

Lublin 16-02-2025 r.

dr hab. inż. Krzysztof Kolano, profesor uczelni
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin
ul Nadbystrzycka 38a

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Strączyńskiego
pt. „*Analiza wpływu wybranych zmian obwodu magnetycznego na parametry
silnika komutatorowego z magnesami trwałymi*”

Podstawa opracowania recenzji

Podstawą wykonania recenzji jest pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych Politechniki Świętokrzyskiej, dr hab. inż. Andrzeja Chojnackiego, prof. PŚk, z dnia 9 stycznia 2025 r., o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Strączyńskiego zatytułowanej: *Analiza wpływu wybranych zmian obwodu magnetycznego na parametry silnika komutatorowego z magnesami trwałymi* (zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 18 grudnia 2024 r.). Promotorem pracy jest dr hab. inż. Sebastian Różowicz, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Zbigniew Goryca.

1. Ocena aktualności tematu, celu i zakresu rozprawy

Tematyka rozprawy dotycząca silników elektrycznych, a w szczególności maszyn wykorzystujących magnesy trwałe jest niezwykle aktualna w kontekście współczesnych trendów technologicznych oraz globalnych wyzwań energetycznych. Wzrost zapotrzebowania na silniki elektryczne, wynikający z dynamicznego rozwoju branż takich jak automatyka, robotyka czy elektromobilność, podkreśla zasadność podejmowanej problematyki. Znaczący udział silników



elektrycznych w globalnym zużyciu energii elektrycznej oraz rosnące wymagania dotyczące ich sprawności, gęstości mocy i kosztów produkcji uzasadniają celowość podejmowania badań nad optymalizacją ich konstrukcji.

W kontekście naukowym praca wpisuje się w kluczowe nurty badawcze, koncentrujące się na poprawie parametrów eksploatacyjnych maszyn elektrycznych. Jednym z istotnych aspektów analizowanych w rozprawie jest problematyka momentu zaczepowego, który wpływa na właściwości dynamiczne maszyn, ich precyzję pozycjonowania oraz efektywność energetyczną. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w aplikacjach wymagających wysokiej precyzji ruchu, takich jak systemy mechatroniczne, pojazdy elektryczne czy nowoczesne napędy przemysłowe.

Cel pracy, jakim jest analiza wpływu konstrukcji obwodu magnetycznego na parametry silnika komutatorowego z magnesami trwałymi, jest jasno określony i istotny zarówno z perspektywy teoretycznej, jak i aplikacyjnej. W odróżnieniu od szeroko opisanych w literaturze maszyn BLDC i PMSM, silniki komutatorowe z magnesami trwałymi są rzadziej przedmiotem szczegółowych badań, mimo ich dużego znaczenia w wielu zastosowaniach. W pracy zaproponowana została zamiana magnesów ferrytowych silnika na prostopadłościennne magnesy o znacznie większej energii – magnesy z ziem rzadkich. Pozwala to zwiększyć moment tak zmodyfikowanej maszyny jednakże kosztem zwiększenia jej momentu zaczepowego. Aby zminimalizować ten niekorzystny efekt modyfikacji, Autor w pracy zbadał kilka metod minimalizacji momentu zaczepowego, co jak wykazał pozwoliło osiągnąć zakładane rezultaty.

Zakres rozprawy obejmuje przegląd istniejących metod redukcji momentu zaczepowego, analizę różnych konfiguracji obwodu magnetycznego oraz propozycję nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Podejście to wpisuje się w aktualne trendy badawcze i posiada istotny potencjał aplikacyjny, umożliwiając rozwój technologii silników elektrycznych o lepszych parametrach dynamicznych i energetycznych.

Podsumowując stwierdzam, że tematyka rozprawy i jej cel obejmuje problemy aktualne i wymagające naukowego opisanie. Uważam więc, że podjęcie przez Doktoranta tej tematyki jest trafne i uzasadnione, zarówno z naukowego jak i technicznego punktu widzenia.

2. Charakterystyka pracy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska należy do grupy prac badawczo – eksperymentalnych. Praca jest obszerna i liczy 143 strony. Dysertacja wydana w postaci książki zawiera: spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów; 8 rozdziałów głównych; a także spis literatury obejmujący 151

pozycji, wśród których dominującą rolę odgrywają krajowe i międzynarodowe publikacje wydane na przestrzeni ostatnich kilku lat.

Doktorant uzyskał stopień magistra na Politechnice Świętokrzyskiej w roku 2016 na specjalności Automatyka. Od 01.12.2016 r. jest zatrudniony na stanowisku asystenta w Politechnice Świętokrzyskiej - aktualnie jako pracownik badawczo-dydaktyczny w Katedrze Urządzeń Elektrycznych i Automatyki.

Doktorant jest autorem lub współautorem 12 publikacji naukowych, w tym 5 z listy A MNiSW.

Dysertacja Pana mgr inż. Pawła Strączyńskiego jest skoncentrowana na tematyce związanej z możliwością poprawy parametrów technicznych komutatorowych silników prądu stałego poprzez modyfikację ich obwodu magnetycznego. Motywację prowadzonych badań jest chęć zastąpienia magnesów ferrytowych w kształcie wycinka pierścienia, tanimi magnesami neodymowymi prostopadłościami o znacznie mniejszej masie oraz określeniem wpływu takiej modyfikacji na parametry maszyny elektrycznej. Działania te mają dać odpowiedź na pytanie czy zastosowanie takich modyfikacji prowadzi do pożądanych zmian charakterystyki maszyn elektrycznych tego typu.

Autor określił cel pracy:

„Analiza możliwości i korzyści wynikających z zastąpienia magnesów ferrytowych w maszynie komutatorowej o klasycznej budowie magnesami neodymowymi prostopadłościami oraz ocena wpływu wybranych zmian obwodu magnetycznego na parametry tej maszyny”, którego realizacja pozwala na weryfikację postawionej w pracy tezy:

„Odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych silnika o wzbudzeniu od magnesów neodymowych prostopadłościami pozwoli na zwiększenie momentu elektromagnetycznego przy równoczesnej redukcji jego wymiarów i masy względem silnika o klasycznej budowie wzbudzanego magnesami ferrytowymi bez zwiększania poziomu tętnień tego momentu.”

W celu udowodnienia tej tezy Doktorant postawił szereg celów pośrednich, spośród których najważniejsze to:

- przegląd metod minimalizacji momentu zaczepowego w maszynach o wzbudzeniu magnetoelektrycznym,
- budowa zautomatyzowanego stanowiska pomiarowego do wyznaczania momentu zaczepowego,
- opracowanie modeli polowych i polowo-obwodowych badanych maszyn,
- analiza porównawcza wyników obliczeń uzyskanych dla modeli opracowanych w różnych programach MES oraz dla modeli o różnej złożoności obliczeniowej,

- analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych badanego silnika na jego własności elektromechaniczne,
- weryfikacja pomiarowa modeli obliczeniowych na zbudowanych prototypach maszyn.

Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów, w których kompleksowo przeanalizowano tematykę silników komutatorowych o wzbudzeniu od magnesów trwałych.

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do tematyki, przegląd stanu wiedzy oraz uzasadnienie podjęcia badań. Określono główny cel pracy oraz cele pośrednie służące weryfikacji postawionej tezy.

Rozdział 2 przedstawia uproszczony opis analizowanych zjawisk fizycznych, w tym mechanizmu powstawania momentu elektromagnetycznego i momentu zaczepowego, a także opisuje metodę elementów skończonych stosowaną w modelowaniu maszyn elektrycznych.

Rozdział 3 zawiera przegląd istniejących rozwiązań konstrukcyjnych mających na celu ograniczenie momentu zaczepowego w silnikach komutatorowych.

Rozdział 4 koncentruje się na opracowanych modelach polowych i polowo-obwodowych oraz wynikach badań symulacyjnych. Dokonano w nim analizy porównawczej silnika o klasycznej budowie (magnesy ferrytowe) oraz nowego rozwiązania (magnesy neodymowe). Zbadano wpływ zmian konstrukcyjnych obwodu magnetycznego na parametry elektromechaniczne maszyny.

Rozdział 5 opisuje stanowiska pomiarowe opracowane przez autora oraz stosowane metody pomiarowe. Szczegółowo przedstawiono zautomatyzowane stanowisko do pomiaru momentu zaczepowego, a także stanowiska do wyznaczania momentu elektromagnetycznego i sprawności badanych silników.

Rozdział 6 zawiera opis przeprowadzonych badań eksperymentalnych wraz z przedstawieniem modeli fizycznych testowanych konstrukcji.

Rozdział 7 poświęcono porównaniu wyników badań eksperymentalnych dla maszyny przed i po zmianach konstrukcyjnych. Dokonano porównania wyników obliczeń dla analizowanych różnych wersji silników, oceniając ich parametry elektromechaniczne, gabaryty oraz masę.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie i wnioski. Potwierdzono słuszność postawionej tezy oraz wskazano możliwe kierunki dalszych badań, obejmujące m.in. dokładniejsze modelowanie strat i wpływ temperatury na parametry maszyny.

Praca cechuje się kompleksowym podejściem do tematu, łącząc modelowanie numeryczne, badania eksperymentalne oraz analizę wpływu modyfikacji konstrukcyjnych na parametry silnika.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Przedstawione przez Doktoranta badania wskazują na oryginalne i kompleksowe podejście do problemu. Kompleksowość ta wyraża się w umiejętności operowania aparatem matematycznym, technikami symulacji, budowy złożonego stanowiska laboratoryjnego, poprawnego organizowania pomiarów i interpretacji ich wyników.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych doktoranta zaliczam:

- Przedstawienie w sposób syntetyczny i zwięzły bardzo obszernych tematycznie zagadnień dotyczących rozwiązań konstrukcyjnych w zakresie ograniczania momentu zaczepowego.
- Budowa stanowisk laboratoryjnych – stworzenie dedykowanych stanowisk do badań maszyn, w tym zautomatyzowanego stanowiska do pomiaru momentu zaczepowego. W mojej ocenie podczas budowy tego stanowiska doktorant wykazał się dużą wiedzą techniczną oraz kreatywnością polegającą na wydajnym wykorzystaniu ograniczonych środków finansowych do budowy zaawansowanych stanowisk badawczych, co jest niezwykle cenną umiejętnością przy prowadzeniu badań eksperymentalnych.
- Opracowanie modeli matematycznych i symulacyjnych – stworzenie licznych modeli polowych i polowo-obwodowych badanych maszyn, oraz przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych na przygotowanym przez autora modelach siatek 2-d i 3-d przy wykorzystaniu dwóch różnych programów dedykowanych do tego typu zastosowań. Takie podejście do badań symulacyjnych minimalizuje wpływ parametryzacji modelu i solvera na uzyskane wyniki, a ich zbieżność potwierdza wiarygodność rezultatów. Doktorant dokonał przy tym krytycznej analizy ich wyników z uwzględnieniem różnych parametrów prowadzenia obliczeń wykazując, że możliwe jest uzyskanie wiarygodnych wyników przy ograniczeniu czasu ich przygotowania poprzez odpowiedni dobór parametrów siatki.
- Na szczególne uznanie zasługuje fakt, że autor dysertacji wykonał kilka wersji maszyn elektrycznych z różnymi wariantami wykonania obwodu magnetycznego, co niewątpliwie stanowi mocną stronę pracy.
- Przeprowadzenie kompleksowych badań laboratoryjnych – eksperymentalna weryfikacja teoretycznych założeń i wyników symulacji. Autor poprzez porównanie wyników uzyskanych na drodze symulacji komputerowej opracowanego przez siebie modelu polowo-obwodowego oraz wyników uzyskanych na zaprojektowanym i zbudowanym przez siebie stanowisku jednoznacznie, wykazał poprawność przyjętych założeń

modelowych. Było to o tyle trudne, że podczas prac doktorant nie dysponował referencyjnym urządzeniem do walidacji wyników uzyskanych z autorskiego stanowiska.

- Porównanie konstrukcji klasycznej z nową koncepcją – zestawienie wyników dla maszyny ze standardowymi magnesami ferrytowymi i nowej, zbudowanej w ramach prac nad doktoratem, maszyny z magnesami neodymowymi prostopadłościennymi.
- W ramach prac badawczych Doktorant przeprowadził analizę sprawności i strat energetycznych pod kątem oceny efektywności zaproponowanych nowych rozwiązań konstrukcyjnych.
- W sposób nie budzący wątpliwości wykazał słusność przedstawionej tezy stanowiącej że odpowiednia konfiguracja obwodu magnetycznego pozwala na zwiększenie momentu elektromagnetycznego przy zmniejszeniu gabarytów maszyny.
- Propozycje dalszych badań – wskazanie przyszłych kierunków badawczych, w tym potrzeby opracowania bardziej zaawansowanych modeli 3D i analizy wpływu strat oraz temperatury na parametry maszyny.

Doktorant w stopniu biegłym opanował tematykę rozprawy w warstwie nie tylko teoretycznej, ale przede wszystkim praktycznej skutecznie łącząc techniki analizy numerycznej z badaniami eksperymentalnymi, co znacząco podnosi wartość naukową rozprawy. W opinii recenzenta przyjęta przez autora teza rozprawy została udowodniona – opracowane zostały prototypy silników, których pomiary jasno wskazują, że uzyskano zwiększenie momentu elektromagnetycznego bez zwiększania poziomu tętnień tego momentu.

Powyższe osiągnięcia upoważniają do stwierdzenia, że Doktorant opanował tematykę rozprawy zarówno w zakresie teoretycznym, badawczym jak i eksperymentalnym. Potwierdza to dobre rozeznanie problemów technicznych i naukowych związanych z problematyką konstrukcji i eksploatacji maszyn elektrycznych ze wzbudzeniem od magnesów trwałych.

4. Ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Podział treści rozprawy jest logiczny i uporządkowany. Styl oraz poziom językowy jest bardzo dobry – z rzadka można dopatrzeć się drobnych błędów trudnych do uniknięcia przy edycji pracy. Szata graficzna jest starannie przygotowana i przejrzysta, a rysunki poprawnie opisane i czytelne. Jedyna uwaga recenzenta dotycząca szaty graficznej dotyczy oznaczenia magnesów jednolitym kolorem, co może sugerować istnienie monopoli magnetycznych, które w rzeczywistości nie występują. Dla większej klarowności warto dodać oznaczenia biegunów (N i S) lub zastosować

dwukolorowe oznaczenie. Jednocześnie stwierdzam, że pełne oznaczenie biegunów magnesu mogłoby zmniejszyć czytelność rysunku, stąd taki zabieg jest stosunkowo często stosowany w literaturze przedmiotu.

W pracy można odnaleźć nieliczne usterki literowe, edytorskie czy niezbyt precyzyjne zwroty, bądź sformułowania, wśród których można wymienić:

1. Brak odniesienia do rys 2.1 w tekście jest odniesienie do rys 2.4.
2. Podpis rysunku 4.5 – jest „*Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie dla silnika B*” winno być: „*Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie dla różnych wykonan dla silnika B*”, podobnie w rys 4.6.
3. Dotyczy całej pracy – „solver” zamiast spolszczonej wersji „solwer”.
4. s. 84 przy założonej prędkości obrotowej 1°/s czas trwania symulacji pełnego obrotu powinien wynosić 360s nie 1 s.
5. Wzór 4.2 – błędnie oznaczenia „+ –”
6. s. 91 jest: „...świetnymi właściwościami metrologiczne...” winno być: „...świetnymi właściwościami metrologicznymi...”
7. s. 110 jest: „...w związku z czym duży duży udział w momencie..”, winno być: „...w związku z czym duży udział w momencie..”
8. rys 6.12, 6.13, 6.14 – nieuzasadniona zmiana kolorystyki przebiegów.
9. s. 127 jest „ M_{bering} ” winno być „ $M_{bearing}$ ”.

Pragnę zaznaczyć, że zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia stylistyczne oraz edytorskie nie wpływają na ocenę merytoryczną zawartości opiniowanej rozprawy doktorskiej.

5. Uwagi merytoryczne i pytania dyskusyjne.

1. Autor w analizie metod minimalizacji momentu zaczepowego nie wspomniał o metodach minimalizacji negatywnego wpływu momentu zaczepowego poprzez zastosowanie odpowiednich algorytmów sterowania silnika. Pomimo, że praca koncentruje się na konstrukcji maszyn elektrycznych moim zdaniem nadal istnieje potrzeba chociażby enumeratywnego wymienienia pozostałych metod.
2. W rozdziale 2 autor wspomina o metodzie bezczujnikowej, która określa położenie wirnika na podstawie pomiaru prądów i napięć. W rzeczywistości pomiar prądów nie jest wymagany do ustalenia położenia w przypadku silników BLDC, ale jest rzeczywiście niezbędny w przypadku określenia położenia z wykorzystaniem obserwatora stanu

Luenbergera w silnikach PMSM. Wydaje się, że te techniki należałoby przyporządkować do odpowiednich metod sterowania.

3. Autor wyróżnia określanie silników z magnesami trwałymi akronimami PMSM oraz BLSM. Wspomina również o tym, że terminologia ta jest dyskusyjna. W opisie autor stwierdza, że silnik BLSM zasilony jest tak samo jak silnik BLDC, a PMSM poprzez falownik bezpośrednio z sieci. W mojej ocenie struktura układu energoelektronicznego jest taka sama we wszystkich tych układach, a różnice wynikają niemal jedynie z przyjętego przez konstruktora algorytmu sterowania.
4. Stwierdzenie, że „szerokość impulsów zależy od położenia wirnika” jest co najmniej niezręczne. Stwierdzenie, że położenie wirnika ma wpływ na sposób sterowania jest co do zasady prawdziwe, ale kluczowa jest tutaj rola regulatorów prądu i prędkości. Skorelowanie współczynnika PWM jedynie z pozycją uniemożliwiłoby poprawne sterowanie silnikiem napędowym.
5. Stwierdzenie autora, że „Moment zaczepowy występuje we wszystkich maszynach z magnesami trwałymi” jest zbyt dużym uogólnieniem – istnieją maszyny z magnesami trwałymi pozbawione rdzenia stojana – tzw. silniki bezrdzeniowe. Są one dedykowane szczególnie do układów wysokoobrotowych, gdzie straty w żelazie związane z szybkością przemagnesowania rdzenia znacząco zmniejszałyby użyteczność takich układów napędowych. Dodatkowo są aplikacje silników stosowanych w tzw. układach haptycznych, w których jakiejkolwiek fluktuacje momentu w funkcji położenia wirnika są szczególnie niepożądane.
6. Autor wybrał bardzo trudną drogę w prowadzeniu badań. Samodzielna budowa modeli, parametryzacja solvera oraz prototypowe stanowisko do weryfikacji wyników uzyskanych na drodze symulacji komputerowej, niesie ze sobą ryzyko braku możliwości poprawnej weryfikacji uzyskanych wyników. Czy brak odniesienia się do wyników pomiarów referencyjnego urządzenia do badania momentu zaczepowego lub pomiarów silnika ze znanym rozkładem momentu zaczepowego na zbudowanym stanowisku nie zmniejsza wiarygodności uzyskanych danych.
7. Na rysunku 7.6 najwyższą sprawność w całym zakresie momentu obciążenia uzyskuje silnik o najwyższym momencie zaczepowym. Ponieważ moment zaczepowy jest przyczyną obniżenia sprawności maszyn elektrycznych może to być zaskakujące, co powinno być opatrzone stosownym komentarzem.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Uważam, że Doktorant wykazał się samodzielnością oraz umiejętnością zaplanowania eksperymentu i rozwiązania postawionego problemu badawczego. Przedłożoną do recenzji rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Dotyczy to zarówno jej strony naukowej jak i formalnej. Obie nie wzbudzają wątpliwości. Na szczególną uwagę zasługuje duży wkład pracy Autora podczas wykonania wielu pracochłonnych i czasochłonnych badań laboratoryjnych i podczas budowy stanowiska badawczego. Praca doktorska stanowi rozwiązanie problemu naukowego, dotyczącego dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Doktorant wykazał się znajomością wiedzy teoretycznej w zakresie dyscypliny naukowej. Rozprawa niewątpliwie stanowi samodzielne rozwiązanie postawionych zadań przy użyciu właściwych metod. Stwierdzam, że przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Strączyńskiego *Analiza wpływu wybranych zmian obwodu magnetycznego na parametry silnika komutatorowego z magnesami trwałymi* spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określonym w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2022 poz. 574 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz wnioskuję o przyznanie jej wyróżnienia.

.....
dr hab. inż. Krzysztof Kolano

