

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Mateusza MICHALCZYKA
pt.: „MODYFIKACJA WIRÓW ZAŚMIGŁOWYCH I ICH WPŁYW NA CIĄG
ZESPOŁU WENTYLATORA OTUNELOWANEGO”
wykonanej
na Wydziale Inżynierii Mechanicznej w Wojskowej Akademii Technicznej
pod kierownictwem
dr. hab. inż. Krzysztofa SZAFRANA

1. PODSTAWA WYKONANIA RECENZJI

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej, nr 64/RDN IM/2023 z dnia 12.07.2023 roku oraz pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” WAT z dnia 20.07.2023 roku z załączoną rozprawą doktorską mgr. inż. Marcina Mateusza MICHALCZYKA pt. „Modyfikacja wirów zaśmigłowych i ich wpływ na ciąg zespołu wentylatora otunelowanego”. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Krzysztof SZAFRAN, a opiekunem pomocniczym dr inż. Adam DZIUBIŃSKI.

2. TREŚĆ I ZAKRES PRACY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zawiera 151 stron. Składa się ze spisu treści, symboli i akronimów, dziesięciu ponumerowanych rozdziałów, bibliografii, załącznika, spisu rysunków i ilustracji oraz spisu tabel. Literatura zawiera 66 pozycji z czego 1 artykuł jest współautorstwa Doktoranta. W pracy doktorskiej zamieszczono 115 rysunków i ilustracji, 22 tabele oraz załącznik zawierający wykresy charakterystyk aerodynamicznych profilu łopaty wirnika uzyskane za pomocą programu komputerowego XFOIL.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wstęp”, Doktorant zaprezentował historię rozwoju i zastosowań wentylatorów od początku lat 40-tych ubiegłego wieku. Obecnie napędy otunelowane są powszechnie stosowane jako źródło napędu: samolotów, samolotów operujących z krótkich pasów startowych, samolotów typu VTOL, wolno latających samolotów obserwacyjnych oraz helikopterów. Napędy otunelowane zyskują również popularność wśród

konstruktorów bezzałogowych statków powietrznych. Ponadto z uwagi na burzliwy rozwój napędów elektrycznych w lotnictwie tym bardziej zyskują popularność otunelowane wentylatory.

W drugim rozdziale zatytułowanym „Przegląd modeli aerodynamiki śmigła” zaprezentowano informacje na temat „Aerodynamiki śmigła”, a w nim ujęto :

- teorię strumieniową Rankine’a – Froude’a,
- teorię elementu łopaty śmigła,
- teorię strumieniową elementu łopaty śmigła,
- teorię wirową.

W podrozdziale „Aerodynamika wentylatora” przedstawiono strumieniową teorię śmigła obudowanego. Z przedstawionej analizy wynika, że zastosowanie śmigła otunelowanego ma sens przy niskich prędkościach lotu, ponieważ opór otunelowania wzrasta wraz ze wzrostem prędkości lotu. W związku z powyższym przyjmuje się, że śmigła otunelowane znajdują zastosowanie w samolotach nieprzekraczających prędkości rzędu 200 km/h.

Z kolei w podrozdziale „Elektryczny silnik bezszczotkowy” przedstawiono walory tych silników, które dzięki dużej sprawności, bezawaryjności silników bezszczotkowych oraz coraz to większej pojemności akumulatorów znalazły zastosowanie przede wszystkim w bezzałogowych statkach powietrznych ale również stosowane są w statkach powietrznych.

W rozdziale trzecim pt. „Teza pracy”, Doktorant przedstawił problem badawczy, twierdząc że bezszczotkowe silniki elektryczne pozwalają zaprojektować układ napędowy śmigło – otunelowanie, który nie posiada szczeliny bezpośrednio nad końcówką łopaty wirnika.

W wyniku przedstawionego problemu badawczego Doktorant założył wykazanie prawdziwości następującej tezy pracy tj. „Istnieje techniczna i ekonomiczna możliwość wykonania wentylatora z modyfikacją kształtu końcówek łopat i luzu wierzchołkowego oraz bez piasty ze zredukowanym oporem wywołanym zmodyfikowanym kształtem wirów zaśmigłowych”.

Doktorant określił cel pracy doktorskiej, którym jest ocena możliwości redukcji oporów indukowanych i oporów tarcia wentylatora otunelowanego o napędzie elektrycznym, dzięki umieszczenia silnika elektrycznego na zewnętrznym pierścieniu wirnika oraz przedstawił plan pracy koncepcji śmigła otunelowanego ze zmodyfikowanym kształtem szczeliny między zewnętrznym pierścieniem wirnika a otunelowaniem.

