

Grzegorz Skarpetowski  
prof. nzw. Politechniki Krakowskiej  
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej  
ul. Warszawska 24  
PL 31-155 Kraków  
Adres Prywatny  
Birkenweg 8  
CH 5417 Untersiggenthal  
Szwajcaria

Untersiggenthal, 20.02.2016

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

magistra inżyniera Marka Dudzika

**pt. „Analiza możliwości ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego w silniku ASM sterowanym wektorowo w napędach trakcyjnych”**

### 1. PODSTAWA FORMALNA RECENZJI

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Marka Dudzika z Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej pt. „Analiza możliwości ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego w silniku ASM sterowanym wektorowo w napędach trakcyjnych”. Recenzja została sporządzona na zlecenie (pismo z dnia 28.01. 2016) Dziekana w/w Wydziału Politechniki Krakowskiej.

### 2. OGÓLNA CHARAKTRYSTYKA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Rozprawa pod wyżej wymienionym tytułem obejmuje 7 rozdziałów mieszczących się na 177 stronach wraz z 34 pozycjami starannie dobranej bibliografii krajowej i zagranicznej. Podane są wybrane schematy układów sterowania maszyny indukcyjnej zasilanej przekształtnikowo, schematy blokowe symulowanych układów sterujących oraz rysunki i zestawienia tabelaryczne otrzymanych rezultatów.

Rozdział pierwszy, jest poświęcony omówieniu znanych metod sterowania maszyny indukcyjnej zasilanej przekształtnikowo oraz wskazaniu na zalety i wady omawianych metod sterowania. W rozdziale tym jest przeprowadzone, oparte na złożonych wyjaśnieniach, uzasadnienie wyboru tematu pracy, wynikającego ze szkodliwego wpływu tętnień (pulsacji) momentu napędowego na mechaniczne elementy traktu przenoszenia mocy w pojazdach z przekształtnikowym napędem elektrycznym. Na końcu rozdziału doktorant przedstawia zestaw przyczyn kierujących jego uwagę na problem pulsacji momentu napędowego: na potrzebę zmniejszenia obciążenia dynamicznego elementów mechanicznego traktu przenoszenia mocy w napędach trakcyjnych oraz konieczność poprawy niezawodności tych bardzo złożonych układów napędowych. Doktorant spostrzega wzrost wymagań eksploatacyjnych dotyczących rentowności, niezawodności i bezpieczeństwa pojazdów trakcyjnych stawianych przez kolejowe przedsiębiorstwa transportowe. Teoretyczny i praktyczny postęp w technice sterowania napędów przekształtnikowych, powinien, zdaniem autora, zostać wykorzystany do wypracowania zadowalających odpowiedzi na w/w oczekiwania zarówno w nowych jak też już działających układach napędowych.

W rozdziale drugim zostaje sformułowany cel stawiany przed pracą a wynikający z przeprowadzanych w rozdziale pierwszym analiz i porównań. Ograniczając zakres ingerencji w stosowaną obecnie metodę DTC, autor koncentruje swoje badania nad taką modernizacją istniejącego algorytmu sterowania maszyn indukcyjnych zasilanych przekształtnikowo,

żeby mógł być on zastosowany w użytkowanych obecnie pojazdach bez potrzeby wymiany istniejących podzespołów układów sterowania.

Autor następnie formułuje tezę, że:

**"istnieje możliwość ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego dla metody DTC poprzez odpowiednie dostosowanie napięcia zasilania falownika dwupoziomowego"**.

W celu udowodnienia tej tezy doktorant organizuje odpowiednie naukowo-badawcze wsparcie narzędziowe:

- W środowisku Simulink projektuje model układu zasilania maszyny indukcyjnej, zasilanej z dwupoziomowego przekształtnika pracującego z wymuszeniem napięciowym oraz stosuje odpowiedni model poddawanej badaniom maszyny indukcyjnej
- Opracowuje projekt układu zadającego sterowalną wartość napięcia na kondensatorze wejściowym falownika
- Przeprowadza badania układu stosując sterowanie wektorowe z bezpośrednim zadawaniem momentu elektromagnetycznego.

Stosowalność tak zorganizowanego, nowoczesnego stanowiska badawczego zostaje obwarowana szeregiem poprawnych i dobrze przemyślanych założeń upraszczających dotyczących samej maszyny indukcyjnej, modelu falownika trójfazowego, mechanicznej części układu przenoszenia mocy jak i zastosowanych w układzie algorytmów sterujących.

Rozdział trzeci przedstawia w skrócie strukturę przedłożonej do oceny pracy doktorskiej i odpowiada jej charakterystyce.

Rozdział czwarty jest poświęcony opisowi analitycznemu metody sterowania DTC-ST i objaśnia ideę sterowania wektorowego.

