

dr hab. inż. pil. Leszek CWOJDZIŃSKI

Poznań, 8. 03. 2021 r.

Dyrektor Programów Wojskowych Airbus Poland S.A

tel.: +48 502 695 195

e-mail: samolot221@wp.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra Michała KUŹNIARA nt.:

" WIELOKRYTERIALNA OCENA DOBORU NAPĘDÓW LOTNICZYCH NOWEJ GENERACJI Z WYKORZYSTANIEM METOD ENERGETYCZNYCH"

*wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Rzeszowskiej.*

OCENA STRONY METODYCZNEJ ROZPRAWY

1. Układ rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska liczy 111 stron, składa się z wprowadzenia-wiadomości wstępnych, dziewięciu rozdziałów, wniosków z przeprowadzonych badań, oraz przedstawienia dalszych prac badawczych i kierunków rozwoju. W wykazie zastosowanej bibliografii ujętych zostało 98 pozycji, odpowiednio dobranych do zilustrowania poruszanych zagadnień. Istnieje korelacja pomiędzy sformułowanymi i konsekwentnie realizowanymi założeniami badawczymi a treścią rozprawy doktorskiej. Trafnie i umiejętnie w stosunku do założonego celu i sprecyzowanych szczegółowych problemów naukowych autor odpowiednio dobrał metody i narzędzia badawcze.

Praca doktorska zawiera 21 tabel i 55 rysunków o charakterze poznawczym obejmującym materiał badawczy rozprawy, wykaz skrótów i oznaczeń oraz 4 załączniki i streszczenia rozprawy. Przedstawiona rozprawa poświęcona została wielokryterialnej ocenie doboru napędów lotniczych nowej generacji z wykorzystaniem metod energetycznych, które mogą być użyte do napędu statków powietrznych. Autor podjął aktualny obecnie temat dotyczący negatywnych skutków dla środowiska naturalnego towarzyszących intensywnemu

rozwojowi transportu lotniczego. We wstępie Doktorant przedstawił bazowe dokumenty wskazujące na potrzebę zmniejszenia negatywnego oddziaływania transportu lotniczego na środowisko naturalne. Obecnie zauważyć można trend rozwoju lotnictwa prowadzący do spełnienia kryteriów bardziej sprzyjających ochronie człowieka i jego ekosystemu. Efektem takich rozwiązań jest możliwość obniżenia kosztów podróży poprzez zmniejszenie zużycia paliwa, jak również ograniczenie emisji hałasu i związków szkodliwych do atmosfery. Trend proekologiczny znalazł swoje odbicie w wielu opracowywanych i cały czas doskonalonych przepisach w zakresie zmniejszania negatywnego wpływu transportu lotniczego na środowisko naturalne. Pierwsze międzynarodowe regulacje dotyczące ograniczenia zużycia paliwa, emisji spalin i hałasu weszły w życie w 1972 roku (załącznik 16 do konwencji chicagowskiej) W 2018 roku załącznik 16 wszedł w życie w nowym brzmieniu. Reguluje on limity emisji CO₂, NO_x oraz hałasu dla nowopowstających konstrukcji lotniczych, zgodnie z zaleceniami CAEP (Komitetu Technicznego ICAO ds. Ochrony Środowiska).

Równocześnie, pojawiają się deklaracje, programy badawcze i inicjatywy organizacji międzynarodowych, samorządowych i pozarządowych, a także firm lotniczych, których celem jest zrównoważony i odpowiedzialny rozwój lotnictwa.

Obecnie prowadzonych jest wiele prac badawczych wpisujących się w tematykę pracy doktorskiej jak np. prace związane ze zwiększeniem efektywności ruchu lotniczego - program SESAR. W jego ramach podejmowane są próby nowego podejścia do planowania lotu oraz bardziej efektywnego wykorzystania przestrzeni towarowej i pasażerskiej w samolocie. Ponadto prace związane z optymalizacją trajektorii lotu pod względem minimalizacji czasu przelotu i zużycia paliwa wskazują, że możliwe jest osiągnięcie spadku emisji i zużycia paliwa na tej samej trasie.

