

Dr hab. inż. Dariusz M. Perkowski, prof. PB

Białystok, 30 września 2025 r.

Politechnika Białostocka

Wydział Mechaniczny

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej

Ul. Wiejska 45C, Białystok 15-351

Email: d.perkowski@pb.edu.pl,

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Peciak

***„Application of Model Based System Engineering (MBSE) methods in designing
hybrid and electric propulsion system for aircraft”***

wykonana pod opieką naukową:

Pana Promotora PhD, DSc, Eng. Wojciech Skarka, Prof. SUT

oraz Pana Promotora , Prof. Dr.-Ing. Maik Gude, TU Dresden

1. Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Prof. PŚ Alicja Piasecka-Belkhayat o numerze RDIME.512.70.2025.

2. Opis zawartości pracy:

Rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Peciak pt. „Application of Model Based System Engineering (MBSE) methods in designing hybrid and electric propulsion system for aircraft” stanowi spójne i interdyscyplinarne opracowanie poświęcone problematyce projektowania statków powietrznych z napędami alternatywnymi, obejmującymi układy elektryczne, hybrydowe oraz oparte na ogniwach paliwowych. Autorka podjęła temat niezwykle aktualny w kontekście transformacji sektora lotniczego w kierunku rozwiązań niskoemisyjnych i zeroemisyjnych, wskazując, że tradycyjne metody projektowania, bazujące na danych historycznych dla konstrukcji spalinowych, tracą swoją użyteczność w odniesieniu do nowych koncepcji napędowych. W pracy sformułowano tezę, iż brak historycznych baz danych może zostać zastąpiony przez modele parametryczne powiązane z czterema podstawowymi siłami działającymi na statek powietrzny: nośną, ciężarem, oporem i ciągiem.

Rozdział pierwszy zawiera szerokie wprowadzenie do problematyki oraz podkreśla znaczenie redukcji emisji gazów cieplarnianych w lotnictwie. Autorka przedstawia cele badawcze oraz pytania naukowe, które określają kierunek dalszych analiz. Wskazano

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 13.10.2025
RDJMe 1219/1512025
nr zał.

jednoznacznie, że konieczne jest opracowanie nowej metodyki projektowej, opartej na podejściu modelowym, umożliwiającej integrację napędów alternatywnych z płatowcem już na etapie projektowania wstępnego.

W rozdziale drugim autorka omawia klasyczny proces projektowania samolotów i wskazuje jego ograniczenia w odniesieniu do napędów alternatywnych. Szczegółowo opisano zależności między wymaganiami misji lotniczej a głównymi siłami aerodynamicznymi, podkreślając znaczenie parametrów T/W (thrust-to-weight ratio) oraz W/S (wing loading). Następnie przedstawiono przegląd dostępnych metod analitycznych i numerycznych stosowanych do konstrukcji hybrydowych i elektrycznych, wskazując zarówno ich zalety, jak i ograniczenia. Rozdział ten ma charakter porządkujący i przygotowuje grunt do dalszych badań autorskich.

Rozdział trzeci rozpoczyna część oryginalną rozprawy. Dokonano w nim klasyfikacji podsystemów napędu alternatywnego w cztery grupy: dostarczania energii, konwersji energii, generacji ciągu oraz układów pomocniczych. Dla każdej z grup określono kluczowe parametry projektowe i zaproponowano ich modele w środowisku Matlab/Simulink z wykorzystaniem Simscape. Autorka pokazuje, w jaki sposób parametry te wpływają na siły aerodynamiczne i jak mogą być użyte do iteracyjnego projektowania płatowca.

Rozdział czwarty przedstawia modele całych układów napędowych: elektrycznego, hybrydowego oraz wodorowego opartego na ogniwach paliwowych. W oparciu o podejście energy-based modelling przeanalizowano przepływy energii pomiędzy podsystemami i ich wpływ na charakterystykę misji lotniczej. Modele te pozwalają na ocenę możliwości układu napędowego w różnych scenariuszach lotu i są przykładem pełnej integracji obliczeń numerycznych z procesem projektowym.

