

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława RACZYŃSKIEGO

**pt.: „AERODYNAMIKA WIRNIKA NOŚNEGO ZE STEROWANYM SKRĘCANIEM
GEOMETRYCZNYM ”**

wykonanej
na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej
pod kierownictwem
prof. dr. hab. inż. Mirosława WENDEKERA

1. PODSTAWA WYKONANIA RECENZJI

Recenzję opracowano na podstawie pisma Zastępcy Przewodniczącego ds. stopni naukowych Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna nr RDN/IM/173/2022 z dnia 25.03.2022r. z załączoną rozprawą doktorską mgr. inż. Radosława RACZYŃSKIEGO pt. „Aerodynamika wirnika nośnego ze sterowanym skręcaniem geometrycznym”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Mirosław WENDEKER, a promotorem pomocniczym dr inż. Łukasz GRABOWSKI.

2. TREŚĆ I ZAKRES PRACY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zawiera 250 stron. Składa się ze streszczenia, wykazu symboli i skrótów, ośmiu ponumerowanych rozdziałów, bibliografii oraz dwóch załączników dotyczących analizy osiągnięć wirnika w zawisie i locie postępowym.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wstęp”, Doktorant przedstawił problematykę wytwarzania siły nośnej na wirniku śmigłowca. Wykonał zestawienie porównawcze podstawowych teorii związanych z problematyką podejścia do analiz osiągnięć. Zastosowane przez niego podejście przedstawia analizę osiągnięć w ujęciu parametrycznym oraz bezwymiarowym. Zaprezentował podstawowe informacje na temat modeli wirnika, sposoby wyznaczania siły ciągu oraz zapotrzebowania mocy pochłanianej przez wirnik.

W drugim rozdziale zatytułowanym „Podstawowe informacje o materiałach inteligentnych”, zaprezentowano informacje na temat mechaniki efektu pamięci kształtu. Stopy

z pamięcią kształtu określone jako SMA posiadają zdolności do przyjmowania zaprogramowanych kształtów. Doktorant podkreśla, że zastosowanie SMA umożliwia uproszczenie konstrukcji i zmniejszenie kosztów wytwarzania, a także uzyskanie nowej funkcjonalności. Unikatowymi cechami tej grupy materiałów są:

- jednokierunkowy efekt pamięci kształtu,
- pseudosprężystość,
- dwukierunkowe zjawisko pamięci kształtu.

Zjawiska te charakterystyczne dla SMA związane są z termosprężystą przemianą martenzytyczną, która oznacza, że przejście pomiędzy fazami struktury materiału austenitu i martenzytu odbywa się wskutek grzania bądź chłodzenia.

Z punktu widzenia oceny opisu materiału SMA oraz możliwości wykorzystania go jako element konstrukcyjny (struktura nośna) bądź wykonawczy (wzmacniacz), Autor przedstawił opis zjawiska pamięci kształtu w otoczeniu obciążeń mechanicznych. Doktorant dokonał przeglądu typowych materiałów wykazujących cechę pamięci kształtu. Przedstawił rolę materiałów inteligentnych w procesie optymalizacji wirnika nośnego wiroplątów, optymalizację pasywną, optymalizację półaktywną i aktywną. Powyższe procesy wiążą się głównie z modyfikacją:

- profilu aerodynamicznego wpływającego na rozkład prędkości i ciśnień,
- rozmieszczenia rodzin profili wzdłuż rozpiętości łopaty,
- skręcenia geometrycznego,
- kształtu końcówki łopaty,
- kształtu łopaty (zmiana grubości profilu, zmiana cięciwy).

W podrozdziale „Mechanizmy inteligentne stosowane w łopatach śmigłowców”, Doktorant przedstawił podstawowe metody redukujące niekorzystne aspekty osłabiające wirnik, a tym samym poprawiające osiągi wirnika, którymi są:

- aktywna krawędź spływu,
- klapka Gurneya,
- morficzna zmiana struktury aerodynamicznej,
- zmienna geometrii krawędzi natarcia,
- aktywne skręcenie,
- aktywna kontrola opływu.

Autor stwierdził, że podstawowym wymogiem stawianym elementom aktywnej kontroli wirników jest jego integralność z konstrukcją łopat wirnika nośnego, co oznacza, że

elementy aktywne powinny cechować się technologicznością i niezawodnością zabudowy. Przedstawił zalety układów wykonawczych na bazie stopów z pamięcią kształtu. Z punktu widzenia mechaniki działania wzmacniaczy (aktuatorów) wykonanych na bazie SMA wyróżnił dwie grupy aktuatorów: jednokierunkowe i dwukierunkowe. Przedstawił model konserwatywny wzmacniacza SMA w którym zależności opisujące termomechaniczne właściwości stopów z pamięcią kształtu zawarte są w modelu Brinson'a. Opisują one proces bliźniakowania stopów SMA wzmacniaczy opartych na działaniu sprężyn śrubowych. Ponadto Doktorant przedstawił aktulatory wykonane na bazie materiałów piezoelektrycznych, których charakterystyczną cechą jest proces zamiany energii mechanicznej w elektryczną i energii elektrycznej w mechaniczną.

