

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Tomasza Muszyńskiego pt. „Charakterystyki śmigła obudowanego ze sterowaniem ciągiem za pomocą pierścienia o zmiennej geometrii”

Problematyka pracy. Metody badań. Rezultaty badań.

W śmigłowych napędach lotniczych stosowane są dwa rozwiązania konstrukcyjne. Jedną konstrukcją to śmigła obudowane, druga to śmigła swobodne. Istnieje przedział prędkości, w którym stosowanie śmigieł obudowanych jest niekorzystne. Aktualnie praktycznie wszystkie samoloty poruszające się z prędkościami powyżej 0.6 Ma to konstrukcje o śmigłach obudowanych.

Autor postawił sobie za zadanie znalezienie rozwiązań konstrukcyjnych pozwalających na zastosowanie śmigieł obudowanych w szerszym zakresie prędkości niż są one aktualnie stosowane, oraz poprawę ich charakterystyk sprawnościowych w zastosowaniu do zakresu prędkości, w którym są już stosowane.

Ograniczenia istniejące dla poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych co do zakresu stosowanych prędkości próbowało pokonywać wiele firm lotniczych. Jeżeli udawało się poprawić sprawność, to odbywało się to kosztem wzrostu hałasu, co eliminowało to rozwiązanie z powszechnego zastosowania.

Istnieje duża ilość publikacji zawierających opisy zmodernizowanych konstrukcji napędów śmigłowych, metod ich projektowania, metod badań i rezultatów badań jakie w następstwie tych modernizacji osiągnięto. Autor zgromadził bardzo dużą ilość tych publikacji i szczegółowo, z wykorzystaniem bogatego materiału ilustracyjnego, przedstawił je i omówił w swojej pracy. Analiza wyników badań zawartych w zgromadzonej literaturze dostarczyła szczegółowych odpowiedzi na pytanie dlaczego śmigła obudowane nie są stosowane w określonym przedziale prędkości.

Zgromadzenie i usystematyzowanie przez Autora wyników dotychczasowych badań pozwoliło mu na sformułowanie ważnego stwierdzenia, że zmiana parametrów geometrycznych obudowy śmigła może w znaczący sposób zmieniać charakterystyki zespołu napędowego, w tym pozwalać osiągnąć wyższą sprawność i większy ciąg. To ważne stwierdzenie było dla Autora inspiracją do podjęcia zadania, które sformułował w postaci dwóch tez:

1. Możliwe jest zbudowanie obudowy śmigła o zmiennej geometrii, która dla małych posuwów będzie posiadała cechy śmigła obudowanego z dyszą przyspieszającą, natomiast po zmianie konfiguracji będzie posiadała cechy śmigła obudowanego z dyszą opóźniającą.
2. Zastosowanie zmiennej geometrii obudowy śmigła pozwoli na uzyskanie większego ciągu dla warunków statycznych i małych posuwów oraz poprawę sprawności dla większych posuwów, w szczególności uzyskanie ciągu dla posuwów większych niż maksymalne dla Śmigła otwartego, dla założonego stałego skoku śmigła.

Udowodnienia postawionych tez postanowił Autor dokonać dwiema metodami: eksperymentalną i numeryczną. Szczególnie trudne i wymagające dużego nakładu pracy były przygotowania do badań i same badania eksperymentalne.

Na część eksperymentalną rozprawy składa się zaprojektowanie i wykonanie obudowy śmigła o zmiennej geometrii umożliwiającej zamianę dyszy przyspieszającej na dyszę opóźniającą. Zmiana geometrii wlotu i wylotu musiała obejmować duży zakres zmian kątów i wymiarów liniowych, tym samym duży zakres zmian prędkości strumienia na wlocie i na wylocie. Było to niezbędne dla jednoznacznej interpretacji wyników badań bez obawy znalezienia się w marginesie niepewności pomiarowej.

Przygotowanie obiektów do badań i stanowiska badawczego wymagało dużej wiedzy, inwencji i nakładów pracy. Stanowisko badawcze obejmowało w pierwszym rzędzie dobór tunelu aerodynamicznego do prowadzenia badań. Do prowadzenia badań wybrany został tunel o obiegu otwartym, niskiej turbulencji rzędu 0.5% i przestrzeni pomiarowej o średnicy 1000 mm i długości 1700 mm. Kolejnym krokiem w kierunku przygotowania stanowiska do badań był projekt obiektu badań czyli obudowy śmigła. Kształt i proporcje poszczególnych wymiarów geometrycznych obiektów do badań zostały zaczerpnięte z publikacji z zakresu tej problematyki.

Najważniejsze wymiary zaprojektowanej, wykonanej i przyjętej do badań obudowy to średnica wewnętrzna wynosząca 306 mm, średnica zewnętrzna wynosząca 386 mm oraz cięciwa profilu obudowy (dla zerowych kątów rozwarcia wlotu i wylotu) wynosząca 420 mm. Tunel jako narzędzie badań został dobrze dobrany do postawionego zadania. Proporcje pomiędzy wymiarami przestrzeni pomiarowej a wymiarami obiektu zostały dobrane w sposób właściwy. Wielkość szczeliny między łopatkami śmigła a obudową, po analizie informacji zawartych na ten temat w literaturze, przyjął Autor jako wynoszącą 1% wymiaru średnicy śmigła.

W celu przedstawienia wyników badań przyjął Autor sposób charakteryzowania profili obudowy śmigła oparty na dwóch parametrach: kącie natarcia cięciwy profilu obudowy oraz strzałce profilu obudowy śmigła. Autor wykonał również tabelę w której zestawiał przeliczenie parametrów przyjętych za charakterystyczne na wartości pozostałych parametrów geometrycznych stosowanych przy charakteryzowaniu profili aerodynamicznych.

Na szczególne uznanie zasługuje opracowanie i zrealizowanie przez Autora metody zmiany geometrii obudowy śmigła i systemu sterowania zmianą obudowy śmigła. Zakres zmian średnicy wlotu obudowy obejmował przedział od 60 do 176 % powierzchni tarczy śmigła, natomiast zakres zmian średnicy wylotu obejmował przedział od 38 do 157% powierzchni tarczy śmigła. Zmianę geometrii wlotu i wylotu osiągnął Autor poprzez wykonanie ścianek obudowy z mogących się względem siebie przesuwać 64 segmentów. Zmiana wzajemnego ustawienia segmentów powodowała niezależnie od siebie zmianę kątów rozwarcia wlotu i wylotu obudowy. Sterowanie geometrią obudowy było procesem złożonym. Sterowanie ruchem segmentów realizowano przy pomocy indywidualnych dla każdego segmentu siłowników, przesuwanymi pierścieniami i przegubów kulowych. Tak przygotowana obudowa z zamontowanym śmigłem, układami pomiarowymi, silnikiem napędowym została umieszczona w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego.

Mierzone były prędkość obrotowa śmigła, ciąg zespołu śmigło-obudowa, moment obrotowy silnika, ciśnienia, prędkości oraz kąty na wlocie i wylocie obudowy. Pozostałe parametry potrzebne do określenia charakterystyk określone zostały pośrednio na podstawie parametrów mierzonych.

Prezentację wyników badań rozpoczął Autor od przedstawienia charakterystyk sprawnościowych. Zostały one przedstawione w postaci tabelarycznej i w postaci wykresów zamieszczonych w jednym wspólnym układzie współrzędnych posuw-sprawność, Parametrem rodziny krzywych była geometria obudowy śmigła. Charakterystyki sprawnościowe śmigieł pracujących przy zmieniającym się kształcie obudowy zostały porównane z charakterystyką śmigła pracującego bez zabudowy. Ponieważ spośród ponad trzydziestu uzyskanych przez Autora charakterystyk miało zbliżony do siebie charakter do dalszych analiz porównawczych wybrał spośród nich osiem. Były to charakterystyki na których najwyraźniej ujawniał wpływ obudowy w postaci największego przyrostu posuwu. Analiza porównawcza wyników badań przedstawionych w postaci graficznej w układzie współrzędnych posuw-sprawność pokazuje szereg ważnych cech wynikających z wprowadzenia na śmigło obudowy i parametrów geometrycznych tej obudowy. Niektóre z tych cech były spodziewane, niektóre Autor chciał swoimi badaniami dopiero wykazać. Wyniki badań pokazały że w zakresie małych posuwów największą sprawność pozwala osiągnąć obudowa o największej średnicy wlotu i jednej z największych średnic wylotu. W przedziale zmian posuwów od 0,45 do 0,7 przy żadnej z badanych obudów nie osiągnięto sprawności większej niż przy śmigle pracującym bez obudowy. Godny uwagi rezultat badań to wykazanie, że obudowa śmigła pozwala osiągnąć wyższą sprawność w zakresie małych posuwów (do 0,4) oraz wyższą sprawność przy posuwach dużych (od 0,7 do 0,9). Należy jednak zaznaczyć, że podwyższone przez wprowadzenie obudowy sprawności są znacznie niższe niż sprawności osiąmane przy posuwach 0,5 lub 0,6 dla śmigieł swobodnych.

Kolejne zależności które Autor określił na podstawie przeprowadzonych eksperymentów to kształtowanie się współczynnika ciągu w zależności od posuwu przy różnych parametrach geometrycznych obudowy śmigła. Zależności te, podobnie jak poprzednio, określono dla 32 różnych przypadków geometrii obudowy. Zostały one przedstawione w postaci tabelarycznej oraz w postaci wykresów w układzie współrzędnych posuw-współczynnik ciągu. Parametrem rodziny krzywych wykreślonych w tym układzie współrzędnych była geometria obudowy śmigła, a dla jednej z krzywych brak obudowy śmigła. Na podstawie uzyskanych wyników badań można powiedzieć że dla posuwu z przedziału od 0,4 do 0,6 żaden z wariantów zmiennej obudowy nie osiągnął większej wartości współczynnika niż śmigło bez obudowy. W zakresie posuwów do 0,3 kilka konstrukcji obudowy osiągnęło większą wartość współczynnika ciągu niż śmigło nieobudowane. Podobnie jest dla posuwów większych od 0,7. W tym zakresie kilka rozwiązań konstrukcyjnych obudowy śmigła pozwala osiągnąć większy współczynnik ciągu.

Ostatnią grupą charakterystyk, która na podstawie badań eksperymentalnych została przez Autora określona są zależności pomiędzy współczynnikiem mocy a posuwem przy różnych geometriach obudowy. Podobnie jak przy określaniu tych relacji dla sprawności i współczynnika ciągu Autor przedstawił wyniki w postaci wykresów i tabel zawierających wyniki badań wszystkich 32 przypadków konstrukcji obudowy. Wyniki w formie graficznej zostały przedstawione w układzie współrzędnych posuw-współczynnik mocy z danymi geometrycznymi budowy jako parametrem rodziny krzywych. Szczegółowej analizy tych zależności dokonał Autor na rysunku, na którym pominał charakterystyki dotyczące obudów o bardzo małych współczynnikach mocy znajdujących się poniżej charakterystyki śmigła nieobudowanego. Warto zwrócić uwagę na to, że takich charakterystyk była zdecydowana większość. Udało się jednak wskazać takie konstrukcje obudowy śmigła, dla których współczynnik mocy jest większy niż dla śmigła nieobudowanego w całym zakresie zmian

posuwów oraz takie, dla których współczynnik mocy dla posuwów większych od 0,6 był większy niż dla śmigła nieobudowanego.

Drugą część rozprawy stanowią wyniki badań numerycznych. Przed przystąpieniem do prezentacji wyników badań numerycznych zamieścił Autor rozdział zawierający charakterystykę metod i narzędzi stosowanych w analizach numerycznych. Z treści tego rozdziału wynika że Autor posiada w zakresie tych metod dobre przygotowanie i rozeznanie.

Badaniami numerycznymi objął Autor dwa przypadki geometrii obudowy śmigła przebadane wcześniej metodą eksperymentalną. Badania numeryczne dostarczyły ciekawych informacji rozszerzających wiedzę o rozkładach prędkości występujących w badanym obiekcie przy jego różnych parametrach pracy. W wyniku wykonanych symulacji numerycznych uzyskał Autor charakterystyki badanych obiektów bardzo zbliżone do uzyskanych drogą eksperymentalną.

Uwagi krytyczne

- Brak uzasadnienia wyboru wielkości głównego wymiaru obiektu badań – średnicy wewnętrznej obudowy śmigła.
- Brak uzasadnienia wyboru typu śmigła.
- Brak stanowiska Autora nt. przeniesienia wyników na obiekty o innej skali geometrycznej.
- Brak stanowiska Autora nt. hałasu proponowanych rozwiązań (mam na myśli prognozę).
- Nazwanie równań Naviera-Stokesa postacią zasady zachowania pędu podczas gdy jest to postać zasady pędu i popędu.
- Niewyraźne niektóre rysunki.

Ocena pracy

Praca zasługuje na bardzo wysoką ocenę. Decyduje o tym:

- Szczegółowy przegląd obszernej zebranej przez Autora literatury.
- Opracowanie i wykonanie obiektu badań z oryginalnym rozwiązaniem sterowania jego parametrami geometrycznymi.
- Wykonanie przez Autora dużej ilości trudnych, wymagających dużej wiedzy, doświadczenia i nakładu pracy badań.
- Przejrzyste przedstawienie i omówienie wyników wykonanych badań.
- Wykonanie szczegółowej analizy niepewności pomiarowej.
- Dobór odpowiednich do analizowanej problematyki metod symulacji numerycznej.
- Wskazanie przydatności wyników przeprowadzonych badań w praktyce.

Wniosek

Biorąc po uwagę wymienione wyżej w skrócie osiągnięcia i zalety rozprawy wyrażam opinię że spełnia ona wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Tomasza Muszyńskiego do publicznej obrony swojej rozprawy.

Sławomir Gmurda