

Prof. dr hab. Inż. Grzegorz Kamiński
Politechnika Warszawska
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Zakład Napędu Elektrycznego

Warszawa, 17.04.2024 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia 15.05.2024

nr zał.

Recenzja
Rozprawy Doktorskiej
**System rozwiązań konstrukcyjnych do projektowania
silników elektrycznych o zwiększonej gęstości mocy dla
zastosowań w elektromobilności**

Autor: **mgr. inż. Piotr Dukalski**

I. Wybór tematu

Rozwój różnego rodzaju urządzeń stacjonarnych oraz pojazdów transportowych wymusza poszukiwanie nowych układów napędowych. Często są to znane od dawna konstrukcje silników elektrycznych, jednak z powodu skomplikowanej na owe czasy technologii lub braku odpowiednich układów sterowania jak również samej lokalizacji w układzie napędowym silnika (dla przykładu koło samochodowe) były i są stosowane szczególnie w pojazdach jednośladowych. Ponadto rozwój nowych konstrukcji pojazdów w elektromobilności skłania do opracowania odpowiednich silników napędowych spełniających specjalne wymagania w zależności od miejsca lokalizacji w pojazdach, warunków drogowych i sposobów samej jazdy.

Doktorant wybrał konstrukcje silnika umieszczoną w piastach kół, gdzie masa silnika stanowi nieresorowaną część pojazdu. Konstrukcja silnika jest ograniczona wymiarami felgi oraz sposobem umieszczenia układu hamulcowego i elementów zawieszenia.

II. Cel pracy - zakres, teza i metodyka badań

Układ napędowy samochodu elektrycznego, w którym zastosowane mają być silniki umieszczone w piaście wymagają bardzo szerokiego rozpatrzenia

poszczególnych problemów. Należą do nich: wyznaczenie masy nieresorowanej, wymiarów geometrycznych (dotyczy stojana oraz wirnika), jak również sposobu umieszczenia układu hamulcowego, przewodów zasilających silnik, przewodów medium chłodzącego oraz elementów zawieszenia.

W czasie realizacji pracy doktorskiej autor postawił tezę:

Teza niniejszej pracy brzmi następująco:

„Opracowana metoda analizy systemów rozwiązań konstrukcyjnych silnika do zabudowy w piaście koła, wykorzystująca: - analizę wyników badań laboratoryjnych silnika z odpowiednio rozmieszczonymi czujnikami temperatury - sprzężony model elektromagnetyczny i cieplno-przepływowy, skalibrowany pomiarami wykonanymi na zbudowanych prototypach, umożliwiający przeprowadzenie badań silnika przy odwzorowaniu rzeczywistych warunków pracy występujących w samochodzie pozwoli na tworzenie nowych rozwiązań konstrukcyjnych poprawiających parametry elektromechaniczne i cieplne silnika. Metoda umożliwi przeprowadzenie analizy systemu rozwiązań konstrukcyjnych mających na celu redukcję masy silnika, zmniejszenie jego temperatury pracy oraz rozszerzenie zakresu pracy silnika”.

III. Metodyka badań

W celu udowodnienia tezy autor opracował metodykę badań, która obejmuje opracowanie następujących zagadnień:

- . Opracowanie i wykonanie silnika modelowego przeznaczonego do badań laboratoryjnych oraz obliczeń symulacyjnych, zbudowanie modeli fizycznych podstawowych węzłów konstrukcyjnych silnika dla oceny technologii produkcji.
- . Wprowadzenie czujników w silniku modelowym dla identyfikacji rozkładu: pól magnetycznych, lokalnych stref zjawisk termicznych (nagrzewania wynikającego ze strat), a ponadto przeprowadzenie analizy układu chłodzenia.

- . Przeprowadzenie badań laboratoryjnych silnika modelowego oraz modeli podstawowych węzłów konstrukcyjnych maszyny.
- . Opracowanie sprzężonych modeli obliczeniowych silników w tym: modeli obwodów elektromagnetycznych oraz cieplnoprzepływowych z wykorzystaniem najnowszych metod numerycznych.
- . Kalibrację modeli teoretycznych z wykorzystaniem wyników badań laboratoryjnych.
- . Wykonanie obliczeń silników przy: zastosowaniu różnych żywic izolacyjnych, radiatorów umieszczonych na czołach uzwojenia, zastosowaniu izolacji termicznych pomiędzy uzwojeniem stojana i układem chłodzenia. Ponadto zmianę liczby par biegunów, modyfikację wymiarów magnesów trwałych.
- . Przeprowadzenie badań symulacyjnych w stanach ustalonych.
- . Wykonanie i badania laboratoryjne silnika prototypowego z uwzględnieniem wniosków z badań symulacyjnych.
- . Finalnie opracowanie analizy ekonomicznej przeprowadzonych badań.

IV. Stanowisko badawcze

Głównymi rozdziałami tej pracy są rozdziały: 8, 9, 10.

W rozdziałach tych są analizowane zjawiska elektromagnetyczne oraz cieplne wybranego modelu silnika umieszczonego w feldze koła pojazdu.

W rozdziale 8 został opracowany model obliczeniowy silnika z zastosowaniem programu ANSYS Motor CAD. Model obliczeniowy składa się z trzech modułów: elektromagnetycznego, cieplnego oraz badań laboratoryjnych. W rozdziale tym zostały wyspecyfikowane straty mocy maszyny.

W rozdziale 9 przeprowadzono obliczenia symulacyjne silników z wybranymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi silników.

W rozdziale 10 przeprowadzono badania symulacyjne silnika dla różnych cykli jazdy samochodu – analiza zjawisk mechanicznych.

V. Wartość merytoryczna pracy

W tym miejscu należy stwierdzić, że recenzowana praca jest typowym opracowaniem projektowym, konstrukcyjnym i technologicznym niekonwencjonalnej maszyny. W doktoracie wykazano umiejętność prowadzenia pracy naukowej i można stwierdzić, że praca ta stanowi przyczynek do badań nietypowych konstrukcji maszyn elektrycznych.

Identyfikacja problemu, sformułowanie celu, dobór i sposób wykorzystania narzędzi, własnych oraz opracowań ogólnie dostępnych jest zasadna i prawidłowa. Również trafność i spójność wniosków oraz krytyka uzyskanych wyników badań jest poprawna w odniesieniu do stanu wiedzy z równoczesnym określeniem kierunków dalszych prac.

Układ i redakcja pracy, staranność edytorska, poprawność językowa są dobre.

VI. Pytania i uwagi dyskusyjne

- . Analizując różne zjawiska w maszynie z magnesami trwałymi pojawia się szereg problemów takich jak: moment zaczepowy, wpływ temperatury na charakterystyki magnesów trwałych oraz koszt fabrykacji silnika. Co sądzi doktorant o innych rodzajach maszyn w tego rodzaju konstrukcjach np. o silnikach reluktancyjnych, silnikach indukcyjnych klatkowych?
- . Proszę kompleksowo porównać konstrukcję samochodu z silnikami w kołach z samochodem z silnikiem centralnym.
- . Doktorant podaje listę producentów pracujących nad silnikami w kole, jako ostatnią pozycję podaje Sieć Badawczą Łukasiewicz, Górnośląski Instytut Technologiczny. Autor pomija prace Instytutu Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej (jeden punkt [66]) oraz Instytutu Elektrotechniki w Międzylesiu.

W latach 2009 – 2016 w ramach grantu unijnego ECO-MOBILNOŚĆ jednym z tematów było opracowanie silnika napędowego dla niskopodłogowego pojazdu elektrycznego przeznaczonego dla przewozu osób niepełnosprawnych. Temat ten obejmował opracowanie konstrukcji i wykonanie modeli silników napędowych umieszczonych w kołach dla prototypowego pojazdu. Kierownikiem projektu był dr. inż. Jan Szczypior oraz pracownicy Zakładu Maszyn Elektrycznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej.

Zespół ten opracował, zaprojektował i wykonał modele silników z magnesami trwałymi, stanowisko pomiarowe oraz przeprowadził szereg analiz teoretycznych zjawisk występujących w tych maszynach.

