

- skomplikowany system sterowania kątem natarcia łopat

## Zastosowanie:

Większość lokalizacji o  
zmiennych warunkach  
wietrzności.



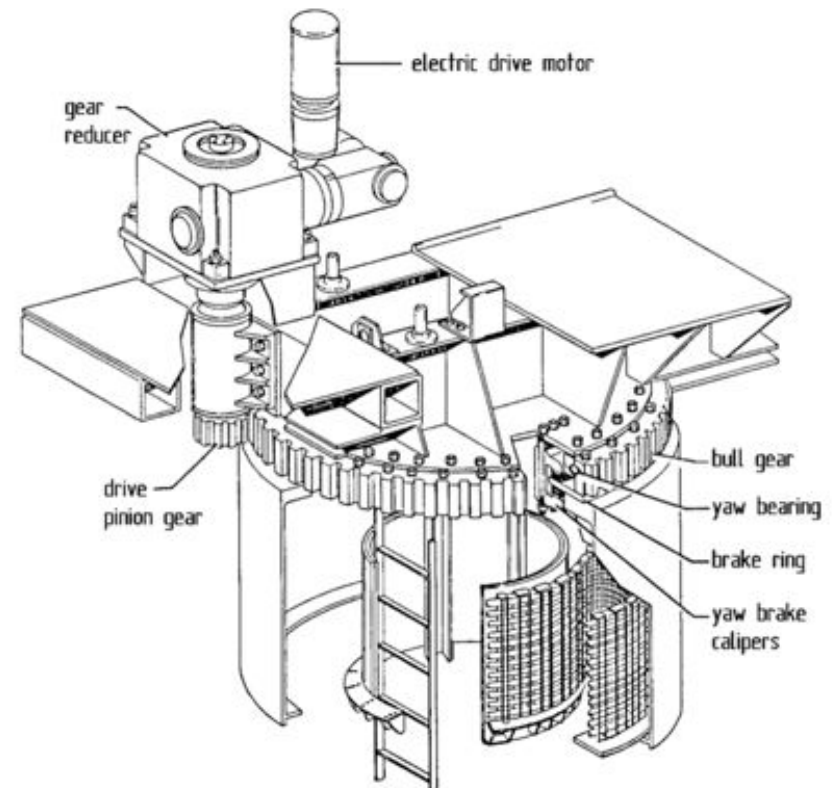
fot: hungrybeast.abc.net.au

# GONDOLA

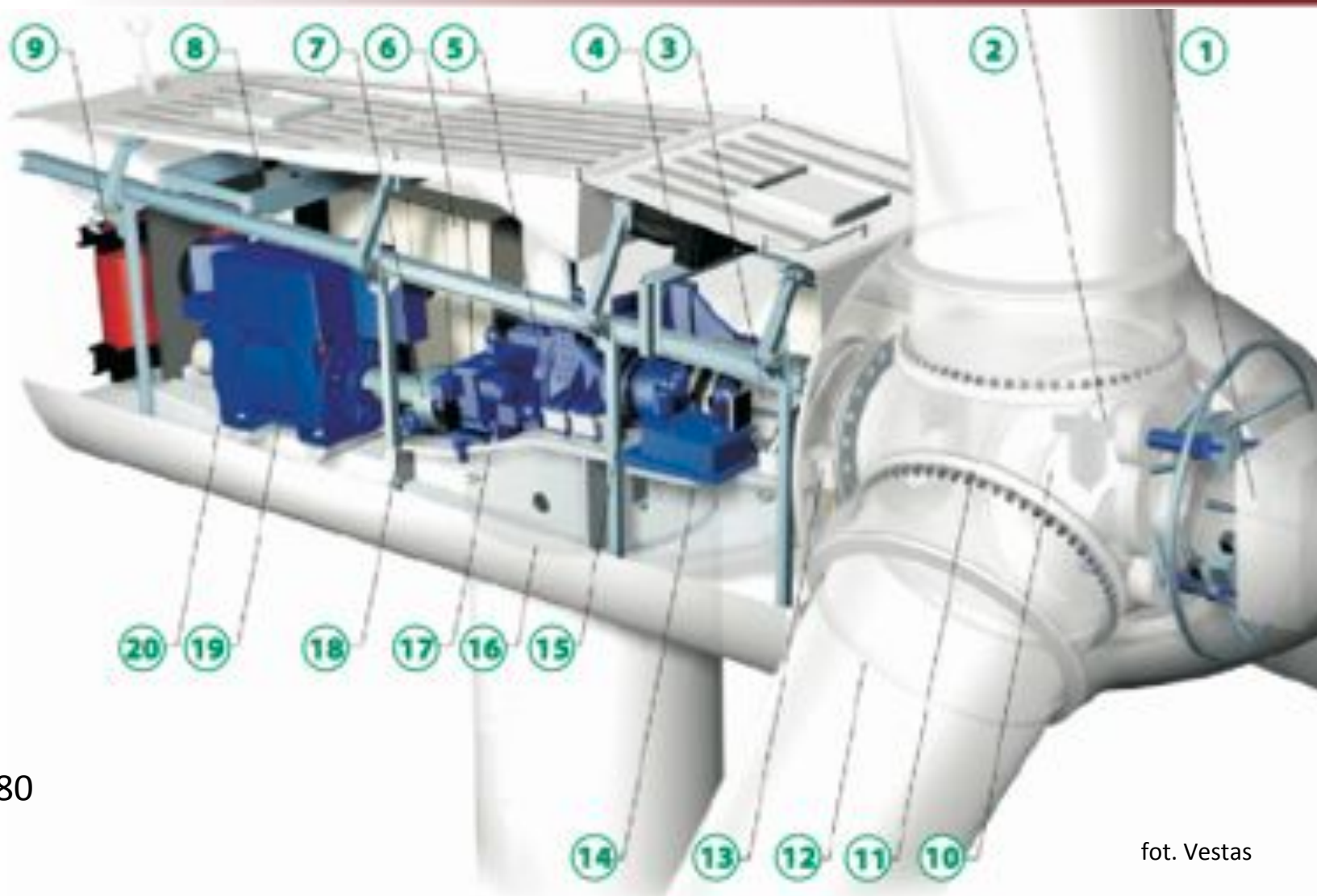


*Gondola jest kolejnym elementem siłowni wiatrowej, który mieści w sobie generator, zespół napędowy turbiny, układ hamowania, mechanizm odchylenia kierunkowych oraz cały system sterujący*

*Cały element posiada możliwość obrotu wokół własnej osi, aby zawsze mieć możliwość ustawienia wirnika prostopadle do kierunku wiatru. Obrót realizowany jest za pośrednictwem silnika i zębatego umieszczonej na szczycie wieży.*