Cele zakładane do roku 2050 wymagają jednak opracowania nowych rozwiązań technicznych. W nowo powstających konstrukcjach lotniczych coraz większy udział mają materiały kompozytowe, wpływające na spadek masy własnej statków powietrznych. Podnoszona jest sprawności napędu poprzez opracowanie nowych układów aerodynamicznych, śmigieł a także przez podnoszenie temperatury spalin przed turbiną w przypadku silników turbinowych. Mając na celu zwiększenie efektywności konstrukcji lotniczych poszukuje się nowych rozwiązań układów aerodynamicznych samolotów jak np. latające skrzydło czy układów napędowych przewidzianych w samolotach przyszłości takich jak napęd rozproszony.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska jest syntetyczną próbą opracowania uniwersalnych metod umożliwiających prowadzenie wielokryterialnej analizy oceny

doboru napędów lotniczych nowej generacji z wykorzystaniem metod energetycznych. Ciągły rozwój lotnictwa skłania do poszukiwania nowszych, bardziej przyszłościowych konstrukcji lotniczych. Poszukiwane są rozwiązania mające zapewnić ekonomię eksploatacji i zmniejszone negatywne oddziaływanie na środowisko. Stąd zainteresowanie takimi napędami nowoczesnymi jak napędy hybrydowe, elektryczne czy rozproszone.

Bazując na przeglądzie literatury, istniejących rozwiązaniach i pracach własnych Doktorant podjął się oceny efektywności wybranych napędów z wykorzystaniem metody energetycznej. W pracy podjęto próbę opracowania napędu rozproszonego do płatowca motoszybowca AOS H2. Analizie poddano dwa warianty źródła energii, hybrydę wykorzystującą ogniwo wodorowe oraz układ hybrydowy wykorzystujący silnik spalinowy (Wankel TGi 407) napędzający generator doładowujący akumulator.

Do płatowca motoszybowca dobrano napęd rozproszony. Dla mocy niezbędnej do lotu płatowca określono zapotrzebowanie energetyczne. Przyjęto 10-silnikowy układ marszowy (po pięć silników AXi 8120 na skrzydło). W wyniku teoretycznej analizy doboru śmigła wstępnie określono wzrost zasięgu i długotrwałości lotu statku powietrznego na podstawie zwiększonej sprawności pracy śmigieł. Z powodu braku możliwości przeprowadzenia prób w locie i badań tunelowych wybranego układu napędowego, przeprowadzono komputerowe analizy CFD śmigła i opływu skrzydła. Na tej podstawie zmieniono średnice dobranego śmigła i określono zmianę współczynników aerodynamicznych statku powietrznego. W efekcie uzyskano zwiększenie wzrostu zasięgu i długotrwałości lotu, oraz wskaźników energetycznych (zużycie energii i paliwa na kilometr i godzinę lotu) dla obu źródeł energii umieszczonych na pokładzie samolotu.

Odnotowano wzrost zasięgu o 51 km dla wariantu hybrydowego spalinowego i o 39 km dla układu hybrydowego z ogniwnem wodorowym. Długotrwałość lotu wzrosła odpowiednio o 30 i 24 minuty. Poprawiło to osiągi samolotu o 19%. Dla układu hybrydy spalinowej stwierdzono spadek emisji trasowej związków szkodliwych zawartych w spalinach silnika napędowego generatora elektrycznego, a także obniżenie emisji trasowej badanych zanieczyszczeń o 17%. W przypadku rozkładu parametrów energetycznych (rozkład energii potrzebnej do pokonania kilometra trasy bądź godziny lotu) stwierdzono 16% poprawę tych wskaźników po zastosowaniu napędu rozproszonego. Badania nad tego typu napędami są perspektywiczne, ponieważ napędy rozproszone, hybrydowe i elektryczne będą coraz częściej stosowane w lotnictwie i bezzałogowych platformach latających.

Przyjmując, że rozdziały 1- 9 stanowią zasadniczą część rozprawy, stwierdzam, że proporcje pomiędzy jej częściami merytorycznymi są prawidłowe. Treść pracy nawiązuje w sposób właściwy do jej tytułu, a nazwy rozdziałów przedstawiają spójną całość dając syntetyczny pogląd na rozważane treści. Pracę kończy pragmatyczna ocena użyteczności badań oraz wniosków i opracowanie propozycji ich praktycznego wykorzystania.

Doktorant słusznie zauważył, iż we współczesnej literaturze przedmiotu podejmuje się ogólną tematykę analiz jednostek i systemów napędowych oraz układów aerodynamicznych płatowców statków powietrznych. Występuje wiele prac poświęconych temu zagadnieniu, brak jest jednak badań nad systemowymi rozwiązaniami.

Praca doktorska mgra Michała Kuźniara mieści się w nurcie prac związanych z systemowym rozwojem doboru napędów lotniczych nowej generacji z wykorzystaniem metod energetycznych które mogą być użyte do napędu statków powietrznych i wnosi wkład w rozwój metod badawczych nad zastosowaniem napędów lotniczych. Obecny trend w tej dziedzinie łączący działania proekonomiczne, proefektywne i proekologiczne, wymusza opracowywanie nowych lub udoskonalanie obecnych technicznych rozwiązań napędów i układów aerodynamicznych statków powietrznych.

Uważam iż treści zawarte w rozprawie mogą posłużyć jako podstawa do dalszych rozważań w ramach systemu analiz i diagnozowania rozwoju napędów lotniczych. Za wartość dodatkową rozprawy należy uznać uporządkowanie aparatu pojęciowego związanego z budową i eksploatacją lotniczych napędów rozproszonych.

2. Metoda opracowania

Ze względów metodycznych całość rozprawy została podzielona na pięć części: część wstępną, analityczną i badawczą, dysertacyjną i podsumowującą - wnioski z przeprowadzonych badań i kierunki dalszych prac badawczych i rozwoju. Streszczenie pracy w języku polskim i angielskim. Rozprawa poprzedzona jest opracowanym przez Doktoranta wprowadzeniem do tematu jakim jest wielokryterialna ocena doboru napędów lotniczych nowej generacji z wykorzystaniem metod energetycznych. Praca zawiera wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

3. Zakres rozprawy

Część pierwsza, wstępna, obejmuje trzy rozdziały i omawia problematykę badawczą, zawiera przegląd literatury i wnioski z niego wypływające, stan wiedzy

o istniejących rozwiązaniach technicznych oraz sformułowanie zadania badawczego, celu i zakresu pracy. Poddana analizie literatura skłania do następujących wniosków i spostrzeżeń.

Napędy elektryczne są bardzo interesujące z punktu widzenia osiągnięć statku powietrznego w locie. Pozostaje problem związany z ograniczonym zasięgiem limitowanym pojemnością ciężkich akumulatorów. Napęd hybrydowy może być rozwiązaniem przejściowym przed opracowaniem akumulatorów o odpowiedniej gęstości energii lub wydajnych (lżejszych) ogniw paliwowych. Napęd hybrydowy posiada istotną wadę jaką jest skomplikowanie konstrukcji oraz wzrost masy własnej samolotu.

Napędy rozproszone mogą skompensować część wad napędu elektrycznego poprzez efektywniejsze zarządzanie energią na pokładzie, a tym samym zapewnieniu większego zasięgu i długotrwałości lotu. To samo spostrzeżenie można odnieść także do napędu hybrydowego, gdzie źródło energii stanowią akumulatory i generator spalinowy, bądź ogniwo paliwowe.

Większość dostępnych i analizowanych prac jest pracami teoretycznymi. Brak jest analiz energetycznych, sprawdzonych modeli obliczeniowych, wskazujących na to, że napęd rozproszony może zwiększyć efektywność napędu, przy ewentualnym zredukowaniu zużycia paliwa przez generator spalinowy czy też ogniwo paliwowe oraz emisję związków szkodliwych. Na podstawie przeglądu literatury przedmiotu istniejących rozwiązań technicznych oraz dotychczas przeprowadzonych przez Doktoranta prac własnych, można zauważyć intensywny rozwój napędów lotniczych zarówno w zakresie konstrukcyjnym jak i funkcjonalnym. Analiza przedmiotu dostarcza jednoznacznej informacji, że o ile mnogość napędów jest znaczna to nie ma jednoznacznie opracowanych kryteriów pozwalających z jednej strony na porównanie cech funkcjonalnych napędów a z drugiej na jednoznaczne jego dopasowanie do statku powietrznego. Stąd niejako wymuszona zostaje konieczność opracowania metodyki bądź metodyk umożliwiających dopasowanie, już na etapie projektu wstępnego, charakterystyk napędu do wymogów aerodynamicznych i energetycznych statku powietrznego.

