

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Krzemiński  
Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 31.08.2011



## Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Romana Niestroja

### pt. **Analiza porównawcza wybranych układów odtwarzania zmiennych stanu i momentu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego**

Recenzja wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej.

#### **1. Tematyka rozprawy**

Tematyka rozprawy obejmuje badania układów odtwarzania zmiennych stanu maszyn indukcyjnych. Rozpatrzono układy z modelem referencyjnym (ang. Model Reference Adaptive System, MRAS).

Pomimo wielu lat rozwoju teorii obserwatorów mało jest opracowań dotyczących metod analizy właściwości układów MRAS. Zwykle autorzy ograniczają się do określenia struktury i warunków stabilności obserwatora bez analizy wpływu zakłóceń i dokładności określenia parametrów obiektu. Podjęta przez Autora tematyka odporności MRAS na odchyłki parametrów i zakłócenia jest aktualna zwłaszcza w zastosowaniu do maszyny indukcyjnej. Badania odporności układów na zakłócenia i zmiany parametrów MRAS są złożone od strony obliczeniowej i wymagają zastosowania metod numerycznych, rozbudowanego oprogramowania i określenia kryteriów doboru wzmocnień.

Na tle stanu techniki i badań można zatem stwierdzić, że podjęta przez Autora tematyka rozprawy jest aktualna pod względem naukowym i ważna dla zastosowań praktycznych.

## 2. Ogólna analiza merytoryczna rozprawy

Celem pracy jest analiza porównawcza wybranych układów MRAS przy zastosowaniu analizy opartej na wielu kryteriach. Badane układy są znane z literatury. Autor skoncentrował się na badaniu stabilności wybranych układów MRAS, ich odporności na zakłócenia sygnałów wejściowych i odporności na błędy identyfikacji parametrów silnika indukcyjnego.

Zrealizowanie celu pracy wymagało opracowania oprogramowania służącego do wykonywania symulacji cyfrowych oraz oprogramowania służącego do automatyzacji badań. Oprogramowanie zostało wykonane w ramach prowadzonych badań i stanowi istotną część wkładu własnego Autora. Wykonanie oprogramowania wraz z zaimplementowanymi algorytmami wymagało dużej wiedzy, stosowania oryginalnych rozwiązań i opanowania złożonych narzędzi programistycznych.

Podstawą przeprowadzonych badań są modele matematyczne silnika indukcyjnego. Autor przeprowadził niezbędne rozważania uzyskując znany model silnika, w którym wprowadził wybrane własne oznaczenia wykorzystywane w dalszej części pracy. Takie podejście jest właściwe, jednak pewna nadmiarowość oznaczeń, będąca wynikiem dążenia Autora do perfekcji zapisu, utrudnia czytanie pracy i analizę rezultatów. Dalszym utrudnieniem występującym przy czytaniu pracy jest wprowadzenie oznaczeń zmiennych, które nie występują w spisie oznaczeń.

Model matematyczny silnika indukcyjnego został wykorzystany do prezentacji modelu napięciowego, modelu prądowego, estymatora prądu uzwojenia stojana i proporcjonalnego obserwatora Luenbergera wykorzystywanych w badanych w pracy układach odtwarzania zmiennych. Otrzymane struktury są znane, ale ich prezentacja została rozbudowana o rozważania dotyczące zmiany układu współrzędnych, co znalazło zastosowanie w dalszej części pracy.

Autor obszernie przedstawił zagadnienie doboru współczynników wzmocnienia obserwatora proporcjonalnego. Pokazał zależność położenia biegunów od prędkości kątowej wirnika. Zaproponował zastosowanie algorytmu genetycznego do doboru współczynników wzmocnienia obserwatora. Otrzymał stałe wartości współczynników obserwatora zapewniające minimalizację wybranych wskaźników przy szerokim zakresie zmian prędkości kątowej wirnika. Zastosowanie tak efektywnego narzędzia, jakim jest algorytm genetyczny, umożliwiłoby również ustalenie ograniczonego zakresu zmienności położenia biegunów obserwatora przy zmianach prędkości kątowej wirnika przy założeniu zależności współczynników wzmocnienia od punktu pracy.

Układy MRAS poddane analizie zostały zaprezentowane w rozdziale 5. Układy te są znane z literatury, zwykle przy innym zapisie w porównaniu z zastosowanym w pracy. Wobec rozważania sześciu układów wskazane byłoby zamieszczenie tablicy, w której w sposób skrótowy byłyby pokazane poszczególne struktury i bez uogólnień wskazane algorytmy adaptacyjnego wyznaczania prędkości kątowej wirnika. Ułatwiłoby to odwołania w dalszej części pracy, gdyż roli takiej nie pełnią rysunki struktur.

Na rysunku 5.3.2 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla otwartej pętli mechanizmu adaptacyjnego. Nie podano, jaka jest odchyłka pomiędzy prędkością rzeczywistą a odtwarzaną. Nie jest jasny cel takich badań, nie wiadomo jak zmieniana jest prędkość wirnika w modelu dostrajanym.

Nie jest jasny cel przedstawienia rozdziału 5.5. Oczywiście możliwe jest zapisanie ogólnych równań błędu odtwarzania zmiennych niezależnie od konkretnej realizacji, jednak nie wnosi to żadnego efektu poznawczego, ani nie ułatwia analizy tekstu pracy.

Rozdział 6 napisany jest w sposób nieprzejrzysty. Trudno prześledzić ogólne zależności, zwłaszcza że w teście występują liczne odwołania do poprzednich wyrażeń i specyficzne oznaczenia wprowadzone przez Autora.

Wniosek o braku możliwości udowodnienia globalnej stabilności układów MRAS przedstawiony w rozdziale 6 wydaje się oczywisty. Istnieją bowiem punkty pracy maszyny indukcyjnej, w których nie ma możliwości jednoczesnej estymacji wektora strumienia wirnika i prędkości wirnika. Stąd próby udowodnienia globalnej stabilności układów MRAS w sposób ogólny są skazane na niepowodzenie. Ponadto niepowodzenie zastosowania drugiej metody Lapunowa do wykazania stabilności układu dynamicznego nie świadczy o tym, że ten układ jest niestabilny, ale o tym, że Autor rozważań nie znalazł odpowiedniej postaci funkcji Lapunowa.

Podrozdziały 7.1 i 7.2 są zbędne ze względu na elementarny, podręcznikowy charakter rozważań dotyczący linearyzacji równań układu dynamicznego.

Badania stabilności zlinearyzowanego układu MRAS Autor przeprowadził dla modelu silnika, w którym występują wartości zmiennych w punkcie pracy. Najprościej wartości zmiennych w punkcie pracy ustalonej silnika indukcyjnego można wyznaczyć przyjmując prędkość, moment obciążenia i wartość wektora strumienia jako punkt wyjścia do obliczeń. Przyjęty przez Autora zbiór wielkości, od których zależy punkt pracy, wymaga numerycznego rozwiązywania układu równań nieliniowych, co jest pracochłonne i uciążliwe.

Autor badał stabilność układów MRAS stosując metodę, w której konieczne jest określenie transmitancji. Autor przedstawił wyniki badań w postaci wykresów położenia

biegunów równania charakterystycznego stosując interesujący sposób prezentacji wyników z wykorzystaniem kolorów dla pokazania zmienności prędkości kątowej wirnika.

Wykresy położenia biegunów pokazane na rysunkach 8.2.7 do 8.2.12 nie mają wartości przy analizie układu napędowego lub generatorowego, gdyż przy stałej częstotliwości zasilania tak szeroki zakres zmian prędkości wirnika, jaki przyjęto na wykresach, nie występuje. Istnieje jednak pewne zastosowanie tych wyników, zwłaszcza w formie pokazanej na rysunkach 8.3.1 i 8.3.2, do opracowania tak zwanego lotnego startu, czyli włączania układu przekształtnikowego przy wirującym wirniku silnika.

Wyniki badań symulacyjnych pokazane na rysunkach 8.4.2 – 8.4.6 pokazano w zakresie bardzo małych zmian odtwarzanych wielkości. Zmiany na szóstej pozycji są w rzeczywistym układzie nieistotne. Czy badane były właściwości układu MRAS z uwzględnieniem zasilania silnika z falownika sterowanego metodą modulacji szerokości impulsów? Jakie są przy takim zasilaniu chwilowe zmiany napięcia i prądu?

Autor przedstawił analizę charakterystyk częstotliwościowych zlineryzowanych układów MRAS. Wyniki badań mogą znaleźć zastosowanie w specjalnych rozwiązaniach układów diagnostycznych silnika indukcyjnego i napędzanego obiektu.

Autor przedstawił w rozdziale 11 obszernie wyniki badań właściwości układów MRAS przy zaburzeniach sygnałów wejściowych oraz przy odchyleniach parametrów silnika użytych w modelu. Zakres wyników pozwala na ocenę właściwości różnych realizacji układów MRAS i ewentualny wybór najlepszej do określonych zastosowań. Jakość prezentacji wyników wskazuje na znakomite opanowanie przez Autora narzędzi badawczych.

Pewne zastrzeżenia budzi prezentowanie błędu odtwarzania prędkości jako procentu wartości w punkcie pracy. Prowadzi to do pokazywania, że dla małych prędkości procentowe błędy odtwarzania są bardzo duże, nawet 100%, co nie jest wygodne do interpretacji.

### **3. Ocena wyników badań eksperymentalnych**

Badania eksperymentalne, których wyniki przedstawiono w rozdziale piątym, przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym znajdującym się w Politechnice Gdańskiej przy udziale dr inż. Arkadiusza Lewickiego. Została przy tym nawiązana intensywna współpraca pomiędzy Autorem pracy a Katedrą Automatyki Napędu Elektrycznego na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki PG. Rezultatem współpracy są wspólne referaty w czasopiśmie, w których współautorem jest A. Lewicki. Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem procesora Sharc firmy Analog Devices i systemu oprogramowania narzędziowego umożliwiającego bieżącą kontrolę i monitoring wszystkich zmiennych użytych

w programie układu regulacji. Stanowisko badawcze oraz zastosowana technologia zapewniają bardzo wysoki poziom przeprowadzonych badań.

Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych potwierdziły rezultaty otrzymane na drodze symulacji. Jest to istotne, gdyż w modelach symulacyjnych zastosowano uproszczenia, w tym pominięto układ generowania napięcia za pomocą falownika.

#### 4. Uwagi szczegółowe

20<sub>13</sub> – co znaczy „transformacja dwuosiowa fazowego układu współrzędnych do układu prostokątnego x-y-0”?

27<sub>9</sub> – oznaczenie transformacji układu współrzędnych przez  $T_{x_1 \rightarrow x_2}$  jest nadmierne.

Autor konsekwentnie wprowadza oznaczenie  $T_{4(x_1-y_1) \rightarrow (x_2-y_2)}$  (36<sub>1</sub>), które jest już dużą przesadą. Poza tym dokładna analiza oznaczenia  $T_{4(x_1-y_1) \rightarrow (x_2-y_2)}$  prowadzi do wniosku, że jest ono błędne.

42<sup>1</sup> – współczynniki  $k_1$  i  $k_2$  są macierzami, co nie zostało uwzględnione przez odpowiednie oznaczenie.

42<sub>8</sub> – występuje niezgodność wymiarów prawej i lewej strony równania. Wprawdzie Autor w dalszej części wywodu wyjaśnia, że pierwiastki równania charakterystycznego zawierają po dwa pierwiastki, jednak takie podejście można uznać jedynie za indywidualną twórczość Autora. W teorii sterowania znane są określone metody oznaczeń, które Autor powinien pokornie respektować.

53<sup>8,9</sup> – Autor podał w sposób bardzo ogólny zależności do wyznaczania wielkości  $\hat{w}_{(ref)}$  i  $\hat{w}_{(adapt)}$  jako statyczne funkcje prądów i napięć. W dalszej części pracy nigdzie takie zależności nie występują, więc uogólnienie jest zbędne.

54<sub>4</sub> – co oznacza określenie „siła elektromotoryczna transformacji”? Siła elektromotoryczna w maszynie występuje obiektywnie i niezależnie od transformacji układu współrzędnych.

55<sup>14</sup> – nie ma podziału układów całkujących na klasyczne i jakieś inne.

56<sub>3</sub> – nie ma potrzeby wprowadzania oznaczenia wektora  $\hat{\psi}_{r1}$ .

57<sub>1</sub> – elementy macierzy z potrójnymi indeksami są, jak wynika z dalszych rozważań, macierzami. Przyjęty sposób oznaczania macierzy normalną czcionką utrudnia czytanie tekstu.

74<sup>3</sup> – wyrażenie (6.1.1) jest niezrozumiałe. Nie jest to definicja stabilności.

74<sup>13</sup> – wprowadzenie oznaczenia  $\zeta x$  nie ma żadnego matematycznego uzasadnienia.

Wprowadza jedynie dodatkową komplikację utrudniającą czytanie.

78<sub>8</sub> – i dalej - określenie „pochodna czasowa” jest nieprawidłowe.

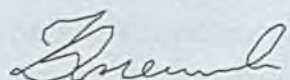
### **5. Uwagi redakcyjne**

Praca zawiera szereg niedociągnięć utrudniających czytanie. Wiele stwierdzeń powtarzanych jest kilkakrotnie. Znaczna część pracy mogłaby być napisana w krótszy, zwięzły sposób. Często pojawiają się odwołania do wzorów lub wyników z poprzednich rozdziałów. W wielu miejscach pracy występują powtórzenia wyjaśnień lub stwierdzeń.

Styl redakcji odbiega w wielu miejscach od przyjętego w opracowaniach naukowych. Przykładem jest opis równań estymatora prądowego podany na stronach 55 i 56. W literaturze przyjęto schemat: równanie (...), gdzie (...). Autor stosuje opis równania, a następnie wypunktowanie opisów równań. Jest to pewne utrudnienie czytania dla osób, które przeanalizowały dużą ilość standardowych tekstów i nie powinno być wprowadzanie w rozprawie doktorskiej.

### **6. Ocena ogólna i wniosek końcowy**

Autor wykazał dużą wiedzę teoretyczną z zakresu elektrotechniki i automatyki oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i pracy zespołowej, co świadczy o spełnieniu wymagań stawianych przy nadawaniu stopnia naukowego doktora. Praca zawiera oryginalne osiągnięcia Autora w zakresie zastosowania układów MRAS do odtwarzania zmiennych stanu maszyny indukcyjnej. Dużym osiągnięciem jest opracowanie metod badania właściwości układów MRAS. Wnioski wyciągnięte z badań dotyczą konkretnych rozwiązań, mogą być jednak uogólnione na inne rozwiązania. Rozprawa jest podsumowaniem istniejącego stanu wiedzy w zakresie wybranej klasy układów MRAS zastosowanych do odtwarzania zmiennych maszyny indukcyjnej i zawiera wiele oryginalnych i interesujących wyników. Uwagi krytyczne przedstawione wyżej mają charakter dyskusyjny i nie pomniejszają wartości pracy. Stwierdzam, że praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim określone w Art. 11 Ustawy „O tytule naukowym i stopniach naukowych” i stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony.



(prof. dr hab. inż. Zbigniew Krzemiński)