Na tej podstawie w rozdziale trzecim pt. „Cel i zakres pracy”, określony został cel pracy doktorskiej, którym jest „opracowanie i zweryfikowanie metodami numerycznymi i eksperymentalnymi układu pozwalającego w sposób jednoznaczny kontrolować pracę wirnika poprzez modyfikację skręcenia geometrycznego łopaty”. Dodatkowym celem pracy jest opracowanie metodyki pozwalającej wyznaczyć obciążenia generowane przez wirnik w zależności od wymaganych potrzeb operacyjnych.

W wyniku sformułowanych celów Doktorant założył wykazanie prawdziwości następującej tezy pracy tj. „Wirnik wyposażony w układ zmieniający geometryczny kąt skręcenia łopaty, dzięki zastosowaniu materiałów z pamięcią kształtu charakteryzujących się termosprężystą przemianą fazową, pozwala uzyskać większą sprawność aerodynamiczną podczas realizacji misji transportowej w porównaniu z wirnikiem o niezmiennym geometrycznym kącie skręcenia łopat”.

Na uwagę zasługuje fakt, że w odróżnieniu od wcześniejszych rozwiązań wykorzystujących siłowniki SMA, proponowany przez Doktoranta wirnik posiada poprawione właściwości w różnych stanach lotu takich jak zawis, lot postępowy itp. Ponadto cechą charakterystyczną odróżniającą proponowane rozwiązanie jest to, że czas aktywacji siłowników SMA jest uzależniony od fazy lotu.

W części czwartej rozdziału pt. „Założenia projektowe”, przedstawiono założenia konstrukcyjne obiektu badawczego jakim jest wirnik nośny oraz łopaty wirnika. Obiektem badawczym jest klasyczny trzyłopatowy przegubowy wirnik wyposażony w aktywny układ sterowania geometrycznym kątem skręcenia łopaty. Sterowanie wirnika wykonywane jest przez zespół tarczy sterującej. Zmiana nastawienia pochylenia, przechylenia oraz kąta skoku ogólnego realizowana jest poprzez zespół tarczy sterującej. Aktywacja układu wzmacniaczy

SMA odbywa się poprzez dostarczenie energii cieplnej wynikającej z przepływu prądu elektrycznego, dostarczanej do łopaty przez kolektorowy układ zasilania.

Do obliczeń przyjęto założenia konstrukcyjne wirnika nośnego takie jak: prędkość końcówki łopaty, graniczną prędkość oderwania na łopacie powracającej czy powierzchnię łopaty mającą bezpośredni wpływ na osiągi wiroplata.

Doktorant przedstawił podejście metodyczne w doborze parametrów aktuatora sprężynowego opartego na materiałach aktywnych SMA. Metodyka przedstawia podejście do wyznaczania podstawowych parametrów siłownika SMA o budowie opartej na zasadzie sprężyny śrubowej.

Doktorant przedstawił założenia projektowe wzmacniacza SMA opartego na technologii SMA, którego zadaniem jest dobór odpowiednich parametrów umożliwiających zmianę geometrycznego kąta nastawienia łopaty wirnika nośnego poprzez wprowadzenie zmiany zwichrzenia geometrycznego. Zmiana konstrukcyjnego parametru łopaty, realizowana jest przez wprowadzenie dodatkowego momentu skręcającego realizowanego na osi zwichrzenia łopaty, w taki sposób aby pod wpływem wygenerowanego momentu wynikającego ze zmiany fazowej materiału aktywnego nastąpiło odwracalne odkształcenie struktury łopaty, a następnie w wyniku zaniku ciepła wynikającego z przepływu prądu, pod wpływem sił sprężystości struktury powrót łopaty do stanu pierwotnego.

W ramach studium wykonalności wzmacniacza SMA, Doktorant przedstawił projekt wstępny siłownika opartego na stopach z pamięcią kształtu. Celem prac było opracowanie siłownika, który działałby w oparciu o odkształcalną strukturę aktywowaną za pomocą włókien wykonanych ze stopu z pamięcią kształtu w którym struktura siłownika poprzez swoje odkształcenie miałyby pełnić rolę przekładni pomiędzy ruchem liniowym a obrotowym.

