

Prof. dr hab. inż. Wojciech Jarzyna
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81 5384339; e-mail: w.jarzyna@pollub.pl

Lublin, 12.08.2024 r.

RECENZJA

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

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka,
Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej
z dnia 20 czerwca 2024 r.

1. Ocena problematyki rozprawy

Przełączalne silniki reluktancyjne SRM są alternatywą dla napędów elektrycznych, od których oczekuje się dużej niezawodności nawet kosztem pogorszenia sprawności i dokładności działania. Znajdują one zastosowania m.in. w bardzo odpowiedzialnych napędach elektrowni jądrowych, takich jak wentylatory, wysokoobrotowe pompy odśrodkowe, sprężarki oraz w sprzęcie AGD. Wykazują się długą żywotnością, dłuższą nawet od napędów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi. Negatywną ich cechą są fluktuacje momentu elektromagnetycznego i z tego względu są one polecane zwłaszcza do napędów szybkoobrotowych przekraczających 4000obr/min.

Za zasilanie pasm tych silników odpowiedzialne są stosunkowo proste przekształtniki energoelektroniczne, które umożliwiają niezależne sterowanie każdym z uzwojeń. Typowo, sterując skalarnie, pasma silnika SRM zasilane są z obwodu prądu stałego, a wartość napięcia określona jest przez głębokość modulacji PWM tranzystorów przekształtnika. Napięcie na zaciskach pasma jest więc limitowane jego wartością w obwodzie prądu stałego. Wpływa to na ograniczenie osiągnięć silnika takich jak maksymalny moment obrotowy oraz możliwości pracy w obszarze podwyższonej częstotliwości zasilania pasm.

Istnieje szereg sposobów podwyższenia napięcia zasilania, a wśród nich to przetwornice DC/DC typu boost. Tego typu układy powodują jednak zwiększenie złożoności a w związku z tym zmniejszenie niezawodności. Ciekawą alternatywę dedykowaną przełączalnym silnikom reluktancyjnym są układy C-Dump, opracowane przez zespół naukowców Politechniki Opolskiej. Umożliwiają one zasilanie pasm niemal dwukrotnie wyższym napięciem dzięki sekwencyjnej rekonfiguracji, wskutek której napięcie zasilania wzrasta o wartość napięcia kondensatora C-Dump. Pomysł ten jest interesujący i godny uwagi,

a wpływ takiego sposobu zasilania na własności użytkowe silnika jest tematem rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Daniela Rataja.

2. Ocena układu rozprawy, zastosowanego piśmiennictwa, celu i hipotezy badawczej

Układ rozprawy jest zgodny z typową organizacją prac naukowych i zawarty jest w ośmiu rozdziałach wraz z nienumerowanym wykazem bibliografii. Pierwszym rozdziałem jest wstęp, w którym scharakteryzowano cel, tezę i zakres pracy. W rozdziale tym znajduje się również jedenastowersowy podrozdział 1.1. zatytułowany „Aktualny stan wiedzy”, który jednak nie przedstawia tego czego spodziewać się można po tytule. Nie ma w nim żadnego powołania na literaturę i stanowi on raczej motywację podjęcia tematu. Po tej krótkiej części Doktorant przedstawił precyzyjnie i jasno sformułowane elementy rozprawy takie jak: cel, tezę i zakres pracy.

Przegląd literatury znajduje się w rozdziałach drugim i trzecim. Poruszone są w nich zagadnienia dotyczące budowy silników SRM oraz układów przekształtnikowych dedykowanych do tych silników. W rozdziale tym Doktorant płynnie wprowadza topologię tytułowego przekształtnika C-Dump.

Model matematyczny przekształtnika oparty o równania obwodowe i równanie ruchu przedstawiony jest w rozdziale czwartym. Dla każdej z sekwencji zasilania Doktorant określa aktywny obwód i zapisuje jego równania uwzględniając konfiguracje: ¹⁾ zasilania pasm z samego źródła napięcia, ²⁾ zasilania pasm z szeregowo połączonego źródła napięcia i kondensatora C-Dump, ³⁾ ładowania kondensatora z wykorzystaniem energii zmagazynowanej w paśmie silnika oraz ⁴⁾ pracy w pętli jałowej, podczas której końce uzwojenia pasma są zwarte poprzez tranzystor i diodę zwrotną. Jednak w dalszej części pracy brak jest jakichkolwiek informacji na temat sposobu wykorzystania tego modelu. Mimo, że kolejny rozdział zatytułowany jest „badania symulacyjne”, to nie ma w nim nawiązania do modelu matematycznego. Przedstawiony na rys. 5.1.1 model symulacyjny stworzony został bowiem (str.32) „z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) przy użyciu programu FEMM”. Poza tą informacją Autor nie zamieścił żadnego opisu matematycznego. Nawet jeżeli skorzystał z biblioteki Matlab i wcześniej opracowanego modelu, należało się na niego powołać. W tej części pracy pojawia się też informacja, że badania dotyczą silnika „EMS-71 o mocy 750 W”, jednak w tekście rozprawy nie znaleziono przedstawienia szczegółowych parametrów tego silnika, poza mocą i prędkością znamionową. Jednymi z wyników tej symulacji są trójwymiarowe wykresy momentu i prądu w funkcji położenia wirnika. Kolejny model symulacyjny (rys.5.1.4) przedstawia układ sterowania z blokowo przedstawionym przekształtnikiem, komutatorem elektronicznym i członami przetwarzania. Niestety, brak jest jasnego wyjaśnienia tego schematu, w którym można by znaleźć informacje co kryje się pod maskami przedstawionych bloków oraz jak zdefiniowane są ich wejścia i wyjścia.

