

Prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Energetyki Przemysłowej
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań

Poznań, 15 lutego 2021 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Macieja Majchera pt.: Numeryczna analiza trójwymiarowych przepływów w kluczowych elementach wentylatorów osiowych

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Macieja Majchera stanowi pismo z dnia 23 grudnia 2021 r. Prof. dra hab. inż. Jerzego Małachowskiego przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna”.

Praca zawarta jest na 275 stronach i jest podzielona na 6 rozdziałów poprzedzonych: spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów, a w zakończeniu bibliografią liczącą 75 pozycji literaturowych związanych z tematem pracy. Uzupełnieniem pracy są 3 załączniki merytoryczne będące wynikiem zrealizowanych badań. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Stanisław Wrzesień a promotorem pomocniczym mjr dr inż. Michał Frant.

1. Uwagi wstępne

Postępy w budowie samolotów wymagają nowoczesnych metod projektowania. Metody te oparte są na przesłankach teoretycznych, metodach doświadczalnych i w ostatnich latach na wykorzystaniu pakietów numerycznej mechaniki w szczególności mechaniki płynów i termodynamiki. Opanowanie tych metod wymaga głębokiej wiedzy o równaniach opisujących zjawiska przepływowe, programach numerycznych wspomagających obliczenia i wiedzy z dziedzin pokrewnych. Szeroki zasób wiedzy mgra inż. Macieja Majchera pozwala na podjęcie tematu zaprezentowanego w Jego pracy doktorskiej.

2. Omówienie pracy

W celu osiągnięcia dużych strumieni objętości powietrza stosuje się wentylatory osiowe. Zatem niezwykle ważnym problemem jest ich konstrukcja zapewniająca stabilną pracę przy wysokiej sprawności. Wymagania te stawiają przed konstruktorami potrzebę wykorzystania nowoczesnych narzędzi obliczeniowych do projektowania wysokosprawnych wentylatorów. Wykorzystanie wentylatorów osiowych w lotnictwie jest tylko jednym z przykładów ich wykorzystania w praktyce. Innymi przykładami są wentylatory do wentylacji sztolni górniczych, hal produkcyjnych, galerii handlowych czy podziemnych garaży. Biorąc zatem pod uwagę ich szerokie zastosowanie w praktyce

oszczędność energii i co za tym idzie koszty eksploatacyjne, wyznaczają kierunek rozwoju metod projektowania tych maszyn.

Zrozumienie potrzeb projektowania współczesnych wentylatorów Autor ukazuje na tle ich historycznego rozwoju wynikającego z różnych potrzeb przemysłowych. Zastosowania wentylatorów osiowych doprowadziły do wyszczególnienia konstrukcji i ich podziału na wentylatory : śmigłowe, kanałowe, z kierownicami i przeciwbieżne. Autor szczegółowo omawia ich znaczenie w praktyce.

Podstawowe charakterystyki wentylatorów osiowych w funkcji strumienia objętości, to :

- charakterystyka przyrostu ciśnienia całkowitego,
- charakterystyka sprawności całkowitej,
- charakterystyka mocy.

Dla porównania różnych wentylatorów osiowych stosuje się wielkości (wskaźniki) bezwymiarowe takie jak : wskaźnik wydajności, wskaźnik spiętrzenia całkowitego, wskaźnik mocy, liczba szybkości i liczba średnicy. Autor szczegółowo omawia znaczenie tych wskaźników