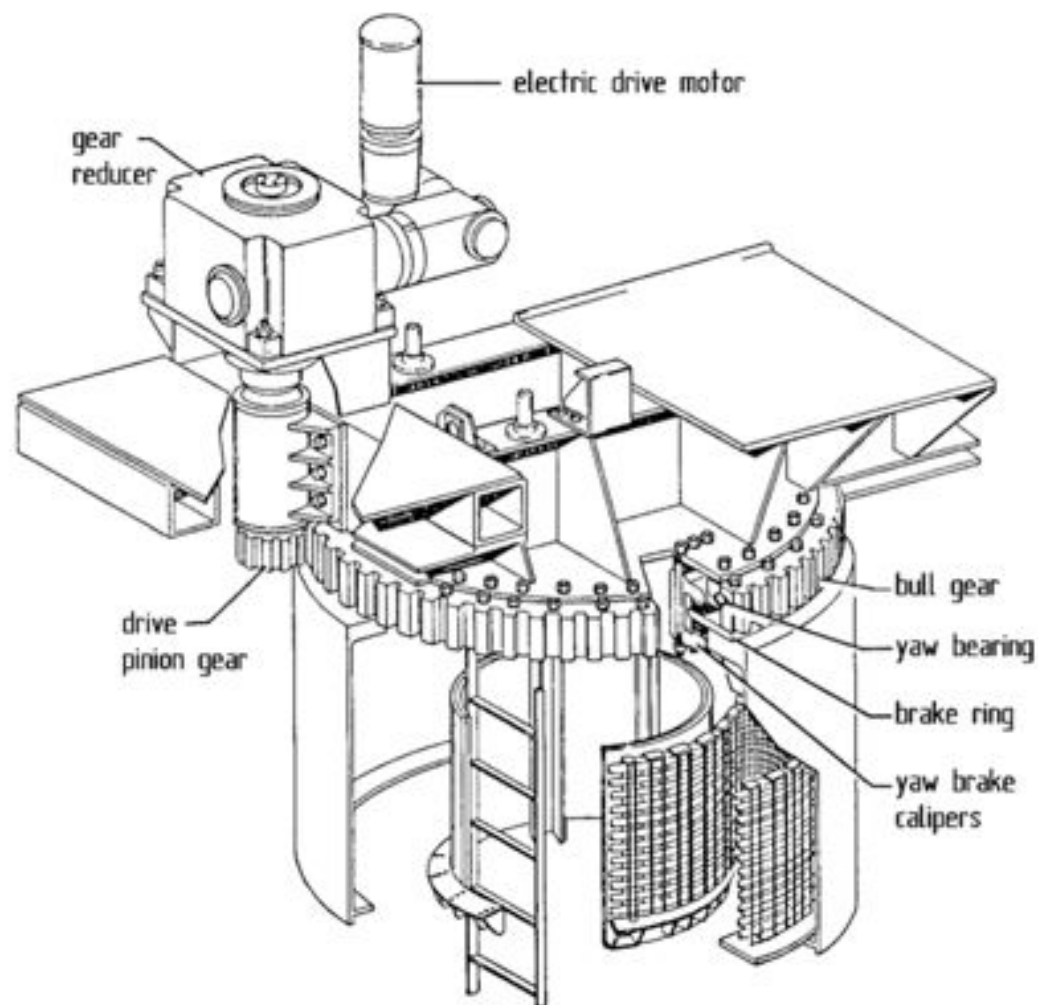






Vestas V80

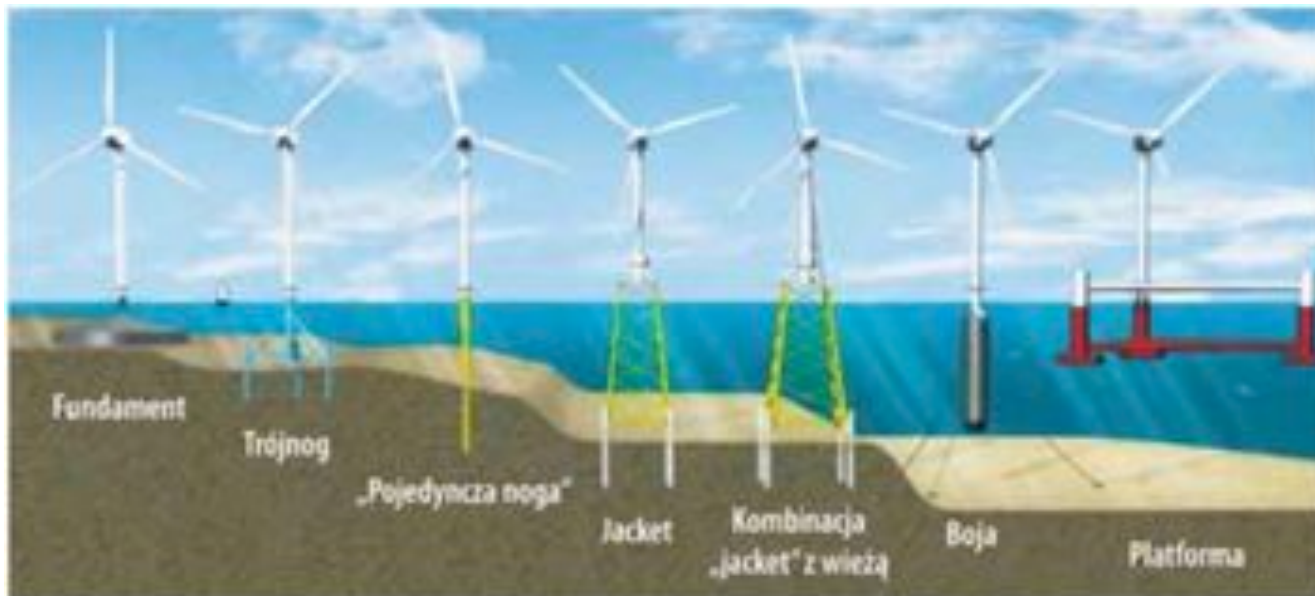
fot. Vestas





# WIEŻA

*Wieża jest głównym elementem konstrukcyjnym siłowni wiatrowych i jest wykonana w formie rury, kratownicy lub może być betonowa.*



Rys. 4. Sposoby zakotwiczenia elektrowni wiatrowych na dnie morskim w zależności od głębokości (źródło: Carbon Trust, artykuł opublikowany w Recharge 26/06/2009)



*Najczęstszym rozwiązaniem jest wykonanie z rur ze stali nierdzewnej. Ze względów logistycznych wieża podzielona jest na kilka elementów, które transportuje się oddzielnie i składa w docelowej lokalizacji.*

- segmenty= 20- 30 m
- stożkowy kształt,
- każdy segment wyposażony jest w kołnierz, który umożliwia łączenie



**Głównym celem wieży jest umieszczenie wirnika na *odpowiedniej wysokości* nad poziomem gruntu w celu optymalnego wykorzystania wiatru.**

Częste rozwiązanie:

*wysokość wieży = średnicy wirnika*

Przykładowa masa wieży o wysokości 50 m to ok. 40 ton, a jej stosunek do całkowitej masy elektrowni to od 30% do 78 %.



