

Opole 16.06.2021 r.

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

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr. inż. Szymona Lipińskiego

**pt. "Analiza stanów cieplnych w silnikach synchronicznych z rozruchem
bezpośrednim wzbudzanych magnesami trwałymi"**

wykonanej pod kierunkiem dra hab. inż. Jana Zawilaka prof. PWi.

*Niniejszą recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka,
Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej
z dnia 19 kwietnia 2021 r.*

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Recenzowana praca dotyczy aktualnej i intensywnie rozwijanej w ostatnich latach dziedziny wspomaganego komputerowo projektowania i optymalizacji konstrukcji przetworników elektromechanicznych.

Od ponad 30 lat w analizie przetworników elektromechanicznych stosuje się metody komputerowe rozwiązywania równań pola elektromagnetycznego i pola cieplnego, w tym metodę elementów skończonych. W ostatnich latach na podstawie tej metody opracowano szereg algorytmów do polowo-obwodowej i cieplnej analizy maszyn elektrycznych. Obliczenia cieplne są ważnym etapem w projektowaniu maszyn elektrycznych. Współczesny sprzęt komputerowy i oprogramowanie umożliwia przeprowadzenie analizy zjawisk cieplnych, w którym z powodzeniem stosuje się modele polowe. Nie oznacza to, że metody modelowania matematycznego i badań zjawisk cieplnych w maszynach elektrycznych zostały opanowane w stopniu wystarczającym. W ostatnich latach pojawiła się na ten temat znaczna liczba publikacji naukowych, co wskazuje na pewien deficyt w tym zakresie. Dotyczy to zwłaszcza maszyn synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi, które są konstruowane w dużej rozpiętości typoszeregów i prędkości obrotowych. Modele matematyczne przeznaczone do analizy cieplnych stanów pracy maszyn elektrycznych są bardzo złożone. Jest to związane z trudnymi do opisanie matematycz-

nego stratami mocy, warunkami granicznymi i brzegowymi jak również ze złożonością maszyny elektrycznej wirującej jako układu termodynamicznego.

Z tego powodu należy uznać, że tematyka dotycząca analizy stanów cieplnych w maszynach synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi dobrze wpisuje się w aktualne trendy rozwojowe w metodach komputerowego projektowania maszyn elektrycznych i może stanowić temat rozprawy naukowej w obszarze nauk inżynierijsko-technicznych i dyscyplinie naukowej: Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.

Ośrodek Wrocławski (Zespół prof. J. Zawilaka) jest jednym z nielicznych w kraju, który 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. Twierdzę, że praca badawcza mgr inż. **Szymona Lipińskiego** doprowadziła do powstania użytecznego i skutecznego narzędzia analizy zjawisk cieplnych w silnikach synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi i bezpośrednim rozruchem. Tematykę rozprawy uważam za aktualną i nowoczesną. Szerokie spektrum problemów, które pojawiły się w trakcie realizacji badań, jak również aktualność tematyki z technicznego punktu widzenia gwarantują, że badania mogą być kontynuowane w przyszłości.

2. Cel i teza naukowa rozprawy

Praca Pana mgr inż. **Szymona Lipińskiego** jest wynikiem systematycznych studiów nad zagadnieniem analizy stanów cieplnych silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi i bezpośrednim rozruchem (LSPMSM).

Przedmiotem pracy jest konstrukcja polowo-obwodowych modeli silników synchronicznych, opracowanie modelu cieplnego opartego na obliczeniowej mechanice płynów, wykonanie obliczeń porównawczych silników synchronicznych z jednoczesnym wykorzystaniem dostępnego oprogramowania oraz weryfikacja pomiarowa na modelu fizycznym.

Autor formułuje cele pracy (str.7), które sprowadzają się do opracowania modeli matematycznych i obliczeniowej analizy stanów cieplnych i ich weryfikacji na przykładzie silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o podwyższonej sprawności, uruchomionego przez bezpośrednie włączenie do sieci.

Autor sprecyzował jedną tezę naukową rozprawy (str. 7). Zagadnienie naukowe, jakie Autor postawił do rozwiązania, zostało określone logicznie i precyzyjnie. Prezentowane

wyniki symulacji komputerowych oraz wyniki pomiarów na modelu fizycznym, mające na celu udowodnienie postawionej tezy, przedstawiono w sposób czytelny i przejrzysty.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona rozprawa zawiera 98 stron, składa się z 6 rozdziałów podstawowych, spisu literatury podstawowej (90 pozycji i 14 prac własnych Doktoranta) oraz wykazu ważniejszych oznaczeń. Recenzowaną rozprawę zaliczam do grupy prac metodologicznych i projektowych, związanych z rozwojem metod analizy pól sprzężonych (elektromagnetycznego i cieplnego) w złożonych strukturach elektromagnetycznych. Stanowi ona istotny wkład w rozwój analizy stanów cieplnych silników synchronicznych.

Praca jest skonstruowana poprawnie. Zawiera wprowadzenie wraz z przeglądem literatury, poprawnie postawioną tezę oraz jednoznacznie sformułowany cel pracy (rozdział 1).

