

MARCIN AUGUSTYN, JAN RYŚ*

**KINEMATYKA I MOMENT NAPĘDOWY
TURBINY WIATROWEJ
O PIONOWEJ OSI OBROTU WIRNIKA**

**KINEMATICS AND DRIVING TORQUE OF A WIND
TURBINE WITH ROTOR ROTATION VERTICAL AXIS**

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono przegląd turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu, ze szczególnym uwzględnieniem wirnika karuzelowego silnika wiatrowego z mechanizmem naprowadzania na kierunek wiatru i planetarnym ruchem łopatek. Pokazano budowę i działanie wirnika. Przeanalizowano kinematykę i moment napędowy wirnika turbiny oraz moc jednostkową. Rezultaty obliczeń przedstawiono na rycinach i w tablicach.

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa, główny wirnik, mechanizm naprowadzania, moment napędowy, moc jednostkowa

Abstract

The structure of different solutions of wind turbine has been discussed. This paper presents the method describing the motion of wind rotor with vertical axis, mechanism of locate the direction of the wind and planetary rotation of blades. Under some assumptions the propelling moment and unit power were obtained. The results are presented in figures and tables.

Keywords: wind turbine, main rotor, directing unit, propelling moment, unite power

*Mgr inż. Marcin Augustyn, prof. dr hab. inż. Jan Ryś, Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji Maszyn, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Artykuł dotyczy turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu wirnika i planetarnym ruchu łopat. W celu wyznaczenia mocy turbiny określono składowe prędkości względnej wiatru odnośnie do poruszających się łopat wirnika. Opierając się na wyliczonych wartościach prędkości, wyznaczono moment obrotowy wirnika z dwoma lub trzema łopatomi, co w końcowej fazie pozwala na wyznaczenie mocy jednostkowej łopaty w funkcji prędkości wiatru i prędkości obrotowej wirnika. Zaprezentowano przykład obliczeniowy.

2. Turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu

Wirnik o pionowej osi obrotu opatentowany w 1931 r. przez Georges'a Jeana Marie Darrieusa, obecnie nazywany wirnikiem Darrieusa (ryc. 1), to konstrukcja składająca się z kilku cienkich, półkolistych wygiętych łopat, które obracają się w płaszczyźnie pionowej.



Ryc. 1. Wirnik Darrieusa
Fig. 1. Darrieus rotor

Siłownia tego typu nie wymaga budowy wysokiej wieży z wyposażeniem w systemy orientacji na wiatr, jednak ze względu na praktycznie zerowy moment startowy konieczne jest zastosowanie pomocniczego napędu przeznaczonego do rozruchu silnika wiatrowego [3, 4]. Najczęściej jednak jako wstępny napęd wirnika Darrieusa wykorzystuje się silnik elektryczny.

Innym przykładem może być połączenie z wirnikiem Savoniusa. Jest to wirnik o prostej konstrukcji i dużym momencie startowym (ryc. 2). Z połączenia korzystnych cech konstrukcyjnych i aerodynamicznych obu turbin, przy jednoczesnym wyeliminowaniu cech ujemnych, otrzymano szereg zmodyfikowanych turbin, takich jak [6]:

- Turbina TURBY – o mocy 2,5 kW, opracowana w Holandii z przeznaczeniem do pracy na dachu budynku, z możliwością wykorzystania energii wiatru wiejącego poziomo, jak również pod różnym kątem. Możliwe jest to dzięki ukośnie ustawionym łopatom,
- Turbina H-Darrieusa – opracowana w Austrii, o kształcie litery H, z trzema pionowymi łopatom z mechanizmem odśrodkowym, układem sprężyn umożliwiających samoregulację obrotów przy różnych prędkościach wiatru. Zamocowany na 5,5 m maszcie wirnik o średnicy 1,9 z łopatami o długości 2 m osiąga moc 1,5 kW,
- Turbina Wind Rotor – moc od 0,75 kW do 6 kW, posiada tylko dwie łopaty, szersze niż w turbinie H-Darrieusa, ale węższe niż w turbinie Savoniusa,
- Turbina świdrowa – zwana również śrubową, powstała w Danii, wyróżniają ją stabilna i cicha praca, jak również możliwość pracy w pełnym zakresie prędkości wiatru dzięki śrubowemu skręceniu łopat.

3. Obiekt badań

Alternatywą dla rozwiązań omówionych wcześniej jest wirnik karuzelowego silnika wiatrowego opisany w [1, 2], o pionowej osi obrotu i planetarnym ruchu łopatek wirnika z mechanizmem naprowadzania na kierunek wiatru (ryc. 5). Łopaty wirnika są łożyskowane na pionowych czopach wirnika i sprzężone bezpośrednio z tuleją wspólną z osią obrotu wirnika. Położenie katowe przekładni wyznacza mechanizm naprowadzania na kierunek wiatru, łopaty obracają się z szybkością (prędkością) dwukrotnie mniejszą i w kierunku przeciwnym do obrotów wirnika. Zasada pracy wymaga identyczności kształtu obu powierzchni płatek w pozycji przejmwania parcia wiatru, powierzchnie pracują przemiennie, co drugi obrót wirnika.



