

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Sibilski
krzysztof.sibilski@pw.edu.pl
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24,
00-665 Warszawa

Warszawa, 30-03-2026 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej opracowanej przez
Pana mgr inż. Wojciecha Krzysztofa Plucińskiego

nt.:

**OPRACOWANIE METODY SYMULACJI DZIAŁANIA OBWODÓW ELEK-
TROMECHANICZNYCH SERWOZAWORÓW I CZUJNIKÓW POŁOŻENIA
STOSOWANYCH W APLIKACJACH LOTNICZYCH Z UWZGLĘDNIENIEM
WPŁYWU OBCIĄŻEŃ MECHANICZNYCH ORAZ TEMPERATURY NA ICH
WYDAJNOŚĆ**

*wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mecha-
niczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego*

1. Podstawy formalno-prawne

Recenzję przygotowałem na podstawie pisma przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronowskiego, (sygn. W10/RDND07/189/2025), z dnia 8 października 2025 r. z prośbą o sporządzenie recenzji odnośnej rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Krzysztofa Plucińskiego pt.: „Opracowanie metody symulacji działania obwodów elektromechanicznych serwozaworów i czujników położenia stosowanych w aplikacjach lotniczych z uwzględnieniem wpływu obciążeń mechanicznych oraz temperatury na ich wydajność”

OCENA STRONY METODYCZNEJ

2. Układ rozprawy

Rozprawa doktorska obejmuje 159 stron wydruku w formacie A4, w tym 8 stron załączników, zawiera 90 rysunków oraz 13 tabel. Bibliografię stanowi 150 pozycji, w tym 12 odniesień do stron internetowych oraz 4 patenty współautorstwa Doktoranta). Większość pozycji literatury to prace o znaczeniu poznawczym i technicznym, obejmujących materiał badawczy rozprawy.

Przedmiotem pracy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Krzysztofa Plucińskiego było opracowanie metody badania oraz symulacji działania obwodów elektromechanicznych serwozaworów i czujników położenia, stosowanych w napędach elektrohydraulicznych urządzeń stanowiących podzespoły samolotu. W symulacjach uwzględniono wpływ obciążeń mechanicznych oraz temperatury na wydajność i stabilność badanych przetworników. Praca doktorska została wykonana w ramach doktoratu wdrożeniowego, we współpracy z firmą Collins Aerospace.

Tematyka rozprawy dotyczy ważnego zagadnienia z obszaru bezpieczeństwa konstrukcji lotniczych. Doktorant opracował metodykę pozwalającą na identyfikację wielkości determinujących krytyczne parametry pracy elektromechanicznych serwomechanizmów lotniczych.

Przeprowadzona przez Doktoranta analiza dostępnej literatury wykazała brak kompleksowych modeli przetworników elektromechanicznych, uwzględniających rzeczywiste warunki eksploatacyjne w odniesieniu do najnowszej generacji lotniczych instalacji paliwowych. Dlatego też Doktorant opracował zintegrowane modele numeryczne dla przetwornika położenia oraz silnika momentowego serwozaworu obejmujące elektromagnetyzm, mechanikę oraz przewodnictwo cieplne. Opracowane przez siebie modele zaimplementował w komercyjnych środowiskach: ANSYS®, FEMM®, JMag®, z powiązaniem do pakietu narzędzi obliczeniowych MATLAB/Simulink®. W przeprowadzonych symulacjach opisujących pracę przetworników w serwonapędzie Doktorant uwzględnił wyznaczone na drodze pomiarów zmienne parametry materiałowe zależne od temperatury, stanu naprężenia oraz struktury ferromagnetyka.

Reasumując uważam, że opracowanie mgr inż. Wojciecha Krzysztofa Plucińskiego jest oryginalne i wnosi wartościowe elementy w nurt badań w dziedzinie elektromechanicznych przetworników instalacji płatowcowych.

Przyjmując, że rozdziały od 3 do 5 (łącznie 88 stron) stanowią zasadniczą część rozprawy doktorskiej, 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 rozważaną treść.

2. Metoda opracowania

Ze względów metodycznych całość rozprawy można podzielić na:

Część metodologiczną, obejmującą rozdziały 1 oraz 2 (43 strony), w której Autor przedstawił genezę podjętych badań, ocenił stan wiedzy dotyczący zakresu merytorycznego rozprawy, określił przedmiot, zakres, cel i zarys metodyki przeprowadzonych badań.

Celem pracy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Krzysztofa Plucińskiego było zbadanie czy zjawiska fizyczne w materiałach magnetycznych wynikające ze środowiskowych warunków brzegowych wpływają w sposób istotny na działanie przetworników elektromagnetycznych w serwonapędach lotniczych. Drugim celem pracy było opracowanie wytycznych prawidłowego projektowania tego typu urządzeń.

Część doświadczalną i teoretyczną – obliczeniową obejmującą rozdziały od 3 do 5 (68 stron), w której Doktorant przedstawił zagadnienia teoretyczne oraz sposób numerycznego modelowania podzespołów działających w systemie serwonapędu elektrohydraulicznego oraz metodykę badań.

Opracowana przez Doktoranta metodyka łączyła modelowanie wielofizyczne, symulacje numeryczne oraz walidację eksperymentalną. Opisana w rozdziale 3 metoda symulacji numerycznej umożliwiła predykcyjną ocenę działania komponentów elektromechanicznych w warunkach eksploatacyjnych. W szczególności opracowana przez Kandydata metodyka uwzględniała:

- Odniesienie problemu technicznego do literatury branżowej i naukowej.
- Stworzenie i omówienie modeli matematycznych opisujących pracę obwodów elektromagnetycznych dedykowanych do sterowania siłownikami w aplikacjach lotniczych na przykładzie silnika momentowego i przetwornika położenia typu LVDT.
- Stworzenie modeli wielofizycznych opartych na elementach skończonych.
- Eksperymentalne wyznaczenie charakterystyk magnesowania $B(H)$ dla materiałów miękkich magnetycznie o strukturze polikrystalicznej nieorientowanej.
- Opracowanie statystyczne wyników pomiarów,
- Walidacja opracowanej metody symulacji działania produktu typu EMID, przez zbadanie fizycznego prototypu i porównanie wyników testów z modelem numerycznym.

Model serwozaworu i czujnika położenia Doktorant oparł na podejściu zintegrowanym w którym uwzględnił następujące założenia:

- Układ traktowany jest jako system rozproszony, ale aproksymowany

przez modele dyskretne (MES);

- Zjawiska elektromagnetyczne opisane są równaniami z uwzględnieniem nieliniowości (zależność $\mu = f(H)$);
- Mechanika uwzględnia deformacje sprężyste;
- Właściwości materiałowe ferromagnetyków są funkcją temperatury oraz naprężenia:

Doktorant w ramach zrealizowanych prac wdrożeniowych rozwinął metody badania i analizy silników momentowych o następujące zagadnienia:

- Model układu bazujący na równaniach algebraicznych dla obwodu elektromagnetycznego przetwornika;
- Modelowanie obwodu silnika z wykorzystaniem MES;
- Badanie charakterystyki zbudowanego prototypu na opracowanym w tym celu stanowisku badawczym.

W dalszej części pracy Doktorant przedstawił wyniki badań eksperymentalnych. Prace badawcze koncentrowały się na wyznaczeniu brakujących danych materiałowych oraz weryfikacji modeli teoretycznych i symulacji numerycznych. Celem działalności badawczej Doktoranta był również rozwój metod i narzędzi pomiarowych. Prototyp czujnika indukcyjnego z modulowanym (nastawianym) naprężeniem osiowym w rdzeniu jest przykładem wielofizycznej analizy harmoniczej. Natomiast budowa prototypowego silnika momentowego pozwoliła na weryfikację statycznych symulacji magneto-mechanicznych typu transient.

Część doświadczalną i teoretyczną – obliczeniową kończy rozdział 5, w którym Doktorant omówił korzyści wynikające z wykonanej pracy badawczej pod kątem ich potencjału implementacyjnego dla przedsiębiorstwa zatrudniającego. W rozdziale tym Kandydat przedstawił również praktyczne zastosowanie rezultatów badań w postaci danych materiałowych oraz metody symulacji wielofizycznej na przykładzie projektu przetwornika połączenia do systemu ACC, rozwiniętego do poziomu gotowości TRL6. Doktorant stwierdził, że ze względu na rozwój symulacji typu *Multiphysic* jest aktualnie zagadnieniem istotnym nie tylko dla branży lotniczej. Zaprezentował możliwości przyszłościowej komercjalizacji narzędzia analitycznego jako gotowy komponent oprogramowania CAE na otwartym rynku.

Pracę kończy rozdział 6, w którym Doktorant Podsumował wyniki przeprowadzonych badań oraz omówił wątpliwości i obszary wymagające uściślenia. Sformułował również wnioski końcowe dotyczące zarówno części naukowej jak i technicznej pracy.

Reasumując stwierdzam, że podjęty przez Doktoranta problem badawczy został sformułowany poprawnie, tak pod względem obszaru merytorycznego, jak i głębi prowadzonych rozważań, analiz, obliczeń i badań laboratoryjnych. Z punktu widzenia określonych celów, przyjęta koncepcja badań jest w pełni uzasadniona, a zastosowane narzędzia i metody badawcze są do niej adekwatne. Stwierdzam, że zarówno materiał badawczy, jak i literaturowy został przez Doktoranta rozprawy wykorzystany poprawnie. Na podstawie treści pracy można w sposób jednoznaczny ocenić wkład własny Doktoranta w rozwój Metodyki badań i projektowania mechatronicznych urządzeń osprzętu lotniczego.

3. Metoda wykładu

Praca jest ilustrowana 90 rysunkami, wykonanymi czytelnie i jednoznacznie oraz logicznie wplecionymi w treść wykładu. Ułatwia to zrozumienie prezentowanych przez Autora rozważań. Treści poszczególnych rozdziałów właściwie wynikają po sobie, tworząc spójną całość.

Reasumując stwierdzam, że pod względem metodycznym praca zawiera następujące:

A. Niedociągnięcia

Zasadniczo nie dostrzegłem większych niedociągnięć pracy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Krzysztofa Plucińskiego. Doktorant nie ustrzegł się drobnych pomyłek tzw. „literówek”. Ponadto rozdział 1 jest moim zdaniem zbyt rozbudowany. Wiele informacji to klasyczne dane podręcznikowe.

B. Zalety

- Obszerny zakres problemowy pracy dający pogląd na ważność podjętej tematyki, oraz dogłębne studium przedmiotu pracy zawarte w rozdziałach 3 i 4.
- Opracowanie oryginalnej metodyki obliczeń typu *multiphysics* mechatronicznych urządzeń osprzętu lotniczego.
- Opracowanie skryptów w środowisku MATLAB przeznaczonych do obliczeń urządzeń mechatronicznych osprzętu lotniczego.
- Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń.
- Przedstawienie i analiza wyników badań eksperymentalnych symulacji numerycznych.

Należy podkreślić, że przeprowadzone przez mgr inż. Wojciecha Krzysztofa Plucińskiego badania, obliczenia i analizy stanowią zarazem genezę pracy, a także uwypuklają nowe elementy opracowanego przez Doktoranta innowacyjnego rozwiązania w postaci metodyki obliczeń mechatronicznych urządzeń osprzętu lotniczego. Należy także podkreślić aplikacyjny charakter pracy wykonanej w ramach realizacji doktoratu wdrożeniowego.

OCENA STRONY MERYTORYCZNEJ

Zasadniczym przedmiotem pracy było opracowanie metody badania oraz symulacji działania obwodów elektromechanicznych serwozaworów i czujników położenia napędów elektrohydraulicznych urządzeń stanowiących podzespoły układu paliwowego samolotu. W symulacjach uwzględniono wpływ obciążeń mechanicznych oraz temperatury na wydajność i stabilność badanych przetworników. Praca doktorska została wykonana w ramach doktoratu wdrożeniowego, we współpracy z firmą Collins Aerospace..

Tematyka rozprawy dotyczy ważnego zagadnienia z obszaru bezpieczeństwa konstrukcji lotniczych. Doktorant opracował metodykę pozwalającą na identyfikację wielkości determinujących krytyczne parametry pracy elektromechanicznych serwomechanizmów lotniczych. Opracował modele matematyczne obwodów elektromechanicznych serwozaworów i czujników położenia stosowanych w napędach elektrohydraulicznych. Następnie opracował skrypty w środowisku programu MATLAB i przeprowadził obliczenia struktury stanowiącej podstawę do badań laboratoryjnych.

Wyniki badań potwierdzały także zasadność uwzględniania zjawiska sprzężenia magneto-mechanicznego w modelach materiałowych przygotowanych jako dane wejściowe do analiz wielofizycznych oraz wskazują na konieczność kalibracji parametrów opisujących materiał ferromagnetyczny w zależności od warunków brzegowych w symulacji MES. Doktorant stwierdził, że w przypadku stopu 50% Fe-Ni zmiany μ_r pod wpływem temperatury T oraz naprężenia efektywnego σ_{ef} w badanym zakresie są przewidywalne, a ich charakter w przybliżeniu liniowy. W odniesieniu do zastosowania tego materiału w lotniczych produktach typu EMID, zmiany μ_r można kompensować stosując właściwe rozwiązania konstrukcyjne dla struktury mechanicznej wyrobu.

Przeprowadzone przez Doktoranta badania potwierdziły także, że w technice serwozaworów, należy dążyć do utrzymania przewidywalnego i powtarzalnego stanu naprężenia w strukturze silnika momentowego przez stosowanie trwałych połączeń pomiędzy elementami w obwodzie magnetycznym.

Oslabienie silnika w wysokich temperaturach oraz wzmocnienie w niskich może skutkować zmianami pozycji przesłony względem dysz sterujących we wzmacniaczu hydraulicznym pierwszego stopnia lub zmiennością w kącie odchylenia rurki strumieniowej w funkcji prądu. Należy jednak podkreślić, że osłabienie lub wzmocnienie silnika może być kompensowane przez prawidłowy dobór parametrów definiujących obwód hydrauliczny serwozaworu. Należy zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury maleje lepkość oraz gęstość cieczy roboczej, zatem przepływ wolumetryczny przez pierwszy stopień zaworu może pozostać niezmienny w funkcji temperatury.

PODSUMOWANIE

Przedstawiona do recenzji praca jest ciekawa i nowatorska. Autor wykazał się orientacją w badanej problematyce. Potrafił wyodrębnić najistotniejsze problemy badawcze oraz określić sposoby i metody adekwatne do ich rozwiązania.

Uważam, że osiągnięciami Doktoranta są

- Opracowanie oryginalnej metodyki obliczeń typu *multiphysics* mechatronicznych urządzeń osprzętu lotniczego.
- Opracowanie skryptów w środowisku MATLAB przeznaczonych do obliczeń urządzeń mechatronicznych osprzętu lotniczego.
- Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń.
- Przedstawienie i analiza wyników badań eksperymentalnych symulacji numerycznych.

Bez wątpienia praca doktorska została wykonana samodzielnie i wnosi wkład w rozwój badań nad metodyką projektowania, modelowania oraz obliczeń mechatronicznych podzespołów osprzętu statków powietrznych. Wiedza zdobyta na podstawie analiz wyników uzyskanych z przeprowadzonych przez Doktoranta eksperymentów pozwoliła na weryfikację modeli obliczeniowych mechatronicznych urządzeń lotniczych.

WNIOSEK KOŃCOWY

Reasumując uważam, że recenzowana rozprawa została poprawnie skonstruowana pod względem merytorycznym i językowym. Uwzględniając osiągnięte wyniki badań, rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Zawartość rozprawy świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Stwierdzam zatem, że praca doktorska mgr. inż. Wojciecha Krzysztofa Plucińskiego pt.: „*Opracowanie metody symulacji działania obwodów elektromechanicznych serwozaworów i czujników położenia stosowanych w aplikacjach lotniczych z uwzględnieniem wpływu obciążeń mechanicznych oraz temperatury na ich wydajność*” spełnia wszystkie wymagania zawarte w obowiązującej Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r., „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) i stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony. Nadto uważam, że przedłożona rozprawa doktorska należy do kategorii rozpraw wyraźnie wykraczających poza poziom przeciętne i spełnia ustawowe wymagania z nadmiarem.

.....
prof. dr hab. inż. Krzysztof Sibilski