

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Szabat  
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Wydział Elektryczny, Politechnika Wroclawska  
ul Smoluchowskiego 19  
50-372 Wrocław

Wrocław 2023-09-07

WPŁYNEŁO

dn.....2023-09-13.....

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Marka Jackiewicza  
pt. **Sterowanie powtarzalne momentem elektromagnetycznym  
w układzie napędowym z maszyną reluktancyjną przełączalną**

Opracowana na podstawie zlecenia Przewodniczącego  
Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej

### 1. CHARAKTERYSTYKA DZIEDZINY I OCENA TEMATU ROZPRAWY

W ostatnich latach obserwuje się gwałtowny rozwój szeroko pojętej elektromobilności. Tradycyjne silniki spalinowe zastępowane są przez wyspecjalizowane napędy elektryczne. Obecnie najpopularniejszą maszyną elektryczną stosowaną w pojazdach elektrycznych jest silnik PMSM. Posiada on szereg zalet, takich jak duża gęstość mocy, małe wymiary i korzystne charakterystyki uzyskiwane dzięki nowoczesnym układom sterowania. Do jej wytworzenia konieczne jest jednak użycie magnesów trwałych. Pociąga to za sobą szereg negatywnych skutków. Można tutaj wymienić duży koszt zakupu magnesów, problemy z ich dostępnością na globalnym rynku, jak również duży wpływ na środowisko podczas ich wydobycia. Obecnie można zauważyć na rynku nowy trend polegający na świadomej rezygnacji z ich stosowania. Dąży się do konstrukcji maszyn elektrycznych, do budowy których używa się powszechnie występujących, a przez to tanich materiałów. Jednym z takich rozwiązań jest maszyna reluktancyjna przełączalna. Posiada ona szereg zalet, tj. wysoki moment napędowy, duża odporność na uszkodzenia mechaniczne, niewielka wrażliwość na zmiany temperatury jak również prostą i taną konstrukcję. Do jej wad należą duże nieliniowości w obwodzie magnetycznym, które powodują występowanie oscylacji w momencie elektromagnetycznym.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienia związane z zaawansowanymi metodami sterowania układu napędowego z reluktancyjnym silnikiem przełączalnym. Rozważane algorytmy sterowania minimalizują oscylacje momentu elektromagnetycznego a tym samym prędkości kątowej. Opiniowana rozprawa doktorska nawiązuje do najbardziej istotnych, nowoczesnych i cieszących się dużym zainteresowaniem zagadnień z dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne badanych przez szereg ośrodków naukowych i przemysłowych.

## 2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska składa się z dziewięciu rozdziałów podstawowych, streszczenia, spisu treści, rysunków, tabel oraz bibliografii. Całość pracy zawarta jest na 151 stronach. Autor odnosi się do 107 pozycji literatury. Oprócz pozycji klasycznych wymagających cytowania, większość zamieszczonych źródeł powstała w ciągu ostatnich lat.

Podstawowym celem pracy jest zaprojektowania i wszechstronne przebadanie układu regulacji dla silnika reluktancyjnego przełączalnego opartego na sterowaniu powtarzalnym.

Bazując na przedstawionym celu pracy w rozprawie zaproponowano następującą tezę naukową:

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

Dowodząc tezy naukowej rozprawy przyjęto czytelny sposób postępowania. Po krótkim wprowadzeniu do tematyki przedstawiono spotykane metody redukcji tętnień momentu elektromagnetycznego w maszynach przełączalnych. Następnie przedstawiono tezę, cel i zakres pracy. Omówiono strukturę pracy. Wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń używanych w rozprawie zawarto w rozdziale drugim. Rozdział trzeci zawiera najważniejsze informacje o konstrukcji maszyny reluktancyjnej przełączalnej, zasadzie jej działania, znaczeniu pasm fazowych, przebiegu indukcyjności w zależności od położenia kątowego wirnika, generacji momentu elektromagnetycznego oraz zasadzie sterowania maszyny. Niniejszy rozdział zawiera szereg rysunków ilustrujących opisywane zjawiska. Podstawowe układy sterowania maszyną reluktancyjną zaprezentowano w rozdziale czwartym. Opisano podstawowy układ sterowania, podkreślając rolę komutatora elektronicznego. Szczegółowo opisano sposób doboru kąta włączania i wyłączania pasma fazowego. Wskazano na efekty niewłaściwego czasu doboru załączania i wyłączania pasma. Aby wyeliminować generowanie

