

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Krykowski
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki
Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej
ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-101 Gliwice
tel. 32-237-10-43, 032-237-12-47
e-mail krzysztof.krykowski@polsl.pl

Gliwice, dnia 10 maja 2017r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Marcina Skóry
pod tytułem
„Analiza odpornego na uszkodzenia układu sterowania pojazdem z silnikami PM BLDC”

Recenzja została wykonana dla Politechniki Wrocławskiej
na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego z dnia 03.04.2017

I. Wprowadzenie

W ostatnich latach coraz większe znaczenie zaczęły odgrywać bezszczotkowe silniki prądu stałego wzbudzone magnesami trwałymi z komutatorem elektronicznym (silniki PM BLDC). Silniki te charakteryzują się stosunkowo prostą konstrukcją i dużą pewnością działania. W silnikach tych stosuje się wysokoenergetyczne magnesy trwałe, które są źródłem stałego strumienia wzbudzenia, niezależnego od zasilania silnika. Jednym z perspektywicznych zastosowań silników PM BLDC jest wykorzystanie ich do napędu pojazdów małej mocy. Tematyka dotycząca konstrukcji silnika PM BLDC jest obszernie rozpracowana w literaturze. Tematyka dotycząca sterowania, a zwłaszcza sterowania określonych obiektów napędzanych silnikiem PM BLDC jest natomiast słabiej rozpracowana. Jednym z ważniejszych zastosowań silników PM BLDC jest wykorzystanie ich do napędów pojazdów elektrycznych małej mocy.

Zapotrzebowanie na pojazdy z napędem elektrycznym jest bardzo duże i nieustannie rośnie. Ze względu na rosnące wymagania co do bezpieczeństwa, coraz większe wymagania stawia się układom sterowania. W pojeździe z napędem elektrycznym każdy z elementów w czasie normalnego użytkowania podlega pewnemu zużyciu. Oprócz tego mogą się pojawić stany awaryjne. Oprócz tego pewne grupy pojazdów podlegają szczególnej kontroli przed dopuszczeniem do ruchu. W tej sytuacji podjęto przez doktoranta tematykę sterowania odpornego silników PM BLDC zastosowanych do napędu pojazdów elektrycznych małej mocy należy uznać za aktualną i ważną, a proponowany temat za nowoczesny.

II. Zawartość pracy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje w sumie 212 stron, w tym spis treści i wykaz literatury. Do pracy dołączono załącznik, w którym przedstawiono układy napędowe wykorzystywane w badaniach laboratoryjnych. Wykaz literatury obejmuje łącznie 94 pozycje, w tym prace autorskie (2 pozycje), prace współautorskie (4 pozycje), dokumentacje techniczne i noty aplikacyjne (5 pozycji), normy (3 pozycje). Należy zwrócić uwagę, że większość cytowanych prac, to są prace wydane po roku 2010.

Treść pracy odpowiada zaproponowanemu tytułowi rozprawy. Rozważania teoretyczne zostały zweryfikowane badaniami symulacyjnymi na modelu komputerowym oraz badaniami laboratoryjnymi na modelu rzeczywistym. Całość materiału autor zgrupował w sześciu rozdziałach uzupełnionych o wykaz oznaczeń i wykaz literatury.

W rozdziale pierwszym znajduje się przegląd podstawowych problemów badawczych w napędzie elektrycznym z silnikiem PM BLDC oraz cel, zakres, teza naukowa rozprawy i charakterystyka przyjętej metody badań.

W rozdziale drugim zaprezentowano układ symulacyjny oraz wybrane wyniki badań. W rozdziale tym autor opisuje skrótowo zasadę działania silnika PM BLDC, zwracając uwagę na te właściwości, które są potrzebne przy budowie modelu komputerowego. Właściwości silnika opisywał przy tym analitycznie, korzystając z przebiegów czasowych oraz korzystając z hodografów wektora prądów fazowych. Wybrane właściwości silnika pracującego poprawnie były następnie porównywane z właściwościami silnika pracującego nieprawidłowo po wystąpieniu wybranych uszkodzeń.

