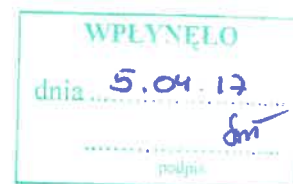


Prof. dr hab. inż. Krzysztof Zawirski
Politechnika Poznańska
Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej

Poznań, 31 marca 2017 r.



RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Pracownika
pt. "Problem LQ w implementacji cyfrowego sterowania i obserwacji
w napędzie z połączeniem sprężystym",**

przygotowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii
Biomedycznej Akademii Górniczo – Hutniczej im Stanisława Staszica w Krakowie
dr. hab. inż. Ryszarda Srokę, prof. AGH

1. Temat i zakres rozprawy

Obserwowany coraz częściej wzrost wymagań odnośnie do poprawy właściwości regulacyjnych i jednoczesnego zwiększania dynamiki zautomatyzowanych elektrycznych układów napędowych napotyka w wielu przypadkach na pewną przeszkodę jaką jest skończona sztywność ich konstrukcji mechanicznej. Ujawnia się to szczególnie w połączeniu silnika elektrycznego z napędzanym mechanizmem roboczym. Takie elastyczne (sprężyste) połączenie prowadzi do występowania rezonansów mechanicznych znacznie utrudniających precyzyjne i dobre dynamicznie sterowanie. Uwzględnienie elastycznego połączenia przy syntezy i analizie układu sterowania napędu wymaga wprowadzenia opisu części mechanicznej w postaci tzw. modelu dwumasowego a niekiedy modelu wielomasowego. Aby w układzie tym zapewnić dobrą dynamikę sterowania przy jednoczesnym zapewnieniu skutecznego tłumienia występujących drgań regulowanych wielkości, najczęściej prędkości lub położenia wału silnika lub mechanizmu roboczego, konieczne jest stosowanie specjalnych złożonych układów sterowania. Rozwiązaniu tego zagadnienia poświęconych jest wiele prac badawczych prowadzonych w ośrodkach naukowych zarówno w kraju jak i na świecie.

Oceniana rozprawa poświęcona jest zaimplementowaniu metody LQ do syntezy zarówno regulatora jak i obserwatora zmiennych stanu i zakłócenia w układzie napędowym z połączeniem sprężystym, przybliżonym układem dwumasowym. Autor rozprawy dokonał wnikliwego przeglądu literaturowego stosowanych w takich układach rozwiązań i na podstawie przeprowadzonej analizy sformułował zakres i cele swej pracy.

Postawiona teza rozprawy brzmi następująco :

"W układach sterowania cyfrowego napędem z połączeniem sprężystym istnieje możliwość efektywnego zastosowania problemu LQ w syntezy dyskretnego regulatora i obserwatora prowadząca do uzyskania optymalnych przebiegów w stanach dynamicznych i wymaganej dokładności stabilizacji prędkości kątowej agregatu technologicznego".

Przez przebiegi optymalne rozumie Autor dobre tłumienie oscylacji w układzie regulacji, ograniczenie wartości momentu elektromagnetycznego oraz uzyskanie dobrych wskaźników odpornościowych. Tak postawiona teza i przyjęte cele rozprawy mieszczą się w aktualnej tematyce badawczej, rozwijanej przez wiele ośrodków naukowych. Temat opiniowanej rozprawy jest zatem ulokowany w światowym nurcie badań, jest aktualny i ważny dla rozwoju układów sterowania napędów elektrycznych.

2. Charakterystyka rozprawy

Opiniowana rozprawa obejmuje łącznie 146 stron i podzielona jest na rozdział wprowadzający, dwanaście rozdziałów, podsumowanie, dodatek i wykaz literatury. Rozdział pt. „Wprowadzenie” charakteryzuje tematykę rozprawy, formułuje tezę rozprawy i określa jej cele. W rozdziale tym Autor dokonuje też przeglądu światowej literatury poświęconej zagadnieniom obserwatorów zmiennych stanu i zakłócenia oraz układom regulacji prędkości napędu z połączeniem sprzężystym.

W rozdziale 1 przedstawiono model matematyczny napędu prądu stałego dla układu z połączeniem sztywnym i połączeniem sprzężystym dwumasowym. Pokazano przebiegi przejściowe prędkości silnika i napędzanego mechanizmu oraz momentu skręcającego, elektromagnetycznego i obciążenia dla układu dwumasowego bez sprzężeń zwrotnych (w układzie otwartym). Scharakteryzowano też skrótowo wykorzystane w rozprawie struktury regulacji i obserwatora. W rozdziale 2 scharakteryzowano zaimplementowaną w rozprawie metodę optymalizacji parametrycznej regulatora stanu LQ z uwzględnieniem nieskończonego horyzontu sterowania dla układów ciągłych, dyskretyzację podejścia ciągłego oraz strukturę proporcjonalno-całkową. Rozdział 3 omawia problemy syntezy obserwatorów zmiennych stanu pełnego i zredukowanego rzędu oraz obserwatora zakłócenia, jakim jest moment oporowy. W rozdziale 4 pokazano przegląd struktur układów regulacji dla napędu jedno i dwumasowego. Dla układu dwumasowego zaprezentowano oryginalny układ regulacji o zmiennej, przełączalnej strukturze. Rozdział 5 poświęcony jest optymalizacji ciągłego regulatora prędkości typu LQ o strukturze tradycyjnej i proporcjonalno-całkowej. Działanie zilustrowano wynikami badań symulacyjnych. W rozdziale 6 omówiono budowę i dobór parametrów obserwatora zmiennych stanu i zakłócenia opracowanego przez M. Tondosa i opisanego w [54, 102, 103] a wykorzystanego w rozprawie i oznaczonego symbolem TO. Jego właściwości zilustrowano wynikami badań symulacyjnych. Rozdział 7 przedstawia układ regulacji z nadrzędnym regulatorem prędkości optymalizowanym wg metody LQ, z podporządkowanym obwodem regulacji prądu twornika oraz z wcześniej (rozd. 6) opisanym obserwatorem. W rozdziale 8 omówiono modyfikację układu sterowania prędkości przez wprowadzenie przełączalnej struktury regulatora o dwóch niezależnie optymalizowanych modułach. Jeden optymalizowany był ze względu proces rozruchu a drugi ze względu na stabilizację prędkości przy występujących zakłóceniach. Wymagało to zaproponowania dwóch różniących się wskaźników jakości regulacji. Uzyskane właściwości zilustrowano wynikami badań symulacyjnych. Rozdział 9 poświęcony jest cyfrowej czyli dyskretniej realizacji regulatora

liniowo-kwadratowego LQ oraz jego odmiany proporcjonalno-całkowej wraz obserwatorem TO. Szczególną uwagę Autor zwrócił na uwzględnienie kodowania sygnałów w formacie stałoprzecinkowym. Rozdział 10 omawia badania eksperymentalne cyfrowej realizacji wybranych struktur obserwatorów pełnego i zredukowanego rzędu, zaprojektowanych w rozprawie metodą LQ i porównuje ich właściwości z obserwatorem TO. W początkowej części rozdziału opisano konstrukcję stanowiska laboratoryjnego. Kolejny rozdział 11 prezentuje wyniki badań eksperymentalnych cyfrowej realizacji struktur regulacyjnych z wcześniej zaproponowanymi regulatorami i obserwatorami LQ. Badania przeprowadzono dla różnych okresów próbkowania i różnych długości słów kodowania stałoprzecinkowego. W rozdziale 12 przeprowadzono badanie odporności zaproponowanego układu regulacji z wykorzystaniem kryterium Nyquista. Badania te wykonano dla układu sterowania bez i z obserwatorami. Jako wskaźniki odporności przyjęto zapas modułu i zapas fazy. Rozdział pt. „Podsumowanie pracy” zawiera resume wcześniejszych wyników badań i wniosków podawanych w końcowych częściach poszczególnych rozdziałów. Rozprawę kończy dodatek podający parametry badanego układu oraz wykaz literatury.

Rozprawa jest napisana poprawnym i zrozumiałym językiem z troską o jej zrozumienie przez czytelnika.

3. Główne rezultaty rozprawy

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnień badawczych związanych z implementacją metody LQ do sterowania i obserwacji w układzie automatyki napędu elektrycznego z połączeniem sprężystym, traktowanym jako model dwumasowy. W literaturze można spotkać przykłady stosowania tej metody do projektowania regulatora prędkości napędu w układzie dwumasowym jednak zaprezentowane w rozprawie podejście wyróżnia się dobrym uzasadnieniem teoretycznym i łącznym ujęciem zagadnienia syntezy regulatora i obserwatorów. Rozprawa wyróżnia się starannym opisem matematycznym kolejnych kroków w procesie syntezy regulatorów i obserwatorów zmiennych stanu i zakłóceń, jak i przeprowadzeniem badań symulacyjnych oraz weryfikujących badań eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym.