Ważnym problemem staje się wybór metody projektowania kinematyki wirników. Jedną z metod jest metoda analityczna, która odnosi się do przepływu dwuwymiarowego (palisad płaskich). Ta metoda analityczna pozwala na określenie podstawowych parametrów palisady profilów. Metoda ta jednak nie uwzględnia trójwymiarowego charakteru przepływu jak również powstających strat przepływu. W celu wyboru właściwej metody projektowania należy uwzględnić przepływ rzeczywisty w którym występują między innymi straty : profilowe, straty szczelinowe, straty tarcia o powierzchnie ograniczające kanał łopatkowy, straty indukowane. Ponadto występują straty dodatkowe związane z oddziaływaniem zmiany kąta napływu na wieńce kierownicze czy wpływu odległości wieńca kierowniczego od wieńca wirnikowego. Autor omawia stronę fizyczną tych strat. W dalszych rozważaniach autor zwraca uwagę na charakterystykę oporu c_x dla pojedynczego profilu i tego samego profilu umieszczonego w palisadzie profilów, na przykładzie profilu NACA 65-410. Charakterystyki profilów pracujących w palisadzie profilów wyznacza się doświadczalnie. Naturalnym przeto następnym krokiem jest analiza metod doświadczalnych wyznaczania charakterystyk palisad. Temu celowi służą badania ilościowe przeprowadzane na stanowiskach znormalizowanych, których rodzaje w zależności od konfiguracji geometrycznych wentylatorów (według Polskiej Normy) przedstawia szczegółowo Autor. Następnie Autor omawia podstawowe metody oceny jakościowej przepływu przez wentylatory osiowe. Znaczenie tych metod ma zdaniem recenzenta podstawowe znaczenie dla zrozumienia fizyki zjawiska co w konsekwencji służy właściwemu wyborowi metody numerycznej z doбором siatki uwzględniającej występujące zjawiska.

Przedstawiony przez Doktoranta materiał świadczy o głębokim zrozumieniu problematyki badań teoretyczno-doświadczalnych w zakresie podejścia do projektowania wentylatorów osiowych.

Następnym krokiem jest przedstawienie równań opisujących przepływ turbulentny z zastosowaniem różnych modeli turbulencji w szerokim zakresie liczby Macha. *Ujęcie tej problematyki jest cenną wskazówką dla przyszłych użytkowników pakietów komputerowych z numerycznej mechaniki płynów.* Korzystanie z różnych pakietów obliczeniowych wymaga niekiedy dodatkowych obliczeń z zastosowaniem różnic skończonych, przeto Doktorant pokrótce opisał podstawowe schematy różnicowe.

Obszary obliczeniowe związane z maszynami przepływowymi są na ogół nieregularne i trójwymiarowe i metoda różnic skończonych jest dalece nieefektywna przy konstruowaniu siatek obliczeniowych i uwzględnianiu zakrzywień obszaru. Tutaj szczególnie przydatne są dwie metody, są to metoda elementu skończonego i metoda objętości skończonych; oczywiście są to metody różnicowe

jednakże w innym znaczeniu niż klasyczna metoda różnic skończonych. Cenne jest przedstawienie przez Doktoranta różnic pomiędzy tymi dwoma metodami komputerowej mechaniki z uwypukleniem ich zalet. Dopełnieniem przygotowań Doktoranta do postawienia tezy badań jest analiza obecnego stanu badań w zakresie projektowania wentylatorów osiowych z uwzględnieniem nie tylko sprawności lecz również oddziaływania na środowisko (hałas). Ten ostatni problem wymaga spełnienia dyrektywy unijnej obowiązującej od 2015 roku. Wiele metod projektowania wentylatorów osiowych opiera się na metodzie analitycznej (wcześniej omówionej przez Doktoranta) służącej jako pierwsze przybliżenie geometrii palisady kierownic i wirnikowej wentylatora. To pierwsze przybliżenie jest wykorzystywane w pakiecie ANSYS FLUENT numerycznej mechaniki płynów. Pakiety numerycznej mechaniki płynów pozwalają na przestrzenne kształtowanie łopatek, uwzględnienie promienia zaokrąglenia krawędzi natarcia i spływu. Wielu badaczy zajmowało się kształtowaniem obydwu tych krawędzi pod kątem uzyskania większej sprawności jak również obniżenia hałasu. Obserwacja przyrody (wieloryb humberk) nasunęła badaczom ideę sprawdzenia wpływu ząbkowania bądź to krawędzi napływu bądź spływu w sensie polepszenia sprawności i redukcji hałasu (efekt ząbkowania jest odczuwalny w pracy silników odrzutowych). Również ciekawym efektem jest pogrubienie w części środkowej strony ssącej łopatki. Numeryczna mechanika płynów pozwala na badania wpływu pochylenia czy skręcenia łopatki w celu zwiększenia sprawności. Zatem przeprowadzenie analizy numerycznej istotnie zmniejsza koszty w porównaniu z badaniami eksperymentalnymi. Nabyta przez Doktoranta wiedza o doświadczeniu badania wentylatorów osiowych stanowi pokłosie udziału w granicy projektu NBiR realizowanego przez Promotora poświęconego wentylatorom osiowym. Analiza stanu wiedzy w zakresie projektowania wentylatorów osiowych stała się podstawą do postawienia następującej tezy pracy doktorskiej, która brzmi :

