



dr hab. inż. Tomasz Tarczewski, prof. UMK
Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń

Toruń, 23 sierpnia 2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Jackiewicza

pt.: **Sterowanie powtarzalne momentem elektromagnetycznym w układzie
napędowym z maszyną reluktancyjną przełączalną**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Jackiewicza z Instytutu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej, pod tytułem *Sterowanie powtarzalne momentem elektromagnetycznym w układzie napędowym z maszyną reluktancyjną przełączalną*. Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, Pana prof. dra hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 28 czerwca 2023 r. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie mgr. inż. Krzysztofowi Jackiewiczowi stopnia naukowego doktora w zakresie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

2. Wprowadzenie

Negatywny wpływ napędów wykorzystujących silniki o spalaniu wewnętrznym powoduje wzrost zainteresowania rozwiązaniami bazującymi na silnikach elektrycznych i hybrydowych. W obszarze maszyn elektrycznych obserwowany jest rozwój algorytmów sterowania umożliwiających poprawę dynamiki i precyzji sterowania oraz wzrost zainteresowania niezawodnymi i relatywnie tanimi silnikami pozbawionymi pierwiastków ziem rzadkich. Istotną rolę w tym zakresie odgrywają maszyny reluktancyjne przełączalne (*ang.* switched reluctance machines - SRM) charakteryzujące się wysokim momentem obrotowym, możliwością chwilowego przeciążania, prostą konstrukcją i niezawodnością. Konstrukcja SRM charakteryzuje się rozłącznością obwodów elektrycznych pasm fazowych zapewniając odporność maszyny na uszkodzenia i umożliwiając kontynuowanie pracy ze zmniejszoną mocą. Do wad SRM zalicza się relatywnie skomplikowane sterowanie oraz wysoki poziom tętnień momentu obrotowego i

prędkości kątowej. Tętnienia są odpowiedzialne za generowanie hałasu akustycznego i drgań negatywnie wpływając na trwałość napędu. Wykorzystanie zalet przy jednoczesnej minimalizacji wad omawianego silnika wymaga zastosowania dedykowanego przekształtnika energoelektronicznego wyposażonego w zaawansowany układ sterowania.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienie badawcze dotyczące zaawansowanych metod sterowania silnikiem reluktancyjnym przełączalnym. Opracowano oryginalny algorytm regulacji bazujący na regulatorze wielooscylacyjnym próbkowanym w dziedzinie położenia kątowego. Zaproponowane rozwiązanie zapewnia znaczącą redukcję tętnień prędkości kątowej i momentu obrotowego maszyny.

W mojej ocenie tematyka poruszona w rozprawie doktorskiej jest ważna i aktualna zarówno z badawczego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Tematyka ta zawiera się w obszarze badań w zakresie elektrotechniki oraz automatyki, które obecnie wchodzą w zakres dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

3. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Jackiewicza liczy łącznie 151 stron i składa się z 9 rozdziałów obejmujących: wstęp z celem, tezą i zakresem rozprawy, część literaturową, część badawczą, wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych, podsumowanie i wnioski oraz literaturę, wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń. Spis literatury załączony na końcu pracy zawiera łącznie 107 pozycji, w tym 13 prac autorskich Doktoranta, z których 3 opublikowano w czasopismach posiadających IF. Analiza źródeł literaturowych została przeprowadzona w sposób właściwy. Spis literatury zawiera również patent Doktoranta dotyczący regulatora wielooscylacyjnego pracującego w dziedzinie położenia kątowego wraz z mechanizmem próbkowania.

W rozdziale pierwszym, będącym wprowadzeniem do rozprawy, autor przedstawił przegląd metod redukcji tętnień momentu obrotowego maszyn reluktancyjnych przełączalnych oraz zamieścił cel i tezę a także omówił strukturę pracy. Celem prac badawczych było opracowanie, analiza, implementacja oraz weryfikacja systemu sterowania przekształtnika energoelektronicznego dla układu napędowego wykorzystującego maszynę reluktancyjną przełączalną w zakresie pracy silnikowej. Problem naukowy został jasno sformułowany przez Doktoranta w postaci następującej tezy naukowej:

„Zastosowanie zmodyfikowanego, próbkowanego w dziedzinie położenia kątowego, regulatora wielooscylacyjnego w pętli regulacji prędkości kątowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej umożliwia redukcję tętnień prędkości kątowej układu napędowego”.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił spis ważniejszych symboli i oznaczeń wykorzystanych w pracy.

Rozdział trzeci zawiera opis budowy oraz zasadę działania maszyny reluktancyjnej przełączalnej z uwzględnieniem modelowania przebiegu indukcyjności pasma fazowego w funkcji położenia kąтового wirnika, wytwarzania momentu obrotowego. W rozdziale tym przedstawiono również schemat poglądowy układu napędowego oraz omówiono zasilanie pasm fazowych przy użyciu wielogłęziowego przekształtnika energoelektronicznego.

W kolejnych rozdziałach zawarto najbardziej wartościowe treści w ocenianej pracy doktorskiej. Sterowanie maszyną reluktancyjną przełączalną bez uwzględnienia redukcji tętnień momentu obrotowego przedstawiono w rozdziale czwartym. Kolejno omówiono strukturę regulacji, komutator elektroniczny, autorski algorytm adaptacyjnego doboru kąta wyłączenia pasma fazowego, blok wyznaczania prądu referencyjnego oraz adaptacyjny regulator prądu pasma fazowego. Rozdział zawiera również informacje o parametrach i modelu numerycznym badanego układu napędowego oraz wyniki badań symulacyjnych obrazujące działanie układu w różnych warunkach. W szczególności dokonano oceny jakości działania układu przy użyciu zaproponowanych wskaźników jakości definiujących wartość skuteczną tętnień prędkości kątovej oraz wartość skuteczną tętnień momentu obrotowego.

W rozdziale piątym przedstawiono autorską metodę sterowania maszyną reluktancyjną przełączalną zapewniającą redukcję tętnień momentu obrotowego. Po krótkim wprowadzeniu dotyczącym modelowania elektrycznej i mechanicznej części układu napędowego opisano opracowany mechanizm redukcji tętnień prędkości kątovej i momentu obrotowego bazujący na regulatorze wieloscyłacyjnym wprowadzającym dodatkowy sygnał sterujący w pętli regulacji prędkości kątovej. Kandydat omówił również proces dyskretyzacji regulatora, zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie położenia kątovej. Zamieszczone w rozdziale wyniki badań symulacyjnych ukazują znaczące zmniejszenie tętnień momentu obrotowego i prędkości kątovej w stanach ustalonych bez istotnego pogorszenia zachowania układu w stanach przejściowych, w porównaniu z rozwiązaniem bazowym przedstawionym w rozdziale czwartym.

Wyniki badań symulacyjnych zaprezentowane w rozdziałach 4. i 5. zostały zweryfikowane na stanowisku eksperymentalnym. Rozdział szósty zawiera informacje dotyczące implementacji opracowanych algorytmów sterowania w wielordzeniowym mikrokontrolerze sygnałowym TMS320F28379D. W rozdziale siódmym Doktorant omówił stanowisko badawcze, natomiast rozdział ósmy zawiera wyniki badań eksperymentalnych potwierdzające wcześniejsze badania eksperymentalne i potwierdzające zrealizowanie postawionego celu pracy. Warto podkreślić, że przedstawiony sposób implementacji opracowanych rozwiązań oraz zamieszczone w pracy wyniki

badania układu napędowego świadczą o dużym doświadczeniu programistycznym i eksperymentalnym Kandydata.

Rozdział dziewiąty zawiera podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych, spostrzeżenia i wnioski, dalsze możliwe kierunki badań oraz najważniejsze osiągnięcia Autora rozprawy.

4. Ocena rozprawy

W recenzowanej rozprawie doktorskiej przedstawione zostały zagadnienia dotyczące syntezy i analizy kaskadowego układu regulacji prędkości kątowej oraz prądów pasm fazowych maszyny reluktancyjnej przełączalnej bazującego na regulatorze wielooscylacyjnym próbkowanym w dziedzinie kąta położenia wirnika oraz układzie automatycznego doboru kąta wyłączenia każdego z pasm fazowych. Tematyka i przedstawione wyniki są oryginalne i istotne zarówno w skali krajowej jak i światowej. Zaletą pracy jest przedstawienie przez Autora pełnego cyklu badawczego w rozprawie, w którym analiza teoretyczna jest uzupełniona wynikami badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Założony cel pracy został osiągnięty a teza rozprawy w pełni udowodniona.