ujemnego momentu napędowego zaproponowano użycie układu ADKW. Efektywność działania tego układu zilustrowano szeregiem przebiegów wielkości układu. Kolejno skupiono się na zagadnieniach regulacji prądów pasmowych. Przebadano układy z regulatorem prądu typu P o różnej wartości wzmocnienia jak i wzmocnieniu adaptacyjnym. Kolejno zawarto i opisano wyniki badań symulacyjnych całego układu sterowania (bez i z ADKW) pracującego w różnych warunkach. Zaproponowano ocenę działania układu przez zdefiniowane wskaźniki jakości. Rozdział piąty jest najoryginalniejszą częścią pracy. Przedstawiono w nim analizę teoretyczną i wyniki badań symulacyjnych układu sterowania z regulatorami oscylacyjnymi. Po opisanu struktury sterowania wprowadzono zagadnienia związane z regulatorami rezonansowymi. Zaprezentowano sposób doboru nastaw tych regulatorów. Następnie omówiono zagadnienia związane z próbkowaniem w dziedzinie czasu i położenia kąтового wału maszyny. Następnie zaprezentowano porównawcze wyniki badań symulacyjnych zaprojektowanego układu w różnych warunkach pracy. Zamieszczono wartości wskaźników jakości regulacji badanych układów. W rozdziale szóstym przedstawiono zagadnienia związane ze sposobem implementacji struktury sterowania na procesorze sygnałowym. Omówiono wybrane aspekty zagadnień w tym próbkowanie ze stałym krokiem czasowym oraz krokiem kątowym. Opis stanowiska badawczego zamieszczono w rozdziale siódmym a wyniki eksperymentalne w rozdziale ósmym. Zaprezentowano w nim wiele przebiegów ilustrujących działanie poszczególnych struktur regulacji. Zamieszczono wartości poszczególnych wskaźników ilustrujących działanie poszczególnych struktur sterowania. Pracę zakończono podsumowaniem, w którym przedstawiono najważniejsze wnioski wypływające z jej treści.

### 3. OCENA PRACY

W opiniowanej pracy przedstawione zastały zagadnienia związane z tłumieniem pulsacji momentu napędowego i prędkości kątowej w układzie napędowym z przełączalną maszyną reluktancyjną. Tematyka i prezentowane wyniki są oryginalne zarówno w skali krajowej jak również światowej. Dodatkowym czynnikiem wyróżniającym pracę jest fakt, że Autor nie ograniczył się tylko do jednego rozwiązania, ale zaprezentował krytyczną analizę porównawczą różnych podejść. Kolejną zaletą pracy jest podejście wybrane przez Autora i przedstawienie w rozprawie pełnego cyklu badawczego. Analiza teoretyczna jest poparta licznymi wynikami badań symulacyjnych oraz eksperymentem laboratoryjnym, dzięki czemu założony cel pracy został osiągnięty a teza rozprawy w pełni udowodniona.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć rozprawy należy zaliczyć:

- Opracowanie modeli symulacyjnych maszyn reluktancyjnych przełączalnych wraz z różnymi strukturami sterowania.
- Przeprowadzenie analizy kaskadowej struktury regulacji prędkości i prądów pasm fazowych dla maszyny reluktancyjnej przełączalnej.
- Opracowanie algorytmu adaptacyjnego doboru kąta wyłączania prądów fazowych. Przeprowadzenie szeregu badań ukazujących właściwości zaprojektowanego układu. Wykonanie analizy otrzymanych wyników.
- Opracowanie regulatora prądu o zmiennym wzmacnieniu poprawiającym właściwości dynamiczne układu regulacji. Przeprowadzenie szeregu badań ukazujących właściwości zaprojektowanego układu. Wykonanie analizy otrzymanych wyników.
- Opracowanie struktury sterowania prędkości z regulatorem PI oraz z regulatorami rezonansowymi. Przeprowadzenie szeregu badań ukazujących właściwości zaprojektowanego układu. Wykonanie analizy otrzymanych wyników.
- Zaproponowanie i opracowanie próbkowania układu w dziedzinie położenia kąтового.
- Zaprojektowanie oraz budowa stanowiska laboratoryjnego.
- Opracowanie programu sterującego układem napędowym.
- Wykonanie licznych testów na stanowisku laboratoryjnym wraz z analizą otrzymanych wyników.

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

- Strona 19 w. 27 jest 'przestawiony' powinno być 'przedstawiony'.
- Rozdział 2 jest spisem ważniejszych symboli i oznaczeń. Jest to niestandardowe podejście.
- Strona 28. Odstęp po tytule 3.2 jest większy niż w pozostałych przypadkach.
- Strona 68 w. 18. Jest '-0.19 radiana', powinno być '-0.10'.
- Pod tytułem rozdziału 5 znajduje się krótkie streszczenie, pod innymi brak. Analogicznie między 5.4 a 5.4.1 występuje krótki komentarz.

Należy jednak podkreślić, że liczba takich błędów jest znacznie mniejsza niż w standardowej rozprawie doktorskiej. Materiał zawarty w pracy jest ilustrowany właściwie dobranymi i starannie wykonanymi rysunkami.