Numeryczna analiza pól przepływu czynnika roboczego w kluczowych elementach wentylatorów osiowych pozwala na skuteczną eliminację obszarów niewłaściwych struktur przepływów wpływających na sprawność wentylatorów.

Pierwszym krokiem dla udowodnienia postawionej tezy było opracowanie modelu analitycznego wentylatora osiowego. Na podstawie dostępnej literatury [22,32,59,65] uznanych badaczy maszyn przepływowych i własnych rozwiązań autorskich związanych z szacowaniem strat Doktorant zaproponował algorytm projektowania wentylatorów osiowych. W celach porównawczych zaprojektowanych 2 wentylatorów osiowych Doktorant wykorzystał wentylator będący na wyposażeniu Laboratorium Mechaniki Płynów ITL WMUiL WAT. Efektem szczegółowych obliczeń było zaprojektowanie geometrii łopatek stojanowych i wirnikowych wentylatora osiowego a następnie wyznaczenia ich charakterystyk. Uzyskane charakterystyki sprawności dla pierwszego wentylatora (o strumieniu objętości $5\text{m}^3/\text{s}$ i przyroście ciśnienia całkowitego 400Pa) zgodnie z Rozporządzeniem Komisji Europejskiej nie spełniają jej wymogów. Przyczyną jest negatywny wpływ szczeliny wierzchołkowej. Doktorant dokonał zaprojektowania według tego samego algorytmu drugi układ łopatkowy wentylatora (o strumieniu objętości $8\text{m}^3/\text{s}$ i przyroście ciśnienia całkowitego 3300Pa). Otrzymane charakterystyki również nie czynią zadość wspomnianemu rozporządzeniu. Przed podjęciem przez Doktoranta badania przepływów trójwymiarowych z zastosowaniem metod numerycznej mechaniki płynów, Doktorant zbudował stanowisko doświadczalne zgodnie z Polską Normą (stanowiska te dla różnych konfiguracji pracy wentylatora osiowego zostały wcześniej omówione w pracy). Badania prowadzone na stanowisku doświadczalnym pozwalają na wyznaczenie podstawowych charakterystyk wentylatora osiowego. Stanowi to początkowy krok do badania przepływu przez wirnik wentylatora osiowego (bez i z palisadą kierowniczą) wspomnianymi metodami numerycznej mechaniki płynów. Zatem podstawowym elementem tych badań (niezależnie

od tego czy stosuje się metodę objętości skończonych czy elementów skończonych) jest generowanie numeryczne tych maszyn. Wstępne dane można uzyskać z projektowania dwuwymiarowego i badań doświadczalnych, są to : dane geometryczne łopatek, kąty ustawienia profilu wzdłuż wysokości wynikające z zasady stałego krętu, średnice wirnika i liczba łopatek.

Dobór siatki opisującej wirtualny model jest niezwykle ważny. Doktorant wykorzystał metodę inżynierii odwrotnej odtworzenia geometrii łopatek trzech rzeczywistych wieńców wirnikowych. Przepływ przez palisadę profilów o skończonej liczbie łopatek można rozwiązać na dwa sposoby, mianowicie :

- ujmując wszystkie łopatki żądając spełnienia równości wszelkich pól na kącie 0 i 360 stopni,
- biorąc pod uwagę kanał przepływowy i przyjmując warunki okresowości na liniach prądu (ogólniej na liniach równoległych wychodzących z krawędzi napływu i spływu).

