

dr hab. inż. Stefan Brock
Politechnika Poznańska
Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

Poznań, 20 maja 2017 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Skóry
pt.: **Analiza odpornego na uszkodzenia układu sterowania pojazdem
z silnikami PM BLDC**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Skóry z Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej, pod tytułem *Analiza odpornego na uszkodzenia układu sterowania pojazdem z silnikami PM BLDC*. Recenzja została opracowana na zlecenie Pana Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej (pismo W-5/372/2017 z dnia 3 kwietnia 2017 r.) na podstawie dostarczonej rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie mgr. inż. Marcinowi Skórze stopnia naukowego doktora nauk technicznych w zakresie nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika.

2. Charakterystyka formalna pracy

Opiniowana rozprawa doktorska liczy 215 stron druku komputerowego, zawiera 180 rysunków i zdjęć. Rozprawa jest podzielona na 6 rozdziałów merytorycznych, w tym wprowadzenie oraz wnioski i uwagi końcowe. Dodatkowo do pracy dołączono załącznik, w którym przedstawiono charakterystykę układów napędowych wykorzystywanych w badaniach laboratoryjnych. Spis literatury zawiera 94 pozycji, w tym 6 prac autorskich Kandydata. Na początku rozprawy znajdują się wykazy ważniejszych oznaczeń. Praca jest napisana poprawnym językiem, Autor rozprawy nie ustrzegł się jednak drobnych błędów stylistycznych i gramatycznych. Układ pracy nie budzi istotnych zastrzeżeń. Materiały graficzne w pracy są staranne i czytelne, terminologia jest używana poprawnie.

3. Ocena podjętego tematu

Tematem przedstawionej rozprawy jest projekt, konstrukcja i sterowanie układem napędowym w pojeździe elektrycznym z silnikami bezszczotkowymi prądu stałego o wzbudzeniu od magnesów trwałych.

W ostatnich latach obserwuje się bardzo gwałtowny rozwój zastosowań elektrycznych układów napędowych w pojazdach. Dotyczy to zarówno pojazdów dużych, takich jak autobusy miejskie, pojazdów osobowych jak i mniejszych pojazdów takich jak urządzenia transportu bliskiego, rowery czy też wózki inwalidzkie. W pojazdach stosowane są różne typy silników

SB

elektrycznych, ale zwłaszcza w urządzeniach mniejszej mocy dominują napędy z silnikami bezszczotkowymi prądu stałego o magnesach trwałych (PM BLDC).

W publikacjach naukowych z zakresu elektroniki przemysłowej analizuje się zagadnienie niezawodności układów napędowych. Wskazuje się przy tym, że najbardziej zawodne w takim układzie są elementy energoelektroniczne w torze zasilania silnika oraz elementy toru pomiarowego, natomiast silnik z magnesami trwałymi jest wysoce niezawodny. Obserwuje się szybki rozwój teorii i praktyki układów sterowania odpornych na uszkodzenia (*fault tolerant control*).

Zagadnienie sterowania odpornego na uszkodzenia jest ważnym obszarem badań w zakresie energoelektroniki i napędu elektrycznego. Takie metody sterowania mogą zapewnić lepsze właściwości kompletnego napędu. Efektem tych prac są liczne publikacje ukazujące się w czołowych czasopismach z zakresu elektroniki przemysłowej. Przedstawiona rozprawa dobrze wpisuje się w te kierunki badań. Uważam zatem, że zagadnienia podjęte w rozprawie są aktualne i ważne zarówno z poznawczego, jak i z aplikacyjnego punktu widzenia.

4. Zagadnienie naukowe analizowane w rozprawie.

W rozdziale pierwszym rozprawy autor dokonuje przeglądu literatury tematu wykorzystując klucz tematyczny. Przedstawione zostały metody czujnikowego i bezczujnikowego sterowania silników PM BLDC, wskazano przy tym na istniejące wady i główne kierunki badań w zakresie sterowania bezczujnikowego. Autor następnie przedstawia zagadnienie zasilania silników PM BLDC, zwracając uwagę zwłaszcza na rozwiązania redundantne. Ostatnim elementem przeglądu literatury jest przedstawienie metod rozpoznawania wystąpienia stanu awaryjnego. Autor zauważa przy tym, że brak jest w literaturze przedstawienia układów, które mogłyby działać w warunkach występowania jednocześnie uszkodzeń w torze zasilania i w torze pomiarów. Zaprojektowanie i zbadanie takiego układu Autor stawia sobie za cel rozprawy doktorskiej.

W dalszej części rozdziału pierwszego Autor określa cel naukowy i tezę rozprawy. Celem pracy jest opracowanie metody sterowania pojazdem z napędem PM BLDC, zapewniającą odporność na wybrane uszkodzenia, a następnie opracowanie prototypu pojazdu i zaimplementowanie w nim przygotowanych metod sterowania.

Autor rozprawy postawił następującą tezę:

Zastosowanie metod detekcji, identyfikacji i kompensacji uszkodzeń, wykorzystujących dostępne pomiary prądów fazowych i położenia wirnika silnika PM BLDC, umożliwi realizację odpornego na wybrane uszkodzenia układu napędowego pojazdu.

Tak sformułowana teza budzi pewne wątpliwości na gruncie metodologii nauki, gdyż jej falsyfikacja byłaby bardzo trudna. Uważam jednak, że godny podkreślenia jest szeroko zakreślony cel pracy, zawierający zarówno aspekty metodyczne (w postaci opracowania metod sterowania odpornego na uszkodzenia dla wybranej klasy aplikacji) jak i aspekty implementacyjne (w postaci weryfikacji zaproponowanych metod sterowania).

Dla uzyskania celu dysertacji Autor zaproponował przeprowadzenie kolejnych etapów, w ramach których opracowane zostały algorytmy sterowania, zweryfikowane następnie w trakcie badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

5. Przegląd i ocena wartości naukowej rozprawy

Po określeniu celu naukowego rozprawy i przedstawieniu przyjętej metodyki badań w rozdziale 2 Autor przedstawia model matematyczny i symulacyjny układu napędowego z silnikiem PM BLDC. W modelach tych jest możliwość wprowadzenia deterministycznych stanów awaryjnych w układzie zasilania oraz w układzie pomiaru położenia wirnika. Uszkodzenia układu zasilania ograniczono do przerwy w gałęzi z tranzystorem mocy. Autor argumentuje to w ten sposób, że wykrycie zwarcia w tranzystorze mocy możliwe jest tylko przez bardzo szybki rozwiązania sprzętowe, które wykraczają poza przyjęty zakres rozprawy. Dlatego też w pracy zaproponowano ochronę poszczególnych gałęzi przez odpowiednie bezpieczniki. Przepalenie bezpiecznika jest równoważne z wystąpieniem przerwy w obwodzie. W przypadku układu pomiaru położenia przyjęto, że silnik wyposażony jest w czujniki hallotronowe, wykrywające sektorowo położenie wirnika. Analizowano różne warianty uszkodzenia takiego czujnika, odnoszące się do doświadczeń praktycznych. Na podstawie szeregu symulacji określone zostały skutki analizowanych uszkodzeń na działanie kompletnego układu napędowego.

W rozdziale 3 przeprowadzono szerokie badania eksperymentalne, weryfikujące wyniki symulacyjne. Warte podkreślenia jest to, że do badań wykorzystano 3 różne zestawy maszynowe, a elementy sterujące i tor zasilania zostały zaprojektowane i wykonane na potrzeby realizacji dysertacji. Przeprowadzono wybrane badania także dla komercyjnych konstrukcji układu zasilania dla silnika PM BLDC. Badania eksperymentalne rozszerzone zostały także o analizę wibroakustyczną napędu w stanie normalnej pracy i w przypadkach wprowadzonych uszkodzeń.

W rozdziale 4, który stanowi najobszerniejszą część pracy, zaproponowano algorytm odpornego na uszkodzenia sterowania silnikiem PM BLDC. Szczegółowo omówiono zagadnienie detekcji i identyfikacji uszkodzenia czujników położenia wirnika. Zaproponowano zmodyfikowaną wersję algorytmu ZOA, który służy do estymacji położenia wirnika przy błędnym działaniu czujnika. Zaproponowano także procedurę postępowania wykrywającą i identyfikującą uszkodzony tranzystor w przekształtniku zasilającym silnik PM BLDC. Zaproponowano i sprawdzono w praktyce dwa rozwiązania kompensacji takiej awarii: redundantna gałąź falownika i pracę falownika w układzie zredukowanym (z neutralnym punktem zasilania).

Wyniki prac przeprowadzonych na stanowiskach laboratoryjnych pozwoliły na zabranie doświadczeń, które wykorzystano przy konstrukcji i sterowaniu prototypu pojazdu ze sterowaniem odpornym na uszkodzenia. W rozdziale 5 rozprawy omówiono zagadnienia konstrukcyjne i programistyczne związane z prototypem. Przeprowadzono także testy, które wykazały poprawne zachowanie się układu sterowania w przypadku uszkodzeń czujników i elementów energoelektronicznych. Następnie przeanalizowano wpływ tych uszkodzeń na trajektorie ruchu pojazdu.

W podsumowaniu pracy w ostatnim rozdziale 6 Autor dowodzi słuszności postawionej w rozprawie tezy.

Za główne osiągnięcia Kandydata uznać należy:

- opracowanie nowych algorytmów klasy ZOA do pracy napędu z silnikiem o magnesach trwałych w warunkach uszkodzeń czujników pomiarowych,
- opracowanie algorytmów detekcji, identyfikacji i kompensacji uszkodzonych elementów energoelektronicznych w torze zasilania PM BLDC.
- przeprowadzenie badań symulacyjnych w szerokim zakresie, w której ocenie podlegały właściwości układu regulacji,
- wykonanie złożonego mikroprocesorowego systemu sterowania oraz implementacja algorytmów sterowania,
- weryfikację eksperymentalną wybranych struktur regulacji.

6. Wątpliwości i uwagi dyskusyjne

W trakcie lektury rozprawy nasunęło mi się kilka pytań. Większość z nich ma charakter dyskusyjny, dlatego też proszę o odpowiedź na nie w trakcie publicznej obrony.

1. Praca zawiera łącznie 180 rysunków, z czego zdecydowana większość to rysunki złożone z kilku podpunktów. Szacuję, że w pracy jest około 700 ilustracji, a na większości z nich zaznaczono po kilka przebiegów. Tak duży zestaw materiału ilustracyjnego utrudnia percepcję pracy. Wydaje się, że jedną z przyczyn tego stanu rzeczy jest przyjęty w pracy schemat postępowania, w którym większość zadań badana jest dla układu otwartego i dla zamkniętego układu regulacji. Takie podejście nie zostało jednak jednoznacznie podsumowane. Dlatego bardzo proszę o określenie, jakie są różnice w obu wariantach w aspekcie zaproponowanych w pracy rozwiązań.
2. We wzorze 2.9 (także 2.11) występuje niecodzienny zapis definicji równań logicznych, w których symbole nawiązują do rachunku zbiorów. Bardzo proszę o wyjaśnienie użytej symboliki. Czy wartość „D” jest sygnałem logicznym czy ciągłym?
3. Struktury regulacji, przedstawione na rysunku 2.4, wymagają szerszego wyjaśnienia. Czy sygnałem wyjściowym z regulatora prądu jest sygnał o charakterze analogowym czy też dyskretnym (odniesionym do wzoru 2.9). Jaka jest rola bloku „Ogr. Prądu”.
4. Ważnym elementem w pracy jest zagadnienie pomiaru prędkości. Na str. 28 Autor wspomina, że bezpośredni pomiar prędkości można wykonać przy pomocy „enkodera inkrementalnego”. Przy pomocy przetwornika obrotowo – impulsowego zmierzyć można przebytą drogę, i na tej podstawie wyznaczyć wartość średnią prędkości za miniony okres pomiarowy. (Ta sama uwaga dotyczy uwag na stronie 122.) Dalej na str. 49 Autor pisze, że „prędkość wyznaczana na drodze pomiarowej jest nieco opóźniona”. Proszę o wyjaśnienie tego opóźnienia.
5. Dlaczego od wzoru 4.12 autor wprowadza prędkość w obr/min, traktując ją inaczej niż prędkość w rad/s ? W tym samym punkcie dalej autor wprowadza pojęcie „średniej ruchomej”. Czy intencją Autora było określenie prostej średniej kroczącej (ang. *simple*

moving average SMA)? Warto zauważyć, że wyznaczanie SMA sprowadza się do filtru typu FIR o równych współczynnikach. Natomiast podany wzór 4.13 opisuje filtr IIR odpowiadający prostej dyskretyzacji filtru dolnoprzepustowego pierwszego rzędu. Przyjęty przez Autor „parametr uśredniania” opisuje stosunek stałej czasowej filtru do sumy tej stałej czasowej i okresu próbkowania. Proszę także o komentarz do skokowych zmian zarejestrowanych na rysunku 4.54 b.

6. Na str. 30 Autor pisze, że w pewnych stanach awaryjnych „nie będzie prądów zadanych” Bardzo proszę o rozszerzenie, co Autor miał na myśli.
7. Na str. 52 podano, „widać spadek prędkości ..., gdyż zwiększa się okres przebiegu prądu”. Wydaje się, że zwiększenie okresu przebiegu prądu jest skutkiem a nie przyczyną zmniejszenia prędkości.
8. Dla zestawu maszynowego z prądnicą obciążoną rezystancją należało by podać charakterystyki mechaniczne silnika i obciążenia, bo bez tych danych interpretacja danych liczbowych (jak na str. 52) jest utrudniona.
9. Autor na str. 73 proponuje pewien wskaźnik (4.1), odnosząc go do współczynnika kształtu sygnału okresowego. Należy jednak zauważyć, że współczynnik kształtu zwykle definiuje się jako stosunek wartości skutecznej do wartości średniej z sygnału wyprostowanego. Proszę o szerszy komentarz do rys 4.4 w odniesieniu do 4.3. Jak dobierana była liczba próbek do uśredniania.
10. Czy suma mierzonych prądów fazowych, o których mowa na str. 77 jest różna od 0?
11. Jakie są parametry filtru dolnoprzepustowego z rys. 4.30? W komentarzu do rysunków 4.23 i 4.30 Autor podaje, że sterowanie bezczujnikowe generuje wcześniejsze sygnały komutacji niż sterowanie czujnikowe. Dlaczego tak się dzieje?
12. Niedostatecznie opisana jest w pracy koncepcja generowania dodatkowych sygnałów pomocniczych, przedstawiona na rysunku 4.62. Czy rysunek ten jest kompletny?
13. UWAGA DYSKUSYJNA. Autor postawił sobie za cel pracy opracowanie algorytmu działającego na ograniczonych zasobach sprzętowych. Jednak do weryfikacji wykorzystane zostały wydajne procesory STM32F4 rodziny ARM. Czy zatem przyjęte w celu pracy ograniczanie mocy obliczeniowej jest uzasadnione?
14. UWAGA DYSKUSYJNA. Badania trajektorii ruchu pojazdy w rozdziale 5 dotyczyły przypadków, gdy na skutek uszkodzenia napęd koła jeźdnego działał z innymi parametrami niż napęd nieuszkodzony. Pominięto jednak w tych badaniach kierowcę lub nadrzędny układ sterowania (w przypadku pojazdu autonomicznego). Wydaje się, że to właśnie nadrzędny układ sterowania powinien zapewnić poprawną realizację zadanej trajektorii ruchu. Oczywiście jest przecież, że praca napędu w układzie otwartym z różnymi parametrami dynamicznymi (moment maksymalny, czas rozruchu) prowadzić będzie do nieprawidłowego odtwarzania trajektorii.

7. Dodatkowe uwagi krytyczne o charakterze redakcyjnym.

1. Jak zdefiniowana jest „wiarygodność układu napędowego”, wzmiankowana na str. 6?

2. W całej pracy Autor posługuje się nieprecyzyjnym pojęciem dynamiki (w miejsce właściwości dynamicznych) układu regulacji. Autor stosuje przy tym opis jakościowy, na przykład: „duża dynamika”.
3. Podobnie w całej pracy pojawia się określenie „przebieg czasowy”. Zgodnie z definicją słownikową, przebieg jest to „zbiór następujących po sobie kolejno wartości tej samej wielkości fizycznej”, zatem „przebieg czasowy” jest nadmiarowe.
4. Pojęcie „nieruchomy stojan” brzmi niezręcznie.
5. Czy sformułowanie „pojazd ... osobowy i inwalidzki” wynika z powszechnie przyjętych określeń, czy też jest niezręczną konstrukcją Autora?
6. Omawiana na str. 23 dekompozycja modelu symulacyjnego odpowiada raczej paradygmatowi programowania strukturalnego a nie obiektowego.
7. Na str. 46 Autor zastosował nadmierny chyba skrót myślowy, pisząc że „uszkodzenia generowane są na drodze programowej”.
8. Niektóre podpisy pod rysunkami są niejasne, na przykład opis rysunku 3.15.
9. Skrótowe określenie „częstotliwość obrotowa” (str. 60) jest nieprecyzyjne.
10. Jak zdefiniowana jest wielkość z licznika wzoru 4.6?

8. Wniosek końcowy.

Podsumowując powyższe uwagi uważam, że rozprawa doktorskiej mgr. inż. Marcina Skóry pod tytułem: *Analiza odpornego na uszkodzenia układu sterowania pojazdem z silnikami PM BLDC* zawiera oryginalny i wartościowy dorobek naukowy. Zapowiadane tytułem i sformułowane w rozdziale pierwszym cele pracy zostały z powodzeniem osiągnięte. Praca łączy w sobie takie obszary wiedzy technicznej jak: energoelektronikę, teorię sterowania i metody inżynierii informatycznej. Autor wykazał się także dobrym opanowaniem metod badań empirycznych i symulacyjnych, dowodząc umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w zakresie nauk technicznych. Przedstawione uwagi krytyczne, w dużej mierze dyskusyjne, nie podważają tej oceny.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Skóry pod tytułem: *Analiza odpornego na uszkodzenia układu sterowania pojazdem z silnikami PM BLDC* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a także wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej elektrotechnika oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Tym samym, zgodnie z obowiązującą ustawą *O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę szeroki zakres podjętych prac i kompleksowe ujęcie tematyki uważam, że praca doktorska mgr. inż. Marcina Skóry wyróżnia się spośród aktualnie realizowanych prac w dyscyplinie elektrotechnika. Dlatego też stawiam wniosek do Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej o wyróżnienie tej rozprawy.

Stefan Brock