

dr hab. inż. Jacek Karliński
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny

R E C E N Z J A
rozprawy doktorskiej
mgra inż. Wojciecha Gancarskiego

pt.:
„Trwałość elementów turbiny wiatrowej VAWT”

1. Wstęp

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej RNDIM/99/23 z dnia 6 lipca 2023r.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Wojciecha Gancarskiego pt.: „Trwałość elementów turbiny wiatrowej VAWT”. Promotorem w przewodzie doktorskim jest prof. dr hab. inż. Adam Niesłony, natomiast promotorem pomocniczym dr inż. Stanisław Anweiler.

Rozprawa doktorska mgra inż. Wojciecha Gancarskiego została przygotowana w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

2. Ogólna charakterystyka problematyki rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej jest bardzo aktualna i ważna. Celem badań realizowanych przez Autora było opracowanie algorytmu wyznaczania trwałości elementów turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu, a zakres zrealizowanych prac obejmował m. in.: badania literaturowe, analizę i adaptację numerycznych metod obliczeniowych stosowanych w analizach zagadnień strukturalnych oraz przepływu płynów. Autor ponadto zaplanował oraz wykonał niezbędne badania eksperymentalne oraz symulacyjne służące wyznaczeniu obciążeń działających na łopaty turbiny.

Problem prawidłowej oceny trwałości turbin wiatrowych, na etapie projektowania, jest istotny zarówno ze względów ekonomicznych jak i społeczno-środowiskowych. Głównymi elementami turbiny wiatrowej są: wirnik wyposażony w łopaty, przekształcający energię wiatru w energię mechaniczną ruchu obrotowego,

generator prądu oraz np. wieża w przypadku turbin o poziomej osi obrotu. Obecnie standardowy okres eksploatacji turbin wiatrowych wynosi od 20 do 25 lat. Na ustrój nośny, jak i na elementy wirnika (np. łopaty czy też wał, na którym wirnik jest osadzony) działają obciążenia o charakterze zmiennie-amplitudowym. Przedwczesne uszkodzenie jednego z wymienionych elementów może skutkować koniecznością wycofania turbiny z eksploatacji, ze względu na np. wysoki koszt naprawy lub skalę uszkodzeń uniemożliwiających przywrócenie urządzenia do prawidłowego działania.

Dużym wyzwaniem stanowi recykling elementów turbin wykonanych z materiałów kompozytowych. Najczęściej są to polimery wzmocnione włóknami węglowymi lub szklanymi. Obecnie nie ma skutecznych i ekonomicznie uzasadnionych metod pozwalających na przetworzenie i ponowne wykorzystanie tego typu materiałów, w związku z powyższym podlegają one najczęściej składowaniu.

Wobec powyższego opracowanie wiarygodnych metod oceny trwałości zmęczeniowej turbin wiatrowych jest istotne, a w przypadku turbin o pionowej osi obrotu również trudne, aktualne i wymagające zaawansowanych badań zarówno eksperymentalnych jak i symulacyjnych.

3. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa liczy 115 stron i obejmuje 6 rozdziałów (strony od 1 do 103) oraz 2 załączniki: A i B (zamieszczone od strony 104 do 115). Rozprawa zawiera streszczenie w językach polskim i angielskim oraz spis oznaczeń. Wykaz literatury zestawiono na stronach od 95 do 101. Zawiera on 70 pozycji związanych ściśle z tematyką rozprawy, w tym 1 Autorski.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do problematyki rozprawy i zawarto w nim podstawowe informacje oraz pozycje literaturowe wprowadzające czytelnika w zagadnienia z zakresu podstawowych cech konstrukcyjnych jak i regulacji prawnych dotyczących turbin wiatrowych. W rozdziale można również znaleźć krótką charakterystykę pracy.

W rozdziale drugim Autor dokonał przeglądu literatury w zakresie obejmującym budowę turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu, metod wyznaczania obciążeń zarówno tych eksperymentalnych wykorzystujących badania w tunelach aerodynamicznych, jak i symulacyjnych wykorzystujących metody numeryczne. Autor przedstawił specyfikę pracy turbin wiatrowych w warunkach miejskich.

Rozdział trzeci zawiera sformułowanie celu i zakresu pracy oraz tezę.

Rozdział czwarty stanowi opis badań własnych, nad wpływem kierunku i prędkości strugi powietrza na wartość sił naporu hydrodynamicznego. Przedstawiono w nim metodę wyznaczania sił stycznych oraz normalnych działających na łopate turbin. Autor opisał wykorzystane do tego celu stanowisko badawcze (tj. tunel aerodynamiczny) oraz zastosowany układ pomiarowy.