To drugie podejście wymaga dodatkowego założenia stacjonarności przepływu. Linie okresowości występują jeśli weźmie się pod uwagę pojedynczy opływający profil. To podejście jest oprogramowane w systemie ANSYS FLUENT. Doktorant szczegółowo pokazuje etapy tworzenia profili i omawia różne rodzaje podstawowych elementów objętościowych. Istotnym elementem obliczeń numerycznych jest właściwy dobór siatki obliczeniowej szczególnie w obszarach o dużych gradientach ciśnienia. Doktorant dokonuje weryfikacji symulacji numerycznych przez porównania otrzymanych wyników z eksperymentalnymi dla pięciu rodzajów siatek. Istotna ocena wpływu liczby elementów na wyniki porównawcze. Szczególnie istotne jest uwzględnienie warstwy przyściennej w której Doktorant, niezależnie od stosowanych siatek poza warstwą przyścienne, przyjął stałą liczbę elementów przyrównawczych. Dobór siatek wynikał z kryterium jak najmniejszego odchylenia obliczonego strumienia objętości od wynikającego z badań eksperymentalnych.

Podsumowując tę część pracy wymagającą szerokiej wiedzy i niezwykle dużego nakładu pracy włożonego w przygotowanie danych do systemu ANSYS FLUENT, oceniam wysoko osiągnięte przez Doktoranta wyniki.

W projektowaniu analitycznym płaskich palisad przyjmuje się szereg założeń upraszczających takich jak nieskończona liczba łopatek, brak szczeliny wierzchołkowej, zerowa grubość krawędzi napływu i spływu. W rzeczywistości należy uwzględnić grubość krawędzi napływu i spływu, zmienność kąta napływu po wysokości łopatki (łopatki skrzyśnięte), skończona liczba łopatek, wielkość szczeliny wierzchołkowej. Szczególnie luz wierzchołkowy generuje straty. Wpływ wielkości luzu wierzchołkowego dla założonych parametrów przepływu na wielkość przyrostu ciśnienia całkowitego dla dwóch nominalnych strumieni objętości pokazano na rysunkach 4.37 i 4.38 (podobny charakter mają charakterystyki mocy). Istotne było zbadanie rozkładu ciśnienia na łopatkach w funkcji wielkości luzu wierzchołkowego dla zadanych parametrów nominalnych. Powstawanie wirów wierzchołkowych wpływa istotnie na straty ciśnienia całkowitego. Ideą Doktoranta była ich minimalizacja poprzez wprowadzenie płyt brzegowych zmniejszających straty wierzchołkowe (występowanie płyt powoduje zwiększanie strat tarcia). Wprowadzenie płyt brzegowych jednakże nie spowodowało istotnego zmniejszenia wirów lecz ich przesunięcia i zmniejszenia intensywności. Efektem pozytywnym było zwiększenie statecznej pracy wentylatora. Wyniki z niezwykle ***szerokiej analizy przeprowadzonych obliczeń*** uwzględniającej wielkości szczeliny wierzchołkowej i wprowadzenia płyt brzegowych (wierzchołkowych) przedstawił w podsumowaniu punktu 4.7.1. Przeprowadzenie tak szerokiej analizy wpływu szczeliny wierzchołkowej i wpływie płyt brzegowych nie byłoby możliwe w procesie doświadczalnym ze względu na koszty jak również wizualizację powstających wirów w obrębie wierzchołkowym.

Na szczególne podkreślenie zasługuje wkład pracy Doktoranta w przeprowadzenie i interpretacje otrzymanych wyników.

Uwzględnienie wpływu grubości krawędzi spływu łopatki wirnikowej na charakterystyki wentylatorów stanowi następny etap badań Doktoranta z zastosowaniem metod numerycznej mechaniki płynów. W tym przypadku Doktorant wykorzystał wyniki realizowanego projektu z łopatkami NACA 65-810. Ze względu na technologię wykonania łopatek wirnika wentylatora polegającą na spawaniu łopatek wyciętych z arkusza blachy o stałej grubości krawędzi spływu (prosta technologia o małych kosztach) istotne stało się zbadanie wpływu grubości krawędzi spływu na charakterystyki wentylatora. Doktorant utworzył dwa modele geometryczne wieńców wirnikowych. Doktorant uwzględnił zaokrągloną jak również ostrą krawędź spływu. Szczególnie ważne ilościowe wnioski z przeprowadzonych badań między innymi to:

