Prof. dr hab. inż. Marian Pasko
Politechnika Śląska Wydział Elektryczny
Instytut Elektrotechniki i Informatyki
44-100 Gliwice ul. Akademicka 10

Gliwice, 21.08.2011 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA w Gliwicach

RECENZJA
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Romana Niestroja

pt. „Analiza porównawcza wybranych układów odtwarzania zmiennych stanu i momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego"

1. WSTĘP

Podstawę opracowania niniejszej recenzji stanowi zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Lesława Topór-Kamińskiego wynikające z uchwały Rady Wydziału z dnia 28.06.2011 r.

2. OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

2.1. Ocena tematyki i celów rozprawy

Rozprawa stanowi wynik badań analitycznych, symulacyjnych i laboratoryjnych prowadzonych przez mgr inż. Romana Niestroja, dotyczących zastosowania układów odtwarzania zmiennych stanu, które wykorzystywane są w budowie tzw. bezczujnikowych układów sterowania silnika indukcyjnego. Przez „układy odtwarzania zmiennych stanu" doktorant nazywa układy, które jednocześnie odtwarzają strumienie magnetyczne stojana i wirnika oraz prędkość silnika. Doktorant badał układy odtwarzania, które należą do grupy układów adaptacyjnych nazywanych prądowymi estymatorami MRAS (ang.: *Model Reference Adaptive System*). Są to stosunkowo nowe, złożone układy odtwarzania, których opis jest rozwijany w literaturze polskiej i światowej w ostatnich latach. Wszystkie badane przez autora rozprawy realizacje prądowego estymatora MRAS mają podobną strukturę.

Badania, które doktorant przeprowadził skupiają się przede wszystkim na analizie stabilności, odporności na zakłócenia sygnałów wejściowych, odporności na odchyłki i błędy identyfikacji parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego. W odróżnieniu od badań prezentowanych dotychczas w literaturze przedmiotu, w ramach recenzowanej pracy w badaniach uwzględniano jednoczesne odchyłki lub błędy identyfikacji wszystkich parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego, a uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej. W trakcie badań doktorant wykorzystuje różnorodny aparat

matematyczny, metody znane z teorii sterowania oraz opracowane programy w środowiskach Mathcad oraz Matlab. Uzupełnieniem badań analitycznych i obliczeniowych były badania laboratoryjne, przeprowadzone w układzie multiskalarnego sterowania silnika indukcyjnego o mocy 3 kW. Badania te przeprowadzono w ramach nawiązanej kilka lat temu intensywnej współpracy z Katedrą Automatyki Napędu Elektrycznego na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej.

Problematyka obejmująca badania w tym zakresie jest bardzo ważna, tak z teoretycznego jak i praktycznego punktu widzenia. Wynika to z następujących powodów:

- we współczesnych, bezczujnikowych układach sterowania silnika indukcyjnego, realizujących tak zwaną optymalizację dynamiczną pracy silnika niezbędna jest bieżąca informacja o składowych wektora przestrzennego strumienia magnetycznego skojarzonego z uzwojeniem stojana lub wirnika oraz o prędkości wału silnika;
- pomiar strumieni magnetycznych skojarzonych z uzwojeniami silnika jest trudny, drogi i wymaga ingerencji w budowę silnika; dlatego w układach sterowania wykorzystuje się odtworzone wartości składowych wektorów przestrzennych strumieni;
- we współczesnych układach sterowania silnika indukcyjnego istnieje tendencja do eliminowania przetworników wielkości mechanicznych;
- w ostatnich trzydziestu latach nastąpił bardzo intensywny rozwój różnych układów odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego; istnieje więc potrzeba dogłębnego poznania specyficznych właściwości tych układów w celu ich porównania, przy wykorzystaniu wielu kryteriów i w sposób jak najbardziej obiektywny.

W recenzowanej rozprawie nie sformułowano tezy. Określono natomiast jeden cel główny jakim jest dogłębna, wielokryterialna analiza porównawcza wybranych realizacji układów odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego oraz pięć celów szczegółowych, wynikających z celu głównego. Są to następujące cele szczegółowe:

- 1. opracowanie metody analizy stabilności wybranych układów odtwarzania zmiennych stanu z uwzględnieniem odchyłek i błędów identyfikacji modelu matematycznego silnika indukcyjnego;
- 2. opracowanie metody analizy odporności na zakłócenia sygnałów wejściowych wybranych układów odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego;
- 3. opracowanie metody analizy odporności wybranych układów odtwarzania zmiennych stanu na odchyłki i błędy identyfikacji parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego;
- 4. wykonanie badań wybranych realizacji układów odtwarzania zmiennych stanu przy wykorzystaniu opracowanych metod oraz opracowanie wniosków;

- 5. wykonanie badań laboratoryjnych wybranych układów odtwarzania zmiennych stanu.

Realizacji poszczególnych celów zostały poświecone główne rozdziały rozprawy.

Podsumowując ten punkt należy uznać, że podjęcie badań przez mgr inż. Romana Niestroja z zakresu tej tematyki i w takim zakresie uważać należy za celowe.

2.2. Ocena strony redakcyjnej

Recenzowana rozprawa liczy 234 strony i obejmuje: część zasadniczą podzieloną na 12 rozdziałów (łącznie 220 stron), dwa załączniki oraz spis publikacji, który zawiera 90, pozycji w tym 12 autorstwa lub współautorstwa Doktoranta. Bibliografia zawiera pozycje prezentujące obecny stan wiedzy z dziedziny badanych w pracy układów odtwarzania zmiennych stanu, a także z matematyki, statystyki oraz teorii sterowania. Uważam, że są to pozycje reprezentatywne dla tematyki rozprawy.

Praca jest bardzo obszerna i nic by nie straciła na wartości, gdyby rozdziały 1-5 zostały napisane skrótowo z częstszymi odnośnikami do literatury. Praca jest napisana przejrzyście, a układ pracy jest prawidłowy. Materiał ilustracyjny jest dobrze dobrany, rysunki są czytelne i dobrze skomentowane. Pewną trudność stwarza analiza wyników prezentowanych na wykresach trójwymiarowych.

W pracy można jednak znaleźć sformułowania żargonowe, nieścisłe pod względem merytorycznym czy w końcu edytorskie. Większość tych uwag przekazałem bezpośrednio doktorantowi i tutaj ich nie przytaczam. Natomiast układ pracy i ocena merytoryczna zostanie szczegółowo omówiona w rozdziale 2.3 niniejszej recenzji.

2.3. Układ pracy i ocena merytoryczna

Recenzowaną pracę można podzielić na dwie główne części: wprowadzenia teoretycznego będącego podstawą do wykonania badań (rozdziały od 1 do 5) oraz opisu realizacji kolejnych celów szczegółowych, sformułowanych w podrozdziale 1.1 (rozdziały od 6 do 11) i podsumowania (rozdział 12).

Rozdział 1 zatytułowany ***„Wstęp"*** stanowi wprowadzenie do części zasadniczej pracy. Obejmuje on między innymi motywację autora do podjęcia badań opisanych w pracy, cel główny oraz cele szczegółowe, próbę usystematyzowania terminologii stosowanej w pracy, spis najważniejszych oznaczeń oraz krótkie rozeznanie literatury przedmiotu. W rozeznaniu literatury przedmiotu doktorant koncentruje się przede wszystkim na estymatorach MRAS i syntezie proporcjonalnych obserwatorów Luenbergera.

W rozdziale 2 zatytułowanym ***„Model matematyczny silnika indukcyjnego"*** doktorant przedstawił uproszczony model matematyczny silnika indukcyjnego w dwóch postaciach: jako układ równań różniczkowych i algebraicznych (podrozdział 2.1) oraz zapisany w przestrzeni stanu przy potraktowaniu prędkości wirnika oraz prędkości wirowania

układu współrzędnych, jako wolnozmiennych parametrów (podrozdział 2.2). Transformację zmiennych stanu opisano w podrozdziale 2.3. Przedstawione modele matematyczne, jak i transformacja są ogólnie znane i prezentowane w literaturze przedmiotu.

W rozdziale 3 ***„Wybrane układy odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego"*** doktorant opisał wybrane układy odtwarzania zmiennych stanu, które służą do budowy estymatorów MRAS. Są to układy znane w literaturze od wielu lat, podrozdział 3.1 - model napięciowy, podrozdział 3.2 - model prądowy strumienia magnetycznego, podrozdział 3.3 - estymator prądu uzwojenia stojana, który jako oddzielny układ nie ma znaczenia praktycznego, ale jest wykorzystywany do budowy estymatorów MRAS, podrozdział 3.4 - dotyczący proporcjonalnego obserwatora Luenbergera. W podrozdziale tym dodatkowo autor opisał zagadnienia związane z transformacją równań proporcjonalnego obserwatora Luenbergera do układu współrzędnych, wirującego z dowolną prędkością. Wnioski zawarte w tym podrozdziale można częściowo uznać za oryginalne osiągnięcie autora, które zostały wykorzystane w dalszej części pracy. Rozdział 3 kończy się podrozdziałem 3.5, który został poświęcony symulatorowi zmiennych stanu.

Rozdział 4 zatytułowany ***„Synteza proporcjonalnego obserwatora Luenbergera"*** doktorant poświęcił w całości syntezie proporcjonalnego obserwatora Luenbergera. W podrozdziale 4.1, który wg mojej opinii wnosi wiele treści oryginalnych autor przedstawił szczegółowo metodę lokowania biegunów opracowaną przez Kubotę i prezentowaną w literaturze przedmiotu. Autor zaprezentował kompletne wyprowadzenia dla tej metody uzupełniając tym samym lukę w literaturze przedmiotu, w której przedstawiane są zazwyczaj tylko końcowe wyniki. Doktorant nie uzasadnia dlaczego zdecydował się wybrać właśnie tę metodę lokowania biegunów krótko wspominając o innych metodach. Proszę o wyjaśnienie w czasie obrony.

W rozdziale 5 zatytułowanym ***„Estymator MRAS"*** doktorant opisuje budowę i zasadę działania estymatorów MRAS. W podrozdziale 5.1 autor opisuje krótko estymatory MRAS znane z literatury. Wykorzystują one do wytworzenia sygnału przestrajania prędkości składowe wektorów przestrzennych strumieni magnetycznych lub sił elektromotorycznych transformacji. W podrozdziale 5.2 autor przedstawia sześć różnych realizacji prądowego estymatora MRAS, który do wytworzenia sygnału przestrajania prędkości wykorzystuje składowe wektora przestrzennego prądu uzwojenia stojana. Prezentowane realizacje zostały opisane w literaturze. Natomiast prądowy estymator MRAS z proporcjonalnym obserwatorem Luenbergera, którego syntezę przeprowadzono metodą optymalizacyjną z wykorzystaniem algorytmu genetycznego – można uznać za rozwiązanie oryginalne, zaproponowane przez zespół naukowy, w którym doktorant recenzowanej rozprawy ma swój wkład. Autor zastosował własny uogólniony opis przedstawionych sześciu realizacji estymatora MRAS. Uogólnienie to zostało wykorzystane w dalszej części pracy. W podrozdziale 5.3 doktorant przeanalizował właściwości sygnału przestrajania prędkości, występującego w estymatorach MRAS. Analiza ta obrazuje zasadę działania prądowego

estymatora MRAS. W podrozdziale 5.4 autor rozprawy opisał własne spostrzeżenia dotyczące znaczenia dla badań zawartych w dalszej części pracy transformacji równań prądowego estymatora MRAS do układu współrzędnych, wirującego z prędkością synchroniczną. W podrozdziale 5.5 autor szczegółowo przeanalizował źródła błędów odtwarzania w badanych estymatorach MRAS, prezentując autorskie uogólnione równanie błędu modelu przestrajanego prądowego estymatora MRAS i omawiając jego składniki.

Rozdział 6 zatytułowany ***„Badanie stabilności estymatora MRAS za pomocą drugiej metody Lagunowa"*** został poświęcony badaniu stabilności wykorzystując drugą metodę Lapunowa dla wybranych trzech spośród sześciu realizacji badanych estymatorów MRAS. Wykorzystana przez autora funkcja Lapunowa pochodzi z literatury nie związanej z napędami elektrycznymi. Wykorzystanie tej funkcji do badania stabilności estymatorów MRAS należy uznać za oryginalny pomysł doktoranta. Analiza pochodnej czasowej tej funkcji, która stanowi podstawę drugiej metody Lapunowa została zawarta w podrozdziale 6.4. W podrozdziałach od 6.5 do 6.7 autor podjął próbę sprawdzenia warunku stabilności wynikającego z pochodnej czasowej funkcji dla trzech różnych wersji mechanizmu adaptacyjnego w estymatorze MRAS lecz nie uzyskał potwierdzenia globalnej stabilności asymptotycznej dla badanych estymatorów. Stawiam pytanie dlaczego doktorant nie odniósł się w żaden sposób do stosowanych przez innych autorów metod badania stabilności?

W kolejnych dwóch rozdziałach (7,8), które cechują się dużą oryginalnością autor przedstawił badania mające na celu analizę stabilności prądowego estymatora MRAS za pomocą pierwszej metody Lapunowa, słusznej dla układów dynamicznych liniowych. Estymator MRAS jest układem dynamicznym nieliniowym.

W rozdziale 7 zatytułowanym ***„Linearyzacja równań estymatora MRAS"*** autor opracował liniową aproksymację jego równań wykorzystując uogólniony opis przedstawiony w podrozdziale 5.2. W podrozdziałach 7.2, 7.3 autor przeanalizował proces linearyzacji równań układów o złożonej strukturze, a wnioski uzyskane w tym podrozdziale autor wykorzystał do opracowania liniowej aproksymacji równań estymatora MRAS. Podrozdział 7.4 zawiera wg mojej opinii opis autorskiej metody wyznaczania parametrów ustalonego punktu pracy silnika indukcyjnego i estymatora MRAS, co jest niezbędnym warunkiem do przeprowadzenia linearyzacji.

W rozdziale 8 zatytułowanym ***„Transmitancja operatorowa zlinearyzowanego estymatora MRAS"*** doktorant zaprezentował zasadę i wyniki badania stabilności prądowego estymatora MRAS dla różnych jego realizacji. W celu przeprowadzenia tych badań autor opisał zlinearyzowany estymator MRAS za pomocą transmitancji operatorowej. Zbadał położenie biegunów jego transmitancji na płaszczyźnie zespolonej, przedstawił wyniki badania stabilności estymatora MRAS z pominięciem odchyłek i błędów identyfikacji parametrów modelu silnika indukcyjnego, wykonanego przy uwzględnieniu zmian w szerokim zakresie parametrów opisujących ustalony punkt pracy. Opis estymatora MRAS za pomocą transmitancji operatorowej Doktorant zweryfikował w badaniach symulacyjnych.

W rozdziale 9 pt. ***„Charakterystyki częstotliwościowe zlinearyzowanego***

estymatora MRAS" doktorant podjął próbę zbadania odporności różnych realizacji prądowego estymatora MRAS na zakłócenia jego sygnałów wejściowych wyznaczając uprzednio zdefiniowane charakterystyki amplitudowe. W celu zweryfikowania poprawności wyznaczenia charakterystyk amplitudowych i zweryfikowania uzyskanych wniosków autor rozprawy zbudował odpowiedni model symulacyjny. W rozdziale 9 zawarto również przykładowe wyniki badań, wykonanych za pomocą tego modelu.

Bardzo ważną część recenzowanej rozprawy doktorskiej stanowią rozdziały 10 i 11. W rozdziale 10 pt. ***"Realizacja praktyczna układów sterowania silnika indukcyjnego z estymatorem MRAS"*** zostały opisane skrótowo wybrane zagadnienia związane z realizacją praktyczną prądowego estymatora MRAS. I tak w podrozdziale 10.1 zaprezentowano równania dyskretne estymatora MRAS w układzie wielkości względnych, natomiast w podrozdziale 10.2 opisano metodę numeryczną, stosowaną do całkowania równań dyskretnego estymatora MRAS w systemie cyfrowym. Zastosowano metodę Rungego-Kutty czwartego rzędu. Dlaczego taką złożoną metodę, czy nie można stosować metod mniej złożonych? Proszę o wyjaśnienie. W podrozdziale 10.3 przedstawiono opis stanowiska wykorzystywanego w badaniach laboratoryjnych, które jak już wspominałem były przeprowadzone w Katedrze Automatyki Napędu Elektrycznego na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej.

W rozdziale 11 zatytułowanym ***„Badania estymatora MRAS"*** Doktorant przedstawił wyniki badania stabilności oraz odporności na zmiany parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego dla różnych realizacji estymatora MRAS. Badania przeprowadzono z uwzględnieniem jednoczesnych odchyłek lub błędów identyfikacji wszystkich parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego w szerokim zakresie zmian parametrów opisujących ustalony punkt pracy (podrozdziały 11.1-11.5). Natomiast w podrozdziale 11.6 zawarto przykładowe wyniki badań laboratoryjnych układu multiskalarnego sterowania silnika indukcyjnego, zawierającego estymator MRAS. Dla każdego badania autor przedstawił algorytm opracowanego programu komputerowego a wyniki zostały opatrzone obszernym komentarzem. Wyniki przedstawione w rozdziale 11 należy uznać za oryginalne osiągnięcia Doktoranta.

Najważniejsze wnioski, uzyskiwane na kolejnych etapach realizacji celów szczegółowych niniejszej pracy, autor zebrał w rozdziale 12.

Przyjęte i zastosowane w pracy metody badawcze są właściwe dla analizowanego problemu, a opracowane programy i modele symulacyjne są dobrym narzędziem badawczym, które zostały zweryfikowane na stanowisku laboratoryjnym.

Za najważniejsze osiągnięcia doktoranta wg mojej opinii należy uznać:

- przeprowadzenie analizy stabilności w oparciu o pierwszą metodę Lapunowa dla wybranych realizacji prądowych estymatorów MRAS z uwzględnieniem linearyzacji;
- wypracowanie wniosków dotyczących transformacji równań proporcjonalnego obserwatora Luenbergera, odtwarzającego strumienie magnetyczne stojana i wirnika do prostokątnego układu współrzędnych wirującego z dowolną prędkością oraz

wypracowanie wniosków dotyczących linearyzacji układu o złożonej strukturze, jakim jest prądowy estymator MRAS;

- zdefiniowanie i wyznaczenie charakterystyk amplitudowych różnych realizacji prądowego estymatora MRAS, obrazujących wpływ zakłóceń sygnałów wejściowych na jakość odtwarzania zmiennych stanu;
- opracowanie statystycznych metod analizy stabilności i analizy błędów odtwarzania zmiennych stanu w obecności jednoczesnych odchyłek lub błędów identyfikacji parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego, a także wykonanie badań wykorzystujących opracowane metody.

2.4. Uwagi krytyczne i do dyskusji

Oprócz odpowiedzi na pytania sformułowane w ocenie merytorycznej prosiłbym o ustosunkowanie się do następujących zagadnień.

1. W przyjętych przez autora modelach matematycznych silnika indukcyjnego zmiennymi stanu są strumienie magnetyczne stojana i wirnika lub strumień magnetyczny wirnika i prąd uzwojenia stojana. Natomiast stosowana przez autora nazwa „układ odtwarzania zmiennych stanu" odnosi się również do układów odtwarzających prędkość obrotową. W pracy nie wyjaśniono tej nieścisłości. Proszę o komentarz.
2. Formułując cele szczegółowe autor mało precyzyjnie wskazał, czy odnoszą się one do układów odtwarzania pracujących autonomicznie, czy jako podzespoły układów sterowania silnika indukcyjnego. Proszę wskazać, które cele szczegółowe zostały osiągnięte w odniesieniu do układów odtwarzania pracujących autonomicznie, a które w odniesieniu do układów odtwarzania pracujących jako podzespoły układów sterowania?
3. Autor nie podaje jaki był „koszt" przeprowadzenia badań, których wyniki opracowywano statystycznie. Czy te badania mają sens biorąc pod uwagę czas ich trwania i konieczność wykorzystania komputera o prawdopodobnie dużej mocy obliczeniowej?
4. Wyniki przedstawione w podrozdziałach od 11.3 do 11.5 dotyczą wyłącznie pracy silnikowej silnika indukcyjnego. Badania byłyby bardziej kompletne, gdyby autor rozprawy przedstawił wyniki również dla pracy generatorowej.
5. Na rysunkach prezentujących wyniki badań laboratoryjnych nie przedstawiono wykresu błędu regulacji prędkości, który jest wyznacznikiem jakości regulacji w układzie sterowania z zamkniętą pętlą regulacji prędkości.

3. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując uważam, że recenzowana rozprawa doktorska zawiera bogaty i wartościowy dorobek merytoryczny autora. Autor wykazał się wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej elektrotechnika oraz dodatkowo z zakresu maszyn elektrycznych napędów elektrycznych, automatyki, teorii sterowania i zastosowań informatyki. Wykonał badania: teoretyczne, symulacyjne, laboratoryjne, przez co wniósł wkład do szeroko rozumianej elektrotechniki. Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz umiejętnością pracy zespołowej. Praca zawiera oryginalne osiągnięcia autora w dziedzinie metod analizy właściwości układów odtwarzania zmiennych stanu. Wnioski wypracowane przez autora w trakcie realizacji kolejnych celów pracy także należy uznać za oryginalne. Recenzowana praca przedstawia oryginalne i kompleksowe rozwiązanie problemu naukowego, sformułowanego w tytule oraz celu głównym pracy. O wartości rozprawy doktorskiej świadczą następujące fakty:

- aktualna tematyka i aktualne zastosowane metody badawcze;
- elementy oryginalności zawarte w pracy;
- szczegółowe i obszerne wyniki oraz wnioski, potwierdzające realizację założonych celów.

Stwierdzam zatem, że recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Roman Niestroja pod tytułem **„Analiza porównawcza wybranych układów odtwarzania zmiennych stanu i momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego"** spełnia warunki określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.