# FUNDAMENT

*Fundament jest podstawą każdej elektrowni wiatrowej. Rozmiar fundamentu zależy od wysokości turbiny oraz warunków geologicznych panujących w danej lokalizacji. Konstrukcja jest wykonana zazwyczaj z żelbetonu, a jej wytrzymałość jest dostosowana do oddziaływania wiatru na turbinę.*





# GENERATORY STOSOWANE W ENERGETYCE WIATROWEJ

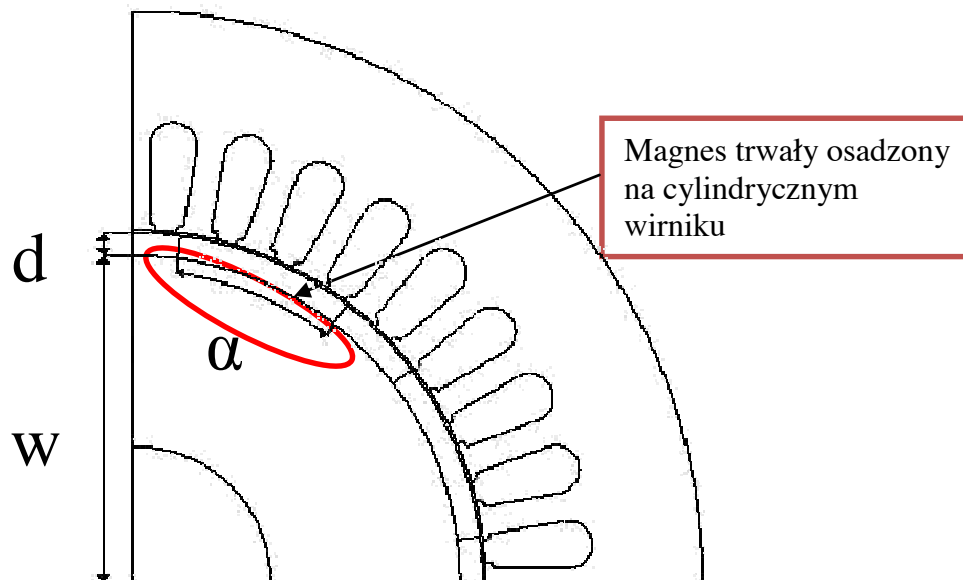
*Aktualnie w sektorze energetyki wiatrowej spotyka się dwa rodzaje generatorów, **asynchroniczny (indukcyjny)** oraz **synchroniczny**.*

*Dodatkowo w celu zróżnicowania możliwych prędkości obrotowych siłownie wyposaża się w system OptiSpeed, umożliwiający zmiany prędkości obrotowych o 60%. Zapewnia to odpowiednie dostosowanie funkcjonowania turbiny do wymagań sieci elektroenergetycznej.*



## GENERATOR SYNCHRONICZNY

„Generator synchroniczny jest maszyną elektryczną prądu przemiennego, która składa się z wirnika (rotoru) z magnesami (lub elektromagnesami prądu stałego), obracającego się z prędkością synchroniczną, tj. równą prędkości wirowania pola magnetycznego wzbudzonego przez stojan (lub w stojanie).”





Prędkość synchroniczną obliczyć można z poniższego wzoru:

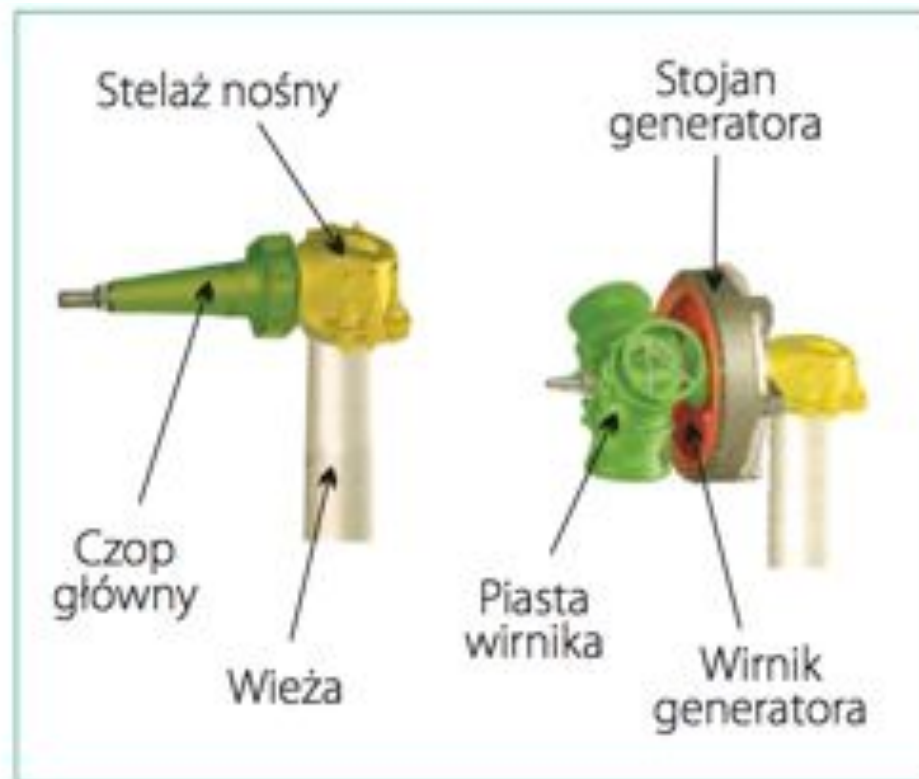
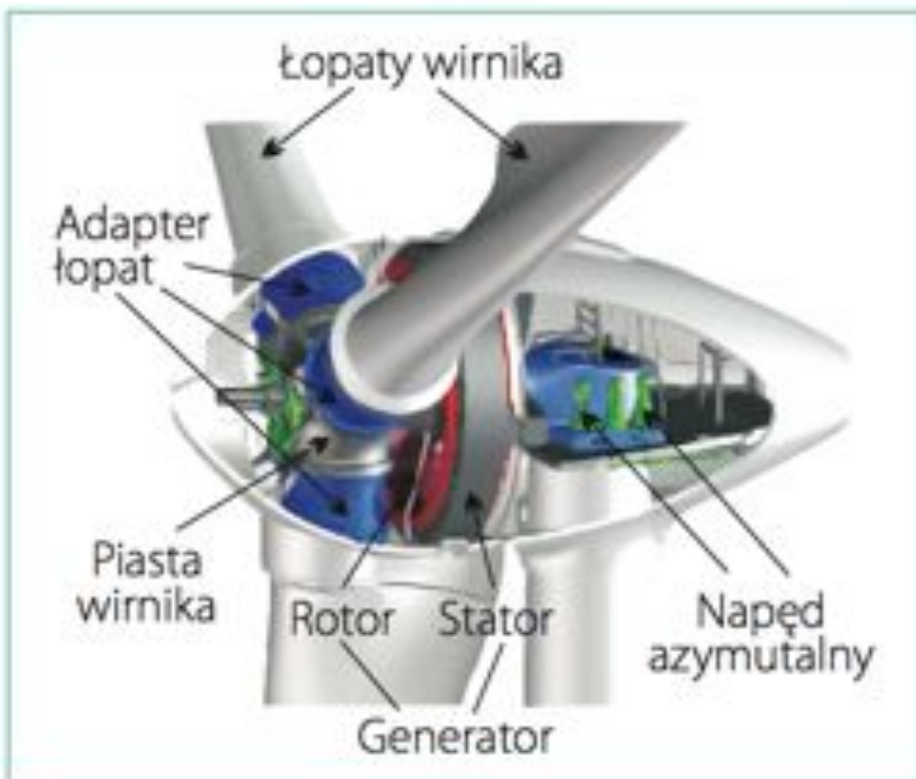
$$n_0 = \frac{60 * f_1}{p}$$

gdzie:

- $f_1$  - częstotliwość napięcia zasilania  
 $p$  - liczba par biegunów maszyny

$p$	$n_0$ [obr/min]
1	3000
2	1500
3	1000
4	750





Enercon E-70

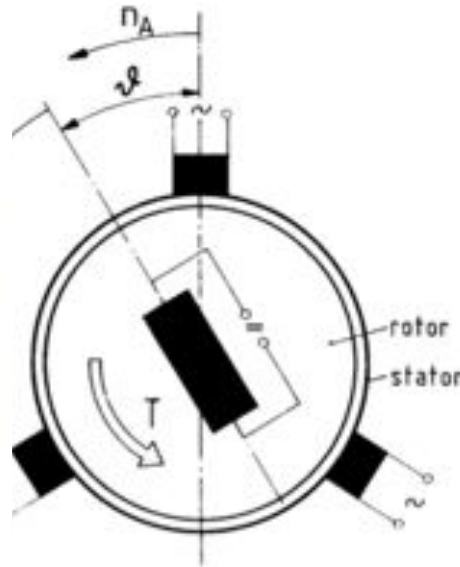
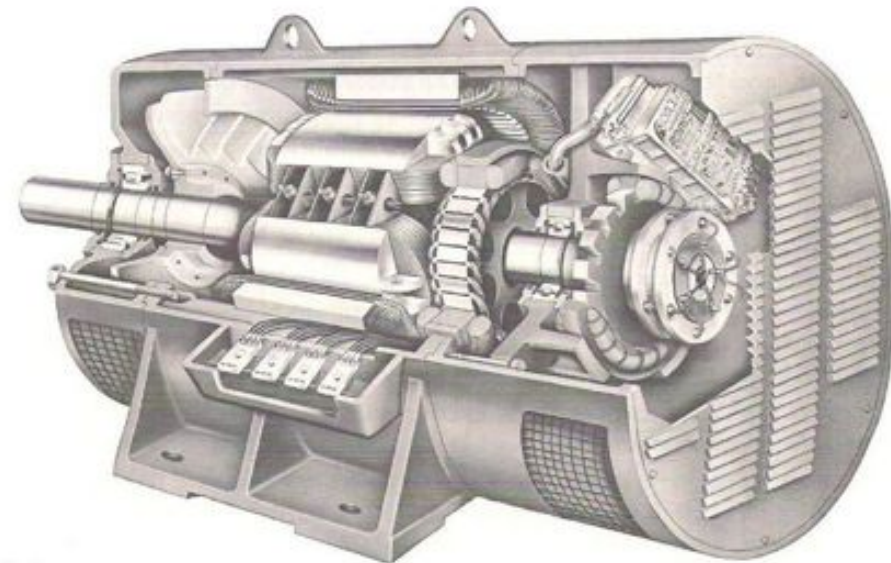
Moc znamionowa: 2 MW  
Długości łopat: 35 m  
Pow. zatraczania: 3959 m<sup>2</sup>

