

Opole 04.01.2022 r.

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

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**Mgr. inż. Pawła Góralskiego**  
**pt. "Silnik reluktancyjny o ruchu złożonym ze wspólnym obwodem**  
**magnetycznym"**

wykonanej pod kierunkiem Prof. dra hab. inż. Grzegorza Kamińskiego  
(Promotor pomocniczy: dr inż. Jan Szczypior)

*Niniejszą recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka,  
Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej  
z dnia 1 grudnia 2021 r.*

**1. Ocena wyboru tematu rozprawy**

Praca doktorska „**Silnik reluktancyjny o ruchu złożonym ze wspólnym obwodem magnetycznym**”, dotyczy aktualnej i rozwijanej w ostatnich latach dziedziny wspomaganego komputerowo projektowania, optymalizacji konstrukcji i sterowania przetworników elektromechanicznych specjalnych.

W elektrodynamice technicznej za kompleksowe można uważać rozwiązanie, które obejmuje adekwatność geometryczną i fizyczną między modelem i badanym obiektem we wszystkich detalach, jak między innymi: nieliniowość stali, prądy wirowe, straty mocy, siły elektrodynamiczne, wpływ temperatury oraz dobór rozwiązań i materiałów umożliwiających optymalizację konstrukcji, a także wyeliminowanie zagrożeń elektrycznych, dynamicznych i cieplnych.

Szybki rozwój nietypowych konstrukcji maszyn elektrycznych spowodowany został, w ostatnich latach, znaczącym postępem technologicznym w dziedzinie materiałów magnetycznych, a także rozwojem metod obliczeniowych i związanych z tymi metodami programów. Wśród maszyn o nietypowej konstrukcji reluktancyjne silniki stanowią grupę mniej zbadaną, a ze względu na ukształtowanie obwodu elektromagnetycznego mogą

stanowić lepsze rozwiązanie. Tego rodzaju sytuacje mają miejsce szczególnie często, gdy ograniczony wymiar osiowy maszyny stanowi jeden z głównych kryteriów doboru jednostki napędowej.

W większości silników reluktancyjnych występują znaczne pulsacje momentu powodujące szereg związanych z tym niekorzystnych zjawisk – zmienne naprężenia konstrukcji silnika, drgania i hałas. Poznanie źródeł pulsacji momentu i wskazanie metod ograniczania tych pulsacji jest tematem wielu prac badawczych.

Tematyka rozprawy ukierunkowana jest na problemy optymalizacji i sterowania silników reluktancyjnych o ruchu złożonym. Modele polowe i obwodowe silników reluktancyjnych o ruchu złożonym umożliwiają badanie ich właściwości eksploatacyjnych oraz wyznaczanie ich parametrów całkowych, użytecznych w układach sterowania.

Dlatego też wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr inż. **Pawła Góralskiego** uważam za trafny i aktualny zarówno z punktu widzenia rozwiązania problemu naukowego, jakim jest projektowanie i optymalizacja konstrukcji silników reluktancyjnych o ruchu złożonym, jak też ze względu na charakter aplikacyjny pracy.

Zespół Prof. G. Kamińskiego od wielu lat realizuje w sposób ciągły badania z tej obszernej i ciekawej problematyki w Politechnice Warszawskiej.

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 Góralskiego** doprowadziła do powstania - użytecznego i skutecznego narzędzia analizy, projektowania, optymalizacji konstrukcji i sterowania silników reluktancyjnych o ruchu złożonym. Zaproponowane autorskie metody obliczeniowe, pozwalają na sprawne i skuteczne projektowanie i analizę wpływu zmian konstrukcyjnych na parametry eksploatacyjne tego rodzaju maszyn oraz są przydatne do celów sterowania.

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. .

Z tego powodu należy uznać, że tematyka rozprawy ukierunkowana na problemy projektowania i optymalizacji konstrukcji silników reluktancyjnych o ruchu złożonym dobrze wpisuje się w aktualne trendy rozwojowe projektowania i optymalizacji maszyn elektrycznych i może stanowić temat rozprawy naukowej w obszarze nauk technicznych i dyscyplinie naukowej Elektrotechnika, będącej przedmiotem dotychczasowej działalności naukowej Doktoranta. Recenzowana rozprawa dobrze wpisuje się też w zakres nauk

inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinę automatyka, elektronika i elektrotechnika według nowej klasyfikacji.

## 2. Cel i teza naukowa rozprawy

Praca Pana mgr inż. **Pawła Góralskiego** jest wynikiem systematycznych studiów nad zagadnieniem projektowania, modelowania i optymalizacji konstrukcji silników reluktancyjnych o ruchu złożonym.

