

*Discrete wind turbine model for energy system modeling***Dyskretny model turbiny wiatrowej na potrzeby modelowania systemu energetycznego**

DOI: 10.15199/62.2024.12.22

A discrete wind turbine model was developed and implemented in the Modelica language in the OpenModelica environment. The developed model was verified by comparison with profile characteristics generated using Qblade software and verified on the basis of exptl. data for RISØ wind turbines. The choice of a universal modeling language allows the use of the developed model in many com. computing environments.

Keywords: energy system, wind turbine, modeling, Modelica, OpenModelica

W związku z upowszechnieniem się farm wiatrowych pojawia się potrzeba budowy modeli złożonych systemów energetycznych. Modele dające dokładniejsze wyniki wymagają wzięcia pod uwagę większej liczby czynników wejściowych. W modelu systemu energetycznego turbin wiatrowych jako źródeł energii wymagane jest uwzględnienie zmienności wiatru. Zatem aby możliwe było budowanie lepszych modeli systemów energetycznych, konieczne jest opracowanie dyskretnego modelu turbiny wiatrowej. W pracy podjęto się opracowania takiego modelu i zaimplementowania go w języku Modelica w środowisku OpenModelica. Wybór uniwersalnego języka modelowania pozwala na wykorzystanie opracowanego modelu w wielu komercyjnych środowiskach obliczeniowych.

Słowa kluczowe: system energetyczny, turbina wiatrowa, modelowanie, Modelica, OpenModelica

Według danych zaczerpniętych z Głównego Urzędu Statystycznego w 2021 r. udział energii ze źródeł odnawialnych w Polsce stanowił 21,3%, z czego ponad połowa pochodziła z farm wiatrowych. Średnia prędkość wiatru w Polsce wynosi ok. 3,6 m/s, natomiast minimalna prędkość wiatru wymagana do uruchomienia elektrowni wiatrowej to ok. 4 m/s. W związku z tym tylko na pewnych obszarach kraju zasadne jest budowanie farm wiatrowych. Szacuje się, że obecnie jest to ok. 60% całkowitej powierzchni kraju. Jest to też zależne od zmienności prędkości wiatru w zależności od pory roku. Tereny nadające się pod takie inwestycje są już w znacznej mierze zagospodarowane. W związku z tym większość inwestycji w tego typu obiekty sprowadza się do modernizacji obiektów już istniejących^{1,2}.

W energetyce wiatrowej przenikają się różne dziedziny działalności inżynierskiej, od inżynierii wiatrowej, poprzez inżynierię mechaniczną, elektryczną, sterowania, aż po inżynierię systemową. W związku z tym na rynku można znaleźć różne narzędzia informatyczne służące do wyznaczania właściwości poszczególnych podsystemów turbin wiatrowych. Najczęściej spotykane są rozwiązania komercyjne, takie jak HAWC2, Adams, 3Dfloat i CRAFTS³). Gotowe moduły dotyczące zagadnień aerodynamicznych można również znaleźć w pakiecie Simulink środowiska Matlab⁴). Na rynku dostępne jest też oprogramowanie Qblade służące do wykreślania charakterystyk wirnika, obciążeń łopat oraz do oceny hałasu, które w pierwszej wersji było darmowe, natomiast obecnie jest oprogramowaniem komercyjnym.



Dr hab. inż. Ireneusz CZAJKA, prof. AGH (ORCID: 0000-0003-0013-8467), w roku 1997 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. W 2009 r. uzyskał stopień doktora, a w 2020 r. stopień doktora habilitowanego na tym samym wydziale. Obecnie pracuje na stanowisku profesora uczelni w Katedrze Systemów Energetycznych i Urzędzeń Ochrony Środowiska AGH w Krakowie. Specjalność – numeryczne modelowanie złożonych procesów, z uwzględnieniem sprzężeń między różnymi zjawiskami fizycznymi.



Dr inż. Katarzyna SUDER-DĘBSKA (ORCID: 0000-0003-1945-6799) w roku 2006 ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. W 2011 r. uzyskała stopień doktora na tym samym wydziale. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Systemów Energetycznych i Urzędzeń Ochrony Środowiska AGH w Krakowie. Specjalność – numeryczne modelowanie zjawisk akustyczno-przepływowych.

*** Adres do korespondencji:**

Katedra Systemów Energetycznych i Urzędzeń Ochrony Środowiska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (12) 617-36-67, e-mail: iczajka@agh.edu.pl

W środowisku Modelica można znaleźć komercyjne pakiety organizacji Claytex oraz Modelon służące do modelowania systemów energetycznych. W środowiskach OpenModelica i Python również można znaleźć moduły, które wykorzystując istniejące krzywe mocy urządzeń, pozwalają na symulację ich pracy w układzie⁵⁻⁷).

Prędkość wiatru jest zmienna, co powoduje, że turbiny wiatrowe są narażone na zmienne siły dynamiczne, w efekcie czego wpływa to zarówno na ich żywotność, jak i na współpracę z siecią energetyczną. Jest to jeden z czynników, które muszą być uwzględniane podczas modelowania farm wiatrowych. Posiadanie wysokiej klasy modelu złożonego systemu energetycznego jest zatem pożądane zarówno w sytuacji projektowania nowych farm wiatrowych, jak i modernizacji już istniejących. Stąd też prace nad rozwinięciem modeli są ze wszech miar zasadne.

