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

Dr hab. inż. Alicja Mazur, prof. uczelni
Katedra Cybernetyki i Robotyki
Wydział Elektroniki
Politechnika Wrocławska
e-mail: alicja.mazur@pwr.edu.pl

Wrocław, 25 listopada 2019

Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr Pauliny Superczyńskiej pt. "Metoda sterowania suboptymalnego z wykorzystaniem linearyzacji układu zamkniętego"

1. Problem badawczy i jego znaczenie.

Problem badawczy rozważany przez autorkę rozprawy został sformułowany w rozdziale 1, a następnie rozwinięty bardziej szczegółowo w rozdziale 2. Problem ten to zastosowanie znanego z teorii układów liniowych sterowania optymalnego LQR do afinicznych układów nieliniowych.

Podejście takie jest bardzo nietypowe i niezwykle rzadko spotykane w metodach sterowania układami nieliniowymi z różnych względów. Po pierwsze, techniki często stosowane w teorii regulacji układów liniowych wykorzystują pojęcie transmitancji, które nie istnieje dla układów nieliniowych. Po drugie, istnieje nieskończenie wiele postaci modeli dla układów nieliniowych, inaczej niż ma to miejsce w teorii liniowych układów sterowania. Z tego względu sterowanie układami nieliniowymi jest "oparte na modelu" (z ang. *model-based control*), gdyż wymaga choćby częściowej znajomości postaci równań obiektu. Po trzecie, techniki regulacji układów liniowych bardzo rzadko znajdują zastosowanie podczas sterowania układami nieliniowymi, gdyż obie grupy obiektów bardzo się różnią. Przykładem niech będzie znany liniowy regulator PID, który użyty do sterowania robotów ma gorsze właściwości niż regulator PD, znany w teorii sterowania robotów pod nazwą algorytmu Qu i Dorsey'a.

Patrząc z tej perspektywy należy przyznać, że autorka rozprawy podjęła się problemu nietrywialnego i trudnego. Z teoretycznego punktu widzenia postanowiła ona wykazać, że użycie technik sterowania i metod matematycznych pochodzących z teorii optymalizacji układów liniowych znajdzie zastosowanie także w sterowaniu układów nieliniowych, dając poprawę efektywności algorytmów wyznaczania sterowania suboptymalnego dla zlinearyzowanych układów nieliniowych z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego. Problem naukowy jest ciekawy, nietrywialny, poprawnie rozwiązany, np. poprzez przeprowadzone dowody prawidłowego zachowania układów regulacji suboptymalnej.

Problem ten ma także bardzo istotny wymiar praktyczny, gdyż metoda zaproponowana przez autorkę pozwala na wyznaczenie parametrów regulacji suboptymalnej ze znaczną redukcją nakładów obliczeniowych. Znacząca część rozprawy jest poświęcona aspektowi praktycznemu, poprzez pokazanie sposobu implementacji opracowanego autorskiego algorytmu suboptymalnego do sterowania bardzo różnymi obiektami nieliniowymi, takimi jak robot mobilny, manipulator, ale i oscylator Van der Pola.

2. Wkład autorki.

Zasadnicza oryginalność rozwiązania podanego przez autorkę polega na wybraniu specjalnej parametryzacji SDC (z ang. *state dependent coefficient form*) dryfu w afinicznym układzie sterowania, polegającej na wydzieleniu części stałej oraz zależnej od stanu. Następnie dekompozycja kompensatora, czyli macierzy wzmocnień sprzężenia zwrotnego $K(x(t))$ na część $K_1(t)$ zależną od czasu, a niezależną od stanu oraz część $K_2(x)$ zależną w jawny sposób od stanu pozwoliła na uzyskanie nowej, zmodyfikowanej metody sterowania suboptymalnego dla układów nieliniowych. Okazało się, że taki sposób wydzielenia poszczególnych elementów w funkcji opisującej dryf oraz w kompensatorze K pozwolił na otrzymanie metody efektywnej obliczeniowo. Wynika to z faktu, że wzmocnienie każdego z kompensatorów składowych K_1 oraz K_2 można wyznaczyć oddzielnie, najpierw wyliczając K_2 jako pseudoodwrotność Moore'a-Penrose'a z macierzy B, R oraz A_2, a następnie K_1 wyliczając z równania definiującego warunek optymalności rozwiązania dla problemu LQR, czyli (6.34) lub (6.39).

Takie rozdzielenie problemu na dwa niezależne (częściowo niezależne) rozwiązania powoduje uproszczenie procedur obliczeniowych. I tak w przypadku z nieskończonym horyzontem sterowania rozwiązanie równania Riccatiego jest

otrzymywane tylko raz. Z kolei dla przypadku ze skończonym horyzontem sterowania równanie zależne od czasu jest obliczane tylko dla części kompensatora K_1 zależnej od czasu.

W rozdziale 9 pokazano praktyczne zastosowanie zmodyfikowanej metody suboptymalnej LQR do sterowania układami nieliniowymi. Wyniki symulacji potwierdzają wysoką efektywność opracowanej metody dla obiektów nieliniowych pochodzących z różnych dziedzin.

3. Poprawność.

Jeśli chodzi o kwestię poprawności, to nie ma wątpliwości, że zwrócono na nią bardzo staranną uwagę w rozprawie. Autorka rozpoczęła rozważania od przedstawienia szczegółowego rozwiązania problemu LQR dla układów liniowych. Następnie omówiła zagadnienie istnienia i jednoznaczności rozwiązań zadania optymalnego przedstawione w literaturze przedmiotu. Potem przedstawiła własną propozycję zmodyfikowanej metody $SDRE$ zaimplementowanej do układów nieliniowych, szczególnie do układów afinicznych. Metoda ta została poparta analizą stabilności, w której wykazano uzyskanie rozwiązania suboptymalnego, o ile takie rozwiązanie będzie istniało.

Ponieważ metoda autorki rozprawy wymaga rozwiązania równań Riccatiego w wersji $SDRE$, a nie jest możliwe uzyskanie rozwiązania analitycznego, to autorka rozważyła użycie znanych z literatury metod numerycznego rozwiązywania takich równań, np. takich jak rozkład w szereg Tayloga, metoda Newtona czy też dekompozycja Schura, itp. Pokazano, że otrzymane rozwiązania spełniają warunki optymalności wynikające z zasady maksimum Pontriagina.

Podsumowując, należy podkreślić staranność w wykazaniu nie tylko istnienia rozwiązania, ale także optymalności nowej metody. To zapewnia poprawność uzyskanych wyników.

Jest jeszcze jedna przesłanka, która przemawia za poprawnością przedstawionych rozwiązań. Jest to dobór i ilość literatury przedmiotu. Prawie każde przekształcenie jest poparte odpowiednim cytowaniem, co pozwala na ocenę słuszności otrzymanych rezultatów. Pozycje literaturowe przytoczone przez autorkę rozprawy reprezentują najważniejsze źródła z dziedziny, której dotyczy tematyka rozprawy. Są to wszystko prace recenzowane, a więc godne zaufania i sprawdzone pod względem naukowym.

4. Wiedza kandydatki.

Wiedza autorki rozprawy na temat zagadnień z automatyki i robotyki jest imponująca. Jest to wiedza nie tylko na poziomie praktycznym, ale także teoretycznym. Autorka wyszczególniła w rozprawie specjalne rozdziały, które miały na celu potwierdzenie poprawności działania nowej metody w oparciu o metody matematyczne automatyki i robotyki. Są to rozdziały 3, 4, 5, 7 oraz 8. Zawarto w nich zagadnienia modelowania nieliniowych układów dynamicznych, podstawy matematyczne sterowania optymalnego liniowo-kwadratowego (LQR), omówiono rozwiązania równań Riccatiego dla przypadku ze skończonym oraz nieskończonym horyzontem sterowania, a także istnienie i jednoznaczność rozwiązań wybranych problemów sterowania optymalnego, takich jak metoda mnożników Lagrange'a, równań Hamiltona-Jacobiego-Bellmana. Dowody stabilności przedstawione w rozdziale 7 wykorzystują II metodę Lapunowa aby wykazać, że uzyskana metoda gwarantuje stabilność globalną rozwiązań, w odróżnieniu od rozwiązań ogólnych równań Riccatiego SDRE z nieskończonym horyzontem sterowania, które są asymptotycznie stabilne ale tylko lokalnie.

To potwierdza tezę, że autorka rozumie istotę problemów związanych z syntezą układu sterowania dla obiektu nieliniowego, potrafi ją przeprowadzić i w oparciu o istniejące twierdzenia zbadać właściwości uzyskanego systemu z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, co jest najważniejsze z punktu widzenia dyscypliny Automatyka i Robotyka.

5. Inne uwagi.

Pomimo bardzo pozytywnego wrażenia, jakie wywarła rozprawa, to jednak autorka nie ustrzegła się pewnych nieścisłości i usterek. Poniżej przedstawiono uwagi krytyczne oraz komentarze:

- Str. 17, 3 linia poniżej wzoru (4.2): autorka pisze, że macierz Q musi być dodatnio określona, jednak z opisu słownego w dalszej części tekstu wynika, że chodzi o macierz dodatnio półokreśloną.
- Str. 19 – podobna uwaga, macierz Q także ma być dodatnio półokreślona.
- Str. 23, zdanie poniżej (4.31): "W praktyce należy wybrać taką parametryzację, która zapewni macierzy $W(x)$ pełen rząd dla całego obszaru sterowania."

  Czy można być pewnym, że taka parametryzacja istnieje? Skąd wiadomo, że taka parametryzacja będzie jedna, a nie będzie ich kilka, które złożą się na pokrycie całego obszaru Ω?
- Str. 30, tw. 1, warunki (5.2): co to jest $g(x)$ i jak się ma do $g_1, ..., g_k$? Czy to są te same funkcje definiujące ograniczenia, co G oraz $G_1, ..., G_k$ na poprzedniej stronie?

- Str. 30: w polskiej terminologii istnieje pojęcie "lagranżian", do tego pisany w dwóch wersjach – "lagranżian" oraz "lagranżjan".
- Str. 35, definicja 3: czy ta definicja pochodzi z cytowanej pracy [88]? Moja wątpliwość wynika z analogii z zależnością od czau. Jeśli $A(t)$ ma wszystkie wartości własne o $Re(s) < 0$ dla każdej chwili czasu, to nie jest to warunek wystarczający dla asymptotycznej stabilności. Proszę o komentarz.
- Str. 39, 1 linia poniżej wzoru (6.6): jest "są symetrycznymi dodatnimi półokreślonymi...", powinno być "są symetrycznymi dodatnio półokreślonymi..."
- Str. 57, 8 linia od góry tekstu: jest "region atrakcji", jest to kalka z języka angielskiego, bardziej zgrabnie byłoby "obszar zbieżności", bo dotyczy to stabilności lokalnej.
- Uwaga ogólna: szkoda, że w badaniach nie pokazano, czy taki sam efekt redukcji nakładów obliczeniowych pozostaje ważny dla różnych macierzy S, Q, R. Z pojedynczego doboru parametrów regulacji niestety nie można wysnuć wniosku ogólnego.
- Str. 96, w tekst wkradły się błędy ortograficzne: 7 i 8 linia od góry tekstu, jest "wzdłóż" oraz "wzdłóżny", powinno być "wzdłuż" oraz "wzdłużny".
- Rozdział 9.1.5. Ogólna uwaga: sterownik działa bardzo dobrze, choć śledzona trajektoria nie jest trajektorią dopuszczalną (spełniającą ograniczenia nieholonomiczne). Jest to bardzo spektakularne zastosowanie zmodyfikowanej metody $SDRE$ podanej przez autorkę rozprawy.

6. Podsumowanie.

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez artykuł 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym (z późniejszymi zmianami) moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

A Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego?

Zdecydowanie TAK.

B Czy po przeczytaniu rozprawy rozprawy zgadzasz się, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Automatyka i Robotyka?

Zdecydowanie TAK.

C Czy kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

Zdecydowanie TAK.

Ponadto, biorąc pod uwagę zakres tematyczny rozprawy, jej znakomitą strukturę popartą obszerną analizą teoretyczną uzyskanych wyników rekomenduję wyróżnienie rozprawy doktorskiej pani mgr Pauliny Superczyńskiej. Praca ta mogłaby służyć jako podręcznik z dziedziny sterowania optymalnego zastosowanego zarówno do układów liniowych, jak i nieliniowych.

Alicja Mazur