

RDJMe. 512.70. 2025

[w nagłówku każdej strony logo Technische Universität w Berlinie, storny ponumerowane od 1 do 5]

Politechnika Śląska

Rada Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna

Dziekanat/Wydział Mechaniczny Technologiczny

Dr inż. Alicja Piasecka-Belkhat, prof. Politechniki Śląskiej

Konarskiego 18a

44-100 Gliwice

FAKULTÄT V
VERKEHRS- UND
MASCHINENSYSTEME
Institut für Luft- und Raumfahrt
Lufahrzeugbau und Lechibit
Prof. dr inż. A. Bardenhagen

Berlin, 08.10.2025

**Recenzja pracy doktorskiej przedstawionej przez mgr inż. Magdalenę Peciak
„Application of Model Based System Engineering (MBSE) methods
in designing hybrid and electric propulsion system for aircraft”**

[„Zastosowanie metod inżynierii systemów opartej na modelach (MBSE) w projektowaniu hybrydowych i elektrycznych układów napędowych dla samolotów”]

Problem

W lotnictwie cywilnym, zmniejszenie zużycia energii przez samoloty odgrywa decydującą rolę w ich dalszym rozwoju. Z jednej strony, zmniejszenie zużycia energii prowadzi bezpośrednio do obniżenia kosztów eksploatacji, a z drugiej strony zmniejsza się wpływ na środowisko poprzez obniżenie emisji zanieczyszczeń, mierzonych w ekwiwalentach CO₂. Jeśli w przyszłości będą stosowane zrównoważone, neutralne pod względem emisji CO₂ paliwa, np. LH₂, których koszt będzie znacznie wyższy niż dzisiejszych paliw lotniczych, oba efekty będą się sumować. Podczas gdy w ostatnich dziesięcioleciach znaczna poprawa technologii silników była głównym czynnikiem wpływającym na zmniejszenie zużycia energii przez samoloty, inne technologie w obszarach redukcji masy konstrukcji, aerodynamiki i sterowania lotem nie zapewniły takiego samego efektu w zakresie redukcji zużycia energii przez samoloty. Dlatego też badania nadal koncentrują się na technologiach napędów i silników, ale stają się one szersze w miarę wprowadzania nowych źródeł energii, np. LH₂, konwerterów energii, np. ogniw paliwowych, silników, np. silników elektrycznych. Ponadto integracja tych nowych systemów z konfiguracją samolotu zwiększa złożoność, a zarządzanie temperaturą staje się szczególnie ważnym podsystemem. Ponieważ „klasyczne” oddzielenie konfiguracji samolotu od silnika/napędu nie jest już możliwe w przypadku tych nowych systemów magazynowania/przetwarzania energii i napędu, konieczne jest nowe, zintegrowane podejście, począwszy od fazy projektowania koncepcyjnego.

[stempel biura Dziekana z datą wpływu 13.10.2025 RDJMe/218151/2025]

Cel i znaczenie naukowe

Potrzeba nowego zintegrowanego podejścia do projektowania koncepcyjnego samolotów, opisana powyżej, ujawnia lukę w badaniach, którą Pani Magdalena Peciak zamierza wypełnić w swojej pracy doktorskiej. Jej podejście naukowe polega na wprowadzeniu inżynierii systemów opartej na modelach jako podstawy projektowania koncepcyjnego samolotów. W swojej pracy doktorskiej Magdalena Peciak koncentruje się na samolotach ogólnego przeznaczenia, które nie przyczyniają się w znaczący sposób do emisji CO₂ spowodowanej lotnictwem, ale stanowią skalowalną platformę testową pod względem ryzyka technicznego i finansowego. Na tej podstawie można następnie opracować i eksploatować w późniejszym etapie większe systemy napędowe dla lotnictwa komercyjnego. Pierwszym krokiem w tym kierunku jest zatem numeryczna

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 13.10.2025
RDJMe/218151/2025
nr zał.

symulacja samolotów lotnictwa ogólnego z alternatywnymi systemami napędowymi przy użyciu podejścia MBSE. Pani Peciak podsumowuje to w swojej hipotezie badawczej.

*„Projekt koncepcyjny jako część klasycznego procesu projektowania samolotów dla lotnictwa ogólnego koncentruje się początkowo na czterech głównych siłach: siły nośnej, ciężaru, oporu powietrza i ciągu, oraz wykorzystuje dane historyczne do oceny tych sił w celu podjęcia wstępnych decyzji projektowych. Jednak w przypadku samolotów z alternatywnymi systemami napędowymi, dane historyczne nie są już aktualne lub mają ograniczoną przydatność. **Jako alternatywę dla danych historycznych można wykorzystać modele parametryczne, pod warunkiem, że parametry projektowe tych modeli są bezpośrednio związane z czterema głównymi siłami. Dokładna identyfikacja tych parametrów projektowych stanowi zatem podstawę odpowiedniego procesu projektowania opartego na modelach dla samolotów z alternatywnymi systemami napędowymi**”.*

Celem pracy doktorskiej jest weryfikacja głównej hipotezy oraz hipotez cząstkowych z niej się wywodzących.

W niniejszej pracy doktorskiej Pani Magdalena Peciak wnosi naukowy wkład w inżynierię, łącząc podejście klasycznego, opartego na danych historycznych projektowania koncepcyjnego samolotów z koncepcją inżynierii systemowej opartej na modelach, stosowaną w przypadku innowacyjnych koncepcji napędu hybrydowo-elektrycznego. Jest to cenny krok w kierunku oceny wpływu niekonwencjonalnych i innowacyjnych systemów bez uzależnienia od danych statystycznych już na wczesnych etapach projektowania samolotów, umożliwiając oszacowanie ich wpływu na oszczędność energii, redukcję emisji CO₂, osiągi i ogólną wydajność samolotu.

Treść pracy i podejście metodologiczne

Recenzja opiera się na pisemnej wersji pracy napisanej w języku angielskim, która została mi przekazana 9 lipca 2025 r. przez Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechniki Śląskiej w Gliwicach i składa się łącznie ze 117 stron. Zawiera ona stronę tytułową, spis treści, nomenklaturę (skroty i symbole), siedem rozdziałów, bibliografię i załącznik. Nie ma wykazu rysunków ani tabel.

W wprowadzeniu (rozdział 1) Pani Magdalena Peciak przedstawia krótkie ogólne wprowadzenie do tematu, koncentrując się na najważniejszych warunkach ramowych. Od tej podstawy wywodzi znaczenie projektowania koncepcyjnego samolotów ogólnego przeznaczenia oraz podstawową hipotezę roboczą swojej pracy doktorskiej, która została już przytoczona na początku. Hipoteza ta ma zostać zweryfikowana poprzez odpowiedź na cztery kluczowe pytania. Nacisk kładziony jest na modelowanie czterech podstawowych sił działających na statek powietrzny: siły nośnej, ciężaru, ciągu i oporu. Dobrze przeprowadzony przegląd literatury systematycznie obejmuje obszary związane ze statkiem powietrznym jako systemem: ogólne modelowanie systemów i inżynieria systemowa, alternatywne systemy napędowe, projektowanie statków powietrznych oraz związane z tym procedury. Podział alternatywnych systemów napędowych na całkowicie elektryczne, hybrydowo-elektryczne i ogniwa paliwowe nie jest ostateczny i jest niejednoznaczny pod względem koncepcyjnym: napęd całkowicie elektryczny rozumiany jest wyłącznie jako napęd akumulatorowy, a ogniwa paliwowe opisują tylko jedną formę przekształcania energii chemicznej w energię elektryczną. W tym przypadku bardziej systematyczna klasyfikacja według magazynowania energii, przekształcania energii i generowania ciągu oraz analiza morfologiczna umożliwiłyby jaśniejsze uporządkowanie i usystematyzowanie kombinacji napędów. Wreszcie, struktura i treść kolejnych rozdziałów są wyjaśnione bardzo jasno. W tym miejscu pomocne byłoby powiązanie treści rozdziałów z odpowiedziami na cztery kluczowe pytania.