W części czwartej pracy pt. „Elektryczny wentylator ze zmodyfikowanym luzem szczelinowym” przedstawiono założenia teoretyczne i konstrukcyjne wentylatora o napędzie

elektrycznym ze zmodyfikowanym luzem szczelinowym. W prezentowanym silniku elektrycznym uzwojenie znajduje się wewnątrz struktury otunelowania, natomiast wirnik składający się z magnesów neodymowych umieszczony na zewnętrznej obręczy śmigła, pozwala na modyfikację szczeliny między śmigłem a otunelowaniem. W przedstawionej konstrukcji, szczelina nad końcówką łopaty wirnika została zastąpiona dwoma szczelinami znajdującymi się w pewnej odległości przed oraz za dyskiem roboczym wirnika.

Analizę wentylatora Doktorant oparł na koncepcji samolotu firmy Airbus E-Fan. Na podstawie dostępnej dokumentacji samolotu Airbus E-Fan przyjęto profil łopaty wirnika Eppler 387, natomiast przy otunelowaniu zastosowano profil aerodynamiczny Clark-Y oraz określono charakterystyki lotne samolotu Airbus E-Fan a także parametry konstrukcyjne badanego wentylatora.

Tematem piątego rozdziału jest „Dobór wentylatora”. W rozdziale przedstawiono parametry wentylatora oparte na analizie samolotu Airbus E-Fan oraz charakterystyki niezbędne do wyznaczenia geometrii śmigła. Przy doborze charakterystyk geometrycznych wirnika posłużono się metodą elementu łopaty z uwzględnieniem współczynnika Prandtl’a. Dla zadanej prędkości wirnika wyznaczono:

- prędkość końcówki łopaty śmigła poniżej 0,8 Macha,
- skok aerodynamiczny łopaty śmigła,
- skok geometryczny łopaty śmigła.

Z kolei dla dobranej wartości cięciwy wzdłuż rozpiętości $c=0,07$ m wyznaczono:

- kąt napływu strugi powietrza dla całej rozpiętości łopaty wirnika,
- kąt nastawienia łopaty względem płaszczyzny wirowania,
- kąt natarcia przekroju łopaty,

a następnie dla określonej wartości kąta napływających strug powietrza dla każdego przekroju elementu łopaty wirnika wyznaczono współczynniki siły nośnej i siły oporu oraz wartości siły ciągu i momentu jaki generuje wirnik.

W pracy przeprowadzono również analizę wpływu kąta natarcia otunelowania na warunki przepływu dla zakresu od -10° do $+10^\circ$ względem wektora napływających strug powietrza.

Doktorant dokonał również doboru wewnętrznej obręczy śmigła (obudowy piasty wirnika) w taki sposób aby możliwe było zbudowanie bezszczotkowego silnika elektrycznego.

W rozdziale szóstym pt. „Model numeryczny wentylatora”, Doktorant przeprowadził analizę badanego zespołu napędowego ze zmodyfikowanym kształtem luzu wierzchołkowego za pomocą programu CFD Ansys Fluent. W pierwszym modelu szczelina nad końcówką łopaty wirnika wynosiła 3 mm. Drugi model posłużył do analizy zmodyfikowanej geometrii luzu,

gdzie część otunelowania tworzy pierścień integralny z łopatomy wirnika. Za pomocą modelu trójwymiarowego przeanalizowano przypadek w którym profil lotniczy tworzący otunelowanie wirnika jest ustawiony pod kątem natarcia $\alpha=0^\circ$ do kierunku napływających strug powietrza oraz wyznaczono parametry przepływu w dysku wirnika. Wyniki z modelu trójwymiarowego dla kąta natarcia otunelowania $\alpha=0^\circ$ wykorzystano w analizie dwuwymiarowej. Posługując się modelem dwuwymiarowym przeanalizowano wpływ kąta natarcia otunelowania wirnika na zachowanie się zmodyfikowanej geometrii wentylatora w zakresie kątów natarcia od -10° do $+10^\circ$.

W rozdziale siódmym zatytułowanym „Wyniki”, przedstawiono „Wyniki analizy numerycznej 3D” uzyskane za pomocą trójwymiarowego modelu CFD dla całego analizowanego zakresu prędkości napływających strug powietrza dla prędkości obrotowej śmigła równej 9600 obr/min. W wyniku przeprowadzonej analizy Doktorant przedstawił:

- charakterystyki śmigła,
- charakterystyki wentylatora,
- charakterystyki wentylatora z odsuniętymi szczelinami.