Ryc. 2. Turbina powstała z połączenia wirnika Darrieusa i Savoniusa
Fig. 2. Turbine arisen with adherence Darrieus and Savonius rotor

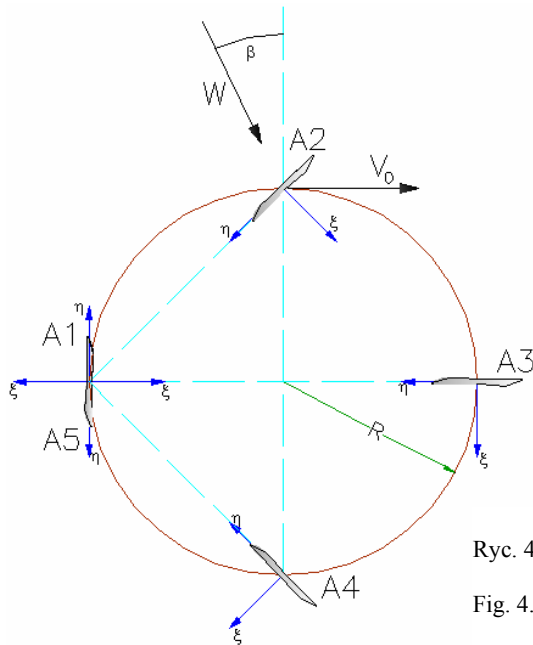


Ryc. 3. Wirnik karuzelowego silnika wiatrowego z mechanizmem naprowadzania na kierunek wiatru
Fig. 3. Wind turbine have main rotor with two blades and directing unit

Na rycinie 4 pokazano, kolejno od punktu A1 do A5, ustawienia łopatek w czasie pracy wirnika wraz z układem współrzędnych (ξ, η) .

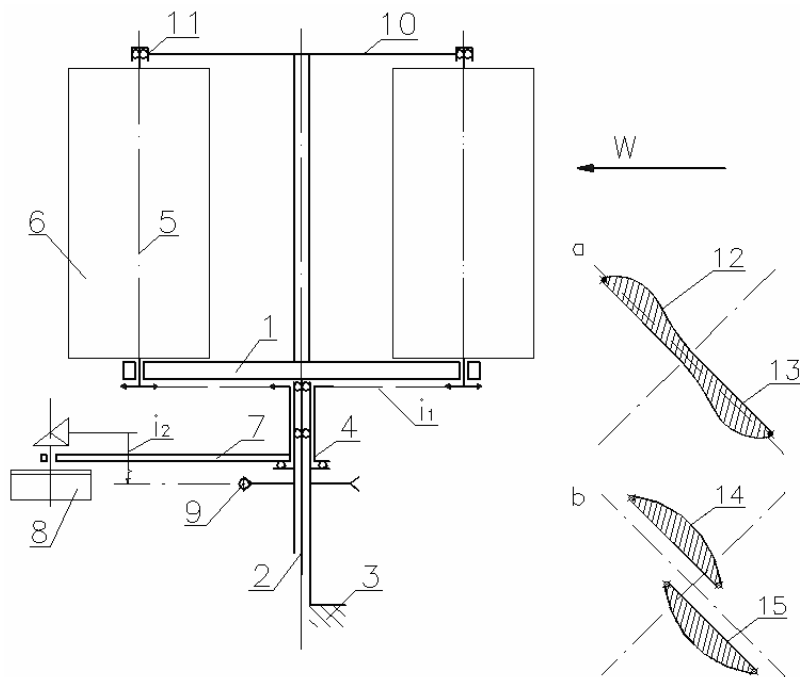
Wirnik karuzelowego silnika wiatrowego z dwoma łopatkami i mechanizmem naprowadzania na kierunek wiatru pokazano na ryc. 3. Siłownia ta została zaprojektowana i zbudowana w Instytucie Konstrukcji Maszyn Politechniki Krakowskiej [1, 2].

Główne parametry turbiny [5] przedstawiono w tabelicy 1. Schemat kinematyczny turbiny zaprezentowano na ryc. 5. Wirnik turbiny składa się z co najmniej dwóch łopatek 6, wirnika 1 połączonego z wałem napędowym 2, obracającego się względem nieruchomej obudowy 3. Na obudowie 3 ułożyskowana jest tuleja 4, połączona kinematycznie z osią



Ryc. 4. Ustawienia łopaty wirnika w czasie pracy turbiny

Fig. 4. A rotor blade position rotates during work



Ryc. 5. Schemat przekroju osiowego wirnika i przekrój poprzeczny łopaty wirnika

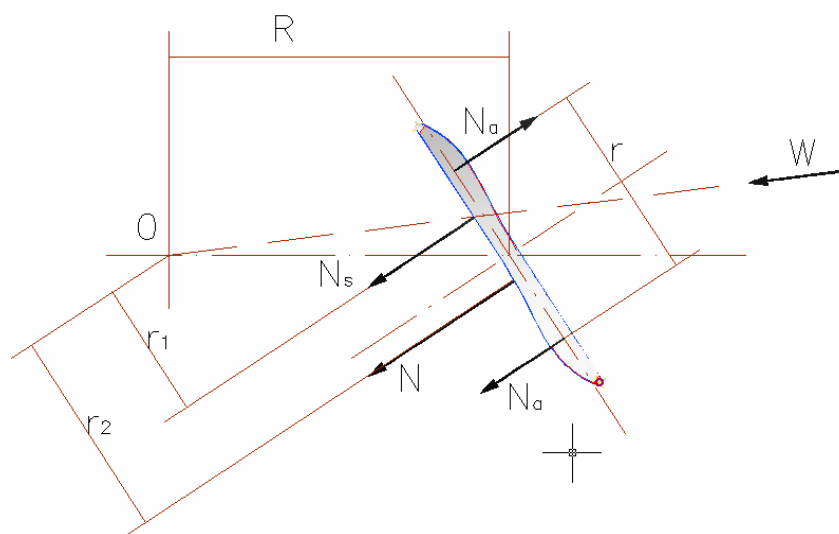
Fig. 5. Scheme is shown longitudinal section of a rotor and intersection of a blade

obrotu 5 płata 6 przekładnią o przełożeniu redukującym $i_1 = 1:2$. Z tuleją 4 sprzężony jest mechanizm naprowadzania na kierunek wiatru 7, realizowany wirnikiem 8. Między wirnikiem 8 a ślimacznica 9 występuje przełożenie i_2 . Wchylenie mechanizmu 7 nadąża za kierunkiem wiatru W , a samohamowna ślimacznica gwarantuje ustalenie pozycji dla określonego kierunku. Możliwe jest zastosowanie automatycznego naprowadzania turbiny na kierunek wiatru bez wirnika 8 z użyciem samohamownej ślimacznicy 9 napędzanej silnikiem elektrycznym. Osie obrotu 5 płatów spięte są kolumną i łącznikiem 10, utrzymującym czopy górne i łożyska 11, w celu przeniesienia sił odśrodkowych.

Tablica 1

**Główne parametry turbiny wiatrowej z dwoma łopatom
i mechanizmem naprowadzania na wiatr**

Moc minimalna	1 kW
Moc maksymalna	6 kW
Wymiary łopaty wirnika	700 × 2000 mm
Średnica kolumny wsporczej	108 mm
Wysokość kolumny wsporczej	3450 mm
Całkowita wysokość turbiny	6000 mm
Wymiary łopat mechanizmu naprowadzającego na kierunek wiatru	350 × 420 mm
Działania turbiny przy prędkości wiatru w zakresie	3–30 m/s
Całkowita masa turbiny	180 kg



Ryc. 6. Efekt aerodynamiczny zwiększający moment napędowy płatów
Fig. 6. Aerodynamic effect increasing propelling moment of blades

Kształt przekroju poprzecznego łopat zaprezentowano na ryc. 5a jako jednopójny lub na ryc. 5b jako dwuspójny, istnieje możliwość kształtu wielospójnego. Dla potrzeb niniejszego artykułu przyjęto do rozważań przekroje poprzeczne łopat jak na ryc. 5a. Przekrój poprzeczny łopaty badanej turbiny wiatrowej ukształtowano tak, aby na jednej połowie

płata 6 była powierzchnia płaska 13, równoległa do powierzchni głównej, a na drugiej połowie wychylała się łukiem wklęsłym na zewnątrz i przechodziła w wypukłą powierzchnię 12. Druga powierzchnia płata 6 ma kształt identyczny, lecz obrócony o 180° . Taki kształt łopaty 6 – przy przepływie strugi powietrza – wywołuje moment obrotowy względem osi obrotu 5 płata 6 zgodny z kierunkiem ruchu obrotowego płatów w ruchu bezwzględny.

Działanie efektu aerodynamicznego na moment napędowy silnika przedstawiono na ryc. 6. Dla płata płaskiego na całej powierzchni siła aerodynamiczna N_s działa na ramieniu r_1 , natomiast dla badanego kształtu płata występuje dodatkowa para sił $N_a \times r$, która powoduje przesunięcie siły wypadkowej N na ramię r_2 – korzystnie względem osi obrotu O wirnika wg ryc. 6. Moment napędowy wynosi $N \times r_2 > N_s \times r_1$, co gwarantuje zwiększenie mocy silnika turbiny.

4. Prędkość wiatru względem łopaty wirnika

Poniżej zaprezentowano wyznaczenie prędkości względnej wiatru dla jednej łopaty turbiny, dla prędkości wiatru W , prędkości wirnika V_0 i kąta natarcia wiatru β . Kąt $\alpha = 0-2\pi$ jest kątem obrotu wirnika.

Zgodnie z ryc. 7 prędkość względną wiatru otrzymamy ze wzoru

$$\vec{V} = \vec{W} - \vec{V}_0 \quad (1)$$

Prędkość wiatru W rozpisujemy na składowe w układzie $x-y$

$$W_x = W \sin \beta \quad (2)$$

$$W_y = W \cos \beta \quad (3)$$

Podobnie dla prędkości wirnika V_0

$$V_{0x} = V_0 \sin \alpha \quad (4)$$

$$V_{0y} = -V_0 \cos \alpha \quad (5)$$

Korzystając z wyżej zapisanych wzorów, składowe prędkości względnej będą równe

$$V_x = W \sin \beta - V_0 \sin \alpha \quad (6)$$

$$V_y = W \cos \beta + V_0 \cos \alpha \quad (7)$$

$$V^2 = W^2 + V_0^2 - 2WV_0 \sin \alpha \sin \beta + 2WV_0 \cos \alpha \cos \beta \quad (8)$$

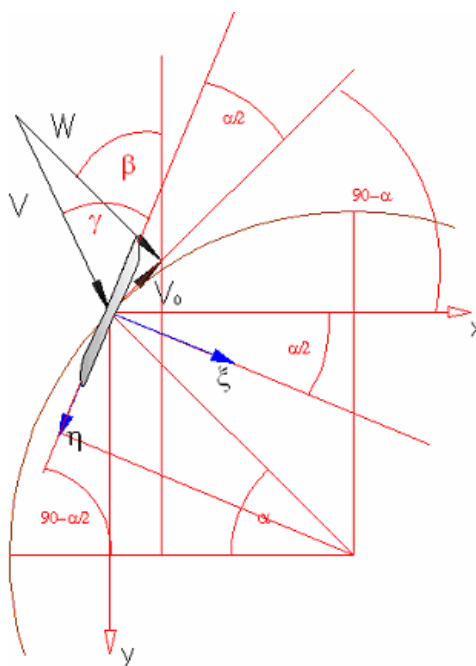
Ostateczny wzór na wartość prędkości względnej wiatru wygląda następująco

$$V = \sqrt{W^2 + V_0^2 - 2WV_0 \cos(\alpha + \beta)} \quad (9)$$

Transformacja składowych prędkości względnej wobec układu ruchomego związanego z łopatą turbiny ξ i η

$$V_\xi = V_x \cos \frac{\alpha}{2} + V_y \sin \frac{\alpha}{2} \quad (10)$$

$$V_{\eta} = -V_x \sin \frac{\alpha}{2} + V_y \cos \frac{\alpha}{2} \quad (11)$$



Ryc. 7. Schemat łopaty wirnika turbiny w ruchu dla kąta α
 Fig. 7. Scheme of blades rotor in motion under angle of a blade α

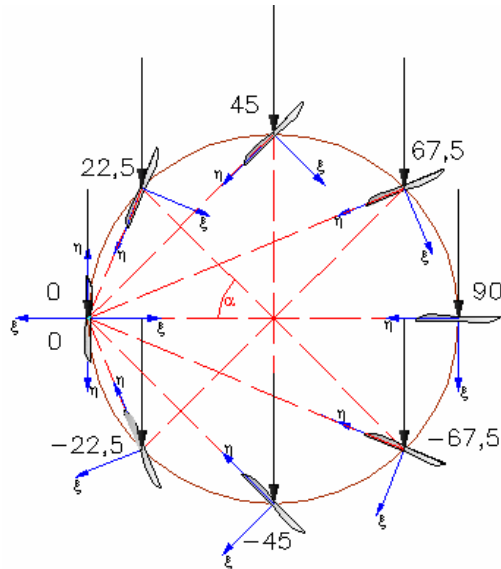
Po podstawieniu wzorów (6) i (7) i wykonaniu uproszczeń otrzymujemy następujące wzory na składowe prędkości względnej V dla układu ruchomego związanego z łopata turbiny ξ i η

$$V_{\xi} = W \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) - V_0 \sin \frac{\alpha}{2} \quad (12)$$

$$V_{\eta} = W \cos \left(\frac{\alpha}{2} + \beta \right) + V_0 \cos \frac{\alpha}{2} \quad (13)$$

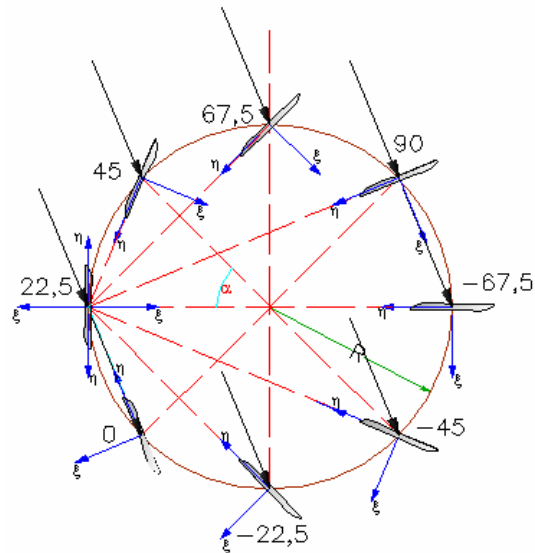
4.1. Przykład obliczenia prędkości względnej dla wybranych wartości prędkości wiatru W , prędkości wirnika V_0 i kąta natarcia wiatru β

Na kolejnych rycinach (ryc. 8–13) przedstawiono graficznie kierunek wektora prędkości wiatru V względem łopaty turbiny w układzie ξ i η dla wybranych pozycji łopat względem wirnika. Kierunek wektora V w układzie ξ i η określa na rycinie cyfra w stopniach.