- zwiększenie grubości krawędzi spływu z 1 mm do 3 mm spowodowało 6% spadek ciśnienia całkowitego w obszarze dużych strumieni objętości,
- tak zwiększona grubość profilu powoduje istotny spadek sprawności wieńca wirnikowego,
- do grubości 1 mm krawędzi spływu, jej zaokrąglenia czy stępienia, nie obserwowano istotnego wpływu na charakterystyki wieńca wirnikowego,
- duże grubości przyczyniają się do powstania strat mieszania wpływających na spadek sprawności wieńców wirnikowych (następuje zmiana kierunku przepływu).

Ważnym wnioskiem z tych badań jest wskazanie obszarów mieszania powstawania niewłaściwej struktury przepływu wpływającej na pogorszenie charakterystyk wentylatorów osiowych.

Analiza numeryczna wpływu profilowania łopatek kierowniczych na wzrost ciśnienia całkowitego wentylatora osiowego stanowi cenne osiągnięcie Doktoranta. Wykazał On (dla analizowanych 2 przypadków strumienia objętości) wzrost wzrostu ciśnienia w punkcie znamionowym (1,33% dla pierwszej maszyny i 3,85% dla drugiej) jak również średniego względnego wzrostu ciśnienia w całym zakresie charakterystyki (3,85% dla pierwszej maszyny i 9,09% dla drugiej). Autor badał przy tym różne geometrie podkreślając na podstawie szeregu testów istotny wpływ profilowania łopatek kierowniczych na osiągi wentylatorów osiowych. Badania numeryczne pozwoliły Doktorantowi na uzyskanie pół prędkości pozwalających na identyfikację niewłaściwych struktur, które można wyeliminować przez profilowanie łopatek.

Niezwykle szerokie analizy numeryczne dotyczące wpływu grubości względnej profilów łopatek wirnikowych na charakterystyki (mocy, przyrostu ciśnienia całkowitego i sprawności) przeprowadził Doktorant opisując uzyskane wyniki i wnioski w punkcie 4.7.4. Wpływ zwiększania się względnej grubości łopatki ma istotny wpływ na sprawność, przesunięcie punktu separacji warstwy przyściennej i stanowi istotne wskazówki dla procesu projektowania łopatek wirnika.

Dobór liczby łopatek ma istotny wpływ na trójkąty prędkości. Realizacja dużej liczby łopatek zwiększa straty tarcia. Zatem szczególnie ważne jest określenie liczby łopatek w funkcji strumienia objętości i sprawności wentylatora. Te zagadnienia Doktorant przedstawił analizując wspomniane charakterystyki. Jednym z najważniejszych wyników z przeprowadzonych symulacji jest stwierdzenie o braku niepożądanych zjawisk (struktur) przepływowych wynikających ze wzrostu liczby łopatek w wieńcach wirnikowych.

Przedstawienie otrzymanych z analizy trójwymiarowej wyników jest szczególnie cenne i świadczy o głębszej wiedzy Doktoranta i ogromnym wkładzie pracy.

Dopełnieniem badań Doktoranta w zakresie optymalnego projektowania wentylatorów osiowych jest rozdział poświęcony porównaniu wyników analizy numerycznej z wynikami badań eksperymentalnych. Doktorant dokonał porównania podstawowych charakterystyk (przyrostu ciśnienia całkowitego, mocy i sprawności w funkcji strumienia objętości) 3 rzeczywistych wentylatorów osiowych z charakterystykami wynikającymi z symulacji numerycznych otrzymanych z wykorzystaniem pakietu programów ANSYS FLUENT. Badania eksperymentalne i symulacyjne Doktoranta obejmowały różne kąty ustawienia łopatek z różną liczbą łopatek. *Porównanie charakterystyk potwierdza wielką zaletę stosowania metod numerycznej mechaniki płynów w procesie projektowania wentylatorów osiowych co nie tylko stanowi obniżenie kosztów produkcji lecz również pozwala na analizę zjawisk przepływowych trudnych do zobrazowania eksperymentalnego.*

