



O C E N A

rozprawy doktorskiej mgra inż. Tadeusza Białonia
pt. "ZASTOSOWANIE OBSERWATORÓW LUENBERGERA DO ODTWARZANIA
ZMIENNYCH STANU SILNIKA INDUKCYJNEGO"

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego
Politechniki Śląskiej zawarte w piśmie nr RE 585/09/10 z dnia.16.03.2010r.

1. Przedmiot rozprawy

W wektorowych metodach sterowania silników prądu przemiennego konieczna jest znajomość wielkości wewnętrznych silnika - strumieni magnetycznych sprzężonych z uzwojeniami stojana lub wirnika. Ich pomiar bezpośredni jest kosztowny, wymaga ingerencji w konstrukcję silnika i dlatego układy sterowania wektorowego bazują na wartościach strumieni odtwarzanych. Ponadto we współczesnym napędzie istnieje tendencja do eliminowania przetworników wielkości mechanicznych – prędkości, drogi kątowej wału silnika. Wielkości te również można odtworzyć na podstawie łatwo mierzalnego napięcia i prądu zasilania silnika. Zastosowanie odtworzonej prędkości w układzie regulacji wiąże się wprawdzie z pogorszeniem precyzji regulacji, ale zachowane są inne korzyści sterowania napędem w układzie zamkniętym, przede wszystkim poprawa jego właściwości dynamicznych i zwiększenie odporności na zakłócenia.

Oceniana rozprawa obejmuje analizę teoretyczną, badania symulacyjne oraz badania laboratoryjne obserwatorów Luenbergera do odtwarzania niedostępnych zmiennych stanu silnika indukcyjnego. Rozważania analityczne prowadzone są w sposób ogólny dla biliniowego modelu obiektu regulacji. Autor rozważa tradycyjny obserwator proporcjonalny oraz obserwator całujący i obserwator z dodatkowymi integratorami. Odtwarzanymi zmiennymi stanu są składowe wektorów przestrzennych strumieni skojarzonych z uzwojeniami stojana i wirnika oraz prędkość obrotowa silnika. Do odtwarzania prędkości obrotowej wykorzystano rozszerzony obserwator Luenbergera oraz estymator typu MRAS. W oparciu o przyjęte kryteria Autor dokonał doboru parametrów rozważanych typów obserwatorów metodą analityczną i przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego. Badania symulacyjne obserwatorów prowadzono w środowisku Matlab-Simulink, a badania laboratoryjne zrealizowano dla napędu z silnikiem o mocy znamionowej 3kW pracującym w multiskalarnym układzie sterowania.

Recenzowana rozprawa liczy 203 strony i obejmuje: zasadniczą część pracy podzieloną na 6 rozdziałów (łącznie 174 strony), spis publikacji oraz dwa załączniki.

Doktorant przeprowadził w pracy syntetyczny przegląd publikacji dotyczących aktualnego stanu wiedzy na temat teorii i zastosowań obserwatorów Luenbergera w układach napędowych. Bibliografia zawiera 90 pozycji, w tym 16 autorstwa lub współautorstwa Doktoranta. Uważam, że są to pozycje reprezentatywne dla tematyki rozprawy, uwzględniają najnowsze publikacje na temat odtwarzania niedostępnych zmiennych stanu i bardzo dobrze świadczą o rozeznaniu problemu przez Doktoranta.

2. Ocena tematu i tezy rozprawy

Uważam, że temat rozprawy jest bardzo aktualny i ważny ze względów zarówno poznawczych jak i praktycznych. Wynika to między innymi z następujących powodów:

- w wektorowych układach sterowania maszyn asynchronicznych niezbędna jest bieżąca informacja o składowych wektora przestrzennego strumieni skojarzonych z uzwojeniami stojana lub wirnika,
- pomiar strumieni skojarzonych z uzwojeniami silnika jest skomplikowany, drogi i wymaga ingerencji w konstrukcję silnika. Z tego powodu wykorzystuje się w układach sterowania wektorowego odtworzone wartości strumieni,
- coraz powszechniej stosowane są tzw. bezczujnikowe układy sterowania napędów elektrycznych wymagające odtworzenia wartości prędkości silnika,
- jakość procesu regulacji w dużej mierze zależy od precyzyjnej informacji o stanie obiektu regulacji i dlatego ważny jest problem odtwarzania niedostępnych pomiarowo zmiennych stanu z jak najmniejszym uchybem,
- w ostatnich latach rozwinięta została teoria obserwatorów Luenbergera dla liniowych obiektów sterowania i nie wszystkie osiągnięcia w tej dziedzinie zostały aplikowane i przebadane dla obiektów biliniowych, w szczególności dla silników indukcyjnych.

W treści rozprawy sformułowano trzy tezy:

1. *Zastosowanie nowych typów obserwatorów Luenbergera do odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego spowoduje poprawę jakości odtwarzania zmiennych stanu oraz jakości regulacji układów sterowania w których obserwatory te zostaną zastosowane.*
2. *Udoskonalenie istniejących oraz wprowadzenie nowych metod i kryteriów doboru parametrów obserwatorów pozwoli na lepsze wykorzystanie możliwości tłumienia błędów odtwarzania zmiennych stanu oferowanych przez obserwatory proporcjonalne oraz inne typy obserwatorów Luenbergera.*
3. *Zastosowanie podczas doboru parametrów obserwatora kryteriów uwzględniających przyczyny powstawania błędów odtwarzania zmiennych stanu, jako uzupełnienie kryteriów związanych z tłumieniem tych błędów, pozwoli na zwiększenie odporności obserwatorów na zakłócenia i odchyłki parametrów obiektu obserwowanego.*

Uważam, że tezy 2 i 3 zostały w pracy udowodnione, choć mam zastrzeżenia do sformułowania tezy 2 – niepotrzebne jest w niej słowo „oferowanych”. Natomiast teza nr 1 jest nieprecyzyjna. Nie sformułowano w niej w stosunku do jakich innych układów czy metod odtwarzania następuje poprawa jakości odtwarzania: czy chodzi tylko o tradycyjne obserwatory Luenbergera czy odnosi się to również do innych układów i metod odtwarzania niedostępnych zmiennych stanu. W rozprawie udowodniono polepszenie jakości odtwarzania niedostępnych zmiennych stanu silnika indukcyjnego przy zastosowaniu nowych typów obserwatorów Luenbergera w porównaniu z obserwatorem proporcjonalnym. Nie badano natomiast w pracy właściwości innych metod odtwarzania.

3. Przegląd i ocena treści rozprawy

Oceniana rozprawa składa się z 6 rozdziałów zasadniczych, dwóch załączników oraz bibliografii. Rozdział pierwszy stanowi dobrze opracowane wprowadzenie do części zasadniczej pracy i obejmuje:

- motywację pracy, jej tezy i cele,
- próbę usystematyzowania terminologii związanej z tematem pracy,
- przegląd i analizę literatury dotyczącej tematyki pracy.

Najważniejsza dla oceny pracy jest zawartość rozdziałów 2-5. W rozdziale 2.1 Autor sformułował biliniowy model silnika indukcyjnego, w którym założono, że prędkość wirnika jest wolnozmienna w porównaniu z innymi zmiennymi stanu i potraktowano ją jako element wektora sterowania silnika obok składowych napięcia zasilania w osiach α i β . Jako zmienne stanu przyjęto składowe wektorów przestrzennych strumieni skojarzonych z uzwojeniami stojana i wirnika, a wektor wyjścia zawiera składowe prądu uzwojeń stojana.

W rozdziale 2.2 przeanalizowano znany z aplikacji dla silnika indukcyjnego obserwator proporcjonalny Luenbergera, natomiast w rozdziałach 2.3 i 2.4 zaprezentowano nie wykorzystywane dotąd do odtwarzania zmiennych stanu silnika indukcyjnego obserwator całkowy i obserwator z dodatkowymi integratorami. Rozważania analityczne prowadzone są w sposób ogólny dla biliniowego modelu obiektu regulacji. Dla każdego obserwatora sformułowano model matematyczny oraz równanie błędu. Wykazano, że równanie błędu każdego z opisanych obserwatorów da się sprowadzić do postaci równania błędu obserwatora proporcjonalnego. Określono wpływ zakłóceń spowodowanych odchyłkami parametrów obiektu obserwowanego, oraz zakłóceń nakładających się na wymuszenia i na wielkości wyjściowe na błąd odtwarzania zmiennych stanu. W rozdziale 2.4 przeanalizowano także dwa układy do odtwarzania prędkości silnika oparte na obserwatorze z dodatkowymi integratorami: rozszerzony obserwator Luenbergera oraz estymator typu MRAS.

Przeprowadzona w rozdziale 2 analiza wpływu zakłóceń na powstawanie błędów odtwarzania zmiennych stanu stanowiła podstawę do opracowania opisanych w rozdziale 3 metod doboru parametrów obserwatorów. Ponieważ błędy odtwarzania zmiennych stanu spowodowane zakłóceniami nałożonymi na sygnały wejściowe oraz odchyłkami parametrów obiektu obserwowanego zależą od współczynników macierzy K sprzężenia zwrotnego obserwatora, Autor zaproponował i zdefiniował wskaźnik wzmocnienia macierzy, który umożliwia proste sformułowanie jednego z kryteriów doboru parametrów obserwatora. Pozostałe to kryterium stabilności obserwatora i kryterium rozkładu wartości własnych obserwatora na płaszczyźnie zespolonej (stałych czasowych tłumienia i częstotliwości drgań własnych obserwatora).

Doboru parametrów obserwatora dokonano dwoma metodami: przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego oraz metodą analityczną. Dla metody wykorzystującej algorytm genetyczny przedstawiono wyniki bardzo obszernych badań, obejmujących kilkadziesiąt tysięcy doborów, dla różnych postaci funkcji celu, wartości współczynników kary, wartości prędkości obrotowej silnika, szerokości przedziału poszukiwań, zadanych wartości części rzeczywistej wartości własnych obserwatora. Do analitycznego doboru parametrów obserwatora (rozdział 3.4) Autor przystosował zaczerpniętą z literatury metodę ustawiania biegunów obiektów dynamicznych za pomocą proporcjonalnego kompensatora działającego w pętli sprzężenia zwrotnego. Opracowany algorytm umożliwia niezależnie dobrać wartości własne obserwatora i wartość wskaźnika wzmocnienia macierzy sprzężenia zwrotnego obserwatora.

Właściwości opracowanych obserwatorów oraz metody doboru ich parametrów zostały zweryfikowane na drodze badań symulacyjnych i laboratoryjnych. W symulacjach komputerowych (rozdział 5) Autor skoncentrował się na dwóch problemach:

- dla obserwatora proporcjonalnego przebadano wpływ wartości wskaźnika wzmocnienia macierzy sprzężeń zwrotnych na wartości błędów odtwarzania zmiennych stanu generowanych przez różnego rodzaju zakłócenia. Na podkreślenie zasługuje, że badania te przeprowadzono dla bardzo licznej grupy 13475 zestawów parametrów obserwatora proporcjonalnego,
- badania symulacyjne analizowanych obserwatorów zmiennych stanu, których celem było ich porównanie z uwagi na jakość odtwarzania zmiennych stanu.

Badania symulacyjne posłużyły do wyboru nastaw obserwatorów zastosowanych w badaniach laboratoryjnych opisanych w rozdziale 5. Wykonano je dla obserwatorów proporcjonalnych i całkujących oraz estymatorów typu MRAS. Pracę kończy obszernie, dobrze opracowane podsumowanie (rozdział 6). W załącznikach przedstawiono przykład doboru parametrów obserwatora proporcjonalnego opracowaną metodą analityczną oraz parametry badanych obserwatorów.

Podstawowe metody badawcze zastosowane w pracy to przede wszystkim analiza matematyczna wsparta obliczeniami przy wykorzystaniu programów komputerowych, badania symulacyjne i badania laboratoryjne obserwatorów. Przyjęte metody badawcze są właściwe dla analizowanego problemu. Na szczególne podkreślenie zasługuje bardzo wnikliwa analiza poszczególnych typów obserwatorów oraz obszerny zakres badań symulacyjnych i laboratoryjnych.

Głównym problemem naukowym opiniowanej rozprawy jest analiza nowych typów obserwatorów Luenbergera oraz synteza ich parametrów w zastosowaniu do biliniowych obiektów sterowania, w szczególności do silników indukcyjnych. Za najważniejsze osiągnięcia Autora uważam:

- zastosowanie zmodyfikowanego obserwatora całkującego i obserwatora z dodatkowymi integratorami do odtwarzania zmiennych stanu obiektu biliniowego, w szczególności silnika asynchronicznego,
- przeprowadzenie analizy wpływu zakłóceń nakładanych na sygnały sterujące i wyjściowe oraz odchyłek parametrów obiektu obserwowanego na generację błędów odtwarzania zmiennych stanu,
- sformułowanie wskaźnika wzmocnienia macierzy i jego zastosowanie w obliczeniach parametrów obserwatorów,
- obszernie analizy i badania wpływu wielkości kryterialnych na proces obliczeń oraz na wyniki obliczeń obserwatorów przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych,
- opracowanie analitycznego algorytmu obliczeń parametrów obserwatora umożliwiającego dobór wartości własnych obserwatora oraz dobór wartości wskaźnika wzmocnienia macierzy sprzężenia zwrotnego,
- obszernie badania symulacyjne opracowanych obserwatorów, oraz ich weryfikację w układzie laboratoryjnym.

Rozprawa jest podsumowaniem kilkuletniej pracy Doktoranta, a dużą część szczegółowych zagadnień prezentował on w publikacjach i wystąpieniach konferencyjnych. Pracę doktorską mgr inż. Tadeusza Białonia uważam za bardzo wartościową. Na tę ocenę składają się: duży element oryginalności zawarty w rozprawie, obszerna, wszechstronna i pod względem formal-

nym bardzo elegancko przeprowadzona analiza teoretyczna rozpatrywanych problemów, oraz jej aspekt praktyczny i aplikacyjny.

4. Uwagi dyskusyjne

1. Str. 27, w. 8g. Autor traktuje moment bezwładności obciążenia jako zmienne w czasie wymuszenie. W ten sposób postępuje się czasami, np. w obserwatorach rozszerzonego rzędu. W tym miejscu wydaje się że lepiej byłoby napisać o zmiennym w czasie parametrze.
2. Autor wprowadzając wskaźnik wzmocnienia macierzy do syntezy parametrów obserwatora wskazuje na wpływ wartości macierzy sprzężeń zwrotnych \mathbf{K} na wartość generowanych błędów obserwatora powodowanych zakłóceniami nakładanymi na wielkości wyjściowe obiektu obserwowanego (zależność 2.2.3.26, str. 38). Z zależności (2.2.3.13) na str. 36 wynika, że macierz \mathbf{K} ma także wpływ na generację błędów obserwatora spowodowanych odchyłkami parametrów obiektu obserwowanego poprzez macierz błędu $\Delta\mathbf{C}$. Czy ograniczenie uzasadnienia wprowadzenia wskaźnika wzmocnienia macierzy do syntezy parametrów obserwatora tylko do problemu wzmacniania zakłóceń nakładających się na wielkości wyjściowe obiektu wynika z faktu, że wpływ macierzy błędu $\Delta\mathbf{C}$ na błąd odtwarzania zmiennych stanu jest mniejszy, czy też zakłócenia nakładane na sygnały wyjściowe obiektu uwzględniają także niedokładności identyfikacji parametrów współczynniki macierzy \mathbf{C} ?
3. Przyjęcie funkcji celu F_3 (zal. (3.2.2.2)) w genetycznym algorytmie doboru parametrów obserwatora powoduje, że kontrolowana jest wartość własna obserwatora, która ma najmniejszą wartość części rzeczywistej. Nie są natomiast kontrolowane wartości własne o małej ujemnej wartości części rzeczywistej, np. oznaczone jako 3 i 4 na rys. 3.3.4.1. Czy nie może to doprowadzić do pogorszenia właściwości dynamicznych obserwatora z uwagi na zbyt duże stałe czasowe lub małe wartości tłumienia drgań wynikające z takich wartości części rzeczywistej wartości własnych?
4. W zamieszczonych wynikach badań symulacyjnych obserwatorów uwzględniono odchyłkę wartości rezystancji uzwojenia wirnika. Czy prowadzono badania symulacyjne dla odchyłek wartości pozostałych parametrów silnika? Czy w modelu komputerowym silnika uwzględniano nieliniowość obwodu magnetycznego?
5. W pracy przyjęto założenie (str. 143), że „jakość odtwarzania badanego obserwatora jest tym lepsza im mniejsze są różnice wartości zmiennych stanu w nim odtwarzanych a odtwarzanych w obserwatorze odniesienia”. Czy w świetle stwierdzeniem ze str.142, że „za najlepszy należy uznać ten układ odtwarzania zmiennych stanu, który zapewnia najlepszą jakość działania całego układu regulacji”, nie lepiej byłoby porównywać działanie układów regulacji z obserwatorem badanym i obserwatorem odniesienia?

5. Ocena redakcji rozprawy

Praca jest bardzo obszerna i napisana przejrzysto. Na początku większości rozdziałów Doktorant przedstawia krótko cele cząstkowe, które chce uzyskać. Materiał ilustracyjny jest dobrze dobrany, rysunki są przejrzyste i dobrze skomentowane. Analizę charakterystyk i przebie-

gów ułatwiają markery umieszczone na rysunkach, do których odwołuje się Autor w komentarzach do otrzymanych wyników.

W bardzo obszernym tekście pracy zauważyłem niewiele błędów korektorskich i stylistycznych.

1. Str. 85. Zależność (3.2.2.2) powinna mieć postać:

$$F_3 = \sum_{j=1}^w k_r \left| \min \operatorname{Re} \left[\lambda_1(\omega_{(r)j}), \dots, \lambda_l(\omega_{(r)j}), \dots, \lambda_v(\omega_{(r)j}) \right] - \lambda_{\text{zad}} \right|.$$

2. Str. 89, Zależność (3.3.1.3) powinna mieć postać:

$$l_c = E \left(\frac{k_{i,j} - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} (2^b - 1) \right).$$

3. Nie podano wartości odchyłek parametrów silnika dla badań, których wyniki przedstawiono na rys. 4.1.2.1 i rys. 4.1.2.2.
4. Str. 124, w.16d. Powinno być B.3.2.
5. Str. 131, w.8g. Powinno być „w rozdziale 3.4.3”.
6. Str. 145, w.18g. Powinno być „w rzeczywistości”.

6. Wnioski

Reasumując uważam, że recenzowana praca zawiera bogaty i bardzo wartościowy dorobek merytoryczny mgr inż. Tadeusza Białonia. Autor, rozwiązując rozważane w pracy problemy, wykazał się wiedzą i umiejętnościami z zakresu maszyn elektrycznych, teorii sterowania, metod sztucznej inteligencji oraz zastosowań informatyki. Uważam, że rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje bardzo dobrą wiedzę teoretyczną Autora w dyscyplinie naukowej elektrotechnika oraz dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej. Przedstawione uwagi krytyczne, częściowo dyskusyjne, nie podważają wysokiej oceny rozprawy, którą z uwagi na:

- bardzo aktualną tematykę,
- duży element oryginalności zawarty w rozprawie,
- zastosowane metody badawcze i sposób rozwiązania problemów zawartych w pracy,
- obszerne wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych potwierdzające słuszność przyjętych założeń i prawidłowość przeprowadzonych analiz,
- redakcję pracy,

uważam za wyróżniającą.

Tym samym stwierdzam, że praca doktorska mgra inż. Tadeusza Białonia pt. „Zastosowanie obserwatorów Luenbergera do odtwarzania zmiennych stanu 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. (Dz. U. z 2003r. Nr 65, poz. 595) i wnioskuje o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

