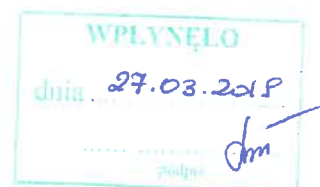


Zielona Góra, 25.03.2019r.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki
Uniwersytet Zielonogórski
Ul. Podgórna 50
65- 246 Zielona Góra
M.Witczak@issi.uz.zgora.pl



Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgra inż. Andrzeja Latocha
pod tytułem

„Sterowanie procesami silnie nieliniowymi w czasie rzeczywistym”

opracowana na zlecenie
Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
AGH w Krakowie

I. Problem naukowy i obszar rozprawy

Problemem naukowym stanowiącym przedmiot recenzowanej rozprawy doktorskiej jest opracowanie i analiza metod sterowania dla klasy nieliniowych układów dynamicznych o jednym wejściu i jednym wyjściu. W świetle rosnących potrzeb technologicznych niezbędne jest konstruowanie coraz bardziej wyrafinowanych technik sterowania. Niniejsze uwarunkowania przekształciły teorię sterowanie ze sztuki projektowania zadowolająco działającego układu regulacji do nowoczesnej gałęzi nauki jaką jest dzisiaj. Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat zostało opracowanych wiele różnego rodzaju strategii i technik sterowania systemami nieliniowymi. Na szczególną uwagę zasługują rozwiązania bazujące na przekształceniu modelu systemu nieliniowego do układu liniowego o zmiennych parametrach. Podobną strategię przyjmuje się w przypadku zastosowania modeli rozmytych typu Takagi-Sugeno. W literaturze można znaleźć niezliczone prace poświęcone tej tematyce, które realizują postawione zadania stosując sterowanie optymalne, sterowanie predykcyjne, sterowanie adaptacyjne, sterowanie odporne oraz sterowanie ślizgowe. W ostatnich latach

pojawiają się również rozwiązania hybrydowe łączące powyższe techniki. Podejścia hybrydowe dają możliwość łączenia zalet powyższych strategii przy jednoczesnej eliminacji ich wad. Zagadnienie projektowania strategii sterowania dla systemów nieliniowych jest bardzo ważnym i stale aktualnym problemem teorii sterowania. Od przełomu lat 50tych i 60tych ubiegłego stulecia, techniki sterowania systemami nieliniowymi są stale rozwijane oraz doskonalone. W literaturze pokazuje się również znaczącą liczbę przykładów ich praktycznego zastosowania przejrzyste uzasadniające korzyści płynące z takiego rozwiązania.

Przedstawiona rozprawa skupia się na strategii linearyzacji i sterowania pewną klasą systemów nieliniowych.

Celem przedstawionych badań było udowodnienie następujących tez:

- **Teza 1:** Możliwe jest zbudowanie obserwatora stanu, który będzie posiadał własności uśredniania, minimalizujące średniokwadratowy błąd estymacji dla wybranych klas skończenie wymiarowych nieliniowych SISO systemów dynamicznych w zadaniu stabilizacji.
- **Teza 2:** Możliwe jest opracowanie algorytmu budowy regulatora stabilizującego czas rzeczywisty, dla wybranych klas skończenie wymiarowych nieliniowych SISO systemów dynamicznych.

Natomiast, do najważniejszych zadań badawczych zalicza się w pracy:

- Zaproponowanie nowego podejścia do linearyzacji systemów nieliniowych i silnie nieliniowych poprzez projekcję modelu dynamiki sytemu nieliniowego lokalnie w otoczeniu punktu referencyjnego na model liniowy filtru impulsowego o nieskończonej odpowiedzi poprzez zastosowanie zmodyfikowanego algorytmu estymacji najmniejszych kwadratów.
- Zaproponowanie uogólnionych algorytmów obliczenia obserwatorów liniowych o wysokim wzmocnieniu i korekcy regulatora LQR w układzie sterowana dla wielu klas systemów nieliniowych, silnie nieliniowych i niepewnych SISO poprzez zastosowanie dodatkowych warunków parametryzowanych za pomocą skalarów.

Podsumowując, należy również podkreślić, że rezultatem praktycznym pracy są aplikacje pozwalająca na weryfikację opracowanych algorytmów.