W rozdziale trzecim scharakteryzowano opracowane stanowisko laboratoryjne, na którym zostały wykonane badania eksperymentalne. Przedstawiono szczegółowo wpływ uszkodzeń czujników położenia wirnika oraz tranzystorów komutatora elektronicznego na pracę napędu. W rozdziale trzecim autor wprowadził również analizę harmoniczną wybranych przebiegów.

Rozdział czwarty dotyczy zagadnień związanych ze sterowaniem odpornym. W rozdziale zaprezentowano metody detekcji i identyfikacji uszkodzeń tranzystorów komutatora elektronicznego i czujnika położenia wirnika. Następnie przedstawiono alternatywne metody wyznaczania położenia wirnika, przewidziane do wykorzystania po wykryciu uszkodzenia czujnika oraz sposoby sterowania możliwe do zastosowania po wykryciu uszkodzenia w stopniu mocy. Opisano również sposoby wyznaczania prędkości obrotowej na podstawie stanu czujników położenia wirnika, w tym także po wystąpieniu uszkodzenia jednego z nich. Przeprowadzone badania zostały zilustrowane badaniami symulacyjnymi oraz eksperymentalnymi, wykonanymi na przygotowanym stanowisku laboratoryjnym.

W rozdziale piątym omówiono zagadnienia związane z budową części mechanicznej, elektronicznej oraz oprogramowania laboratoryjnego prototypu pojazdu, na którym przeprowadzono testy przemieszczania się pojazdu oraz działania w warunkach wystąpienia uszkodzeń. Przedstawiono również badania symulacyjne pracy pojazdu poruszającego się według zadanej trajektorii.

W rozdziale szóstym zamieszczono podsumowanie i ogólne wnioski płynące z realizacji pracy.

W załączniku A zebrano informacje o wykorzystywanych w trakcie badań laboratoryjnych silnikach PM BLDC i zestawach napędowych.

III. Przedmiot, zakres, cel, teza i metoda pracy

Przedmiotem pracy był napęd elektryczny z silnikiem PM BLDC zastosowany w pojeździe małej mocy..

W bezszczotkowym silniku prądu stałego (silniku PM BLDC) komutator mechaniczny zostaje zastąpiony przekształtnikiem energoelektronicznym, zwanym komutatorem elektronicznym. Sterowanie komutatorem elektronicznym wymaga informacji o położeniu wirnika, by móc wyznaczyć uzwojenia, które powinny przewodzić prąd. Położenie wirnika można wyznaczać korzystając z dyskretnych czujników położenia lub z metod

Nad poprawnością pracy silnika i całego układu napędowego czuwa układ sterujący. Układ sterujący narzuca kolejność załączania tranzystorów oraz zapewnia właściwy moment i prędkość silnika. Oprócz tego układ sterujący jest odpowiedzialny za komunikację z układem nadrzędnym sterowania. Ważne jest również szybkie wykrycie stanów awaryjnych i podjęcie działań naprawczych.

Zakres rozprawy doktorskiej objął następujące zagadnienia:

- przegląd i analiza metod sterowania napędem elektrycznym z silnikiem PM BLDC.
- analiza uszkodzeń występujących w układach sterowania napędu elektrycznego z silnikiem PM BLDC,
- opracowanie modelu matematycznego układu z silnikiem PM BLDC umożliwiającego analizę pracy w warunkach uszkodzenia czujników położenia wirnika i tranzystorów komutatora elektronicznego,
- opracowanie metody identyfikacji wybranych uszkodzeń, opracowanie metody sterowania napędu z silnikiem PM BLDC w warunkach wystąpienia uszkodzeń,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych opracowanej metody sterowania w warunkach występowania uszkodzeń,
- opracowanie laboratoryjnego prototypu pojazdu umożliwiającego sprawdzenie metody sterowania odpornego na uszkodzenia,
- badania symulacyjne i eksperymentalne ruchu prototypowego pojazdu w warunkach występowania wybranych uszkodzeń.