załaczenie: 2,5 m/s  
nominalna moc: 12,7 m/s  
wyłączenie: 28-34 m/s



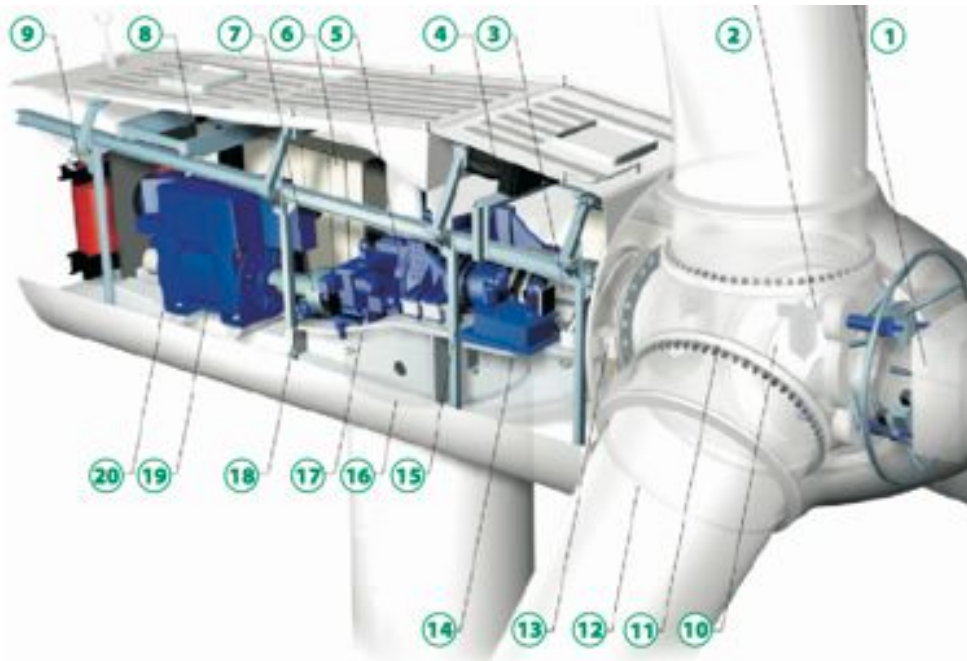
## GENERATOR ASYNCHRONICZNY

*W przypadku generatora indukcyjnego (asynchronicznego) pole elektryczne zostaje wzbudzone przez względny ruch (poślizg) między rotorem a wirującym polem magnetycznym statora, wywołując napięcie w uzwojeniu rotora. Urządzenia takie pracują ze stałą lub zmienną skokowo prędkością wirowania. Maszyny te są tanie, niezawodne i odporne na przeciążenia.*



fot. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)

*Turbiny wyposażone w generator asynchroniczny ze względu na rodzaj pracy wymagają zastosowania przekładni. Obecnie głównie wykorzystuje się generatory o zmiennej liczbie par biegunów. W zależności od warunków wietrznych włączany jest „mały generator” (słaby wiatr) lub „duży” (dla większego wiatru). Dla częstotliwości równej 50 Hz, prędkość synchroniczna generatora mieści się w przedziale od 905 do 1915 obr /min, natomiast wirnik obraca się z prędkością rzędu 20 obr/min.*



Vestas V80





*Integralną częścią elektrowni wiatrowych stanowią, również stacje transformatorowe. Obecnie większość stacji charakteryzuje się dużą trwałością i bezpieczeństwem przy pracy. Ich modułowa budowa bardzo ułatwia instalację w dowolnej lokalizacji w krótkim czasie. Znanym producentem rozdzielnic SN i nN oraz stacji transformatorowych jest firma ZPUE S.A z Włoszczowa.*



# REGULACJA MOCY

W celu zapewnienia bezpiecznej i stabilnej pracy siłowni wiatrowej konieczna jest kontrola obrotów wirnika oraz ustawienia jego kierunku względem wiatru. Wyróżnić można dwa sposoby takiej regulacji : aktywny i pasywny.