Do najważniejszych oryginalnych wyników rozprawy zaliczyć można:

- Opracowanie całościowej koncepcji optymalizacji regulatora prędkości oraz obserwatora zmiennych stanu i zakłóceń na gruncie metody LQ dla napędu z mechanizmem dwumasowym. Wartą podkreślenia nowością jest przeprowadzenie tej syntezy również dla dyskretnej realizacji regulatora i obserwatorów.
- Oryginalnym podejściem Autora jest wprowadzenie regulacji prędkości napędzanego mechanizmu (tzw. agregatu technologicznego) w miejsce często spotykanej w literaturze regulacji prędkości silnika.

- Uwzględnienie w procesie syntezy skończonej rozdzielczości przetworników pomiarowych A/C, skończonej długości słów kodowania stałoprzecinkowego oraz okresu próbkowania i oceny ich wpływu na właściwości regulacyjne na podstawie przeprowadzonej analizy, w tym także eksperymentalnej.
- Przeprowadzenie analizy odporności dyskretniej realizacji różnych wariantów układu regulacji, z obserwatorem i bez, wykorzystując kryterium Nyquista do oceny zapas modułu i fazy, a następnie eksperymentalnej weryfikacji właściwości dynamicznych. Na podkreślenie zasługuje zaproponowane podejście, które w przypadku uzyskania niezadowalających wskaźników odporności polega na zmianie współczynników wag we wskaźniku optymalizacji w celu poprawy badanej odporności.

Przeprowadzenie omówionych rozważań teoretycznych oraz obszernych badań symulacyjnych i eksperymentalnych dowodzi, że Autor posiadał ogólną wiedzę teoretyczną a także i praktyczną w dyscyplinie naukowej Elektrotechnika. Rozwiązał samodzielnie trudne zagadnienia naukowe, sformułował założenia, wybrał i zastosował właściwe metody teoretyczne i doświadczalne oraz udokumentował to wynikami badań zamieszczonymi w rozprawie.

4. Ważniejsze uwagi krytyczne i dyskusyjne.

Wśród wielu ciekawych i oryginalnych rezultatów rozprawy można zauważyć także pewne zagadnienia dyskusyjne.

- 1) Uwaga pierwsza ma charakter b. ogólny. W rozprawie rozważa się optymalizację układu regulacji prędkości dla napędu o złożonej tzw. dwumasowej strukturze mechanicznej. W tego typu układach niemal zawsze występuje podporządkowana (podrzędna) czyli wewnętrzna pętla regulacji momentu elektromagnetycznego silnika. Oczywiście pętla ta realizowana jest jako regulacja wybranego prądu lub składowej prądu silnika jednak jej celem jest regulacja wielkości mechanicznej – momentu. Tak jest zarówno w przypadku układu regulacji napędu prądu stałego jak i we wzorowanych na nim wektorowo sterowanych układach napędu prądu przemiennego z silnikami indukcyjnym bądź synchronicznym o magnesach trwałych. W każdym z tych przypadków można transmitancję operatorową zamkniętej wewnętrznej pętli regulacji momentu przybliżyć transmitancją członu inercyjnego pierwszego rzędu. Autor postępuje podobnie jednak wyprowadza tę transmitancję stosując metodę syntezy regulatora prądu opracowaną we wcześniejszych pracach zespołu, w którym pracuje. Tym samym sugeruje, że takie podejście jest słuszne jedynie dla napędu prądu stałego, choć w końcowym rozdziale rozprawy zaznacza, że podobne podejście można by zastosować dla napędów prądu przemiennego. Zdaniem niżej podpisanego warto by już na początku rozprawy stwierdzić, że przy regulacji prędkości kątowej rodzaj napędu nie gra roli pod warunkiem wprowadzenia wewnętrznej pętli regulacji momentu (prądu) o dobrych właściwościach dynamicznych. Takie

podejście podkreśliło by bardziej uniwersalny charakter rozprawy i uzyskanych w niej wyników.

