

Prof. dr hab. inż. Piotr Doerffer
IMP PAN
Fiszera 14
80-231 Gdańsk

5.09.2016

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Konrada Kacprzak
p.t.:

”Numeryczna i eksperymentalna analiza przepływu przez
turbiny wiatrowe Savoniusa”

Wprowadzenie:

Recenzja pracy doktorskiej została wykonana na zlecenie Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej, przez prof. dr hab. inż. Zbigniewa Kołakowskiego.

Charakterystyka rozprawy

Praca dotyczy bardzo aktualnej tematyki, małych turbin wiatrowych o osi pionowej, które mogą wypełnić sektor prosumencki. Istotnym jest, że autor podjął się nie tylko symulacji numerycznych, ale również pojął się weryfikacji eksperymentalnej. Nawet, jeżeli podjęte zadania nie mają zbytniego ładunku innowacyjnego, to uzyskanie wiarygodnych wyników dla konkretnych rozwiązań jest bardzo ważnym dorobkiem, który na pewno wzbudzi duże zainteresowanie.

Praca jest napisana bardzo zwięźle, co z jednej strony jest bardzo dobrym podejściem, ale z drugiej strony czasami powoduje niedostateczny opis zagadnień. Typowym niedopatrzeniem autora jest opisanie tego co zostało zrobione, ale pominięcie wyjaśnienia, dlaczego zrobiono tak a nie inaczej.

Praca zawarta jest na 107 stronach plus 5 stron spisu literatury.

Analiza pracy z uwagami krytycznymi

1) Wstęp teoretyczny

Autor przedstawia kompendium wiedzy potrzebnej do analizy pracy. Pokrótce omawia

- mechanizmy powstawania wiatru,
- tworzenie i profil warstwy przyściennej
- zależność prędkości wiatru od uformowania powierzchni gruntu
- zmienność wiatru w czasie – modele statystyczne wiatru

Następnie autor definiuje moc i moment wirnika, podając też definicje współczynników mocy i momentu obrotowego oraz wyróżnika szybkobieżności.

We wzorze 1.29 pojawia się wielkość H – wysokość wirnika, a przecież w tym miejscu mówi się o wirniku o osi poziomej i wykorzystuje się jego średnicę D . Wskazane byłoby jakieś wyjaśnienie.

Krótkie omówienie siły oporu oraz siły nośnej jest czysto formalne i nie daje czytelnikowi wycucia tego, że współczynnik siły nośnej osiąga znacznie większe wartości od współczynnika siły oporu.

Następnie, krótko zostaje omówiona charakterystyka pracy rzeczywistej turbiny. Zaraz po niej wraca autor do omówienia zasobów energetycznych wiatru, co już było wcześniej omawiane. Tytuł „Energia generowana przez turbiny wiatrowe”, wprowadza w błąd czytelnika, bo mowa tu jest o energii w wietrze. W omawianych wzorach używane jest oznaczenie T-interwał czasowy, podczas gdy wcześniej, i w spisie oznaczeń T – może być momentem obrotowym lub temperaturą. Stosowanie tego samego oznaczenia dla trzech różnych wielkości nie jest dobrym pomysłem.

Dalej autor poświęca trochę miejsca dla scharakteryzowania różnych rozwiązań turbin wiatrowych a następnie przystępuje do dokładnego omówienia wirnika Savoniusa oraz Bacha. Przedstawia wpływ różnych parametrów konstrukcyjnych na działanie tych turbin.

Istotną częścią tego rozdziału są podpunkty 1.16-*Analiza przepływu* oraz 1.17-*Rozwiązywanie problemów mechaniki płynów*, którym należy się trochę więcej uwagi.

Opis Rys.1.28 jest trudny do zrozumienia. Po pierwsze wykresy pokazują wektory prędkości, które przede wszystkim pokazują wyraźnie obszary przyspieszenia czynnika. Wektory prędkości na pokazanych obrazkach są na tyle małe, że trudno wyciągać jakiegokolwiek wnioski. Pokazują one pewne ruchy okrężne, w jedną czy drugą stronę, ale to nie oznacza formowania wirów. Mówienie o wirach nie jest uprawnione dopóki nie zostanie pokazane pole wirowości, a to przecież łatwo zrobić.

Skrótowe opisy w tekście powodują powstawanie wielu pytań. Przy omawianiu Rys.1.29 mówi się o efekcie Coandy w szczelinie między łopatkowej. Ponieważ w szczelinie mamy do czynienia w zasadzie z prostą struga ograniczoną z tyłu i z przodu powierzchniami wklęsłymi to nie widzę warunków do tworzenia efektu Coandy?

W opisie opływu łopatki stwierdza się, że przepływ wzdłuż zakrzywionej łopatki bez oderwania dla pewnego ustawienia wirnika świadczy o tym, że to siła nośna napędza wirnik. Autor stwierdza więc, że wirnik Savoniusa nie jest urządzeniem napędzanym jedynie siłą oporu aerodynamicznego. Wydaje się, że autor dał się niesłusznie wpędzić w dwu biegunowość kategoryzacji pomiędzy siłą nośną i siłą oporu. Istotne jest powstawanie siły aerodynamicznej, wynikającej z różnicy ciśnień po obu stronach ścianki, w każdym elemencie wirnika. Podział na siły nośne i oporu nie mają tu zastosowania.

Omawiając rysunki 1.28 i 1.29 autor mówi o wpływie formującego się przepływu na moment obrotowy wirnika. Patrząc na słabo widoczne wektory prędkości czytelnikowi pozostaje tylko wiara w to, co pisze autor.

W tej części pracy, dosyć ogólnej, autor pozwala sobie na stwierdzenia bardzo niejasne: *komputery nie są w stanie rozwiązywać funkcji ciągłych, jak te przedstawione w formie różniczkowej*. Podobnie autor stwierdza, że rozwój komputerów i mocy obliczeniowych doprowadził do powstania CFD. Podczas gdy to CFD stanowi stałą presję na rozwój komputerów. Stwierdzenie, że CFD jest mniej stosowane w przemyśle samochodowym jest już od kilku lat nieaktualne, ponieważ obecnie, w rozwoju samochodów Formuły-1, CFD jest permanentnie używane, równoległe z badaniami eksperymentalnymi.

Na końcu rozdziału pierwszego określono tezę rozprawy:

Stworzenie:

Zaawansowanego modelu numerycznego turbiny wiatrowej Savoniusa

Z jednoczesną weryfikacją eksperymentalną

Pozwoli na określenie wpływu parametrów geometrycznych na:

jej sprawność

i charakter przepływu.

Ponieważ w obecnym rozdziale pokazano wpływ różnego typu modyfikacji kształtu turbiny Savoniusa i Bacha na podstawie badań literaturowych, szkoda, że nie przedstawiono w tym miejscu dokładnie, o jakie parametry geometryczne chodzi.

2) Numeryczna analiza 2-D

Osiowa niezmiennosc kształtu wirnika Savoniusa pozwoliła na wykonanie podstawowej analizy wpływu różnych parametrów na efektywność wirnika w ramach prostego modelu 2-D. W celu odniesienia takich symulacji do działania wirnika rzeczywistego, wykorzystano geometrię turbiny Savoniusa i Bacha, dla których istnieje baza pomiarowa w literaturze.

Interfejs między częścią obrotową siatki a częścią stałą został odsunięty od krawędzi zewnętrznych łopat. Chodziło autorowi o to by tworzące się struktury wirowe nie znajdowały się w obszarze interfejsu. Jak pokazuje Rys.2.3 spowodowało to, że zagęszczenie siatki w pobliżu interfejsu znajduje się w oddaleniu od tworzących się struktur wirowych w sąsiedztwie łopat wirnika. Tu zabrakło komentarza czy to jest właściwa strategia.

Siatka została tak zbudowana, że na interfejsie wymiar oczka siatki po obu stronach jest taki sam. Dla różnych prędkości obrotowych wirnika można dobrać taki krok czasowy, aby przemieszczenie odpowiadało wymiarowi oczka siatki. Autor sugeruje, że taka zgodność dopasowania komórek w interfejsie zwiększa dokładność obliczeń, bo wyeliminowuje błędy interpolacji. Nie podano jakiego interfejsu używał autor, ale w *sliding interface* takie pokrywanie się komórek nie eliminuje interpolacji. Tu autor stwierdza również, że wadą zastosowanego podejścia jest fakt, że zmiana prędkości czynnika powoduje jednocześnie zmianę liczby Reynoldsa. Jest to niejasny komentarz, ponieważ zmiana prędkości jest naturalnie związana ze zmianą liczby Re, i nie ma to nic wspólnego z podejściem do siatki obliczeniowej w interfejsie.

W celu weryfikacji gęstości siatki porównywano wartość średnią momentu obrotowego na wirniku. Najpierw wykonano symulacje na rzadkiej siatce a potem na siatkach coraz bardziej zagęszczonych i porównywano je między sobą. Stwierdzono, że IV poziom siatki jest dostateczny do dalszych obliczeń, ponieważ zabezpiecza bardzo małe różnice w rozwiązaniu przy dalszym zagęszczaniu siatki obliczeniowej.

Autor poświęca sporo miejsca do opisu modelu turbulencji i przejścia laminarno turbulentnego postulując ich duży wpływ na dokładność obliczeń. Nie próbuje jednak wyjaśnić czy warstwa przyścienna rzeczywiście ma szansę się sturbulizować w tego typu przepływach. Po pierwsze przy takich małych prędkościach liczba Reynoldsa jest mała. Ponadto, chwile w których przepływ jest w stanie rozwinąć się wzdłuż ściany łopaty jest tak krótki, że może w ogóle nie być czasu na rozwinięcie się przejścia laminarno turbulentnego. Wydaje się, że przepływ w wirniku Savoniusa jest zdominowany wielkoskalowymi strukturami wirowymi i dynamicznie rozwijającymi się strukturami oderwaniowymi. Na przepływ z rozwiniętymi warstwami przyściennymi jest mało miejsca i czasu.

Opis warunków brzegowych na domenie quasi 2-D budzi pewne wątpliwości. W części stacjonarnej obszaru obliczeniowego na bocznej ścianie założono warunek symetrii. W części wirnikowej obszaru obliczeniowego przyjęto warunek ścianki z poślizgiem. Autor nie wyjaśnia jednak, dlaczego tak postąpiono i jaka jest różnica w tych warunkach brzegowych. Autor pisze poza tym, że założenie poślizgu na bocznych ograniczeniach wirnika (str 42) powoduje brak efektów tarcia w warstwie przyściennej. Autor zapomina chyba, że w quasi-2D siatka jest jednoelementowa po grubości i żadna warstwa przyścienna nie może powstać. Podane zostało zastosowanie modelu *High Resolution* oraz *Secondo Order Upwind Euler Method* i podano ich działanie, ale nie uzasadniono dlaczego takie podejście jest właściwe dla rozwiązywanych zagadnień.

W prowadzonych symulacjach zadbano o doprowadzenie do ustabilizowanego i powtarzalnego rozwiązania. Ustalono, że dopiero 8-my obrót wirnika jest w pełni powtarzalny. Tu trzeba pochwalić troskę autora o jakość wyników.

Autor stwierdził, że zdefiniowanie poziomu turbulencji jest kluczowym czynnikiem wpływającym na dokładność rozwiązania numerycznego. Niestety w tej kwestii nie ma zaplecza eksperymentalnego. Tak, więc rozwiązania w pracy są czysto numeryczne. Wybrano poziomy turbulencji 1%, 5% oraz 10%. Zwiększeniu poziomu turbulencji towarzyszy nieznaczne zwiększenie generowanej mocy. Na rys.2.9, pokazującym pole prędkości zasugerowano, że zwiększona turbulencja powoduje zmniejszenie oderwania, a tym samym zwiększenie momentu na wirniku. Taki obrazek nie jest chyba dostatecznym uzasadnieniem podanych stwierdzeń.

Na Rys.2.11 znajduje się prawdziwa walidacja wyników symulacji 2-D w stosunku do eksperymentu. Charakter krzywej mocy dla wirnika Savoniusa jest zbliżony z eksperymentem, przy czym symulacje numeryczne dają większe wartości mocy. Jest to zgodne z oczekiwaniami, ponieważ symulacje 2-D nie uwzględniają strat na ograniczeniach wirnika. W przypadku wirnika Bacha charakter krzywej eksperymentalnej i numerycznej są inne. Maksimum mocy w eksperymencie jest wyższe niż z symulacji numerycznych. Dla dużych i małych wyróżników szybkości ta różnica maleje. Tak naprawdę doktorant nie wyjaśnił przyczyn takiej różnicy wyników.

Na stronie 46 i 47 autor pokazuje zmienność mocy wirnika w czasie jednego obrotu. Ilustracją dla wytłumaczenia uzyskiwanego maksimum i minimum mocy są obrazki na Rys.2.13. Pole prędkości nie jest najlepszą prezentacją. Może prezentacja pola ciśnień była lepszą ilustracją. Można by chociaż pokazać różnicę ciśnień wzdłuż łopatki.

W dalszej części autor analizuje powstawanie struktur wirowych w trakcie obrotu wirnika. Do tego celu pokazane zostały pola wektorów prędkości oraz pole energii kinetycznej turbulencji dla różnych położenia wirnika. Nie zostało wyjaśnione, dlaczego kandydat nie posługuje się polem wirowości, które jest jedynym parametrem pokazującym istnienie wirów.

Energia kinetyczna turbulencji w ogóle nie nadaje się do detekcji wirów w dużej skali. Ona powstaje w warstwie przyściennej oraz w warstwach tarcia, takich jak ślady czy oderwania. Stąd też nasuwa się pytanie, dlaczego na ściankach łopatki nie widać podwyższonej energii kinetycznej turbulencji, skoro autor twierdzi, że turbulencja i przejście laminarno turbulentne odgrywa istotną rolę w opływie wirnika.

Badanie wpływu szczeliny międzyłopatkowej.

Badania z literatury wskazują, że w turbinie Bacha optymalna geometria jest bez szczeliny. Dlatego też w pracy w tym miejscu badania dotyczyły tylko wirnika Savoniusa. Bardzo ciekawe wyniki w tej kwestii pokazuje wykres na Rus.2.19 oraz 2.20. W zasadzie uzyskane wyniki zgodne są z danymi literaturowymi. Pokazują, że najlepsze efekty daje szczelina nie większa niż 20%. Pewną rozbieżnością z literaturą jest fakt, że najwyższą efektywności uzyskuje się dla przypadku bez szczeliny, chociaż bardzo nieznacznie.

Przedstawiono również zmienność mocy w trakcie pojedynczego obrotu wirnika. Dla przypadku bez szczeliny zauważalne są małe deformacje krzywej, co autor przypisuje efektowi Magnusa. Kilka słów wyjaśnienia przydałoby się tutaj, bo nie jest to stwierdzenie oczywiste.

Pole prędkości dla dwóch położenia wirnika i dla wszystkich szerokości szczeliny pokazuje różnice przepływu. Byłoby bardzo ciekawe zobaczyć więcej informacji, jak np. rozkłady ciśnień na łopatkach lub siły wypadkowe działające na każdą z łopatek. Oczywiście brak pola wirowości jest tu też obecny.

3) Numeryczna analiza 3-D

Ze względu na fakt, że autor ocenił symulacje 2-D za niedostatecznie dokładne to przeprowadzono symulacje 3-D. Tak jak uprzednio najpierw przeprowadzono symulacje dla konfiguracji przebadanych eksperymentalnie, aby zdobyć doświadczenie i zaufanie do zastosowanej strategii numerycznej. W drugiej części rozdziału przeprowadzono symulacje pod kątem analizy wpływu pewnych parametrów wirnika.

W celu usprawnienia obliczeń, przez środek domeny obliczeniowej na połowie wysokości wirnika przeprowadzono podział domeny. Symulacje prowadzono tylko w połowie domeny z założeniem symetrii w płaszczyźnie środkowej.

Nie jest to jasno napisane, ale skoro podano, że dla tarcz końcowych $y=\pm 9$, to oznacza, że warunek brzegowy na tarczach jest warunkiem *ściana*, na którym powstaje warstwa przyścienna. Fakt, że te tarcze mają dwukrotnie większą średnicę od łopat jest chyba niezgodny z eksperymentem. To ma znaczenie, ponieważ wirująca tarcza napędza przepływ odśrodkowy. W Tabeli 3.2 stosunek średnic jest jednak 1,33 więc wspomniany efekt nie będzie aż taki mocny.

Ważny wynik porównania symulacji z eksperymentem pokazano na Rys.3.7. Dalej autor uzasadnia wniosek, że symulacje 3-D z przejściem laminarno-turbulentnym dają wyniki najbardziej zbliżone do eksperymentu.

Do analizy struktur przepływu przedstawiono ilustracje z liniami prądu w obszarze przepływu. Z takiej wizualizacji trudno cokolwiek wnioskować. Autor twierdzi, że za wirnikiem tworzy się struktura taka jak ścieżka wirowa Karmana. Rysunki 3.10 i 3.11 nie mogą być żadnym uzasadnieniem takiego twierdzenia. Należałoby pokazać, że w śladzie za wirnikiem powstają naprzemiennie wiry raz po jednej stronie raz po drugiej stronie śladu, o przeciwnej rotacji. Jednakże asymetria śladu pokazana na rys.3.12 i 3.13 zaprzecza koncepcji podobieństwa do ścieżki Karmana.

Wirnik Savoniusa

Drugą część rozdziału poświęcono wpływowi różnych parametrów na wirnik, który jest przedmiotem badań wykonanych przez autora dysertacji.

Wpływ szczeliny między łopatkami

Symulacje dla różnych wielkości szczelin pokazały tym razem, że optymalną szczeliną, która daje najwyższą moc jest szczelina 15%, i daje maksymalną moc przy $\lambda=0,8$.

Wpływ współczynnika kształtu (H/D)

Bardzo istotny i mało badany parametr wirnika Savoniusa jest wysokość wirnika odniesiona do jego średnicy. W tym względzie Kandydat otrzymał bardzo ważny wynik pokazany jako Rys.3.17. Wykazuje on, że powinno się unikać wirników krótszych niż 2 średnice.

Wirnik Bacha

W tych badaniach nie ograniczono się do wirnika bez szczeliny, jak uprzednio.

Wpływ szczeliny między łopatkami

Przeprowadzono symulacje dla trzech szczelin: 0%, 10% i 15%. Krzywa mocy dla obu szczelin jest prawie tak sama z niesymetrycznym przesunięciem maksimum w kierunku większych współczynników szybkoobrotowości. Bez szczeliny międzyłopatkowej krzywa mocy jest symetryczna i osiąga największą wartość.

Wpływ kąta rozwarcia łopaty – określono optymalny kąt 124° (110, 135)

Wpływ wskaźnika kształtu łopaty – określono optymalną wartość 0,1 (0,2; 0,3)

Wpływ skreńcenia łopat

Dane literaturowe na ten temat są niejednoznaczne. Nie znaleziono żadnych symulacji numerycznych dotyczących skreńconych łopat wirnika Savoniusa czy Bacha. Przeprowadzone symulacje 3-D pokazały, że skreńcenie łopat zwiększa moc wirnika. Szczególnie korzystne jest skreńcenie łopat o 90° .

Dalej autor podejmuje porównanie dwóch turbin o najlepszych parametrach. Ale tutaj bierze pod uwagę turbinę Savoniusa o prostych łopatach a turbinę Bacha o skośnych łopatach. Skoro stwierdzono, że skośność łopat zwiększa moc to nie wiadomo, dlaczego wybrano turbinę Savoniusa z prostymi łopatom.

Dla każdej z prostych łopat turbiny Savoniusa można wyznaczyć jej wkład w moment napędowy wirnika. Każda z łopat ma dwie fazy: jedną gdy daje pozytywny moment obrotowy a drugą w której hamuje wirnik. Wypadkowy moment jest zmienny, ale zawsze dodatni.

Inne zachowanie łopat jest rejestrowane dla turbiny Bacha ze skośnymi łopatom. Jak pokazały obliczenia każda z łopat daje pozytywny moment przez cały obrót. Łopata powracająca nie ma negatywnego wpływu na działanie wirnika. Wydaje się to niejasne, ponieważ skreńcenie łopatki wynosi tylko 90° , i musi być taki moment, kiedy cała łopata porusza się pod wiatr. Autor pisze, że dzięki temu skreńcony wirnik Bacha daje większą moc od prostego Savoniusa. Patrząc jednak na sumaryczną krzywą mocy (rys.3.26 i 3.27) wygląda na to, że moc obu wirników jest bardzo zbliżona.

4) Badania eksperymentalne

Do badań wytypowano dwie turbiny o największych mocach. Turbinę Savoniusa o prostych łopatkach oraz turbinę Bacha o łopatkach skośnych. W poprzednim rozdziale pokazano, że skośność łopatek zawsze podnosi moc turbiny. Nie wyjaśniono, dlaczego więc turbina Savoniusa ma łopatki proste.

Sporo miejsca autor poświęca charakterystyce wietrzności w miejscu badań, nawiązując do metodologii opisanej we wcześniejszych rozdziałach. Średni wiatr uzyskany z pomiarów jest niewysoki 4,2 m/s.

Nie ma jasno opisanej procedury poszukiwania mocy maksymalnej przy danym wietrze. Jest to zadanie niebanalne ze względu na szybką zmienność wiatru, a szczególnie w lokalizacji wiatraka na budynku. Stałe czasowe systemu sterowania są ważne. Próbkowanie wiatru co 10s (jak wynika z rys.4.13) nie daje szans na skuteczne poszukiwanie maksymalnej mocy dla danych warunków.

Pomimo niejasności w opisie pomiarów, wykres 4.17 przedstawia bardzo ciekawe wyniki pomiarów.

Turbina Bacha wykazuje nieco większy współczynnik mocy.

Wyniki pomiarów obu turbin wykazują systematycznie niższe wartości od symulacji numerycznych. Autor stara się wypunktować te dodatkowe źródła strat w eksperymencie dla uzasadnienia takiego wyniku badań.

Autor zainteresował się efektem przesłonięcia domeny obliczeniowej przez wiatrak. Wirnik zamknięty w stałej komorze powoduje zawyżenie prędkości opływu wiatraka, co prowadzi do zwiększenia jego mocy. Aby dopasować wyniki symulacji do eksperymentu autor stosuje różne wymiary domeny obliczeniowej. Ale nie próbował zastosować takiego samego przesłonięcia, które miało miejsce w eksperymencie.

Posumowanie

Przedstawiona praca doktorska mgr.inz. Kacprzaka jest ważnym wkładem do wiedzy na temat wirników Savoniusa. Bardzo istotnym aspektem pracy jest przeprowadzenie symulacji numerycznych i uzupełnienie ich badaniami eksperymentalnymi.

Najbardziej wartościowe jest pokazanie zależności efektywności wirnika od jego wysokości. Niewiele jest takich wyników. Będą one bardzo przydatne w przyszłości.

Praca dostarcza też wartościowego materiału dotyczącego wirnika Bacha.

Niektóre niedociągnięcia interpretacyjne muszą być jeszcze przez doktoranta przemyślane, ale nie mają one bezpośredniego wpływu na podstawowy cel pracy, którym było pokazanie wpływu różnych parametrów na efektywność wirnika Savoniusa i Bacha

Jestem przekonany, że praca doktorska spełnia kryteria stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