W pracy podjęto się opracowania dyskretnego modelu turbiny wiatrowej i zaimplementowania go w języku Modelica w środowisku OpenModelica, co czyni go uniwersalnym narzędziem, które może być wykorzystywane również w wielu komercyjnych środowiskach obliczeniowych. Model matematyczny turbiny wiatrowej, który ma pozwalać na analizę działania łopat turbiny, sił działających na nie i sprawności, z założenia jest modelem dynamicznym o parametrach skupionych.

Część obliczeniowa

Obiekt badań

Analizowanym obiektem była turbina wiatrowa o poziomej osi obrotu oraz regulowanym kącie nastawienia łopat i głowicy, czyli najczęściej stosowany typ turbiny. Wirnik turbiny składa się z trzech łopat połączonych piastą, która jest osadzona na wale obrotowym. Jego standardowa prędkość zawiera się w przedziale 15–30 rpm. Zastosowanie układu regulacji kąta nastawienia łopat umożliwia obrót łopat wokół własnej osi. Pozwala to na regulację sił osiowych i obwodowych na łopatach, a w efekcie momentu oraz prędkości na wale obrotowym. Kąt nastawienia łopat jest tak dobierany, aby utrzymywać stałą prędkość obrotową wirnika (w przypadku generatorów pracujących ze stałą prędkością obrotową) albo aby zapewnić minimum potrzebnej mocy (w przypadku generatorów zmiennooobrotowych). Dzięki temu po przekroczeniu maksymalnej prędkości dopuszczalnej wiatru łopaty turbiny mogą być

wykorzystywane jako hamulce aerodynamiczne. System ten zwiększa liczbę części ruchomych turbiny wiatrowej w stosunku do prostszych rozwiązań, co niestety zwiększa koszty eksploatacji oraz podatność na awarie.

Wirnik połączony jest z układem napędowym, w skład którego wchodzi: wał wolnoobrotowy, wał szybkoobrotowy, przekładnia mechaniczna i hamulec. Gondola pełni funkcję konstrukcji nośnej dla układów napędowego i elektrycznego oraz służy do pozycjonowania osi wirnika.

Głównym elementem podzespołu elektrycznego jest generator. Może on być typu synchronicznego lub asynchronicznego. W maszynach synchronicznych prędkość obrotowa wirnika odpowiada prędkości wirowania pola magnetycznego bezpośrednio związanego z częstotliwością prądu elektrycznego w sieci. W maszynach asynchronicznych wirnik nie wymaga zewnętrznego zasilania, a prędkość obrotowa wału nie zależy bezpośrednio od częstotliwości sieci.

Ze względu na fakt, że parametry wiatru są zmienne, konieczne jest stosowanie układów sterowania. W elektrowniach wiatrowych dużej mocy można wyróżnić następujące układy sterowania: (i) kąt natarcia łopat, (ii) ustawienia gondoli względem kierunku wiatru, (iii) dodatkowe obciążenie generatora, (iv) prąd wzbudzenia i (v) moment hamowania wału przez hamulec tarczowy. Wprowadzenie tego typu elementów powoduje zwiększenie złożoności elektrowni wiatrowej, z czym wiąże się wzrost kosztów eksploatacji oraz ryzyka wystąpienia awarii¹).

Założenia i budowa modelu numerycznego

Aby móc opracować model numeryczny turbiny wiatrowej, należy wykonać model łopaty oraz model wirnika. Jako narzędzie wybrano środowisko OpenModelica, ze względu na jego wysoką uniwersalność oraz otwartość źródła, co pozwoliło na utworzenie modelu wirnika turbiny wiatrowej kompatybilnego z innymi elementami podstawowej biblioteki środowiska obliczeniowego, a w szczególności z pakietem MultiBody.

Prędkość wiatru w ogólności wzrasta (praktycznie od zera) wraz ze wzrostem wysokości nad powierzchnią ziemi. Do opisu tej zależności można wykorzystać np. wzór Hellmana (1), bazujący na takich parametrach, jak wysokość, prędkość odniesienia oraz szorstkość terenu⁸):

$$v/v_{ref} = (h/h_{ref})^{\alpha_H} \quad (1)$$

w którym h oznacza wysokość, m, v prędkość wiatru, m/s, na wysokości h , v_{ref} prędkość odniesienia, h_{ref} wysokość odniesienia, $\alpha_H = 1/\ln(h/z_0)$ wykładnik Hellmana wyznaczony doświadczalnie i zależny od wysokości oraz szorstkości terenu.

Najmniejsze wartości szorstkości terenu osiąga dla powierzchni wód, najwyższe natomiast dla terenów miejskich^{1, 8}). Różnica prędkości dla końcówek łopat może wynosić nawet kilka metrów na sekundę, w zależności od średnicy oraz wysokości umiejscowienia osi wirnika^{1, 2}).



Mgr inż. Grzegorz CZAJA ukończył studia II stopnia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Zajmuje się modelowaniem układów mechanicznych. Specjalność – informatyka w inżynierii mechanicznej.

Ilość właściwej energii kinetycznej wiatru N_j jest określana za pomocą gęstości mocy strumienia powietrza, która jest stosunkiem pochodnej energii kinetycznej masy gazu przepływającej przez przekrój kontrolny do pola powierzchni tego przekroju, przy założeniu stałej prędkości powietrza^{1,2)}:

$$N_j = 1/2 \rho v_{ref}^3 (h/h_{ref})^{3\alpha_H} \quad (2)$$

W związku z tym energia wiatru będzie maleć wraz z wysokością nad powierzchnią terenu, a rosnać wraz z prędkością odniesienia^{1,2)}.

Jako model łopaty wybrano model Glauerta wraz z poprawkami Prandtla i Spera. Model Glauerta należy do metod elementu łopaty, uzależniających parametry pracy turbiny od kształtu jej wirnika. W metodach tych pojedynczą łopatę dyskretyzuje się na małe płyty, z których każdy ma własny profil aerodynamiczny, rozmiar oraz zorientowanie w przestrzeni. W podstawowej wersji metody zakłada się, że charakterystyka pojedynczego płata odpowiada charakterystyce dwuwymiarowej jego profilu. W modelu Glauerta uwzględniana jest bezwymiarowa prędkość indukowana (osiowa) a zależna od prędkości przed i za wirnikiem oraz bezwymiarowa składowa obwodowa prędkości indukowanej b . Wpływa to na zmianę wynikowego wektora prędkości strumienia powietrza napływającego na poruszający się płat i pozwala w ten sposób uwzględnić straty pędu wiatru, co przyczynia się do obniżenia wynikowej mocy siłowni wiatrowej.

Wirnik o skończonej liczbie łopat generuje wiry swobodne, które powiązane są z siłami aerodynamicznymi. Dla słabo obciążonego wirnika ślad wirowy zawiera się w półpłaszczyznach śrubowych rozciągających się za turbiną wiatrową. Dla takiego przypadku Prandtl wprowadził poprawkę uwzględniającą opory indukowane. Poprawka ta wprowadza współczynnik strat wierzchołkowych, który koryguje wartość reakcji aerodynamicznej poszczególnych sekcji, co powoduje zmiany w wartościach współczynników prędkości indukowanej w modelu Glauerta^{1,9)}. Dla wysoko obciążonego wirnika pojawia się turbulentny ślad przepływu za turbiną, wskutek czego wiry swobodne tracą swą indywidualność oraz występuje napływ masy spoza wyznaczonej powierzchni kontrolnej do jej wnętrza. Do obliczeń wprowadza się w takiej sytuacji współczynnik Spera korygujący wartość współczynnika siły oporu¹⁰⁾.

Turbiny wiatrowe mają kilka stopni swobody. Łańcuch kinematyczny rozpoczyna się w piąście wirnika umocowanej na wale wolnoobrotowym, a kończy na sekcjach poszczególnych łopat. W związku z tym na rys. 1 przedstawiono przyjęte w modelu układy współrzędnych.

Gcs to globalny układ współrzędnych. Układ współrzędnych związany z piastą oznaczono symbolem Hcs . Oś x pokrywa się z osią wału wolnoobrotowego. Układ współrzędnych Bcs związany jest z łopatom, wokół jego osi z może obracać się łopata, a przekroje sekcji łopaty są prostopadłe do tej osi. Oś x może pokrywać się z osią wału, ale jeżeli nie zachodzi taka sytuacja, to jej przesunięcie

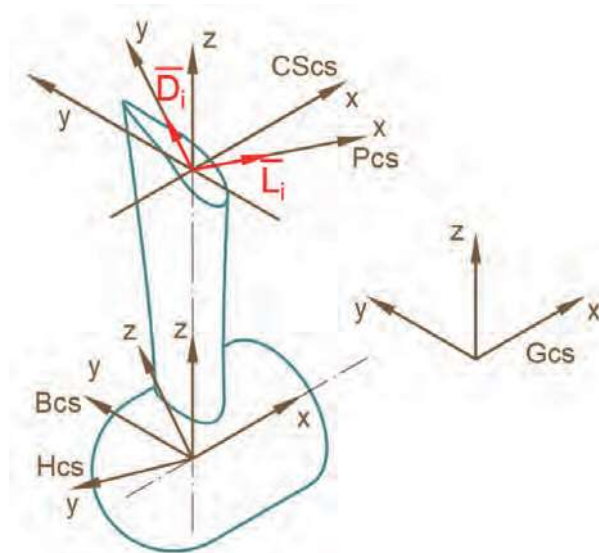


Fig. 1. Coordinate systems adopted in the model

Rys. 1. Układy współrzędnych przyjęte w modelu

pozwała na zdefiniowanie wielkości odchylenia łopat od podstawowej płaszczyzny wirnika, z reguły w kierunku strony nawietrznej. Układ współrzędnych $CScs$ odnosi się do płaszczyzny przekroju profilu aerodynamicznego danej sekcji płata. Jest on generowany poprzez translację wzdłuż osi z układu współrzędnych Bcs . W układzie Pcs wyznaczone są siły aerodynamiczne, siła nośna wzdłuż osi x oraz siła oporu wzdłuż osi y . Układy współrzędnych Hcs oraz Bcs są uwzględniane w komponentach typu Frame i mają dwa główne atrybuty: r_0 , czyli promień wodzący wyznaczony względem układu Gcs i R , czyli macierz rotacji układu współrzędnych względem układu Gcs .

Schemat struktury modelu wirnika opracowanego w środowisku OpenModelica, składającego się z komponentu głównego Rotor oraz komponentu pomocniczego WindSource przedstawiono na rys. 2.

