Dr hab. inż. Mirosław Rodzewicz – prof. PW
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej PW
Zam. 02-776 Warszawa, ul. Hawajska 10 m. 17

W-wa 10.08.2023

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Mateusza Michalczyka

p.t. „Modyfikacja wirów zaśmigłowych i ich wpływ na ciąg zespołu wentylatora otunelowanego"

wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna" Wojskowej Akademii Technicznej - prof. dr. hab. inż. Jerzego Małachowskiego, z dnia 20.07.2023, wystosowanego na podstawie uchwały w/w Rady Dyscypliny Naukowej z dnia 12.07.2023.

Napęd śmigłowy jest bez wątpienia najstarszym i wciąż najbardziej popularnym rodzajem napędu statków powietrznych i urządzeń latających poruszających się w zakresie małych i średnich prędkości (do ok. 0.6 Ma). Mimo upływu dekad, podczas których śmigła lotnicze przeszły ewolucję ukierunkowaną na zwiększenie efektywności osiągając niemal maksimum teoretycznych możliwości ten rodzaj napędu jest nadal tematem prac badawczych. Choć zdawałoby się, że niewiele już można poprawić– to wciąż pojawiają się nowe koncepcje i opracowania naukowe dot. poprawy różnych właściwości klasycznych napędów śmigłowych (np. obniżenia hałasu, możliwości złożenia łopat śmigła, gdy nie potrzeba wytwarzać ciągu, itd.). Jedną z linii rozwojowych napędów śmigłowych są śmigła otunelowane lub wentylatory napędowe, gdzie przy generowaniu ciągu istotny jest udział nie tylko wirnika, ale też otunelowania. Ten rodzaj napędu ma również kilkudziesięcioletnią historię, w której początkowo w okresie nowości koncepcji i związanych z nią nadziei można zaobserwować etap dużego zainteresowania konstruktorów i licznych prób zastosowania do różnych statków powietrznych, a następnie etap pewnego zastoju związanego z oceną bilansu osiąganych w praktyce korzyści i problemów pochodnych. Równoległy rozwój technologii zwłaszcza w dziedzinie napędów elektrycznych czy też w dziedzinie addytywnych technik wytwarzania stwarza dziś zupełnie nowe możliwości rozwojowe dla tej grupy napędów śmigłowych. Powstało kilka b. innowacyjnych koncepcji konstrukcyjnych wiążących się np. z możliwością zintegrowania napędu elektrycznego z otunelowaniem wirnika, co mogłoby umożliwić pozbycie się wielu wad „klasycznego" napędu otunelowanego.

Przedstawiono do recenzji rozprawa doktorska doskonale wpisuje się w ten nowy trend badań naukowych.

Mgr inż. Marcin Mateusz Michalczyk zajął się dysertabilnym tematem związanym z modelowaniem numerycznym przepływu powietrza przez wentylator otunelowany, w którym zastosowano alternatywne rozwiązanie eliminujące szczelinę między końcówką wirującej łopaty wirnika a ścianką wewnętrzną tunelu (w skrócie: **szczeliną wierzchołkową wirnika**). W „klasycznych" napędach otunelowanych szczelina ta w b. istotny sposób wpływa na efektywność zespołu napędowego powodując straty energetyczne i obniżając generowany ciąg, a możliwości jej zmniejszenia są ograniczone np. z powodu drgań, którym podlega zespół napędu otunelowanego. W rozwiązaniu rozważanym w niniejszej dysertacji końcówki łopat wirnika zintegrowano z powierzchnią stanowiącą

