

Opole, 22.04.2024 r.

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

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 14.05.2024
nr zał.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr. inż. Piotra Dukalskiego

**pt. " System rozwiązań konstrukcyjnych do projektowania silników
elektrycznych o zwiększonej gęstości mocy dla zastosowań
w elektromobilności "**

wykonanej pod kierunkiem dra hab. inż. Romana Kroka, prof. PŚ (Politechnika Śląska)

Opiekun pomocniczy: prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka, Sieć Badawcza Łukasiewicz -
Górnos Śląski Instytut Technologiczny

*Niniejszą recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechnik Śląskiej
z dnia 11 marca 2024 r.*

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Praca doktorska „System rozwiązań konstrukcyjnych do projektowania silników elektrycznych o zwiększonej gęstości mocy dla zastosowań w elektromobilności”, dotyczy aktualnej i rozwijanej w ostatnich latach dziedziny wspomaganej komputerowo projektowania, optymalizacji konstrukcji i sterowania przetworników elektromechanicznych. Proces projektowania i produkcji maszyn elektrycznych o cylindrycznej strukturze obwodu elektromagnetycznego został bardzo dobrze rozpoznany przez naukowców i konstruktorów w ciągu ostatnich dziesięcioleci. Silniki elektryczne zabudowane w kolach stanowią grupę mniej zbadaną, ze względu na ukształtowanie obwodu elektromagnetycznego i zagadnienia cieplne. Tego rodzaju sytuacje mają miejsce szczególnie często, gdy ograniczony wymiar osiowy maszyny stanowi jeden z głównych kryteriów doboru jednostki napędowej lub w wybranych napędach bezprzekładniowych.

Z uwagi na swoje zalety – proste uzwojenie i znaczny moment w stosunku do objętości – silniki synchroniczne z magnesami trwałymi mogą znaleźć zastosowanie nie tylko w specjalizowanych napędach elektrycznych, ale także szeroko rozpowszechnionym w literaturze napędzie kół pojazdów samochodowych. Dotyczy to zarówno pojazdów wolnobieżnych, takich jak wózki golfowe, wózki inwalidzkie i niewielkie skutery, jak

również napędów do samochodów osobowych. Olbrzymią zaletą tych silników w porównaniu z innymi silnikami elektrycznymi jest prosta konstrukcja wirnika i związana z nią pewność działania.

Większość publikacji naukowych dotyczących tematyki silników elektrycznych zabudowanych w kołach, jakie można spotkać w literaturze światowej, jest przede wszystkim skupiona na silnikach z magnesami trwałymi, w tym głównie magnesami neodymowymi

W elektrodynamice technicznej za kompleksowe można uważać rozwiązanie, które obejmuje adekwatność geometryczną i fizyczną między modelem i badanym obiektem we wszystkich detalach, takich 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, elektromagnetycznych, dynamicznych i cieplnych.

Od ponad 30 lat w analizie urządzeń elektrycznych stosuje się metody komputerowe do rozwiązywania równań pola elektromagnetycznego, w tym metodę elementów skończonych. W ostatnich latach na podstawie tej metody opracowano szereg algorytmów do analizy polowej ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień analizy i syntezy urządzeń elektrotechnicznych.

Autor rozprawy stara się uwzględnić te problemy. Tematyka rozprawy jest zatem ukierunkowana na problemy projektowania, wyznaczania parametrów elektromagnetycznych a w szczególności aspektów termicznych pracy silników zabudowanych w kołach pojazdu, zdecydowanie mniej rozpoznanych w literaturze przedmiotu.

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL od kilkunastu lat realizuje w sposób ciągły badania z tej obszernej i ciekawej problematyki.

Dlatego też wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr. inż. **Piotra Dukalskiego** uważam za trafny i aktualny zarówno z punktu widzenia rozwiązania problemu naukowego, jakim jest analiza i projektowanie konstrukcji silników elektrycznych zabudowanych w kołach pojazdu, jak też ze względu na charakter aplikacyjny związany z napędami elektrycznymi.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska znajduje się w głównym nurcie współczesnej analizy i projektowania urządzeń elektrotechnicznych za pomocą technik należących do tzw. elektromagnetyzmu obliczeniowego. Reasumując stwierdzam, że praca badawcza mgr. inż. **Piotra Dukalskiego** w zakresie stosowania metod polowych, w obliczeniach pól sprzężonych (elektromagnetycznego i termicznego), w strukturach obiektów fizycznych, doprowadziła do powstania - użytecznego i skutecznego narzędzia analizy i projektowania. Zaproponowane autorskie modele obliczeniowe silników elektrycznych do

zabudowy w kołach pojazdów, pozwalają na sprawne i skuteczne projektowanie oraz analizę wpływu zmian konstrukcyjnych na parametry eksploatacyjne tego rodzaju silników.

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. **Piotr Dukalski** jest wynikiem systematycznych studiów nad zagadnieniem analizy, modelowania i projektowania konstrukcji silników elektrycznych zabudowanych w kołach pojazdów.

Przedmiotem pracy jest opracowanie metody analizy systemów rozwiązań konstrukcyjnych silnika o zwiększonej gęstości mocy przeznaczonego do zabudowy w piaście koła pojazdu oraz wykonanie prototypów silników i szeregu badań, które pozwolą na uzyskanie zbieżnych wyników obliczeń z wynikami badań na rzeczywistym modelu fizycznych silnika.

Zbudowane modele fizyczne silników synchronicznych z zewnętrznym wirnikiem są efektem pracy.

Autor formułuje cele pracy na str. 22, które sprowadzają się do opracowania stanowiska badawczego, opracowanie sprzężonych modeli obliczeniowych (elektromagnetycznych i cieplno-przepływowych) silników w środowisku ANSYS Motor CAD, wdrożenia nowych rozwiązań technologicznych i materiałowych, wykonanie modeli fizycznych silników oraz badań porównawczych i weryfikacji. Tak postawione cele pracy uważam za w pełni poprawne i uzasadnione.

Autor wyszczególnia jedną tezę naukową rozprawy (str.21) i 2 zadania badawcze związane z jej udowodnieniem. 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 szesnastu rozdziałów podstawowych, wykazu ważniejszych oznaczeń, spisu literatury oraz wykazu patentów i prac własnych Doktoranta. Recenzowaną rozprawę

zaliczam do grupy prac technologiczno-projektowych. Stanowi ona istotny wkład w rozwój technik analizy, projektowania, optymalizacji konstrukcji i technologii wykonania silników synchronicznych z magnesami trwałymi o zwiększonej gęstości mocy, przeznaczonych do zabudowy w piaście koła pojazdu. Nie ulega wątpliwości, że Doktorant osiągnął bardzo wysoki stopień opanowania teorii i techniki obliczeń pól sprzężonych elektromagnetycznych i ciepłno-przepływowych oraz technik pomiarowych i sterowania.

Praca jest skonstruowana poprawnie. We wprowadzeniu Autor przedstawił historię napędów pojazdów elektrycznych z silnikami zabudowanymi w kołach. Opisał główne zalety zastosowania tego typu silników w napędzie samochodu oraz krytycznie omówił stan wiedzy dotyczący metod projektowania i zastosowań silników (rozdziały 1-2). Wyraźnie sformułowane cele oraz precyzyjnie postawioną tezę zamieszczono w rozdziale 3.

W kolejnych rozdziałach 4 i 5 opisano stanowisko badawcze oraz założenia konstrukcyjne silnika do zabudowy w piaście koła pojazdu. Główne problemy związane z aspektami termicznymi pracy silnika i propozycje ich rozwiązania łącznie z opracowanymi modelami termicznymi maszyny zawierają rozdziały 6 i 7.

W rozdziałach 8 i 9, Autor omówił szczegółowo sprzężony model elektromagnetyczny i ciepłno-przepływowy przygotowany w środowisku programu ANSYS Motor CAD, skalibrowany pomiarami wykonanymi na zbudowanych prototypach silnika. Analizowano szereg rozwiązań konstrukcyjnych maszyny, badając stany ciepłe i parametry elektromechaniczne.

Rozdziały 10 i 11 są poświęcone analizie badań symulacyjnych silnika przy odwzorowaniu rzeczywistych warunków pracy występujących w samochodzie na podstawie dobranych cykli jezdnych. Dokonano oceny skuteczności proponowanych rozwiązań, technologii wykonania silników prototypowych oraz wpływu parametrów zasilania silnika na jego temperaturę pracy w cyklach jazdy samochodu. Celem badań Autora było opracowanie silnika o lepszych parametrach elektromechanicznych i zwiększonej gęstości mocy do zastosowania w napędzie hybrydowym samochodu dostawczego.

Kolejne rozdziały (12,13,14 i 15) zawierają autorskie propozycje szeregu rozwiązań konstrukcyjnych mających na celu zmniejszenie masy silnika oraz poprawę jego parametrów cieplnych. Należą do nich: zmiany długości rdzenia magnetycznego, zwiększenie liczby par biegunów magnetycznych, zastosowanie specjalnych materiałów pozwalających na zmniejszenie rezystancji cieplnej pomiędzy uzwojeniem a układem chłodzenia oraz nowe rozwiązania konstrukcyjne układu chłodzenia. Główne problemy związane są jednak z aspektami termicznymi pracy silnika oraz wymaganiami wynikającymi z dynamiki jazdy

samochodu. Uwzględnić należy również ograniczenia gabarytowe silnika podyktowane wymiarami felgi, konieczność bezkolizyjnego zamontowania układu hamulcowego i elementów zawieszenia samochodu oraz ograniczenie masy silnika w celu ograniczenia masy nieresorowanej. Silniki powinny też pracować jako prądnice zapewniające hamowanie rekuperacyjne, a układ napędowy samochodu elektrycznego musi spełniać wymagania drogowe związane z pokonywaniem przeszkód oraz dynamiką jazdy.

W rozdziale 16 Autor zaprezentował podsumowanie i zakres dalszych prac.

Oceniając pracę chcę podkreślić, że została ona wykonana na bardzo dobrym poziomie i jest wartościowa z punktu widzenia pogłębienia wiedzy na temat modelowania i projektowania silników elektrycznych synchronicznych z zewnętrznym wirnikiem zabudowanych w kołach pojazdów. Wnosi ona także oryginalny wkład naukowy i potwierdza wysokie kwalifikacje Autora rozprawy.

Do oryginalnych osiągnięć w pracy doktorskiej można zaliczyć:

1. Autorskie opracowanie metodyki analizy i środowiska komputerowego, które może być uniwersalnym narzędziem do analizy stanów pracy, wspomagania procesu projektowania oraz optymalizacji silników elektrycznych zabudowanych w kołach pojazdów.
2. opracowanie modeli komputerowych silników elektrycznych synchronicznych zabudowanych w kołach pojazdów, w programie ANSYS Motor CAD;
3. opracowanie i wdrożenie rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych wspomagających odbiór ciepła z uzwojenia stojana;
4. analiza efektywności i dokładności modeli symulacyjnych w szczególności stanów cieplnych maszyny;
5. opracowanie, zaprojektowanie i wykonanie prototypów silników elektrycznych zabudowanych w kołach pojazdów;
6. przeprowadzenie analizy pracy silnika z uwzględnieniem cykli jazdy z grupy Artemis;
7. analiza wpływu zmian konstrukcyjnych obwodu elektromagnetycznego i zmian technologicznych oraz parametrów zasilania silnika na jego charakterystyki eksploatacyjne;
8. wykonanie stanowiska pomiarowego i badań eksperymentalnych.

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

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

1. Dokonując przeglądu literatury, nie wspomina Pan o pracach prof. E. Mendreli, związanych z silnikami tarczowymi BLDC montowanymi w piastę koła;
2. Co Autor sądzi o zastosowaniu tarczowych silników elektrycznych z magnesami trwałymi do napędu pojazdów?
3. Na str. 23, Autor napisał o silniku przyjętym do badań, jako model podstawowy - SMzs200S3. Czy Autor brał udział w projektowaniu tej maszyny?
4. Ograniczenia proponowanych w pracy algorytmów;
5. Obliczenia wykonano dla 3-fazowych silników elektrycznych synchronicznych z zewnętrznym wirnikiem. Czy to oprogramowanie można zastosować do innych struktur silników (np. tarczowych)?
6. Czy Autor widzi możliwość uwzględnienia skosu żłobków (magnesów) w opracowanym oprogramowaniu, chociaż Autor stwierdza, że ze względów technologicznych nie wykonuje się skosu?
7. W przypadku zwiększenia liczby par biegunów występuje ułamkowa liczba żłobków na biegun i fazę. Obok korzyści (zmniejszenie momentu zaczepowego, masy silnika, krótsze czola uzwojeń) wydaje się, że wzrośnie hałas? Proszę o komentarz;
8. Niewątpliwie, osiągnięciem Autora jest również opracowanie modelu silników elektrycznych zabudowanych w kołach pojazdów (program ANSYS Motor CAD), który umożliwia uwzględnienie zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych oraz wykonanie prototypów. Czy zdaniem Autora istnieje możliwość optymalizacji konstrukcji takich maszyn? Czy Autor mógłby przedstawić na podstawie literatury możliwości optymalizacji kształtu obwodu magnetycznego z punktu widzenia maksymalizacji wartości średniej momentu silnika i sprawności za pomocą algorytmów deterministycznych lub ewolucyjnych? Jakie postaci przyjąłby funkcje celu?
9. 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 stroną graficzną pracy.

W pracy znalazłem niewiele błędów edytorskich (np. str.: 4, 31, 113, 115) oraz dotyczących stylu (np. str.: 41, 51, 68, 76, 110, 127, 152, 160, 133), które nie wpływają na

ostateczną pozytywną ocenę pracy. Spis literatury zawiera jednak wiele błędów interpunkcyjnych.

Należy też zwrócić uwagę na pewne niedociągnięcia:

- str.13, nie „tą”, a „tę organizację”;
- str. 19 i 31, „...zaletą takich silników jest stosunkowo duży moment obrotowy ze względu na dużą średnicę szczeliny powietrznej.” – niezrozumiałe stwierdzenie;
- str. 55, nie „przy pomocy”, a „za pomocą”;

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 oraz technik pomiarów i sterowania. Uważam, że praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora szeregu zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych.

Doktorant od kilku lat pracuje w INiME KOMEL na stanowisku specjalisty badawczo-technicznego. Przedstawione zagadnienia, w znacznej mierze są efektem prac zrealizowanych przez Autora w Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL w ramach projektów badawczych. Na uwagę zasługuje dorobek naukowy Doktoranta w liczbie 14 artykułów i 8 patentów

Stwierdzam, iż recenzowana rozprawa pt.: *"System rozwiązań konstrukcyjnych do projektowania silników elektrycznych o zwiększonej gęstości mocy dla zastosowań w elektromobilności"* autorstwa Pana mgr. inż. **Piotra Dukalskiego** 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.) i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. **Piotra Dukalskiego** do dalszych etapów przewodu

doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika technologie kosmiczne.