Dokonał porównania kształtu wiru końcówki łopaty wentylatora w warunkach statycznych oraz przedstawił intensywność wirów w przepływie przy powierzchni wewnętrznej zmodyfikowanego wentylatora.

W podrozdziale „Wpływ położenia szczelin oraz kąta natarcia otunelowania na wartość generowanego ciągu”, Doktorant zbadał wpływ umiejscowienia szczelin przed i za wirnikiem oraz wpływ zmiany kąta natarcia otunelowania na generowany ciąg wentylatora.

Ponadto wykazał różnice w uzyskanej sile ciągu między modelami 2D oraz 3D dla wentylatora wirnika i otunelowania w zakresie prędkości przelotowej od 0 do 40 m/s.

Wpływ rozmieszczenia szczelin na wartość generowanego ciągu zbadał dla 9-ciu różnych przypadków rozmieszczenia szczelin między pierścieniem wirnika a otunelowaniem wentylatora. Szczeliny umiejscowiono w trzech różnych odległościach przed i za wirnikiem.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń przedstawił:

- rozkłady ciśnienia oraz prędkości osiowej dla modelu 2D i 3D,
- ciąg generowany przez wirnik model 2D oraz 3D w funkcji prędkości przelotowej,
- wpływ położenia szczelin na siłę ciągu uzyskaną na powierzchni otunelowania.

Z przedstawionej analizy wynika, że największy wpływ rozmieszczenia szczelin widoczny jest na małych prędkościach lotu i maleje wraz ze wzrostem prędkości lotu. Oznacza to, że im dalej położona jest szczelina przed wirnikiem tym mniejszy ciąg powstaje na otunelowaniu wentylatora. Natomiast rozkład ciśnienia dla prędkości przelotowej równej 1 m/s jest

porównywalny dla wszystkich badanych przypadków rozmieszczenia szczelin, jak również umiejscowienie szczelin ma minimalny wpływ na wartość ciągu generowanego przez wentylator.

W badaniach Doktorant sprawdził również wpływ kąta natarcia profilu tworzącego otunelowanie na zachowanie się ciągu wentylatora. Tak jak w poprzednim przypadku obliczenia przeprowadził dla 9-ciu wersji rozmieszczenia szczelin między otunelowaniem a wirnikiem. Wpływ kąta natarcia otunelowania zbadał w zakresie od -10° do $+10^\circ$ z separacją co 5° . W wyniku przeprowadzonych obliczeń przedstawił wpływ kąta natarcia otunelowania na wartość siły ciągu:

- generowanego przez wirnik przy prędkości 1 m/s;
- uzyskanej na powierzchni otunelowania przy prędkości 1 m/s;
- zespołu napędowego przy prędkości 1 m/s;
- zespołu napędowego dla prędkości napływających strug powietrza $V=10,20,30$ i 40 m/s.

Doktorant dokonał analizy wyników z uzyskanych obliczeń z których wynika, że:

- wraz ze wzrostem kąta natarcia otunelowania wzrasta wpływ szczeliny na wydatek masowy przed wirnikiem;
- przy skrajnym dodatnim kącie natarcia otunelowania najkorzystniejsze jest umieszczenie szczeliny przed wirnikiem jak najbliżej punktu spiętrzenia profilu otunelowania, natomiast szczelinę za wirnikiem jak najdalej od krawędzi sływu łopaty;
- ze wzrostem prędkości przelotowej wzrasta wpływ położenia szczelin na wartość generowanego ciągu uzyskując największą wartość przy kącie natarcia -5° . Za wyjątkiem prędkości przelotowej równej 40 m/s, gdzie zespół napędowy generuje niski ciąg w zakresie kątów natarcia otunelowania od -1° do 6° . Na co ma wpływ grubość profilu otunelowania stwarzającego opór.

W podrozdziale 7.3 Doktorant dokonał korelacji między modelami 2D oraz 3D dla przypadku zmodyfikowanego wentylatora.

W rozdziale ósmym pt. „Wyniki”, Doktorant przedstawił wnioski z badań wpływu zmiany kształtu wiru zaśmigłowego polegającej na eliminacji szczeliny między końcówką łopat wirnika a wewnętrzną powierzchnią otunelowania na ciąg zespołu wentylatora otunelowanego.