W rozdziale 2 przedstawiono metody modelowania takich maszyn (LSPMSM), równania pola elektromagnetycznego oparte na metodzie elementów skończonych oraz metodzie objętości skończonych dla zagadnień ciepłno-wentylacyjnych.

Rozdział 3 i następane stanowią wkład własny Doktoranta.

W rozdziale 3 omówiono stanowisko pomiarowe oraz zastosowaną aparaturę pomiarową do wyznaczania parametrów elektromechanicznych badanej maszyny. Przedstawiono metody pomiaru temperatury poszczególnych części maszyny oraz prędkości przepływu powietrza.

W rozdziale 4 opisano szczegółowo wykonane symulacje numeryczne, wykorzystane solwery, definicje własności materiałowych i warunków brzegowych. Zakres analiz obejmował obliczenia wentylacyjne oraz sprzężone ciepłno-elektromagnetyczne. Rozpatrywano różne stany pracy, w szczególności pracę ustaloną przy stałym obciążeniu, przy zasilaniu znamionowym i przy zasilaniu napięciem odkształconym oraz rozruchy. Oprócz wykonania symulacji rozkładu temperatur w stanie ustalonym, wyznaczono również krzywe nagrzewania się silnika w czasie normalnej pracy jak i w czasie rozruchu.

Rozdział 5 i 6 zawierają uzyskane wyniki pomiarów zestawione z wynikami obliczeń wykazujące zbieżność i dowodzące poprawności wykonanych obliczeń i symulacji. Ponadto przedstawiono podsumowanie badań i wnioski końcowe.

Wyniki zawarte w rozdziale 4, 5 i 6 uważam za najważniejsze osiągnięcie Autora. Na uwagę zasługuje wykonanie układu pomiarowego i z powodzeniem przeprowadzona weryfikacja pomiarowa.

Oceniając pracę chcę podkreślić, że została ona wykonana na wysokim poziomie i jest wartościowa z punktu widzenia pogłębienia wiedzy na temat analizy i modelowania

zjawisk cieplnych w silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi. Wnosi ona także oryginalny wkład naukowy i potwierdza wysokie kwalifikacje Autora rozprawy. Analiza numeryczna została wykonana z wykorzystaniem istniejących, dostępnych na rynku, pakietów ANSYS Maxwell, ICEM CFD i Fluent. Rozwiązanie zagadnienia wymagało wiedzy dotyczącej numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych oraz przygotowania analizy w oparciu o analizowane zjawisko, w szczególności definicji warunków brzegowych oraz przygotowania siatki obliczeniowej. Zakres rozpatrywanych zagadnień obejmował elektrotechnikę, transport ciepła oraz mechanikę płynów.

Brak też poważniejszych błędów i uchybień, które należałoby wymienić. Wydaje się jednak, że Autor mógł szerzej napisać o konstrukcji modeli matematycznych obejmujących zjawiska elektromagnetyczne i cieplne oraz napisać więcej o wykonanych badaniach. Komentarze Autora są zbyt skromne.

Do oryginalnych osiągnięć w pracy doktorskiej można zaliczyć:

1. Wykonanie obszernej analizy literatury fachowej dotyczącej analizy cieplnej silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM);
2. Konstrukcję modelu LSPMSM obejmującą zjawiska elektromagnetyczne i cieplne, a w szczególności przedstawienie równań różniczkowych cząstkowych zaimplementowanych w wykorzystywanym oprogramowaniu;
3. Sprzęgnięcie elektromagnetycznego modelu polowo-obwodowego z modelem cieplnym zrealizowane poprzez zdefiniowanie wszystkich własności materiałów jako zależnych od temperatury oraz źródeł ciepła jako zależnych od obliczonych strat;
4. Wykonanie sprzężonych obliczeń elektromagnetycznych i cieplnych w stanach ustalonych i nieustalonych;
5. Wykonanie obliczeń dotyczących analizy stanu ustalonego przy stałym obciążeniu dla zasilania znamionowego oraz przy zasilaniu napięciem odkształconym. Wyznaczenie krzywych nagrzewania przy stałym obciążeniu oraz obliczenia przyrostu temperatury podczas rozruchu;
6. Weryfikację modelu i obliczeń na przygotowanym stanowisku pomiarowym;
7. Badanie możliwości uszkodzeń termicznych oraz opracowanie sposobów minimalizacji ryzyka zagrożeń;
8. Wykazanie, że zaproponowane postępowanie (model polowy + model cieplny) jest skutecznym narzędziem do uzyskania założonego celu.

Uzyskując dobrą zbieżność pomiarów i obliczeń potwierdzono, że dwuwymiarowy model polowo-obwodowy silnika poprawnie odwzorowuje zachowanie się maszyny i pozwala z dużą dokładnością wyznaczyć występujące w maszynie straty niezbędne do definicji modelu cieplnego. Podobnie wykazano dobrą zbieżność dla modelu cieplnego zarówno dwu- jak i trójwymiarowego. Autor rozprawy przeprowadził wnikliwą i poprawną analizę rezultatów obszernych badań symulacyjnych. Wykazał się przy tym dobrym zrozumie-

niem przebiegu złożonych zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych w różnych stanach pracy maszyny.

