

Prof. dr hab. inż. Witold ELSNER
Katedra Maszyn Ciepłych
Politechnika Częstochowska
ul. Armii Krajowej 21; 42-200 Częstochowa
tel.: (034) 3250507; e-mail: witold.elsner@pcz.pl

Częstochowa, 18.04.2024

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. (MSc. Eng.) Thanushree Suresh:

„Aeroacoustic investigation of streamwise vortex generators for flow control”

Recenzja została opracowana na zlecenie z-cy Dyrektora ds. naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk dr hab. inż. Grzegorza Żywicy prof. IMP PAN w piśmie RN-421-7/23 z dnia 18 stycznia 2024r.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska przygotowana została pod kierunkiem dr hab. inż. Pawła Flaszynskiego. Promotorem pomocniczym był dr inż. Oskar Szulc. Praca została napisana w języku angielskim, zawiera 159 stron i jest podzielona na siedem rozdziałów. Na początku pracy zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis oznaczeń. Pracę kończy spis wykresów, tabel oraz zestaw pozycji literaturowych związanych z tematyką rozprawy. Dodatkowo w pracy umieszczono dwa załączniki uzupełniające treść głównej części pracy, pierwszy zawierający, opis walidacji kodu FW-H oraz drugi przedstawiający informację nt. przesunięcia DC sygnału.

Praca była realizowana w ramach programu Unii Europejskiej Marie Skłodowska-Curie Actions MSCA.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy.

Tematyka rozprawy dotyczy analizy zjawisk aeroakustycznych występujących przy opływie łopat wirnika turbiny wiatrowej, a właściwie profili łopatkowych, pracujących w niekorzystnych warunkach przepływowych, wymuszających oderwania przepływu. Doktorantka swoje zainteresowania badawcze skoncentrowała na ocenie wpływu prętowych generatorów wirów wzdłużnych (RVGs), mocowanych po stronie ssącej łopatki, na charakterystyki aerodynamiczne oraz na pole akustyczne. Generatory wirów wzdłużnych są uznane jako jedna ze skuteczniejszych pasywnych metod kontroli przepływu a instalacja takich systemów, w odpowiednio dobranych miejscach, na profilu łopatki powoduje zmniejszenie oderwania, laminarnego i/lub turbulentnego, zwiększając tym samym sprawność aerodynamiczną wirnika. Zagadnienie kontroli przepływu i zmniejszenie niekorzystnego oddziaływania pęcherza oderwania w urządzeniach technicznych jest przedmiotem zainteresowania wielu ośrodków badawczych i koncernów przemysłowych. W przypadku profilu łopatkowego na jego wypukłej stronie po osiągnięciu punktu minimalnego

ciśnienia, występuje najczęściej niewielkie, oderwanie laminarnej warstwy przyściennej. W wyniku turbulizacji oderwanej warstwy i wzrostu momentu pędu w kierunku powierzchni następuje ponowne przylgnięcie warstwy przyściennej. Duże straty profilowe występują, gdy nie zachodzi przylgnięcie warstwy przyściennej i wtedy mówimy o oderwaniu otwartym. Sytuacja taka występuje zwłaszcza przy nieoptymalnych kątach napływu, co istotnie zwiększa opór aerodynamiczny i zmniejsza siłę nośną płata. Dlatego też prace badawcze poświęcone metodom kontroli przepływu i ograniczaniu oderwania na profilach łopatkowych turbin wiatrowych oraz optymalizacji kształtów tych profili, są ze wszech miar celowe.

Z drugiej strony jednym z problemów związanych z rozwojem energetyki wiatrowej jest emisja hałasu, dlatego jakkolwiek ingerencja w geometrię wirnika, w tym przypadku instalacja RVGs, powinna być zbadana pod kątem ryzyka zwiększonej emisji hałasu. Z tego powodu podjęcie przedmiotowego tematu badawczego oraz założenia rozprawy doktorskiej, uważam za celowe i prawidłowo uzasadnione. Przepływ wokół turbiny wiatrowej jest silnie turbulentny, a hałas aerodynamiczny przez nią generowany wynika głównie z niestabilnego opływu powierzchni łopaty turbiny wiatrowej.

Główną tezę pracy jest założenie, że prętowe generatory wirów redukcją pęcherz oderwania, zmniejszając w ten sposób hałas aerodynamiczny, przy czym jednak mogą one działać, jako dodatkowe źródło hałasu. Celem pracy było więc zbadanie czy teza ta jest słuszna, do czego niezbędne było zrozumienie mechanizmów generacji i propagacji dźwięku oraz przygotowanie odpowiednich narzędzi badawczych. Tak więc szczegółowymi celami pracy, jakie postawiła sobie Doktorantka, było opracowanie i walidacja ogólnego kodu aeroakustycznego, bazującego na analogii akustycznej Ffowcsa-Williamsa i Hawkingsa (FW-H) przeznaczonego do określenia emisji i propagacji dźwięku oraz przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentu, w którym badano wpływ RVGs na emisję szerokopasmową generowaną przez łopatę turbiny.

W mojej ocenie podjęta badania, dotyczące kontroli opływu łopat turbin wiatrowych i związanych z tym zagadnieniem zjawisk aeroakustycznych, wpisują się w światowe tendencje rozwoju transportu, energetyki rozproszonej i zrównoważonego rozwoju. Uważam również, że tematyka badań oraz ich zakres został właściwie nakreślony i może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej. Należy również stwierdzić, że tytuł rozprawy jest dobrze dobrany i właściwie oddaje jej treść. Z formalnego punktu widzenia i obecnej klasyfikacji dyscyplin rozprawa, sytuuje się w **dyscyplinie inżynierii mechanicznej**.

2. Ocena szczegółowa.

W **Rozdziale 1**, Doktorantka, na wstępie, przedstawia podstawowe informacje dotyczące źródeł i propagacji hałasu w przemyśle transportowym i energetycznym oraz wyzwań stojących przed projektantami i producentami maszyn i urządzeń mającymi na celu ograniczenie hałasu, co wpisuje się kompleksowy program ochrony środowiska. Zwraca Ona uwagę, że choć współczesne badania zjawisk aeroakustycznych są często podejmowane, to rzadko dotyczą maszyn i urządzeń pracujących w warunkach pozanominalnych, co dotyczy również nowoczesnych turbin wiatrowych z osią poziomą. W tym też obszarze Doktorantka lokuje swoje

zainteresowania badawcze, wskazując równocześnie na analogie występujące pomiędzy wirującymi łopatom wirnika turbiny wiatrowej oraz łopatom wirnika śmigłowca. Wprowadzenie jest motywacją do zdefiniowania problemu, sformułowania hipotezy badawczej oraz głównego celu pracy jakim jest zrozumienie generacji i mechanizmu propagacji dźwięku pojawiającego się w wyniku ruchu obrotowego łopat wirnika, zwłaszcza w warunkach pozanominalnych. Szczególna uwaga została zwrócona na określenie wpływu, na emisję hałasu, prętowych generatorów wirów wzdłużnych (RVGs) montowanych w celu redukcji oderwania przepływu i poprawy sprawności.

Rozdział 2 zawiera szczegółowe informacje na temat aeroakustyki oraz różnych metod należących do grupy aeroakustyki obliczeniowej (CAA). Rozdział ten zawiera również omówienie analogii akustycznych, w tym wykorzystywanej w pracy analogii Ffowcs Williams–Hawkings’a (FW–H), powszechnie stosowanej do modelowania generacji dźwięku przez ruchome powierzchnie, w tym łopaty wirników turbin wiatrowych. Zawartość tego rozdziału świadczy, że Doktorantka dysponuje podstawową wiedzą oraz odpowiednim przygotowaniem do podjęcia tego trudnego tematu.

Rozdział 3 zawiera opis założeń, implementację i wstępną walidację kodu aeroakustycznego opartego na całkowym rozwiązaniu Farassata dla analogii akustycznej FW–H. Wstępna walidacja został przeprowadzona w oparciu o rozwiązania analityczne opracowane dla dwóch elementarnych źródeł akustycznych tj. monopol i dipol, jak również dla wirujących źródeł modelujących hałas wywołany wirującymi powierzchniami np. łopatom wirnika, tzw. thickness and loading noise. Jak wykazano w pracy wyniki obliczeń z wykorzystaniem kodu FW–H są w pełni zbieżne z rozwiązaniem analitycznym, przy względnym błędzie nie przekraczającym 0.5%.

Większym wyzwaniem były, opisane w **Rozdziale 4**, obliczenia przeprowadzone dla niskoczęstotliwościowego hałasu harmonicznego generowanego przez model wirnika śmigłowca w tzw. „zawisie”. Dane eksperymentalne do walidacji pozyskano z University of Maryland. Model eksperymentalny wirnika wykonany jest w postaci jednej nieskręconej, sztywnej łopatki o profilu NACA 0012 oraz przeciwwagi. Natomiast model obliczeniowy składał się z 2 łopatek, co jest najczęściej stosowanym rozwiązaniem w badaniach symulacyjnych. Mikrofon pomiarowy, rejestrujący, wybrany do porównania sygnał, znajdował się w odległości $2.4 R$ (średnicy wirnika) od osi obrotu i $1.63 c$ (ciężki) powyżej płaszczyzny wirnika. Do generacji danych wejściowych do obliczeń akustycznych wykorzystano uproszczoną metodę Blade Element Momentum Theory (BEMT), lub klasyczną metodę RANS. Również w tym przypadku uzyskano bardzo dobrą zgodność pomiędzy danymi literaturowymi a obliczeniami z wykorzystaniem kodu FW–H. Pewne zaobserwowane różnice, zwłaszcza jeżeli chodzi o wartość ujemnej wartości szczytowej oraz poziom OASPL, przypisano odbiciom niskoczęstotliwościowym, które mogą występować w pomiarowej komorze akustycznej i które nie są modelowane przez analogię FW–H. Zawarta w rozdziale analiza potwierdza krytyczne podejście Doktorantki do uzyskanych wyników.

Najważniejszymi, z punktu widzenia głównego celu pracy, są **Rozdziały 5 i 6**, z których 5 dotyczy analizy wpływu RGVs na hałas rotacyjny emitowany przez wirnik turbiny wiatrowej NREL Phase VI, natomiast **Rozdział 6** wpływu generatorów wirów na hałas szerokopasmowy dla płata typu DU96-W-180. W pierwszym przypadku model numeryczny został zwalidowany w oparciu o dostępne dane pomiarowe uzyskane w tunelu aerodynamicznym w Centrum Badawczym NASA Ames. Obliczenia aeroakustyczne zostały poprzedzone obliczeniami przepływowymi, w których wykazano, że zastosowanie RVGs powoduje zmniejszenie rozmiaru pęcherza oderwania, co prowadzi do 0,54% wzrostu momentu obrotowego i 0,67% wzrostu siły ciągu. Należy przy tym zaznaczyć, że RGVs były zainstalowane tylko blisko końcówki łopaty i na małym ok. 3.7% odcinku jej cięciwy. Tak jak poprzednio, uzyskane dane dotyczące rozkład ciśnienia na powierzchni łopaty wraz z jej kinematyką służyły jako informacja wejściowa dla kodu FW-H. Analizę akustyczną przeprowadzono w trzech różnych lokalizacjach obserwatora, zarówno w płaszczyźnie jak i poza płaszczyzną obrotową wirnika. Doktorantka wykazała, że nie występują znaczące różnice w poziomach ciśnienia akustycznego zarówno dla punktów pomiarowych znajdujących się w tzw. obszarze bliskiego, jak i dalekiego pola. Co pozwoliło jej sformułować wniosek, że RVGs nie powodują podwyższenia poziomu hałasu rotacyjnego, poprawiając jednocześnie właściwości aerodynamiczne wirnika.

Badania wpływu RGVs na hałas szerokopasmowy zostały przeprowadzone, przez Doktorantkę, w bezechowym, otwartym tunelu aerodynamicznym zlokalizowanym w laboratorium niskich prędkości Delft University of Technology. Pomiar przeprowadzono przy prędkości napływu 30 m/s i w zakresie kątów natarcia od -4° do 20° . Wykonanie profilu zostało poprzedzone obliczeniami RANS i zwalidowane danymi pomiarowymi zamieszczonymi w pracy Suryadi i inni (2015). Wykorzystano dwa rodzaje profilu DU96-W-180, pierwszy bez a drugi z taśmą zaburzającą (typu zig-zag) umieszczoną w odległości 5% cięciwy, po stronie ssącej oraz 10% cięciwy po stronie ciśnieniowej łopatki. Pomiaru pola prędkości z wykorzystaniem techniki PIV zostały poprzedzone wizualizacją olejową, dla kilku kątów natarcia, co pozwoliło na wskazanie obszaru oderwania i przyłgnięcia przepływu, jak również oddziaływania zarówno taśmy zaburzającej, jak również RVGs. Zaobserwowano, oczywistą tendencję, że redukcja obszaru oderwania w wyniku zastosowania RVGs, jest bardziej skuteczna dla profilu z naturalnym przejściem l-t niż dla profilu z przejściem wymuszonym. Do pomiaru hałasu wykorzystano, opisaną szczegółowo w pracy, technikę kształtowania wiązki akustycznej (ang. acoustic beamforming). Przeprowadzona analiza spektralna wykazała obecność różnych źródeł dźwięków tj. hałas generowany przez, krawędź natarcia, krawędzi spływu, płyty boczne itp. Opierając się na analizie spektralnej oraz całkowitym poziomie ciśnienia akustycznego SPL, Doktorantka stwierdziła, że RGVs redukuje hałas niskoczęstotliwościowy, związany z oderwaniem przepływu, choć z drugiej strony nieznacznie podnosi szum szerokopasmowy w obszarach wyższych częstotliwości. Interesująca jest interpretacja, w jaki sposób wiry strumieniowe generowane przez pręty mogą oddziaływać ze strukturami wirowymi w warstwie przyściennej, co prowadzi do modyfikacji poziom oraz spectrum dźwięku, generowanego przez profil łopatkowy, dla naturalnego i wymuszonego przejścia l-t. Rozwinięcia tego zagadnienia oczekiwałbym w trakcie obrony pracy.

Rozdział 7 zawiera zbiór najważniejszych obserwacji i wniosków sformułowanych w zasadniczej części pracy. Wnioski szczegółowe pozwoliły Doktorantce na stwierdzenie, że hipoteza badawcza sformułowana na początku pracy została potwierdzona.

4. Komentarze i uwagi dyskusyjne

Nie mam uwag krytycznych do pracy. Poniżej znajdują się jedynie kilka pytań, lub uwag o charakterze dyskusyjnym:

- proszę o uzasadnienie dlaczego prowadząc walidację obliczeń dla modelu wirnika śmigłowca wykorzystano dany punkt pomiarowy (w odległości 2.4 R oraz 1.63 c) ? Jakie inne dane były zawarte w dostępnej bazie danych i dlaczego tylko ten został uznany za reprezentacyjny?
- Badając wirnik NREL Phase VI stwierdzono, że RVGs nie powodują podwyższenia poziomu hałasu rotacyjnego. Pytanie, czy przy tak małej powierzchni, która została poddana modyfikacji wniosek jest wystarczająco wiarygodny?
- Proszę o wyjaśnienie, porównując wyniki wizualizacji na rys. 6.4.12, czy RVGs mogą oddziaływać w górę przepływu (na oderwanie laminarne)?
- Fig. 6.4.15; Metoda Clausera dla wyznaczania prędkości tarcia sprawdza się dla zerowego gradientu ciśnienia. Lokalizacja $x/c = 0.43$ znajduje się w obszarze dodatniego gradientu ciśnienia. Czy próbowano zastosować korektę oszacowania uwzględniając gradient ciśnienia?
- Fig. 6.5.20; Jaka jest przyczyna wzrostu SPL w funkcji AoA w zakresie powyżej 1500 Hz?
- Strona 122; Cennym uzupełnieniem byłaby informacja jaki jest wpływ kąta natarcia oraz RVGs na współczynnik oporu,
- Strona 118; Nieczytelne sformułowanie, lub brak części zdania. *“With increasing inflow angles, the emitted sound levels increase and the peak values emitted also shifts to lower frequencies at almost all frequencies.”*

5. Uwagi końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy istotnego z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego opisu zjawisk aeroakustycznych i oddziaływania na pole akustyczne generatorów wirów stosowanych w celu poprawy efektywności przepływowej. Tematyka jest ważna, ciekawa i zarazem bardzo ambitna. Praca jest bardzo obszerna, obejmująca szereg zagadnień, zarówno o charakterze podstawowym np. generacja i oddziaływanie elementarnych źródeł dźwięku itp., jak i o dużym poziomie złożoności, jak opływ wirujących łopat wirnika śmigłowca, czy turbiny wiatrowej. Obszerny zakres merytoryczny rozprawy świadczy o szerokiej i ugruntowanej wiedzy Doktorantki, jej kompetencjach, jak również o dużym nakładzie pracy poświęconym na przeprowadzenie szeregu obliczeń, pomiarów i analiz oraz na rzeczowy opis wyników, świadczący o dobrym zrozumieniu analizowanych zjawisk. Praca napisana została bardzo starannie, poprawnym językiem a układ rozdziałów jest logiczny i przejrzysty.

Rozprawa doktorska stanowi wartościowe opracowanie naukowe, a wyniki badań wzbogacają stan wiedzy dotyczący zjawisk aeroakustycznych występujących przy opływie łopat wirnika turbiny wiatrowej w obecności pasywnych metod kontroli przepływu. Dotyczy aktualnej tematyki badawczej i jest istotna z praktycznego i poznawczego punktu widzenia. Zawartość pracy oraz jej poziom merytoryczny świadczy, że Doktorantka dysponuje wiedzą oraz odpowiednim doświadczeniem w rozwiązywaniu problemów naukowych.

Reasumując uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Thanushree Suresh, jest opracowaniem naukowym, mającym odpowiednią wartość poznawczą oraz stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego co pozwala mi stwierdzić, że spełnia ona wymogi ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. 2022 poz. 574 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy rozprawy, solidnie przygotowany i merytoryczny opis stosowanych metod badawczych oraz oryginalne wyniki wzbogacające stan wiedzy dotyczący zjawisk aeroakustycznych występujących przy opływie wirnika turbiny wiatrowej wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pani mgr. inż. Thanushree Suresh.