**Aktywna metoda** regulacji opiera się na zmianie kąta natarcia płatów oraz zmianie obciążenia, poprzez zastosowanie odpowiednich systemów sterujących.

**Pasywne rozwiązanie** opiera się na wykorzystaniu specjalnie zaprojektowanych profili łopat, które odpowiadają za wyhamowanie wirnika przy prędkościach wiatru przekraczających bezpieczne limity.





W energetyce wiatrowej wykorzystywane są następujące metody regulacji mocy wytwarzanej przez siłownię wiatrową:

- Regulacja ustawieniem turbiny w kierunku wiatru (Yaw Control)
- Regulacja kąta natarcia łopat (Active Pitch Regulation)
- Regulacja przez zmianę obciążenia (Load Control)
- Regulacja przez „przecignięcie” (Stall Regulation)
- Regulacja lotkami łopat wirnika (Aileron Control)
- Regulacja przez zmianę poślizgu generatora



## REGULACJA USTAWIENIEM TURBINY W KIERUNKU WIATRU (YAW CONTROL)

*Jest to najpopularniejsza metoda regulacji spotykana w elektrowniach wiatrowych.*

*Zasadą tej regulacji jest kontrola ustawienia osi obrotu wirnika w stosunku do wiatru.*

*W razie potrzeby ograniczenia lub zwiększenia mocy, obracana zostaje gondola turbiny, zwiększając lub zmniejszając kąt między kierunkiem wiatru a osią obrotu wirnika.*

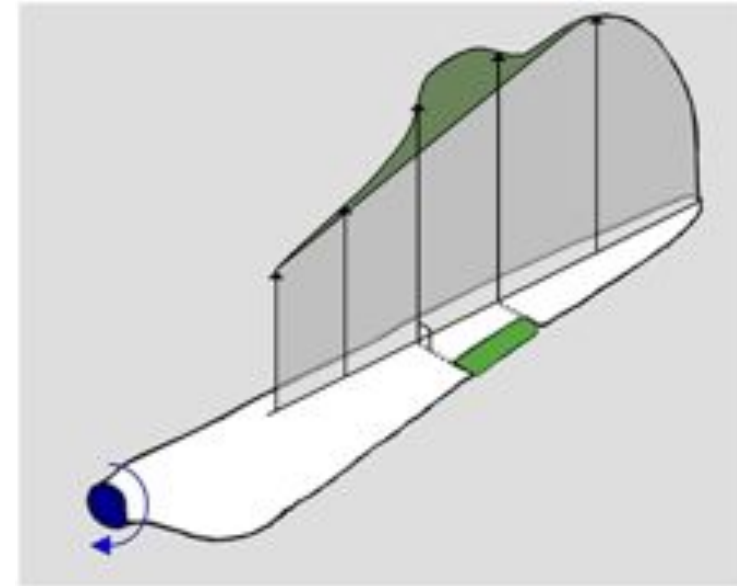


fot. romowind.com

## REGULACJA KĄTA NATARCIA ŁOPAT (ACTIVE PITCH REGULATION)

*Podstawowym celem tego typu regulacji jest zwiększenie lub zmniejszenie siły nośnej łopaty oraz zmianę sposobu opływu powietrza wokół profilu płatów zmieniając wartości sił hamujących.*

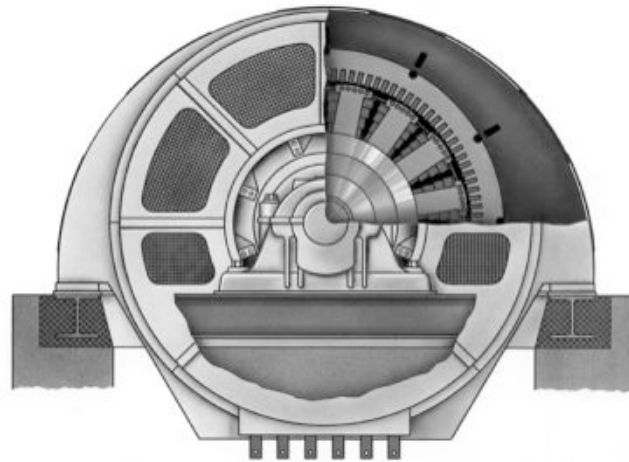
*Opisana metoda pozwala na zachowanie stałych obrotów wirnika przy zmiennym wietrze jednak wymaga zastosowania ruchomych mechanizmów, zwiększając ryzyko awarii.*



fot. [nanopatentsandinnovations.blogspot.com](http://nanopatentsandinnovations.blogspot.com)

## REGULACJA PRZEZ ZMIANĘ OBCIĄŻENIA (LOAD CONTROL)

*Metoda polega na dostosowaniu obciążenia generatora, prowadząc do zmiany punktu pracy turbiny oraz jej charakterystyki mechanicznej, dostosowując ją do panujących aktualnie warunków wietrzności. Ważne jest, aby zmiana obciążenia generatora odbywała się w sposób kontrolowany, aby nie uszkodzić wału lub innych podzespołów mechanicznych.*



fot. GLOBEnergy



## REGULACJA PRZEZ „PRZECIĄgniĘCIĘ” (STALL REGULATION)

*Rozwiązanie bazuje na zjawisku aerodynamicznym, wywołanym przez zaburzenie opływu powietrza wokół profilu łopaty i wyeliminowanie siły nośnej.*



fot. romowind.com





## REGULACJA PRZEZ ZMIANĘ POŚLIZGU GENERATORA

*W celu wykorzystania tej metody konieczne jest wyposażenie turbiny w odpowiedni generator, który posiada możliwość regulacji prędkości obrotowej wykorzystując zmianę poślizgu.*

*W sytuacji gdy generator oddaje moc bliską znamionowej poślizg generatora ustawiany jest na połowę jego wartości maksymalnej.*

*Gdy następuje zwiększenie siły wiatru, system sterowania zwiększa poślizg, aby obroty wirnika również mogły wzrosnąć, jednocześnie korygując ustawienie kąta natarcia.*

*Gdy obroty wirnika zostaną ustabilizowane, poślizg ponownie zostaje ustawiony na połowę wartości maksymalnej.*

*Sytuacja się powtarza również przy zmniejszeniu siły wiatru.*

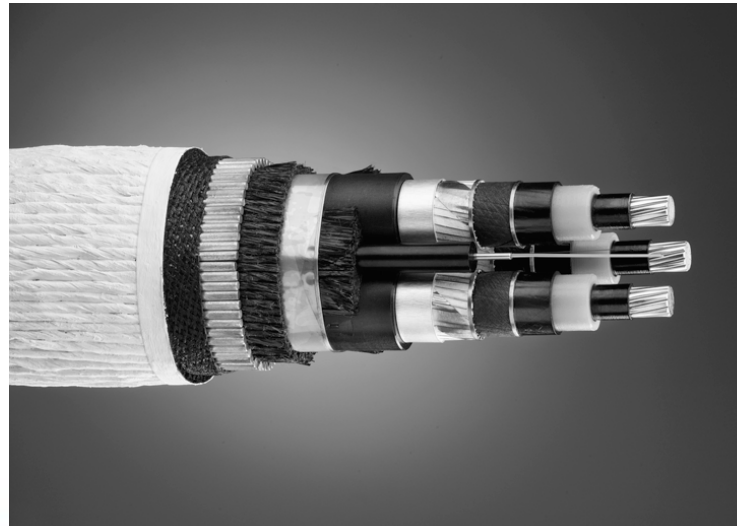




## PRZESYŁ ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Standardowy kable podziemny o przekroju 150 mm<sup>2</sup> z aluminium może przenieść następujące moce dla poszczególnych napięć:

- 400 V - niskie napięcie – ok. 200 kW
- 20 kV – średnie napięcie – ok. 10 MW
- 110 kV – wysokie napięcie – ok. 150 MW



Ważne jest również, aby wziąć pod uwagę straty mocy na kablu do minimum. Poniżej zamieszczono, przykładowe wartości akceptowalnych, 5% strat napięcia (oraz mocy), przy wykorzystaniu wspomnianych kabli aluminiowych na każdy km kabla:

400 V - niskie napięcie – 34 kW na km

20 kV – średnie napięcie – 85 kW km

Zgodnie z powyższym, elektrownia wiatrowa o mocy 150 kW, która podłączona jest do sieci niskiego napięcia powinna znajdować się w odległości nie większej niż 230 m (dla zakładanego kabla z aluminium 150 mm<sup>2</sup>).

W przypadku farmy wiatrowej o mocy 8 MW podłączonej do sieci średniego napięcia, ten dystans nie powinien przekraczać 10 km.





# DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

Piotr Grzyski

[piotr@grzyski.com](mailto:piotr@grzyski.com)

