

ME-1,43

Konwersja energii - laboratorium

Zakład Spalania

SW - SILNIKI WIATROWE

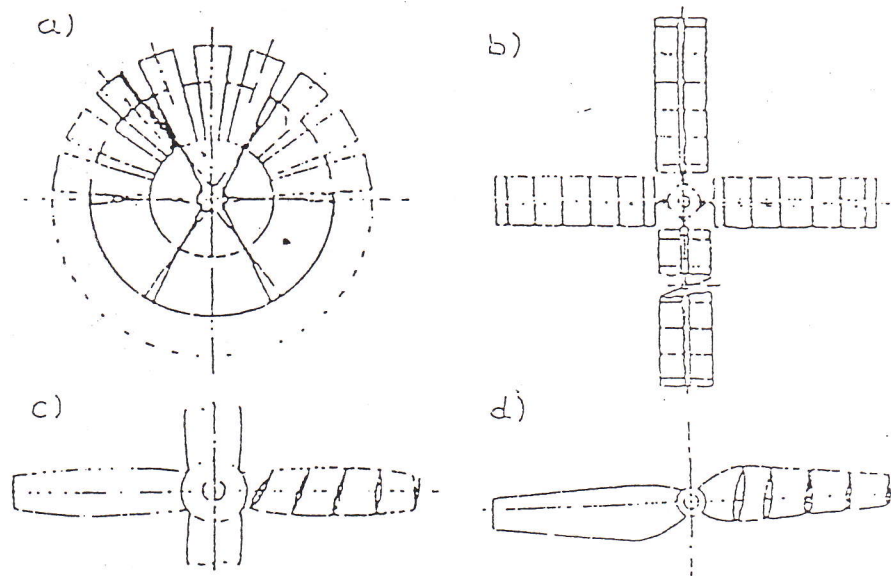
Silniki wiatrowe

Opracował: Dr inż. Adam Hanik

I. Klasyfikacja silników wiatrowych według zasad funkcjonowania

Podstawowe typy silników wiatrowych ze względu na budowę wirnika i jego położenie w strumieniu powietrza można podzielić na 3 grupy:

1. Silniki wiatrowe, w których wirnik jest położony w płaszczyźnie pionowej, a os obrotu jest równoległa do kierunku wiatru. Takie silniki nazywają się silnikami wirnikowymi z wirnikiem łopatkowym (rys. 1).



Rys. 1. Rodzaje wirników łopatkowych

Szybkobieżność jest to stosunek prędkości obrotowej końca łopaty wirnika do prędkości wiatru

$$z_n = \frac{\omega R}{v}$$

gdzie ω jest prędkością kątową, a R promieniem wirnika.

Silniki wiatrowe z wirnikiem łopatkowym dzielą się na 3 grupy:

1) silniki z wirnikiem wielołopatkowym (rys. 1a), cichobieżne o szybkobieżności $z_n < 2$,

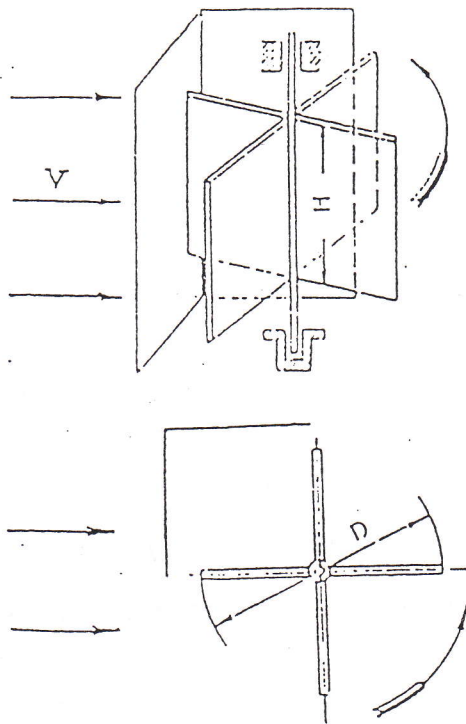
b) silniki z wirnikiem o niewielkiej liczbie łopatek (rys.1 b,c), cichobieżne o szybkobieżności $Z_n > 2$,

c) silniki szybkobieżne ($Z_n > 3$) z wirnikiem o niewielkiej liczbie łopatek (rys.1d) .

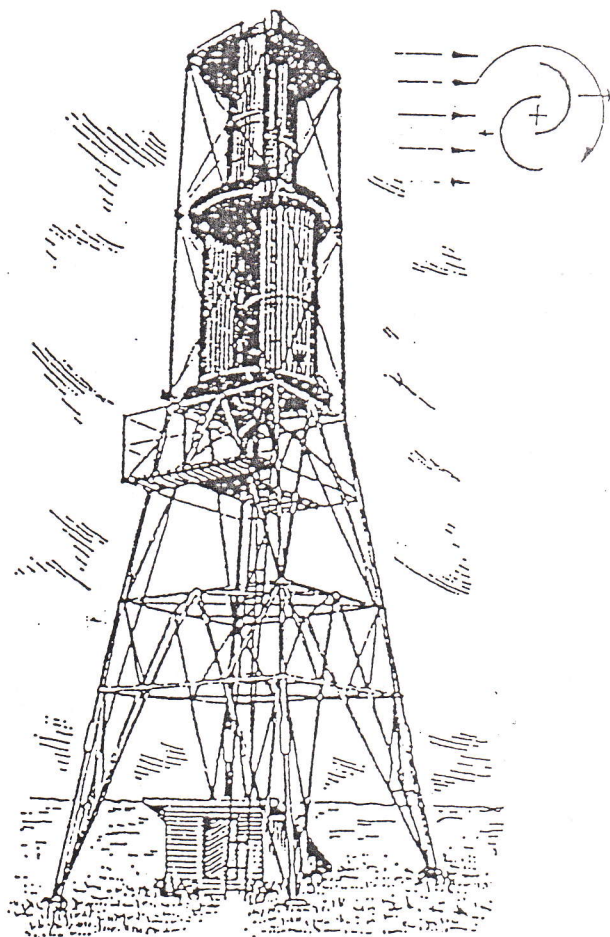
2. Silniki wiatrowe, w których os obrotu wirnika jest prostopadła do kierunku wiatru. Według schematów konstrukcyjnych dziela sie one na 2 grupy:

- karuzelowe (rys.2), w których niepracujące łopaty sa zasłonięte przed działaniem wiatru,

-rotacyjne (rys.3), w których wirnik zbudowany jest z dwóch łopat w kształcie półkregów przesuniętych względem osi obrotu.

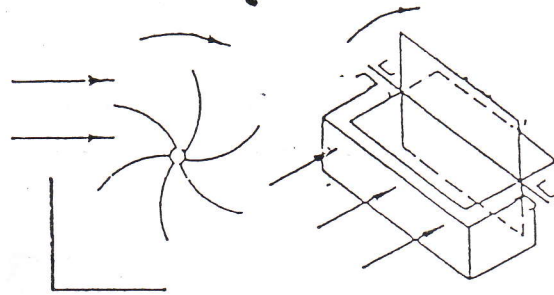


Rys. 2. Silnik wiatrowy karuzelowy



Rys. 3. Silnik wiatrowy rotacyjny

3. Silniki wiatrowe pracujące według schematu koła młyńskiego nazywane bebnowymi (rys.4). W silnikach tych oś obrotu wirnika jest pozioma i prostopadła do kierunku wiatru.



Rys. 4. Silnik wiatrowy bebnowy

II. Powierzchnia poddana działaniu siły wiatru

Strumień powietrza o przekroju poprzecznym F posiada energię kinetyczną

$$E_k = \frac{mV^2}{2} \quad (1)$$

Masa powietrza przelatującego z prędkością V przez powierzchnię F poprzeczną do kierunku strumienia powietrza wynosi

$$\dot{m} = \rho FV \quad (2)$$

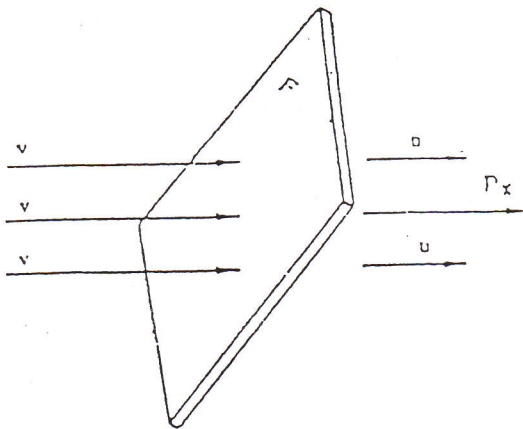
stawiając (2) do wyrażenia na energię kinetyczną uzyskuje się

$$E_k = \frac{\dot{m}V^2}{2} = \frac{\rho FV^3}{2} \quad (3)$$

$$E_k = \frac{\rho \pi r^2 V^3}{2}$$

skąd wynika, że energia kinetyczna wiatru jest proporcjonalna do v^3 .

Przeanalizujmy ile procent energii wiatru może zostać przekształconych w pracę użyteczną powierzchni umieszczonej prostopadle do kierunku wiatru i przemieszczającej się z prędkością U w tym samym kierunku (rys.5), co ma miejsce np. w silnikach wiatrowych karuzelowych.



Rys. 5. Działanie siły wiatru na powierzchnię F

Moc T jest iloczynem siły P i prędkości v .

$$T = P v \quad (4)$$

Taka sama moc można uzyskać przy działaniu dużej siły i małej prędkości przemieszczania się powierzchni albo przy działaniu małej siły i dużej prędkości ruchu powierzchni.

Załóżmy, że mamy powierzchnię F umieszczoną prostopadle do kierunku wiatru. Strumień powietrza wskutek hamowania go przez powierzchnię będzie ją opływał oddziałując na nią siłą P_x . Wskutek działania tej siły powierzchnia będzie się przemieszczała w kierunku wiatru z prędkością U (rys.5). Moc jaką posiada ta przemieszczająca się powierzchnia jest równa iloczynowi siły i prędkości jej ruchu

$$T = P_x U, \quad (5)$$

gdzie P_x jest siłą oporu, która można wyrazić jako

$$P_x = C_x F \frac{\rho}{2} (V - U)^2, \quad (6)$$

a C_x jest współczynnikiem oporu powierzchni F . W tym przypadku prędkość względna wiatru wynosi

$$W = V - U. \quad (7)$$

Wstawiając (6) do (5) uzyskuje się moc przemieszczającej się powierzchni F

$$T = C_x F \frac{\rho}{2} (V - U)^2 U. \quad (8)$$

Energia strumienia wiatru napływającego na tą powierzchnię wynosi:

$$E_k = \frac{\rho F V^3}{2}. \quad (9)$$

Stosunek mocy przemieszczającej się powierzchni F do energii kinetycznej strugi wiatru o takim samym przekroju poprzecznym

$$\xi = \frac{C_x F \frac{\rho}{2} (V - U)^2 U}{\frac{\rho F V^3}{2}} = C_x (V - U)^2 \frac{U}{V^3} \quad (10)$$

określany jest jako tzw. współczynnik wykorzystania energii wiatru ξ

Po przekształceniu (10) otrzymuje się

$$\xi = C_x \left(1 - \frac{U}{V}\right)^2 \frac{U}{V} \quad (11)$$

Ze wzoru (11) wynika, że ξ zależy od prędkości U przemieszczania się powierzchni F w kierunku wiatru. Przy pewnej wartości prędkości U współczynnik ξ osiąga maksimum.

Przyjmując oznaczenie $e = U/V$ wzór (11) można przepisać w postaci

$$\xi = C_x (1 - e)^2 e = C_x e - 2 C_x e^2 + C_x e^3. \quad (12)$$

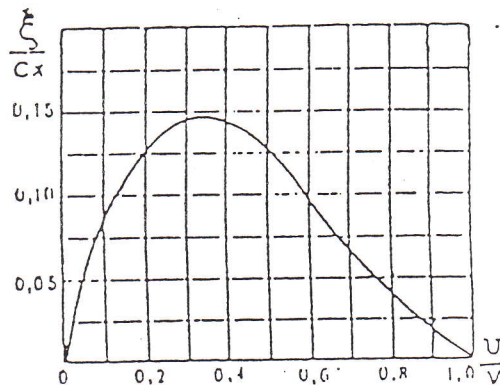
Aby znaleźć wartość e , dla której ξ będzie maksymalne należy przyrównać pierwszą pochodną do zera

$$\frac{d\xi}{de} = C_x - 4 C_x e + 3 C_x e^2 = 0, \quad (13)$$

skąd $e = U/V = 1/3$. Aby uzyskać maksymalną wartość ξ , powierzchnia F powinna się przemieszczać z prędkością

$$U = V / 3 .$$

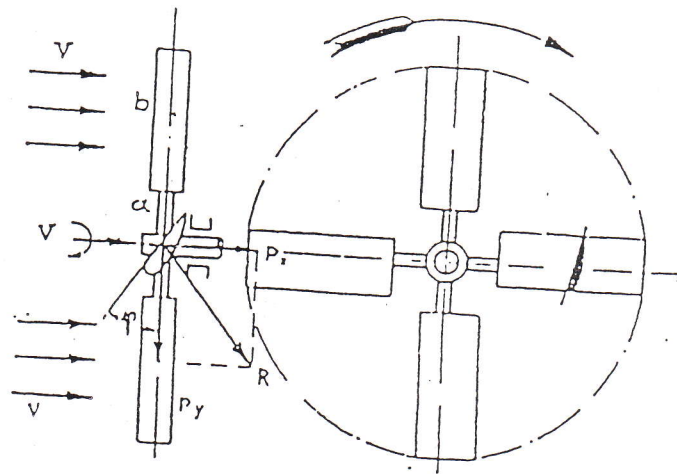
Charakterystyka idealnego współczynnika wykorzystania energii wiatru przez powierzchnie przemieszczającą się w kierunku wiatru jest pokazana na rys. 6.



Rys. 6. Charakterystyka idealnego współczynnika wykorzystania energii wiatru

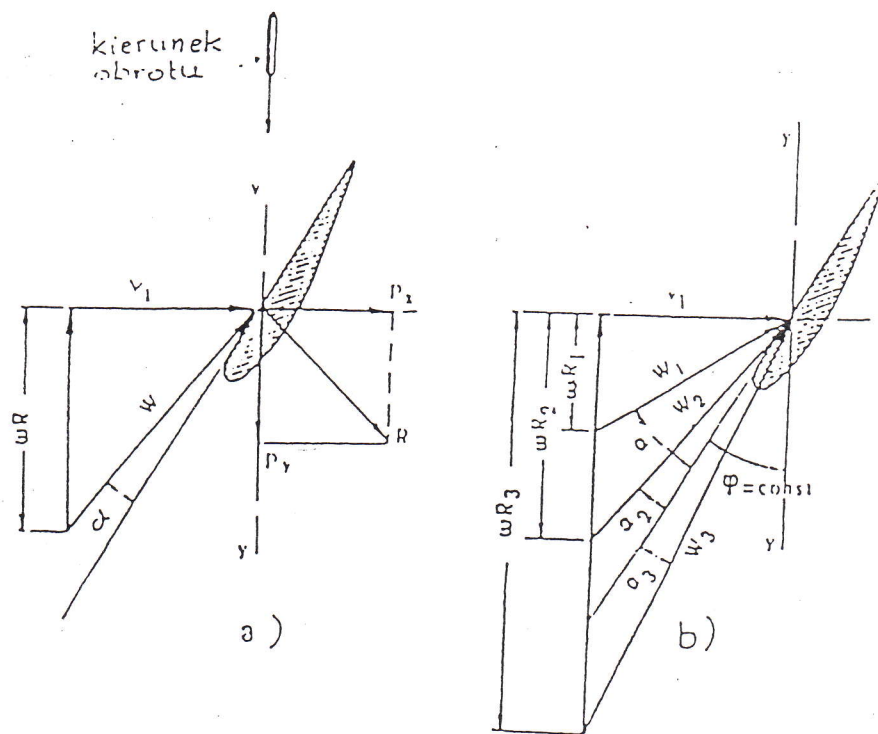
III. Praca wirnika łopatkowego silnika wiatrowego

Wirniki łopatkowe pracują dzięki ukośnemu uderzeniu wiatru przy ruchu łopatek w kierunku prostopadłym do kierunku wiatru, w przeciwieństwie do prostego napływu rozpatrywanego wcześniej. Konstrukcja takiego wirnika jest pokazana na rys. 7. Na poziomym wale zamocowane są łopaty, których liczba może się zmieniać od 2 do 24. Skrzydło wiatraka składa się z osi a i łopaty b , która jest tak zamocowana, że tworzy z płaszczyzną obrotu kąt ϕ . Kąt ten nazywany jest kątem zaklinowania łopaty (rys. 7). Przy tym na łopate napływa strumień powietrza o prędkości względnej W pod kątem α , który nazywa się kątem napływu i oddziałuje na nią siła R .



Rys. 7. Konstrukcja wirnika

Katy ϕ i α w znacznej mierze określają efektywność łopaty śmigła wiatrowego. Siłę R można rozłożyć na 2 składowe P_x i P_y (rys.8a). Składowa P_x wytwarza ciśnienie w kierunku wiatru, które nazywa się ciśnieniem czołowym.



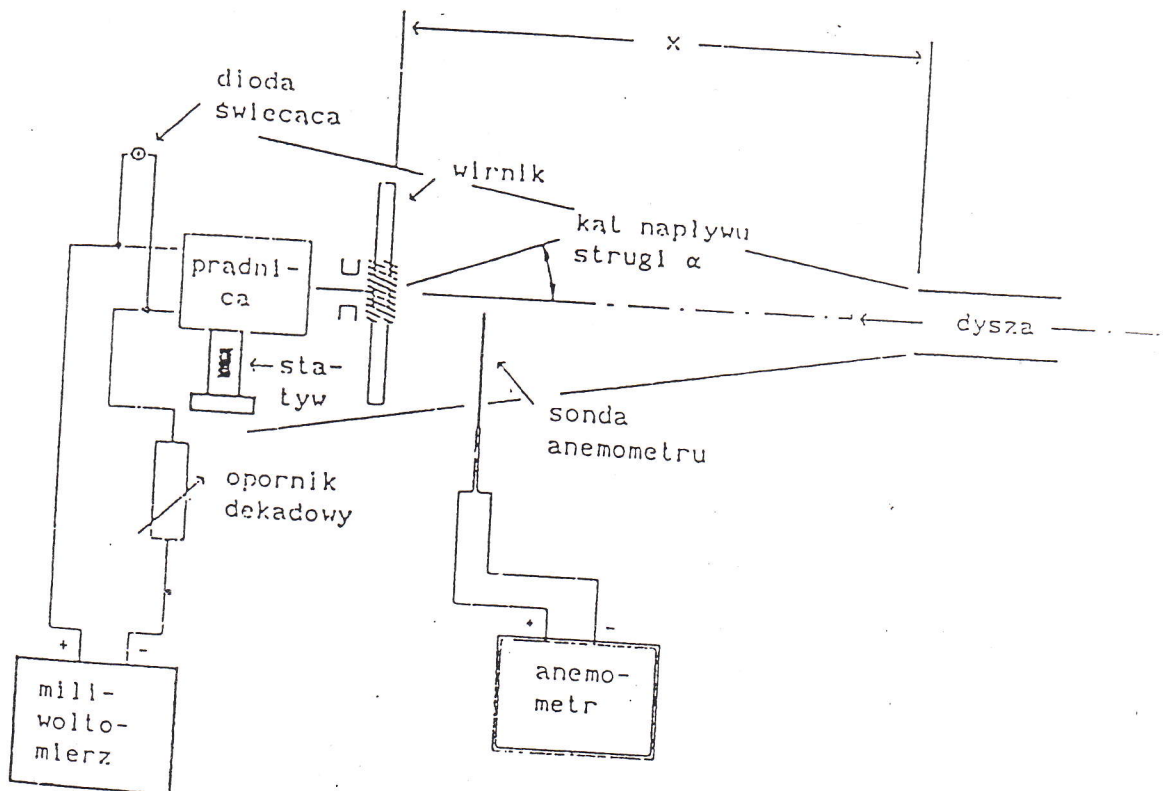
Rys. 8. Działanie sił strumienia powietrza na element łopaty wirnika

5110
Składowa P_y działająca w płaszczyźnie y-y obrotu wirnika wywołuje moment obrotowy. Siły maksymalne powodujące obrót wirnika uzyskuje się przy pewnych wartościach kąta napływu α , tj. kąta pochylenia strumienia do powierzchni łopaty. Ze względu na to, że prędkość obrotowa wzdłuż łopaty wzrasta w miarę oddalania się od osi obrotu, prędkość względna w napływie strumienia na łopate także wzrasta. Konsekwencją tego jest zmniejszanie się kąta napływu α , [i] przy pewnej prędkości obrotowej ωR kąt ten staje się ujemny (rys. 8b). Z tego też względu nie wszystkie części łopaty będą miały maksymalną siłę podnoszenia.

Jeżeli będziemy zmniejszać kąt ϕ każdego elementu łopaty przy oddalaniu się od osi obrotu tak, aby najdogodniejszy kąt napływu α był stały, to uzyskamy warunek, przy którym wszystkie elementy łopaty będą pracowały ze swoją maksymalną siłą podnoszenia. Łopata ze zmiennym kątem pochylenia ϕ uzyskuje postać powierzchni śrubowej. Prawidłowe kąty pochylenia łopaty przy jakościowo dobrych własnościach aerodynamicznych profilu, a także szerokości odpowiadającej zadanej szybkości, zapewniają wysoki współczynnik wykorzystania energii wiatru. Dla starannie wykonanych konstrukcji może on wynosić do 45%.

IV. Schemat stanowiska i przebieg ćwiczenia

Na rysunku 9 przedstawiono schemat stanowiska do badania silnika wiatrowego.



Rys. 9. Schemat stanowiska

Przebieg ćwiczenia

1. Dla 3 odległości dyszy od wirnika silnika wiatrowego ($x=20, 40, 60$ cm) wyznaczyć zależność mocy prądnic P_g w funkcji kąta napływu strugi α . Moc prądnic obliczyć ze wzoru

$$P_g = \frac{U^2}{R}$$

gdzie: U - napięcie, V
 R - oporność opornika dekadowego, Ω .

Pomiary dokonywać dla α zmieniającego się w zakresie od 0° do 60° co $7,5^\circ$.

2. Dla $x=60$ cm i α zmieniającego się w zakresie od 0° do 60° co $7,5^\circ$ sporządzić charakterystykę sprawności układu η definiowanej jako

$$\eta = \frac{P_g}{P_p}$$

gdzie P_p jest mocą strugi

$$P_p = \int_0^R \rho v \frac{v^2}{2} dr$$

R jest promieniem wirnika, a v jest prędkością powietrza w odległości r od osi symetrii.