Wyniki tych prac zostały opublikowane w następujących artykułach:

- a) Jan Szczypior, Rafał Jakubowski, Adam Biernat, Mateusz Rzeszowski Project, design and tests of in-wheel outer-rotor PMSM for electric car application - Part 1 Przegląd Elektrotechniczny 2017, NR 2/2017.
- b) Jan Szczypior, Rafał Jakubowski, Adam Biernat, Mateusz Rzeszowski Project, design and tests of in-wheel outer-rotor PMSM for electric car application - Part 2 Przegląd Elektrotechniczny 2017, NR 2/2017.
- c) Jan Szczypior, Rafał Jakubowski Thermal calculations and testing external rotor permanent magnet machine - Czasopismo Techniczne 2015, Elektrotechnika 1-E (8), rok 2015.
- d) Jan Szczypior, Rafał Jakubowski Obliczenia i badania cieplne maszyny z magnesami trwałymi i zewnętrznym wirnikiem - Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe 2014.
- e) Jan Szczypior, Rafał Jakubowski Konstrukcja maszyny do napędu samochodu elektrycznego o specjalnych wymaganiach - Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej 2012, Nr 66/2012, Tom 2.

f) Jan Szczypior, Rafał Jakubowski Układ chłodzenia i obliczenia ciepłne maszyny z magnesami trwałymi i zewnętrznym wirnikiem - Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej 2012, Nr 66/2012, Tom 2.

Ponadto należy zauważyć zespół w składzie: Konrad Dąbała, Jacek Dudziński, Andrzej Rudeński – Instytut Elektrotechniki w Międzyzlesiu, który również pracował nad tego typu silnikami. Prace te publikowane były także w zeszytach Komelowskich.

Ad. 4.2. Mało precyzyjny opis miejsc położenia czujników temperatury np. nie wiadomo który czujnik mierzył temperaturę rdzenia. Jak uzasadnić stwierdzenie, że „Ze względu na to, że silnik zasilany jest napięciem o wysokiej częstotliwości, wykonano dodatkowo pomiar temperatury magnesów trwałych umieszczonych w wirniku zewnętrznym”? Wysoka częstotliwość jest skutkiem przyjęcia dużej liczby biegunów. Jak to się ma do nagrzewania magnesów?

Na czym polegała nowatorskość rozwiązania układu pomiaru temperatury wirnika silnika?

Ad. str. 31. „charakteryzuje się także większym momentem bezwładności, co pozwala na zmniejszenie tętnień momentu obrotowego i zwiększa stabilność pracy”. Czy moment bezwładności wpływa na tętnienia momentu? Czy raczej na tętnienia prędkości przy określonych tętnieniach momentu?

Ad. str. 38. Autor stwierdza, że "Zaletą silikonów jest duży współczynnik rozszerzalności cieplnej, co jest korzystne z punktu widzenia łączenia materiałów o różnych parametrach fizycznych" - to wydaje się być dyskusyjne. Zatem zdaniem Autora jakie powinny być relacje między współczynnikami rozszerzalności cieplnej materiałów zastosowanych na obwód elektromagnetyczny silnika elementów konstrukcyjnych, blach, uzwojeń itd.

Ad. str. 74. Autor wymienia co obejmują straty mechaniczne, a nic nie wspomina o stratach mocy na uszczelniaczu pomiędzy wirnikiem a stojanem? Patrząc na przekrój prototypu uszczelniacz musi być na dużej średnicy, zastosowanie uszczelniacza wargowego o dużej średnicy przy dużych prędkościach liniowych daje dodatkowe straty mocy.

Ad 6.3. Niedokładna legenda na rys. 6.5 gdzie jest ta przekładka?

Proszę wytłumaczyć sens wprowadzenia przekładki ceramicznej między czołami i radiatorem. Przewodność cieplna korundu wynosi 27 a aluminium 168 dodatkowo może powstać między nimi szczelinka powietrzna. Czy nie lepiej zamiast stosowania przekładki ceramicznej maksymalnie zbliżyć radiator do czoła, przekładka jest tak samo sztywna jak radiator a ma gorszą przewodność od radiatora i unikamy problemów z korundem po co te informacje o korundzie. Jeżeli przekładka korundowa ma zmniejszyć straty w radiatorze spowodowane prądami indukowanymi od pola z połączeń czołowych to do zbadania tego potrzebny jest model elektromagnetyczny 3D a nie 2D. Ponadto czy jeżeli wprowadzano przekładkę ceramiczną to co było niezmiennikiem czy całkowita masa przekładki radiatora, czy po prostu dołożono przekładkę, jeżeli tak to czy nie lepszy jest grubszy radiator?

Czy rozważano wprowadzenia radiatora aktywnego chłodzonego cieczą?

Czy badano wpływ nagrzewania tarczy hamulcowej na wzrost temperatury?

Ad 9.2. Proszę wyjaśnić w jaki sposób z pomocą opracowanego modelu wyznaczono jeden punkt charakterystyki momentu od prędkości obrotowej przy ograniczeniach maksymalnych temperatur uzwojenia i magnesów, jak dochodzono do aktywności poszczególnych ograniczeń czyli maksymalnych temperatur uzwojenia i magnesów.

Proszę wyjaśnić jakie modyfikacje zrealizowane w wariancie krótszym silnika spowodowały nieaktywność ograniczenia temperatury magnesów i permanentną aktywność ograniczenia temperatury uzwojenia (elektrotechnicznych materiałów przewodowych), materiałów izolacyjnych itd. aby w warunkach dużych przyrostów temperatury oraz szybkich zmian temperatur układ ten zachowywał się poprawnie?

Ad 9.8. Opisana zmiana konstrukcyjna polegająca na skróceniu osiowej długości silnika i zmianie liczby zwojów jest przedstawiona bardzo niejasno. W jaki sposób zmniejszono masę obwodu elektromagnetycznego przy takim samym prądzie, przekroju drutu i momencie obrotowym? Proszę o porównanie parametrów konstrukcyjnych obydwu wariantów, z których wynikałoby zmniejszenie mas poszczególnych części silnika. Jeżeli skrócenie długości jest tak korzystne to dlaczego skrócono silnik tylko o 10 mm?

VII. Wnioski końcowe

Analizując całokształt wykonanej pracy należy podkreślić ogromną ilość zadań wykonanych w celu otrzymania bardzo ciekawych wnikliwych wniosków.

Dotyczą one problemów konstrukcyjnych związanych z opracowaniem podstawowych węzłów konstrukcyjnych modeli maszyn. Ponadto opracowanie zmian wybranych elementów konstrukcyjnych podlegających modernizacji w celu uzyskania odpowiednich zalet parametrów wyjściowych maszyny.

Uzyskanie interesujących wniosków tak z obliczeń symulacyjnych jak i badań pozwoliły zbudować finalną maszynę do badań.

Należy również zaznaczyć szeroki aspekt różnorodnych badań związanych z samą maszyną oraz jej zachowaniem się przy symulacji jazdy pojazdów modelowych.

O wartości pracy świadczą również opracowane wnioski patentowe oraz publikacje naukowe doktoranta.

Uzyskane interesujące wyniki badań były możliwe dzięki możliwości korzystania z zaplecza badawczego Górnośląskiego Instytutu Badawczego.

Można stwierdzić, że tego rodzaju opiniowana praca doktorska broni się sama przez to, że jest wykonana: szeroko rozumiana analiza teoretyczna konstrukcji maszyny elektrycznej, przeprowadzone badania symulacyjne oraz badania techniczne finalnie opracowanego modelu.

Doktorant przez wieloletnie badania zagadnień związanych z budową nowego rodzaju konstrukcji maszyny elektrycznej profesjonalnie buduje model w oparciu o poprzedzające obliczenia teoretyczne, badania symulacyjne oraz przeprowadza badania techniczne zaprojektowanej przez siebie maszyny uzyskując ciekawe wnioski oraz możliwość dalszych badań w tym temacie dla uzyskania najlepszych parametrów wyjściowych maszyny.

VIII. Podsumowanie

Należy zaznaczyć, że pytania i uwagi dyskusyjne nie umniejszają walorów merytorycznych tej pracy ponieważ jest to rozeznanie problemu, opracowanie własnej metody projektowania, opracowanie konstrukcji modelu, wykonanie badań i weryfikacja wyników obliczeń oraz wskazanie kierunków dalszych prac, a jedynie ubogacą dyskusję podczas publicznej obrony.

Reasumując Rozprawa Doktorska pt. „System rozwiązań konstrukcyjnych do projektowania silników elektrycznych o zwiększonej gęstości mocy dla zastosowań w elektromobilności. ”, autora mgr inż. Piotra Dukalskiego w dyscyplinie elektrotechnika **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 i technologie kosmiczne.

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński