

dr hab. inż. Kazimierz Jagieła
profesor ATH Bielsko-Biała
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki

Częstochowa, 05.05.2017 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama PRACOWNIKA

**pt.: „Problem LQ w implementacji cyfrowego sterowania i obserwacji
w napędzie z połączeniem sprzężystym”**

**dla Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii
Biomedycznej AGH im. St. Staszica w Krakowie**

Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska **mgr inż. Adama Pracownika** doktoranta prof. dr hab. inż. Zbigniewa Hanzelki jako promotora i dr inż. Grzegorza Siekluckiego jako promotora pomocniczego, pt. „Problem LQ w implementacji cyfrowego sterowania i obserwacji w napędzie z połączeniem sprzężystym” zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH w Krakowie z dnia 26.01.2017 r. oraz zleceniem Pana Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH w Krakowie prof. dr hab. inż. Ryszarda Sroki zgodnie z pismem nr WEAlilB-b/510-25-1/13 w sprawie opracowania recenzji.

1. Aktualność tematyki pracy doktorskiej

Tematyka pracy dotyczy wciąż aktualnych zagadnień naukowych z zakresu sterowania w zautomatyzowanym napędzie prądu stałego, w którym występują połączenia sprzężyste między silnikiem a maszyną roboczą. Istnienie takich połączeń wielokrotnie prowadzi do występowania niepożądanego generacji drgań w układzie mechanicznym z nałożoną interakcją zjawisk elektromagnetycznych pochodzących od maszyn elektrycznych, których skutkiem mogą być poważne awarie, szczególnie dotkliwe w hutniczych napędach elektrycznych. Na podstawie bogatej literatury z dziedziny doboru elementów układu elektromechanicznego, jak również własnych doświadczeń technicznych Autora rozprawy, wydaje się w pełni zasadne przyjęcie rozważań naukowych ukierunkowanych na cyfrowe sterowanie napędem przy implementacji określonych reguł i zasad systemów regulacji, w tym proponowanej w rozprawie metody LQ. Wykorzystanie metody liniowo - kwadratowej LQ do optymalizacji dyskretnego regulatora i obserwatora zmiennych stanu i zakłócenia dla układu 2. masowego jest zasadniczym celem pracy, który z punktu widzenia naukowego i poznawczego jest bardzo interesujący, bowiem

pozwała osiągnąć zadawalające parametry regulacji wielkości fizycznych w stanach nieustalonych wraz ze stabilizacją prędkości kątowej zespołu napędowego.

Zrealizowanie badań teoretycznych i doświadczalnych z tego zakresu przez mgr inż. Adama Pracownika, który na co dzień boryka się z różnymi zagadnieniami eksploatacyjnymi występującymi w praktyce przemysłowej należy uznać za w pełni uzasadnione i celowe, bowiem stanowi to znakomite połączenie praktyki inżynierskiej z dociekaniem naukowymi.

Uważam, że tematyka rozprawy jest ważna, aktualna i bardzo nowoczesna. Rezultaty naukowe prowadzonych badań mają charakter aplikacyjny, które trzeba bardzo mocno popierać i wysoko oceniać.

2. Ocena strony redakcyjnej pracy

Rozprawa liczy 146 stron i składa się z wykazu ważniejszych oznaczeń, wprowadzenia, zasadniczych dwunastu rozdziałów, podsumowania pracy, dodatku w formie danych parametrycznych dotyczących silników oraz wartości mechanicznych związanych ze sprężystymi wałami, wykazu literatury, oraz streszczeniem rozprawy w języku angielskim. O dużym nakładzie pracy Autora świadczą następujące dane liczbowe: ogólna ilość rysunków to według numeracji - 100 (jest ich znacznie więcej z uwagi na dodatkowe oznaczenia literowe w niektórych przypadkach w postaci a, b, c i d) , tabel – 26, cytowana literatura zamieszczona w spisie bibliograficznym zawiera 119 pozycji w tym 5 publikacji współautorskich Doktoranta. W recenzowanej rozprawie znajdują się nieliczne błędy interpunkcyjne, które nie mają wpływu na ogólną wysoką wartość pracy. Bardzo dobrą ocenę można wystawić szacie graficznej pracy, wszystkie rysunki i oscylogramy są opracowane bardzo dokładnie, czytelnie i starannie.

3. Charakterystyka i ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

Pierwsza część rozprawy to „Wprowadzenie” poświęcone podziałowi obserwatorów i regulatorów ze względu na działanie i metody doboru ich parametrów, opracowane na podstawie rozpoznania literaturowego. Autor w tej części precyzuje swój cel pracy w formie tezy z podaniem metodyki badań wykonanych w poszczególnych rozdziałach rozprawy.

Tytuł rozdziału pierwszego to „**Model matematyczny napędu prądu stałego z połączeniem sprężystym**”, w którym Autor przedstawia koherentne równania elektromechaniczne dla napędu prądu stałego układu 1. masowego oraz 2. masowego. W części końcowej tego rozdziału prezentuje przebiegi wielkości elektromechanicznych (ω_1 , ω_2 , M_e , M_s) dla układu 2. masowego w zależności od rozkładu mas bezwładności J w poszczególnych podukładach zespołu silnik - maszyna robocza.

Rozdziały: drugi "**Problem liniowo - kwadratowy (LQ)**" i trzeci "**Zasada odtwarzania zmiennych stanu**" stanowią wprowadzenia teoretyczne z zakresu sterowalności i obserwowalności, problemu liniowo - kwadratowego z nieskończonym horyzontem sterowania dla systemów ciągłych, zasad dyskretyzacji w problemie LQ z uwzględnieniem proporcjonalno-

całkowej regulacji LQ. Na szczególną uwagę zasługują dwa schematy blokowe obserwatora stanu i zakłócenia (rys.3.1) oraz schemat blokowy cyfrowego obserwatora zmiennych stanu (rys.3.3).

W kolejnym rozdziale czwartym, zatytułowanym "**Układy regulacji napędem z połączeniem sprężystym**" Doktorant bardzo starannie scharakteryzował struktury regulacji dla układu 1. masowego i 2. masowego. Analizuje dokładnie niezależnie obwód regulacji prądu z regulatorem typu PI oraz obwód regulacji prędkości kątowej z regulatorem P/PI. Doktorant proponuje oryginalne rozwiązanie systemu regulacji o zmiennej strukturze dla układu 2. masowego (rys.4.9) wprowadzając dwa regulatory: rozruchowy i stabilizacyjny, których struktura zmienia się w zależności od estymowanych sygnałów obserwatora tj. momentu skrętnego M_s i prędkości maszyny roboczej ω_2 .

Rozdział piąty o tytule "**Optymalizacja regulatora prędkości dla układu 2. masowego**" dotyczy optymalizacji ciągłego regulatora LQ oraz regulatora proporcjonalno-całkowego LQ zastosowanego do rzeczywistego zespołu napędowego z silnikiem prądu stałego o mocy 1kW. Potwierdzeniem rozważań teoretycznych są wyniki badań symulacyjnych wykonanych w oparciu o program narzędziowy MATLAB-SIMULINK, które ilustrują przebiegi prędkości kątowych silnika i maszyny roboczej oraz momentów: elektromagnetycznego i skrętnego dla dwóch różnych relacji między wartościami momentów bezwładności J_1 i J_2 .

Rozdział szósty to "**Obserwator stanu i zakłócenia - podejście klasyczne**", w którym Autor przedstawia opracowany i zbudowany przez prof. Macieja Tondosa obserwator wraz z doбором jego parametrów. Posiłkując się publikacjami prof. M. Tondosa projektuje w pakiecie MATLAB-SIMULINK obserwator zmiennych stanu oraz zakłócenia. Dysponując prawidłowo zidentyfikowanymi parametrami elektromagnetycznymi i elektromechanicznymi zespołów napędowych wykonuje cały szereg badań symulacyjnych, które zestawione są w postaci przebiegów czasowych pokazanych na rysunkach od 6.3 do 6.11. Rozdział kończy się krótkim podsumowaniem.

W rozdziale siódmym "**Układ sterowania z podrzędnym regulatorem prądu**" opisano w formie kompleksowego układu sterowania z nadrzędnym regulatorem prędkości zoptymalizowanym według zasady LQ oraz podrzędnym regulatorem prądu twornika z wykorzystaniem klasycznego obserwatora stanu. Na bazie równania stanu (7.1) wykonano serię badań symulacyjnych a ich wyniki przedstawiono w postaci przebiegów prędkości kątowych i momentów elektromagnetycznego i skręcającego dla różnych wartości sygnałów zadających i zakłócających w postaci momentu obciążenia.

Modyfikacja regulatora prędkości kątowej według pomysłu Autora zgodnie z ideą pokazaną na rys.4.9 jest przedmiotem rozważań rozdziału ósmego "**Metoda regulacji o zmiennej strukturze**". Istota modyfikacji polega na wprowadzeniu przełączalnej struktury regulatora, pełniącego rolę regulatora adaptacyjnego, który złożony jest z dwóch podzespołów

odpowiedzialnych za stan rozruchu i hamowania oraz stabilizację prędkości kątowych podczas występowania zakłóceń. Wykorzystując równania stanu (8.1) zapisane dla kaskadowego systemu regulacji układem 2. masowym z regulatorem typu P oraz (8.2) [w tekście jest błędne oznaczenie jako (8.1)] dla regulacji proporcjonalno-całkowej LQ wraz z ich wzajemnym połączeniem w układ o zmiennej strukturze, wykonano różne symulacje komputerowe w pakiecie MATLAB-SIMULINK zestawione w postaci odpowiednich przebiegów prędkości i momentów. Rozdział kończy się krótkimi sformułowaniami traktowanymi jako wnioski wynikające z przeprowadzonych badań symulacyjnych.

W rozdziale dziewiątym "**Cyfrowa regulacja i obserwacja w układzie 2. masowym**" po krótkim wprowadzeniu z zakresu przetwarzania sygnałów analogowych na sygnały cyfrowe Autor dokonuje optymalizacji regulatora prędkości dla potrzeb cyfrowej regulacji i obserwacji. Strukturę cyfrowej regulacji LQ układem 2. masowym przeprowadzono w oparciu o stałoprzecinkowe bloki obliczeniowe przedstawione na rys.9.2. Na podstawie otrzymanych rezultatów badań symulacyjnych uwzględniających również liczbę bitów przetworników A/C sformułowano zasadnicze właściwości cyfrowego sterowania układem 2. masowym.

Rozdział dziesiąty to "**Badania eksperymentalne cyfrowych obserwatorów LQ**", w którym opisano układ laboratoryjny do badań obserwatorów LQ następnie przedstawiono schematy w programie SIMULINK do pomiaru sygnałów obserwatora LQ w formie cyfrowej pełnego rzędu (wszystkich zmiennych stanu) oraz zredukowanego rzędu. Wyniki przebiegów dla wielkości rzeczywistych i odtworzonych dla obserwatorów LQ typu LQOF i LQOR porównano z obserwatorem klasycznym według reguł opracowanych przez prof. M. Tondosa.

W rozdziale jedenastym "**Badania eksperymentalne cyfrowej regulacji i obserwacji LQ**" przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych cyfrowej regulacji i obserwacji LQ dla układu 2. masowego z zastosowaniem zespołu napędowego oznaczonego symbolem N2 w dodatku rozprawy. Podczas badań eksperymentalnych wykorzystano układy cyfrowej regulacji z obserwatorami LQOF (pełnego rzędu - rys.11.1) oraz LQOR (zredukowanego rzędu - rys.11.6) zbudowanymi w oparciu o pakiet SIMULINK (rys.11.1, rys.11.6). Jak wynika z tabel, głównie z 11.3 i 11.4 oraz 11.5 i 11.6 badano również wpływ czasu próbkowania oraz kodowania stałoprzecinkowego na parametry dynamiczne zmiennych stanu.

Ostatni numerowany rozdział dwunasty "**Analiza odporności układu regulacji - badania eksperymentalne**" poświęcony został analizie odporności układu regulacji w złożonym zautomatyzowanym napędzie prądu stałego z uwzględnieniem kryterium Nyquista. Obliczenia zapasu modułu (GM) i fazy (PM) zostały wykonane dla układów sterowania z regulatorami LQ nie wyposażonymi i wyposażonymi w obserwator typu LQOF (pełnego rzędu).

W "**Podsumowaniu pracy**" Doktorant w sposób zwięzły przedstawił najważniejsze wnioski, które potwierdzają iż postawiona teza rozprawy została właściwie udowodniona. Należy

zaznaczyć, że wcześniej Autor na końcu każdego rozdziału precyzował zasadnicze wnioski i zależności wynikające z rozważań danego problemu.

Jak wcześniej zaznaczono w pracy na stronie 139 znajduje się "**Dodatek**", który zawiera parametry techniczne dla dwóch zespołów napędowych oznaczonych symbolicznie przez (N1) i (N2).

4. Oryginalny dorobek Autora oraz przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Reasumując należy uznać, że zarówno wartość merytoryczna rozprawy, jak i jej kompozycja potwierdza wysokie walory naukowe i techniczne dla wykonanych analiz, badań i symulacji komputerowych uzasadnionych w drodze eksperymentu laboratoryjnego.

W świetle powyższego za oryginalne osiągnięcia naukowe opiniowanej pracy doktorskiej uważam:

1. Opracowanie kompleksowych modeli sterowania złożonego zespołu napędowego prądu stałego z połączeniem sprzężystym w układzie 2. masowym z zastosowanym regulatorem prędkości LQ oraz obserwatorem stanu i zakłócenia.
2. Modyfikację układu regulacji prędkości z zastosowaniem metody o zmiennej strukturze wraz z optymalizacją regulatora rozruchu i regulatora stabilizacyjnego. Na szczególne podkreślenie zasługuje metoda optymalizacji regulatora prędkości dla systemu cyfrowego z członem cyfrowym obserwatora stanu według rys.9.2 z uwzględnieniem całkowego wskaźnika jakości określonego wzorem (9.3).
3. Wykonanie serii badań eksperymentalnych cyfrowych obserwatorów LQ pełnego rzędu (LQOF) i zredukowanego rzędu (LQOR) z uwzględnieniem czasu próbkowania T_s oraz liczby bitów przetworników A/C.
4. Implementację komputerową z wykorzystaniem programu MATLAB-SIMULINK do opracowanych modeli układów cyfrowej regulacji z obserwatorami LQ pełnego i zredukowanego rzędu.
5. Ocenę zapasu stabilności dla zamkniętych układów regulacji przy zastosowaniu kryterium Nyquista z uwzględnieniem regulatora LQ wraz z obserwatorem pełnego rzędu LQOF. Autor rozprawy udowadnia, iż na właściwą odporność układu regulacji w sensie stabilności odpowiadają wartości wag macierzy Q wskaźnika jakości J_c określonego wzorem (9.3). W tym celu wykonuje obliczenia dla trzech przypadków wartości wag \check{R} , dla których prezentuje ploty Nyquista, charakterystyki Bodego dla układów otwartych oraz przebiegi wielkości elektromechanicznych rzeczywistych i odtworzonych.

Rozprawa doktorska świadczy pozytywnie o ugruntowanej wiedzy teoretycznej Autora i opanowaniu przez Doktoranta warsztatu naukowego wspomaganego praktycznym doświadczeniem zawodowym. Wykonane badania eksperymentalne z wykorzystaniem nowoczesnych programów komputerowych potwierdzają bardzo dobre przygotowanie mgr. inż. Adama Pracownika do rozwiązywania trudnych zadań projektowych o charakterze innowacyjnym. Na uwagę zasługuje podjęcie ambitnego tematu, inspirowanego potrzebami eksploatacyjnymi w

rzeczywistych układach napędowych wymagających dokładnej stabilizacji prędkości obrotowej niezależnie od różnych czynników zakłócających.

5. Uwagi dyskusyjne i komentarze do rozprawy

W trakcie czytania pracy nasunęło się kilka uwag i wątpliwości, które wymagają wyjaśnień i uzupełnień Doktoranta. Zdaniem recenzenta uwagi można podzielić na dwie grupy: pierwsza to uwagi krytyczne wymagające dyskusji Autora w trakcie publicznej obrony (tj. pkt.1 do pkt.4) oraz druga to nieliczne błędy redakcyjne zauważone w tekście rozprawy.

1. Na rys.4.9 - str.44 Autor rozprawy prezentuje zasadę pracy układu regulacji o zmiennej strukturze z podwójnym modułem regulatora prędkości z zastosowaniem przełącznika S. W jaki sposób Doktorant zrealizował funkcję przełączającą typu ON-OFF w rzeczywistym układzie napędowym? Podobną uwagę można sformułować do schematu układu cyfrowej regulacji z obserwatorem LQ pełnego (rys.11.1) i zredukowanego rzędu (rys.11.6) w oprogramowaniu SIMULINK. W obu tych układach występuje maska "Regulator LQ" - co kryje się w strukturach wewnętrznych tych modułów?
2. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych istotne znaczenie mają wartości wag wyrazów macierzy Q i R będących elementem całkowitego wskaźnika jakości określonego wzorem (2.9 - str.21) oraz jego modyfikacją w postaci wzoru (9.3). Na jakiej podstawie, przy zastosowaniu jakich reguł, Doktorant dobierał odpowiednie wartości wag opisanych m.in. w tabelach: 7.1, 7.2, 7.3,...,9.1, 9.2 itd.? Zagadnienie to ponownie występuje podczas badań stabilności Nyquista, w których Autor w sposób arbitralny dobiera macierze Q i wartości R np. wzory (12.26), (12.28). Proszę o wyjaśnienie jaki wpływ mają poszczególne wyrazy wag macierzy Q na parametry dynamiczne przebiegów rzeczywistych i odtworzonych prędkości kątowych ω_1 i ω_2 oraz momentu skręcającego.
3. W strukturze cyfrowej regulacji LQ układem 2. masowym wraz z obserwatorem (rys.9.2 - str.87) występują układy dopasowujące (w.3g str.88) o oznaczeniach od UD1 do UD6 tak w członie analogowym jak i cyfrowym. Należy domniemywać, że mają one charakter układów jedno lub wielowymiarowych. Proszę o doprecyzowanie jakie sygnały są podawane na wejścia a jakie otrzymuje się na wyjściach tych układów, jakie są kryteria dopasowania i jakie pełnią one funkcje?
4. Na stronie 104 w końcowej części podsumowania rozdziału dziesiątego Autor zamieszcza fragment w rozprawie w postaci algorytmu pracy filtr Kalmana, bez podania jakiegokolwiek komentarza dotyczącego tego zagadnienia. Zdaniem recenzenta ta część pracy w takiej formie pełni rolę wypełniacza, aczkolwiek w końcowym podsumowaniu Autor odnosi się do stwierdzenia, iż liczba obliczeń numerycznych dla obserwatora LQ jest znacznie mniejsza niż dla filtru Kalmana. Z uwagi na wprowadzenie tego algorytmu

do treści pracy, proszę Doktoranta o krótki komentarz uzasadniający podobieństwo i różnicę w działaniu obserwatora LQ i filtra Kalmana.

5. W punkcie drugim niniejszej recenzji wymieniłem, iż w pracy jest 26 tabel. Niestety Autor oprócz numeracji nie zastosował opisów tabel oraz nie dokonał opisów poszczególnych elementów występujących w tabelach, co w pewnym stopniu utrudnia czytelność rozprawy.
6. Na podstawie jakiego źródła literaturowego Doktorant podaje wzory na pulsację drgań własnych oraz współczynnika tłumienia drgań układu 2. masowego - wzór (1.10)?

Wymienione pierwsze cztery uwagi mają charakter typowo dyskusyjny i w żaden sposób nie umniejszają bogatej treści merytorycznej rozprawy, wręcz przeciwnie ubogacą ją w trakcie publicznej obrony pracy. Pozostałe dwie uwagi wyszczególnione powyżej nie mają żadnego znaczenia dla zasadniczej wartości merytorycznej pracy. Praca pod względem stylistycznym została napisana bardzo poprawnie bez żadnych zastrzeżeń.

6. Konkluzja

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska wnosi duży wkład i nową jakość do teorii sterowania cyfrowego w złożonych układach napędowych z uwzględnieniem wzajemnych połączeń sprzężystych. Postawiony cel pracy w formie tezy został w pełni udowodniony.

Biorąc pod uwagę wartość naukową i poznawczą rozprawy uważam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej pt. „**Problem LQ w implementacji cyfrowego sterowania i obserwacji w napędzie z połączeniem sprzężystym**” mgr inż. Adam Pracownik samodzielnie i w sposób oryginalny rozwiązał bardzo ważny problem z dziedziny elektrotechniki oraz wykazał się umiejętnościami wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych.

Stwierdzam, że w świetle obowiązujących przepisów, tj.: Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r. nr 65, poz. 595 z późn. zm.) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2011 r. nr 204, poz. 1200) praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Uwzględniając wszystkie aspekty pracy, uważam że rozprawa spełnia moim zdaniem z nadmiarem kryteria stawiane rozprawom doktorskim, w związku z tym wnioskuję o jej wyróżnienie.

