Prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak
Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny,
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Koszykowa 75, Gm. E.
00-662 Warszawa

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 12-09-2017
DZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP

Recenzja
rozprawy doktorskiej **mgr. inż. *Krzysztofa Dróżdża*** pt. „*Estymacja zmiennych stanu i parametrów układu dwumasowego przy pomocy rozmytych filtrów Kalmana*"
opracowana na podstawie uchwały Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej z dnia 23 maja 2017 r.

1. Ocena wyboru tematyki rozprawy

Corocznie ukazuje się wiele publikacji związanych z tematyką wykorzystania filtrów Kalmana do estymacji zmiennych stanu i parametrów układów dynamicznych, co świadczy o aktualności zagadnień, będących przedmiotem opiniowanej pracy.
W znaczącej liczbie publikowanych prac z obszaru napędu elektrycznego, obiektem regulacji jest zespół złożony z przekształtnik energoelektroniczny, maszyny elektrycznej oraz układów pomiarowych. Najczęściej wpływ obciążenie, traktowany jest jako zjawisko stochastyczne, nie uwzględniające właściwości konkretnej maszyny roboczej i sposobu połączenia z silnikiem napędzającym. Struktury regulacji projektowane dla tak zdefiniowanego obciążenia, w wielu przypadkach, nie zapewniają odpowiednio dobrej jakości regulacji, gdy połączenie silnika z maszyną roboczą jest elastyczne. Taki przypadek ma jednak miejsce w wielu maszynach wykorzystywanych w przemyśle. Nieuwzględnienie, na etapie projektowania regulatorów, sprężystości połączeń pomiędzy silnikiem a maszyną roboczą, prowadzi najczęściej do pojawienia się oscylacji wielkości regulowanych. Bardzo ważnym zagadnieniem jest więc prawidłowa identyfikacja obiektu sterowania i uwzględnienie właściwości maszyny roboczej w procesie projektowania struktury sterowania.
W szczególności zastosowanie „różnych odmian" filtru Kalmana do wyznaczenia trudno mierzalnych wielkości (i parametrów obiektu) jest zagadnieniem będącym ciągle przedmiotem licznych prac o charakterze teoretycznym jak i aplikacyjnym.
Niektóre z kierunków badań dotyczą poszukiwaniu metod doboru elementów macierzy kowariancji i ich ewentualnego przestrajania w zależności od punktu pracy. Doskonalone są także algorytmy sterowania tak, aby uzyskać możliwie najlepsze funkcjonowanie tych urządzeń w stanach dynamicznych i statycznych. Ciągle poszukiwane są także nowe metody umożliwiające automatyczne przestrajanie filtru Kalmana w sensie ciągłych (na bieżąco) modyfikacji elementów macierzy kowariancji. Problem ten jest podnoszony przez wielu badaczy w licznych publikacjach. W okresie ostatnich lat podejmowane były próby strojenia macierzy kowariancji z wykorzystaniem metod bazujących na sztucznej inteligencji. Autor zaproponował strojenie filtru Kalmana, z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych do statycznego lub dynamicznego modyfikowania macierzy kowariancji. Zamieszczone wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych obrazują jakość odtwarzania wybranych zmiennych stanu i niektórych parametrów opisujących obiekt regulacji.

Tematykę rozprawy należy uznać za bardzo interesującą i trafnie wybraną zarówno pod względem rozwiązania problemów teoretycznych jak i ewentualnych aplikacji przemysłowych. Problematyka związana z projektowaniem i budową napędów z połączeniami sprężystymi jest ciągle bardzo aktualna.

2. Charakterystyka pracy oraz uwagi ogólne i szczegółowe.

Opiniowana praca doktorska jest bardzo obszerna i liczy 281 strony łącznie ze spisem literatury zawierającym 211 pozycji i załącznikiem opisującym podstawowe zagadnienia systemów rozmytych. Podzielona została na 9 rozdziałów, a oryginalne, najbardziej wartościowe treści zostały przedstawione w rozdziałach 6.5 oraz 7 i 8.

Cele rozprawy podano w podrozdziale 1.3. i są one zapisane następująco:
„Celem niniejszej pracy jest opracowanie rozmytych filtrów Kalmana odtwarzających zmienne stanu i parametr układu dwumasowego. Celem dodatkowym jest weryfikacja w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych opracowanych algorytmów estymacji, zastosowanych w adaptacyjnej strukturze sterowania rozważanego obiektu".