Wykonane przez Doktoranta analizy potwierdziły, że:

- 1) Wyeliminowanie szczeliny nad końcówką łopaty wirnika oraz zaproponowanie integralnego z wirnikiem obracającego się pierścienia wpływa na kształt powstającego wiru zaśmigłowego. Z badań wynika, że brak szczeliny nad końcówką łopaty wirnika

w warunkach statycznych spowodował zwiększenie sprawności analizowanego zespołu napędowego (o 14%) względem wentylatora z trójmilimetrową szczeliną nad łopata wirnika;

- 2) Kąt natarcia otunelowania ma wpływ nie tylko na wartość ciągu jaki generuje samo otunelowanie, ale także na wartość ciągu jaki generuje wirnik;
- 3) Największą wartość generowanego ciągu dla wentylatora uzyskano przy prędkości przelotowej równej 1 m/s.

Poza tym zaproponowana przez Doktoranta modyfikacja wentylatora pozwala całkowicie zrezygnować z piasty, a tym samym zminimalizować opór jakie ona stawia. Rozwiązanie to narzuca łożyskowanie śmigła na zewnętrznym pierścieniu, co powoduje odciążenie piasty i dociążenie zewnętrznej średnicy wirnika.

- 4) Zaproponowana modyfikacja wentylatora wpływa pozytywnie na sprawność układu przy relatywnie małych prędkościach lotu;
- 5) Z porównania parametrów przepływu na powierzchniach kontrolnych blisko krawędzi natarcia oraz krawędzi spływu wirnika, modelu 3D z modelem dwuwymiarowym wynika, że średnia wartość ciśnienia oraz prędkość osiowa jest większa na powierzchniach kontrolnych w modelu dwuwymiarowym.

Tematem dziewiątego rozdziału pracy jest „Model ekonomiczny”, w którym Doktorant przedstawił biznes plan, techniczne studia wykonalności oraz proces wdrożenia nowego zespołu napędowego do produkcji seryjnej.

W rozdziale dziesiątym pt. „Dalsze prace”, przedstawił nowe rozwiązania możliwe do zastosowania w zaproponowanym wentylatorze m.in.:

- badania związane z wyeliminowaniem obudowy piasty,
- badania związane z kształtem szczelin między wirnikiem a statycznym fragmentem otunelowania,
- badania związane z profilami lotniczymi.

3. OCENA MERYTORYCZNA PRACY

Temat rozprawy doktorskiej podjęty i opracowany przez mgr. inż. Marcina Mateusza MICHALCZYKA, uważam za dysertabilny i niezwykle istotny pod względem naukowym i użytecznym.

Praca doktorska ma charakter analityczny i poświęcona jest badaniom zmian kształtu wiru zaśmigłowego otunelowanego zespołu napędowego, który powstaje dzięki zastosowaniu niekonwencjonalnego napędu elektrycznego.

Doktorant przedstawił w pracy model innowacyjnego elektrycznego zespołu napędowego, w którym szczegółowo omówił problematykę zastosowania elektrycznych napędów w lotnictwie. Zaprezentował prototypy napędów eksploatowanych w statkach powietrznych oraz koncepcje przyszłych statków powietrznych z napędem elektrycznym.

Doktorant zaproponował innowacyjne rozwiązanie techniczne polegające na umieszczeniu silnika elektrycznego na zewnętrznym pierścieniu wirnika i wynikające z tego możliwości zmiany kształtu wirów na końcówkach łopat śmigła.

W pracy Doktorant przeprowadził badania wpływu osiowego położenia szczelin w otunelowaniu na generowany ciąg otunelowanego zespołu napędowego oraz przeprowadził analizę dla kilku wybranych kątów natarcia otunelowania. Dokonał analizy wpływu zaproponowanych modyfikacji wentylatora dla prędkości rzędu 180 km/h.

Do dyskretyzacji i numerycznego rozwiązania cząstkowych równań różniczkowych opisujących mechanikę płynów zastosował oprogramowanie komputerowe Ansys Fluent za pomocą którego opracował modele komputerowe wiernie odzwierciedlające badane zjawiska fizyczne.

Doktorant przeprowadził badania porównawcze, sprawdzające zachowanie się wentylatora przy wybranych zmiennych parametrach konstrukcyjnych za pomocą dwuwymiarowych modeli numerycznych mechaniki płynów 2D, a wybrane warianty wentylatora skorelował z trójwymiarowym modelem numerycznym mechaniki płynów 3D.

Wobec powyższego mogę stwierdzić, że Doktorant zrealizował wyznaczony przez siebie cel pracy, a sformułowana w rozprawie doktorskiej teza pracy tj. „Istnieje techniczna i ekonomiczna możliwość wykonania wentylatora z modyfikacją kształtu końcówek łopat i luzu wierzchołkowego oraz bez piasty ze zredukowanym oporem wywołanym zmodyfikowanym kształtem wirów zaśmigłowych”, została wykazana jako możliwa do zrealizowania.