Rozdział 2 obejmuje kluczowe aspekty procesu projektowania samolotów z innowacyjnymi układami napędowymi na łącznie 19 stronach. Rozdział drugi, punkt 2.1 rozpoczyna się od analizy kluczowych zależności sił w samolocie oraz zależności zasięgu i czasu lotu od sił działających na samolot, które zasadniczo wywodzą się ze znanego równania zasięgu Bregueta. Na tej podstawie wyprowadza się następnie zależność między siłami a elementami określonymi w pracy doktorskiej Pani Magdaleny Peciak jako „systemy główne” – skrzydła, kadłub, ogon, napęd itp. Dobrze znany „klasyczny” proces projektowania konwencjonalnych samolotów został dokładnie wyjaśniony w części 2.2 i poparty odniesieniami. Sekcja 2.3 zawiera dobry i kompleksowy przegląd metod projektowania samolotów z alternatywnymi koncepcjami napędu, przy czym

szczególnie dobrze przedstawiono definicje różnych stopni hybrydyzacji i konkretnych zasięgów w metodach analitycznych. Metody projektowania numerycznego krótko wyjaśniają powszechnie stosowane systemy programowe. Przegląd literatury mógłby również obejmować system programowy PrADO oraz komercyjne oprogramowanie APD/Desmo firmy PACE. Ważną kwestią jest wzmianka o modernizacji istniejących samolotów z napędem konwencjonalnym do alternatywnych koncepcji napędu, ale ze względu na inne wymagania i ograniczenia w procesie projektowania zasługuje ona na osobny rozdział. Adaptacja procesu projektowania do nowych systemów napędowych zamyka rozdział w punkcie 2.4. Chociaż rys. 2.5 ilustruje główne różnice, termin „system oparty na modelu” pozostaje niejasny, ponieważ odnosi się zarówno do „parametrycznych modeli symulacyjnych”, jak i „systemów”, a termin „system” nie został zdefiniowany w tym rozdziale. Klasyfikacja podejść modelowych według klas dokładności („poziomów wierności”), która jest powszechnie stosowana w projektowaniu samolotów, również pomogłaby wyjaśnić niektóre kwestie w tym całkiem dobrze napisanym rozdziale.

Parametrycznie skonstruowane modele poszczególnych podsystemów zostały szczegółowo omówione w Rozdziale 3 na 21 stronach, gdzie najpierw podzielono je na trzy grupy: „dostarczające energię”, „przekształcające energię” i „wytworzące ciąg”. Ponieważ symulacja w pracy doktorskiej została przeprowadzona przy użyciu narzędzia Matlab/Simulink, wykorzystano podstawowe modele dostępne w tym narzędziu. Pierwsza grupa obejmuje akumulatory, zbiorniki na paliwa konwencjonalne i alternatywne oraz magazyny wodoru gazowego i ciekłego. Przedstawiono istotne zależności pomiędzy parametrami modelu, które później reprezentują parametry w całej symulacji. Pożądane byłoby krótkie określenie odpowiednich parametrów dla każdego członka grupy, które później będą zmieniane lub ustalane. W przypadku systemów magazynowania wodoru, nie wyjaśniono bardziej szczegółowo zależności masy zbiornika od jego objętości, ciśnienia i temperatury. Druga grupa przetworników energii obejmuje silniki elektryczne, spalinowe i ogniwa paliwowe. Granice systemu mogłyby zostać wyjaśnione bardziej szczegółowo poprzez porównanie silników chłodzonych powietrzem i wodą, z przekładnią i bez przekładni, pod względem wydajności i masy, szczególnie w przypadku silników spalinowych. W przeciwieństwie do ogniw paliwowych, wymagania dotyczące chłodzenia silników elektrycznych i spalinowych nie są dalej rozpatrywane. W przypadku ogniw paliwowych, można było wyjaśnić czy uwzględniono tylko masę poszczególnych ogniw, czy też masę zainstalowaną, w tym konstrukcje nośne dla poszczególnych ogniw, obróbkę powietrza (w razie potrzeby sprężanie) i kondycjonowanie wodoru (ciśnienie, temperatura). Grupa „generowanie ciągu” zawiera bardzo uproszczony model śmigła, który określa jakość konwersji energii za pomocą stałego współczynnika sprawności. Wreszcie, kolejna grupa przedstawia modele parametryczne „systemów pomocniczych”: elektroniki mocy, dystrybucji energii elektrycznej, systemu zarządzania temperaturą, systemów awioniki/kabiny oraz przekładni. Nie uwzględniono projektu i masy okablowania. Ogólnie rzecz biorąc, Rozdział 3 zawiera bardzo udany przegląd, ale nadal pozostawia wiele pytań bez odpowiedzi dotyczących konkretnego zastosowania i wzajemnych powiązań w ogólnym modelu systemu.

Pani Magdalena Peciak omawia modelowanie i analizę alternatywnych układów napędowych w Rozdziale 4 swojej pracy doktorskiej. W pierwszym punkcie, 4.1, jasno przedstawiono cztery rozważane konfiguracje: a) napęd wyłącznie elektryczny z akumulatorem, b) napęd hybrydowy elektryczny szeregowy c) równoległy oraz d) napęd wspomagany akumulatorem z ogniwami paliwowymi. Nie ma żadnej uwagi wstępnej informującej, że podsystem zarządzania temperaturą uwzględnia wyłącznie podsystemy akumulatorów i ogniw paliwowych. Jest to podsystem, którego nie należy pomijać, zwłaszcza w przypadku napędu hybrydowego z silnikami spalinowymi, a jego pominięcie wymagałoby wyjaśnienia. Ilustracje dla a) (rys. 4.1), b) (rys. 4.2) i d) (rys. 4.4) nie pokazują przekładni pomiędzy silnikiem elektrycznym a śrubą napędową, która - podobnie jak chłodzenie silników spalinowych - mogłaby mieć zauważalny wpływ na oszacowanie masy. W punkcie 4.2 z powodzeniem połączono podejście do modelowania układu napędowego poprzez analizę energetyczną z ogólnym podejściem projektowym opartym na siłach wyjaśnionych w Rozdziale 2. Modele symulacyjne alternatywnych układów napędowych od a) do d) zostały przedstawione w sposób zwięzły i przejrzysty w punkcie 4.3. Pożądane byłoby ściślejsze powiązanie rysunków 4.7 – 4.10 z rysunkami 4.1 – 4.4 i poszczególnymi modelami podsystemów w Rozdziale 3. Modele te zawierają wiele parametrów i wzajemnych zależności, które należy bardzo dokładnie i centralnie odwzorować, aby móc prawidłowo zinterpretować późniejsze wyniki.

Przegląd i opis jakościowy samolotów ogólnego przeznaczenia z alternatywnymi konfiguracjami napędu, które zostały dotychczas zrealizowane, przedstawiono w punkcie 5.1 Rozdziału 5. W punkcie 5.2 poniżej przedstawiono tabelę pokazującą wpływ integracji podsystemów napędowych na kluczowe parametry konfiguracyjne (geometria: masa, aerodynamika itp.) całego samolotu. Nie uwzględniono wpływu aspektów integracji na podsystem (wydajność, sprawność, wymagania dotyczące chłodzenia itp.). Na koniec w punkcie 5.3 krótko przedstawiono modelowanie i analizę statków powietrznych w oprogramowaniu OpenVSP, bez dogłębnego wyjaśnienia metod stosowanych w tym narzędziu. Rozdział 5, który można by ogólnie poprawić, tylko częściowo spełnia cele sformułowane przez Panią Magdalenę Peciak w części 1.3. Szczególnie pomocne byłoby dogłębne rozważenie lub wdrożenie związku między alternatywnymi układami napędowymi (Rozdział 4) a procesem projektowania zaproponowanym w rozdziale.