Doktorant przygotowując rozprawę wykazał się znaczną wiedzą teoretyczną i praktyczną, umiejętnością prowadzenia badań naukowych oraz poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników. Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- opracowanie modeli symulacyjnych układu napędowego z maszyną reluktancyjną przełączalną,
- opracowanie algorytmu adaptacyjnego doboru kąta wyłączenia pasm fazowych maszyny reluktancyjnej przełączalnej i przeprowadzenie badań,
- opracowanie oraz wszechstronną analizę regulatora wielooscylacyjnego pracującego w dziedzinie położenia kątowego wirnika,
- opracowanie regulatora prądu o zmiennym wzmocnieniu zależnym od położenia regulowanego pasma fazowego,
- zaprojektowanie i budowę układu laboratoryjnego oraz implementację opracowanych algorytmów w wielordzeniowym systemie mikroprocesorowym; wykonanie szeregu badań eksperymentalnych ukazujących właściwości zaproponowanych struktur regulacji.

5. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

Redakcja pracy jest staranna, tym niemniej autor nie uniknął drobnych błędów edytorskich i stylistycznych, np.:

- We wstępie Autor pisze o *coraz większym zainteresowaniu ze strony badań naukowych*, uważam, że lepiej jest używać zwrotu *zainteresowanie ze strony jednostek badawczych*, ewentualnie *zespołów badawczych*.

- Autor powinien połączyć akapit dotyczący metod sterowania bazujących na kształtowaniu przebiegu prądu fazowego znajdujący się na stronie 16 z akapitem piątym umieszczonym na stronie 17.
- W podrozdziale 3.5 Autor powinien podać przykładowe zakresy zmian indukcyjności dla SRM o parametrach zbliżonych do badanej maszyny.
- Proszę o doprecyzowanie czy ukazana na rys. 3.13 charakterystyka wytwarzanego momentu obrotowego powstała dla badanej maszyny.
- W Tabeli 4.5 zebrano przypadki testowe dla badań symulacyjnych dynamicznych. Opis przypadku TDSP2 nie jest zgodny z przebiegami ukazanymi na Rys. 4.18. Proszę o wyjaśnienie rozbieżności.
- W opisach rysunków 4.17 i 4.19 zamiast słowa *skokowe* jest *skokowa*.
- W pozycji [22] błędnie podano nazwisko autora.
- W bibliografii znajduje się dwukrotne odwołanie do tej samej monografii – [60] i [74]. W pozycji [60] błędnie podano nazwisko jednego z autorów.

Po przeanalizowaniu rozprawy nasuwa się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym o różnej wadze merytorycznej, na które proszę Doktoranta o odpowiedź:

1. Z rys. 3.14 oraz z zależności (3.26) wynika, że kąt przewodzenia pasma fazowego odpowiada przypadkowi, dla którego wirnik maszyny w minimalnym zakresie znajduje się pod pasmem PhD. Proszę o uszczegółowienie.
2. Przedstawiony na rys. 3.1 schemat blokowy podstawowego układu sterowania czterofazową maszyną reluktancyjną przełączalną ukazuje pętlę regulacji prądu z regulatorami typu P. Następnie, ze względu na duży zakres zmian indukcyjności obwodu w SRM, Autor wprowadza adaptację wzmocnienia regulatora opisaną równaniem (4.12). Analiza literatury wskazuje, że w pętli regulacji prądu stosowane są regulatory typu PI [R1, R2], a efekty związane ze zmianą indukcyjności są kompensowane poprzez zastosowanie przestrajanego członu całkującego (rys. 5.24 i zależność (5.68) na str. 291 w [R2]). Czy zastosowanie regulatorów typu PI z przestrajającym członem całkującym miałyby wpływ na niższe poziomy tętnień prędkości kątowej i momentu obrotowego w porównaniu do rozwiązania z regulatorami typu P?

[R1] F. Blaabjerg, et al. "Improved digital current control methods in switched reluctance motor drives." IEEE Trans. Pow. Electron., vol. 14, no. 3, pp. 563-572, 1999

[R2] R. Krishnan, Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications, CRC Press, 2001
3. Na stronie 54 Autor pisze: „Z równania (4.10) wynika, że aktywnie zasilanie jest średnio k_{ph} pas fazowych”. Proszę o dokładniejsze wyjaśnienie tego sformułowania.

4. Równanie (4.12) określa wartość wzmocnienia regulatora prądu pasma fazowego w zależności od położenia kąтового pasma fazowego. Następnie, na str. 61 Autor wskazuje, iż nastawy regulatorów w modelu numerycznym dobrane zostały eksperymentalnie. Proszę o wyjaśnienie jakimi kryteriami kierował się autor podczas doboru nastaw? Czy nastawy regulatora prądu zastosowane podczas badań eksperymentalnych były inne? Jeżeli tak, to co było przyczyną?
5. Czy regulator prędkości ukazany na rys. 4.1 był wyposażony w blok anty-windup? Jeżeli tak, to jaką metodę ograniczania tego zjawiska zastosowano? Proszę o przedstawienie schematu blokowego omawianego regulatora. Dlaczego nastawy regulatora prędkości nie zostały dobrane przy użyciu jednego z powszechnie stosowanych w automatyce napędu elektrycznego kryterium?
6. Na schemacie blokowym ukazanym na rys. 4.12 widoczny jest pomiar napięcia obwodu pośredniczącego przekształtnika energoelektronicznego. Czy sygnał jest wykorzystywany w opracowanym algorytmie?
7. W pierwszym akapicie podrozdziału 4.8.4. Autor wskazuje, że przypadki testowe dobrane zostały na podstawie właściwości układu fizycznego. Proszę o uszczegółowienie.
8. Zależność (5.2) nie opisuje stałej czasowej mechanicznej lecz jej odwrotność [R3].
[R3] W. Leonhard, Control of electrical drives. Springer, 2001
9. W podrozdziale 5.3. omówiony został regulator wielooscylacyjny. Struktura ukazana na rys. 5.5 nie zawiera bloku anty-windup. Czy w układzie rzeczywistym zaimplementowano ograniczenie sygnału wyjściowego oraz strukturę zapobiegającą nasyceniu członów całkujących? W jaki sposób Autor określił liczbę członów oscylacyjnych.
10. W podrozdziale 5.7.2. wskazano, że nastawy regulatorów dobrane zostały eksperymentalnie. Proszę o wyjaśnienie jakimi kryteriami kierował się autor podczas doboru nastaw?
11. Przedstawione na rys. 5.11 przebiegi ukazują znaczącą redukcję zawartości harmonicznych, w porównaniu do rys. 4.13, za wyjątkiem harmonicznej 96. Analogiczną sytuację można zaobserwować analizując wyniki dla par przypadków testowych TSSA2-TSSP2 oraz TSSA3-TSSP3. Proszę o wyjaśnienie zaobserwowanego zjawiska.
12. W pierwszym zdaniu podrozdziału 6.3. Autor zamieścił niepoprawne odwołanie do równań z podrozdziału 5.4.2.

6. Podsumowanie

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy mgra. inż. Krzysztofa Jackiewicza z Instytutu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej. Recenzowana rozprawa doktorska pt. „*Sterowanie powtarzalne momentem*

elektromagnetycznym w układzie napędowym z maszyną reluktancyjną przełączalną” zawiera rozwiązanie problemu naukowego, świadczy o bardzo dobrej wiedzy autora w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, zwłaszcza w zakresie elektrotechniki oraz automatyki napędu elektrycznego. Przedstawione w rozprawie zagadnienia obejmują najnowsze osiągnięcia nauki i świadczą o bardzo dobrej znajomości tematyki prezentowanej przez Autora. Zaproponowany algorytm sterowania maszyną reluktancyjną przełączalną może być podstawą dalszych prac zmierzających do implementacji przemysłowych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra. inż. Krzysztofa Jackiewicza z Instytutu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej, pod tytułem „*Sterowanie powtarzalne momentem elektromagnetycznym w układzie napędowym z maszyną reluktancyjną przełączalną*” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, wymienione w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668).

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie pracy doktorskiej mgra. inż. Krzysztofa Jackiewicza do publicznej obrony.

Tomasz Jaworski