

Wrocław, dn. 15 styczeń 2026 r.

dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. PWr.

Politechnika Wrocławska

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wzlynęło dnia 26.01.26
nr zał.

Recenzja rozprawy doktorskiej (doktorat wdrożeniowy)

mgr inż. Emila Króla

pt. „Ograniczanie hałasu silników trakcyjnych”

wykonanej pod kierunkiem dra hab. inż. Marcina Maciążka, prof. PŚl.

Opiekunem pomocniczym był dr inż. Robert Rossa

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

Niniejszą recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej

pismo RDAEETK.512.34.2025 z dnia 26 listopada 2025 r.

na podstawie uchwały Rady Dyscypliny nr 112/2025 z dn. 23 października 2025 r.

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Praca dotyczy aktualnej, intensywnie rozwijanej w ostatnich latach dziedziny analizy i projektowania silników elektrycznych o zwiększonej gęstości mocy stosowanych do napędów pojazdów mechanicznych.

Koncepcja napędu samochodu elektrycznego z silnikami zabudowanymi w piastach kół prezentowana była od ponad 150 lat i mimo zmian w technice oraz motoryzacji jest ciągle aktualna oraz inspirująca w obecnych badaniach. Wynikami tych prac zainteresowane są fabryki produkujące pojazdy mechaniczne różnych wielkości i zastosowaniach, w których stosuje się bezpośredni napęd kół tych pojazdów eliminując przekładnie mechaniczne.

Układ napędowy samochodu elektrycznego musi spełniać wymagania drogowe związane z pokonywaniem przeszkód oraz dynamiką jazdy w zależności od klasy i przeznaczenia pojazdu. Maszyny elektryczne powinny pracować również jako prądnice zapewniające hamowanie rekupe-racyjne, które zgodnie z najnowszymi trendami w elektromobilności obejmuje możliwie największą część procesu hamowania pojazdu.

Wymagania te są szczególnie trudne do spełnienia dla maszyn o kompaktowej konstrukcji, takich jak silniki do zabudowy w piastach kół, których masa zainstalowana jest w części niereso-rowanej pojazdu, a wymiary ograniczone są wymiarami felg, sposobem umieszczenia układu ha-mulcowego i elementów zawieszenia.

Wszystkie wymienione powyżej czynniki sprawiają, że silniki do zabudowy w piastach kół pracują ze stosunkowo dużą gęstością prądu i dużą częstotliwością zasilania, co skutkuje

generowaniem znacznych strat mocy w uzwojeniu i magnetowodzie oraz wzrostem ich temperatury pracy istotnym szczególnie dla magnesów trwałych.

Praca doktorska związana jest z określeniem kierunków rozwoju konstrukcji silników do zabudowy w piastach kół pojazdów mechanicznych uwzględniających zmienne warunki pracy oraz oceny korzyści płynących z zastosowania opracowanych systemów rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych. Badania te rozpoczęto już w 2017 roku i prowadzone były w ścisłej współpracy a nawet na zlecenie jednostek gospodarczych zainteresowanych zastosowaniem przemysłowym tych rozwiązań. Silniki te o mocy znamionowej większej niż 200 kW planowano zastosować w autobusach i samochodach ciężarowych.

Zagadnienia te wpisują się w dyscyplinę naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i techniki kosmiczne, nie stanowią problemu wyłącznie teoretycznego, ale mają duże znaczenie dla praktyki. Prezentowane wyniki świadczą o istotnym znaczeniu i aktualności prowadzonych badań naukowych a ich rozwój jest w pełni uzasadniony. Dlatego uważam, że podjęta problematyka badań jest trafna, potrzebna i na czasie.

2. Cel i teza naukowa rozprawy

Praca Pana mgr inż. Emila Króla jest wynikiem systematycznych studiów nad zagadnieniami analizy teoretycznej oraz zastosowaniami konstrukcji silników elektrycznych do bezpośredniego napędu w kołach pojazdów mechanicznych dla różnych warunków pracy.

Jako cel Doktorant postawił w pracy:

opracowanie wytycznych projektowych, dla trakcyjnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi, charakteryzujących się możliwie najmniejszym poziomem hałasu generowanego przez obwód elektromagnetyczny.

Opracowane w ramach pracy wytyczne projektowe dotyczące ograniczenia drgań i emisji akustycznej hałasu, wzbudzanych przez pole magnetyczne w szczelinie powietrznej silników synchronicznych z magnesami trwałymi, nie powinny wpływać negatywnie na parametry elektromechaniczne ani obniżać wysokiej sprawności energetycznej projektowanych silników trakcyjnych.

Autor sprecyzował tezę naukową rozprawy (str. 15), która brzmi:

Możliwy jest dobór parametrów konstrukcyjnych obwodu magnetycznego i uzwojenia twornika silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, przeznaczonego do zastosowań w napędach trakcyjnych, który umożliwi osiągnięcie wymaganych charakterystyk elektromechanicznych napędu, przy jednoczesnym ograniczeniu mocy akustycznej generowanej przez silnik podczas jego pracy do poziomu nieuciążliwego dla otoczenia.

Dla udowodnienia tezy pracy Autor przyjął następujący zakres badań:

1. opracowano metodologię analizy zjawisk elektromagnetycznych i wibroakustycznych związanych z pracą silników oraz zbudowano kompleksowe modele symulacyjne, zastosowano

- nowoczesne techniki obliczeniowe, w tym metodę elementów skończonych (MES), metody obwodowo-polowe, podejścia hybrydowe oraz rozszerzone modele analityczne,
2. przeanalizowano wpływ konfiguracji uzwojeń i geometrii żłobków stojana, asymetrii pola magnetycznego oraz właściwości zastosowanych materiałów konstrukcyjnych na osiągnięte charakterystyki mechaniczne silnika co umożliwiała identyfikację najważniejszych mechanizmów generowania drgań i hałasu i umożliwiło działania powodujące ich ograniczenie,
 3. przeanalizowano prototypowe silniki trakcyjne (SMwsK280M20, SMwsK280M16 oraz SMwsK280M16A), i wykonano obliczenia elektromagnetyczne, analizy wibroakustyczne zweryfikowane badaniami laboratoryjnymi modeli fizycznych,
 4. na podstawie dotychczasowych doświadczeń, w ramach doktoratu wdrożeniowego, zaprojektowano i wykonano silnik seryjny SMwsK280M16B, przeprowadzono pełny zakres badań elektromagnetycznych, wibroakustycznych weryfikując skuteczność przyjętych rozwiązań projektowych.

Badania te umożliwiły ocenę wpływu rzeczywistych warunków eksploatacyjnych na poziom generowanych drgań i hałasu, a także pozwoliły przeanalizować wpływ zasilania falownikowego na poziom hałasu.

Zagadnienie naukowe, jakie Autor postawił do rozwiązania, zostało określone logicznie i precyzyjnie. Prezentowane wyniki symulacji komputerowych oraz wyniki pomiarów na modelach fizycznych, mające na celu udowodnienie postawionej tezy, przedstawiono w sposób czytelny i przejrzysty.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Recenzowana praca napisana jest na 179 stronach, ma 14 rozdziałów merytorycznych (w tym jeden z wnioskami), bardzo obszerny wykaz literatury (114 pozycji głównie zagranicznych), 10 publikacji współautorskich, w których na 9 Doktorant jest na pierwszym miejscu, oraz wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów.

Recenzowaną rozprawę zaliczam do grupy prac związanych z rozwojem metod analizy stanów pracy oraz zastosowaniem wyników obliczeń do opracowania konstrukcji i technologii maszyn elektrycznych pracujących w bezpośrednich napędach kół pojazdów mechanicznych o minimalnym hałasie generowanym do otoczenia.

W rozdziale 3 na podstawie zebranej literatury wyjaśnił zagadnienia związane hałasem generowanym przez pojazdy i napędy elektryczne. Uporządkował podstawowe pojęcia i definicje hałasu akustycznego, zagadnienia związane z pomiarami hałasu i wymaganiami obowiązujących przepisów i norm.

Opisał źródła i przyczyny hałasu w silnikach trakcyjnych: mechaniczne, aerodynamiczne, magnetyczne i inne np. związane z uszkodzeniami.

Omówił zagadnienia związane z kształtem przestrzennym sił i ich wpływem na poziom hałasu i ich związek z podzespołami silników elektrycznych.

W rozdziale 4 Doktorant opisał metody i przeprowadził krytyczną ocenę obliczeń poziomu hałasu w silnikach trakcyjnych: metodę analityczną, hybrydową MES 2D, hybrydową MES 3D.

W rozdziale 5 przedstawiono różne rozwiązania silników elektrycznych stosowanych w pojazdach elektrycznych, przeprowadzono ocenę ich konstrukcji i uzasadniono wybór konstrukcji silnika prototypowego do dalszych badań.

W rozdziale 6 przedstawiono obliczenia poziomu hałasu w maszynach trakcyjnych min. modelowanie wibroakustyczne, analizę sił w szczelinie powietrznej silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi (siły promieniowe i siły osiowe).

W rozdziale 7 Doktorant przedstawił metody zmniejszania poziomu hałasu silników trakcyjnych mianowicie przez zastosowanie odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych stojana, wirnika, kadłuba i tarcz łożyskowych silnika. Rozważono sposoby zasilania uzwojenia stojana z przekształtników napięcia, modyfikację oprogramowania falownika i aktywną redukcję poziomu hałasu.

W rozdziale 8 rozprawy Doktorant opisał narzędzia i metody do obliczeń elektromagnetycznych i wibroakustycznych (ANSYS Motor-CAD, FEMM oraz GNU Octave, PYLEECAN, Eomys MANATEE).

W rozdziale 9 Autor prezentuje oryginalną rozszerzoną metodę hybrydową 2D obliczeń wibroakustycznych, wystarczająco szybką umożliwiającą przeprowadzenie dziesiątek iteracji w standardowym cyklu konstruowania napędu i po uwzględnieniu korekt wynikających z zasilania falownikowego oraz zastosowania rzeczywistego kadłuba pozwalającą z dużą precyzją wskazywać częstotliwości rezonansowe oraz uzyskiwać wartości mocy akustycznej SWL zbliżone do rzeczywistych.

W rozdziale 10 przedstawiono wytyczne projektowe zastosowane w obliczeniach silników: analizę wstępną (metoda analityczna), optymalizację wibroakustyczną projektu (modelowanie hybrydowe MES 2D), weryfikację laboratoryjną i korektę poziomu mocy akustycznej.

W rozdziale 11 przedstawiono prototypowe silniki trakcyjne typu SMwsK280M20 oraz SMwsK280M16 zaprojektowane i wykonane jako jednostki napędowe dla miejskich autobusów elektrycznych, w których nie uwzględniono aspektów związanych z ich hałasem. Pokazano obszernie wyniki badań tych silników odnosząc je do wymagań obowiązujących norm.

Następnie w rozdziale 12 przedstawiono wersje silników seryjnych typu SMwsK280M16A oraz SMwsK280M16B o takim samym wzniosie i zbliżonych wymiarach gabarytowych. Silniki seryjne zaprojektowano z uwzględnieniem szczegółowych obliczeń wibroakustycznych już na etapie doboru obwodu elektromagnetycznego. Pozwoliło to zoptymalizować konstrukcję pod względem poziomu hałasu generowanego przez silniki. Pokazano wyniki pomiarów

laboratoryjnych zbudowanych silników seryjnych dla takich samych programów badań (jak dla silników prototypowych) dla obciążenia silnikowego i pracy generatorowej. W podrozdziale 12.9. przedstawiono szczegółowe wnioski z przeprowadzonych badań silników prototypowych i seryjnych.

W rozdziale 13 podsumowano metodologię projektowania silników trakcyjnych, opracowane i wdrożone autorskie wytyczne projektowe (rozdz. 10), które dzięki ścisłemu powiązaniu analiz wibroakustycznych z obliczeniami elektromagnetycznymi pozwalają projektować ciche, a jednocześnie wysokosprawne napędy trakcyjne. W opracowanych wytycznych podkreślono konieczność ścisłego połączenia symulacji numerycznych z badaniami laboratoryjnymi.

W rozdziale 14 przedstawiono podsumowanie działań wykonanych w pracy i streszczenie najważniejszych wniosków mających szczególne znaczenie dla konstruktorów tego typu maszyn i umożliwia dowiedzenie postawionej tezy.

4. Podsumowanie i ocena rozprawy

Praca realizowana była w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych Komel, gdzie Doktorant jest pracownikiem. Z tego powodu prace badawcze o większym zakresie realizowane są zespołowo. Jest to działanie pozytywne bo w zespole można podejmować znacznie większy zakres badań. Wieloma pracach badawczymi Doktorant kierował i mógł realizować własne koncepcje.

Według oświadczenia Doktoranta do oryginalnych osiągnięć w pracy doktorskiej i wkład w rozwój nauki można zaliczyć:

4.1. Analiza wibroakustyczna i modelowanie numeryczne

Opracował kompletną część analityczną oraz przeprowadził zaawansowane symulacje komputerowe hałasu wzbudzanego magnetycznie. Prace te obejmowały:

- obliczenia poziomu hałasu wynikającego z oddziaływania pola magnetycznego w szczelinie powietrznej,
- identyfikację harmoniczných sił Maxwella i ich wpływu na strukturę mechaniczną silnika,
- wykorzystanie specjalistycznego oprogramowania (m.in. Eomys MANATEE oraz PyLEECAN, FEMM, GNU Octave, Ansys MotorCAD) do predykcji emisji akustycznej na etapie projektów silników.

4.2. Projektowanie obwodów elektromagnetycznych

Samodzielnie opracował projekty obwodów elektromagnetycznych oraz przeprowadził pełne obliczenia elektromagnetyczne, cieplne oraz wibroakustyczne dla wszystkich silników modelowych, prototypowych i seryjnych. Działania dotyczyły całości obwodu elektromagnetycznego a koncentrowały się na doborze oraz optymalizacji geometrii silnika jak również żłobków, typu zastosowanego uzwojenia i ułożenia oraz doboru magnesów trwałych w celu uzyskania dużej

sprawności silnika oraz parametrów elektromechanicznych przy jednoczesnej redukcji źródeł drgań i hałasu. Do obliczeń elektromagnetycznych silników zastosował autorskie skrypty LUA (generowanie geometrii obwodów elektromagnetycznych w 2D, zadawanie właściwości materiałów, zdawanie warunków brzegowych) w programie FEMM oraz plików m.in. do przeprowadzenia obliczeń elektromagnetycznych z wykorzystaniem solvera FEMM i GNU Octave.

4.3. Optymalizacja konstrukcji mechanicznej silników (korpus)

Jako członek zespołu projektującego korpusy silników, pełnił rolę eksperta odpowiedzialnego za implementację wyników analiz wibroakustycznych do konstrukcji mechanicznej m.in.

- wprowadzanie modyfikacji usztywniających korpus w celu przesunięcia częstotliwości drgań własnych poza zakres częstotliwości sił magnetycznych,
- korelacja geometrii korpusu z wynikami analiz modalnych oraz cieplnych,
- koncepcja układu chłodzenia wirnika silnika.

4.4. Budowa silników

Fizyczne wykonanie wszystkich zaprojektowanych jednostek napędowych zostało zrealizowane przez Dział Prototypów i Urządzeń Specjalnych Łukasiewicz – GIT. Silniki były wykonywane pod nadzorem merytorycznym Doktoranta.

4.5. Metodyka badań laboratoryjnych i weryfikacja eksperymentalna

Doktorant brał aktywny udział w badaniach realizowanych w Laboratorium Napędu Elektrycznego Łukasiewicz – GIT.

Do autorskiego wkładu w tym zakresie należy:

- zaprojektowanie stanowiska pomiarowego,
- opracowanie dedykowanego programu badań wibroakustycznych zarówno dla badań w trybie generatorowym jak również silnikowym,
- przeprowadzenie kompleksowej analizy wyników pomiarowych,
- analiza wpływu zmian konstrukcyjnych, stojana, wirnika i kadłuba silnika,
- porównanie wyników badań z obliczeniami oraz porównanie wyników badań pomiędzy poszczególnymi typami silników,
- opracowanie systemu korekt poziomów mocy akustycznej pozwalającego na skalowanie wyników obliczeniowych względem rzeczywistych danych pomiarowych.

4.6. Synteza i wytyczne projektowe

Zwieńczeniem prac było sformułowanie wytycznych projektowych umożliwiających precyzyjne przewidywanie źródeł hałasu i minimalizację emisji akustycznej silników trakcyjnych już na etapie projektowania bez negatywnego wpływu na ich parametry elektromechaniczne (moment, moc, sprawność).

5. Uwagi krytyczne i redakcyjne

W silnikach prototypowych zastosowano 48 żłobków stojana i wytworzenie pola magnetycznego o liczbie biegunów 16 a tym bardziej 20 związane jest z generowaniem dużej zawartości harmonicznych co ma duże znaczenie na hałas tych maszyn.

Oba silniki zasilono z 4 niezależnych falowników trójfazowych – str. 67 – Autor nie wyjaśnia w jaki sposób?

W tabelach prezentujących parametry silników podano moc znamionową dla określonych prędkości obrotowych – jak zmienia się moc (moment) dla innych prędkości obrotowych np. od 0 do 3000 obr/min?

Autor w tekście bardzo często stosuje żargonowe określenia wielkości np.

str. 45 „indukowanie prądu w zwartym uzwojeniu wirnika” – indukuje się napięcie,

„osiągnięcie wyższej mocy” – większej,

„niskie koszty produkcji” – mniejsze,

str. 100 pkt. 12 „seryjne silniki trakcyjne o mocy powyżej 250 kW”

– mocy większej niż 250 kW,

str.101 „podniesiono moment znamionowy z 1250 Nm na 1545 Nm” – zwiększono moment,

str. 127 „przy jednoczesnym zachowaniu niskiej masy” – mniejszej, małej masy,

str. 138 co oznacza „wysokie właściwości trakcyjne”?, str. 167 „wyśrubowane parametry elektromechaniczne”?

6. Dorobek naukowy Doktoranta

Doktorant jest współautorem (z udziałem nie mniejszym niż 50 %) w opracowaniu 10 publikacji w renomowanych czasopismach oraz konferencjach krajowych i zagranicznych. Jest współautorem 9 patentów i 2 wzorów użytkowych przyznanych przez Urząd Patentowy RP.

Był kierownikiem 7 projektów badawczych:

Projekt 03717/C.ZR8-6/2005: „Opracowanie i uruchomienie produkcji wysokosprawnych silników z magnesami trwałymi typu PMPg250L, 33/60 kW zasilanych z komutatora elektronicznego”. realizacja: 2005 – grudzień 2007.

Projekt 0166/R/T02/2007/IT1 nr 13238: „Elektryczny napęd statku powietrznego – paralotnia”. realizacja: 2007 – 2009.

Projekt NR01-0085-10/2010: „Hybrydowy, bimodalny napęd spalinowo - elektryczny dla samochodów transportu osobowego i towarowego o masie całkowitej do 3,5 t”. realizacja: czerwiec 2010 – marzec 2013.

Projekt INNOTECH-K1/IN1/17/155502/NCBR/12: „Pojazd sportowo-rekreacyjny z napędem elektrycznym”. realizacja: listopad 2011 – grudzień 2013.

Projekt PBS3/B4/13/2015: „Bezszcotkowa wysokomomentowa zakrętarka elektromechaniczna”. realizacja: 2015 – marzec 2018.

Projekt zamówienie firmy Rafako S.A. „*Innowacyjny mały autobus miejski z napędem elektrycznym*”. realizacja: marzec 2017 – grudzień 2019.

Projekt zam. firmy BEMotion Sp. z o.o „*Opracowanie dostawczego pojazdu o napędzie elektrycznym z inteligentnym systemem zarządzania energią*”. realizacja: lipiec 2017 – grudzień 2019.

7. Konkluzja

Stwierdzam, że rozprawa jest opracowana starannie. Układ pracy jest logiczny, a strona graficzna wzorowa. Wnioski w poszczególnych rozdziałach oraz wnioski końcowe są poprawne i interesujące.

W tekście można zauważyć „niezręczne” (żargonowe) sformułowania, które nie obniżają mojej pozytywnej oceny pracy.

Wyniki uzyskane w rozprawie potwierdzają, że teza pracy została udowodniona, a założone cele pracy osiągnięte.

Doktorant wykazał się dobrą znajomością najnowszej literatury w obranej dziedzinie wiedzy, podchodzi do niej krytycznie, a ponadto potrafi twórczo rozwijać osiągnięcia innych autorów.

Doktorant wykazał się również dobrą znajomością nowoczesnej metodyki modelowania złożonych obiektów fizycznych, metod numerycznych i technik programowania. Praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora szeregu zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych.

Stwierdzam, że rozprawa pt. „*Ograniczanie hałasu silników trakcyjnych*” stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego i spełnia wszystkie wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Emila Króla do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Jan Zawilak

Wrocław, dn. 15 styczeń 2026 r.

dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. PWr.
Politechnika Wrocławska
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Wniosek dodatkowy

do recenzji rozprawy doktorskiej

mgr inż. Emila Króla

pt. „*Ograniczanie hałasu silników trakcyjnych*”

wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Marcina Maciążka, prof. PŚl.

Opiekunem pomocniczym był dr inż. Robert Rossa
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny rozprawy (zastosowane zaawansowane metody modelowania i symulacji komputerowej), nowoczesność podjętej tematyki, realizację praktyczną opracowanych, innowacyjnych wielu modeli silników elektrycznych w napędach pojazdów mechanicznych (elektromobilności), bardzo ciekawe wyniki badań umożliwiające weryfikację modeli obliczeniowych, precyzyjnie sformułowane wnioski końcowe uważam recenzowaną pracę za wyróżniającą.

Zgłaszam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej pt. " *Ograniczanie hałasu silników trakcyjnych* " autorstwa Pana mgr inż. Emila Króla.

Dodatkowym argumentem jest duży aspekt praktyczny wykonanych badań. Opracowane i przebadane innowacyjne konstrukcje maszyn elektrycznych w zastosowaniach do napędów pojazdów samochodowych różnej wielkości mogą być bezpośrednio zastosowane w przemyśle motoryzacyjnym.