Sformułowano 2 tezy:

- ***Wprowadzenie logiki rozmytej do klasycznych algorytmów filtrów Kalmana, estymujących wielkości związane z układem dwumasowym, zapewnia poprawę jakości ich estymacji***
- ***Adaptacyjna struktura sterowania układu dwumasowego z regulatorem liniowym i dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi od wybranych wielkości, współpracująca z rozmytym filtrem Kalmana, umożliwia uzyskanie założonych przebiegów prędkości obciążenia układu dwumasowego, niezależnie od zmian jego parametrów***

W zasadzie pierwsza z podanych tez wiąże się bezpośrednio z tematem pracy *„Estymacja zmiennych stanu i parametrów układu dwumasowego przy pomocy rozmytych filtrów Kalmana"*.
Drugie sformułowanie w znaczący sposób wykracza poza określoną tytułem zawartość pracy i jest jedynie zwróceniem uwagi na możliwe wykorzystanie - proponowanych estymatorów - w adaptacyjnej strukturze sterowania układem dwumasowym. Zostało to jednak zasygnalizowane uprzednio jako cel dodatkowy pracy.

W pierwszej kolejności (rozdział 2) podane zostały modele matematyczne obiektu badań. Przedstawiono model matematyczny silnika obcowzbudnego prądu stałego, sygnalizując jednak, że będzie on wykorzystywany jedynie w układach ze sztywnym połączeniem silnika i maszyny roboczej. Niezrozumiałe jest stwierdzenie Autora, że ... *w przypadku występowania połączenia sprężystego równania dotyczące tej części napędu zmieniają swoją postać* ... co może oznaczać całkowicie inny model matematyczny i inny rodzaj napędu.
W podrozdziale 2.3 podano, zaczerpnięte z literatury, najczęściej wykorzystywane modele matematyczne układu dwumasowego. Założono przy tym, że wymuszeniem jest arbitralnie zadawany moment elektromagnetyczny wytwarzany w silniku napędowy.
Kolejny fragment pracy (rozdział 3) zawiera opisy wybranych struktur układu sterowania. Zaczerpnięte z liter rozwiązania zostały zbadane symulacyjnie co pozwoliło ocenić ich właściwości. W następnym rozdziale (4) dokonano przeglądu metod odtwarzania zmiennych stanu i parametrów układu dwumasowego. Przytoczono rozwiązania algorytmiczne oraz rozwiązania bazujące na sztucznej inteligencji. Kolejny, krotki fragment dotyczy wprowadzenia do teorii zbiorów rozmytych, a w zasadzie przedstawia system

rozmyty Mamdaniego. Kolejny, obszerny fragment rozprawy zawiera opisy matematyczne filtru Kalmana oraz jego zmodyfikowanych odmian takich jak rozszerzony filtr Kalmana (EKF) i bezśladowy filtr Kalmana (UKF). Wskazując na wady filtrów EKF i UKF w przypadku wykorzystania w procesie estymacji wielkości zmiennych i parametrów układu dwumasowego, zaproponowano dwa rozwiązania ze statyczną oraz dynamiczną adaptacją wyrazów macierzy kowariancji. W podrozdziale 6.5 Autor definiuje pojęcie „rozmytego filtru Kalmana" jako algorytmu filtrów EKF lub UKF, w których macierze kowariancji Q i R są modyfikowane na bieżąco z wykorzystaniem systemów rozmytych. Ten fragment wnosi istotne nowe podejście do realizacji algorytmu filtru Kalmana. Zaproponowane zostały dwie struktury rozmyte zawierające odpowiednio 2 lub 4 funkcje przynależności zmiennej wejściowej wykorzystywane do statycznej adaptacji macierzy kowariancji. Analogicznie w przypadku dynamicznej adaptacji macierzy kowariancji zastosowano struktury o dwóch lub czterech funkcjach przynależności. Sygnałem wejściowym jest w tym przypadku estymowany parametr T_2. Koncepcje filtrów rozmytych zostały w dalszej części rozprawy opisane i utworzono modele symulacyjne wykorzystane do testowania zaproponowanych rozwiązań. Bardzo obszerny rozdział 7 (Wybrane badania symulacyjne) ma - moim zdaniem - niefortunnie sformułowany tytuł sugerujący, że zostaną przedstawione wyniki badań symulacyjnych opisanych wcześniej układów. Tak jednak nie jest. W tym rozdziale podane zostały zależności matematyczne, przedstawiono oryginalne algorytmy realizujące wybrane struktury filtrów Kalmana, oraz dokonano analizy pracy i oceniono właściwości wielu odmian różnych struktur filtru Kalmana.
Wprowadzając stosowne założenia upraszczające podano model matematyczny układu opisany niestacjonarnymi równaniami stanu (7.2) i wyjścia (7.3) przy czym elementami wektora stanu są odpowiednio prędkości wału silnika, prędkość wału maszyny roboczej, moment skrętny, moment obciążenia i odwrotność mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej. W takim ujęciu należy uznać, że zaproponowany model nie jest dedykowany do określonego napędu (rodzaju silnika) i może być wykorzystany w przypadku zastosowania napędów prądu stałego jak i przemiennego.
W podrozdziale 7.2 został przedstawiony algorytm rozszerzonego filtru Kalmana. Istotnym zagadnieniem, przed którym staje projektant jest wybór współczynników macierzy kowariancji Q i R. Na stronie 109 znajduje się lakoniczna informacja, że współczynniki te *... dobierano podczas badań symulacyjnych za pomocą algorytmu hybrydowego stanowiącego połączenie algorytmów genetycznego i Pattern Search minimalizując odpowiednie funkcje celu ...* przy czym Autor odsyła czytelnika do dalszych - bliżej nieokreślonych - części pracy.
W dalszej części pracy opisano bezśladowy filtr Kalmana podając stosowne modele matematyczne oraz algorytm obrazujący kroki wykonywane w przypadku jego implementacji. Dobór macierzy kowariancji realizowany jest z wykorzystaniem funkcji celu. Sformułowane zostały 2 funkcje celu (7.33 i 7.34) będące iloczynami błędów wielkości estymowanych (F1) lub iloczynami błędów wielkości estymowanych i pochodnych tych błędów (F2).
Badania symulacyjne zostały wykonane dla przypadku, kiedy estymator pracował poza strukturą sterowania jak i w przypadku wbudowania estymatora w strukturę sterowania. Takie podejście należy uznać za uzasadnione ponieważ wyniki symulacji pozwalają ocenić właściwości regulacyjne kompletnego napędu.
Autor zamieścił w tym rozdziale ok. 400 wykresów obrazujących wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych dla rożnych odmian filtru Kalmana i różnych warunków pracy. Wiele wykresów jest tak podobnych, że trudno dostrzec sens ich przytaczania. W zamieszczonym w podrozdziale 7.10 podsumowaniu są zawarte - moim zdaniem - subiektywne oceny właściwości poszczególnych „mutacji" estymatorów wykorzystujących różne odmiany filtru Kalmana.

W rozdziale 8 zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych napędu z połączeniem sprężystym o sterowaniu adaptacyjnym z wykorzystaniem kolejno: rozszerzonego filtru Kalmana, bezśladowego filtru Kalmana oraz ich modyfikacji w sensie zastosowania logiki rozmytej do przestrajania macierzy kowariancji. Podobnie jak w rozdziale 7 zamieszczono dużą liczbę wykresów (ok. 200), które nie obrazują jednak - dostatecznie jasno - istotnych właściwości poszczególnych rozwiązań.

Główne osiągnięcia badawcze Autora dotyczą zaprojektowania i przetestowania estymatorów zmiennych stanu i parametrów układu dwumasowego bazujących na rozszerzonym oraz bezśladowym filtrze Kalmana. Autor zaproponował oryginalne przestrajanie macierzy kowariancji z wykorzystaniem systemów rozmytych (struktura Mamdaniego).
Pierwsze podejście dotyczyło budowy układu w którym wykorzystano statyczne przestrajanie współczynników macierzy kowariancji w funkcji estymowanej wartości parametru T_2 (mechaniczna stała czasowa maszyny roboczej proporcjonalna do momentu bezwładności).
Drugie rozwiązane polega na wykorzystaniu adaptacji dynamicznej. System rozmyty został rozszerzony o fragment dynamicznego przetwarzania sygnału. Wejściem jest moduł różnicy momentu elektromagnetycznego i momentu skrętnego. Zamieszczone wyniki badań symulacyjnych jak i eksperymentalnych wskazują na poprawne działania zaprojektowanych estymatorów. Szczególnie ważne jest przeprowadzenie badań układu sterowania adaptacyjnego, w którym wykorzystano wielkości estymowane.

3. Uwagi dyskusyjne i krytyczne.

Praca jest - moim zdaniem - zbyt obszerna, a wiele zamieszczonych wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych jest formą raportu z przeprowadzonych testów, a nie obrazem istotnych właściwości proponowanych autorskich rozwiązań. Rozdziały 2 - 5 (ponad 50 stron) mogłyby być pominięte lub ich zawartość skrócona dosłownie do kilku stron. Tytuł pracy wskazuje, że zagadnienia rozmytych filtrów Kalmana wykorzystywanych do estymacji zmiennych stanu i parametrów są przedmiotem rozważań. Te zagadnienia są jednak słabo wyeksponowane.
Po przeczytaniu pracy nasuwają się następujące pytania:

1. Jakie były przesłanki do wyboru systemu rozmytego? Nie ma przekonującej analizy odnośnie wybranej liczby funkcji przynależności (dlaczego 2 i 4 ?) czy też kształtu tych funkcji.
2. Dynamiczna adaptacja wyrazów macierzy kowariancji realizowana jest w ten sposób, że wprowadzono poprzez człon inercyjny pierwszego rzędu - sygnał różnicy rzeczywistego momentu elektromagnetycznego i estymowanego momentu skrętnego - na wejście systemu rozmytego. Jakie były przesłanki wyboru tych sygnałów.
3. Moment elektromagnetyczny jest zaznaczony jako rzeczywisty. W jaki sposób wykonano pomiar tego momentu?
4. Zamieszczono wiele wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych, ale nie ma bezpośredniego porównania wyników symulacji i eksperymentu dla identycznych pobudzeń. Takie podejście jest powszechnie stosowane w prezentowaniu wyników, bowiem pozwala ocenić czy modele symulacyjne w zadawalający sposób opisują układ rzeczywisty.
5. W rozdziale wybrane badania eksperymentalne nie ma schematu struktury układu sterowania i estymatora.
6. Jaki typ regulatora prędkości został zastosowany i jaki jest opis funkcji zmieniających parametry regulatora prędkości i parametry sprzężeń dodatkowych?

7. W rozdziale 3.1.6. podano schemat blokowy kaskadowej adaptacyjnej struktury sterowania. W tekście napisano, że parametry układu regulacji są przestrajane zgodnie z wartością stałej czasowej T_{2e}, która nie występuje na schemacie 3.16 ani we wzorach do których odwołuje się Autor.
8. W rozdziale 7.4 „Metodologia badań" podano arbitralnie wybraną sekwencje cyklu pracy wykorzystywaną przy doborze wartości elementów macierzy kowariancji. Jakie były przesłanki ograniczenia sygnału referencyjnego prędkości do zakresu +/- 25% prędkości znamionowej.
9. W badaniach symulacyjnych wykonywane były testy dla zmienności prędkości z zakresu +/- 100% prędkości znamionowej. Zamieszczone przebiegi momentu elektromagnetycznego pokazują występowanie oscylacji w przypadku pracy z ograniczeniem momentu na poziomie 300% m_{eN}. Co jest powodem występowania tych oscylacji?

W zakończeniu brakuje informacji co Autor uznaje za oryginalne osiągnięcia własne.