Osiągnięciem Autora jest również zaadoptowanie profesjonalnego oprogramowania do symulacji dla specyficznych wymogów związanych z analizowanym zagadnieniem. Otrzymane wyniki i zaprezentowany model okazuje się perspektywiczny i może być wykorzystany jako podstawa bardziej złożonych analiz, np. takich jak analiza ryzyka trwałego odmagnesowania magnesów trwałych. Innym możliwym zastosowaniem jest analiza wydajności chłodzenia wentylatorem na wale przy różnych prędkościach obrotowych w przypadku zasilania silnika z falownika.

Jednak do wad pracy doktorskiej zaliczyłbym:

- Niepełny wykaz ważniejszych oznaczeń, co utrudnia czytanie pracy;
- Wyjaśnienia wymaga zastosowana metoda homogenizacji uzwojeń (str. 55 i 84);
- Jakiego było uzwojenie silnika jedno- czy dwuwarstwowe (str. 40 i 59);
- Brak legendy na rys. 4.5, str.44;
- Brak powołania się na rys. 4.19, 4.20 i rys. 5.3;
- Dlaczego moment bezwładności oznaczono przez I (rys. 4.40 - 4.42).

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

- Autor bardzo skrótowo potraktował problemy związane z modelem, dyskretyzacją i odwzorowaniem ruchu w metodzie elementów skończonych. Prosiłbym o omówienie tych problemów w trakcie obrony;
- Niewątpliwie, osiągnięciem Autora jest opracowanie uściślonego modelu cieplnego silnika, który umożliwia uwzględnienie zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych w maszynie. Jednak zdefiniowanie wszystkich własności materiałów jako zależnych od temperatury oraz źródeł ciepła jako zależnych od obliczonych strat zostało potraktowane bardzo skrótowo;
- Autor miał bardzo duże możliwości zastosowania Swojego modelu do tego typu maszyn dużych mocy (synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi i bezpośrednim rozruchu), które były zaprojektowane, wykonane i wdrożone do eksploatacji. Maszyna o mocy znamionowej 1600 kW i prędkości obrotowej 1500 obr/min była przedmiotem zainteresowań Doktoranta w ramach wcześniejszych prac. Szkoda, że Autor nie zweryfikował Swojego modelu na maszynie dużej mocy. Co Autor sądzi o skuteczności modelu cieplnego maszyny w tym przypadku ?

- Co Autor sądzi o możliwości optymalizacji kształtu obwodu magnetycznego i elektrycznego z punktu widzenia wytrzymałości termicznej ?
- Porównanie kosztów budowy silników asynchronicznych oraz synchronicznych z magnesami trwałymi i bezpośrednim rozruchem? Uzasadnienie zastosowania silników synchronicznych z magnesami trwałymi.
- Perspektywy dalszych badań cieplnych związanych z maszynami synchronicznymi wzbudzanymi magnesami trwałymi?

4. Uwagi szczegółowe

Podkreślam staranność Autora w poprawnym zapisywaniu wzorów matematycznych oraz bardzo staranną stroną graficzną pracy. W pracy występują drobne błędy edytorskie i redakcyjne, które nie wpływają na końcową pozytywną ocenę pracy. Przytaczam niektóre z nich:

- uwagi edytorskie - strona: 19, 24, 25, 29, 30, 31, 66, 72, 73;
- uwagi dotyczące stylu - strony: 10, 11, 21, 22, 23, 24, 26, 47, 48, 49, 66, 84, 86.

5. Konkluzja

Stwierdzam, że rozprawa jest opracowana starannie. Układ pracy jest logiczny, a strona graficzna wzorowa. Wnioski w poszczególnych rozdziałach oraz wnioski końcowe są poprawne i interesujące.

Przedstawione uwagi ogólne i szczegółowe nie obniżają mojej bardzo pozytywnej oceny pracy.

Wyniki uzyskane w rozprawie potwierdzają, że teza pracy została udowodniona, a założone cele pracy osiągnięte.

Doktorant wykazał się dobrą znajomością najnowszej literatury w obranej dziedzinie wiedzy, podchodzi do niej krytycznie, a ponadto potrafi twórczo rozwijać osiągnięcia innych autorów.

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

Mgr **Szymon Lipiński** jest autorem 14 publikacji zamieszczonych między innymi w Przeglądzie Elektrotechnicznym (2) oraz materiałach konferencji międzynarodowych (2): Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych- SME, Maszyny Elektryczne -Zeszyty Problemowe (5).

Stwierdzam, że rozprawa pt. „**Analiza stanów cieplnych w silnikach synchronicznych z rozruchem bezpośrednim wzbudzanych magnesami trwałym**” autorstwa Pana mgr inż. **Szymona Lipińskiego** 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, 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).

W związku z tym wnioskuję o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora Pana mgr inż. **Szymona Lipińskiego** do publicznej obrony pracy.



prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn