Dr hab. inż. Roman Muszyński, Prof. nadzw.

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Stanisława Staszica w Pile
Instytut Politechniczny

Poznań, dnia 31.07.2017 r.

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 01-09-2017
DZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP

Ocena

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Dróżdża pt.

Estymacja zmiennych stanu i parametrów układu dwumasowego przy pomocy rozmytych filtrów Kalmana,

przedłożonej Radzie Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej

1. Przedmiot rozprawy

W ostatnich latach prowadzone są w wielu ośrodkach krajowych i zagranicznych intensywne badania nad układami sterowania napędów elektrycznych, zmierzające do poprawienia ich właściwości dynamicznych i eliminowania czujników pomiarowych. Dotyczy to szczególnie układów o złożonej strukturze mechanicznej, przede wszystkim napędów o rezonujących właściwościach, spowodowanych elastycznością połączenia mechanicznego pomiędzy silnikiem, a maszyną napędzaną, przy zmiennym jej momencie bezwładności i nieliniowym tarciu w układzie łożyskowania silnika i maszyny. Dodatkowymi wymaganiami są w takich przypadkach dobre tłumienie drgań skrętnych i ograniczenie amplitud momentu elementu sprężystego. Ma to duże znaczenie dla jakości procesu oraz niezawodności napędu (żywotności elementów połączenia mechanicznego).

Wyliczone cele osiągane są przez doskonalenie struktur sterowania i estymatorów wielkości stosowanych w torach sprzężeń zwrotnych, zamiast przetworników wielkości, których pomiar jest trudny lub niemożliwy, albo komplikuje układ napędowy i obniża jego niezawodność. W zakresie struktur sterowania takich układów dobrym rozwiązaniem są struktury adaptacyjne, w których parametry regulatorów i współczynniki wzmocnień w torach sprzężeń zwrotnych zmieniane są w zależności od parametrów struktury mechanicznej napędu. Zatem przy takich niestacjonarnych układach, oprócz estymatorów zmiennych stanu, potrzebne są także estymatory ich parametrów, aby – w ich funkcji – właściwie przestrajać układ regulacji. Estymatory na podstawie pomiaru zwykle jedynie jednej, łatwo dostępnej wielkości wymuszającej i jednej zmiennej stanu odtwarzają wszystkie potrzebne pozostałe zmienne, jak i parametry struktury. Ponieważ zarówno pomiar, jak i przetwarzanie sygnałów podlegają w układach rzeczywistych zakłóceniom, jest problem minimalizacji błędu estymacji. Do tego nadaje się filtr Kalmana, który jest estymatorem minimalizującym kwadrat błędu. Idea zastosowania filtrów Kalmana w charakterze estymatorów w układach napędowych nie jest nowa, jednak – ze względu na wymagany duży nakład obliczeń – z jednej strony i stosunkowo dużą dynamikę współczesnych układów napędowych – z drugiej, aplikacja praktyczna tej idei w omawianej dziedzinie wiąże się z wieloma problemami.

Podstawowym zagadnieniem w przypadku omawianych układów niestacjonarnych o złożonej strukturze mechanicznej jest realizowalność sterowania adaptacyjnego, z filtrem Kalmana w charakterze estymatora zmiennych stanu i parametrów układu, w czasie rzeczywistym. Okazuje się, że pomimo dużej mocy obliczeniowej dostępnych procesorów, trzeba stosować specjalne zabiegi i kompromisy, aby opóźnienie związane z krokiem nie zmniejszało nadmiernie dynamiki układu. Te czasowo krytyczne wymagania sprawiają, że

trzeba szukać nowych rozwiązań algorytmu sterowania i estymacji. Wobec niestacjonarności i nieliniowości obiektu w grę wchodzą algorytmy rozszerzonego filtru Kalmana (EKF – Extended Kalman Filter) i bezśladowego filtru Kalmana (UKF – Unscented Kalman Filter), których złożoność obliczeniowa jest znacznie większa niż w przypadku zwykłego filtru Kalmana (KF – Kalman Filter). Przy stosowaniu filtrów Kalmana kluczowym dla jakości ich działania jest – już przy wersji podstawowej filtru – właściwy wybór elementów macierzy $\boldsymbol{Q}$ i $\boldsymbol{R}$ kowariancji, odpowiednio, zmiennych wewnętrznych i wyjściowych (pomiaru). Brak jest bowiem ogólnej metody rozwiązania tego zagadnienia. Najczęściej wybór ten jest arbitralny, żeby nie powiedzieć przypadkowy. W wariantach filtrów rozszerzonego i bezśladowego wybór ten nabiera jeszcze większego znaczenia. Z powodu nieliniowości i niestacjonarności układu, dla znalezienia optymalnych wartości tych elementów, zmieniających się z parametrami, stanem i punktem pracy układu, potrzeba zaawansowanych metod optymalizacji wielowymiarowej i ogromnej liczby symulacji, aby spośród licznych zbiorów wybrać właściwą powierzchnię w hiperprzestrzeni.

Oceniana rozprawa podejmuje przedstawione wyżej – aktualne w Polsce i na świecie – problemy estymacji zmiennych stanu i parametrów układu oraz sterowania adaptacyjnego w odniesieniu do układu napędowego o złożonej strukturze mechanicznej, z elementem sprężystym, niestacjonarnością i nieliniowościami. Wybór tematu jest bardzo trafny i aktualny.

Rozprawa liczy łącznie 281 stron i podzielona jest na dziewięć rozdziałów z wykazem literatury oraz załącznikiem. Obejmuje kompleksowo ciąg zagadnień od teorii i koncepcji, przez wieloaspektowe i wielowariantowe badania symulacyjne aż do budowy i badań eksperymentalnych różnych wariantów układu rzeczywistego.

W rozdziale wstępnym 1. na tle obszernego przeglądu literatury, dotyczącej sterowania napędem z połączeniem sprężystym i metod odtwarzania zmiennych stanu i parametrów w takim układzie, sformułowane zostały: cel, teza i zakres pracy. Celem rozprawy jest opracowanie i przebadanie na modelach symulacyjnych oraz w rzeczywistym układzie laboratoryjnym różnych wariantów rozmytych filtrów Kalmana odtwarzających zmienne stanu i niektóre parametry napędu ze sprężystością. Tezę rozprawy stanowi stwierdzenie, że wprowadzenie logiki rozmytej do algorytmów filtrów Kalmana, estymujących wielkości w układzie dwu-masowym, poprawia jakość estymacji oraz, że adaptacyjna struktura sterowania takiego układu, współpracująca z rozmytym filtrem Kalmana, umożliwia uzyskanie założonych przebiegów jego prędkości, niezależnie od zmian parametrów napędu. W zakres pracy wchodzą wszystkie wymienione wyżej etapy od teorii i koncepcji, do weryfikacji estymatorów w fizycznym układzie napędowym.

W rozdziale 2. przedstawiono przyjęty model matematyczny układu napędowego ze sprężystym połączeniem, w postaci modelu dwu-masowego, z uwzględnieniem nieliniowego tarcia w łożyskach. Jednocześnie podano obowiązujące w całej pracy parametry podstawowe układu w postaci mechanicznych stałych czasowych: po stronie silnika T_1 i po stronie maszyny napędzanej T_2 – o tej samej wartości równej 0,203 s oraz elementu sprężystego – T_c= 0,0012 s. Dla tych podstawowych wartości napęd rezonuje przy częstotliwości 14,4 Hz, a jego częstotliwość anty-rezonansowa wynosi 10,2 Hz. Te niskie częstotliwości powodują, że tłumienie drgań skrętnych napędu jest stosunkowo łatwe, nawet przy znacznych opóźnieniach w torach przetwarzania sygnałów. Zaplanowane w badaniach zwiększanie momentu bezwładności po stronie maszyny napędzanej (stałej T_2) do 4-krotnej wartości podstawowej obniża jeszcze bardziej obie częstotliwości. Zmiany momentu bezwładności powodują jednocześnie, że układ staje się niestacjonarny.

Rozdział 3. zawiera przegląd najczęściej stosowanych struktur sterowania dla napędów ze sprężystym połączeniem, z elementami badań symulacyjnych niektórych z nich. Skupiono się na kaskadowej strukturze sterowania adaptacyjnego, z dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi od momentu sprężystości i różnicy prędkości pomiędzy silnikiem, a maszyną roboczą, oraz ze sprzężeniem kompensacyjnym od momentu obciążenia. Uznano tę strukturę jako odpowiednią do wszystkich badań opracowywanych estymatorów wielkości.

W ramach rozdziału 4. dokonano przeglądu metod odtwarzania wielkości, zwłaszcza w odniesieniu do przyjętego w pracy obiektu w postaci układu dwu-masowego. Wskazano – na podstawie wad i zalet poszczególnych metod, że dla niestacjonarnego przemysłowego układu dwu-masowego – z zakłóceniami pomiarowymi i parametrycznymi – właściwym rozwiązaniem mogą być filtry Kalmana, stanowiące jedną z metod algorytmicznych, stosunkowo mało wrażliwą na takie zakłócenia, ze względu na wbudowany mechanizm ich filtrowania..

Mając na względzie istotę pracy czyli ideę poprawienia właściwości filtrów Kalmana, w odniesieniu do nieliniowego i niestacjonarnego obiektu, poprzez zastosowanie logiki rozmytej, dokonano w ramach rozdziału 5. przeglądu systemów rozmytych. Za najwłaściwszą do postawionego zadania – adaptacji macierzy kowariancji filtrów Kalmana – uznano metodę Mamdaniego z singletonami. Słusznie kierowano się przy tym jej prostotą w porównaniu z innymi metodami logiki rozmytej, gdyż – przy złożoności procedur filtrów Kalmana – należało ograniczać nakład czasu obliczeń na elementy dodatkowe algorytmów.

Rozdział 6. stanowi najważniejszy teoretycznie i koncepcyjnie fragment pracy, biorąc pod uwagę jej temat i postawioną tezę. Opisano w nim liniowy filtr Kalmana oraz jego modyfikacje: rozszerzony i bezśladowy filtr Kalmana, przeznaczone dla systemów nieliniowych i/lub niestacjonarnych. Za pomocą badań symulacyjnych pokazano wadę rozszerzonego i bezśladowego filtru w odniesieniu do napędu dwu-masowego, jaką jest zależność błędów estymacji wszystkich wielkości od bezwładności po stronie maszyny napędzanej. Zaproponowano rozwiązanie problemu w postaci adaptacji elementów macierzy kowariancji filtrów w funkcji stałej czasowej T_2 napędu za pomocą logiki rozmytej Mamdaniego. Ponieważ w badaniach zauważono różne wartości błędów estymacji w stanach statycznych i dynamicznych napędu, adaptację statyczną uzupełniono dodatkowym torem, w którym wykrywany jest stan dynamiczny napędu, wpływający – również w sposób rozmyty – na wartości elementów macierzy kowariancji. Wskaźnikiem stanu dynamicznego jest różnica pomiędzy momentem elektromagnetycznym silnika i momentem sprężystości, przekraczająca wartość momentu tarcia.. Opracowano w ten sposób dwa warianty systemu rozmytego: z dwoma i czterema funkcjami przynależności na zbiorze zmiennej T_2, w których poprzez wartości singletonów jest wpływ na 5 elementów macierzy $\boldsymbol{Q}$ kowariancji zmiennych wewnętrznych i na 1 element macierzy $\boldsymbol{R}$ kowariancji zmiennych wyjściowych.

Rozdział 7. obejmuje 99 stron i jest podstawowy z punktu widzenia sprawdzenia opracowanej koncepcji filtrów rozmytych. Przedstawiono w nim wielowariantowe badania symulacyjne na modelu układu poddanym dyskretyzacji z krokiem 500 μs, obejmującym cały układ napędowy z kaskadową adaptacyjną strukturą sterowania, z dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi i z filtrami Kalmana w roli estymatorów wielkości. W badaniach słusznie stosowano złożoną sekwencję wymuszeń, obejmującą skokowe zmiany prędkości zadanej w obydwu kierunkach o różnych wartościach, skokowe obciążenie i jego zrzut, a także skokowe zwiększanie oraz zmniejszanie parametru T_2 w zakresie pomiędzy wartością podstawową i czterokrotną podstawowej. Przy optymalizacji układu adaptacji (wyborze singletonów) stosowano dwie funkcje celu: F_1 – stanowiącą wartość iloczynu błędów estymacji wszystkich wielkości, średnią z próbek obejmujących całą sekwencję wymuszenia, oraz F_2, która – oprócz iloczynu samych błędów – zawiera także iloczyn pochodnych błędów estymacji wszystkich wielkości. Wielowariantowość symulacyjnych badań porównawczych dotyczy:

- filtrów Kalmana: rozszerzonego i bezśladowego w wersjach podstawowej i zmodyfikowanej przez Doktoranta (z adaptacją rozmytą),
- filtrów Kalmana w zamkniętej strukturze sterowania i poza nią,
- struktur rozmytych z adaptacją dynamiczną i bez niej,
- struktur z dwoma i czterema funkcjami przynależności na zbiorze wartości T_2,
- dwóch funkcji celu: z pochodnymi błędów i bez nich,
- modelu z nieliniowym tarciem i bez tarcia w łożyskach maszyn.

Na uwagę zasługuje duża trudność przeprowadzonych obliczeń optymalizacyjnych, związana ze złożonością algorytmów i dużym wymiarem przestrzeni czynnikowej. W najtrudniejszym

przypadku poszukiwano optymalnych wartości 6 elementów macierzy kowariancji, a na każdy z nich miało wpływ 8 singletonów, co dawało 48-wymiarową przestrzeń optymalizacji. Stosowano szeregowo algorytm genetyczny do wstępnej optymalizacji i algorytm *Pattern Search* – do końcowej. Zadanie zdekomponowano w ten sposób, że optymalizowano kolejnościowo po 6 singletonów. Badania symulacyjne miały charakter przesiewowy. Chodziło o wytypowanie najbardziej celowych wariantów struktury z filtrami rozmytymi do ostatecznej weryfikacji w układzie fizycznym. Zarówno w przypadku filtru rozszerzonego, jak i rozmytego okazały się nimi filtry rozmyte uwzględniające także adaptację dynamiczną, z dwoma jedynie funkcjami przynależności na zbiorze parametru T_2. Dają one znaczącą poprawę jakości estymacji w porównaniu z filtrami bez adaptacji rozmytej. Struktury z czterema funkcjami przynależności niewiele są lepsze od struktur wybranych.

W rozdziale 8. przedstawiono stanowisko laboratoryjne i wyniki porównawczych badań eksperymentalnych, przeprowadzonych dla wytypowanych struktur rozmytych i konwencjonalnych. W stanowisku zarówno silnik napędowy, jak i maszynę obciążającą stanowią jednakowe maszyny prądu stałego o mocy 500 W. Posiada ono podane wcześniej parametry wyjściowe, przy czym zmiana momentu bezwładności odbywa się jedynie na postoju do wartości ok. 3 razy większej od wyjściowej. Implementacje opracowanych algorytmów zrealizowano za pomocą karty procesorowej DS1103 firmy dSPACE GmbH. Badania eksperymentalne potwierdziły polepszenie jakości estymacji wielkości napędu w strukturach z rozmytymi filtrami Kalmana, w porównaniu do struktur z filtrami konwencjonalnymi, zarówno w przypadku filtru rozszerzonego, jak i bezśladowego. W szczególności uzyskuje się mniejsze amplitudy błędów estymacji i szybsze ich zanikanie.

Ostatni 9. rozdział pracy stanowi podsumowanie wszystkich badań i zawiera wynikające z nich wnioski.

Zestawienie literatury obejmuje 211 pozycji. Na uwagę zasługuje aktualność i trafny dobór źródeł, jak również znaczna liczba prac z zakresu rozprawy, opublikowanych przez Doktoranta lub przy jego udziale.

W załączniku przedstawiono informacje literaturowe dotyczące logiki rozmytej w ogólności i systemów rozmytych Takagi-Sugeno-Kang'a oraz Tsukamoto.

2. Ocena wartości naukowej rozprawy

Do istotnych wyników uzyskanych przez Autora należy zaliczyć:

1. Opracowanie oryginalnych modyfikacji rozszerzonego i bezśladowego filtru Kalmana do estymacji zmiennych stanu oraz parametrów niestacjonarnego i nieliniowego napędu z połączeniem sprężystym silnika i maszyny napędzanej, znamiennych tym, że zawierają one dodatkowy rozmyty mechanizm adaptacji elementów macierzy kowariancji do zmieniającego się stanu napędu i momentu bezwładności po stronie obciążenia, która poprawia jakość estymacji wszystkich wielkości napędu.
2. Opracowanie koncepcji struktur rozmytych, realizujących modyfikację konwencjonalnych filtrów Kalmana.
3. Zaproponowanie sposobu doboru (optymalizacji) elementów macierzy kowariancji filtrów Kalmana, opracowanie testów, wymuszeń i kryteriów optymalizacji.
4. Opracowanie modelu symulacyjnego kaskadowej adaptacyjnej struktury sterowania układu dwu-masowego z dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi od momentu sprężystości oraz różnicy prędkości silnika i maszyny napędzanej, ze sprzężeniem kompensacyjnym od momentu obciążenia, wraz ze wszystkimi analizowanymi strukturami filtrów i wielowariantowe ich przebadanie.
5. Zbudowanie laboratoryjnego stanowiska badawczego, implementacja na karcie procesorowej algorytmów sterowania adaptacyjnego napędu i zaproponowanych rozmytych filtrów Kalmana w roli estymatorów zmiennych stanu i parametrów układu.

6. Doświadczalna weryfikacja opracowanych modyfikacji filtrów Kalmana.

Założony cel rozprawy został w pełni osiągnięty z dobrym wynikiem. Opracowano koncepcję teoretyczną oryginalnych modyfikacji filtrów Kalmana dla estymacji zmiennych stanu i parametrów napędu ze sprężystością połączenia mechanicznego, przeprowadzono obszerne badania symulacyjne oraz zrealizowano i przebadano sterowanie w laboratorium. O adekwatności modeli symulacyjnych i wartości przeprowadzonych na nich badań świadczy fakt, że w układzie laboratoryjnym potwierdziły się z dużą dokładnością wyniki uzyskane wcześniej na modelach symulacyjnych. W szczególności potwierdziła się skuteczność i dobra jakość estymacji wielkości napędu, lepsza niż w przypadku filtrów niemodyfikowanych.

Rozprawa zawiera oryginalne wyniki naukowe i aplikacyjne, uzyskane za pomocą nowoczesnych metod i narzędzi badawczych. Na szczególne podkreślenie zasługuje kompleksowość potraktowania tematu: od teorii, przez koncepcję, badania symulacyjne aż do zbudowania stanowiska i weryfikacji doświadczalnej opracowanego układu, a także rzetelność Doktoranta, który na poszczególnych etapach pracy prowadzi wieloaspektowe i wielowariantowe badania.

3. Uwagi

3.1. Uwagi merytoryczne

1. Tytuł rozprawy jest zawężający w stosunku do tego, co w ramach niej zrobiono. Dotyczy bowiem ona nie tylko estymacji wielkości napędu, ale także optymalizacji całej kaskadowej adaptacyjnej struktury regulacji napędu ze sprężystością, z dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi. Na potrzebę rozszerzenia lub ogólniejszego sformułowania tytułu wskazuje dwu-członowa teza pracy, obejmująca również strukturę regulacji napędu.
2. Nigdzie w pracy nie podano, skąd wzięto i jak wygląda zależność nastaw adaptacyjnego regulatora prędkości i wzmocnień w dodatkowych torach sprzężeń zwrotnych od parametru T_2. Wprawdzie – zgodnie z tytułem – rozprawa dotyczy estymacji, ale skoro – de facto – zajmowano się w niej także strukturą regulacji i podawano przebieg wartości jej parametrów w trakcie procesu regulacji, to brakuje choćby krótkiej, ogólnej informacji, dotyczącej mechanizmu adaptacji w zastosowanej strukturze regulacji.
3. W pracy nie postawiono jasno problemu zakresu dynamiki, w jakim obowiązuje stwierdzenie stanowiące tezę pracy, tj. w jakim zakresie dynamiki układu dwu-masowego opracowane rozmyte algorytmy filtrów Kalmana dają dobre efekty. Wszystkie przedstawione w pracy badania i wyniki dotyczą układu o małej dynamice, tj. układu o jednym zestawie parametrów, dla których częstotliwość rezonansowa wynosi co najwyżej kilkanaście Hz (biorąc pod uwagę zmiany wartości momentu bezwładnosci). W tym zakresie okres rezonansu jest na tyle długi, że można pomijać nawet znaczne opóźnienia przy przetwarzaniu sygnałów i stosować złożone procedury wymagające dużego okresu próbkowania. Dla układów o częstotliwości rezonansowej rzędu kilkudziesięciu Hz dynamika estymatora, czas zanikania błędu którego przekracza 100 ms (jak na rys 7.6b lub 8.14), wydaje się być dyskwalifikująca. Również krok dyskretyzacji modelu, podyktowany ogromnym nakładem obliczeń rozmytych filtrów Kalmana, wynoszący 500 μs, należy uznać jako krytycznie długi, już dla badanego "wolnego" układu, jeśli wziąć pod uwagę, że stała czasowa związana z jego sprężystością ma wartość tylko 1200 μs. Również stosowana w badaniach struktura układu regulacji, a w szczególności jej dodatkowe sprzężenia zwrotne, jak wynika z badań piszącego niniejszą ocenę, nie daje wyraźnej poprawy jakości regulacji, przy dużej dynamice układu. Wszelkie bowiem opóźnienia, niweczą ewentualne efekty takich sprzężeń. Trudności regulacyjne układów rezonujących rosną niewspółmiernie z iloczynem całkowitego opóźnienia i częstotliwości rezonansowej. Byłoby zatem ważne, aby ustalić granicę celowości stosowania opracowanych struktur z rozmytymi filtrami Kalmana w roli

estymatorów wielkości w takich układach. Z tego powodu zarówno tezę, jak i wnioski końcowe z pracy należałoby ostrożniej sformułować, podając zakres ich obowiązywania.

4. Pewne wątpliwości budzi dekompozycja zadania optymalizacji w przestrzeni 48-wymiarowej na szeregowe optymalizacje w grupach po 6 singletonów. Takie postępowanie wymagałoby realizacji zadania w pętli iteracyjnej, gdyż jedno tylko przejście może dać wynik daleki od optymalnego. Autor jednak na ten temat nie podaje informacji. Sprawa zaś dotyczy nie tylko dużego wymiaru przestrzeni parametrycznej, ale także ogromnego zakresu liczb. Jak bowiem wynika np. z tabeli 7.1, wartość największego elementu macierzy kowariancji jest kilkadziesiąt miliardów razy większa od wartości najmniejszego. Świadczy to – z drugiej strony – o osiągnięciu Doktoranta, który potrafił w tej hiperprzestrzeni o ogromnej rozciągłości znaleźć konkretne liczby, które inni przyjmują arbitralnie.
5. Można kwestionować zakres wartości momentu bezwładności (stałej czasowej T_2) przyjmowany w badaniach jako krotność od 1 do 4 momentu bezwładności silnika. W roli silnika napędowego układu Doktorant stosuje maszynę obcowzbudną prądu stałego z roku 1974. Maszyna ta ma stosunkowo duży moment bezwładności, który jest ok. 10 razy większy niż w przypadku współczesnego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi lub maszyny indukcyjnej o tej samej mocy. Zasadne by więc było, aby badać także przypadki z momentem bezwładności po stronie obciążenia mniejszym niż silnika. Oddawało by to proporcje występujące nierzadko w realnych napędach z silnikiem prądu stałego, zwłaszcza przy dużym przełożeniu reduktora. To naturalnie zwiększałoby trudności regulacyjne w związku ze wzrostem częstotliwości rezonansowej układu.

3.2. Uwagi redakcyjne i formalne

Rozprawa jest dobrze uporządkowana. Koncepcję swoją Autor rozwija i opisuje przejrzyście i komunikatywnie, od teorii aż do badań laboratoryjnych skonstruowanego układu, bez luk i przeskoków. Materiał zamieszczany w kolejnych rozdziałach wiąże się, na zasadzie logicznego wynikania, z treściami poprzednich rozdziałów. Całość napisana jest pod względem językowym i redakcyjnym dużo lepiej niż to spotyka się średnio w przypadku rozpraw doktorskich. Redakcja i korekta są bardzo staranne, praktycznie brak jest błędów ortograficznych i gramatycznych w rozprawie. Można mieć jedynie kilka uwag redakcyjnych i formalnych.

1. Niekonsekwencją jest mieszanie w tej samej strukturze na rys. 3.17 oznaczeń z dziedziny czasu (symbol różniczkowania du/dt) i dziedziny transformat (symbol całkowania $1/s$). Niezależnie od tego, zamiast pochodnych du/dt (nieznanej i nigdzie nie wprowadzonej wielkości u), powinien być jedynie symbol różniczkowania d/dt. Jednak dla spójności z resztą układu z rys. 3.16, winien być symbol różniczkowania w postaci operatora s. Nie wiadomo też po co przy stałej czasowej T_2 na rys. 3.17 jest nie objaśniony dodatkowy indeks "e".
2. W niektórych miejscach, np. w podpisach rys. 3.18 i 3.19 Autor myli opóźnienie z inercją. Skoro przyjęto zamkniętą pętlę regulacji momentu traktować jako człon inercyjny o transmitancji podanej wzorem (3.37), to nie można już pisać o "opóźnieniu wymuszenia momentu". Są to bowiem dwa różne człony podstawowe w automatyce.
3. W tabeli 7.1 są kuriozalne liczby cyfr znaczących, nie korespondujące w żaden sposób z rzeczywistą dokładnością obliczeń. Brak jest inżynierskiej oceny i właściwego zaokrąglenia wyników.
4. Nie wiadomo, co oznacza współczynnik k_2, którego przebieg jest pokazywany na wielu rysunkach, bo na żadnym rysunku ze strukturami sterowania adaptacyjnego nie ma takiego współczynnika. Za to na rysunkach ze strukturami jest współczynnik k_s, którego przebiegu nie ma nigdzie.
5. Na str. 208 podano nieistotne dane tarcz bezwładnościowych, ale nie podano najważniejszego ich parametru – momentu bezwładności. Również w opisach badań i

podpisach rysunków, zamiast konkretnych wartości są "tajemnicze" sformułowania "zwiększona wartość".

6. W badaniach eksperymentalnych (rys. 8.8b i 8.9b oraz 8.15g i 8.16g) ujawnił się znaczny uchyb statyczny estymacji parametru T_2, którego nie było w badaniach symulacyjnych. Doktorant zdaje się nie zauważać tej różnicy, bo jej nie skomentował ani nie wyjaśnił.
7. Przy omawianiu wyników kolejnych badań powtarzane są niekiedy znaczne fragmenty takich samych sformułowań (kopiowane komputerowo zdania różniące się "wsadem"). W dobrych opracowaniach powinno unikać się takich powtórzeń, korzystając z bogactwa języka.

4. Wnioski

1. Doktorant wykazał się bardzo dobrym przygotowaniem teoretycznym, umiejętnością pracy badawczej, konstrukcyjno-programowej i eksperymentalnej. Biegle wykorzystuje nowe niekonwencjonalne metody sterowania i nowoczesne środki do jego realizacji.
2. Uzyskane w pracy oryginalne wyniki naukowe, w pełni potwierdzone eksperymentalnie, są nowym rozwiązaniem aktualnych problemów odtwarzania wielkości i sterowania adaptacyjnego, nad którymi pracują ośrodki w kraju i na świecie. Mają one wartość poznawczą oraz aplikacyjną i stanowią duże osiągnięcie.
3. Uwagi przedstawione w recenzji mają w części charakter dyskusyjny i nie podważają merytorycznych wyników rozprawy.
4. Doktorant w ramach swojej pracy przedstawił koncepcje i przeprowadził badania, które przy odpowiednim podziale treści wystarczyłyby na dwie rozprawy doktorskie.

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa mgr inż. Krzysztofa Dróżdża spełnia z dużym nadmiarem wymagania stawiane pracom doktorskim w Ustawie z 2003 roku (z późniejszymi zmianami) o stopniach naukowych i tytule naukowym. Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Roman Muszyński