W rozdziale piątym jest przeprowadzona analiza metod stosowanych obecnie do redukcji tętnień momentu w układach napędowych z maszynami indukcyjnymi. Wprowadzając do tematyki swej pracy doktorant przedstawia przegląd, już wypróbowanych, algorytmicznych, metod redukcji pulsacji momentu napędowego maszyn indukcyjnych, co wskazuje na dobre rozeznanie w prezentowanej tematyce. Autor przeprowadza dodatkowe rozszerzenie tematyki z uwzględnieniem własnej propozycji podejścia do rozpatrywanego problemu. Wybiera metody sterowania nadające się do proponowanej przez niego modyfikacji i ułatwiające wprowadzenie zamierzonych zmian mających doprowadzić do udowodnienia postawionej tezy.

Rozdział szósty zawiera opis teoretyczny udoskonalonej koncepcji układu i jego modyfikacji na bazie istniejącego algorytmu sterowania wektorowego maszyny indukcyjnej. W tym rozdziale są przeprowadzone symulacje i testy zaproponowanej modyfikacji w środowisku Matlab/Simulink, ukierunkowane na wykazanie osiągalności celu pracy sformułowanego w rozdziale drugim. Zaproponowana przez autora modyfikacja algorytmu sterującego została przebadana w sposób symulacyjny. Badania przeprowadzone na modelu układu napędowego obejmowały tylko stany pracy silnikowej maszyny indukcyjnej i autor nie zajmował się rozpatrywaniem problemów związanych z praktyczną wykonalnością zastosowanego rozwiązania. Przebadana modyfikacja algorytmu DTC otrzymała oznaczenie DTC-MD. Wyniki przeprowadzonych symulacji układu sterowania maszyną indukcyjną metodą DTC– MD zostały porównane z wynikami symulacyjnymi uzyskanymi dla metody DTC na tym samym stanowisku badawczym.

Podsumowanie wyników przeprowadzonych badań jest przedstawione w rozdziale siódmym. Autor stwierdza, że wyniki symulacji otrzymane na zastosowanym stanowisku badawczym potwierdzają słuszność założenia leżącego u podstaw tezy sformułowanej na początku rozważań poświęconych modyfikacji stosowanych obecnie algorytmów sterujących.

### 3. TEMATYKA ROZPRAWY

Tematyka rozprawy dotyczy nowej generacji trakcyjnych układów napędowych wykorzystujących osiągnięcia dzisiejszej Energoelektroniki. Ale zakończył się już okres samej fascynacji techniką przekształtników statycznych. Wzrosła liczba pojazdów wyposażonych w nowoczesne, określane, jako energooszczędne, przekształtnikowe układy napędowe z maszyną indukcyjną. Awaryjne wywołane zniszczeniem elementów półprzewodnikowych nie są już codziennym problemem konserwatorów przekształtnikowych napędów trakcyjnych. Na pierwszy plan wysuwają się teraz problemy wywołane następnym słabym punktem tych układów, problemy z trwałością i niezawodnością maszyny indukcyjnej oraz części składowych mechanicznego traktu przenoszenia mocy. Przez długi okres czasu badania koncentrowały się tylko na części energoelektronicznej i na jej niezawodności, a to doprowadziło do znacznego zaniedbania zjawisk związanych z częścią mechaniczną napędów trakcyjnych. Zjawiska, które dotychczas ukrywały się za problemami z Energoelektroniką stawiają coraz bardziej pod znakiem zapytania stosowane obecnie metody zasilania i sterowania układów przekształtnikowych. Czy uda się skutecznie rozwiązać problem związany z oddziaływaniem pulsacji momentu napędowego maszyny indukcyjnej zasilanej przekształtnikowo na trakt przenoszenia mocy w układach z szerokim zakresem regulacji prędkości obrotowej? Czy da się to osiągnąć w części elektrycznej układu napędowego?, Czy też rozwiązania należy poszukiwać jedynie w odpowiedniej konstrukcji samego traktu mechanicznego?

Prace badawcze i rozwojowe koncentrują się na poszukiwaniu rozwiązania w metodach sterowania maszyn indukcyjnych. Rozwiązanie algorytmiczne byłoby rozwiązaniem najprostszym i najtańszym. Zarówno przemysł jak i uczelnie techniczne koncentrują swe badania na tej tematyce. Rozwiązanie tego obecnie szczególnie palącego problemu z całą pewnością nie nastąpi w postaci niespodziewanego, milowego kroku, ale w postaci małych, ciężko wypracowanych kroczków. Wybrana przez doktoranta tematyka jest poświęcona temu ważnemu problemowi, a osiągnięte przez niego rezultaty mogą być jednym z tych małych kroczków, a może kroków, ale niewątpliwie są krokiem we właściwym kierunku.

### 4. OCENA WYBRANEGO TEMATU PRACY

Tematyka pracy doktorskiej wykonanej przez mgr inż. Marka Dudzika, po uwzględnieniu aktualnego stanu techniki i wiedzy oraz obserwowanych trendów i kierunków rozwojowych w technice trakcyjnych układów napędowych zasługuje na wysoką ocenę. Przemysł napędów trakcyjnych boryka się obecnie z problemami niezawodności części mechanicznej przekształtnikowych napędów trakcyjnych. Nic, więc dziwnego, że w gronie dobrze poinformowanych pracowników naukowych różnych uczelni wyższych, problem ten został zauważony i zaczyna być uwzględniany w prowadzonych badaniach naukowych, nawet, jeśli nie dochodzi w tej dziedzinie do ścisłej współpracy z przemysłem. Fakt, że doktorant skoncentrował się na tej tematyce wynika z jego osobistego zainteresowania postępem w rozwoju przekształtnikowych trakcyjnych układów napędowych i rozeznaniu w wadze, wartości naukowej i ważności rozpatrywanego zagadnienia naukowego.

## 5. OCENA STANU WIEDZY TEORETYCZNEJ I PRAKTYCZNEJ DOKTORANTA

Przeprowadzając badania na zbudowanym samodzielnie stanowisku badawczym, doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej, wyciągania logicznie poprawnych wniosków i właściwej interpretacji otrzymanych rezultatów. Doktorant wykazał dobrą znajomość stosowanych metod sterowania maszyn indukcyjnych zasilanych przekształtnikowo. Przedstawił szczegółowe wyjaśnienia zasady działania algorytmu DSC, IFOC, DFOC, DTC, DTC-ST i DTC-SVM. Analizując cechy omawianych metod sterowania doszedł do słusznego wniosku, że istnieje, wprawdzie obecnie jedynie teoretycznie, możliwość redukcji pulsacji momentu przez odpowiednie dopasowanie do siebie wartości napięcia stałego przykładanego na wejście falownika trójfazowego oraz wytwarzanej w tym falowniku podstawowej harmonicznej napięcia stojanowego. Zakładając wykonalność odpowiedniego sterowania wartością napięcia zasilania obwodu wejściowego falownika potrafił przeprowadzić modyfikację metody sterowania DTC prowadzącą do otrzymania założonych w tezie rezultatów. Szczegółowy opis problemów wytwarzanych w mechanicznej części traktu przenoszenia mocy w przekształtnikowych układach napędowych ukazuje rozeznanie autora w tej tematyce.

## 6. ANALIZA MERYTORYCZNA

Autor bada sterowanie maszyny indukcyjnej zasilanej przekształtnikowo algorytmem sterującym rozłożonym na dwie części: część wyjściową sterującą wektorową modulacją falownika trójfazowego oraz na część wejściową sterującą wartością napięcia na kondensatorze wejściowym falownika trakcyjnego. W tym teoretycznym rozwiązaniu przejawia się wkład własny i oryginalność podjętego zagadnienia naukowo-badawczego. Nad praktyczną realizacją tego rozwiązania potrzebne są dalsze prace.

## 7. UWAGI KRYTYCZNE

Recenzent nie wypowiada się na temat problemów językowych, związanych z werbalnym prezentowaniem wyników przeprowadzonych prac, ze składnią i zawiłościami języka z niezauważonymi „literówkami”, zawiłymi wyjaśnieniami, niewłaściwymi końcówkami ze względu na wieloletni braku kontaktu z codziennym językiem polskim. Z tej przyczyny zostaje podkreślone, że ewentualne problemy językowe lub redakcyjne nie są brane pod uwagę i nie mają wpływu na merytoryczną ocenę recenzowanej pracy doktorskiej.

## 8 UWAGI SZCZEGÓŁOWE

- Użycie wyjaśnienia *idem per idem* w zdaniu na stronie 4 „W pracy przez układ sterowania napięciem zasilania falownika dwupoziomowego rozumie się układ sterujący wartością napięcia zasilania tego falownika”
- Niedostateczne wyjaśnienie zawartości Rys 16. Poprawnie jest przedstawiona trajektoria wektora strumienia skojarzonego stojana  $\psi_s(t)$ , ale naniesienie na tym samym rysunku histerezy momentu jest problematyczne. Autor powinien przedstawić dwa rysunki: jeden dla wektorów wirujących: napięcia i strumieni skojarzonych a drugi dla momentu rozwijanego przez maszynę. Przebiegi na obu rysunkach powinny być powiązane odpowiednio objaśnioną skalą czasową. Histereza momentu nie może być przedstawiona na okręgu.
- Na stronie 11 autor pisze, że: Metoda ta charakteryzuje się również niewielkimi zniekształceniami prądu stojana...”. A czy małe zniekształcenia prądu nie oznaczają także małych pulsacji momentu?

- Na stronie 11 jest wspomniana możliwość stosowania metody DTC-SVM w układzie bezczujnikowym. Czy autor może podać przykład bezczujnikowego napędu trakcyjnego?
- Strona 12. Co autor rozumie pod pojęciem, „dostrojenie metody”?
- Strona 40. Jaki jest związek między  $L_{\mu}$  na stronie 40 i  $L_M$  na stronie 41?
- Na stronie 44 używane są pojęcia wzrostu, spadku wartości chwilowej wektora. Czy można się z tego wytłumaczyć?
- Strona 45. „możliwość konfiguracji kluczy jest wykluczona”. Co to znaczy?
- Rys. 17. „przebiegi czasowe momentów „ – czy nie jest tylko jeden moment?
- Tab. 3. „ustawiony sygnał zadany”. Co to znaczy?
- Rys. 24. Na jaki prąd zwymiarowane są zawory przekształtnika?
- Strona 90. Jak rozumieć zdanie „Wniosek ten nie jest zaskakujący, jednakże biorąc pod uwagę fakt, iż w podanych przedziałach czasu układ sterowania utrzymuje moment elektromagnetyczny maszyny sterowanej w taki sposób, ażeby był on możliwie jak najbliższy momentowi zadanemu”?
- Strona 99. Jak rozumieć zdanie...”, że wartość napięcia zasilania, jaką należy zasilić układ falownika w stanie, w którym prędkość obrotowa maszyny sterowanej jest utrzymywana w okolicach stałej wartości, należy dostosować w zależności od prędkości wirowania wirnika maszyny sterowanej w tym stanie, jak i wartości zadanego momentu elektromagnetycznego tej maszyny”. Czy zawsze moment rozwijany przez maszynę zależy od napięcia?
- Strona 103. Jest odwołanie do nieoznaczonego jeszcze przypadku „c”
- Od strony 100 Autor często używa zwrotu ”zadanej dostosowanej wartości”. Co autor ma na myśli?
- Strona 110. Co oznaczają „porty zasilania”?
- W rozdziale 6.4.3 autor wprowadził odnośnik, który spowodował powtórny wydruk rozdziału 3.
- W całej pracy znajduje się błędy robione przez niedoświadczonego użytkownika programów OFFICE firmy Microsoft. Niepoprawnie wprowadzone odnośniki spowodowały min powtórny wydruk niektórych stron pracy. Z tej przyczyny podana na początku recenzji liczba 177 nie odpowiada rzeczywistej liczbie stron pracy doktorskiej.

## 9. OSIĄGNIĘCIE CELU ROZPRAWY

Teza pracy, że:

**"istnieje możliwość ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego dla metody DTC poprzez odpowiednie dostosowanie napięcia zasilania falownika dwupoziomowego",**

została udowodniona i cel został osiągnięty.

## 10. OCENA PRACY

Przedłożona praca doktorska jest interesującym i oryginalnym, opartym na wynikach własnych badań i analiz teoretyczno-symulacyjnych opracowaniem naukowym dotyczącym autorskiej koncepcji rozwiązania palących problemów współczesnych, przekształtnikowych napędów trakcyjnych. Praca ta jest w mojej ocenie wstępem do całej serii dalszych badań, które należy przeprowadzić w ścisłej współpracy uczelni z przemysłem. Należy podkreślić, że ma ona obok walorów naukowych walory edukacyjne.

## 11. KONKLUZJA

Praca doktorska mgr. inż. Marka Dudzika otrzymuje ode mnie jednoznacznie pozytywną ocenę. Wnosi ona istotny wkład w rozpoznanie i naukowe przedstawienie problemów występujących w trakcyjnych układach napędowych. Stanowi oryginalne podejście do bardzo aktualnego tematu. Rozprawa potwierdza wysoki poziom ogólnej wiedzy doktoranta i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej. Rezultaty pracy są interesujące i wnioski poprawne. Osobisty wkład doktoranta do rozwoju wiedzy z dziedziny sterowania przekształtnikowych napędów trakcyjnych zasługuje na wyróżnienie.

Praca doktorska mgr. inż. Marka Dudzika pt. **„Analiza możliwości ograniczenia składowej przemiennej momentu elektromagnetycznego w silniku ASM sterowanym wektorowo w napędach trakcyjnych”** spełnia kryteria i wymagania stawiane pracom doktorskim w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku oraz rozporządzeniach z (Dz. U. z 2014 r. poz. 1852 oraz z 2015 r. poz. 149 i 1767) o stopniach naukowych i tytule naukowym w Rzeczypospolitej Polskiej.

**Wnioskuje do Rady Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Grzegorz Skarpetowski