Stanowisko laboratoryjne (rys. 6.1.1) opisane jest w rozdziale szóstym, w którym przedstawiona jest struktura blokowa wraz z układem sterowania (rys. 6.1.6) opartym na bezpośrednio programowalnym układzie FPGA, współpracującym z laboratoryjnymi

modułami komunikacji, modułami pomiarów oraz blokiem sterowania silnikiem, zawierającym generator PWM, regulator prędkości i komutator logiczny realizujący sterowanie pasmami silnika. Jak zaprojektowano i wykonano te podzespoły, przedstawiają rysunki 6.1.2–6.1.5 oraz 6.2.2–6.2.7.

Kluczowy dla realizacji celów i przedstawienia dowodu hipotezy naukowej jest rozdział siódmy, który przedstawia badania porównawcze przekształtnika energoelektronicznego typu C-Dump w odniesieniu do układu klasycznego opartego na asymetrycznych półmostkach tranzystorowych H. Badania te zrealizowano w oparciu o modele symulacyjne w ustalonych cyklach pracy oraz badania eksperymentalne na stanowisku laboratoryjnym. Obejmowały one wyznaczenie charakterystyk prędkości obrotowej, mocy mechanicznej, wartości średniej napięcia, prądu źródła zasilania oraz sprawności, wykonanych w funkcji kąta wyłączającego zasilanie pasm, jak również oscylogramy napięcia i prądu (rys. 7.1.1–7.1.11).

Podobne oscylogramy zarejestrowano dla układu z kondensatorem C-Dump podwyższającym napięcie pasma. Doktorant przedstawił trzy serie przebiegów zrealizowane dla różnych nastaw układu sterowania, różniące się synchronizacją tranzystora pasma względem procesu rozładowania kondensatora oraz wartością histerezy minimalnego i maksymalnego napięcia C-Dump (rozd. 7.2). Zarejestrowane przebiegi (rys.7.2.1÷7.2.3) znacząco różnią się między sobą, tym niemniej Doktorant podsumowując wyniki stwierdził, że „Przeprowadzone próby potwierdzają prawidłowe działanie układu oraz ustawienia sterownika”. Doktorant nie wskazał jednak, czym powinno się charakteryzować poprawne działanie układu i które przebiegi/nastawy, zdaniem Doktoranta, gwarantują najlepsze wykorzystanie potencjalnych możliwości układu z kondensatorem C-Dump.

Kolejne badania porównawcze (rozd. 7.3) poświęcone są badaniu wpływu napięcia ładowania kondensatora C-Dump i jego pojemności na uzyskiwane osiągi. Liczne charakterystyki mogą być przydatne, ale nie zawsze zostały skomentowane w sposób wyjaśniający zjawisko, a nie tylko efekt zilustrowany na charakterystykach. Niemniej jednak, obserwowany na charakterystykach 7.3.1–7.3.5 wzrost mocy i momentu na wale wraz ze wzrostem napięcia zasilania potwierdza spodziewane pozytywne efekty zastosowania kondensatora C-Dump.

Końcowe badania symulacyjne (rys. 7.4.1–7.4.24) miały na celu porównanie klasycznego układu zasilania z układem typu C-Dump. W każdym z obliczanych warunków pracy, dla tych samych wartości kątów wyłączania, zaobserwowano około dwukrotny wzrost momentu, pobieranej mocy i prądu skutecznego pasma. Pytanie budzi jednak fakt, dlaczego doktorant wykonał, jak pisze na str. 81, „28 000 przypadków obliczeniowych”, zamiast skupić się na ograniczonej liczbie wyselekcjonowanych warunków zasilania, które następnie sprawdziłby na układzie laboratoryjnym. Trudne do oceny są również charakterystyki, w których zastosowano słabo zdefiniowaną selekcję wyników, określoną jako filtr Pm.