Po przeglądzie podstawowych problemów badawczych w obszarze napędów pojazdów z silnikami PM BLDC autor rozprawy przyjął założenie, że docelowym obiektem badań jest dwusilnikowy czterośladowy pojazd z dwoma kołami i napędzanymi silnikami PM BLDC oraz dwoma kołami podporowymi – wleczonymi. Pojazd powinien być wyposażony w takie rozwiązanie układu sterowania, które zapewni niewrażliwość na wybrane uszkodzenia, szczególnie niebezpieczne dla ciągłości ruchu wózków inwalidzkich ewentualnie innych pojazdów małej mocy.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury i analizy stanu zagadnienia sformułowano następujący cel rozprawy doktorskiej:

Opracowanie metody sterowania pojazdem z napędem elektrycznym z silnikami PM BLDC zapewniającej pracę bezpieczną i odporną na wybrane uszkodzenia.

Dodatkowym celem rozprawy jest opracowanie prototypu pojazdu laboratoryjnego umożliwiającego sprawdzenie zaproponowanej metod sterowania odpornego na uszkodzenia.

Tezę pracy doktorskiej sformułowano natomiast następująco:

Zastosowanie metod detekcji, identyfikacji i kompensacji uszkodzeń wykorzystujących dostępne pomiary prądów fazowych i położenia wirnika silnika PM BLDC, umożliwi realizację odpornego na wybrane uszkodzenia układu napędowego pojazdu

Metoda badawcza zastosowana w pracy jest kompleksowa. Obejmuje analizę teoretyczną, symulacje komputerowe oraz weryfikację laboratoryjną.

IV. Ocena naukowej wartości pracy

Obiektem rozważań przedstawionych w rozprawie jest napęd pojazdu małej mocy z silnikami PM BLDC odporny na wybrane rodzaje zakłóceń.

Stosując typowe założenia upraszczające doktorant opracował modele matematyczne silnika przekształtnika i napędu.

Zamierzonym celem było opracowanie napędu odpornego, który będzie można zastosować w pojazdach elektrycznych małej mocy.

By ten cel osiągnąć doktorant przeprowadził analizę pracy układu, opracował metody identyfikacji zakłóceń oraz metodę kompensacji zakłóceń.

Opracowana przez doktoranta koncepcja sterowania stanowi istotne oryginalne osiągnięcie autora.

Kolejne oryginalne osiągnięcia autora to: opracowanie własnych modeli komputerowych, rozwinięcie i sprawdzenie metod sterowania znanych z literatury, opracowanie i realizacja oryginalnego prototypu napędu pojazdu małej mocy.

Przeprowadzona analiza i badania symulacyjne oraz laboratoryjne wykazały znaczną odporność układu napędowego na zmiany parametrów napędu.

Praktycznym efektem pracy jest prototypowy pojazd (wózek inwalidzki) odporny na zakłócenia pojawiające się w układach sterowania oraz na uszkodzenia tranzystorów.

V. Perspektywy aplikacji uzyskanych wyników

Przedstawiona metoda sterowania nadaje się do zastosowania w napędach pojazdów małej mocy, a zwłaszcza w wózkach inwalidzkich. Opracowany i wykonany pojazd nadaje się do wdrożenia przemysłowego.

VI. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W pracy nie stwierdzono błędów merytorycznych, a zaproponowane rozwiązanie należy uważać za oryginalne. Najważniejsze uwagi zestawiono poniżej w punktach.

1. Dlaczego przyjęto sterowanie tranzystorami górnymi? Na ogół korzystniej jest sterować tranzystorami dolnymi.
2. Na str. 22 pomyłono rysunki 2.4a oraz 2.4b.
3. Jak wyglądał model komputerowy napędu i silnika?
4. Jaką założono przeciążalność silnika?
5. Jako podstawową strukturę sterowania przyjęto kaskadowy układ regulacji. Jak autor się zapatruje na sterowanie momentem (siłą ciągu) tak jak to się stosuje w samochodach?