Ważnym elementem badań Doktoranta było porównanie zaproponowanej przez Doktoranta metody analitycznej i numerycznej. Doktorant sformułował zalecenia dla projektantów wentylatorów osiowych. Uzyskana wiedza i doświadczenie pozwoliły na wykonanie projektu zgodnie z zaproponowanym przez Doktoranta algorytmem analitycznym. Projekt ten to jednowirnikowy wentylator osiowy z kierownicą dla potrzeb górnictwa. W tym projekcie zawarto pełne doświadczenie Doktoranta w zakresie zastosowania algorytmu analitycznego, obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych. Prototyp zawierał 14 łopatek wirnikowych, 7 łopatek w wieńcu wirnikowym, grubość krawędzi spływu 3 mm i luz wierzchołkowy 3 mm. Łopatki wirnikowe były oparte o profil NACA 65-810 zaś dla łopatek kierowniczych zaproponowano łopatki z giętej blachy o grubości 3 mm . Do obliczeń numerycznych posłużono się geometrią rzeczywistą uzyskaną ze skanowania łopatek. Porównanie w szczególności charakterystyk numerycznych i doświadczalnych wykazuje dużą zgodność.

Osiągnięte wyniki świadczą o merytorycznym przygotowaniu Doktoranta do projektowania wentylatorów osiowych spełniających wymagania Rozporządzenia Komisji Unii Europejskiej. Zrealizowany projekt z udziałem Doktoranta pozwolił na podniesienie sprawności wentylatora w stosunku do istniejącej wersji co stanowi cenny krok w projektowaniu wentylatorów osiowych spełniających wymagania wspomnianego rozporządzenia.

Podsumowując: Doktorant dokonał istotnego postępu w projektowaniu wentylatorów osiowych w oparciu o nowoczesne narzędzia numerycznej mechaniki płynów i badania eksperymentalne. Osiągnięte rezultaty są wynikiem ogromnej wiedzy Doktoranta w wielu obszarach związanych z maszynami przepływowymi.

3. Uwagi

W trakcie czytania pracy zauważyłem drobne nieścisłości językowe co nie umniejsza w **najmniejszym stopniu** merytorycznej wartości wyników osiągniętych przez Autora. Dla porządku wspomnę tylko, że powinno używać się : strumień objętości z oznaczeniem kropką nad Q. Raczej nie używałbym skrótu ww. lecz wyżej wymienione. W pracy zawartej na 275 stronach tylko w dwóch miejscach były literówki.

4. Podsumowanie

Doktorant dokonał szczegółowej analizy literatury przedmiotu i na podstawie własnych doświadczeń sformułował tezę swojej pracy :

Numeryczna analiza pól przepływu czynnika roboczego w kluczowych elementach wentylatorów osiowych pozwala na skuteczną eliminację obszarów niewłaściwych struktur przepływów wpływających na sprawność wentylatorów.

której słuszność w pełni potwierdził przeprowadzonymi badaniami.

Przeprowadzone badania Doktoranta mgr inż. Macieja Majchera jednoznacznie świadczą o wysokich Jego umiejętnościach do prowadzenia badań naukowych na wysokim poziomie naukowym zaś wnioski końcowe pracy wskazują na nowe kierunki badań służące rozwiązaniu szeregu problemów aplikacyjnych.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Majchera spełnia w sposób **nadmiarowy** wymogi obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę do Rady Dyscypliny Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa WAT o dopuszczenie mgr inż. Macieja Majchera do publicznej obrony recenzowanej pracy. **Jednocześnie uważam osiągnięcia zaprezentowane w rozprawie doktorskiej za niezwykle ważne do zastosowania w praktyce. Praca stanowi kompendium wiedzy nowoczesnego projektowania wentylatorów osiowych. Rozwiązane przez Doktoranta problemy teoretyczne potwierdzone badaniami eksperymentalnymi nadają recenzowanej pracy wybitny charakter, przeto stawiam wniosek o jej wyróżnienie.**



