Prof. dr hab. inż. Mirosław Galicki
Wydział Mechaniczny
Instytut Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytet Zielonogórski
ul. Podgórna 50
65-246 Zielona Góra

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 04 -12- 2019
Rektor Politechniki Poznańskiej
prof. dr hab. inż. Tomasz Łodygowski
z up. prof. dr hab. inż. Andrzej Kasiński
Dziekan

Zielona Góra. 28.11.2019

Recenzja

rozprawy doktorskiej pt. ***„Metoda sterowania suboptymalnego z wykorzystaniem linearyzacji układu zamkniętego"*** autorstwa mgr inż. Pauliny Superczyńskiej.

Opiniowana praca doktorska dotyczy bardzo aktualnego a zarazem trudnego do rozwiązania zagadnienia naukowego jakim jest zadanie sterowania optymalnego nieliniowych obiektów skupionych opisanych różniczkowymi równaniami stanu z całkowym kwadratowym wskaźnikiem jakości przedstawiającym zarówno energię dostarczoną do obiektu jak i traconą. Dynamikę obiektu traktuje się w pracy jako w pełni znaną. W rozważaniach pomija się ograniczenia nierównościowe na sterowania oraz zmienne stanu a także nie uwzględnia się wpływu zewnętrznych sygnałów zakłócających, które mogą oddziaływać na obiekt. Problem sterowania optymalnego postawiony przez Autorkę pracy jest zagadnieniem trudnym i w ogólnym przypadku nie są znane obliczeniowo efektywne metody rozwiązania takiego zadania. W literaturze przedmiotu istnieją dwa podejścia do problemu sterowania optymalnego. Pierwszym jest zastosowanie Zasady Maximum Pontriagina, które implikuje konieczność rozwiązania dwupunktowego problemu brzegowego. Drugie podejście wykorzystuje zasadę optymalności Bellmana, której konsekwencją jest konieczność rozwiązania nieliniowego skalarnego równania różniczkowego cząstkowego pierwszego rzędu. Podstawową wadą obu podejść jest bardzo duża złożoność obliczeniowa wyznaczania sterowania optymalnego (o ile ono istnieje) dla obiektów rzeczywistych co w praktyce wyklucza ich zastosowanie w trybie pracy on-line. W tym kontekście Autorka pracy zdecydowała się na poszukiwanie rozwiązania sub-optymalnego (redukującego liczbę

niezbędnych obliczeń), które wykorzystuje równanie Riccatiego zależne od stanu obiektu do syntezy regulatora, tzn. wyznaczenie sterowania również zależnego od stanu. Problem sterowania suboptymalnego z wykorzystaniem różniczkowego albo algebraicznego równania Riccatiego zależnego od stanu jak również liniowo podobnej parametryzacji modelu obiektu postawiony przez Autorkę pracy jest nadal zagadnieniem trudnym i w ogólnym przypadku nie są znane obliczeniowo efektywne algorytmy jego numerycznego wyznaczenia. Ponadto kwestia istnienia regulatora suboptymalnego staje się istotna przy jego potencjalnej konstrukcji. W literaturze krajowej i głównie zagranicznej znanych jest kilka podejść do tego skomplikowanego obliczeniowo problemu przy czym podejścia te opierają się na rozwiązywaniu równania Riccatiego dla każdego stanu oddzielnie co czyni je nieakceptowalnymi do implementacji na obiektach rzeczywistych z uwagi na dużą czasochłonność. Zaproponowana przez Autorkę metoda dekompozycji macierzy stanu obiektu jak również macierzy Riccatiego skutkuje uzyskaniem nowych algorytmów sterowania, które w porównaniu ze znanymi z literatury przedmiotu wydają się być obliczeniowo efektywniejsze.

W świetle powyższego praca przedstawia rozwiązanie aktualnego problemu naukowego z dziedziny automatyki i robotyki. W mojej opinii rozprawa stanowi bardzo dobre uzupełnienie wyników istniejących w literaturze światowej. Dlatego też stwierdzam, że Autorka napisała cenną (zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia) pracę, która zasługuje na miano rozprawy doktorskiej. Stwierdzenie to opieram na następujących przesłankach.

W pracy Autorka podaje kompletne rozwiązanie problemu sterowania suboptymalnego dla obiektów nieliniowych opisanych równaniami różniczkowymi zwyczajnymi. W sposób oryginalny Autorka postawiła i udowodniła tezę rozprawy o obliczeniowej skuteczności metody sterowania suboptymalnego wykorzystując również wprowadzoną przez Autorkę dekompozycję zarówno macierzy stanu obiektu jak i macierzy Riccatiego zależnej od stanu. Na uwagę zasługuje sposób w jaki Doktorantka dokonała rozkładu macierzy stanu na sumę dwóch macierzy stałej oraz zależnej (na ogół nieliniowo) od stanu dla problemu sterowania zarówno w skończonym jak i nieskończonym horyzoncie czasowym. Konsekwencją takiej dekompozycji jest otrzymanie części liniowej obiektu o stałych współczynnikach oraz części nieliniowej zależnej od wektora stanu. Niezwykle cenny jest pomysł Autorki rozkładu szukanej macierzy Riccatiego zależnej od stanu również na sumę dwóch macierzy: jednej niezależnej od stanu będącej funkcją co najwyżej czasu i drugiej zależnej od stanu.

Wprowadzenie przez Doktorantkę oryginalnej koncepcji dekompozycji macierzy stanu i Riccatiego oraz wyznaczenie sterowania z Zasady Maximum Pontriagina jak również uwzględnienie hipotezy o zależności wektora sprzężonego od iloczynu macierzy Riccatiego przez wektor stanu, skutkowało otrzymaniem równania dynamiki obiektu w układzie ze sprzężeniem zwrotnym, które zawiera dwa składniki jeden zależny liniowo oraz drugi zależny nieliniowo od wektora stanu. W tym kontekście linearyzację powyższego równania z wykorzystaniem techniki pseudo-odwrotności Moore'a-Penrose'a i pozbyciu się części nieliniowej uważam za szczególnie cenną 'wartość dodaną' w automatyce i teorii sterowania. Za kluczowe z punktu widzenia ciężaru gatunkowego pracy wydają się być zaproponowane i udowodnione przez Autorkę twierdzenia pozwalające na obliczenie macierzy Riccatiego przez rozwiązanie tylko raz niezależnego od stanu równania różniczkowego macierzowego dla sterowania w skończonym horyzoncie czasowym oraz w przypadku sterowania z nieskończonym horyzontem czasowym znalezienie pierwiastków algebraicznego równania macierzowego. Niewątpliwym teoretycznie najmocniejszym osiągnieciem Autorki jest uzyskanie, przy rozsądnych z praktycznego punktu widzenia założeniach odnośne sterowalności i obserwowalności badanych obiektów, wyników dotyczących stabilności (głównie asymptotycznej) zaproponowanych regulatorów suboptymalnych.

Rozprawa liczy 123 strony, składa się z 10 rozdziałów i dobrze skorelowanej literatury przedmiotu. Wyodrębnić w niej można trzy części. Rozdziały 1-5 wprowadzają w zakres pracy i przedstawiają niezbędne pojęcia konieczne do zrozumienia dalszej części. Kluczowe są rozdziały 6-10, w których zaproponowano algorytmy sterowania suboptymalnego dla obiektów opisanych nieliniowymi zwyczajnymi równaniami różniczkowymi. W rozdziale 6 Autorka przedstawiła nowe obliczeniowo efektywne prawa sterowania wykorzystujące równania Riccatiego zależne od stanu dla układów nieliniowych zarówno o skończonym jak i nieskończonym horyzoncie czasowym sterowania. Rozdział 7 prezentuje dowody stabilności lokalnej asymptotycznej jak i globalnej zaproponowanych w rozdziale 6 regulatorów suboptymalnych z horyzontem czasowym skończonym jak również nieskończonym. W rozdziale 8 Autorka skupiła się na prezentacji znanych metod rozwiązywania równań Riccatiego (głównie algebraicznych) uwzględniając kryterium niewielkiej złożoności obliczeniowej klasy $O(n^3)$ i ich zbieżności co najmniej kwadratowej. Rozważania teoretyczne zostały zilustrowane przez Autorkę w rozdziale 9 nietrywialnymi przykładami numerycznymi. Rozdział ten przedstawia wyniki symulacji oraz porównanie sterowania klasyczną metodą wykorzystującą równanie Riccatiego zależne od stanu

z algorytmami sterowania suboptymalnego zaproponowanymi przez Autorkę. Obliczono sterowania suboptymalne dla następujących obiektów nieliniowych: silnika krokowego, quadrocoptera, oscylatora Van der Pola, aktuatora, robota mobilnego oraz stacjonarnego manipulatora holonomicznego o 6 stopniach swobody w zadaniu sterowania trzema stopniami.

Pragnę nadmienić iż obliczenia numeryczne stanowią ważny element pracy nie tylko ze względu na to, że przedstawiają ilustrację rozważań teoretycznych. W mojej opinii otrzymanie zadowalających wyników obliczeń numerycznych nie jest w omawianym przypadku sprawą prostą i jestem przekonany, że Autorka spędziła sporo czasu na obliczeniach zanim uzyskała sensowne wyniki. Dlatego wkład Autorki w tym miejscu jest znaczny. Ponadto, w ostatnim przykładzie sterowania holonomicznym manipulatorem stacjonarnym Autorka zastosowała metodę linearyzacji dynamicznej skutkującą uzyskaniem równań dynamiki obiektu ze stałą macierzą wzmocnienia sprowadzając te równania do postaci wykorzystywanych przez algorytmy sterowania Autorki.

Poniżej zamieszczam kilka uwag krytycznych, które nasunęły mi się podczas czytania pracy.

1. Głównym celem pracy jest redukcja nakładu obliczeń potrzebnych do znalezienia sterowania suboptymalnego. W niektórych przypadkach jak np. sterowanie aktuatorem liniowym różnica w czasach symulacji przy zastosowaniu klasycznej metody oraz proponowanej przez Autorkę pracy jest niewielka. Wydaje się jednak, że oprócz redukcji nakładu obliczeń niemniej ważnym jest porównanie wartości wskaźników jakości sterowania w przypadku obu algorytmów. W pracy takiego porównania zabrakło.
2. Wydaje się również, że zarówno we wzorach (4.27), (6.1) i (6.41) macierz B powinna być pełnego rzędu, tzn. $rank(B) = \min\{m, n\}$. W przeciwnym bowiem przypadku macierz $W(x)$ otrzymana z kryterium sterowalności może nie mieć pełnego rzędu co implikuje brak sterowalności układu.
3. W dowodzie Twierdzenia 1 (przypadek układów nieliniowych z nieskończonym horyzontem czasowym) brakuje składnika $\dot{K}_1 x$ we wzorze (6.70). Z uwagi na przyjęcie rozkładu $K(x)$ zgodnie z zależnością (6.54) wyrażenie $\dot{K}_1 x$ powinno się znaleźć w (6.70). Wydaje się też, że macierz $\dot{K}_1$ powinna się znaleźć w warunku optymalności (6.76).

4. W dowodzie stabilności globalnej z nieskończonym horyzontem czasowym w pochodnej funkcji Lapunowa pojawia się składnik $x^T \dot{K}_1 x$ w zależności (7.41). W konsekwencji jest dla mnie niejasna nierówność (7.42).
5. Wydaje się, że zależność (6.19) obowiązuje w przypadku gdy $m \geq n$. W przeciwnym razie macierz $BR^{-1}B^T$ wymiaru $n \times n$ jest zawsze osobliwa.
6. Redakcja pracy zawiera pewne błędy stylistyczne i maszynowe (np. na stronie 22 jest zależność a powinno być zależność, na stronie 40 we wzorze (6.15) jest $A_1 x(t)$ a powinno być A_1). Większość z nich zaznaczyłem bezpośrednio w tekście i przekazałem Autorce.

Powyższe uwagi mają częściowo charakter dyskusyjny, inne natomiast powinny być dokładnie sprawdzone przez Autorkę. Nie wpływają one jednak na pozytywną ocenę pracy.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Superczyńskiej spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym. Wnoszę więc o jej przyjęcie i dopuszczenie Autorki do publicznej obrony.

M. Galicki

prof. dr hab. inż. Mirosław Galicki