Tematem piątego rozdziału jest „Definicja geometrii łopaty wirnika nośnego”. W rozdziale przedstawiono:

- opis geometrii łopaty wirnika nośnego oraz wyznaczone zostały podstawowe parametry opisujące łopatę wirnika nośnego, takie jak: masa, momenty bezwładności przekroju, masowe momenty bezwładności oraz położenie środka masy względem konstrukcyjnej osi przekręceń łopaty;
- dobór profili i charakterystyki aerodynamiczne. Badania tunelowe przeprowadzone zostały w oparciu o tunel badawczy GUNT model HM 170. W wyniku badań uzyskano charakterystyki współczynnika siły oporu i współczynnika siły nośnej dla sekcji 5 i 6 modelu łopaty;

- analizę rozkładu mas łopaty wirnika nośnego. Wyznaczone wartości mas jednostkowych określone zostały na podstawie modelu geometrycznego CAD łopaty oraz danych materiałowych;
- analizę rozkładu sztywności łopaty wirnika nośnego. Analiza rozkładu sztywności na zginanie oraz sztywności skrętnej, wyznaczona została na podstawie analiz MES modelu geometrycznego łopaty wirnika nośnego oraz danych materiałowych;
- analizę zespoloną podatności łopaty. Analiza podatności łopaty miała na celu zweryfikowanie struktury łopaty pod kątem możliwości skręcenia łopaty;
- analizę rezonansową wirnika nośnego, której celem było określenie charakterystyk dynamicznych wirnika w zależności od aktualnej prędkości obrotowej wirnika;
- analizę wpływu zabudowy wzmacniacza SMA na częstość i postacie drgań własnych.

Rozdział szósty to „Analiza osiągową izolowanego wirnika nośnego”, w zawisie i w locie postępowym.

Celem analizy wirnika w zawisie jest ocena osiągową wirnika dla różnych wariantów skręcenia geometrycznego, a tym samym potwierdzenia słuszności koncepcji zastosowania zmiennej geometrii skręcenia łopaty. Do analizy wybrana została rodzina łopat o liniowym skręceniu $\theta = -5^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 12^\circ$ przy założeniu, że zerowa wartość skręcenia znajduje się na promieniu względnym $r = 0,7 R$. Wszystkie analizy zostały przeprowadzone dla identycznych warunków operacyjnych tj. wysokość $h = 0$ m bez wpływu ziemi, prędkość końca łopaty w zakresie $V_{tip} = 100-240$ m/s. Analizę osiągową izolowanego wirnika nośnego przeprowadzono w funkcji geometrycznego kąta skręcenia łopaty oraz prędkości obrotowej wirnika w zawisie bez wpływu ziemi. Doktorant przeprowadził zestawienie porównawcze analiz wpływu skręcenia geometrycznego łopaty na osiągi wirnika w celu potwierdzenia słuszności doboru odpowiedniego skręcenia geometrycznego łopaty (konfiguracji wirnika) poprawiającego osiągi wirnika w zawisie.

Celem analizy osiągową wirnika w locie postępowym było określenie osiągową wirnika w zależności od wartości skręcenia geometrycznego łopaty θ w zakresie wartości kątów od -5° do $+10^\circ$. Zakres analiz uwzględniał analizę osiągową wirnika nośnego w funkcji geometrycznego kąta skręcenia łopaty oraz prędkości obrotowej wirnika w locie poziomym z prędkością $V = 50$ km/h, 100 km/h i 150 km/h dla różnych kątów natarcia wirnika $\alpha = -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ$. Na podstawie analiz osiągową wirnika w locie postępowym, Doktorant przeprowadził syntezę wyników mających na celu ocenę wpływu zmiany kąta skręcenia. Wynika z niej, że dla prędkości postępowej lotu poziomego $V = 150$ km/h zmiana wartości kąta skręcenia geometrycznego ma istotny wpływ na wartość mocy pobieranej przez wirnik. Otrzymane

wyniki potwierdzają fakt, że morficzna zmiana wartości kąta skręcenia pozwoli zwiększyć osiągi wirnika nośnego.

Doktorant przeprowadził walidację modelu wirnika w oparciu o metodykę Virtual Blade Model (VBM). W tym celu dla określenia wpływu skręcenia geometrycznego łopaty na wartość siły ciągu oraz mocy niezbędnej pobieranej przez wirnik oraz rozkład prędkości indukowanej przeprowadził analizę bazującą na algorytmach CFD. Głównym celem analizy było określenie wrażliwości parametrów osiągowych siły ciągu całkowitego, mocy pobieranej przez wirnik oraz charakteru rozkładu skręcenia geometrycznego.