4. Uwagi szczegółowe

1. Str. 25 w^8 - stwierdzenie, że silnik BLDC jest zasilany z falownika nie jest prawdziwe.
2. Str. 25 w^{15} - żargonowe określenie ... *„wdzięcznym" obiektem badań* ...
3. Str. 25 w_6 - zamiast *„siła elektromotoryczna"* należy używać określenia *„indukowane napięcie"*
4. Str. 33 w^4 - dlaczego Autor uważa, że ... *w przypadku nieuwzględnienie wspomnianego zjawiska* (składowe momentu tarcia) *w modelu matematycznym filtru Kalmana, proces estymacji jest utrudniony* ...
5. Str. 36 w_{21} - jeśli układ jest liniowy to na nie ma potrzeby robienia założeń dotyczących ograniczania sygnałów.
6. Str. 37 - Rys. 3.2 na schemacie jest blok nazwany *„Pętla wymuszenia momentu elektromagnetycznego"*, który aproksymuje dynamikę regulacji momentu, a nie wymusza moment. Ten opis powielany jest na większości innych rysunków.
7. Str. 38 - Rys. 3.3 Przedstawiony schemat blokowy zawiera tylko jeden regulator, a podpis wskazuje na strukturę kaskadową czyli taką w której występują conajmniej dwa regulatory połączone szeregowo. Podobne, błędne podpisy są na kolejnych rysunkach.
8. Str. 51 w^1 - Zawarte stwierdzanie o identyczności układów z kaskadowym połączeniem regulatorów i układu z regulatorem stanu jest nieuprawnione.
9. Str. 54 w^7 - w nazwie podrozdziału jest ... k*askadowa struktura sterowania* ... przy czym schemat i opisy wskazują na istnienie tylko jednego regulatora.
10. Str. 56 i 57 - podpisy pod rysunkami 3.18. i 3.19 są identyczne.
11. Str. 112 w^{13} - niezrozumiałe stwierdzenie o zastosowaniu jakiegoś układu, który ma uniemożliwiać jednoczesne obserwowanie momentu obciążenia i parametru T_2.
12. Str. 112 w_4 - Kolejny raz jest odwołanie do „tajemniczego" *algorytmu hybrydowego* doboru wartości wyrazów macierzy kowariancji. Jaki to jest algorytm ?
13. Str. 120 w_3 - nie ma rysunku 7.4j.
14. Str. 139 w_1 - proszę o wyjaśnienie dlaczego można wyciągnąć wniosek o braku konieczności stosowania bardziej złożonej struktury rozmytej? Uzyskiwane błędy estymacji nie są zerowe i może istnieje możliwość dalszego ich ograniczenia.
15. Str. 179 w_{20} - Autor ocenia, że wprowadzenie dynamicznej adaptacji powoduje znaczącą poprawę jakości estymacji poszczególnych wielkości. Wykresy z rysunku 7.52 tego nie potwierdzają.

16. Str. 197 w_4 - W tabeli 7.52 komórki o identycznych wartościach są „podświetlone różnymi kolorami" ? Takie przypadki są także widoczne w innych tabelach.
17. Str. 202 w_4 - czym poparte jest stwierdzenie o lepszej jakości estymacji w przypadku bezśladowego i bezśladowego rozmytego filtru Kalmana? Lepsza jakość w stosunku do czego?
18. Str. 206 w_{15} - użycie określenia klucz nie jest poprawne. Jest to łącznik energoelektroniczny.
19. Str. 208 - Rys. 8.3 a. jak mierzono moment elektromagnetyczny?
20. Str. 210 w_7 - ... *Występuje tu szybsza zbieżność omawianego błędu w porównaniu do algorytmu EKF* ... - na jakiej podstawie wysnuto talki wniosek. Podobne oceny pojawiają się także w innych fragmentach tego rozdziału.

5. Wniosek końcowy

Sformułowane powyżej uwagi dyskusyjne nie zmieniają pozytywnej oceny pracy. Praca stanowi wystarczająco dojrzałe przedstawienie zagadnień estymacji zmiennych stanu i parametrów układu z wykorzystaniem filtru Kalmana, a w szczególności rozmytych filtrów Kalmana i stanowi samodzielny wkład Autora do teorii i praktyki w obszarze projektowania układu sterowania dla napędów o połączeniu sprężystym. Autor wykazał się znajomością zagadnień z dyscypliny „Automatyka i Robotyka", umiejętnością formułowania celów badawczych oraz przedstawiania wyników badań naukowych. Uzyskane rezultaty mogą być pomocne w dalszych pracach badawczych a także aplikacjach przemyslowych. W szczególności należy docenić fakt wykonania wielu eksperymentów dokumentujących poprawność zaproponowanych rozwiązań.

Moim zdaniem rozprawa doktorska **mgra inż. Krzysztofa Dróżdża** spełnia wymagania stawiane przez „*Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. u o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 Poz. 596) z późniejszymi zmianami*" i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Warszawa, 4-09-2017