

Dr hab. inż. Piotr Bogusz, prof. uczelni
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Zakład Elektrodynamiki i Systemów Elektromaszynowych
ul. W. Pola 2
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 19.08.2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Daniela Rataja pt. „Analiza wpływu parametrów układu zasilania typu C-Dump na właściwości napędów z przełączalnymi silnikami reluktancyjnymi”

Promotor pracy: dr hab. inż. Krzysztof Tomczewski, prof. uczelni,

Promotor pomocniczy pracy: dr inż. Krzysztof Wróbel

1. Podstawa formalna

Podstawą formalną wykonania recenzji było pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej dr. hab. inż. Andrzeja Waindoka, prof. uczelni z dnia 27.06.2024 r. o sygnaturze RE00ST0009/D/2024.

2. Tematyka rozprawy

Silniki reluktancyjne przełączalne (ang. Switched Reluctance Motors – SRM) należą do grupy maszyn elektrycznych bezszczotkowych, a do ich zasilania wymagany jest układ elektroniczny mocy oraz system detekcji położenia wirnika. Maszyny tego typu nie są tak popularne jak silniki indukcyjne, BLDC czy PMSM ze względu na wady do których należą duże tętnienia momentu, duże tętnienia prądu pobieranego ze źródła zasilania jak również głośna praca. Nie mniej jednak ze względu na prostą konstrukcję obwodu magnetycznego maszyny SRM (brak uzwojeń i magnesów trwałych na wirniku), a tym samym wysoką

odporność na uszkodzenia, czy też możliwość pracy przy częściowych uszkodzeniach maszyny lub układu zasilania znajdują one zastosowanie w urządzeniach wymagających wysokiej niezawodności. Silniki SRM w odróżnieniu od innych typów maszyn mogą być zasilane poprzez różne konfiguracje układów energoelektronicznych. W literaturze można znaleźć ponad 20 topologii takich układów zasilania nadających maszynie SRM różne właściwości eksploatacyjne. Jedną z grup układów zasilających maszyny SRM są te, w których wykorzystywany jest dodatkowy kondensator przejmujący energię z uzwojenia wyłączanego pasma silnika. Układy tego typu oznaczane są skrótem C-Dump.

Recenzowana praca dotyczy analizy wpływu parametrów układu zasilania typu C-Dump na właściwości napędów z przełączalnymi silnikami reluktancyjnymi. Autor pracy zajął się tematyką układów zasilania i ich sterowania z naciskiem na sterownik C-Dump zasilający trójfazowy silnik SRM. Zśród dość szerokiej gamy układów typu C-Dump przeznaczonych dla silników SRM do badań został wybrany układ, który opracowano w Politechnice Opolskiej. Układy typu C-Dump charakteryzują się zwykle mniejszą liczbą elementów mocy (choć nie zawsze, czego przykładem jest badany układ) i zasilaniem silnika napięciem wyższym niż napięcie źródła zasilania, choć są bardziej skomplikowane w sterowaniu. Badania właściwości silnika SRM zasilanego z układu C-Dump zostały porównane z wynikami badań tego samego silnika zasilanego z klasycznego układu półmostkowego typu H. W ramach realizowanej rozprawy Autor opracował uniwersalny układ zasilania SRM umożliwiający konfigurację zarówno topologii C-Dump jak i klasycznego półmostka typu H. System zasilania SRM został sprzęgnięty z modułem FPGA za pomocą którego sterowano układami mocy. Ponadto w ramach realizowanych prac został zaprojektowany system równoległego pomiaru prądów i napięć.

W mojej opinii podjęta w ocenianej pracy tematyka badań związana z zasilaniem silnika SRM z układu C-Dump jest istotna, gdyż pozwala na określenie właściwości napędu w odniesieniu do zasilania z układu klasycznego. Realizacja celu i tezy pracy, wymagała od Doktoranta umiejętności opracowania odpowiednich algorytmów sterujących tym układem, zaprojektowania, wykonania i zaprogramowania układu sterowania oraz uruchomienia i przebadania napędu.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

Recenzowana praca Pana mgr. inż. Daniela Rataja zawiera ogółem 124 strony (w tym streszczenia w j. polskim i angielskim oraz dodatek) w których zawarto 79 rysunków, 11 tabel

i 2 listingi programów. Bibliografia zawiera 109 pozycji przy czym około 84% z nich jest opublikowanych po 2017 roku co świadczy o aktualności tematyki, której rozprawa dotyczy. Oceniana praca składa się z ośmiu rozdziałów, bibliografii oraz dodatku. W pierwszym rozdziale zostały zamieszczone podstawowe informacje wprowadzające do tematyki pracy oraz cel i teza pracy. Celem pracy sformułowanym przez Doktoranta było określenie wpływu zastosowania opracowanego na Politechnice Opolskiej układu zasilania C-Dump oraz doboru jego parametrów i parametrów sterowania na charakterystyki wyjściowe napędu z trójfazowym przełączalnym silnikiem reluktancyjnym. Z kolei postawiona teza pracy brzmiała: „Możliwe jest uzyskanie wzrostu mocy napędu z trójfazowym przełączalnym silnikiem reluktancyjnym i rozszerzenie zakresu prędkości obrotowej silnika dla pracy ze stałym momentem, poprzez zastosowanie układu zasilania typu C-Dump dla silnika trójfazowego zasilanego z prostownika sieciowego przy niewielkim obniżeniu sprawności w zakresie prędkości uzyskanych przy zastosowaniu typowego układu zasilania złożonego z asymetrycznych półmostków tranzystorowych”. W drugim rozdziale zamieszczono bardzo ogólny przegląd podstawowych informacji na temat przełączalnych silników reluktancyjnych i ich sterowania. Trzeci rozdział zawiera przegląd wybranych topologii układów zasilania przełączalnych silników reluktancyjnych z uwzględnieniem tych, z których silnik był zasilany w ramach realizacji niniejszej pracy. W rozdziale 4 zamieszczono modele matematyczne przełączalnego silnika reluktancyjnego oraz badanego układu C-Dump dla różnych stanów jego pracy. Piąty rozdział opisuje model symulacyjny przełączalnego silnika reluktancyjnego oparty na charakterystykach statycznych prądowo-strumieniowo-kątowych oraz momentowo-prądowo-kątowych. Ponadto w rozdziale tym zamieszczono opis i strukturę blokową systemu zasilania oraz sterowania silnika zasilanego z układu C-Dump. Model symulacyjny napędu SRM został zrealizowany w systemie Matlab/Simulink. W rozdziale szóstym przedstawiono opis stanowiska badawczego. Z mojego punktu widzenia jest to najistotniejszy rozdział w pracy, w którym Doktorant opisał zaprojektowane, wykonane i uruchomione przez siebie elementy sterownika SRM o strukturze uniwersalnej umożliwiającej sterowanie układami zasilania o różnej topologii. Sterownik został zbudowany modułowo, co umożliwiło sterowanie układów zasilania SRM o różnej topologii (w przypadku tej pracy układ klasyczny z półmostkami typu H oraz C-Dump dla silników dwu i trójfazowych). Do sterowania tymi modułami wykorzystano układ FPGA, który daje duże możliwości realizacji szybkich algorytmów sterowania, ale jest bardziej wymagający szczególnie w realizacji obsługi układów peryferyjnych. Ciekawym i bardzo przydatnym rozwiązaniem przedstawionym w pracy jest pomiar wielkości analogowych (prądów i napięcia), który wykorzystuje możliwości

równoległej obsługi zadań przez układ FPGA. Zwykle w mikrokontrolerach, w których wbudowane są przetworniki analogowo-cyfrowe obsługa jest multipleksowana. Do programowania układu FPGA i realizacji algorytmu sterowania układem zasilania SRM, detekcji położenia wirnika oraz obsługi pomiaru wielkości analogowych Doktorant użył języka VHDL. Dodatkową funkcjonalnością, która została opracowana przez Doktoranta, to możliwość komunikacji układu sterowania z komputerem z możliwością wizualizacji i zapisywania danych (szkoda tylko, że nie zostało to udokumentowane w pracy, np. pokazując okno wizualizacji). Najbardziej obszernym rozdziałem pracy jest rozdział siódmy zawierający wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych przełączalnego silnika reluktancyjnego zasilanego z klasycznego układu półmostkowego oraz opracowanego w Politechnice Opolskiej układu C-Dump. Autor dokonał szeregu symulacji i pomiarów, a następnie porównał otrzymane wyniki uwzględniając procentowe odchyłki wyników pomiarów i symulacji. Badania wykonano dla różnych momentów obciążenia silnika oraz zmieniano kąt wyłączenia przy stałym przedziale zasilania. Z badań jednoznacznie wynika, że silnik podłączony do układu C-Dump przy zasilaniu z tego samego źródła w odniesieniu do zasilania silnika z klasycznego układu półmostkowego typu H może osiągnąć większą prędkość i większą moc. Ten wniosek jest logiczny, gdyż w przypadku zastosowania układu C-Dump napięcie zasilania uzwojeń silnika jest sumą napięć źródła i kondensatora.

Za oryginalne osiągnięcia Autora prezentowane w ocenianej pracy zaliczam:

- **zbudowanie uniwersalnego modułowego układu umożliwiającego konfigurację różnych topologii układów zasilających silniki SRM,**
- **realizację algorytmów sterowania układów: klasycznego półmostka typu H i układu C-Dump dla trójfazowego przełączalnego silnika reluktancyjnego w module FPGA za pomocą języku VHDL,**
- **opracowanie systemu równoległego pomiaru prądów i napięć w oparciu o moduły pomiarowe obsługiwane przez układ FPGA,**
- **zbudowanie stanowiska do badań laboratoryjnych,**
- **opracowanie modeli symulacyjnych dla silnika trójfazowego SRM zasilanych z układów: klasycznego i C-Dump,**
- **wykonanie badań symulacyjnych i pomiarów,**
- **analizę otrzymanych wyników i opracowanie wniosków.**

Osiągnięcia te świadczą o umiejętności Doktoranta w zakresie definiowania i rozwiązywania zagadnienia naukowego i samodzielnego prowadzenia prac badawczych. Zdaniem recenzenta praca jest kompletna i nie wymaga poprawek, mimo wyszczególnionych w kolejnym punkcie recenzji uwag, pytań dyskusyjnych i błędów edytorskich.

4. Uwagi, pytania dyskusyjne i błędy edytorskie

4.1. Uwagi i pytania dyskusyjne

- 1) Czy wykresy sprawności zamieszczone na rysunkach 7.4.8, 7.4.12, 7.4.16 i 7.4.21 dotyczą sprawności napędu czy układu zasilania?
- 2) Czy zastosowanie modelu symulacyjnego silnika SRM, w którym nie uwzględniono strat w żelazie do badań sprawności napędu w szerokim zakresie może wprowadzać duże błędy w odniesieniu do sprawności wyznaczonej pomiarowo?
- 3) W pracy jest brak schematu ideowego badanych układów, na których zaznaczone zostałyby np. prezentowane na oscylogramach wielkości. Takie rozwiązanie rozwiałoby wątpliwości jakie wielkości zostały tak naprawdę zmierzone. Z tą uwagą wiąże się kolejna.
- 4) W mojej ocenie na rysunkach 7.1.4 i 7.1.5 napięcie na oscylogramach oznaczone jako U_{f1} nie jest napięciem pasmowym, gdyż to napięcie powinno być w przedziale zasilania dodatnie, a w przedziale opadania prądu ujemne (a jest około zera). Czy zaszła tu pomyłka?
- 5) Niewątpliwą zaletą zasilania silnika SRM z układu C-Dump jest wzrost mocy i prędkości w odniesieniu do zasilania tego silnika z układu klasycznego przy tym samym napięciu źródła zasilania. A jak zachowuje się silnik zasilany z układu C-Dump w przypadku małych prędkości wirnika? Czy są jakieś ograniczenia?
- 6) Układ C-Dump generuje na uzwojeniu silnika wyższe napięcie niż napięcie źródła zasilania. Powoduje to szybsze narastanie, czy opadanie prądu niż w przypadku zasilania silnika z klasycznego półmostka typu H. Czy podczas badań zauważono różnicę w generowanym przez silnik hałasie przy zasilaniu z jednego i drugiego układu?
- 7) Czy badany układ C-Dump korzystniej jest zastosować do zasilania silnika SRM o większej czy o mniejszej liczbie pasm? Czy może nie ma to znaczenia?

4.2. Błędy edytorskie

Rysunki:

- str. 33, Rys.5.1.2 – na osi strumienia jest oznaczenie „Y”, a powinno być „Ψ”.
- str. 36, Rys.5.1.5 – słaba jakość rysunku.
- str. 43, Rys.6.1.6 – według przyjętej w pracy zasady numeracji rysunków powinno być „Rys.6.2.1”, co w konsekwencji powinno zwiększyć o 1 numerację rysunków od 6.2.1 do 6.2.7.

Błędy stylistyczne:

-Str. 57, wiersz 10 (licząc od dołu strony), jest: : „Różnica pomiędzy wynikami uzyskanymi przy obciążeniach 2,5 Nm i 2 Nm wynosi około 50 W i jest ona w stosunku do pozostałych zmian wartości momentu obrotowego T_m ”, a powinno być: „Różnica pomiędzy wynikami uzyskanymi przy obciążeniach 2,5 Nm i 2 Nm wynosi około 50 W i jest ona ... *(nie wiem do końca co autor miał na myśli?)* w stosunku do pozostałych zmian wartości momentu obrotowego T_m ”

- str. 72, akapit 2, Zdanie: „W kolejnym zestawieniu porównano wartości prądu ...”, a powinno być „ W kolejnym zestawieniu porównano wartości prądu ...”.

5. Wniosek końcowy

Recenzowaną rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Cel pracy został osiągnięty, a teza pracy w drodze serii badań symulacyjnych i laboratoryjnych została udowodniona. Podsumowując mogę stwierdzić, że Doktorant w pełni opanował techniki projektowania, wykonywania i uruchamiania układów elektronicznych oraz programowania układów FPGA. Opanował narzędzie do symulacji, przeprowadził cykl badań i analizy uzyskanych wyników. Wskazane w recenzji uwagi czy pytania mają charakter dyskusyjny i w żadnym stopniu nie umniejszają wartości przedstawionej do oceny dysertacji, a jedynie są wskaźnikiem skłaniającym do głębszej dyskusji wybranych aspektów poruszonych w pracy.

Tematyka pracy jednoznacznie wpisuje się w zakres dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa mgr. inż. Daniela Rataja pt. „Analiza wpływu parametrów układu zasilania typu C-Dump na właściwości napędów z przelączalnymi silnikami reluktancyjnymi” spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



dr hab. inż. Piotr Bogusz, prof. uczelni