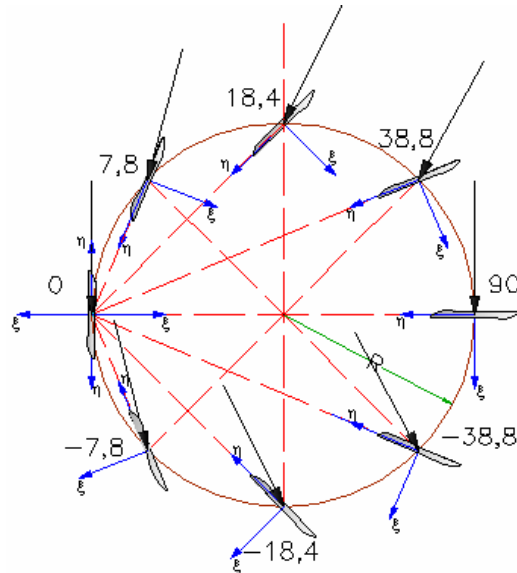
Ryc. 8. Kierunek wiatru V w układzie ξ i η dla poniższych danych
 Fig. 8. Wind direction V in ξ and η system of coordinates for current data:

$$W = 10; \quad V_0 = 0; \quad \beta = 0; \quad \alpha(\alpha_s) = \alpha_s \cdot \frac{\pi}{180}; \quad \alpha_s = 0, 15, \dots, 360$$



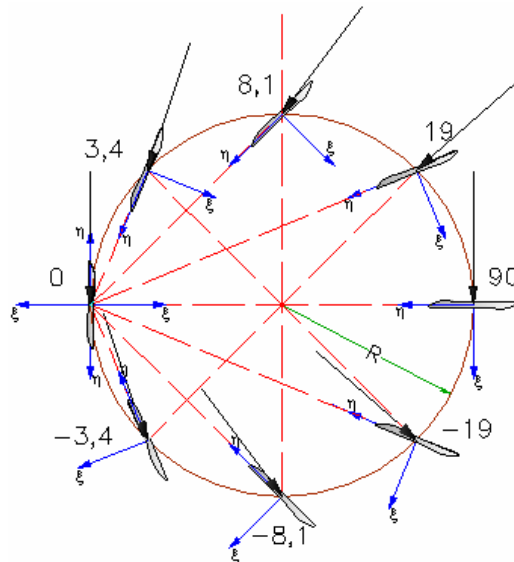
Ryc. 9. Kierunek wiatru V w układzie ξ i η dla poniższych danych
 Fig. 9. Wind direction V in ξ and η system of coordinates for current data:

$$W = 10; \quad V_0 = 0; \quad \beta = \frac{\pi}{8}; \quad \alpha(\alpha_s) = \alpha_s \cdot \frac{\pi}{180}; \quad \alpha_s = 0, 15, \dots, 360$$



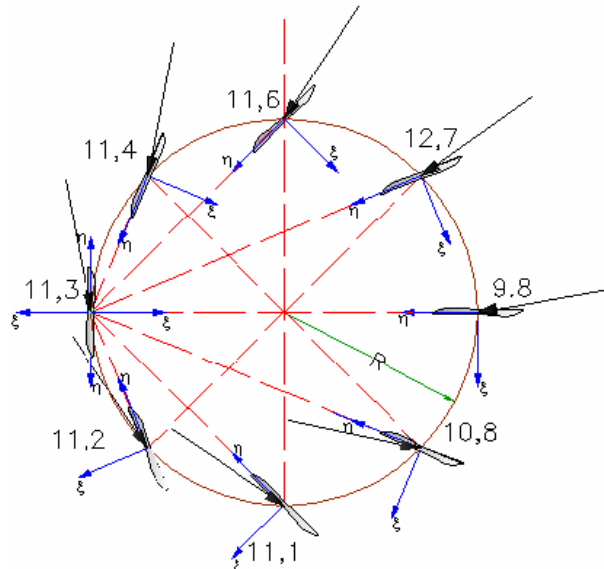
Ryc. 10. Kierunek wiatru V w układzie ξ i η dla poniższych danych
 Fig. 10. Wind direction V in ξ and η system of coordinates for current data:

$$W = 10; \quad V_0 = 5; \quad \beta = 0; \quad \alpha(\alpha_s) = \alpha_s \cdot \frac{\pi}{180}; \quad \alpha_s = 0, 15, \dots, 360$$



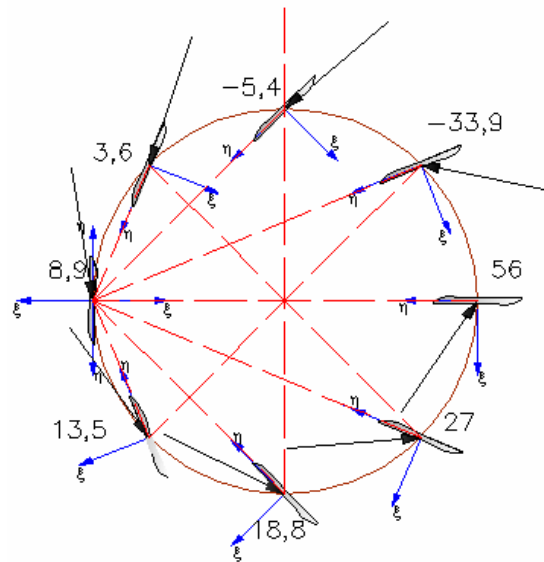
Ryc. 11. Kierunek wiatru V w układzie ξ i η dla poniższych danych
 Fig. 11. Wind direction V in ξ and η system of coordinates for current data:

$$W = 10; \quad V_0 = 7,5; \quad \beta = 0; \quad \alpha(\alpha_s) = \alpha_s \cdot \frac{\pi}{180}; \quad \alpha_s = 0, 15, \dots, 360$$



Ryc. 12. Kierunek wiatru V w układzie ξ i η dla poniższych danych
 Fig. 12. Wind direction V in ξ and η system of coordinates for current data:

$$W = 10; \quad V_0 = 10; \quad \beta = \frac{\pi}{8}; \quad \alpha(\alpha_s) = \alpha_s \cdot \frac{\pi}{180}; \quad \alpha_s = 0, 15, \dots, 360$$



Ryc. 13. Kierunek wiatru V w układzie ξ i η dla poniższych danych
 Fig. 13. Wind direction V in ξ and η system of coordinates for current data:

$$W = 10; \quad V_0 = 15; \quad \beta = \frac{\pi}{8}; \quad \alpha(\alpha_s) = \alpha_s \cdot \frac{\pi}{180}; \quad \alpha_s = 0, 15, \dots, 360$$

5. Moment napędowy turbiny dla jednej łopaty wirnika

Zgodnie z ryciną 14 na łopatę turbiny działają siły: R_ξ , R_η i moment $M_{\eta\xi}$. Moment napędowy wirnika generowany przez jedną łopatę $M_1(\alpha_s)$ będzie sumą momentów opisanych poniżej, gdzie:

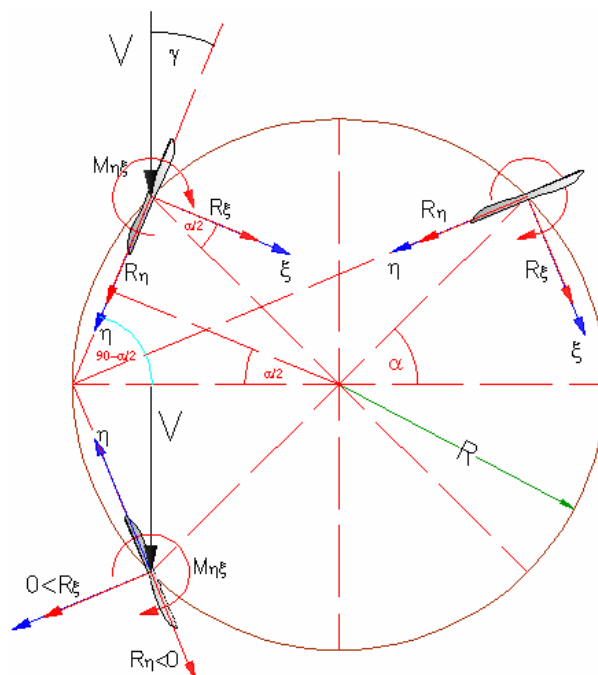
k_ξ ; k_η ; $k_{\eta\xi}$ – współczynniki związane ze składowymi prędkościami wiatru względem łopaty, przyjęte tutaj o stałej wartości, ale ogólnie mogą to być funkcje. W tym zakresie konieczne jest wykonanie badań modelowych w tunelu aerodynamicznym,

$s_{\eta\xi}$ – stosunek powierzchni czołowej do powierzchni bocznej łopaty wirnika.

$$M_{\eta\xi}(\alpha_s) = 0,5 \left(\frac{V_\eta(\alpha_s)}{W} \right)^2 \cdot k_{\eta\xi} \quad (14)$$

$$M_{\xi}(\alpha_s) = \left(\frac{V_\xi(\alpha_s)}{W} \right)^2 \cdot k_\xi \cdot \sin\left(\frac{\alpha(\alpha_s)}{2}\right) \cdot \text{sign}(V_\xi(\alpha_s)) \quad (15)$$

$$M_{\eta}(\alpha_s) = s_{\eta\xi} \left(\frac{V_\eta(\alpha_s)}{W} \right)^2 \cdot k_\eta \cdot \cos\left(\frac{\alpha(\alpha_s)}{2}\right) \cdot \text{sign}\left(\cos\left(\frac{\alpha(\alpha_s)}{2}\right)\right) \quad (16)$$



Ryc. 14. Schemat sił działających na łopatę turbiny dla wybranych położeń względem osi wirnika
Fig. 14. Scheme of forces executing on blades of turbine for chosen location by rotor

Końcowa postać wzoru na moment napędowy dla jednej łopaty

$$M_1(\alpha_s) = M_1(\alpha_s) = (M_{1\eta\xi}(\alpha_s) + M_{1\xi}(\alpha_s)) - M_{1\eta}(\alpha_s) \quad (17)$$

5.1. Moment dla dwóch łopat wirnika rozmieszczonych symetrycznie

Analogicznie dla przypadku, gdy wirnik turbiny posiada dwie symetrycznie rozmieszczone łopaty co 180° , moment napędowy od drugiej łopaty wyniesie $M_2(\alpha_s)$

$$M_{2\eta\xi}(\alpha_s) = 0,5 \left(\frac{V_\eta(\alpha_s + 180)}{W} \right)^2 \cdot k_{\eta\xi} \quad (18)$$

$$M_{2\xi}(\alpha_s) = \left(\frac{V_\xi(\alpha_s + 180)}{W} \right)^2 \cdot k_\xi \cdot \sin\left(\frac{\alpha(\alpha_s + 180)}{2}\right) \cdot \text{sign}(V_\xi(\alpha_s + 180)) \quad (19)$$

$$M_{2\eta}(\alpha_s) = s_{\eta\xi} \left(\frac{V_\eta(\alpha_s + 180)}{W} \right)^2 \cdot k_\eta \cdot \cos\left(\frac{\alpha(\alpha_s + 180)}{2}\right) \cdot \text{sign}\left(\cos\left(\frac{\alpha(\alpha_s + 180)}{2}\right)\right) \quad (20)$$

Korzystając z powyższych równań (18), (19) i (20), otrzymujemy moment napędowy od drugiej łopaty $M_2(\alpha_s)$

$$M_2(\alpha_s) = (M_{2\eta\xi}(\alpha_s) + M_{2\xi}(\alpha_s)) - M_{2\eta}(\alpha_s) \quad (21)$$

Wypadkowy moment dla turbiny z dwoma łopatami wyniesie

$$M_2(\alpha_s) = M_1(\alpha_s) + M_2(\alpha_s) \quad (22)$$

5.2. Moment dla trzech łopat wirnika rozmieszczonych symetrycznie

W analogiczny sposób wyznacza się moment napędowy dla łopat turbiny przesuniętych o kąt 120° i 240° $M_{23}(\alpha_s)$; $M_{33}(\alpha_s)$

$$M_{2\eta\xi}(\alpha_s) = 0,5 \left(\frac{V_\eta(\alpha_s + 120)}{W} \right)^2 \cdot k_{\eta\xi} \quad (23)$$

$$M_{2\xi}(\alpha_s) = \left(\frac{V_\xi(\alpha_s + 120)}{W} \right)^2 \cdot k_\xi \cdot \sin\left(\frac{\alpha(\alpha_s + 120)}{2}\right) \cdot \text{sign}(V_\xi(\alpha_s + 120)) \quad (24)$$

$$M_{2\eta}(\alpha_s) = s_{\eta\xi} \left(\frac{V_\eta(\alpha_s + 120)}{W} \right)^2 \cdot k_\eta \cdot \cos\left(\frac{\alpha(\alpha_s + 120)}{2}\right) \cdot \text{sign}\left(\cos\left(\frac{\alpha(\alpha_s + 120)}{2}\right)\right) \quad (25)$$

Moment napędowy od drugiej łopaty turbiny, przesuniętej o kąt 120° , przyjmuje postać

$$M_{23}(\alpha_s) = (M_{2\eta\xi}(\alpha_s) + M_{2\xi}(\alpha_s)) - M_{2\eta}(\alpha_s) \quad (26)$$

Moment napędowy od trzeciej łopaty turbiny, przesuniętej o kąt 240° , otrzymujemy z następujących wzorów

$$M_{3\eta\xi}(\alpha_s) = 0,5 \left(\frac{V_\eta(\alpha_s + 240)}{W} \right)^2 \cdot k_{\eta\xi} \quad (27)$$

$$M_{3\xi}(\alpha_s) = \left(\frac{V_\xi(\alpha_s + 240)}{W} \right)^2 \cdot k_\xi \cdot \sin\left(\frac{\alpha(\alpha_s + 240)}{2}\right) \cdot \text{sign}(V_\xi(\alpha_s + 240)) \quad (28)$$

$$M_{3\eta}(\alpha_s) = s_{\eta\xi} \left(\frac{V_\eta(\alpha_s + 240)}{W} \right)^2 \cdot k_\eta \cdot \cos\left(\frac{\alpha(\alpha_s + 240)}{2}\right) \cdot \text{sign}\left(\cos\left(\frac{\alpha(\alpha_s + 240)}{2}\right)\right) \quad (29)$$

Zatem ostateczny wzór na moment napędowy od trzeciej łopaty turbiny to

$$M_{33}(\alpha_s) = (M_{3\eta\xi}(\alpha_s) + M_{3\xi}(\alpha_s)) - M_{3\eta}(\alpha_s) \quad (30)$$

Wypadkowy moment dla turbiny z trzema łopatami ma postać

$$M_3(\alpha_s) = M_1(\alpha_s) + M_{23}(\alpha_s) + M_{33}(\alpha_s) \quad (31)$$

6. Przykładowe obliczenia momentu i mocy dla turbiny o pionowej osi obrotu

6.1. Przykład obliczenia momentu dla turbiny o dwóch łopatach

Przyjęto wartości prędkości wiatru W , prędkości wirnika V_0 , kąta natarcia wiatru β , współczynników aerodynamicznych k_ξ , k_η , $k_{\eta\xi}$ i współczynnika wypełnienia $s_{\eta\xi}$

$$W = 10; \quad V_0 = 18; \quad \beta = 0; \quad \alpha(\alpha_s) = \alpha_s \cdot \frac{\pi}{180}; \quad \alpha_s = 0,15, \dots, 360$$

$$k_\xi = 0,5; \quad k_\eta = 0,3; \quad k_{\eta\xi} = 0,2; \quad s_{\eta\xi} = 0,1$$

oraz gęstości powietrza ρ i promienia zawartego między osią obrotu wirnika a osią obrotu łopaty R

$$\rho = 1,2; \quad R = 1,5$$

Korzystając z powyższych danych, wyliczono moment M_2 w [Nm] i moc N_2 w [W] na 1 m² łopaty turbiny.