Rozdział piąty koncentruje się na wpływie napędów alternatywnych na geometrię i parametry aerodynamiczne płatowca. Przy pomocy oprogramowania OpenVSP opracowano modele parametryczne samolotów, w których analizowano różne warianty integracji źródeł energii. Wskazano, że lokalizacja baterii lub zbiorników wodoru istotnie wpływa na kształt kadłuba, rozkład mas i stateczność. Rozdział ten wnosi istotny element nowatorstwa poprzez proponowanie iteracyjnej współpracy modelu napędu z modelem płatowca.

Rozdział szósty ma charakter aplikacyjny i stanowi studium przypadku. Autorka przedstawiła koncepcyjny projekt samolotu z napędem opartym na ogniwach paliwowych PEM, rozpoczynając od faz definiowania wymagań, a następnie przechodząc do doboru rzeczywistych komponentów i ich integracji w płatowcu. Ten fragment pracy jednoznacznie

potwierdza przydatność zaproponowanej metodyki projektowej i stanowi kulminacyjny punkt części autorskiej.

Rozdział siódmy zawiera wnioski końcowe. Autorka podkreśla, że zaproponowane podejście modelowe stanowi skuteczną alternatywę wobec braku danych historycznych i pozwala na projektowanie nowych statków powietrznych w sposób dostosowany do realiów współczesnych napędów alternatywnych. Wnioski są klarowne, logicznie uporządkowane i bezpośrednio wynikają z przeprowadzonych badań.

Podsumowując, rozprawa ma przemyślaną i logiczną strukturę. Część autorska rozpoczyna się wyraźnie od rozdziału trzeciego i jest konsekwentnie rozwijana w kolejnych partiach pracy, aż do studium przypadku w rozdziale szóstym. Całość stanowi wartościowy wkład w rozwój metodyki projektowania statków powietrznych z napędami alternatywnymi, oparty na rzetelnych modelach parametrycznych i spójnej integracji narzędzi obliczeniowych z procesem inżynierskim.

3. Oryginalność pracy

Rozprawa mgr inż. Magdaleny Peciak wnosi istotny, oryginalny wkład do metodologii projektowania statków powietrznych poprzez opracowanie metodyki zastępującej brakujące dane empiryczne modeli historycznych danymi pochodzącymi z symulacji parametrycznych powiązanych bezpośrednio z czterema głównymi siłami aerodynamicznymi (L – siłą nośną, W – ciężarem, D – oporem, T – ciągiem). Oryginalność podejścia polega na konsekwentnym przełożeniu założeń Model-Based Systems Engineering (MBSE) na proces projektowania napędów alternatywnych, przy czym autorka nie ogranicza się do analizy pojedynczych komponentów, lecz buduje spójny model systemowy obejmujący zarówno podsystemy napędowe, jak i geometrię płatowca.

Nowatorskie elementy rozprawy można wskazać w kilku wymiarach:

1. Systematyzacja i parametryzacja podsystemów napędowych. Autorka zaproponowała podział na cztery grupy funkcjonalne: (i) dostarczanie energii (baterie, zbiorniki paliwa, zbiorniki wodoru), (ii) konwersję energii (silniki elektryczne, ogniwa paliwowe, generatory), (iii) generację ciągu (śmigła, wentylatory) oraz (iv) systemy pomocnicze. Każdy z podsystemów został opisany modelem matematycznym w środowisku Matlab/Simulink z wykorzystaniem bibliotek Simscape, co umożliwiło ich połączenie w ujęciu wielodomenowym. Tak zdefiniowana klasyfikacja i jej implementacja nie była dotychczas prezentowana w literaturze w tak pełnej i uporządkowanej formie.

2. Integracja modeli podsystemów w układzie napędowym. Oryginalnym wkładem jest opracowanie konfiguracji kompletnych systemów: all-electric, hybrid-electric oraz fuel cell. Wprowadzono przy tym metodykę energy-based modelling, która pozwala na monitorowanie i bilansowanie przepływów energii w całym układzie, w tym konwersji chemiczno-elektrycznej w ogniwach paliwowych oraz akumulacji energii w bateriach. To podejście umożliwia ocenę pracy systemu w czasie rzeczywistym misji, co znacząco poszerza możliwości analizy względem klasycznych modeli empirycznych.
3. Powiązanie modeli napędu z modelem płatowca. Autorka wprowadziła oryginalną procedurę sprzężenia zwrotnego pomiędzy modelem napędu a modelem aerodynamicznym płatowca opracowanym w OpenVSP. Wykazano, że lokalizacja źródeł energii (baterii, zbiorników wodoru) wpływa na geometrię kadłuba, rozkład mas i parametry stateczności, a więc wymusza iteracyjne modyfikacje konstrukcji. Jest to rozwiązanie o dużej wartości, gdyż klasyczne metody projektowe traktują napęd i płatowiec rozdzielnie, bez ich wzajemnego sprzężenia.
4. Studium przypadku – samolot z ogniwami paliwowymi PEM. Najbardziej kompletnym przejawem oryginalności rozprawy jest koncepcyjny projekt samolotu zasilanego ogniwami paliwowymi. Autorka przeprowadziła proces od fazy wymagań, poprzez dobór komponentów dostępnych na rynku, aż po integrację w modelu płatowca i analizę symulacyjną. Tak całościowe studium aplikacyjne, wykorzystujące w pełni opracowaną metodykę, stanowi dowód praktycznej użyteczności zaproponowanego podejścia i potwierdza oryginalność pracy.

Podsumowując, oryginalność rozprawy Magdaleny Peciak polega na opracowaniu i zastosowaniu zintegrowanej metodyki projektowej opartej na MBSE i modelach parametrycznych, która łączy modelowanie podsystemów napędu w środowisku Simulink z modelem aerodynamicznym płatowca w OpenVSP, umożliwiając iteracyjną optymalizację konstrukcji. Praca ma charakter nowatorski, gdyż w literaturze światowej dominują analizy cząstkowe, natomiast autorka zaprezentowała pełny, systemowy proces projektowania statków powietrznych z napędami alternatywnymi.

4. Wartości użytkowe pracy

Rozprawa mgr inż. Magdaleny Peciak posiada wysokie wartości użytkowe, które jednoznacznie sytuują ją w obszarze badań mających realne zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Opracowana metodyka projektowania, oparta na modelach parametrycznych i podejściu systemowym, pozwala na zastąpienie brakujących danych historycznych, co jest szczególnie istotne w odniesieniu do napędów elektrycznych, hybrydowych i wodorowych, dla

których nie istnieją jeszcze obszerne i wiarygodne bazy empiryczne. Przedstawione modele podsystemów w środowisku Matlab/Simulink, rozszerzone o elementy Simscape, umożliwiają budowanie i analizę kompletnych konfiguracji układów napędowych w różnych wariantach i misjach lotniczych, co stanowi bezpośrednie narzędzie wspierające proces projektowania koncepcyjnego. Odrębną wartością użytkową jest integracja tych modeli z modelem płatowca opracowanym w OpenVSP, która pozwala oceniać wpływ lokalizacji źródeł energii na geometrię, rozkład mas oraz stateczność konstrukcji, a tym samym wspiera iteracyjne doskonalenie projektu. Szczególne znaczenie praktyczne ma również zastosowane podejście energy-based modelling, umożliwiające śledzenie przepływu energii w całym układzie i ocenę sprawności jego poszczególnych komponentów, co pozwala identyfikować potencjalne ograniczenia energetyczne i zwiększać efektywność systemu. Studium przypadku samolotu z napędem opartym na ogniwach paliwowych PEM w pełni potwierdza użyteczność zaproponowanej metodyki i może stanowić punkt odniesienia dla przyszłych projektów badawczych i wdrożeniowych w zakresie lotnictwa lekkiego i regionalnego. Wartością dodatkową pracy jest możliwość adaptacji opracowanych modeli i procedur do innych gałęzi transportu, gdzie stosowane są układy elektryczne i hybrydowe, co znacząco poszerza potencjał aplikacyjny dysertacji. Całość nadaje pracy charakter opracowania nie tylko teoretycznego, ale również wysoce pragmatycznego, z wyraźnym ukierunkowaniem na praktyczne zastosowania w inżynierii lotniczej i pokrewnych sektorach technologii transportowych.

5. Uwagi dyskusyjne do pracy

Rozprawa mgr inż. Magdaleny Peciak została przygotowana w sposób kompletny i logiczny, a jej wartość polega nie tylko na opracowaniu spójnej metodyki, lecz także na otwarciu nowych możliwości badawczych. W tej perspektywie warto wskazać kilka obszarów, które mogą stać się naturalnym polem dalszych dociekań naukowych i rozwoju przedstawionych rozwiązań.

Opracowane modele podsystemów w Matlab/Simulink i Simscape w pełni realizują cele koncepcyjne pracy. Dyskusyjnym, a zarazem interesującym kierunkiem kontynuacji jest ich stopniowe uzupełnianie o dane pochodzące z pomiarów laboratoryjnych lub z charakterystyk producentów komponentów. Pozwoliłoby to na dalsze zwiększanie realizmu symulacji oraz wprowadzanie elementów walidacji doświadczalnej. Integracja modeli napędu z płatowcem w OpenVSP stanowi oryginalny i cenny element rozprawy. W dalszej perspektywie rozwinięciem tego etapu mogłoby być zastosowanie zaawansowanych analiz aerodynamicznych, takich jak obliczenia CFD, które mogłyby pogłębić wnioski dotyczące wpływu rozmieszczenia źródeł energii na charakterystyki lotne konstrukcji. Tego rodzaju poszerzenie byłoby logiczną kontynuacją przyjętego podejścia systemowego. Studium przypadku samolotu z napędem PEM

dobrze potwierdza przydatność metodyki. Dyskusyjną możliwością rozwinięcia tej części badań jest analiza wariantowa, obejmująca różne typy płatowców i scenariusze misji. Pozwoliłoby to jeszcze pełniej pokazać uniwersalność metodyki i jej potencjał adaptacyjny w różnych kontekstach konstrukcyjnych.

Podsumowując, uwagi dyskusyjne dotyczą przede wszystkim możliwości dalszego rozwijania i pogłębiania badań. Nie odnoszą się one do braków pracy, lecz wskazują zdaniem recenzenta naturalne ścieżki, które mogą w przyszłości wzmocnić i poszerzyć zakres opracowanej metodyki.

6. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Biorąc pod uwagę podstawowy charakter przedstawionych badań kwalifikowałbym ją do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna* (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669). **Biorąc powyższe pod uwagę, stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Magdaleny Peciak do publicznej obrony.**

W związku z powyższym przedstawiam pozytywną konkluzję i uprzejmie wnoszę o przyjęcie przedmiotowej rozprawy doktorskiej oraz wnioskuję do **Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej** o dopuszczenie **Pani mgr inż. Magdaleny Peciak** do kolejnych etapów przewodu doktorskiego - Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 roku poz. 478 ze zm.).

Dr hab. inż. Dariusz M. Perkowski, prof. PB
/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)

Małgorzata Jamka

Politechnika Białostocka

Wydział Mechaniczny

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej

Ul. Wiejska 45C, Białystok 15-351

Email: d.perkowski@pb.edu.pl.

Wniosek o wyróżnienie pracy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Peciak
„Application of Model Based System Engineering (MBSE) methods in designing
hybrid and electric propulsion system for aircraft”

wykonana pod opieką naukową:

Pana Promotora PhD, DSc, Eng. Wojciech Skarka, Prof. SUT
oraz Pana Promotora , Prof. Dr.-Ing. Maik Gude, TU Dresden

Biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Peciak, jej konsekwentną i logiczną strukturę, oryginalność zaproponowanej metodyki oraz znaczące wartości aplikacyjne, wnoszę o jej **wyróżnienie**. Na szczególne podkreślenie zasługuje nowatorskie zastosowanie metod *Model-Based Systems Engineering* w projektowaniu statków powietrznych z napędami alternatywnymi, spójna integracja modeli podsystemów napędowych z modelem płatowca oraz praktyczne studium przypadku samolotu z napędem opartym na ogniwach paliwowych, które w pełni potwierdza przydatność opracowanej metodyki. Rozprawa ma charakter nowatorski, a jej rezultaty wpisują się w aktualne potrzeby transformacji sektora lotniczego w kierunku napędów zeroemisyjnych. Wszystkie te cechy uzasadniają przyznanie rozprawie wyróżnienia.

Dr hab. inż. Dariusz M. Perkowski, prof. PB

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)