

Gdańsk, 2017-08-22

Dr hab. inż. Paweł Flaszyński, prof. IMP PAN
Zakład Aerodynamiki
Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk
Tel: 58 6995 268
E-mail: pflaszyn@imp.gda.pl



Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Katarzyny Kludzińskiej

pt.: Badanie zjawisk aerodynamicznych w innowacyjnej turbinie
wiatrowej o osi pionowej

1. Ocena ogólna

Praca dotyczy analizy wyników badań turbiny wiatrowej o osi pionowej, charakteryzującej się innowacyjną konstrukcją łączącą kierownicę z wirnikiem Savoniusa, pozwalającą na zastosowaniu dużo mniejszego wirnika przy uzyskiwaniu niezmienniej mocy turbiny wiatrowej.

Pierwsze próby generowania energii elektrycznej przy wykorzystaniu turbin wiatrowych zostały przeprowadzone pod koniec XIX w. Jednak do lat 80-ych XX wieku konwersja energii wiatrowej w energię elektryczną nie była uznawana za jedną z bardziej obiecujących technologii produkcji energii. Pomimo zmniejszenia kosztów energii w ostatnich dekadach, wciąż wymagany jest rozwój tej technologii w celu podniesienia konkurencyjności wobec tradycyjnych metod wytwarzania energii oraz innych metod wytwarzania w oparciu o źródła odnawialne. Jednostkowy koszt wytwarzania energii może być obniżony poprzez wzrost produkcji rocznej i budowę turbin o coraz większych średnicach wirnika. Ten trend jest wyraźnie widoczny w przypadku turbin wiatrowych o osi poziomej, gdzie w przypadku turbin instalowanych w obszarach morskich obecnie stosowane maksymalne średnice wirnika dochodzą do 170 m i umożliwiają generowanie maksymalnej mocy na poziomie 9.5 MW. Energetyka odnawialna jest i będzie dodatkowym źródłem mocy, a moce zainstalowane w dużych wiatrakach są wyzwaniem dla sieci energetycznej. Należy, także podkreślić, że instalowanie dużych turbin wiatrowych o osi poziomej jest uzasadnione w obszarach o ustabilizowanych parametrach wiatru takich jak prędkość i kierunek. Z kolei parametrem ograniczającym pracę wiatraków jest zakres prędkości wiatru, a w szczególności minimalna jej wartość, przy której następuje start turbiny. Rozwój energetyki rozproszonej i prosumenckiej wymaga stosowania turbin wiatrowych o znacznie mniejszych mocach, ale jednocześnie

bardziej odpornych na zmienny kierunek wiatru i wahania prędkości, a także zapewnienie możliwości produkcji energii przy prędkościach wiatru od 5-6 m/s.

Zasadniczym celem pracy jest identyfikacja zjawisk aerodynamicznych zachodzących w przepływie przez wirnik Savoniusa i jego modyfikację. Autorka poddała analizie wyniki badań eksperymentalnych oraz wykonała symulacje numeryczne niestacjonarnego, trójwymiarowego przepływu dla różnych konfiguracji turbin, a także zaproponowała „szereg miar wirowości, które wiążą się i tłumaczą zwiększoną sprawność innowacyjnej konstrukcji”.

Praca jest oryginalna i można stwierdzić, że ze względu na znaczenie aplikacyjne wybranego obszaru badawczego podjęta tematyka pracy doktorskiej została określona prawidłowo, a złożoność analizowanego przepływu w turbinie o osi pionowej stanowi interesujące pole badań o potencjale nowości naukowej.

2. Ocena szczegółowa

Rozprawa podzielona jest na 6 rozdziałów, poprzedzonych spisem symboli i skrótów, a zakończona bibliografią oraz spisem rysunków i tabel. Bibliografia zawiera 85 pozycji, w tym 6 prac Doktorantki oraz 11 adresów stron internetowych.

W Rozdziale 1, zamieszczono motywację podjętej pracy oraz jej cel i zakres. Autorka w tym rozdziale formułuje tezę pracy wskazując na możliwość zdefiniowania ilościowych wskaźników (zwanych w dalszej części pracy miarami wirowości) umożliwiających analizę zwiększonej sprawności innowacyjnej turbiny wiatrowej o osi pionowej w porównaniu z klasyczną turbiną Savoniusa.

Rozdział 2 zatytułowany „Przegląd literatury” składa się z 4 podrozdziałów. W pierwszym Autorka przedstawia ogólną charakterystykę turbin wiatrowych, ich podział ze względu na konstrukcję i zasadę działania. W tej części pracy wymienione są podstawowe cechy turbin oraz wady i zalety wybranych konstrukcji. Jednak niektóre stwierdzenia są dyskusyjne, np. w 2.1.2.3 podano, że turbiny opisane w tym podrozdziale zaliczają się do samostartujących, a ich praca jest niezależna od kierunku wiatru. Pierwsze stwierdzenie w zasadzie dotyczy wszystkich turbin wiatrowych, a drugie wszystkich turbin o osi pionowej. W części 2.1.3.2 dotyczącej turbiny śmigłowej przeciwbieżnej jako zaletę konstrukcji Autorka wymienia brak konieczności stosowania mechanizmów nakierowania na wiatr. To stwierdzenie nie jest precyzyjne, bo w przypadku każdej turbiny o osi poziomej jej sprawność zależy od kierunku wiatru. Kolejny podrozdział poświęcony jest omówieniu prawa Betza, fundamentalnego ze względu na analizę sprawności turbin wiatrowych i konwersji energii kinetycznej wiatru na energię mechaniczną przekazywaną przez łopaty turbiny na wał i generator.

Trzeci podrozdział zatytułowany „Literatura tematu” składa się z dwóch części: pierwszej „Optymalizacja końcówek łopat” i drugiej „Wybrane publikacje”. W drugiej części Autorka prezentuje wybrane prace eksperymentalne i numeryczne dotyczące badań turbin Savoniusa, szczegółowo analizując uzyskane wyniki podsumowuje tą część wnioskami istotnymi dla dalszej części pracy. Niektóre fragmenty tekstu opisują szczegóły badanych konstrukcji cytowanych prac, które byłoby łatwiej zrozumieć gdyby dodatkowo zamieszczono rysunek lub szkic. W pierwszej części pt. „Optymalizacja końcówek łopat”, Doktorantka przedstawia wyniki obliczeń, których celem była analiza wpływu końcówek łopat na uzyskiwaną moc. Analizie poddano kształt łopat na zewnętrznym i wewnętrznym promieniu, a wyniki przedstawiono na wykresach momentu i współczynnika mocy. Wyniki wskazują na niewielki wpływ analizowanych zmian geometrii na wartość współczynnika mocy (ok. 0.5%). Przedstawione wyniki zostały opublikowane w artykułach, których Doktorantka jest współautorem i nasuwa się pytanie dlaczego ta część została opisana tak skromnie. Wydaje się, że ze względu na sformułowany tytuł i cel pracy rozwinięcie tego paragrafu i włączenie uzyskanych przez Doktorantkę wyników obliczeń i analizy struktur wirowych, jako efekt zmian geometrii łopat, byłoby dodatkową wartością.

Rozdział 3 zawiera opis konstrukcji badanej turbiny oraz wyniki badań eksperymentalnych. W tym rozdziale podane są także definicje wybranych współczynników charakteryzujących turbiny wiatrowe. Autorka wymienia cechy konstrukcyjne innowacyjnej turbiny wiatrowej wskazując na zastąpienie jednego wirnika Savoniusa dwoma mniejszymi z zainstalowanymi płytami kierowniczymi. Wiatrak wyposażony jest w mechanizm rozkładania wiatraka, który dostosowuje odchylenie powierzchni w zależności od prędkości wiatru. Na rys. 3.3 i 3.4 pokazano turbinę w różnych widokach, ale dodatkowy opis na rysunku i chociażby zaznaczenie kąta otwarcia kierownic, czy kąta ustawienia wirnika, byłby przydatny w analizie wyników prezentowanych w dalszej części pracy.

Badania eksperymentalne przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym, gdzie mierzono prędkość przepływu, prędkość obrotową turbiny oraz generowaną moc. Na rys. 3.5 i 3.6 pokazano model komory pomiarowej i widok stanowiska pomiarowego, natomiast brak jest informacji jaki to jest tunel i gdzie wykonano pomiary. Podana jest informacja o otwarciu jednej strony sekcji pomiarowej, natomiast brak komentarza z jakiego powodu. Można się domyślać, że przyczyną jest rozmiar wirnika i efekt blokady tunelu. Autorka zamieściła interesujące wyniki pomiarów wskazujące na wyższą sprawność innowacyjnej turbiny w porównaniu z klasycznym układem Savoniusa, co jest efektem obecności kierownic przed układem wirników. Wyniki przedstawiono dla dwóch kątów ustawienia wirnika. Nasuwa się pytanie, dlaczego wybrano te wartości kąta oraz jaki może być wpływ kąta otwarcia na krzywą mocy.

Należy podkreślić, że na wykresach wyników eksperymentalnych naniesiono słupki błędów, co umożliwia ocenę niepewności pomiarów.

W rozdziale 4, zatytułowanym „Miary wirowości”, Doktorantka wymienia i definiuje wielkości, które są wykorzystywane w pracy do analizy wyników obliczeń trójwymiarowego niestacjonarnego przepływu. Rozdział zawiera wartościowy, systematycznie opracowany materiał, który mógłby być wykorzystywany w dydaktyce. Jednak nasuwa się kilka uwag krytycznych. Problem definiowania wiru i jego detekcji w objętości przepływu był podkreślany przez wielu autorów. Wirami nazywane są obszary o podwyższonej wirowości, natomiast brak jednoznacznej definicji jaka wartość wirowości uzasadnia określanie danego obszaru wirami. Istnienie lokalnego ekstremum wirowości nie może być wykorzystane jako definicja wiru, ponieważ nie zawsze istnienie ruchu wirowego wymaga takiego kryterium. Z całą pewnością wielkości przedstawione w pracy wykorzystywane są w analizie przepływu i detekcji struktur wirowych, ale trudno zgodzić się ze stwierdzeniem, że drugi niezmiennik tensora gradientu prędkości, kryterium δ (definiowane w oparciu o drugi i trzeci niezmiennik tensora prędkości gradientu prędkości) lub współczynnik λ_2 są miarami wirowości. One są wykorzystywane jako kryteria istnienia wirów w analizowanych obszarach identyfikacji struktur wirowych. Na poszczególnych rysunkach w tym rozdziale zamieszczono przykładowe izopowierzchnie definiowanych wielkości/miar, ale brakuje komentarza czy te rysunki są porównywalne (dla różnych kryteriów) i czy należy zwrócić uwagę na jakieś cechy szczególne struktury przepływu.

Rozdział 5 zawiera wyniki obliczeń niestacjonarnego trójwymiarowego przepływu i analizę wyników przedstawioną w oparciu o zdefiniowane wcześniej miary wirowości. W pierwszej części rozdziału Autorka przedstawia metody obliczeniowe DNS, LES i RANS oraz charakteryzuje wybrane modele turbulencji. W dalszej części sformułowano układ równań oraz scharakteryzowano wykorzystywaną metodę objętości skończonych. Należy podkreślić, że Doktorantka do obliczeń wykorzystywała niekomercyjny pakiet OpenFOAM, co stanowi dodatkową wartość prezentowanej pracy. Biorąc pod uwagę, że wcześniej przywoływane wyniki prac Doktorantki zostały uzyskane przy pomocy komercyjnych programów Fluent i CFX, całość tworzy bogatą bazę danych i tym większy niedosyt, że te wyniki nie zostały szerzej opisane w pracy. Geometria modelu obliczeniowego jest dostosowana do konfiguracji mierzonej w tunelu łącznie z otwarciem jednej ze ścian, co dodatkowo wpływa na trudność numerycznego modelowania przepływu i określenie warunków brzegowych. Problem ten dotyczy w szczególności powierzchni ograniczającej domenę obliczeniową poza tunelem, gdzie założono warunek wylotowy w postaci stałego ciśnienia. Brakuje jednak informacji czy wartość ciśnienia była różna dla powierzchni wylotowych wewnątrz i na zewnątrz tunelu,

czy też przyjęto tą samą wartość. Wyjaśnienia wymaga także stwierdzenie dotyczące warunku k i ω na ścianie. W pracy podano, że dla k i ω uwzględniono skalowalną funkcję ścianki.

Porównanie wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi w formie wykresów generowanego momentu siły i mocy na wale wirnika wskazuje na dobrą zgodność i poprawność przewidywania trendu w badanym zakresie prędkości. Zastanawia jednak, dlaczego obliczenia wykonano dla prędkości obrotowych wirnika do 6 obr/s, podczas gdy zakres mierzonych prędkości w przypadku turbiny innowacyjnej sięgał 14-15 m/s. Wobec czego, porównanie dotyczy zakresu wartości mierzonych ograniczonych do lewej strony krzywej mocy, poniżej wartości maksymalnych.

Istotnym elementem pracy ze względu na porównanie obu konstrukcji turbin są podrozdziały zawierające wyniki przedstawione w postaci wcześniej omawianych miar wirowości. Pierwsza z nich dotyczy modułu wirowości. Doktorantka stwierdza, że dla tych samych prędkości wiatru i prędkości obrotowych konstrukcje z kierownicą osiągają zawsze większe wartości niż klasyczna konstrukcja Savoniusa. Brakuje komentarza w jaki sposób należy interpretować uzyskane wyniki i jaka jest zależność pomiędzy modulem wirowości i sprawnością turbiny. Do takiej analizy prowokują wcześniej prezentowane wykresy współczynnika mocy (badania eksperymentalne) i wykresy 5.19. Tym bardziej, że na rys. 5.19 dla prędkości wiatru 8.5 m/s oraz 10.5 m/s symulacje numeryczne wskazują na ten sam wynik uzyskany w przypadku konfiguracji z kierownicą pod kątem 40° i turbiny Savoniusa, podczas gdy wyniki pomiarów (rys. 3.11) pokazują wyraźnie większą sprawność innowacyjnej turbiny. Podobny efekt obserwuje się w na wykresach bezwzględnej helikalności (rys. 5.24) i entropii (rys. 5.34). Niestety niedosyt pozostaje po analizie wartości pozostałych „miar wirowości”, gdyż nie wyjaśniono relacji między wyznaczonymi wartościami „miar wirowości” a sprawnością danej konstrukcji turbiny.

Istotna informacja wyjaśniająca uzyskaną wyższą sprawność innowacyjnej turbiny poprzez zastosowanie kierownic została zamieszczona w podsumowaniu pracy. Obecność kierownic wpływa na wzrost ciśnienia przed wirnikiem i większą ekspansję w obszarze wirnika. W świetle tego wniosku nasuwa się pytanie dlaczego w pracy nie zamieszczono przykładowego rozkładu ciśnienia w wybranym przekroju turbiny. Obliczenia były wykonywane dla przepływu niestacjonarnego, więc można pokazać także fluktuacje ciśnienia i prędkości. Połączenie tego obrazu z polem wirowości lub wyznaczonymi strukturami wirowymi ułatwiłoby interpretację wyników i zrozumienie różnic pomiędzy klasyczną turbiną Savoniusa i innowacyjną turbiną z kierownicami.

Praca została napisana w sposób jasny i komunikatywny, chociaż nie uniknięto pewnych pomyłek, literówek lub sformułowań wymagających korekty, np.:

- str. 15 – „wirnik... jest bardziej hałaśliwy” jest sformułowaniem kolokwialnym,
- str. 21 – zwrot „przyspieszenie prędkości” nie jest poprawny,
- str. 26 – stwierdzenie „,zadowolające wartości y^+ ” nie jest precyzyjne,
- str. 32 – stwierdzenie „...wpływ liczby Reynoldsa na współczynnik momentu i współczynnika mocy jest niższy niż 3%” wymagałoby dodatkowego wyjaśnienia
- wzór 4.26, 5.74 i 5.75 jest błędny,
- dodatkowe wyjaśnienia na rysunkach 2.23, 3.4 lub fotografii 3.7 poprawiłyby ich czytelność.

3. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Doktorantka podjęła w rozprawie ważny problem dotyczący analizy przepływu w wirniku turbiny wiatrowej o osi pionowej i wykazała umiejętność wykonywania złożonych obliczeń przepływu niestacjonarnego. Wyniki obliczeń wykazały dobrą zgodność z przedstawionymi badaniami eksperymentalnymi, a analiza przepływu w oparciu o zaproponowane miary wirowości są oryginalnym wkładem Doktorantki. Uzyskane wyniki obliczeń mają duży potencjał poznawczy i stanowią potwierdzenie umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a uwagi krytyczne zawarte w recenzji nie pomniejszają wartości przedstawionej pracy doktorskiej.

Uważam, że praca doktorska mgr inż. Katarzyny Kludzińskiej pt. „Badanie zjawisk aerodynamicznych w innowacyjnej turbinie wiatrowej o osi pionowej” w pełni odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.