W rozdziale siódmym pt. „Zintegrowana analiza wirnika nośnego”, Doktorant porównał obciążenia wirnika nośnego w zależności od konfiguracji łopat. Model obliczeniowy oparł na schemacie hybrydowym uwzględniającym bezpośrednią integrację analiz opartych na metodyce MBD z uwzględnieniem podatności bazującej na elastyczne elementy typu „Bushing”. Model wirnika posiada ściśle określoną liczbę stopni swobody, odwzorowane zostały układy obciążeń siłami zewnętrznymi, obliczane w zależności od warunków początkowych i aktualnego stanu symulacji. Doktorant przedstawił równania ruchu łopaty oraz składowe całkowitego obciążenia uwzględniające siłę: ciągu, oporu i odśrodkową oraz moment: aerodynamiczny, skręcający wał oraz momenty zginające i skręcające sekcję łopaty.

Analiza obciążeń wirnika dla konfiguracji wirnika z łopatom referencyjnymi oraz łopatom z zabudowanymi wzmacniaczami SMA przeprowadzona została dla zawisu bez wpływu ziemi na wysokości $h=0$ m oraz w locie poziomym z prędkością przelotową V_d i prędkością optymalną V_{opt} na wysokości $h=0$ m.

Doktorant przeprowadził również walidację osiągową oraz obciążeń wirnika nośnego opartą na modelu zespolonym MBD.

W rozdziale ósmym przedstawiono „Weryfikację tezy badawczej”. Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant stwierdził, że zastosowanie wzmacniacza opartego na strukturach SMA, skutkuje modyfikacją cech geometrycznych wirnika poprzez zmianę geometrycznego kąta skręcenia oraz umożliwia poprawę osiągową wirnika, a tym samym zwiększenie sprawności i redukcję zapotrzebowania mocy niezbędnej. Weryfikację tezy badawczej Doktorant oparł na podstawie analiz numerycznych bazujących na metodach analiz FEM, FCD+VBM, MBD jak również algorytmów i oprogramowania wykorzystywanego przez PZL Świdnik S.A., które stosowane są w procesie projektowania i certyfikacji śmigłowców. Teza pracy została również zwalidowana w badaniach w tunelu aerodynamicznym w celu potwierdzenia charakterystyk aerodynamicznych zastosowanych profili. Weryfikacja tezy

obejmowała również ocenę właściwości aerodynamicznych, masowo-sztywnościowych i obciążeniowych.

3. OCENA MERYTORYCZNA PRACY

Temat rozprawy doktorskiej podjęty i opracowany przez mgr. inż. Radosława RACZYŃSKIEGO, uważam za dysertabilny i niezwykle istotny pod względem naukowym i użytkowym.

W niniejszej rozprawie Doktorant skupił się na analizie możliwości wykorzystania elementów z pamięcią kształtu jako zespołów wykonawczych (wzmacniaczy) wymuszających zmianę cech geometrycznych łopaty wirnika nośnego dla wiroplata o projektowym ciężarze startowym 100 kg, poprzez odpowiednią zabudowę elementów aktywnych w strukturze nośnej łopaty umożliwiającej wykorzystanie efektu morficzności kształtu skrzydła geometrycznego łopaty a tym samym rozszerzenie możliwości operacyjnych statku powietrznego.

Przeprowadzone analizy objęły aspekty problematyki aerodynamiki, dynamiki strukturalnej oraz mechaniki lotu.

Weryfikacja poprawności doboru parametrów konfiguracji wirnika nośnego przeprowadzona została z wykorzystaniem analizy przypadku lotu poziomego, dla którego projektowa wartość prędkości wynosiła $V_d=150$ km/h oraz przypadku zawisu dla maksymalnej masy startowej.

Badania podzielone zostały na dwa bloki: blok analityczny i blok laboratoryjno-weryfikacyjny. Głównym celem bloku analitycznego był dobór parametrów kinematycznych wirnika oraz opis strukturalny głowicy i łopat wirnika nośnego w konfiguracji referencyjnej jak i aktywnej wyposażonej w elementy aktywne. Z kolei blok laboratoryjno-weryfikacyjny obejmował aspekty aerodynamiczne i zawierał badania tunelowe łopat wirnika oraz testy laboratoryjne prototypu siłownika SMA z uwzględnieniem bilansu energetycznego niezbędnego do zasilania układu SMA.

Weryfikacja została przeprowadzona z wykorzystaniem algorytmów obliczeniowych wykorzystywanych przez PZL Świdnik S.A. Wyniki obejmowały analizę mocy niezbędnej, biegunowej wirnika dla zadanych stanów lotu oraz rozkładu obciążeń wirnika nośnego.

Przedstawiona przez Doktoranta koncepcja wykorzystania siłowników SMA jako elementów wykonawczych spełnia swoje zadanie i umożliwia poprawę osiągnięć wirnika. W niniejszej pracy Doktorant przedstawił koncepcję zabudowy pojedynczego aktuatora pomiędzy pasami dźwigara łopaty w którym jeden koniec znajduje się w obszarze o dużej sztywności skrętnej, a drugi w strefie zmniejszonej sztywności. Przyjęta przez Doktoranta taka

koncepcja umożliwia przeniesienie całego momentu skręcającego z siłownika na łopate, minimalizując w ten sposób niekorzystne momenty gnące deformujące linię konturową łopaty. Pomimo wielu zalet układ może być zastosowany w łopatach wirnika jedynie w wybranych stanach lotu. Dla pełnego sprawdzenia koncepcji konieczna jest wielopunktowa optymalizacja skręcenia geometrycznego kształtu łopaty, poprzez zastosowanie bardziej zaawansowanego technologicznie programatora sterującego przemianami fazowymi siłownika.

Doktorant dowiódł, że przeprowadzone analizy potwierdzają tezę pracy tj.:

- modyfikacja aktywna cech geometrycznych łopaty wirnika istotnie wpływa na osiągi wirnika zarówno w zawisie jak i w locie postępowym;
- zmiana geometryczna kąta skręcenia poprzez układy wykonawcze SMA pozwala na optymalizację osiągowi wiroplata. Zysk wynikający z aktywacji siłowników SMA wynosi około 3,9 kW, co oznacza zmniejszenie zapotrzebowania mocy w zawisie przez wirnik o 11 % w stosunku do wirnika referencyjnego;
- zastosowanie układu SMA powoduje zmniejszenie zużycia paliwa o 4 %, co ma istotne znaczenie na zmniejszenie kosztów operacyjnych wiroplata;
- modyfikacja cech geometrycznych poprzez aktywację wzmacniaczy SMA zwiększa wartość współczynnika siły nośnej C_{lmax} , a tym samym wzrost maksymalnej siły ciągu o 5,2 %.

Na podkreślenie zasługuje również fakt, że adaptacja układu SMA wywiera istotny wpływ na wartości obciążeń układu sterowania zarówno w zawisie jak i w lotach poziomych, powodując redukcję obciążeń o 3,6 %, co istotnie wpływa na żywotność zmęczeniową zespołów tarczy sterującej.

Należy podkreślić, że Doktorant posiada doświadczenie w realizacji badań dotyczących aerodynamiki wirnika nośnego ze sterowanym skręcaniem geometrycznym.

Wobec powyższego mogę stwierdzić, że Doktorant zrealizował wyznaczone przez siebie cele, a sformułowana w rozprawie doktorskiej teza pracy tj. „Wirnik wyposażony w układ zmieniający geometryczny kąt skręcenia łopaty, dzięki zastosowaniu materiałów z pamięcią kształtu charakteryzujących się termosprężystą przemianą fazową, pozwala uzyskać większą sprawność aerodynamiczną podczas realizacji misji transportowej w porównaniu z wirnikiem o niezmiennym geometrycznym kącie skręcenia łopat”, 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 pewnych błędów i niejasności interpretacyjnych jak np. sformułowanie „profil lotów dźwigowych lub przeciwpożarowych” (str. 8), oznaczenie składu materiału (str. 46, Tab. 2.2), czy współczynnika siły nośnej (str. 92).

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

5. WNIOSEK KOŃCOWY

W podsumowaniu swojej recenzji stwierdzam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego aerodynamiki wirnika nośnego ze sterowanym skręcaniem geometrycznym.

Uważam, że mgr inż. Radosław RACZYŃSKI rozwiązał w rozprawie doktorskiej postawione cele pracy, a tym samym tezę pracy.

Doktorant posiada bardzo dobrą znajomość mechaniki, dynamiki lotu, matematyki stosowanej 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. Radosława RACZYŃSKIEGO w zakresie aerodynamiki wirnika nośnego ze sterowanym skręcaniem geometrycznym, recenzowaną rozprawę oceniam jako bardzo dobrą, spełniającą ustawowe wymagania stawiane rozprawom i stawiam wniosek o wyróżnienie pracy.

Przedstawiam Szanownej Radzie Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej, wniosek o przyjęcie rozprawy jako podstawy do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych i dopuszczenie mgr. inż. Radosława RACZYŃSKIEGO do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.