Komponent wirnika Rotor zawiera obiekty typu Blade, które dzielą się na dwie główne części odpowiadające za mechanikę bryły sztywnej oraz aerodynamikę łopaty. Część aerodynamiczna klasy Blade zawiera tablice elementów typu BladeSection. Każdy z nich zawiera komponent InflowWind odpowiadający za informacje dotyczące parametrów wiatru w położeniu danej sekcji łopaty. Wewnątrz niego znajduje się element WindSource, dzięki czemu możliwe jest utworzenie modeli kilku wirników pracujących w takich samych warunkach jednocześnie, jak również grupowanie ich ze względu na różne parametry wiatru. Komponent BladeProperties służy jako interfejs między wczytywanymi danymi a modelami łopat Blade. Wejście ControlInput służy do przekazywania wartości kąta globalnego nastawienia łopat, a wyjście OutputWind do zwracania wartości średniej prędkości wiatru tuż za wirnikiem.

Głównym zadaniem komponentu BladeSelection jest wyznaczenie sił aerodynamicznych działających na łopa-

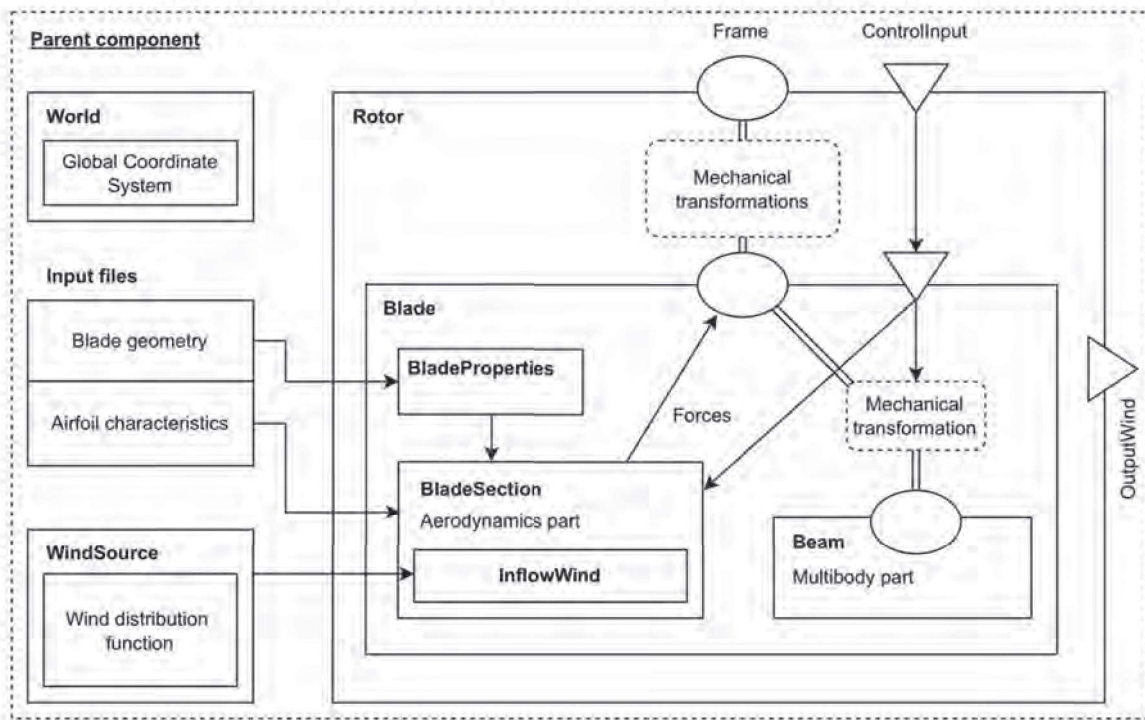


Fig. 2. Rotor model structure diagram

Rys. 2. Schemat struktury modelu wirnika

tę, na podstawie pola prędkości napływającego wiatru, prędkości sekcji łopaty oraz parametrów geometrycznych i charakterystyki odpowiadających danym profilom aerodynamicznym. Pole prędkości wiatru jest definiowane poprzez zewnętrzny komponent WindSource, który wykorzystuje funkcję składową WindDistribution, a jej obsługą zajmuje się blok InflowWind. Funkcja WindDistribution zwraca wektor prędkości wiatru wyrażony w Gcs . Za pomocą funkcji Frames.resolve2 jest on następnie transformowany do układu $CScs$ i w ten sposób otrzymuje się prędkość napływu wiatru local_wind_inflow. Prędkość unoszenia danej sekcji łopaty otrzymuje się w efekcie sumowania prędkości liniowej z układu Bcs oraz iloczynu wektorowego prędkości obrotowej tego układu w Gcs i promienia wodzącego do $CScs$ względem Bcs . Po przetransformowaniu do układu $CScs$ otrzymuje się prędkość unoszenia local_section_velocity. Zsumowanie prędkości local_wind_inflow i ujemnej local_section_velocity daje wypadkową prędkość wiatru padającego na sekcję łopaty relative_inflow_wind. Do wyznaczenia wartości współczynników siły nośnej lift_coefficient oraz siły oporu drag_coefficient wykorzystywane są obiekty klasy CombiTable2Ds. Różnicę prędkości wiatru przed i za wycinkiem płata wyznaczono na podstawie modelu Glauerta i jest to delta_velocity.

Diagram komponentu Blade przedstawiono na rys. 3. Wejście modelu blade_pitch dostarcza informacji na temat aktualnego globalnego kąta nastawienia łopaty. Komponent bladeProperties jest interfejsem pomiędzy plikami tekstowymi przechowującymi dane na temat kształtu łopaty i jej charakterystyk geometrycznych a komponentami środowiska OpenModelica.

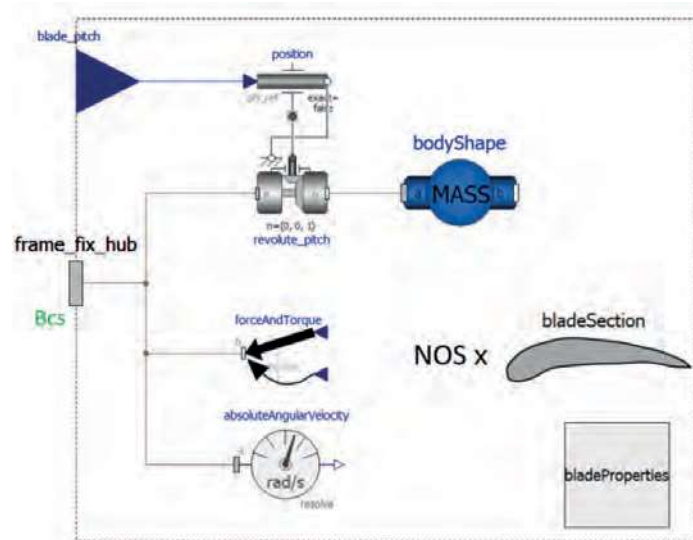


Fig. 3. Blade model diagram

Rys. 3. Diagram modelu łopaty

Klasa Rotor odpowiada za pozycjonowanie łopat w przestrzeni. Komponent ten przekazuje informacje elementom Blade odnośnie do sterowania ControllInput oraz wyznacza wartość wyjścia global_wind_outflow_velocity, która jest średnią prędkością wiatru za wirnikiem. Diagram modelu wirnika przedstawiono na rys. 4.

Ocena poprawności opracowanego modelu numerycznego

W celu oceny poprawności opracowanego modelu numerycznego turbiny wiatrowej opracowano wirtualne stanowisko testowe, które przedstawiono na rys. 5 oraz

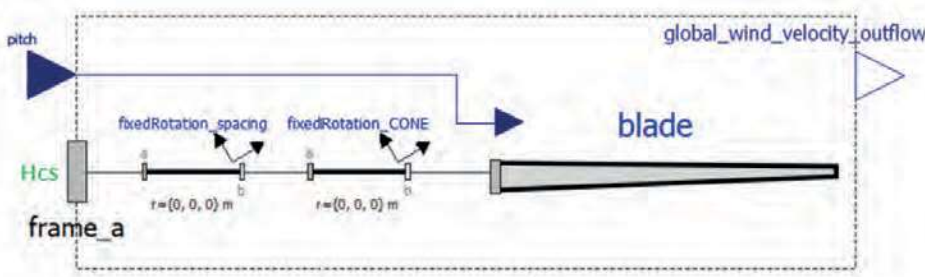


Fig. 4. Rotor model diagram
Rys. 4. Diagram modelu wirnika

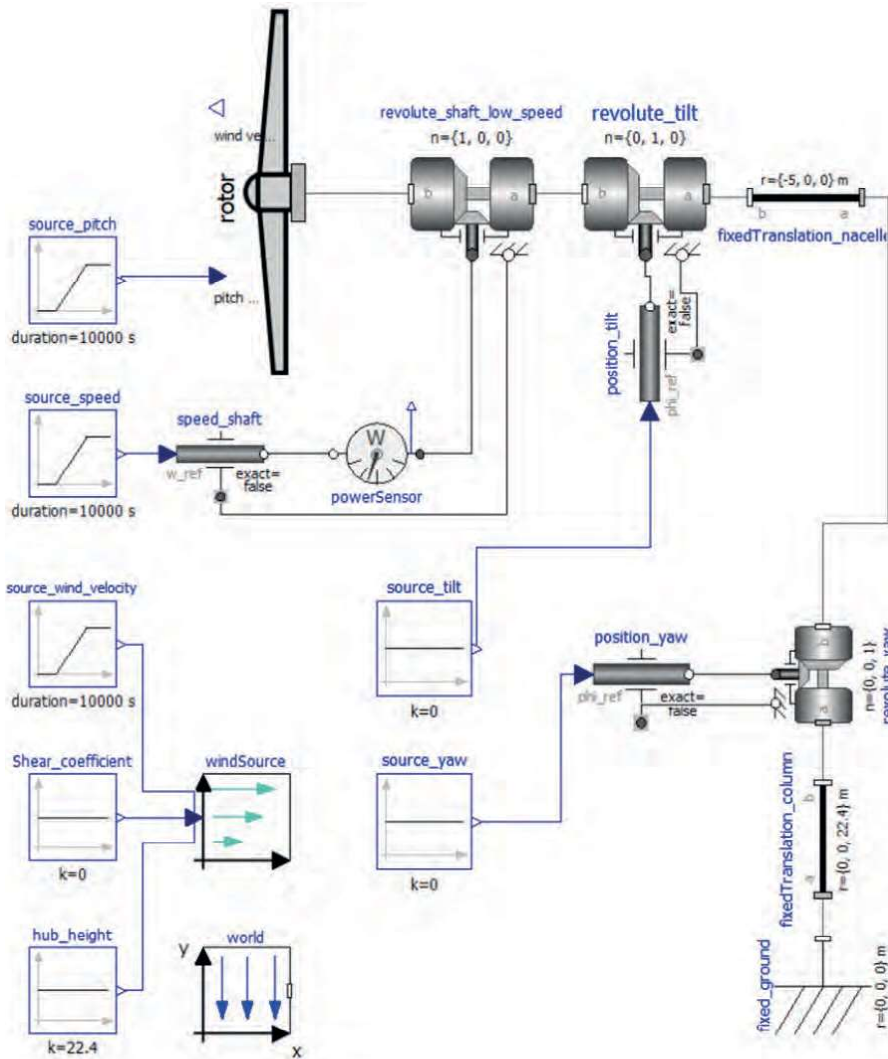


Fig. 5. Virtual test stand diagram
Rys. 5. Diagram wirtualnego stanowiska testowego

Table 1. Geometric parameters of subsequent blade sections
Tabela 1. Parametry geometryczne kolejnych przekrojów łopaty

Odległość od osi, m	Długość cięciwy, m	Zwichrowanie łopaty, °
1,0	0,90	18,0
10,0	0,45	0,0

wykorzystano dla porównania oprogramowanie Qblade, które bazuje na metodzie elementu łopaty Glauerta wraz z poprawką Prandtla.

Obiektem testowym była łopata, której parametry zestawiono w tabeli 1. Przyjęto dla niej jeden profil o stałej grubości na całej długości łopaty. Łopatę podzielono na 9 odcinków o długości równej 1 m każdy. Charakterystyki aerodynamiczne profili wygenerowano za pomocą Qblade i zaimportowano do OpenModelica. Gęstość powietrza przyjęto na poziomie $1,225 \text{ kg/m}^3$. Prędkość napływającego wiatru była stała w każdym punkcie przestrzeni i skierowana równoległe do osi wirnika. W obliczeniach przyjęto współczynnik Spera na poziomie $a_c = 0,35$.

Dla przyjętych parametrów przeprowadzono obliczenia za pomocą obu wspomnianych narzędzi. Ocenie poddano charakterystyki mocy na wale w funkcji prędkości obrotowej wału dla różnych kątów ustawienia łopat oraz dla różnych prędkości wiatru. Wyniki przedstawiono na rys. 6 i 7.

Największe różnice pomiędzy wynikami z oprogramowania Qblade a wynikami z opracowanego modelu otrzymano dla przypadku, w którym prędkość wiatru wynosiła $v_w = 16 \text{ m/s}$ oraz kąt lokalnego nastawienia łopaty $\theta = -5^\circ$. Błąd bezwzględny w tym przypadku wyniósł 4,15 kW, co stanowiło błąd względny o wartości 2,1%.

Walidacja modelu opierała się na danych z eksperymentów przeprowadzonych przez RISØ National Laboratory w Danii, które zawarte były w raporcie sporządzonym przez International Energy Agency⁵⁾. Dane dotyczące analizowanej turbiny testowej RISØ zestawiono w tabeli 2. Charakterystyki profili aerodynamicznych wyznaczono w tunelu aerodynamicznym. Pomiary prędkości napływającego wiatru przeprowadzono z wykorzystaniem anemometrów zlokalizowanych na maszcie w odległości 2 średnic wirnika od wieży turbiny wiatrowej. W raporcie nie podano wartości błędów pomiarowych.

W obliczeniach przyjęto gęstość powietrza równą $1,225 \text{ kg/m}^3$, a wartość współczynnika Spera $a_c = 0,2$.

Rozpatrywano dwa przypadki: (i) równomierny rozkład wiatru i zerowy kąt pochylenia wału oraz (ii) współczynnik Hellmana $\alpha_H = 0,26$, kąt pochylenia wału $\beta = 5^\circ$.

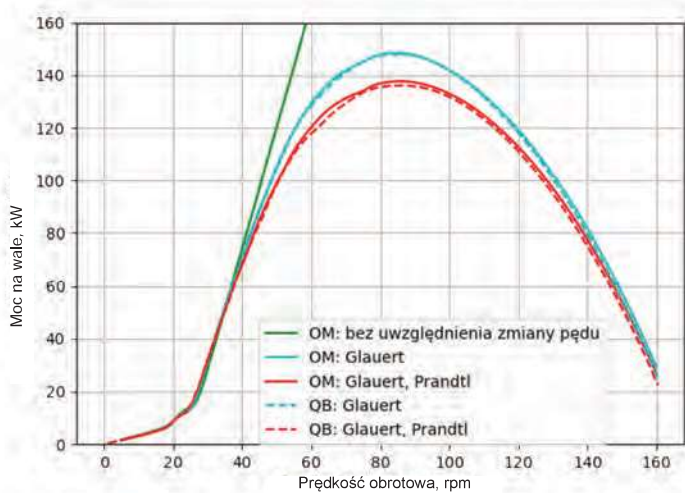


Fig. 6. Comparison of curves obtained from simulations in OpenModelica (OM) and Qblade (QB); wind speed 12 m/s, local blade tip warp angle 0°

Rys. 6. Porównanie krzywych otrzymanych z symulacji w programach OpenModelica (OM) i Qblade (QB); prędkość wiatru 12 m/s, lokalny kąt zwichrowania wierzchołka łopaty 0°