Bazując na powyższych stwierdzeniach Doktorant przyjął w pracy problem analizy parametrów wybranych konstrukcji napędów lotniczych pod kątem uzyskania jednoznacznych parametrów porównawczych wykorzystując do tego metody energetyczne. Dodatkowo w ramach analiz sprawdzono ocenę efektywności zastosowania napędu rozproszonego do napędu lekkiego statku powietrznego. Pogłębionej analizie poddano również zagadnienia ekologiczne i ekonomiczne poprzez zbadanie ilościowe zużycia energii, paliwa i emisji spalin dla przyjętego profilu lotu.

Część druga, analityczna, zawarta jest w dwóch rozdziałach. w rozdziale czwartym przedstawiono metodę energetyczną do wyznaczenia osiągow samolotu w locie takich jak zasięg i długotrwałość lotu. Za pomocą wzorów pokazano jak obliczyć energię pozostałą na pokładzie po starcie statku powietrznego oraz długotrwałość i zasięg lotu. W rozdziale piątym przedstawiono charakterystyki techniczne motoszybowca AOS H2 oraz dane techniczne proponowanych źródeł energii do napędu statku powietrznego, dla przyjętego profilu lotu poddanego analizie.

Część trzecia, badawcza, stanowi sprawozdanie merytoryczne z realizacji zadań badawczych i jest przedstawiona w rozdziałach od szóstego do dziewiątego. W szóstym rozdziale przedstawiono metodykę doboru rozproszonego zespołu napędowego do samolotu oraz dobór takiego napędu i jego konfiguracji do płatowca motoszybowca AOS. Opierając się na założeniach przedstawionych w rozdziale 5 i przytoczonych w podrozdziale 2.1 przykładach, Doktorant przyjął do dalszej analizy wariant napędu rozproszonego dla płatowca motoszybowca AOS H2. Dla doboru napędu konieczne było wstępne rozplanowanie umiejscowienia zespołów śmigło-silnik na płatowcu oraz określenie mocy rozwijanej przez marszowe silniki elektryczne. W dalszej kolejności dokonano doboru śmigieł o małej średnicy tak, by zespół napędowy zapewnił bezpieczną wartość ciągu do wykonywania lotu, a śmigła zachowały odpowiednią separację od siebie. Odpowiednie umiejscowienie śmigieł względem krawędzi natarcia, pozwoliło na efektywniejsze wykorzystanie zjawisk aerodynamicznych do zwiększenia siły nośnej. Z tak dobranymi śmigłami do silników elektrycznych, uzyskano najwyższą sprawność napędową, co pozwoliło zbilansować energetycznie zespół napędowy, by uzyskać poprawę osiągow motoszybowca w porównaniu do tradycyjnego układu jednosilnikowego. W tej fazie badań koniecznym było by rozproszony zespół napędowy rozwijał taką samą moc (niezbędną do lotu poziomego jak również jej nadmiar do wznoszenia) jak napęd skupiony.

W rozdziale siódmym omówiony został dobór śmigieł o małej średnicy do układu rozproszonego współpracujących z silnikami elektrycznymi do zastosowania w napędzie rozproszonym. Doktorant opisał podstawy postępowania przy doborze śmigieł o małej średnicy do silnika elektrycznego, oraz przedstawił autorską metodę doboru śmigła o małej średnicy opracowaną w oparciu o literaturę przedmiotu oraz istniejący sposób doboru śmigieł do silnika spalinowego tłokowego. Dobór śmigła oparto na założeniu wykorzystania 10 silników oraz śmigieł o profilu rodziny Clark-Y, dla założeń napędu rozproszonego

przyjmując parametry lotu dla prędkości 100 km/h. Dla przyjętej konfiguracji napędu rozproszonego przygotowano szacunkowe przybliżenie masy elementów takiego zespołu napędowego i porównano go z konfiguracją motoszybowca z napędem skupionym. Przeprowadzona analiza danych dotyczących przykładu obliczeniowego wykazała, że odpowiednio skonfigurowany napęd może pracować z większą sprawnością. Dzięki większej sprawności śmigieł silniki pobierają niższą wartość mocy ze źródła energii. Przekłada się to na mniejszy pobór prądu. Na tym etapie Doktorant zauważa, że potencjalne zyski zastosowania napędu rozproszonego są niewielkie.

Część czwarta, dysertacyjna rozprawy, zawarta jest w kolejnych rozdziałach pracy. Autor zaprezentował wyniki przeprowadzonych analiz, przyjęto że dopiero uwzględnienie zmiany aerodynamiki przepływu wokół skrzydeł, może przynieść znaczącą poprawę parametrów osiągowych statku powietrznego. Analiza ta została przeprowadzona w ósmym rozdziale pracy. Doktorant przedstawił komputerową analizę CFD osiągow rozproszonego zespołu napędowego. Następnie zaprezentował wyniki analizy – zmianę wartości współczynników sił aerodynamicznych motoszybowca AOS po zastosowaniu napędu rozproszonego. Celem zaprezentowanych analiz CFD była próba określenia skali problemu i ewentualnych zysków, które mógłby napęd rozproszony przynieść po zastosowaniu na płatowcu motoszybowca AOS. Wyniki tych analiz są wystarczające do wstępnego określenia ewentualnych korzyści z zastosowania napędu rozproszonego. W ramach przygotowania analizy wykonano modele geometryczne śmigła oraz wykorzystano model płatowca motoszybowca AOS H2. Wyznaczenie geometrii śmigła opierało się w głównej mierze na jego zaprojektowaniu. Bezpośrednim celem analizy płatowca zintegrowanego z napędem rozproszonym było wyznaczenie współczynników siły nośnej i oporu dla skrzydła motoszybowca przy wykorzystaniu strugi powietrza przyspieszanej przez napęd rozproszony. Pośrednim wynikiem było wyznaczenie współczynników siły nośnej i oporu dla motoszybowca w konfiguracji napędu rozproszonego. W wyniku przeprowadzonych analiz wyznaczono zmianę rozkładu ciśnień i prędkości na skrzydle oraz współczynników sił aerodynamicznych skrzydła. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie wpływu napędu na zmianę współczynników aerodynamicznych skrzydła, a tym samym polepszenie osiągow badanego motoszybowca. W rezultacie dla zakresu przelotowego uzyskano współczynnik siły nośnej $C_Z = 0,926$ oraz współczynnik siły oporu $C_X = 0,031$. W stosunku do wyjściowego-skupionego układu aerodynamicznego (motoszybowiec z masztem silnikowym) współczynnik C_Z wzrósł o 6,8%, natomiast C_X spadł o około 10%. W rozdziale dziewiątym analizą objęty został wpływ zastosowania napędu

rozproszonego na poprawę wskaźników energetycznych, osiągowych i ekologicznych badanego statku powietrznego. W porównaniu do wcześniej uzyskanych wartości zasięgu i długotrwałości lotu dla napędu skupionego stwierdzono wzrost zasięgu o około 39 km i czasu lotu o około 24 minuty. Przekłada się to na 19 % poprawę osiągow samolotu z napędem rozproszonym. Wskaźnik zużycia energii w przeliczeniu na jeden kilometr, jak i jedną godzinę lotu uległ poprawie – zmniejszeniu o około 17 %. Dzięki zastosowaniu napędu rozproszonego uzyskano obniżenie emisji i zużycia paliwa w przeliczeniu na różnicę procentową o 16%.

W ostatniej, **piątej podsumowującej części** rozprawy, przedstawione zostały wnioski z przeprowadzonych badań. Celem badań było pokazanie możliwości i korzyści wynikających z zastosowania napędu rozproszonego, gdzie źródło energii do zasilania elektrycznych silników marszowych stanowił zespół akumulatorów współpracujący z wodorowym ogniwem paliwowym lub generatorem opartym na silniku spalinowym. Badania te wpisują się w zalecenia ujęte w tomie IV załącznika 16. do konwencji chicagowskiej, który ma zastosowanie od 1 stycznia 2019 r., i zawiera wytyczne redukcji emisji dwutlenku węgla dla lotnictwa międzynarodowego dotyczące sposobu realizacji programu zmniejszenia całkowitej emisji CO₂ oraz jego szczegółowy harmonogram.

Bazując na płatowcu motoszybowca AOS H2, dobrano napęd rozproszony, określono jego parametry geometryczne oraz wybrano silniki marszowe. Dokonano również doboru śmigła o małej średnicy do silnika elektrycznego. Na tej podstawie przyjęto układ samolotu z napędem rozproszonym. Wykonano analizy CFD opływu skrzydła w przyspieszonej strudze powietrza generowanej przez zespół śmigieł umiejscowionych nad krawędzią natarcia skrzydeł wyznaczając współczynniki sił aerodynamicznych skrzydła, a następnie porównano je ze współczynnikami skrzydła z wariantu skupionego. Na podstawie badań oraz uzyskanych wyników sformułowano wnioski natury konstrukcyjnej, energetycznej, ekologicznej i poznawczej.