4. UWAGI

Tekst dysertacji napisany jest w sposób zrozumiały i przejrzysty. Przy ogólnej poprawności językowej pracy Doktorant nie ustrzegł się błędów gramatycznych, interpunkcyjnych i niejasności interpretacyjnych m.in.:

- str. 7 – sformułowanie „ V_1 - prędkość daleko za śmigłem”;
- str. 11 – sformułowanie „rozmieszczenie elektrycznych śmigieł wzdłuż rozpiętości płata”;

- str. 22 – różne oznaczenia np. model statku bezzałogowego AD-15 a na rys. 14 samolot bezzałogowy AD-150;
- str. 36 – Tabela 1. Nieprecyzyjne określenie powierzchni kontrolnych śmigła: daleko przed śmigłem, tuż przed śmigłem, tuż za śmigłem, daleko za śmigłem;
- str. 53 – rozbieżności w oznaczeniach np. na rys. 40 - sprawność śmigła obudowanego w funkcji współczynnika siły ciągu; to samo na rys. 41 wykres funkcji oporu pierścienia;
- str. 63 – wzór (5.1) i wzór (5.2) różne wartości parametru V_k ;
- str. 68 – błędne opisanie rysunku;
- str. 71 – różne oznaczenia promienia śmigła „r” i „R”;
- str. 72 – sformułowanie „kąta natarcia otunelowania α ”, może właściwsze byłoby sformułowanie „kąta nastawienia otunelowania”;
- str. 133 – w rozdziale dziewiątym pt. „Model ekonomiczny”, widziałbym bardziej przedstawienie korzyści ekonomicznych jakie niesie nowy rodzaj napędu w stosunku do klasycznego.

Ogólne uwagi:

- Brak uporządkowania wyników obliczeń dla rozpatrywanych przypadków wentylatora otunelowanego tj. samego wirnika bez otunelowania, wirnika z otunelowaniem i ze szczeliną wierzchołkową oraz wentylatora otunelowanego z różnymi konfiguracjami szczelin;
- Zastosowana symbolika w „liście symboli” w wielu przypadkach nie odpowiada symbolice występującej w treści pracy doktorskiej takich jak symbol M dla liczby Macha i momentu obrotowego, promień śmigła R i r, średnica śmigła D i d, współczynniki aerodynamiczne C_x , C_z oraz C_D i C_L itp;
- Zamieszczone w pracy doktorskiej rysunki z pozycji literaturowych są niespójne z symboliką przyjętą w pracy np. rys. 48;
- W pracy doktorskiej występuje wiele symboli niezdefiniowanych.

Ponadto proszę Doktoranta o wyjaśnienie poniższych kwestii:

- 1) Skąd wynika dobór szczeliny wierzchołkowej 3 mm i czy Doktorant rozważał szczeliny wierzchołkowe mniejsze niż 3 mm;
- 2) Czy Doktorant analizował masę zespołu wentylatora otunelowanego w którym uzwojenie znajduje się wewnątrz struktury otunelowania i wirnika składającego się z magnesów neodymowych umieszczonych na zewnętrznej obręczy śmigła w stosunku do klasycznego zespołu napędowego.

W zakończeniu stwierdzam, że wniesione przeze mnie przykładowe zastrzeżenia nie mają wpływu na moją pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej jako całości.

5. WNIOSEK KOŃCOWY

W podsumowaniu swojej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego modyfikacji wirów zaśmigłowych i ich wpływu na ciąg zespołu wentylatora otunelowanego.

Uważam, że mgr inż. Marcin Mateusz MICHALCZYK rozwiązał w rozprawie doktorskiej postawiony cel pracy, a tym samym tezę pracy.

Doktorant posiada znajomość mechaniki, mechaniki płynów oraz współczesnych technik obliczeń numerycznych.

Doktorant wykazał umiejętność samodzielnej pracy naukowo - badawczej i kierowania badaniami naukowymi.

Biorąc pod uwagę wartości poznawcze i użytkowe uzyskanych rezultatów, dojrzałość merytoryczną mgr. inż. Marcina Mateusza MICHALCZYKA, w zakresie modyfikacji wirów zaśmigłowych i ich wpływu na ciąg zespołu wentylatora otunelowanego, recenzowaną rozprawę oceniam jako bardzo dobrą, spełniającą ustawowe wymagania stawiane rozprawom.

W związku z powyższym przedstawiam Szanownej Radzie Dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej, wniosek o przyjęcie rozprawy jako podstawy do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych i dopuszczenie mgr. inż. Marcina Mateusza MICHALCZYKA do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.