Przedmiotem pracy jest omówienie konstrukcji silników reluktancyjnych o ruchu obrotowo-liniowym ze wspólnym obwodem magnetycznym oraz analiza wariantów silnika w zależności od sposobu formowania dróg magnetycznych w jarzmie stojana, liczby zębów oraz liczby pasm fazowych. W tezie naukowej pracy (str. 23) opartej na uzyskanym patencie „Przetwornik elektromechaniczny o ruchu złożonym” Autor stwierdza, że możliwe jest efektywne zaprojektowanie takiego silnika w oparciu o przygotowany sparametryzowany model matematyczny oraz środowisko obliczeniowe. Zbudowany model fizyczny silnika reluktancyjnego o ruchu obrotowo-liniowym jest również efektem pracy.

W celach pracy (str. 24) Autor wyszczególnia kilka następujących zagadnień:

- Określenie wpływu parametrów geometrycznych na statyczne charakterystyki kątowe momentu obrotowego;
- Określenie wpływu liczby par biegunów i pasm na statyczne charakterystyki kątowe momentu obrotowego;
- Analiza konstrukcji konwencjonalnej oraz konstrukcji ze skróconymi drogami strumienia magnetycznego;
- Analiza rozplywu strumienia w jarzmie stojana w zależności od konfiguracji pasm fazowych;
- Określenie wpływu wspólnego obwodu magnetycznego na charakterystyki momentu obrotowego;
- Określenie wpływu wspólnego obwodu magnetycznego na warunki komutacji pasm fazowych;
- Określenie wpływu wspólnego obwodu magnetycznego na straty magnetyczne w jarzmie stojana;
- Porównanie wyników badań na podstawie modeli obliczeniowych i modelu fizycznego;

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

Zagadnienie naukowe, jakie Autor postawił sobie do rozwiązania, zostało określone logicznie i precyzyjnie. Prezentowane wyniki symulacji komputerowych i badań eksperymentalnych

mające na celu udowodnienie postawionej tezy, przedstawiono w sposób czytelny i dość przejrzysty.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona rozprawa została przygotowana jako praca promocyjna (doktorska) i została wydana w formie monografii. Praca jest kompleksowa (163 strony). Składa się z siedmiu rozdziałów podstawowych oraz spisu ważniejszych oznaczeń i spisu literatury – 51 pozycji (w tym 8 prac Autora). Recenzowaną rozprawę zaliczam do grupy prac metodologiczno-projektowych. Stanowi ona istotny wkład w rozwój technik analizy, projektowania, optymalizacji konstrukcji i sterowania silnika reluktancyjnego o ruchu obrotowo-liniowym. Nie ulega wątpliwości, że Doktorant osiągnął wysoki stopień opanowania teorii i techniki obliczeń pól elektromagnetycznych oraz technik optymalizacji.

Praca jest skonstruowana poprawnie, zawiera wstęp oraz informacje dotyczące konstrukcji, budowy i projektowania maszyn elektrycznych o ruchu obrotowo-liniowym.

Wyraźnie sformułowane cele pracy oraz precyzyjnie postawioną tezę zawiera rozdział 2.

W rozdziale 3 zamieszczono opis modelu mechanicznego silnika reluktancyjnego o ruchu złożonym oraz szczegółowy zestaw parametrów konstrukcyjnych uwzględnianych w modelu 2D maszyny. Przedstawiony został również model 2D badanej konstrukcji wykonany w środowisku FEMM. Zamieszczono także zestaw wskaźników do oceny wyników.

Rozdział 4 poświęcono badaniom wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych badanej maszyny na przebiegi momentu obrotowego. Analizowano wpływ liczby zębów stojana i wirnika, liczbę pasm fazowych i parametrów jarzm. Warto podkreślić próbę wieloparametrycznego kształtowania wyników obliczeń z punktu widzenia maksymalnej wartości momentu obrotowego i minimalizacji jego pulsacji. Szczegółowej analizie poddano również wpływ wspólnego obwodu magnetycznego na momenty w stanie statycznym i dynamicznym.

W obszernym rozdziale 5 Autor zaprezentował wyniki badań konstrukcji o skróconej drodze strumienia magnetycznego, w której zaadoptowano wspólny obwód magnetyczny. Porównano wersję maszyny z konwencjonalnie skojarzonymi pasmami z wersją będącą przedmiotem pracy, w zakresie warunków komutacji, strat w jarzmie oraz wpływu na moment obrotowy. Wykonano badania w stanie statycznym i dynamicznym. W stanie statycznym sprawdzono wpływ poszczególnych pasm fazowych oraz wysokości jarzma na moment obrotowy. W części dynamicznej analizowano czasy narastania i wygaszania

prądów w pasmach fazowych. Wykonany obszerny program badań pokazał zalety proponowanej konstrukcji.

Opracowaną innowacyjną konstrukcję silnika reluktancyjnego o ruchu obrotowo-liniowym zamieszczono w rozdziale 6. Przystawiono parametry modelu fizycznego maszyny oraz obszerne badania, zarówno części wewnętrznej maszyny jak i zewnętrznej. Sporządzono charakterystyki momentu obrotowego w funkcji położenia kąтового wirnika oraz funkcji wymuszenia prądowego. Wykonane pomiary momentu silnika rzeczywistego wykazują dobrą zgodność z wynikami obliczeń na modelu symulacyjnym.

W rozdziale 7 zamieszczono podsumowanie. Wykazana została słuszność tezy niniejszej rozprawy. Wszystkie cele prac badawczych zostały zrealizowane. Należy podkreślić, że wyniki przeprowadzonych badań tworzą interesującą podstawę do dalszych prac w przedmiotowym zakresie oraz tworzą liczne potencjalne możliwości komercyjnego zastosowania.

Oceniając pracę chcę podkreślić, że została ona wykonana na dobrym poziomie i jest wartościowa z punktu widzenia pogłębienia wiedzy na temat modelowania, optymalizacji konstrukcji i sterowania silników reluktancyjnych o ruchu obrotowo-liniowym. Wnosi ona także oryginalny wkład naukowy i potwierdza dobre kwalifikacje Autora rozprawy.

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

- 1.** P. Góralski, G. Kamiński, Patent nr PAT.221768, data udzielenia 23.06.2015 „Przetwornik elektromechaniczny o ruchu złożonym”;
- 2.** opracowanie środowiska komputerowego, które może być uniwersalnym narzędziem do analizy stanów pracy, wspomaganie procesu projektowania oraz optymalizacji konstrukcji silników reluktancyjnych o ruchu obrotowo-liniowym;
- 3.** opracowanie modeli komputerowych maszyny w programie FEMM;
- 4.** opracowanie i wdrożenie metody 2D do wyznaczania parametrów maszyn;
- 5.** opracowanie i wykonanie innowacyjnego prototypu silnika reluktancyjnego o ruchu obrotowo-liniowym;
- 6.** analiza wpływu ilości zębów w wirniku zewnętrznym na osiągi silnika reluktancyjnego.
- 7.** modelowanie stanów elektrodynamicznych z użyciem modelu polowego uwzględniającego wspólny obwód magnetyczny w postaci wspólnego jarzma, dla różnego położenia wirników i zasilonych pasm fazowych;
- 8.** oszacowanie strat w jarzmie na podstawie przebiegu czasowego wartości normalnej indukcji magnetycznej w wycinkach jarzma stojana, obliczonej z użyciem modelu polowego uwzględniającego wspólny obwód magnetyczny;

9. wykonanie stanowiska pomiarowego i badań eksperymentalnych.

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

Bardzo wartościowe są podsumowania badań po każdym podrozdziale.

Jednak do wad pracy doktorskiej zaliczyłbym język rozprawy i wiele błędów stylistycznych i edytorskich, które utrudniają czytanie tekstu.

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

1. Ograniczenia proponowanych w pracy algorytmów (Autor zastosował program niekomercyjny FEMM oraz najprostsze algorytmy obliczeniowe, model płaski, algorytm stałokrokowy w modelu stanów dynamicznych);
2. Szerszego wyjaśnienia wymaga budowa procedury obliczeniowej w oparciu o program FEMM i funkcję Fmincon;
3. Niewątpliwie, osiągnięciem Autora jest opracowanie modelu numerycznego silnika, który umożliwia uwzględnienie zjawisk elektromagnetycznych w silniku. Autor wyznaczył parametry silnika wykonując wielowariantowe obliczenia metodą elementów skończonych. Moim zdaniem można dokonać próby rozbudowy oprogramowania do obliczeń polowych (stosując pakiet np.: Ansys lub Flux) o procedury optymalizacyjne obwodu magnetycznego maszyny. Można z powodzeniem opracować skrypty do zautomatyzowanych obliczeń sparametryzowanych modeli polowych silników reluktancyjnych, które umożliwiłyby pełną optymalizację obwodu magnetycznego tych silników przy użyciu na przykład algorytmów genetycznych. Zachęcam Autora do uwzględnienia tych problemów w dalszych badaniach. Konstruując funkcję celu można uwzględnić np. maksymalizację momentu maszyny oraz minimalizację jego pulsacji (prace dr Marcina Kowola z Politechniki Opolskiej);
4. Co Autor sądzi o rozbudowaniu algorytmu optymalizacyjnego genetycznego (w przypadku stosowania obliczeń polowych 2D) o bazę danych, w której zapisywano by dane osobników i obliczony dla nich np. moment średni. Przed wykonaniem obliczeń polowych baza byłaby przeszukiwana, aby sprawdzić czy dla wygenerowanego wcześniej osobnika nie zostały wykonane obliczenia polowe. Pozwoliłoby to być może na znaczne zmniejszenie czasu obliczeń;
5. Czy istnieje możliwość komercyjnego wykorzystania wyników pracy? Jakie Autor widzi możliwości zastosowań?

6. Jakie są korzyści związane z zastosowaniem silnika o skróconej drodze strumienia. Czy jego parametry ruchowe byłyby zbliżone do klasycznych konstrukcji silnika reluktancyjnego?
7. Czy badany przetwornik w wersji tarczowej byłby bardziej skomplikowany konstrukcyjnie? Moim zdaniem należałoby stosować do analizy metody polowe 3D. Zdaniem Autora na podstawie uzyskanych wyników będzie możliwa adaptacja silnika do struktury tarczowej (str.152 pracy);
8. Proszę o podanie kierunków dalszych badań ?

#### 4. Uwagi szczegółowe

Praca została napisana poprawnym stylem. Podkreślam staranność Autora w poprawnym zapisywaniu wzorów matematycznych oraz dość dobrą stroną graficzną pracy. Można jednak mieć zastrzeżenia do kilku rysunków, które są mało czytelne i należałoby posługiwać się wersją elektroniczną pracy.

W pracy znalazłem wiele błędów edytorskich (np. str.: 7, 9, 38, 46, 67, 80, 108, 109, 118, 127, 145, 148) oraz dotyczących stylu (np. str.: 7, 18, 21, 22, 24, 26, 27, 28, 29, 41, 43, 48, 50, 52, 56, 57,71, 79, 80, 89, 91, 93, 98, 107, 113, 115, 117, 121, 130, 135, 153, 156), które utrudniają czytanie pracy. Miejscami tekst jest niejasny (np. str.: 17, 26, 35, 42, 55, 73, 87).

Należy zwrócić też uwagę na pewne dodatkowe niedociągnięcia:

- dlaczego numery rysunków pisane są w tekście z dużej litery?
- str. 109 - błędna numeracja rysunków;
- str. 54 - brak zależności 80 i 81;
- str. 70 – rys 45d - brak opisu osi rzędnych;
- str.118 - jest „nie aktywne”, powinno być „nieaktywne”

Powyższe niedociągnięcia nie wpływają na ostateczną pozytywną ocenę pracy.

#### 5. Konkluzja recenzji

Stwierdzam, iż rozprawa jest napisana dość starannie, układ pracy jest precyzyjny i logiczny, a strona graficzna jest poprawna. 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 dobrą znajomością nowoczesnej metodyki modelowania złożonych obiektów fizycznych, metod numerycznych i technik sterowania. Uważam, że praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora szeregu zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych. Podkreślić należy, że Autor wykonał pracę pracując zawodowo w dziale diagnostyki PKN Orlen i posiada kilka certyfikatów zawodowych. Jest również autorem 9 publikacji, zamieszczonych między innymi w Archives of Electrical Engineering (1 pozycja), Przeglądzie Elektrotechnicznym (1 pozycja), Zeszytach Problemowych – Maszyny Elektryczne (2 pozycje) oraz materiałach konferencji międzynarodowych i krajowych. Dorobek uzupełnia 1 patent.

Stwierdzam, iż przedstawiona rozprawa pt. "**Silnik reluktancyjny o ruchu złożonym ze wspólnym obwodem magnetycznym**" autorstwa Pana mgr inż. **Pawła Góralskiego** stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych oraz o Stopniach i Tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65, poz. 595), Rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 roku, Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 3 października 2014 roku oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261, obowiązujące od dnia 01.02.2018 roku).

Przedstawiona opinia upoważnia mnie do poparcia wniosku o nadanie mgr. inż. Pawłowi Góralskiemu stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, po pomyślnym przebiegu publicznej obrony.

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora Pana mgr inż. **Pawła Góralskiego** do publicznej obrony pracy.

  
prof. dr hab. inż. Marian Łukaszyn