Wnioski konstrukcyjne:

a) Napęd rozproszony powoduje komplikacje konstrukcji statku powietrznego

Umieszczenie wielu elementów zespołu napędowego na skrzydłach czy powierzchniach sterowych powoduje wiele problemów. Na etapie projektowania samolotu należy przewidzieć w skrzydłach miejsce na wiązki elektryczne, regulatory i inne elementy zespołu napędowego. Kolejnym utrudnieniem jest zapewnienie bezpiecznego sterowania silnikami i monitorowanie ich pracy.

b) Śmigła powinny być dobrane dla jak najwyższej sprawności

Moment obrotowy generowany przez silnik elektryczny jest praktycznie stały w czasie jego pracy, silnik tego typu bardzo dobrze nadaje się do napędu śmigieł. W pracy przedstawiono dobór śmigła o małej średnicy (w celu uniknięcia interferencji międzyśmigłowej oraz z racji tego, że śmigła te przenosiły relatywnie małe wartości mocy).

c) Strugi zaśmigłowe generowane przez napęd rozproszony powodują zmianę współczynników siły nośnej i oporu. By wykorzystać ten efekt do poprawy osiągnięć samolotu, należy zmienić jego geometrię (powierzchnię nośną) lub konfigurację w czasie lotu (kąt natarcia)

Strumienie zaśmigłowe wygenerowane przez śmigła napędu rozproszonego powodują przyspieszenie strugi powietrza nad skrzydłem. Implikuje to zwiększenie współczynników siły nośnej i oporu dla skrzydła.

d) Napęd rozproszony nie jest przydatny do motoszybowców

Śmigła w czasie lotu muszą pracować by zapewnić odpowiedni zakres ciągu użytecznego. W przypadku statku powietrznego, takiego jak motoszybowiec, zatrzymanie śmigieł i ustawienie ich w pozycji tzw. chorągiewki spowodowałoby zbyt duży opór aerodynamiczny. Doskonałość takiego motoszybowca byłaby zredukowana do nieakceptowalnego poziomu.

Wnioski energetyczne:

a) Napęd rozproszony umożliwia poprawę osiągnięć samolotu – zwiększenie zasięgu i długotrwałości lotu.

b) Napęd rozproszony umożliwia poprawę wskaźników energetycznych – zużycie energii i paliwa na pokonanie tego samego dystansu jest niższe.

c) Napęd rozproszony posiada wyższą sprawność energetyczną.

Wnioski ekologiczne:

a) Napęd rozproszony umożliwia obniżenie emisji drogowej samolotu

Dla samolotu AOS z napędem rozproszonym i z hybrydowo-spalinowym źródłem energii, dzięki wydłużeniu zasięgu i długotrwałości lotu zredukowano wartość emisji drogowej CO, CO₂ i NO_x zawartych w spalinach wyemitowanych w czasie lotu.

Całkowita masa spalin rozkłada się na większy dystans.

b) Napęd rozproszony ułatwia korzystanie z nowoczesnych i ekologicznych źródeł

energii.

Architektura napędu rozproszonego, w którym silniki marszowe są silnikami elektrycznymi ułatwia stosowanie proekologicznych źródeł energii.

Wnioski poznawcze:

- a) W celu osiągnięcia wyższej sprawności energetycznej i napędowej, projektowanie napędu i płatowca powinno być prowadzone równocześnie.*
- b) Konstrukcja samolotu wyposażonego w napęd rozproszony jest podatna na wielokryterialną optymalizację mając na względzie poprawę własności użytkowych samolotu.*
- c) Konstrukcję samolotu wyposażonego w napęd rozproszony można poddać wielokryterialnej optymalizacji mając na względzie poprawę własności użytkowych samolotu.*
- d) Zastosowanie napędu rozproszonego może usprawnić efektywne wykorzystanie energii*
- e) Konfiguracje napęd rozproszonego można modyfikować w trakcie lotu w celu sterowania samolotem lub w celu efektywnej gospodarki energią zgromadzonej na pokładzie.*

W świetle przytoczonych przykładów obliczeniowych i eksperymentalnych oraz wyciągniętych na tej podstawie wniosków, można stwierdzić, że napędy hybrydowe i elektryczne mogą stanowić przyszłościową alternatywę do napędu platform latających. Ponadto, napęd rozproszony w pewnych konfiguracjach, może umożliwić bardziej efektywne zarządzanie energią zespołu napędowego obiektu latającego (dzięki mniejszemu zużyciu energii na pokonanie danej odległości) i obniżyć zużycia paliwa. Dodatkowo, pozwala na ograniczenie emisji zanieczyszczeń zawartych w spalinach emitowanych do atmosfery oraz poprawę charakterystyk użytecznych statku powietrznego. Statek powietrzny powinien być od początku projektowany z myślą o takim rodzaju napędu, a jego układ aerodynamiczny powinien być zoptymalizowany pod względem uzyskania wyższej efektywności, wykorzystując przyspieszone strugi powietrza przez śmigła lub silniki przepływowe. Również śmigła oraz ich profile powinny być ściśle zaprojektowane do współpracy z silnikami elektrycznymi, jednocześnie uwzględniając ich charakterystykę pracy we współpracy z innymi śmigłami oraz wpływ aerodynamiczny elementów płatowca na ich osiągi. Zastosowanie napędu rozproszonego wpływa na poprawę wskaźników energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych.

Dalsze prace badawcze i kierunki rozwoju zostały zawarte w rozdziale 11.

Na podstawie dotychczasowych analiz Doktorant określił trafnie kierunki rozwoju i plany kolejnych badań. Badania będą obejmowały optymalizację konstrukcji napędu rozproszonego pod względem zmniejszenia jego masy oraz polepszenia parametrów użytecznych. Poprawę tych parametrów można uzyskać poprzez zaprojektowanie śmigieł zapewniających jak najwyższą sprawność dla żądanych zakresów lotu. Również umiejscowienie zespołu śmigła względem krawędzi natarcia i odległości śmigieł od siebie może być częścią tej optymalizacji. Znalezienie odpowiednich uwarunkowań geometrycznych może także poprawić efektywność napędu rozproszonego.

Końcowymi elementami tego rozdziału jest zestawienia uwag i wniosków oraz propozycji obszarów dalszych badań. Pracę zamyka spis literatury, rysunków, tabel i załączników oraz streszczenia doktoratu. Niedostatki pracy, którymi są niewątpliwie zamiennie używane określenia statku powietrznego, nie stosowanie ogólnie przyjętego specjalistycznego nazewnictwa osprzętu lotniczego, elementów i profilu lotu oraz skróty myślowe, zostały omówione z Doktorantem i nie mają wpływu na wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Tematem rozprawy doktorskiej mgra Michała KUŹNIARA była wielokryterialna ocena doboru napędów lotniczych nowej generacji z wykorzystaniem metod energetycznych. W ramach rozprawy opracowano metody badawcze i metodykę ich wykorzystania. Ważnym elementem pracy doktorskiej było wskazanie oddziaływania strumienia zaśmigłowego na wzrost współczynnika siły nośnej, co stanowi kluczowy element zwiększenia osiągnięć eksploatacyjnych takich jak zasięg i długotrwałość. Celem pracy było także wspieranie procesu decyzyjnego, dotyczącego wyboru rodzaju napędu, służącego zwiększaniu efektywności i bezpieczeństwa wykonywanych lotów testowych. Istotnym celem opracowania każdej nowej konstrukcji lotniczej jest zwiększanie efektywności realizacji zadań lotniczych. Rezultat ten jest możliwy do osiągnięcia poprzez systematyczne i planowe prowadzenie badań i analiz zarówno układów aerodynamicznych statku powietrznego jak też układów napędowych, a także zarządzaniem procesami eksploatacji techniki lotniczej.

. Autor rozprawy na podstawie przeprowadzonych badań oraz doświadczeń i analiz wynikających z pracy zawodowej w rozważanym obszarze zauważa potrzebę kompleksowego podejścia do opracowania nowoczesnych konstrukcji lotniczych. Uwaga autora zostaje skupiona na elementach systemów napędowych oraz rozwiązaniach aerodynamicznych

w transporcie lotniczym, w którym odnotowywane są ostatnio próby z napędami elektrycznymi i hybrydowymi. Stąd też wynikają kierunki rozważań prowadzonych w ramach niniejszej rozprawy. Sformułowany cel główny rozprawy został osiągnięty poprzez realizację zadań badawczych wynikających z celów cząstkowych. Zadania badawcze wykonano zgodnie z przyjętym schematem, bazując na uzyskanych rezultatach przeprowadzono analizę i przedstawiono wnioski a wyniki zaprezentowano w kolejnych częściach rozprawy. W ramach wszystkich części rozprawy uporządkowano aparat pojęciowy związany z napędem rozproszonym ogólnie, ale także ten dotyczący konstrukcji lotniczych w rozważanym obszarze analiz. Podjęty przez Doktoranta problem badawczy został sformułowany poprawnie, tak pod względem obszaru merytorycznego, jak i prowadzonych badań i rozważań. Z punktu widzenia określonych celów, przyjęta koncepcja badań jest w pełni uzasadniona, a zastosowane narzędzia i metody badawcze są adekwatne. Zarówno materiał badawczy jak i bibliograficzny został przez Autora rozprawy wykorzystany poprawnie. Na podstawie treści pracy można ocenić znaczący wkład Doktoranta w dziedzinie będącej przedmiotem dysertacji.

5. Podsumowanie

W przedstawionej do recenzji rozprawie Autor wykazał się wiedzą, doświadczeniem i szerokim spojrzeniem na badaną problematykę. W sposób zwięzły i logiczny wyodrębnił najistotniejsze problemy badawcze oraz określił sposoby i metody odpowiednie do ich rozwiązania.

Za istotne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- opracowanie metodyki badań wielokryterialnej oceny doboru napędów lotniczych nowej generacji z wykorzystaniem metod energetycznych w obszarze użytkowania statków powietrznych;
- zastosowanie do napędu motoszybowca AOS H2 wodorowego ogniwa paliwowego powstałego we współpracy z Akademią Górniczo Hutniczą w Krakowie, samo ogniwo jest również konstrukcją oryginalną.
- autorską metodę doboru śmigła o małej średnicy opracowaną w oparciu o literaturę przedmiotu oraz istniejący sposób doboru śmigieł do silnika spalinowego tłokowego.
- określenie uwarunkowań geometrycznych poprawiających efektywność napędu rozproszonego.
- poprawę parametrów osiągowych poprzez umiejscowienie zespołu śmigło-silnik względem krawędzi natarcia i odległości śmigieł od siebie tak, by zapewnić jak najwyższą sprawność dla żądanych zakresów lotu.

- wskazanie potrzeby rozszerzenia badań w celu optymalizacji konstrukcji napędu rozproszonego pod względem minimalizacji jego masy oraz polepszenia parametrów użytecznych.

Doktorant wykazał iż można także badać układy, w których śmigła mają różne zastosowanie i średnice. Poszczególne elementy napędu rozproszonego mogą pracować w czasie różnych etapów lotu, można wykorzystywać tego typu napęd do różnicowania ciągu i sterowania statkiem powietrznym. Odpowiednie kierunkowanie ciągiem zespołu napędowego tego typu może wyeliminować powierzchnie sterowe platformy latającej.

Praca doktorska stanowi znaczący wkład w rozwój badań nad wielokryterialną oceną doboru napędów lotniczych nowej generacji z wykorzystaniem metod energetycznych. W związku z tym, że najwyższą efektywność osiągową napęd rozproszony może przynieść w konstrukcjach projektowanych od podstaw, a nie przebudowywanych z już istniejących konstrukcji. Pod tym względem napęd rozproszony jest interesujący do zastosowania przy projektowaniu ciężkich dronów podwójnego zastosowania oraz statków powietrznych o stosunkowo dużej masie startowej, czyli tam, gdzie może przynieść największe korzyści ekonomiczne, ekologiczne a także militarne.

Reasumując, uważam, że rozprawa doktorska mgra Michała KUŹNIARA nt.: "*Wielokryterialna ocena doboru napędów lotniczych nowej generacji z wykorzystaniem metod energetycznych*" spełnia warunki określone w art. 179, ust. 1. „Ustawa z dnia 3.07.2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669).

W związku z powyższym, stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgra Michała KUŹNIARA jej publicznej do obrony.



Leszek CWOJDZIŃSKI

dr hab. inż. pil.