rodzaj pierścienia, którego kształt wpisuje się w profil aerodynamiczny otunelowania. Nie ma tu, zatem luzu między łopatką a ścianką tunelu, ale za to z konieczności pojawiają się dwie szczeliny: przednia i tylna w płaszczyznach prostopadłych do osi tunelu oddzielające część wirującą od części statycznej zespołu wentylatora otunelowanego (w skrócie: **szczeliny wieńca wirnika**). Modyfikacja ta w szerszym zamyśle Autora związana jest z pomysłem zastosowania specjalnie skonstruowanego na potrzeby tego projektu elektrycznego silnika napędowego zintegrowanego z otunelowaniem i mającego służyć do napędzania wirnika siłami stycznymi do zewnętrznej powierzchni pierścienia spinającego łopaty wirnika. Jak wspomniano wcześniej, byłoby b. nowoczesne rozwiązanie. Autor pracy skupił swoją uwagę na konsekwencjach wynikających z istnienia szczelin wieńca wirnika - przejawiających się w postaci wirów interferujących z wirami generowanymi przez łopaty wirnika. Jak okazało się z badań przeprowadzonych przez Autora – wiry te mogą wpływać na ogólną sprawność napędu i generowany ciąg. Autor podjął próbę zbadania możliwości minimalizacji wpływu tych szczelin poprzez zmianę ich położenia na profilu tunelu.

Przygotowując swoje analizy Autor korzystał z bogatego zestawu materiałów źródłowych. Literatura zawiera 66 pozycji, w tym 21 odnośników do stron internetowych. Wśród zbioru bibliografii wymieniono 1 artykuł współautorstwa Autora dysertacji. Wszystkie cytowane pozycje odnoszą się bezpośrednio do zasadniczego tematu rozprawy. W pracy zamieszczono 115 rysunków i ilustracji oraz 22 tabele, a ponadto załącznik zawierający 22 wykresy charakterystyk aerodynamicznych profilu łopaty wirnika wygenerowanych przy użyciu programu X-Foil.

Rozprawa przygotowana jest w sposób dość przejrzysty – jednak analizując tekst szczegółowo nasuwa się kilka uwag, które zostaną opisane dalej.

Tekst pracy podzielony jest na 10 rozdziałów uzupełnionych o spis symboli, listę akronimów, spis bibliografii, spis rysunków i ilustracji, spis tabel oraz wspomniany wyżej załącznik.

W rozdziale 1 (liczącym 11 stron) zawierającym informacje wstępne przedstawiono motywację podjęcia tematu dysertacji, zamieszczono przegląd konstrukcji lotniczych, w których zastosowano śmigła otunelowane lub wentylatory otunelowane, zamieszczono również rozdział dotyczący przyszłości otunelowanych wentylatorów napędowych wskazując, że ten rodzaj napędu jest przedmiotem zainteresowania znaczących firm lotniczych.

W rozdziale 2 (19 str.) zestawiono i opisano klasyczne modele fizyczne i modele matematyczne dot. aerodynamiki śmigła i aerodynamiki wentylatora otunelowanego. Przedstawiono również model obliczeniowy elektrycznego silnika bezszczotkowego. Część z opisanych tu modeli zostało użyte przez Autora do wstępnych obliczeń projektowych wentylatora otunelowanego.

Rozdział 3 (2 str.) poświęcony jest przedstawieniu problemu badawczego sformułowanemu do rozwiązania w tej pracy, przedstawieniu tezy pracy, celów podjętych prac badawczych oraz planu tych prac. Wszystkie z wymienionych punktów zostały jasno sprecyzowane.

Rozdział 4 (5 str.) dotyczy przedstawienia autorskiej koncepcji konstrukcyjnej wentylatora otunelowanego z całkowicie wyeliminowanym luzem na końcówkach łopat wirnika. Opisano w nim założenia teoretyczne i projektowe założenia konstrukcyjne oraz przedstawiono projekt geometrii i struktury otunelowania, geometrię wirnika oraz wstępny projekt konstrukcyjny elektrycznego silnika

napędowego zintegrowanego ze strukturą tunelu oraz obręczą wirnika. Zilustrowano to na rysunkach 2D oraz 3D.

Rozdział 5 (11 str.) poświęcony jest opisowi sposobu doboru geometrii wirnika wentylatora oraz wstępnym obliczeniom osiągów i parametrów pracy tego wirnika. Zawiera on również rozwinięcie opisu geometrii otunelowania ze wskazaniem czynników, które brane były pod uwagę przy projektowaniu.