- 2) W rozprawie zaproponowano metodę regulacji prędkości z regulatorem o zmiennej strukturze. Autor zaznacza jednak, że warunkiem poprawnej pracy takiego regulatora jest łagodne przełączanie między dwoma częściami (modułami) jego struktury. Zdaniem Autora zadanie to realizuje rozwiązanie pokazane na rys. 4.10. Bez odpowiedniego komentarza nie wynika to jednak wprost z tego rysunku.

Znana jest natomiast w literaturze koncepcja łagodnego przełącznika (ang. *soft switch*) a jedna z jego realizacji wykorzystuje zasadę stosowaną w systemach rozmytych. Wydaje się, że uzasadnione było by zastosowanie tutaj tej koncepcji.

Celowe jest też w tym miejscu wspomnieć, że zagadnienie uzyskiwania dobrych właściwości regulacyjnych prędkości zarówno przy zmianach wartości zadanej jak i przy zmianach zakłócenia można rozwiązać stosując regulator o dwóch stopniach swobody (2 DOF – 2 *Degrees Of Freedom*) co stanowi alternatywne podejścia do zaproponowanego w rozprawie. W odniesieniu do tej struktury przełączanej warto zauważyć, że struktury regulatora pokazane na rys. 4.9 i 4.10 nie są takie same.

- 3) W rozprawie w trakcie procesu syntezy regulatora i obserwatorów wielokrotnie arbitralnie dobierano wartości elementów macierz Q we wskaźniku jakości. W opisie pracy badawczej, jaką stanowi rozprawa doktorska, istotne jest nie tylko jakie dobrano wartości ale czym się kierowano przy ich wyborze i ewentualnie jakie przeprowadzano testy pozwalające na trafny wybór. W rozprawie podano niewiele uwag i komentarzy w tej sprawie.
- 4) Dynamikę obwodu regulacji momentu (prądu twornika) określa stała czasowa β w zastępczej transmitancji członu inercyjnego I rzędu. Stała ta określona jest w procesie syntezy regulatora prądu, opisanej w rozdz. 4.1.1 a jej wartość wynika z założonej szybkości zmian prądu czyli jego pochodnej czasowej. W obwodzie regulacji prądu występuje szereg elementów wnoszących inercję czy opóźnienie, należą do nich opóźnienie wynikające z okresowej pracy przekształtnika, okresu próbkowania regulatora czy niekiedy dodatkowych filtrów pomiarowych. Z rozprawy nie wynika, czy te opóźnienia zostały uwzględnione w stałej β .
- 5) Ogranicznik sygnału wyjściowego regulatora prądu, pokazany na rys. 4.8 nie zapewnia ograniczenia prądu (momentu) zadanego gdyż nie ogranicza on całkowitego sygnału prądu zadanego u_z .
- 6) Na rys. 9.2 wprowadzono szereg bloków oznaczonych symbolami UD_1 , UD_2 , ..., UD_6 nie podając w tekście ich opisu.

- 7) Na rysunkach prezentujących wyniki badań symulacyjnych wykresy odpowiedzi na skok momentu oporowego są w tej samej skali co cały przebieg prędkości przy rozruchu, w efekcie jest on mało czytelny. W tych miejscach warto by zastosować powiększenie skali prędkości. Ten mankament występuje na wielu rysunkach, przykładowo można wymienić rysunki: 5.1, 6.8, 6.10, 6.11, 7.1, 7.2 i kilka innych.
- 8) Struktura regulatora prędkości z trzema ogranicznikami pokazana na rys. 4.1 może prowadzić do zjawiska wind-up.

Przedstawione wyżej uwagi mają w głównej mierze charakter porządkujący i dyskusyjny i nie umniejszają głównych wyników rozprawy.

5. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa mgr. inż. Adama Pracownika pt. **“Problem LQ w implementacji cyfrowego sterowania i obserwacji w napędzie z połączeniem sprzężystym”** stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie ważnego oraz złożonego teoretycznie problemu badawczego. Uważam, że oceniana rozprawa spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i dlatego należy uznać ją za rozprawę doktorską i dopuścić do publicznej obrony.

Zważywszy, że rozprawa prezentuje dobre uzasadnienie teoretyczne zagadnienia syntezy regulatora i obserwatorów a także stanowi całościowe ujęcie problemu od rozważań teoretycznych przez przeprowadzeniem badań symulacyjnych do weryfikujących badań eksperymentalnych wnioskuję o jej wyróżnienie .