6. Takie metody jak analiza harmoniczných, korzystanie z wartości średnich lub skutecznych wymagają pewnego czasu obliczeń. Do identyfikacji jakich uszkodzeń autor mógłby je zalecić?
7. Jakie są wymagania odnośnie czasu obliczeń?
8. Jak doktorant widzie perspektywy dalszej pracy nad układem?
9. Układ pracy czytelny. Liczba usterek redakcyjnych i edycyjnych znikoma.

VII. Podsumowanie i wnioski końcowe

Najważniejsze uwagi stanowiące podstawę końcowej oceny pracy mgr inż. Marcina Skóry zestawiono poniżej w punktach.

1. W pracy sformułowano cel, zakres i tezę. Po zapoznaniu się z treścią pracy stwierdzam, że praca została wykonana w przewidzianym zakresie, jej cele zostały zrealizowane a teza udowodniona.
2. Tematykę pracy i zaproponowane rozwiązanie należy ocenić jako oryginalne, nowoczesne i w pełni aktualne na tle obecnego stanu wiedzy.
3. Cel naukowy pracy został zrealizowany. Autor opracował i przebadął nową metodę sterowania odpornego napędu z silnikami PM BLDC.
4. Autor rozprawy rozwiązał postawione zadanie naukowe od strony teoretycznej przebadał je za pomocą symulacji komputerowych oraz wykonał badania laboratoryjne potwierdzające słuszność zaproponowanych rozwiązań.
5. Autor wykazał się, znajomością tematu, umiejętnością korzystania z komputerowych metod obliczeniowych oraz umiejętnością pracy w nowoczesnym laboratorium naukowym.
6. Z treści pracy, jak również z przeprowadzonej przez autora recenzji analizy literatury dotyczącej opracowywanego tematu, wynika, że doktorant rozwiązał zagadnienie samodzielnie.
7. Z przedstawionej pracy i zamieszczonych w niej treści wynika, że autor posiada szeroką wiedzę z zakresu energoelektroniki i napędu elektrycznego oraz potrafi samodzielnie prowadzić prace naukowe. Uważam również, że autor wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie dyscypliny „Elektrotechnika”
8. Za najważniejsze oryginalne osiągnięcie własne doktoranta należy uznać opracowanie nowego rodzaju układu sterowania odpornego na dwa typy uszkodzeń (uszkodzenia w obwodzie sterowania oraz uszkodzenia tranzystorów).
9. Oryginalnym osiągnięciem doktoranta jest również opracowanie metody odpornej na zakłócenia na oba kierunki prędkości.
10. Wysoko należy również ocenić badania symulacyjne wykonane przez doktoranta.
11. Przebieg i wyniki badań laboratoryjnych wykazały, że doktorant potrafi pracować w nowoczesnym laboratorium naukowym.
12. Przedstawione w pracy wyniki stanowią dobry punkt wyjścia do ewentualnego wdrożenia.
13. Merytorycznie praca została napisana poprawnie. Uwagi krytyczne i dyskusyjne przedstawiono w części VI-tej niniejszej recenzji.

Treść recenzji w tym również przedstawione powyżej uwagi upoważniają autora recenzji do sformułowania wniosku:

Uważam, że przedstawiona praca doktorska mgr inż. Marcina Skóry jest oryginalna i w pełni spełnia wymagania merytoryczne ustawy o stopniach i tytułach naukowych stawiane pracom doktorskim. Uważam również, że nadaje się do przedstawienia do publicznej obrony i wnioskuję o dopuszczenie do obrony.

Wyniki naukowe pracy oceniam bardzo wysoko. Wysoko oceniam również walory użytkowe pracy i oryginalny prototypowy model napędu elektrycznego. Uważam, że praca prezentuje poziom znacznie wyższy od wymaganego zazwyczaj od pracy doktorskiej. W zaistniałej sytuacji wnoszę o **wyróżnienie** rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Marcina Skóry.

Oliczka, 10 maja 2017 K. Kucharski