

Opole, 17.02.2025 r.

Prof. dr hab. inż. Marian Lukaniszyn  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Politechnika Opolska

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr inż. Pawła Strączyńskiego**

**pt.: „Analiza wpływu wybranych zmian obwodu magnetycznego na parametry silnika komutatorowego z magnesami trwałymi ”**

**wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Sebastiana Różowicza, prof. P. Świętokrzyskiej**

**Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Zbigniew Goryca**

*Niniejszą recenzję wykonano na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.  
Politechniki Świętokrzyskiej  
z dnia 13 stycznia 2025 r.*

### **1. Ocena wyboru tematu rozprawy**

Praca doktorska ".: „Analiza wpływu wybranych zmian obwodu magnetycznego na parametry silnika komutatorowego z magnesami trwałymi” dotyczy aktualnej i rozwijanej w ostatnich latach dziedziny wspomaganej komputerowo analizy pracy przetworników elektromechanicznych.

Szybki rozwój konstrukcji maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi spowodowany został, w ostatnich latach, znaczącym postępem technologicznym w dziedzinie materiałów magnetycznych, energoelektronice, a także rozwojem metod obliczeniowych i związanych z tymi metodami programów. Od ponad 30 lat w analizie przetworników elektromechanicznych stosuje się metody komputerowe rozwiązywania równań pola elektromagnetycznego, w tym metodę elementów skończonych.

Olbrzymią zaletą tych silników w porównaniu z innymi silnikami elektrycznymi jest prosta konstrukcja i związana z nią pewność działania. Podstawowym kryterium oceny napędu jest cena. Niebagatelną jednak rolę odgrywają parametry dynamiczne – szybkość reakcji na zmiany momentu obciążenia, czas zaniku stanów nieustalonych i związany z parametrami dynamicznymi kształt momentu wytwarzanego przez silnik.

Tematyka rozprawy ukierunkowana jest na problemy analizy polowej i polowo-obwodowej komutatorowych silników magnetoelektrycznych. Analiza pola magnetycznego

umożliwia wyznaczanie ważnych parametrów całkowitych silników komutatorowych. Znajomość tych parametrów pozwala przeprowadzić badania symulacyjne pracy silnika komutatorowego oraz jego stanów nieustalonych już na etapie projektowania.

Można się zgodzić ze stwierdzeniem Autora (str.15 i 16), „*problem konstrukcji obwodu magnetycznego i jego wpływu na moment zaczepowy w silnikach komutatorowych jest tematem aktualnym i nie poruszonym do tej pory w szerszym zakresie, w przeciwieństwie do silników bezszczotkowych*”. Wydaje się zatem zasadnym zastąpienie magnesów ferrytowych magnesami neodymowymi, co pozwalałoby zwiększyć gęstość mocy i zmniejszyć gabaryty maszyny. Wobec tego pojawia się pytanie czy korzystając z różnych metod aproksymacyjnych oraz wykonanych już pomiarów i rejestracji można rozwiązać ten problem. Moim zdaniem rozprawa doktorska mgra **Pawła Strączyńskiego** odpowiada na to pytanie.

Ośrodek Kielecki jest jednym z nielicznych w kraju, który od kilku lat realizuje w sposób ciągły badania z tej obszernej i ciekawej problematyki.

Współczesne tendencje badawcze w dziedzinie zastosowań elektromagnetyzmu oraz elektromagnetyzmu obliczeniowego prowadzą do następujących wniosków:

- w większości struktur elektrotechnicznych podstawową rolę odgrywa pole elektromagnetyczne;
- rozbudowane systemy komputerowe potrafią już dać odpowiedź na pytanie, jaki jest rezultat działania systemu, w tym przypadku rozkład pola magnetycznego, w dowolnej konfiguracji, przy różnych warunkach brzegowych;
- posiadane narzędzia numeryczne pozwalają na prowadzenie obliczeń elektromagnetycznych dla złożonych systemów i urządzeń.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska znajduje się w głównym nurcie współczesnego projektowania urządzeń elektrotechnicznych za pomocą technik należących do tzw. elektromagnetyzmu obliczeniowego. Reasumując stwierdzam, że praca badawcza mgr inż. **Pawła Strączyńskiego** w zakresie stosowania metod polowych i polowo-obwodowych, w analizie zjawisk elektromagnetycznych, w trójwymiarowych strukturach obiektów fizycznych, doprowadziła do powstania - użytecznego i skutecznego narzędzia analizy i projektowania silników komutatorowych. Dlatego też wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr inż. **Pawła Strączyńskiego**, związany z analizą wpływu zmian obwodu magnetycznego na parametry maszyny komutatorowej, uważam za ciekawy z punktu widzenia rozwiązania problemu naukowego.

Tematykę rozprawy uważam więc za aktualną i nowoczesną. Szerokie spektrum problemów, które pojawiły się w trakcie wykonywania badań, jak również aktualność tematyki z punktu widzenia technicznego gwarantują, że badania mogą być kontynuowane w przyszłości.



## 2. Cel i teza naukowa rozprawy

Praca Pana mgr inż. Pawła Strączyńskiego jest wynikiem systematycznych studiów nad zagadnieniem polowo-obwodowej analizy stanów pracy silnika komutatorowego.

Przedmiotem pracy jest konstrukcja modeli 2 i 3 wymiarowych silnika, analiza pola magnetycznego i parametrów silnika komutatorowego zasilanego ze źródła prądu stałego, wykonanie obliczeń porównawczych, symulacji komputerowej pracy silnika oraz weryfikacja pomiarowa na modelach fizycznych.

Autor formułuje cel pracy na str. 17, który sprowadza się do analizy możliwości wynikających z zastąpienia magnesów ferrytowych w maszynie komutatorowej magnesami neodymowymi prostopadłościennymi oraz ocenę wybranych zmian w oparciu o opracowane modele polowo – obwodowe silników komutatorowych o magnesach trwałych.

Tak postawione cele pracy uważam za w pełni poprawne i uzasadnione.

Autor wyszczególnia jedną tezę naukową rozprawy. Zagadnienie naukowe, jakie Autor postawił sobie do rozwiązania zostało określone logicznie i precyzyjnie. Prezentowane wyniki symulacji komputerowych oraz pomiarów na prototypach maszyn mające na celu udowodnienie postawionej tezy, przedstawiono w sposób czytelny i przejrzysty.

## 3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona rozprawa została przygotowana jako praca promocyjna (doktorska) w formie monografii. Praca składa się z ośmiu rozdziałów podstawowych, dwóch dodatków i spisu literatury (120 pozycji, w tym 3 prac własnych Doktoranta). Recenzowaną rozprawę zaliczam do grupy prac eksperymentalno - teoretycznych. Uważam, że oceniana praca mgr Pawła Strączyńskiego spełnia wymogi pracy doktorskiej, gdyż zawiera oryginalne wartości:

- poznawcze w obszarze badanych zjawisk,
- konceptyjno-konstrukcyjne w obszarze metod projektowania układów pomiarowych,
- eksperymentalne w obszarze identyfikacji parametrów modelu matematycznego silnika komutatorowego,
- teoretyczne w zakresie analizy pracy i wpływu parametrów obwodu matematycznego silnika komutatorowego na straty mocy i sprawność, zweryfikowane na stanowisku badawczym.

Stanowi ona wkład w rozwój technik modelowania i analizy pracy silnika komutatorowego. Nie ulega wątpliwości, że Doktorant osiągnął wysoki stopień opanowania teorii i techniki obliczeń polowo-obwodowych oraz metod pomiarowych.

Praca jest skonstruowana poprawnie, zawiera wstęp wraz z omówieniem stanu wiedzy, wyraźnie sformułowany cel, zakres pracy oraz precyzyjnie postawioną tezę (rozdział 1).

W rozdziale 2 Doktorant omówił budowę silników komutatorowych i powstawanie momentu elektromagnetycznego. Przedstawił również opis matematyczny pola magnetycznego oraz metodę polowo-obwodową wykorzystywaną przy modelowaniu maszyny.

Rozdział 3 zawiera przegląd metod ograniczania momentu zaczepowego.

Rozdział 4 i następne stanowią własny wkład Doktoranta i są najważniejszymi osiągnięciami Autora. W rozdziale 4 opisano modele polowo-obwodowe oraz wyniki badań symulacyjnych. Analizowano silnik klasyczny (model A) oraz autorskie prototypy maszyn wykonane z zastosowaniem magnesów neodymowych (modele B). Badano wpływ rozmieszczenia magnesów, liczby żłobków w wirniku oraz grubość szczeliny.

W rozdziale 5 zamieszczono przegląd metod i przyrządów pomiarowych oraz omówiono budowę stanowiska badawczego silnika komutatorowego. Wyznaczano pomiarowo moment zaczepowy, elektromagnetyczny oraz sprawność maszyn.

Rozdział 6 zawiera opis modeli fizycznych badanych silników oraz wyniki badań. W rozdziale 7 Autor dokonał krytycznego porównania wyników badań i obliczeń analizowanych konstrukcji. Szczególnie ciekawe są symulacje pracy prototypu B silnika komutatorowego. Na uwagę zasługuje zbudowane stanowisko pomiarowe z silnikiem komutatorowym oraz pomiary momentu zaczepowego i strat. Uzyskane wyniki pomiarów weryfikują postawioną tezę.

W rozdziale 8 zamieszczono podsumowanie.

Oceniając pracę chcę podkreślić, że została ona wykonana na dobrym poziomie i jest wartościowa z punktu widzenia pogłębienia wiedzy na temat modelowania silnika komutatorowego i wpływu zmian konstrukcyjnych obwodu magnetycznego na jego parametry. Wnosi ona także oryginalny wkład naukowy i potwierdza dobre kwalifikacje Autora rozprawy.

**Do oryginalnych osiągnięć w pracy doktorskiej można zaliczyć:**

- dokonanie przeglądu literatury;
- opracowanie metody wyznaczania parametrów elektrycznych i mechanicznych maszyny komutatorowej;
- opracowanie licznych modeli polowych i polowo-obwodowych badanych maszyn;
- analiza wpływu złożoności obliczeniowej modelu na dokładność obliczeń; użycie różnych programów MES (darmowego i komercyjnego) w celu porównania wyników – świadczy o dużej biegłości w znajomości oprogramowania;
- przygotowanie skryptów w języku MATLAB do automatyzacji obliczeń momentu zaczepowego i elektromagnetycznego w programie FEMM;



- budowę stanowisk laboratoryjnych do wyznaczania parametrów maszyn w tym w szczególności zautomatyzowanego stanowiska do wyznaczania przebiegu momentu zaczepowego;
- projekt i wykonanie układów pomiarowych;
- wykonanie gruntownych badań eksperymentalnych;
- analizę porównawczą maszyny o konstrukcji klasycznej z maszyną wzbudzaną magnesami neodymowymi prostopadłościennymi;
- zaproponowany model i prototyp silnika komutatorowego można uznać za element nowości. Model został opracowany na podstawie pomiarów i obliczeń połowo-obwodowych, jest też przedmiotem wzoru użytkowego [38].

Brak też moim zdaniem poważniejszych błędów i uchybień, które należałoby podnieść.

**Jednak do wad pracy doktorskiej zaliczyłbym:**

- Brak szczegółowej analizy ekonomicznej rozwiązania – podano jedynie orientacyjne ceny magnesów;
- Przybliżony sposób pomiaru indukcyjności za pomocą mostka RLC, ponadto przyjęto uproszczenie że indukcyjność jest stała w funkcji kąta obrotu;
- Pewne wątpliwości może budzić dokładność wykonania maszyny  $B - Q=15, \delta=1\text{ mm}$ ;
- Brak szczegółowej analizy zagadnień cieplnych w maszynach komutatorowych;

W trakcie zapoznawania się z treścią pracy nasunęło mi się kilka pytań i uwag dyskusyjnych, do których prosiłbym o komentarz ze strony Doktoranta:

1. Czym Autor kierował się przy wyborze zmian konstrukcyjnych obwodu magnetycznego które badał? (grubość szczeliny, ułożenie magnesów, liczba żłobków);
2. Czy Autor badał wpływ dyskretyzacji na moment od zębów (cogging torque), a jest on bardzo wrażliwy na dyskretyzację?
3. Czy Autor stosował o warunki periodyczne bądź aperiodyczne w modelach obliczeniowych?
4. Jaką metodę zastosowano do odwzorowania ruchu w metodzie elementów skończonych (zostało to potraktowane bardzo skrótowo przez Autora)?
5. Jak Autor sam wspomina w pracy silniki komutatorowe są coraz rzadziej wykorzystywane. Gdzie zatem Autor widzi możliwość zastosowania prezentowanej przez siebie konstrukcji maszyny?
6. Proszę omówić wpływ temperatury w silniku komutatorowym. Możliwości rozszerzenia opracowanego oprogramowania o pole termiczne?;
7. Proszę przedstawić kierunek dalszych badań.

**4. Uwagi szczegółowe**

Podkreślam staranność Autora w poprawnym zapisywaniu wzorów matematycznych oraz dobrą stroną graficzną pracy.

W pracy znalazłem drobne błędy edytorskie ( str.: 23, 30, 37, 45, 58, 67, 92, 94, 97, 103), dotyczące stylu (str.:14, 15, 17, 20, 31, 42, 91), które nie wpływają na ostateczną pozytywną ocenę pracy.

Zwracam natomiast uwagę na pewne uchybienia:

8. str.: 31 – nie „w skutek”, a „wskutek”;
9. str.: 33, błędne oznaczenie momentu na rys.2.9;
10. str.: 40, błędny wzór 2.31;
11. str.133 - Bibliografia (brak cytowania monografii: I. Dudzikowski, M. Ciurys „Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi”.

Część uwag szczegółowych, w tym przede wszystkim uwagi dotyczące stosowanych w pracy zwrotów i sformułowań, przekazałem Autorowi.

### 5. Konkluzja recenzji

Stwierdzam, iż rozprawa jest napisana bardzo starannie, układ pracy jest precyzyjny i logiczny, a strona graficzna jest wzorowa. Wnioski końcowe uzyskane w pracy są poprawne i interesujące.

Przedstawione powyżej uwagi ogólne i szczegółowe nie obniżają mojej pozytywnej oceny pracy. Wyniki rozważań zawarte w rozprawie upoważniają do stwierdzenia, iż została udowodniona teza oraz osiągnięto założone cele pracy.

Przedstawiona rozprawa dowodzi, że Doktorant umiejętnie korzysta z najnowszej literatury w obranej dziedzinie wiedzy, podchodzi do niej krytycznie, a ponadto potrafi twórczo rozwijać osiągnięcia innych autorów.

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

Mgr **Paweł Strączyński** jest autorem 11 publikacji w tym: 4 publikacje na liście A (MNiSW0, 4 publikacje w materiałach konferencyjnych (zarejestrowane w Web of Science), 1 publikacja na liście B (MNiSW), 2 publikacje w innych recenzowanych czasopismach krajowych i na konferencjach międzynarodowych.

Stwierdzam, iż przedstawiona rozprawa pt.: „*Analiza wpływu wybranych zmian obwodu magnetycznego na parametry silnika komutatorowego z magnesami trwałymi*” autorstwa Pana mgr inż. **Pawła Strączyńskiego** stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego i spełnia kryteria 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.).

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora Pana mgr inż. **Pawła Strączyńskiego** do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.



prof. dr hab. inż. **Murian Łukaszyszyn**