W rozdziale piątym przedstawiono wyniki badań symulacyjnych obciążeń łopat i porównano je do wyników badań przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym. Rozdział zawiera również badania symulacyjne obciążeń wirnika turbiny o pięciu łopatach. Wyznaczone obciążenia wykorzystano do przeprowadzenia analiz wytrzymałościowych wykonanych metodą elementów skończonych.

Rozdział szósty zawiera algorytm procesu wyznaczania trwałości zmęczeniowej elementów turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu.

Rozdział siódmy to podsumowanie prowadzonych badań i uzyskanych wyników w postaci sformułowanych wniosków oraz spostrzeżeń w zakresie wytycznych do zmian w konstrukcji łopat oraz wirnika wpływających na trwałość.

Rozprawa zawiera ponadto dwa załączniki. W załączniku A przedstawiono tabele wyników pomiarów sił działających na łopate przy różnych prędkościach powietrza uzyskane w badaniach eksperymentalnych realizowanych w tunelu aerodynamicznym, natomiast załącznik B zawiera podobne wyniki uzyskane w badaniach symulacyjnych

4. Oryginalność rozprawy

Opracowany algorytm oceny trwałości małych turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu, przedstawiony przez Autora w rozprawie doktorskiej, jest oryginalny i stanowi nowe podejście do rozwiązania postawionego problemu badawczego. Autor umiejętnie wykorzystał metody eksperymentalne i numeryczne w badaniach obciążeń oraz wyężenia ustrojów nośnych turbin. Przedstawiony algorytm uwzględnia wpływ zmienności obciążeń wynikających z nierównomierności ruchu turbiny, będących konsekwencją budowy strukturalnej wirników o pionowej osi obrotu oraz wynikających z tego zjawisk takich jak: występowanie cienia aerodynamicznego oraz turbulencji.

5. Ocena rozprawy

Pod względem merytorycznym i metodycznym rozprawę doktorską oceniam dobrze. Cel rozprawy został osiągnięty, postawiona teza udowodniona, a zakres prac zdefiniowany w rozdziale 3 zrealizowany.

Układ treści rozprawy jest logiczny i czytelny, odpowiadający w części praktycznej tokowi prowadzonych badań i analiz. Metodycznie Autor przedstawił ciąg czynności badawczych oraz uzyskane wyniki, uzupełniając je komentarzami.

Uzyskane wyniki mają charakter poznawczy i dużą wartość praktyczną.

Uwagi krytyczne merytoryczne:

1. W rozdziale 4 przedstawiono badania eksperymentalne w tunelu aerodynamicznym, które mają dużą wartość poznawczą. Są one obarczone jednak pewnym błędem. Wykonano je dla jednej łopaty, nie uwzględniając zjawisk występujących przy opływie wirnika o kilku łopatach przez powietrze. W przypadku badań i analizy wirnika turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu z kilkoma łopatami obciążenia będą inne. Autor w komentarzu do wyników badań nie odniósł się do wpływu przyjętych uproszczeń na wyniki liczbowe.
2. Wyjaśnienia wymaga przyjęcie na rys. 4.3 układu współrzędnych oraz sposobu pomiaru kąta, którego wartość nie koresponduje z wartościami podanymi w tabelach w Załączniku A oraz ogólnie przyjętymi zasadami (przesunięcie katowe wynoszące 90 stopni oraz przeciwny do ogólnie przyjętego zwrot kąta).
3. W podrozdziale 5.2.1 nie pokazano rozkładów prędkości oraz ciśnień dla wszystkich analizowanych konfiguracji. Dotyczy to kątów względem kierunku przepływu powietrza, wynoszących 135, 180 i 315 stopni. Ponadto, wartości bezwzględne F_y zawarte w tabelach od 5.1. do 5.3. dla katów 45 i 135 stopni powinny być równe ze względu na symetryczność zagadnienia, tak samo jak dla 0 i 180 stopni. Autor nie skomentował przyczyn rozbieżności wyników oraz braku rysunków z rozkładami prędkości i ciśnień.

4. Wyniki symulacji turbiny przedstawione w podrozdziale 5.2.2 wykonano przy założeniu określonych pozycji wirnika (brak ruchu obrotowego wirnika). Wykonanie tego typu analizy, dla pełnej trójwymiarowej struktury wirnika w zakresie dynamicznym, jest trudne ze względu na możliwe niestabilności w rozwiązaniu, wynikające np. wielkości zagadnienia oraz sposobu modelowania turbulencji. Autor nie skomentował jakie skutki na wartość wyznaczonych obciążeń (niezbędnych do oceny trwałości), ma przyjęcie do obliczeń braku ruchu obrotowego wirnika. Podczas obrotu poszczególne elementy (łopaty) wirnika mają różne kierunki i wartości prędkości w stosunku do kierunku przepływu powietrza.
5. W rozdziale 5.4, w celu wyznaczenia stanu wyęźnienia w ustroju, Autor wykonał analizę strukturalną wirnika turbiny metodą elementów skończonych. Analizę wykonano w innym niż badania eksperymentalne i analizy CFD układzie współrzędnych, przy czym Autor stwierdza: „Siły obciążające przyłożono do powierzchni wewnętrznych łopat napędzających i zewnętrznej łopat hamujących przyjmując podwojone wartości dla osi X i Z a zredukowane dla osi Y”. Autor nie komentuje jak uproszczenie, związane z przyjętym rozkładem obciążenia na powierzchni łopaty, wpływa na rozkład naprężeń uzyskanych w analizie wytrzymałościowej.
6. Autor w rozdziale 5.5, na drodze obliczeń analitycznych, wyznaczył naprężenia zredukowane w połączeniach łopat z wałem turbiny oraz w miejscu mocowania wału wirnika. Trwałość elementów turbiny została jednak wyznaczona z wykorzystaniem modelu numerycznego. Zwraca uwagę duża rozbieżność uzyskanych naprężeń zredukowanych w miejscu podparcia wału wirnika turbiny (zestawienie wyników w tabeli 5.8). Autor komentuje w ostatnim akapicie rozdziału 5.5 na str. 80 uzyskane wyniki, wskazując jako przyczynę inną wartość momentu gnącego, wynikającą z różnic w budowie modelu numerycznego oraz schematu przyjętego do obliczeń analitycznych. Prawdopodobną przyczyną jest zastosowanie do dyskretyzacji obszaru elementów tetragonalnych wyższego rzędu oraz nałożenie na styku wydzielonych do dyskretyzacji objętości więzów, co skutkuje zarówno brakiem ciągłości pola odkształceń jak i wywołuje dodatkowe siły.

7. W tabelach zamieszczonych w Załączniku A, w kolumnach „siła obliczona”, podano jednostkę [g], wynika to prawdopodobnie z zastosowania w układzie pomiarowym belek tensometrycznych do pomiaru masy.
8. W rozprawie przedstawiono badania symulacyjne wirnika turbiny wiatrowej dla obciążeń występujących przy prędkości wiatru wynoszącej 52 m/s (uzyskano naprężenia zredukowane ponad dwukrotne przekraczające granicę wytrzymałości dla zastosowanego materiału). Dla analizowanej turbiny Autor nie określił dopuszczalnych parametrów pracy.

Uwagi szczegółowe redakcyjne:

1. Str. 1,
 - a. w drugim zdaniu wstępu dwukrotnie użyto zaimka „ich”,
 - b. w zdaniu „Jak pokazują badania ...” prawdopodobnie Autor chciał wskazać pozycje literaturowe [31] i [32],
 - c. wers 10 – błędy gramatyczne, jest: „... sposobu ich pracy, obciążenia wiatrem...”, powinno być „... sposobem ich pracy, obciążeniem wiatrem...”
 - d. wers 11 – jest „naprężeń”, powinno być „naprężeniach”
 - e. w trzecim akapicie, jest „podmuch pionowe”, powinno być „podmuchy pionowe” i dalej całe zdanie „W ramach pracy” wymaga korekty stylistycznej.
2. Str. 3,
 - a. w zdaniu „ który poprzez zamocowany wał lub oś ...” powinno być „.... który poprzez zamocowany wał ...”,
 - b. w zdaniu jest: „....[56], wynika, że konstrukcja jest wydajniejsza ...” powinno być „....[56], wynika, że HAWT jest wydajniejsza ...”,
 - c. w zdaniu „ ... oraz niska emisja hałasu ...” powinno być „... niższą emisję hałasu ...”.
3. Str. 4, całe zdanie „ W ramach opracowania zostanie omówione...” wymaga zmian stylistycznych.
4. Str. 5, w pierwszym zdaniu użyto sformułowania: „urządzeń lub konstrukcji”, powinno być „urządzeń”.

5. Str. 8, w zdaniu jest: „.... co przy projektowaniu i produkcji niewielkich i tanich turbinach ...”, powinno być „,.... co przy projektowaniu i produkcji niewielkich oraz tanich turbin ...”
6. Str. 9, rozdz. 2.2.2. Autor wprowadza pojęcia „klapa” i „stopa łopaty” nie wyjaśniając, których elementów wirnika dotyczą. Brakuje wyjaśnień symboli stosowanych w równaniach od 6 do 8. Przywoływane normy powinny zostać uwzględnione w wykazie literatury. Ponadto Autor stosując zapożyczenia w podrozdziale powinien odwołać się do odpowiednich pozycji z wykazu literatury (jest to pozycja [24]).
7. Str. 10,
 - a. w pierwszym zdaniu rozdziału 2.2.3 jest: „wykorzystywana”, powinno być „wykorzystywane”,
 - b. w ostatnim zdaniu na stronie jest: „ równanie”, powinno być „równaniem”.
8. Str. 12,
 - a. w zdaniu jest: „... odpowiedzi dynamicznej konstrukcji osi turbiny wiatrowej.”, powinno być „... odpowiedzi dynamicznej wału wirnika turbiny wiatrowej.”
 - b. w zdaniu jest: „ pomiędzy wydajnością w procesie projektowania, a prognozowaną trwałością ...”, powinno być „ pomiędzy projektowaną wydajnością, a prognozowaną trwałością ...”.
9. Str. 14, ostatnie zdanie na stronie wymaga poprawy.
10. Str. 17, fragment od zdania „Problematyka częstotliwość drgań”, do końca strony, wymaga poprawy pod względem gramatycznym i stylistycznym.
11. Str. 18,
 - a. zdanie: „ Obejmowały one testy z dwoma różnymi warunkami końca wału ...” należy poprawić,
 - b. koniec pierwszego , jest: „Oprócz tego znane są [35] również wartość współczynnika ...” - błąd gramatyczny,
 - c. drugi akapit jest „Określenie wartość momentu” - błąd gramatyczny.

12. Str. 19, w zdaniu: „W modelowaniu numerycznym oddziaływanie wiatru na konstrukcję turbiny symulowany jest poprzez zastosowanie modelowania FSI” - błąd gramatyczny.
13. Str. 24, drugie zdanie w pierwszym akapicie jest niezrozumiałe i wymaga poprawy pod względem stylistycznym.
14. Str. 25, ostatni wers, jest: „mikro kontrolera” powinno być „mikrokontrolera”.
15. Str. 27, brakuje głównej części podpisu pod rysunkiem oraz jego numeru.
16. Str. 62.
- a. podpis pod rysunkiem 5.27, powinno być: „Model dyskretny turbiny” lub ewentualnie „Siatka elementów skończonych”,
 - b. prawidłowy tytuł Tablicy 5.7. to: „Własności mechaniczne stopu aluminium PA5754”,
 - c. jednostki w tablicy 5.7, jest: „Mpa” powinno być „MPa”.
17. Str. 63 i 64, podpisy pod rysunkami sugerują wykonanie przez Autora analiz sprzężonych „... pod obciążeniem wiatrem ...” – skrót myślowy.
18. W tabelach zamieszczonych w Załączniku A, w kolumnach „siła zmierzona”, podano jednostkę [g], wynika to prawdopodobnie z zastosowania w układzie pomiarowym belek tensometrycznych do pomiaru masy i braku odpowiedniego przeliczenia wyników.
19. W tabelach zamieszczonych w Załączniku A, w kolumnach „siła obliczona” - składowa g , znajdują się wartości o kilka rzędów większe od pozostałych, prawdopodobnie pominięto znak dziesiętnych.
20. Autor w rozprawie stosuje pojęcie „konstrukcja” zarówno do ustroju nośnego lub urządzenia, jak i do opisu ich cech.
21. W pracy wielokrotnie pojęcie oś wykorzystywana jest do opisu wału wirnika turbiny oraz do opisu cech geometrycznych.

6. Konkluzja

Zawarte w mojej recenzji uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną, pozytywną ocenę rozprawy i w zakresie merytorycznym mają często charakter dyskusyjny, wynikający ze złożoności tematyki rozprawy. Rozprawa cechuje się wartością merytoryczną i jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, zawiera również cenne wskazówki o charakterze praktycznym. Przedstawione w rozprawie badania eksperymentalne oraz symulacyjne stanowią oryginalny dorobek Autora.

Biorąc pod uwagę osiągnięte cele, samodzielność w planowaniu i prowadzeniu badań **stwierdzam, że** rozprawa doktorska przedstawiona przez mgra inż. Wojciecha Gancarskiego pt.: „Trwałość elementów turbiny wiatrowej VAWT” spełnia warunki zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 poz. 1789, z późn. zm.) **i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgra inż. Wojciecha Gancarskiego do publicznej obrony.**