Rozdział 6 (17 str.) jest jednym z najważniejszych rozdziałów rozprawy. Zawiera on opisy modeli numerycznych wentylatora otunelowanego. Opisy te są poprzedzone informacjami dot. algorytmów działania programu Ansys Fluent, objaśnieniem równań Naviera-Stokesa, na których bazują algorytmy tego programu, opisem fizyki warstwy przyściennej i objaśnieniem różnych modeli turbulencji dostępnych w programie (ze wskazaniem wyborów Autora dysertacji). Autor przedstawił szczegółowy algorytm przeprowadzanej analizy, warunki brzegowe dla utworzonych modeli 2D i 3D, oraz warianty modeli obliczeniowych wynikające z lokalizacji przedniej i tylnej szczeliny wieńca wirnika.

Rozdział 7 (34 strony) zawiera szczegółowe wyniki dla poszczególnych modeli obliczeniowych 2D i 3D zarówno wirnika bez tunelu jak też wirnika otunelowanego z uwzględnieniem różnych lokalizacji szczelin wieńca wirnika. Rozdział zawiera również wyniki obliczeń ciągu dla różnych kątów natarcia profilu tunelu zmieniających parametry konfuzora/dyfuzora wentylatora otunelowanego. Przeprowadzono szczegółową analizę obliczonych parametrów przepływu oraz osiągów modeli 2D i 3D wirnika nieosłoniętego dodając także porównanie z rezultatami otrzymanymi z zastosowaniem klasycznej teorii elementu łopaty, oraz zamieszczono analizę parametrów przepływu dla wszystkich konfiguracji położeń szczelin wieńca wirnika i kątów natarcia profilu tunelu. Rozdział ten jest najważniejszą częścią pracy.

Rozdział 8 dotyczy wniosków. Wnioski te dotyczą zarówno efektów związanych z przedmiotem badań, czyli analizą zjawisk zachodzących w przepływie w związku z dokonaną modyfikacją konstrukcji napędu otunelowanego i pozbyciu się luzu wierzchołkowego na łopatach wirnika, jak też porównania różnic rezultatów obliczeń CFD dla modeli 2D i 3D i wytłumaczenia, z czego te różnice wynikają.

Rozdział 9 (4 str.) p.t. Model ekonomiczny" – jest dodatkową częścią pracy zawierającą ogólne informacje z zakresu planowania przedsięwzięcia biznesowego polegającego na uruchomieniu produkcji lekkich statków powietrznych przeznaczonych do transportu w gęsto zaludnionych obszarach. W domyśle chodzi o statki powietrzne, w których mogłyby znaleźć zastosowanie wentylatory napędowe podobnego typu, jak ten analizowany w rozprawie. Rozdział ów ma b. ogólny związek z merytoryczną częścią rozprawy.

Rozdział 10 (2 str.) dotyczy obszaru dalszych prac związanych z analizowanym w rozprawie napędem otunelowanym. Mają one dotyczyć zwłaszcza tego, co było sygnalizowane, ale nie zostało podjęte w rozprawie, np. eliminacji ciała centralnego, (czyli obudowy piasty), modyfikacji kształtu szczelin rozdzielających wieniec wirnika i modyfikacji kształtu wirnika poprzez zastosowanie cienkich, nadkrytycznych profili aerodynamicznych.

Nowości naukowe stanowiące oryginalny dorobek doktoranta

Uważam, że oryginalnym dorobkiem Autora rozprawy jest szczegółowa analiza efektów zastosowań różnych modeli obliczeniowych dla otunelowanego wentylatora napędowego i porównanie rezultatów dot. parametrów przepływu oraz osiągów, umożliwiające wyciągnięcie wniosków odnośnie zakresu stosowalności modeli 2D, 3D, czy też klasycznej teorii elementu łopaty. Obiektem analizy był wentylator otunelowany, w którym zaplanowano użycie nowatorskiego sposobu napędu wirnika wentylatora, który przy okazji umożliwiłby eliminację głównej wady tego rodzaju napędu, czyli luzów między końcówkami łopat wirnika, a tunelem. Jak wspomniano już wcześniej, luzy te w b. istotny sposób wpływają na pogorszenie efektywności tego rodzaju napędów, gdyż generują wiry dysypujące energię. Mając z przeszłości własne doświadczenia z budowy oraz testów kilku różnych napędów otunelowanych (zarówno śmigieł jak i wentylatorów) od dawna myślałem o takim rozwiązaniu spodziewając się, że eliminacja w/w luzów przyniesie niemal wyłącznie korzyści. Teraz, jako recenzent przestudiowawszy z dużym zainteresowaniem analizy wykonane przez Autora dysertacji przekonałem się, że tego rodzaju modyfikacja wiązałaby się z pewnymi konsekwencjami obniżającymi spodziewane korzyści, gdyż w miejsce luzu wierzchołkowego pojawiają się dwie szczeliny w ściance wewnętrznej tunelu, które generując wiry w przepływie mogą dysypować energię i różnicę ciśnień przed i za wirnikiem. Co więcej Autor wykazał, że straty energetyczne wystąpić mogą również z powodu cyrkulacji powietrza wewnątrz przekroju tunelu, co dotychczas było nieoczywiste. W przypadku umieszczenia silnika elektrycznego wewnątrz obudowy tunelu ta cyrkulacja będzie konieczna do chłodzenia. Autor zwrócił uwagę, że zarówno rozmieszczenie, jak i kształt tych szczelin (normalnie czy ukośnie do powierzchni ścianki tunelu) może mieć duże znaczenie. Pokazanie zależności liczbowych dot. osiągów dla różnych kombinacji rozmieszczenia tych szczelin oraz wizualizacja symulacji numerycznej przepływów i wirów generowanych w obszarze wirnik/tunel dla różnej konfiguracji szczelin rozdzielających jest wg. mnie nowością naukową poszerzającą obecny stan wiedzy. Uważam, że badania opisane w dysertacji mogą przyczynić się do powodzenia materialnej realizacji tego ambitnego projektu i przejścia do badań eksperymentalnych.

Krytyczna ocena rozprawy

Doceniając merytoryczną stronę rozprawy – zamieszczam listę uwag, które nie podważają pozytywnej oceny merytorycznej, lecz mają posłużyć do poprawy warsztatu badawczego i być pomocą przy przygotowaniu publikacji dot. tematu rozprawy i wyników dalszych prac w tym kierunku.

1. Rozprawa mogłaby być bardziej uporządkowana. Zdecydowanie brakuje w niej schematu blokowego działań podjętych w procesie formułowania i rozwiązywania problemu badawczego. Schemat ten powinien być zamieszczony np. w p-cie dot. planu pracy lub w rozdziale dotyczącym opisu wyników obliczeń. Na schemacie powinny być wymienione wszystkie przypadki dot. rozpatrywanych przez Autora modeli fizycznych wentylatora otunelowanego. Tych przypadków jest sporo, gdyż rozpatrywany był sam wirnik bez otunelowania, wirnik z otunelowaniem prezentujący klasyczne rozwiązanie ze szczeliną wierzchołkową, następnie różne przypadki zmodyfikowanego wentylatora otunelowanego z różnymi konfiguracjami szczelin rozdzielających wieniec wirnika. Wszystkie te przypadki powinny mieć zdefiniowaną - łatwą do skojarzenia symbolikę, do której powinny odnosić się prezentowane wyniki obliczeń. Znajdujący się w rozdziale 3 plan pracy przypomina raczej

krótkie podsumowanie pracy (napisany został w narracji pierwszoosobowej z użyciem czasu przeszłego). Brak schematu blokowego utrudnia czytanie najważniejszego rozdziału, w którym prezentowane są wyniki obliczeń i analiz dokonanych przez Autora. W relacjonowaniu tych wyników gubi się również Autor, który sprawozdając wyniki badań przypadku wirnika z otunelowaniem odsyła czytelnika do rysunków dot. przypadku wirnika bez otunelowania (tj. do Rys. 75 i 76 zamiast do Rys. 84). Brak jednoznacznej symboliki dla przypadków obliczeniowych czyni niezrozumiałym, co przedstawia Rys. 99 i Rys. 114; z opisu wynika, że w każdym z rysunków należy spodziewać się dwóch obrazków, a tymczasem prezentowane są cztery. Nie jest jasne, czego dotyczą te dwa nadmiarowe...

2. Autor zamieścił wprawdzie na początku pracy listę symboli, ale nie zadbał, aby była ona kompletna i nie stosował się do niej konsekwentnie w całym tekście rozprawy.
   Tak więc symbol "M" odnosi się w tekście rozprawy zarówno do momentu obrotowego jak też do liczby Macha. Na liście symboli zdefiniowany jest symbol „D", jako średnica śmigła oraz symbol „R", jako promień śmigła. W tekście jednak znajdują się wzory zawierające symbol „r", który interpretować należałoby jako promień rozpatrywanego przekroju wirnika, którego brak jest na liście symboli, natomiast w tabelach z wynikami obliczeń dla różnych promieni rozpatrywanych przekrojów zamiast „r" użyty jest niepoprawnie symbol „R", (którego znaczenie wszakże jest inne). W innych miejscach Autor używa wzorów, które zawierają niezdefiniowane symbole „d" (zamiast „D") lub „n" (zamiast „Ω"). W deklarowanej symbolice są współczynniki aerodynamiczne c_z i c_x, a na wykresach w pracy widnieją c_L i c_D, itd.
   Korzystając z modeli obliczeniowych zapożyczonych z literatury należało dostosować podane tam wzory do symboliki przyjętej w pracy, lub definiować je lokalnie.
3. Autor w tekście pracy odwołuje się do wielu pozycji literatury (podając odpowiednie referencje) i zamieszczając zaczerpnięte stamtąd wzory lub rysunki. Rysunki te jednak w podpisie nie mają referencji (a powinny, zwłaszcza, jeśli są kopiowane 1:1). Na wielu z tych rysunków występują oznaczenia niespójne z symboliką przyjętą przez Autora. Z reguły są to rysunki proste, które łatwo byłoby Autorowi przerysować (powołując się na źródło) stosując właściwą symbolikę, a ponadto poprawić graficznie te rysunki. Przykładem rysunku, który koniecznie należałoby poprawić jest Rys. 48. Służy on objaśnieniu skoku geometrycznego oraz skoku aerodynamicznego śmigła. Pokazane są tam trójkąty złożone z wektorów prędkości lub odcinków geometrycznych. W istniejącej wersji monochromatycznej, z użyciem linii o tej samej grubości rysunek ten jest mało czytelny. Ponadto występuje na nim symbol „n", „d" i „g" nieistniejące na liście użytych symboli. Główną wadą tego rysunku jest jednak to, że występująca tam linia styczna do płaskiej dolnej krawędzi profilu aerodynamicznego nie może służyć do wyznaczenia kąta natarcia profilu, gdyż nie jest to ani cięciwa profilu, ani linia zerowej siły nośnej, (jaka przecież występuje na Rys. 30 – zaczerpniętym z literatury dot. teorii elementu łopaty Drzewieckiego, cytowanej w tekście przez Autora. W niektórych miejscach tekstu występują niezdefiniowane symbole, np. na str. 97 symbol τ oraz C_{P_O}
4. Umieszczony na początku pracy przegląd istniejących rozwiązań oraz przykładów zastosowania wentylatorów lub śmigieł otunelowanych do napędów statków powietrznych jest ciekawy, ale brakuje w nim elementu analizy i syntezy. Można byłoby podjąć próbę zestawienia pewnych podstawowych parametrów fizycznych lub osiągowych wnioskując bądź z danych podawanych w opisach konstrukcji, bądź odwołać się do publikacji związanych z badaniem napędów otunelowanych, których jest niemało. Takie zestawienie mogłoby być

przydatne do późniejszej auto-oceny krytycznej wyników obliczeń uzyskanych przez Autora dysertacji.
Brak takiego porównania i przyjęcie postawy wyrażonej w zacytowanym poniżej fragmencie pracy: „Ponieważ weryfikacja wyników trójwymiarowych modeli CFD za pomocą testu nie jest częścią niniejszej pracy, do dalszych analiz porównawczych zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 6.2, założono, że wyniki uzyskane za pomocą trójwymiarowych modeli CFD są poprawne" - jest wadą tej pracy.

5. W rozdziale 4 w p-cie p.t. „Założenia teoretyczne" Autor przedstawia 3-wymiarowy model struktury konstrukcyjnej nowatorskiego rozwiązania wentylatora otunelowanego z napędem elektrycznym zintegrowanym z konstrukcją tunelu. O potencjalnych zaletach takiego rozwiązania wielokrotnie wspominałem w recenzji. Umieszczenie opisu takiego nowatorskiego rozwiązania w tym miejscu rozprawy sugeruje, że tak właśnie będzie wyglądać obiekt badań. Niestety w kolejnych punktach pracy Autor zajmuje się analizą skutków modyfikacji związanej jedynie z luzem wierzchołkowym. Fakt ten powinien być skomentowany przez Autora z podaniem zwięzłego wyjaśnienia, dlaczego został zawężony zakres analiz.

6. Praca zawiera bardzo interesujące wizualizacje symulacji numerycznej przepływów oraz porównania osiągów wentylatora z tym samym wirnikiem w różnych konfiguracjach (sam wirnik, wirnik otunelowany z klasyczną szczeliną wierzchołkową) oraz zmodyfikowany wirnik otunelowany z różnymi wariantami rozmieszczenia szczelin rozdzielających część ruchomą od statycznej. Cechą wspólną jest ta sama prędkość obrotowa. Z punktu widzenia konstruktora próbującego dobrać napęd do swojego samolotu – założenie, że będę porównywał ciąg dla tej samej prędkości obrotowej silnika jest niedobre. Dla konstruktora jednym z najważniejszych wskaźników jest bowiem moc niezbędna do lotu poziomego. Musi on więc dobrać silnik o odpowiedniej mocy oraz dobrać dostosowany do niego pędnik (śmigło lub wentylator), który tę moc skonsumuje z dużą sprawnością, bez wystąpienia niepożądanych zjawisk (np. oderwania na łopatach lub przekroczenia prędkości krytycznych na końcówkach wirnika). W pierwszym kroku należałoby rozpatrzyć sprawność zamiany energii elektrycznej w energię mechaniczną ruchu obrotowego, a w kolejnym kroku sprawność przetworzenia energii ruchu obrotowego w energię ruchu postępowego (czyli sprawność śmigła). Znając ograniczenia geometryczne konstruktor wyznacza maksymalną średnicę śmigła oraz maksymalny skok, przy którym nie wystąpi oderwanie, a następnie określa liczbę łopat, która pozwoli skonsumować dysponowany moment obrotowy silnika.
W wynikach otrzymanych z obliczeń Autora widać, że przy korzystnej konfiguracji szczelin oraz kąta natarcia profilu tunelu – moment obrotowy maleje przy tej samej prędkości obrotowej. To oznacza, że można zwiększyć skok łopat wirnika, albo zwiększyć liczbę łopat. Bilansując momenty obrotowe silnika i wirnika można byłoby wtedy uzyskać znacznie większy ciąg. W rezultacie korzyści wynikające z zastosowania nowatorskiego rozwiązania byłyby wyższe.
7. Uproszczenia przyjęte w pracy (np. założenia stałej cięciwy profilu łopat wirnika) są zrozumiałe biorąc pod uwagę pracochłonność obliczeń. Czuje się jednak niedosyt, że dla „tradycyjnego" rozwiązania wirnika otunelowanego przyjęto tylko jedną wartość luzu

wierzchołkowego. Wynosi on aż 3 mm, co przy wirniku o średnicy 0.5 m jest wartością dużą (znacznie niweczącą osiągi zespołu wirnik/tunel).

8. Na przekroju poprzecznym zespołu wentylatora otunelowanego (Rysunki 55. 56, 57, 58 a także na Rys. 73 i Rys. 106) zaznaczono zamiast wirnika dwie równoległe linie. Nie jest to wszakże rzut łopatki wirnika. Wyjaśnienie, co przedstawiają te linie znaleźć można dopiero w opisie Rys. 95. Ponieważ rysunki 55 do 58 dotyczą aspektów geometrycznych lepiej było by zamieścić na nich rzut obrysu łopatki.
9. Rozdział p.t. „Model ekonomiczny" dot. tematyki słabo związanej z merytoryczną treścią pracy. Obiektem badań Autora był wszakże nowatorski zespół napędowy, który co prawda został przeanalizowany przez niego z dużym nakładem pracy, ale jedynie w aspekcie modelowania przepływów i obliczeń osiągów (ciągu i momentu obrotowego). Ukończenie projektu i doprowadzenie do prób prototypu wymagać będzie szeregu dalszych analiz – nie tylko aerodynamicznych, ale np. wytrzymałościowych. Osobiście wolałbym, aby zamiast ogólnych informacji zawartych w rozdziale „Model ekonomiczny" Autor wykazał, że ma świadomość, jakie inne aspekty mogą stanowić utrudnienia w realizacji praktycznej lub stanowić wady proponowanego rozwiązania. Mając doświadczenie z testów „tradycyjnych" napędów otunelowanych zwróciłbym uwagę np. na problem drgań wynikających ze zjawisk aeroelastyczności. W rozpatrywanym przez Autora rozwiązaniu będziemy mieć do czynienia z wirującymi masami elementów zintegrowanego systemu napędu elektrycznego i łożyskowania (w tym z magnesami wirującymi na dużym promieniu), dużą prędkością kątową wirnika, itd. Jakie konsekwencje mogą a tego wyniknąć? Warto się nad tym zastanowić. Innym wątkiem, który mógłby się pojawić w miejscu „Modelu ekonomicznego" to próba dokonania przybliżonej analizy masowej. Dla konstruktorów samolotów bardzo ważna jest informacja ile waży zespół napędowy generujący określony ciąg. Prezentowana w pracy nowatorska koncepcja wentylatora otunelowanego może być atrakcyjna pod warunkiem, że nie będzie znacząco cięższa w porównaniu z rozwiązaniami klasycznymi.
10. W tekście pracy występują drobne błędy literowe, a gdzieniegdzie również błędy stylistyczne lub niezręczności wyrazowe, a także błędy w odesłaniach do Rysunków.
    Przykłady takich błędów:
    str. 17: „dzisiejsze wersje rozwojowe posiadają śmigła niezabudowane",
    str. 41: „podzielona została na niekończenie wiele przekrojów",
    str. 55: „Spojrzenie na elektryczny wentylator jako na jednolity system a nie na system składający się z trzech podstawowych komponentów: silnik, śmigło, otunelowanie, może stworzyć nowe rozwiązania konstrukcyjne",
    str.76: występuje błędne odesłanie do Rys. 61,
    str. 93: literówka w wyrażeniu „to występuję na całej...".
    str. 99 występuje błędne odesłanie do Rys. 77 i Rys. 78
    str. 100: - błąd w wyrazie „othogonal quality"
    str.130: -błąd w wyrażeniu: „przez co wartość różnicy ciśnień za i przed wirnikiem jest podobny..."
    Niedobrze jest, gdy w tekście odnoszącym się okienkowego menu programu komputerowego w angielskiej wersji językowej cytowane jest w jednym miejscu spolszczenie etykiety wybranego okienka, a tuż obok cytowana jest etykieta innego okienka z zachowaniem pisowni oryginalnej. Tak dzieje się na str. 109 w nagłówkach Tabeli 18. Powinien być zachowany jednolity system etykietowania, a do wyboru są trzy oczywiste rozwiązania.

Wnioski końcowe

W zakończeniu stwierdzam, że wniesione uwagi i zastrzeżenia nie mają zasadniczo negatywnego wpływu na moją pozytywną ocenę rozprawy jako całości. W posumowaniu swojej recenzji stwierdzam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dot. nowoczesnych elektrycznych zespołów napędowych dla lekkich statków powietrznych. Autor wykazał się znajomością podstaw teoretycznych różnych modeli obliczeniowych mechaniki płynów, sprawnością w operowaniu nowoczesnym, bardzo zaawansowanym oprogramowaniem do modelowania i symulacji numerycznej przepływów, jakim jest Ansys Fluent, oraz umiejętnością prowadzenia naukowej pracy badawczej. Tym samym spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce", wnoszę więc o dopuszczenie mgr inż. Marcina Mateusza Michalczyka do publicznej obrony przedłożonej mi do recenzji rozprawy doktorskiej.

Mirosław Rodzewicz

Mirosław Rodzewicz