Po lekturze pracy nasuwa się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym o różnej wadze merytorycznej, na które proszę o odpowiedź:

- We wstępie (str. 15) Autor wymienia negatywne efekty wpływu tętnień momentu na układ napędowy. Z części mechanicznej układu wymienia łożyska. Nasuwa się jednak pytanie, czy pulsacje momentu w zdecydowanie większy sposób wpływają na sprzęgła/przekładnie łączące silnik z maszyną roboczą niż na łożyska? Proszę o komentarz.
- W rozdziale czwartym Autor zaproponował układ ADKW. Jednakże jak zauważył na str. 48, wyznaczony optymalny kąt wyłączenia zależy od szeregu parametrów maszyny. Czy można zaproponować algorytm sterowania odporny na ich zmiany? W przebiegach można zauważyć różne czasy narostu i opadania prądu w pojedynczych fazach. Dodatkowe pytanie jest następujące: Czy można opracować algorytm biorący pod uwagę czasy załączeń i wyłączeń wszystkich faz w sposób np. maksymalizujący całościowym moment maszyny czy też minimalizujący poziom pulsacji momentu?
- W rozdziale czwartym zaproponowano adaptacyjny regulator prądu fazowego. Jednym z kryteriów oceny był poziom uchybu regulacji. Należy tutaj zauważyć, że wartość referencyjna sygnału jest skokowa w wybranej chwili a później oscyluje w niewielkim stopniu. Dlaczego Autor zdecydował się na zastosowanie regulatora typu P? Czy inny typ regulatora nie poprawiłby właściwości układu? Autor w niniejszym punkcie zaproponował zmianę wzmocnienia regulatora w sposób liniowy. Czy jest to optymalne?
- Na stronie 61 Autor wprowadza do badań symulacyjnych. Pisze: 'Nastawy regulatorów zostały dobrane w sposób eksperymentalny'. Proszę o doprecyzowanie jakich regulatorów – prędkości i prądów? Czy w tym przypadku regulator prędkości był PI? Czy dobór nastaw tego regulatora można przeprowadzić analitycznie? Jaki jest wpływ nastaw regulatora prędkości na poziom oscylacji?
- Na przebiegach zamieszczonych w rozdziale czwartym wyraźnie widać tętnienia w momencie elektromagnetycznym wynikające z konstrukcji i sposobu sterowania prądami fazowymi. W literaturze istnieje szereg prac opisujących zastosowanie tzw. 'disturbance observer' do eliminacji różnego typu zakłóceń z prędkości kątowej w rozmaitych układach (np. prace K. Ohnishi, Y. Hori, S. Katsura). Bazując na momencie referencyjnym i prędkości silnika wyznacza się wielkość zwaną momentem zakłócającym. Kolejno wprowadza się ją do struktury sterowania co powoduje eliminację składowej oscylacyjnej. Czy Autor może w sposób ogólny (teoretyczny) ocenić możliwość zastosowania takiego podejścia w rozpatrywanym przypadku?
- Proszę o komentarz transmitancji 5.1 oraz opisu z nim związanego. Matematycznie ta transmitancja jest wyrażona poprawnie. Jednakże zdefiniowana w pracy mechaniczna stała czasowa (5.2) nasuwa pytania. Co będzie w przypadku współczynnika tarcia równego zero? Analizując zamieszczone wzory zauważymy, że zniknie jeden z elementów 5.1. Oznacza to również eliminację momentu bezwładności  $J$  z dynamiki układu? Innego rodzaju zastrzeżenia

można wysunąć do stałej czasowej układu regulacji prądu. Zgodnie z 5.3 zależy ona wprost od stałej układu RL. Czy nie jest ona już skompensowana?

- W rozdziale piątym Autor opisuje schemat blokowy układu regulacji. Pisze 'Mechanizm redukcji tętnień prędkości kątowej... opiera się na dodaniu do układu regulacji... sygnału referencyjnego prądu o odpowiednim przebiegu". Analizując rys. 5.1 uważam, że sygnał referencyjny prądu składa się z dwóch sygnałów pochodzących z dwóch regulatorów. Kolejna uwaga dotyczy sposobu wprowadzenia ograniczeń sygnału referencyjnego w badanym układzie? Jak on wyglądał?

- Czy tłumienie oscylacji jest również efektywne w zakresie prędkości niskich?

#### 4. PODSUMOWANIE

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy. Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Marka Jackiewicza pt. *Sterowanie powtarzalne momentem elektromagnetycznym w układzie napędowym z maszyną reluktancyjną przelączalną* zawiera rozwiązanie problemu naukowego, dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy badawczej, potwierdza bardzo dobre przygotowanie z dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne a zwłaszcza z teorii sterowania, napędu elektrycznego, modelowania i programowania. Dowodem tych umiejętności są nie tylko rozważania teoretyczne i badania symulacyjne, ale również ich praktyczne wykorzystanie, udowodnione poprzez badania eksperymentalne wykonane na stanowisku laboratoryjnym.

Należy podkreślić, że materiał zawarty w rozprawie był prezentowany na konferencjach krajowych i zagranicznych. Dodatkowo autor rozprawy publikował w uznanych czasopismach, co podkreśla aktualność tematyki i wskazuje na wysoki poziom merytoryczny zagadnień poruszanych w rozprawie.

Reasumując, w mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o tytule i stopniach naukowych i w związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Dodatkowo, biorąc pod uwagę jej wysoki poziom merytoryczny wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

Krzysztof Szubert