Część merytoryczną pracy kończą wnioski (rozd.8), które w pierwszym akapicie zawierają opinię Doktoranta, że przedstawione wyniki badań potwierdzają przyjętą we wstępie tezę naukową rozprawy. W dalszej części tego rozdziału Doktorant zrelacjonował zakres

swoich badań i uzyskanych wyników, a w końcowej części wymienił najważniejsze efekty. Niestety, w tej części, jak i w całej rozprawie, zabrakło wskazania, co Autor uważa za swoje oryginalne dzieło. Doktorant powinien wiedzieć, że stopień doktora uzyskuje się za efekty pracy naukowej, a nie za trud włożony w realizację badań. Tym bardziej, że zgodnie z ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, od rozprawy wymaga się, aby jej przedmiotem było oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a więc doktorant powinien tę oryginalność wskazać

3. Ocena zastosowanych metod badawczych

Metody badawcze to ta cecha prac naukowych, która łączy nawet najbardziej odległe dyscypliny. Dla każdego naukowca z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych zrozumiałe są więc takie metody badawcze jak:

- a) Studia literaturowe wraz z interpretacją i analizą źródeł oraz formułowanie wniosków, które wyznaczają decyzje o zakresie i przedmiocie badań, hipotezy naukowej oraz celu badań;
- b) Badania modelowe i symulacyjne;
- c) Badania projektowe i uruchomieniowe układu eksperymentalnego;
- d) Planowanie i przeprowadzenie badań eksperymentalnych;
- e) Analiza, interpretacja i dyskusja osiągniętych rezultatów oraz formułowanie wniosków w zakresie spełnienia oraz osiągnięcia celów naukowych.

Wymienione metody badawcze zostały zastosowane przez Doktoranta w następujących rozdziałach

Ad.a) Studiów literaturowym poświęcone są rozdziały drugi i trzeci. Doktorant określa w nich stan wiedzy w zakresie przełączalnych silnikach reluktancyjnych SRM, przekształtnikach energoelektronicznych dedykowanych do tych silników oraz o układach sterowania. Źródła literaturowe, na które Doktorant powołuje się wymienione zostały w bibliografii zawierającej 109 pozycji, z których większość to artykuły w czasopismach naukowych opublikowane w ostatnich kilku latach.

Ad.b) Na badania modelowe składają się opisy matematyczne, schematy i programy symulacyjne. Elementy te znajdują się w rozdziałach czwartym i piątym, w których są schematy i odpowiadające im równania oraz schematy modeli symulacyjnych i listingi wybranych procedur. Te ostatnie elementy zdecydowanie zyskałyby na czytelności, gdyby Doktorant opracował realizację sterowania wybranych procedur za pomocą algorytmów, które pozwalają poznać logikę działań realizowaną w schematach blokowych programów symulacyjnych.

Umiejętność posługiwania się tą metodą badawczą jest kluczowa dla realizacji badań naukowych. Pomimo uwag Doktorant w stopniu wystarczającym udowodnił umiejętność posługiwania się tą metodą.

Ad.c) Doktorant zmodernizował wcześniej działający układ, dostosowując go zarówno pod względem sprzętowym, jak i programowym do wymaganych zmian. Uruchomienie i przetestowanie układu potwierdzają umiejętność stosowania tej metody badawczej.

Badania eksperymentalne w zakresie obliczeń symulacyjnych przeprowadzono na bardzo dużej liczbie danych wejściowych. Uzupełniono je badaniami laboratoryjnymi na obiekcie rzeczywistym, które posłużyły do uwiarygodnienia wyników obliczeń symulacyjnych. Mimo pewnych uwag wyrażonych w poprzedniej części recenzji, Doktorant dowiódł umiejętności korzystania z metod badań eksperymentalnych.

Ad.d) Bardzo obszerny zbiór wyników wymagał analizy i interpretacji. W pierwszym rzędzie Doktorant przedstawił ich interpretacje graficzne. Starał się opisać uzyskane wyniki, oceniając uzyskane charakterystyki. Szereg dostrzeżonych przez Doktoranta cech wymaga jednak głębszej analizy i szczegółowej interpretacji zjawisk. W pracy naukowej, poza dostrzeżeniem cech, powinna być podjęta próba interpretacji zjawisk oraz określenia ich przyczyn. Takie interpretacje powinny towarzyszyć np. dostrzeżonym zjawiskom oscylacji momentu, które Autor nazwał pracą niestabilną silnika (rozdz. 7). Ponadto można było również podjąć próbę interpretacji modelowej źródeł wzrostu momentu elektromagnetycznego w układzie C-Dump itp.

