



Opole 30.04.2016 r.

Prof. dr hab. inż. Marian ŁUKANISZYN

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Politechnika Opolska

Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Łukasza KNYPIŃKIEGO

**pt. "*Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-
obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych*"**

wykonanej pod kierunkiem Prof. dr hab. inż. L. Nowaka.

Opinia opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej z dnia 22 marca 2016 r.

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Praca doktorska "Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych", dotyczy aktualnej i rozwijanej w ostatnich latach dziedziny wspomaganego komputerowo projektowania i optymalizacji konstrukcji przetworników elektromechanicznych.

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 konstrukcji maszyn elektrycznych o magnesach trwałych spowodowany został, w ostatnich latach, znaczącym postępem technologicznym w dziedzinie materiałów magnetycznych, a także rozwojem metod obliczeniowych i związanych z tymi metodami programów. Silniki o magnesach trwałych stanowią grupę mniej zbadaną. Z uwagi na swoje zalety – proste uzwojenie i znaczny moment w stosunku do objętości mogą one znaleźć zastosowanie nie tylko w specjalizowanych napędach elektrycznych, ale także w sprzęcie powszechnego użytku – np. w pralkach czy wentylatorach. Olbrzymią zaletą tych silników w

porównaniu z innymi silnikami elektrycznymi jest prosta konstrukcja wirnika i związana z nią pewność działania.

W większości silników o magnesach trwałych 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.

Wymagania prawne wprowadzają także wymóg sprzedaży silników elektrycznych o określonych minimalnych wartościach sprawności w zależności od mocy znamionowej i liczby par biegunów. Wymusza to intensyfikację działań mających na celu projektowanie i produkcję silników elektrycznych o coraz większych wartościach sprawności. Projekty nowych norm rozszerzają i podwyższają wymagania norm obecnie obowiązujących. Fakt ten oraz brak w ofercie producentów energooszczędnych silników elektrycznych małej mocy świadczą o potrzebie nowych konstrukcji silników tego typu.

Tematyka rozprawy ukierunkowana jest na problemy optymalizacji silników o magnesach trwałych. Modele polowo-obwodowe silników synchronicznych z magnesami trwałymi (PMSM) oraz silników bezszczotkowych (BLDC) umożliwiają badanie ich właściwości eksploatacyjnych i rozruchowych

Dlatego też wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr inż. **Łukasza KNYPÍŃKIEGO** uważam za trafny i aktualny zarówno z punktu widzenia rozwiązania problemu naukowego jakim jest optymalizacja konstrukcji wybranych silników, jak też ze względu na jego charakter aplikacyjny związany z napędami elektrycznymi.

Zakład Mechatroniki i Maszyn Elektrycznych Politechniki Poznańskiej od kilkunastu lat realizuje w sposób ciągły badania z tej obszernej i ciekawej problematyki.

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. Łukasza KNYPÍŃKIEGO doprowadziła do powstania - użytecznego i skutecznego narzędzia analizy, projektowania i optymalizacji konstrukcji silników o magnesach trwałych.

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. Łukasza KNYPIŃKIEGO jest wynikiem systematycznych studiów nad zagadnieniem modelowania i optymalizacji silników o magnesach trwałych.

Przedmiotem pracy jest konstrukcja 2-wymiarowych modeli obwodowych, połowych i połowo-obwodowych silników o magnesach trwałych i wykorzystanie ich do optymalizacji konstrukcji silników oraz częściowa weryfikacja z pomiarami na modelach fizycznych.

Zbudowane modele silników synchronicznych z magnesami trwałymi, o sprawnościach większych niż w odpowiadającym im silnikach indukcyjnych, są efektem optymalizacji.

Autor formułuje cel pracy na str. 6, który sprowadza się do połączenia efektywnego numerycznego modelu silnika o magnesach trwałych ze skutecznie działającą procedurą optymalizacyjną. Tak postawiony cel pracy uważam za w pełni poprawny i uzasadniony.

Autor wyszczególnia cztery tezy naukowe rozprawy (str.14). Zagadnienie naukowe, jakie Autor postawił sobie do rozwiązania zostało określone logicznie i precyzyjnie. Prezentowane wyniki symulacji komputerowych i badań eksperymentalnych mające na celu udowodnienie postawionych tez, przedstawiono w sposób czytelny i przejrzysty.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona rozprawa została przygotowana jako praca promocyjna (doktorska). Praca składa się z ośmiu rozdziałów podstawowych i spisu literatury (272 pozycje, w tym 23 prace własne i raporty Doktoranta). Recenzowaną rozprawę zaliczam do grupy prac metodologiczno-projektowych. Stanowi ona istotny wkład w rozwój technik analizy, projektowania i optymalizacji silników o magnesach trwałych. Nie ulega wątpliwości, że Doktorant osiągnął bardzo wysoki stopień opanowania teorii i techniki obliczeń pól elektromagnetycznych dwuwymiarowych oraz technik optymalizacji.

Praca jest skonstruowana poprawnie, zawiera wstęp wraz z omówieniem stanu wiedzy, wyraźnie sformułowane cele oraz precyzyjnie postawione tezy (rozdział 1). W rozdziale 2 opisano współczesne konstrukcje silników wzbudzanych magnesami trwałymi.

Rozdział 3 i następne stanowią własny wkład Doktoranta. W rozdziale 3 Autor przedstawił modele obwodowe silników z magnesami trwałymi. Zasugerował ograniczenia wynikające z założeń upraszczających oraz sposób doboru wymiarów magnesów trwałych użytych do budowy silnika. Do odwzorowania histerezy Autor zaproponował model Jilesa-Athertona.

Rozdział 4 jest poświęcony zagadnieniom dotyczącym polowo-obwodowej analizy dynamiki silników synchronicznych i BLDC z magnesami trwałymi. Autor opracował efektywny algorytm bazujący na metodzie Newtona-Rapsona.

W rozdziale 5 Autor przedstawił opracowane środowisko komputerowe do analizy stanów pracy, projektowania i optymalizacji silników synchronicznych i bezszczotkowych (BLDC) z magnesami trwałymi. Szeroko omówił zaproponowane modyfikacje algorytmów, funkcje celu i funkcje kary. Autor zbadał poprawność działania oprogramowania na zadaniach testowych dotyczących optymalizacji silnika synchronicznego (LSPMSM), optymalizacji wymiarów rdzenia i parametrów uzwojeń transformatora oraz identyfikacji parametrów histerezy magnetycznej.

Za najważniejsze osiągnięcia Autora uważam wyniki prac przedstawione w rozdziale 6 i 7. W rozdziale 6 Autor zaprezentował wyniki optymalizacji za pomocą algorytmu genetycznego wirnika silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM) uwzględniając moment zaczepowy, współczynnik THD zawartości harmonicznych w przebiegu siły elektromotorycznej oraz hybrydowy układ wzbudzenia. W kolejnym teście wykorzystano metodę roju cząstek do optymalizacji wirnika silnika LSPMSM. Wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają wyniki badań symulacyjnych i optymalizacji, a w szczególności to, że powstały model fizyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi ma większą sprawność niż w odpowiadający mu silnik indukcyjny.

W rozdziale 7 przedstawiono wyniki optymalnej syntezy silników bezszczotkowych (BLDC).

W rozdziale 8 zamieszczono podsumowanie.

Oceniając pracę chcę podkreślić, że została ona wykonana na bardzo dobrym poziomie i jest wartościowa z punktu widzenia pogłębienia wiedzy na temat modelowania i optymalizacji konstrukcji silników o magnesach trwałych. Wnosi ona także oryginalny wkład naukowy i potwierdza wysokie kwalifikacje Autora rozprawy.

Do oryginalnych osiągnięć w pracy doktorskiej można zaliczyć:

- 1.** opracowanie środowiska komputerowego, które może być uniwersalnym narzędziem do analizy stanów pracy, wspomagania procesu projektowania oraz optymalizacji różnych typów silników o magnesach trwałych. Oprogramowanie składa się z dwóch modułów: modułu optymalizacyjnego oraz modułu zawierającego matematyczny model zjawisk elektromagnetycznych w analizowanym obiekcie. Opracowane środowisko umożliwia także łączenie modułu zawierającego oprogramowanie własne z modułem wykorzystującym oprogramowanie komercyjne.

2. Opracowanie i wdrożenie procedury modyfikacji członu reprezentującego karę za pomocą funkcji sigmoidalnej. Dzięki tej modyfikacji kara nie może przewyższać funkcji celu, a przystosowanie w algorytmie genetycznym pozostaje zawsze wielkością dodatnią.
3. Opracowanie i wdrożenie modyfikacji algorytmu genetycznego i metody roju cząstek. Zmniejsza się liczba „wywołań” funkcji celu, co przy zastosowaniu polowego modelu zjawisk w silniku wpływa znacząco na skrócenie czasu obliczeń optymalizacyjnych.
4. Opracowanie efektywnego połączenia algorytmu genetycznego z metodą funkcji kary zewnętrznej. Wykazano dużą efektywność tej strategii. Jak wynika z przedstawionych w rozprawie rozważań, dzięki takiej modyfikacji można uzyskać dwu- lub nawet trzykrotne skrócenie czasu obliczeń w porównaniu z procedurą klasyczną.
5. Analizę efektywności procesów syntezy silników z wykorzystaniem modeli matematycznych o różnym stopniu złożoności: modeli o parametrach skupionych (modeli obwodowych), modeli o parametrach rozłożonych (modeli polowych), a także modeli polowo-obwodowych (do opisu stanów dynamicznych). Autor wskazał w jakich przypadkach, ze względów ekonomicznych, uzasadnione jest stosowanie modeli uproszczonych, a w jakich konieczne jest stosowanie dokładniejszych modeli polowych.
6. Zaproponowanie dekompozycji zadania optymalizacji, gdy kompromisowa funkcja celu zawiera jednocześnie człon reprezentujący elektromagnetyczny moment użyteczny i moment zaczepowy.
7. Wykazanie, że w przypadku występowania obszarów o silnym nasyceniu, zastosowanie mniej dokładnego modelu o parametrach skupionych może znacząco zniekształcać przebieg procesu optymalizacji.
8. Opracowanie metodyki wstępnego szacowania długości magnesów, co w procedurach optymalizacji jest bardzo przydatne do określenia punktów startowych i przedziału zmienności tego parametru.
9. Analizę i optymalną syntezę nowej hybrydowej struktury wirnika. Stwierdzono, że silniki o hybrydowym układzie wzbudzenia pozwalają na uzyskanie mniejszych wartości współczynnika THD i momentu zaczepowego.
10. Opracowanie oryginalnego algorytmu wyznaczania parametrów modelu Jilesa-Athertona odwzorowującego zjawisko histerezy magnetycznej poprzez minimalizację trójskładnikowej funkcji celu z wykorzystaniem metody roju cząstek.

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

Jednak do wad pracy doktorskiej zaliczyłbym brak wykazu ważniejszych oznaczeń, który ułatwiłby czytanie rozprawy.

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 i oprogramowania do syntezy silników o magnesach trwałych.
2. Wielu autorów stosuje sztuczne sieci neuronowe, jako metodę odwzorowania pętli histerezy (np. prace: Nafalski *et al.*- J. Magn. Mat., 1996; Saliach and Lowther -IEEE Trans. on Mag, 1998; Makaveev *et al.*- IEEE Trans. on Mag., 2002; Dupre and Melkebeek – ICS Newsletter, 2003). Pozwala to zminimalizować konieczną do modelowania pamięć komputera i czas obliczeń. Prosiłbym Autora o komentarz w tej sprawie.
3. Czy istnieje możliwość zastosowania algorytmów równoległych i jakie Autor widzi korzyści?
4. Możliwości uwzględnienia skosu żłobków w opracowanym Autorskim oprogramowaniu?
5. Co Autor sądzi o rozbudowaniu algorytmu optymalizacyjnego o bazę danych, w której zapisywano by dane osobników i obliczony dla nich np. moment średni. Przed wykonaniem obliczeń połowych baza byłaby przeszukiwana, aby sprawdzić czy dla wygenerowanego wcześniej osobnika nie zostały wykonane obliczenia połowe. Pozwoliłoby to być może na znaczne zmniejszenie czasu obliczeń (prace dr M. Kowola [141, 143]).
6. Autor preferuje dwie metody: algorytm genetyczny i metodę roju cząstek. Czy Autor mógłby przedstawić na podstawie literatury i własnych doświadczeń możliwości optymalizacji kształtu obwodu magnetycznego z punktu widzenia maksymalizacji wartości średniej momentu silnika i sprawności za pomocą innych, nieewolucyjnych algorytmów niedeterministycznych:
 - algorytmu bazującego na zachowaniu społeczeństw tworzących cywilizację (Social Behaviour Based Optimization Algorithm),
 - algorytmu immunologicznego (Clonal Selection Algorithm)?
7. Co Autor sądzi o zastosowaniu algorytmu optymalizacyjnego hybrydowego ? (połączenie algorytmu genetycznego z algorytmem deterministycznym)? Może pozwoliłoby to na znaczne zmniejszenie czasu obliczeń
8. Możliwości rozszerzenia opracowanego oprogramowania o pole termiczne?
9. Jak Autor dobierał wartości współczynników wagowych prezentowanych funkcji celu: addytywnej i multiplikatywnej?

10. Proszę o podanie kierunków dalszych badań ?

4. Uwagi szczegółowe

Praca została napisana poprawnym i zrozumiałym stylem. Podkreślam staranność Autora w poprawnym zapisywaniu wzorów matematycznych oraz bardzo dobrą stronę graficzną pracy.

W pracy znalazłem niewiele błędów edytorskich (np. str.: 4, 14, 15, 40, 55, 37, 40, 55, 59, 69, 80, 87, 99, 136, 157, 188, 199) oraz błędów stylistycznych (np. str.: 53, 54, 55, 136), które nie wpływają na ostateczną pozytywną ocenę pracy.

Należy zwrócić jednak uwagę na pewne niedociągnięcia:

- str. 77, 81, 101, 104, 106, 114, 144, 152, 167; nie „przy pomocy”, a „za pomocą”;
- str. 73, 95 jest „z pośród” - powinno być „spośród”;

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

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 zostały udowodnione tezy 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.

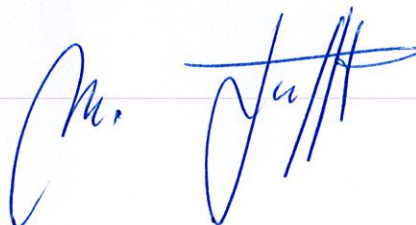
Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością nowoczesnej metodyki modelowania złożonych obiektów fizycznych, metod numerycznych i technik programowania. Uważam, że praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora szeregu zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych.

Praca została zrealizowana w ramach grantu POIG.01.01.02-00-113/09 pt. „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”, finansowanego ze środków Unii Europejskiej.

Stwierdzam, iż przedstawiona rozprawa pt. "Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych" autorstwa Pana mgr inż. Łukasza KNYPIŃKIEGO stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego i spełnia wszystkie 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 oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 3 października 2014 roku.

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



Opole 30.04.2016 r.

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

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Łukasza KNYPIŃKIEGO

**pt. "Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-
obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych"**
wykonanej pod kierunkiem Prof. dr hab. inż. L. Nowaka.

Wniosek dodatkowy

Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny rozprawy (zastosowane zaawansowane metody modelowania i symulacji komputerowej), nowoczesność podjętej tematyki, bardzo ciekawe wyniki badań, precyzyjnie sformułowane wnioski końcowe oraz wzorową stronę graficzną pracy, uważam recenzowaną pracę za wyróżniającą. Zgłaszam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej pt. "*Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych*" autorstwa Pana mgr inż. **Łukasza KNYPIŃKIEGO**.

Dodatkowym argumentem jest wyjątkowy dorobek naukowy Doktoranta w liczbie 48 artykułów (6 zostało opublikowanych w czasopismach z listy Filadelfijskiego Instytutu Informacji Naukowej, 18 kolejnych prac w czasopismach, a kilkanaście prezentowano na uznanych konferencjach międzynarodowych). Uzyskał również trzy znaczące wyróżnienia za działalność naukową

Moim zdaniem, praca doktorska mgr inż. **Łukasza KNYPIŃKIEGO** mogłaby zostać zgłoszona do Nagrody Premiera R.P. bądź Promocyjnej Nagrody Siemens z dużymi szansami na sukces.

Moim zdaniem, praca mogłaby zostać z powodzeniem opublikowana w formie monografii.