Tablica 2

Otrzymane wartości momentu M_2 i moc N_2 turbiny

$I_2 = \frac{\left(\int_0^{360} M(\alpha_s) d\alpha_s \right)}{360}$	$M_2 = I_2 \cdot \rho \cdot R \cdot W^2$	$N_2 = M_2 \cdot \frac{V_0}{R}$
$I_2 = 0,312732$	$M_2 = 56,291689$	$N_2 = 675,500263$

Poniżej zapisano wartości momentu M_{2j} i mocy N_{2j} w zależności od prędkości wirnika V_{0j} dla $j = 1, 2, \dots, 7$

$$V_{0j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 6 \\ 9 \\ 12 \\ 15 \\ 18 \end{pmatrix} \quad M_{2j} = \begin{pmatrix} 89,81 \\ 60,10 \\ 46,56 \\ 49,20 \\ 61,88 \\ 64,75 \\ 56,29 \end{pmatrix} \quad N_{2j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 122,2 \\ 186,3 \\ 259,2 \\ 495,0 \\ 647,5 \\ 675,5 \end{pmatrix}$$

6.2. Przykład obliczenia momentu dla turbiny o trzech łopatach

W analogiczny sposób obliczono moment i moc turbiny o trzech łopatach wg przykładu 5.1. Przyjęto następujące dane

$$W = 10; \quad V_0 = 18; \quad \beta = 0; \quad \alpha(\alpha_s) = \alpha_s \cdot \frac{\pi}{180}; \quad \alpha_s = 0,15, \dots, 360$$

$$k_\xi = 0,5; \quad k_\eta = 0,3; \quad k_{\eta\xi} = 0,2; \quad s_{\eta\xi} = 0,1$$

$$\rho = 1,2; \quad R = 1,5$$

Korzystając z powyższych danych, wyliczono moment M_2 w [Nm] i moc N_2 w [W] na 1 m^2 łopaty turbiny.

Tablica 3

Otrzymane wartości momentu M_3 i moc N_3 turbiny

$I_3 = \frac{\left(\int_0^{360} M(\alpha_s) d\alpha_s \right)}{360}$	$M_3 = I_3 \cdot \rho \cdot R \cdot W^2$	$N_3 = M_{32} \cdot \frac{V_0}{R}$
$I_3 = 0,469097$	$M_3 = 84,437534$	$N_3 = 1,01325 \times 10^3$

Wartości momentu M_{3j} i mocy N_{3j} w zależności od prędkości wirnika V_{0j} dla $j = 1, 2, \dots, 7$

$$V_{0j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \\ 6 \\ 9 \\ 12 \\ 15 \\ 18 \end{pmatrix} \quad M_{3j} = \begin{pmatrix} 134,7 \\ 90,16 \\ 69,85 \\ 73,79 \\ 92,82 \\ 97,13 \\ 84,83 \end{pmatrix} \quad N_{3j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 180,3 \\ 279,4 \\ 442,7 \\ 742,5 \\ 971,3 \\ 1013 \end{pmatrix}$$

7. Podsumowanie

Głównym celem artykułu było zbudowanie procedury, dla tego typu turbiny, na obliczenie przewidywanego momentu napędowego i mocy na jednostkę powierzchni łopaty dla wirnika z dwoma lub trzema łopatom. Obliczenia i przykłady liczbowe przedstawione w artykule wymagają uściślenia ze względu na przyjęte założenia oraz badania eksperymentalne dla optymalizacji kształtu łopat. Autorzy przypuszczają, że najbardziej obiecujący jest kształt dwuspójny wg ryc. 5b ze względu na wytrzymałość i sztywność w rozwiązaniu konstrukcyjnym, a przestrzeń w środkowej strefie łopaty może znacznie zwiększyć moment aerodynamiczny $M_{\eta\xi}$.

Literatura

- [1] Ryś J., Projekt wynalazczy zarejestrowany pod numerem P-298964, *Zespół samonaprowadzania głowicy silnika wiatrowego na kierunek wiatru*, 1993.
- [2] Ryś J., Projekt wynalazczy zarejestrowany pod numerem P-302549, *Wirnik karuzelowego silnika wiatrowego*, 1997.
- [3] Walker J.F., Nicholas J., *Wind Energy Technology*, Unesco Energy Engineering Series, Chichester 1997.
- [4] Dovgy S., Kayan V., Kochin V., *Experimental researches of characteristics of wind rotor models with vertical axis of rotation*, Wind Energy, Springer Verlag, Berlin 2006, 183-186.
- [5] Ryś J., *New type of wind turbine with composite rotor blade*, Wind energy applications, Pwc.
- [6] Lewandowski W.M., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.