Podsumowując, zastosowane metody badawcze są zgodne z ogólnie przyjętymi wymaganiami rozpraw naukowych. Ich zastosowanie i kolejność odpowiadają logicznemu układowi rozprawy. Uważam, że doktorant w wystarczającym stopniu umie posługiwać się metodami naukowymi.

4. Ocena oryginalności osiągnięcia naukowego

Do oryginalnych osiągnięć Doktoranta należy z pewnością układ sterowania, planowanie eksperymentu badawczego oraz przeprowadzenie analizy wyników dowodzących, że spełniona została teza rozprawy naukowej. Spośród wymienianych we wnioskach szczegółowych osiągnięć istotne są zwłaszcza:

- Układ C-Dump umożliwia rozszerzenie zakresu prędkości obrotowych silnika w zakresie pracy ze stałym momentem obciążenia;
- Zwiększenie mocy mechanicznej i momentu na wale silnika a poziom wzrostu zależy od doboru kondensatora C-Dump.

Wymienione osiągnięcia potwierdzają uzyskanie przez Doktoranta umiejętności prowadzenia twórczej pracy o charakterze modelowym i eksperymentalnym, analizy wyników oraz zdolności do formułowania wniosków oraz uogólnień.

5. Uwagi problemowe, redakcyjne oraz pytania nt. zauważonych nieprawidłowości lub wątpliwości recenzenta

Doktorant przedstawił obszerne wyniki z badań symulacyjnych i laboratoryjnych. Jego komentarze polegają niemal wyłącznie na obserwacji prezentowanych wyników. W większości przypadków zabrakło jednak pogłębionej analizy i próby interpretacji oraz wyjaśnienia obserwowanych zjawisk. Taka interpretacja pozwoliłaby zrozumieć istotę badanych zjawisk. W związku z powyższym, kluczowe pytania jakie chciałbym zadać Doktorantowi są następujące:

- a) Zgodnie z wymaganiami ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art. 187. ust.2 , w oparciu o które nadawane są stopnie doktora, wymaga się aby doktorant dowiódł, że „... przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.”). Spodziewać się więc można, że Doktorant sam wskaże co uważa za swoje najważniejsze osiągnięcia i które z osiągnięć zaliczyć można do oryginalnych rozwiązań. W związku z powyższym proszę aby Doktorant wskazał swoje oryginalne osiągnięcia zrealizowane w ramach badań nad pracą doktorską.
- b) W tabelach 7.2.1÷7.2.11 błędy wyrażone w procentach nazwano błędami bezwzględnyymi. To pomyłka.
- c) W rozdziale 7.2.2 określenie niestabilna praca układu prawdopodobnie jest określeniem nieprecyzyjnym. Z opisów wnioskować można, że układ pracował stabilnie, tylko z dużymi oscylacjami. Warunki pracy, przy których występują takie odpowiedzi powinny być modelowo określone i wyeliminowane. Czy Doktorant odnalazł przyczynę powstawania takich niekorzystnych zjawisk?
- d) Doktorant przedstawił proces sterowania w postaci Listingu 6.1. Proszę o przedstawienie algorytmu sterowania odpowiadającego temu programowi.
- e) Na rys. 6.1.6 przedstawiony jest proces sterowania zaimplementowany w układzie FPGA. Proszę o przedstawienie algorytmu sterowania, który realizuje ten układ. Określenie algorytm wymieniane jest w pierwszym akapicie na stronie 44, wers 9.
- f) Na podstawie jakiego modelu matematycznego stworzony został schemat symulacyjny pasma silnika wykorzystywany do realizacji badań symulacyjnych (rys.5.1.1)?

Analizę wyników badań utrudniał recenzentowi również fakt słabo określonych parametrów podzespołów stanowiska, takich jak hamownica Magtrol, a nawet sam silnik EMS-71. W pracy dostrzeżono również pojedyncze błędy redakcyjne, które nie mają większego znaczenia, a przede wszystkim nie utrudniają zrozumienia tekstu.

Doktoranta proszę o ustosunkowanie się do przedstawionych uwag a)-f) formie pisemnej i przesłanie odpowiedzi z wykorzystaniem poczty elektronicznej na adres e-mail recenzenta pobrany ze strony <https://ehms.pollub.pl/standard/staff.php>.

6. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Na podstawie opinii przedstawionych w niniejszej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Daniela Rataja stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz szczegółową wiedzą w zakresie układów zasilania i sterowania reluktancyjnymi silnikami przełączalnymi RSM. Realizując pracę naukową, dowiódł posiadania umiejętności stosowania różnych metod badawczych, co

świadczy o posiadaniu wystarczających umiejętności do samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuję, aby rozprawę doktorską mgra inż. Daniela Rataja uznać za istotny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Stwierdzam więc, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Daniela Rataja do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej.