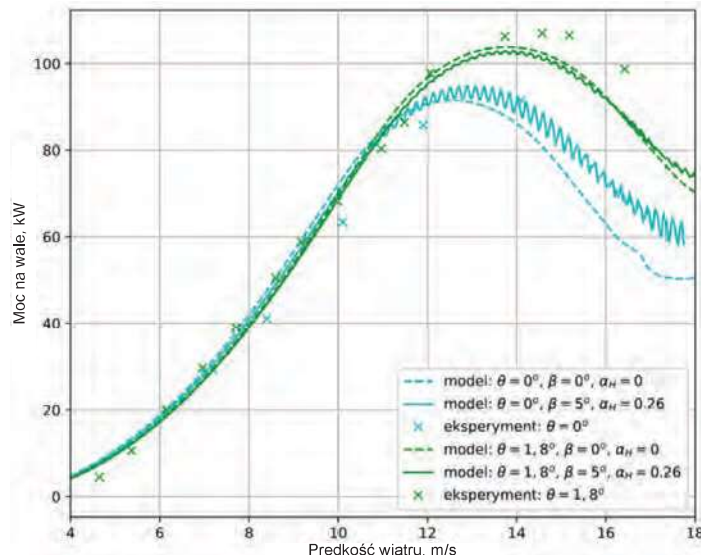


Fig. 8. Comparison of wind turbine power characteristics; rotor shaft rotational speed 47.5 rpm

Rys. 8. Porównanie charakterystyk mocy siłowni wiatrowej; prędkość obrotowa wału 47,5 rpm

Porównanie uzyskanych krzywych mocy dla prędkości obrotowej wirnika wynoszącej 47,5 rpm przedstawiono na rys. 8.

Podsumowanie

Opracowany model umożliwia stosowanie złożonego kształtu łopaty. W modelu zaimplementowany został model Glauerta wraz z poprawkami Prandtla i Spera dla osiowego napływu wiatru. Wirnik natomiast można obciążyć właściwie dowolnym polem prędkości wiatru, można go dowolnie zorientować w przestrzeni oraz nadać mu dowolną prędkość. Zaproponowany model został wykonany tak, aby był kompatybilny z innymi komponentami środowiska OpenModelica, dzięki czemu możliwy jest rozwój modelu o rozszerzenie łańcucha przepływu energii poprzez elementy obrotowe, prądnice, transformatory, których modele są już zaimplementowane w MSL.

Walidacja opracowanego dyskretnego modelu turbiny wiatrowej przebiegła pomyślnie. Różnice względne obliczonej mocy na wale, wynikające z symulacji numerycznych, nie przekroczyły wartości 2,1%. Kształty uzyskanych krzywych pokrywają się z krzywymi uzyskanymi w programie Qblade. Pojawiające się odchylenia mogą być wynikiem sposobu implementacji metod modelowania, doboru współczynników korekcyjnych lub też zastosowanej metody wyznaczania charakterystyk profili dla sekcji o przekrojach pośrednich. Największa moc występuje dla przypadku bez zmian pędu wiatru. W wynikach otrzymanych w procesie walidacji modelu można zauważyć wysoką czułość pracy turbiny wiatrowej na kąt nastawienia łopat.

Weryfikację opracowanego modelu przeprowadzono na podstawie danych eksperymentalnych dla turbin wiatrowych

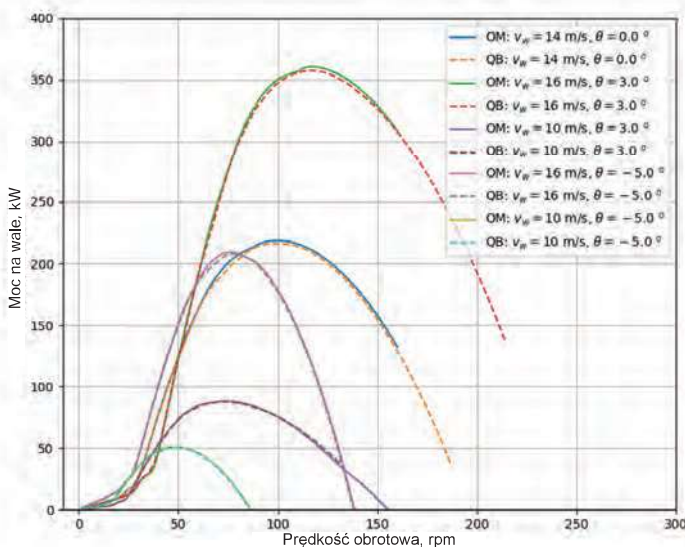


Fig. 7. Comparison of curves obtained from simulations in OpenModelica (OM) and Qblade (QB); v_w - wind speed, θ - local blade tip warp angle

Rys. 7. Porównanie krzywych otrzymanych z symulacji w programach OpenModelica (OM) i Qblade (QB); v_w - prędkość wiatru, θ - lokalny kąt zwichrowania wierzchołka łopaty

Table 2. RISØ wind turbine parameters⁵⁾

Tabela 2. Parametry turbiny wiatrowej RISØ⁵⁾

Liczba łopat	3
Średnica wirnika, m	19,0
Nominalna moc, kW	100
Nominalna prędkość obrotowa wirnika, rpm	47,5; 35,6
Wysokość piasty nad podłożem, m	29,3
Kąt pochylenia osi wirnika, $^\circ$	5
Kąt stożkowatości wirnika, $^\circ$	0
Lokalne kąty nastawienia wierzchołka łopaty, $^\circ$	1,8; -1,8; -1,5
Długość łopaty, m	8,2
Zwichrowanie łopaty, $^\circ$	15
Profil łopaty	NACA 63n-2nn

RISØ. Porównywano wyniki dla krzywych mocy wyznaczonych dla dwóch kątów nastawienia łopat. Największe odchylenie standardowe wyniosło 5,4 kW przy nominalnej mocy turbiny wynoszącej 100 kW. Podobne wartości błędów uzyskano dla dużych kątów odchylenia napływu wiatru (do 22°). Biorąc pod uwagę nieznaną błądów pomiarowych, zróżnicowanie prędkości wiatru, wprowadzone w modelu uproszczenia lub też nieznaną błądów wszystkich danych, można stwierdzić, że weryfikacja opracowanego modelu przebiegła pomyślnie.

Opracowany dyskretny model turbiny wiatrowej może być stosowany do wyznaczania charakterystyk turbin wiatrowych, może być stosowany jako element większych systemów w OpenModelica lub w projektowaniu systemów sterowania.

W opracowanym modelu numerycznym turbiny nie uwzględniono natomiast momentów aerodynamicznych działających na dane sekcje, wpływu zmian liczby Reynoldsa na charakterystyki profili i sprężystości łopat. Niemniej jednak ulepszenia te nie powinny stanowić

większego problemu w przyszłej implementacji i dalszym rozwoju zaprezentowanego modelu.

Otrzymano: 10-10-2024

Zrecenzowano: 31-10-2024

Zaakceptowano: 12-11-2024

Opublikowano: 20-12-2024

LITERATURA

- [1] S. Gumuła, T. Knap, P. Strzelczyk, Z. Szczerba, *Energetyka wiatrowa*, Wydawnictwo AGH, Kraków 2020.
- [2] D. Taler, K. Rup, *Podstawy obliczeń turbin wiatrowych i wodnych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2021.
- [3] M. Odeh, K. Mohsin, T. Ngo, D. Zalkind, J. Jonkman, A. Wright, A. Robertson, T. Das, *Wind Energy* 2022, **26**, nr 9, 985.
- [4] <https://github.com/mathworks/Simscape-Wind-Turbine>, dostęp 29 sierpnia 2024 r.
- [5] <https://windpowerlib.readthedocs.io>, dostęp 29 sierpnia 2024 r.
- [6] <https://build.openmodelica.org/Documentation/WindPowerPlants.html>, dostęp 29 sierpnia 2024 r.
- [7] P. Eberhart, T.S. Chung, A. Haumer, C. Kral, *Proc. 11th International Modelica Conference, Versailles, France, 2015*, 929, doi: 10.3384/ecp15118929.
- [8] J. Pramod, *Wind energy engineering*, McGraw-Hill Education, New York 2016.
- [9] J. Chen, Q. Wang, Z. Sun, *Wind turbine airfoils and blades*, Science Press, Beijing/Berlin/Boston 2018.
- [10] R. Maroński, *Siłownie wiatrowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2022.

Przemysł Chemiczny jest najstarszym polskim, branżowym czasopismem, wydawanym od 1917 r. Miesięcznik od 1964 r. jest notowany na tzw. liście filadelfijskiej najlepszych naukowych pism świata.

Miesięcznik adresowany jest do **menedżerów krajowego przemysłu chemicznego, inżynierów i technologów w przemyśle, projektantów w biurach projektowych oraz pracowników naukowych w instytutach naukowo-badawczych i na wyższych uczelniach oraz studentów chemii.** Wszystkie publikowane prace poddawane są recenzji.

dyscypliny powiązane

1. Badania środowiska
2. Bezpieczeństwo chemiczne i ochrona zdrowia
3. Biotęchnologia
4. Biomateriały
5. Biotechnologia
6. Biotechnologia i mikrobiologia stosowana
7. Chemia (ogólnie)
8. Chemia materiałowa
9. Chemia środowiskowa
10. Ekologia
11. Energetyka i inżynieria jądrowa
12. Ekonomia
13. Ekonomia i organizacja przedsiębiorstw
14. Farmakologia, toksykologia i farmaceutyka (różne)
15. Geochemia i petrologia
16. Gospodarka odpadami i utylizacja
17. Inżynieria bezpieczeństwa
18. Inżynieria chemiczna i procesowa
19. Inżynieria energetyczna
20. Inżynieria biomedyczna
21. Inżynieria chemiczna (ogólnie)
22. Inżynieria chemiczna (różnie)
23. Inżynieria przemysłowa
24. Inżynieria środowiskowa
25. Inżynieria materiałowa
26. Inżynieria mechaniczna
27. Marketing
28. Mikrotechnologia i biotechnologia stosowana
29. Modelowanie ekologiczne
30. Multidyscypliny
31. Nauki leśne
32. Ochrona różnorodności biologicznej
33. Ochrona środowiska
34. Organizacja i zarządzanie
35. Polimery i tworzywa sztuczne
36. Powierzchnie, powłoki i warstwy
37. Rachunkowość
38. Rolnictwo i ogrodnictwo
39. Stosunki przemysłowe
40. Strategia i zarządzanie
41. Systemy informacyjne zarządzania
42. Sztuczna inteligencja
43. Technologia paliw
44. Technologia żywności i żywienia
45. Weterynaria
46. Zachowania organizacyjne i zarządzanie zasobami ludzkimi
47. Zanieczyszczenie środowiska
48. Zarządzanie technologią i innowacjami
49. Zastosowania informatyki
50. Zootechnika i rybactwo

www.przemyslchemiczny.com