W Rozdziale 6 Pani Magdalena Peciak stosuje fazę koncepcyjną poszerzoną w Rozdziale 2, aby uwzględnić projektowanie układów napędowych oparte na modelach w projektowaniu samolotu ogólnego przeznaczenia. W związku z tym, w punkcie 6.1 najpierw zdefiniowano podstawowe wymagania dotyczące samolotu. Nie przedstawiono przeglądu wymagań certyfikacyjnych, które należy uwzględnić w fazie koncepcyjnej zgodnie z CS-23, a w szczególności w odniesieniu do elektrycznych układów napędowych. Rzeczywista realizacja projektu koncepcyjnego została przedstawiona w punkcie 6.2, w której krótko wyjaśniono wszystkie istotne etapy i przedstawiono najważniejsze wyniki. Nie uwzględniono istotnych parametrów konstrukcyjnych statku powietrznego, takich jak obciążenie skrzydła i stosunek ciągu do masy. Współczynnik siły nośnej wynoszący 0,0507 w tabeli 6.2 oraz prędkość lądowania wyższa niż prędkość startu w tabeli 6-3 nie wydają się wiarygodne i nie są dalej omawiane. Brakuje parametrów aerodynamicznych wymaganych do obliczenia misji z wysuniętymi klapami podczas startu i lądowania. Nie przedstawiono porównania dostępnego i wymaganego ciągu dla typowych przypadków startu, awarii silnika podczas wznoszenia i wznoszenia po przerwaniu lądowania. Rysunek 6.3 nie zawiera informacji o wysokości i prędkości samolotu. Brakuje informacji o odległości startu i lądowania. Ogólnie rzecz biorąc, dowód przydatności włączenia opartego na modelu projektu systemu napędowego do projektu koncepcyjnego samolotu jest zatem zasadniczo udany, ale wymaga znacznego rozszerzenia prezentacji wyników uzyskanych w pracy doktorskiej oraz dodania dowodów absolutnie niezbędnych do certyfikacji zgodnie z CS-23 w fazie koncepcyjnej.

Stosunkowo krótkie, dwustronicowe podsumowanie w Rozdziale 7 zawiera najważniejsze treści i wyniki. Przedstawiono w nim również krótką prognozę na przyszłość. Krytyczna dyskusja na temat własnej pracy i osiągniętych wyników, a także refleksja na temat zakresu, w jakim praca może odpowiedzieć na hipotezę roboczą i wynikające z niej pytania naukowe zawarte w rozdziale, dopełniłyby całość pracy.

Podsumowanie

W swojej pracy doktorskiej autorka opracowała i odpowiedziała na postawioną przez siebie hipotezę badawczą oraz wynikające z niej pytania naukowe w sposób zasadniczo zrozumiały i uporządkowany. Dzięki podejściu polegającemu na rozszerzeniu klasycznego projektowania koncepcyjnego samolotów o oparte na modelach projektowanie istotnych systemów nieznanymi z danych historycznych, szczególnie w obszarze napędu, autorka wykazała się umiejętnością prowadzenia niezależnych badań naukowych. Formalne opracowanie pracy doktorskiej można ogólnie uznać za udane, ale wymaga ono znacznych poprawek w rozdziałach 4, 5 i 6, aby procedury były bardziej zrozumiałe, a osiągnięte wyniki bardziej przejrzyste i powtarzalne. W związku z tym zalecam dopuszczenie pracy doktorskiej Pani Magdaleny Peciak, mgr inż., do obrony w dziedzinie inżynierii mechanicznej.

[podpis nieczytelny]

Prof. dr inż. A. Bardenhagen

Ja, Małgorzata Sokołowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na listę tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi dokumentem sporządzonym w języku angielskim. Gliwice, dnia 27 października 2025 r. Repertorium nr 467/2025.