II. Koncepcja i struktura rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera 9 rozdziałów, dodatek oraz bibliografię. Podstawę pracy stanowią rozdziały od 4'ego do 7'ego, które prezentują oryginalne wyniki naukowe Doktoranta w zakresie projektowania estymatorów stanu i regulatorów w rozważanych układach sterowania. Oryginalne wyniki pracy naukowej doktoranta dotyczą również zastosowania opracowanych metod i technik sterowania dla wybranych układów nieliniowych.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy, prezentuje podstawowe cele i zakres pracy. Obejmuje także podstawowe definicje, zastosowania oraz motywacje podjęcia

tematu przez Autora. Rozdział przedstawia również przegląd stanu wiedzy w zakresie klasycznych układów sterowania i estymacji stanu. Doktorant pobieżnie analizuje również ich wady i zalety. Wynikiem przeprowadzonej analizy są problemy badawcze, które autor definiuje w **rozdziale 2**. Doktorant podsumowuje prezentowane zagadnienia w postaci dwóch tez. Jedna z nich posiada charakter teoretyczny i dotyczy opracowania nowatorskich metod sterowania linearyzacji. Druga z tez odnosi się do możliwości zastosowania sterowania optymalnego dla rozważanej klasy systemów nieliniowych.

Rozdział 3 przedstawia klasyczne układy sterowania. Przegląd rozpoczyna regulator PID, następnie przedstawia się kaskadowy regulacji. W kolejnych punktach autor analizuje, tzw. układy regulacji typu „feedforward” przechodząc do regulatorów z modelem wewnętrznym. Przegląd odnośnie regulatorów kończy rozwiązanie bazujące na sprzężeniu od stanu. W kolejnych punktach doktorant koncentruje się na klasycznych podejściach do estymacji stanu, takich jak obserwator Luenbergera czy Filtr Kalmana wraz z jego uogólnieniami dla systemów nieliniowych.

Zawartość niniejszego rozdziału budzi bardzo duży niedosyt, ponieważ odnosi się wrażenie, że od lat 60-70 nie nastąpił żaden rozwój w zakresie metod sterowania i estymacji stanu.

Rozdział 4 wprowadza pojęcie silnej nieliniowości. Następnie autor podaje klasyczne metody linearyzacji. Kolejne punkty dotyczą prezentacji rozwiązań własnych autora dotyczących identyfikacji systemów nieliniowych za pomocą modeli liniowych. Autor prezentuje różne rozwiązania analizując ich wady i zalety. Punkt dotyczący linearyzacji kończą przykłady symulacyjne. Kolejny punkt dotyczy zastosowania otrzymanego modelu liniowego w sterowaniu LQR systemem nieliniowym. Następne dwa punkty autor poświęca analizie dotyczące obserwatora o wysokim wzmocnieniu. Pozostałe punkty rozdziału mają charakter ilustracyjny i dotyczą odpowiednio sterowania systemami Wienera-Hammersteina, układami nieliniowymi o charakterze oscylacyjnym czy wreszcie niestabilnymi układami nieliniowymi. Rozdział kończy przykład dotyczący zawieszenia magnetycznego.

Rozdział 5 Rozdział dotyczy linearyzacji systemów z uszkodzeniami. Autor przedstawia rozwiązania umożliwiające odtwarzanie danych pochodzących z uszkodzonych czujników pomiarowych. Rozdział zawiera odpowiednie algorytmy diagnostyczne i przykładowe symulacje ilustrujące ich funkcjonowanie.

Rozdział 6 jest niewątpliwie najkrótszy w całej pracy i dotyczy zastosowania obserwatora nieliniowego w sterowaniu LQR.

Rozdziały 7-8 ilustrują funkcjonowanie wcześniej przedstawionych algorytmów wraz z drobnymi modyfikacjami. Rozdział 8 przedstawia również dywagacje doktoranta na temat potencjalnych zastosowań proponowanych rozwiązań i związanych z nimi ograniczeń.

Rozdział 9 podsumowuje pracę i jej najważniejsze osiągnięcia.

Wykaz bibliograficzny obejmuje 85 pozycji, które w umiarkowany sposób odzwierciedlają istniejący stan wiedzy.

III. Oryginalne osiągnięcia i znaczenie poznawcze

Przedmiotem pracy badawczej było zaproponowanie metod linearyzacji i opracowanie bazujących na nich estymatorów stanu i regulatorów. Zgodnie z zaprezentowanym w pracy, obecnym stanem wiedzy, w rozważanym obszarze badawczym nie rozpatrywano dotychczas tak sformułowanych metod sterowania. Autor zauważył i przeanalizował szereg interesujących aspektów problemu, które były pomijane lub stanowiły marginalny element w innych opracowaniach. Stąd też konieczne okazało się rozwiązanie wielu cząstkowych zadań. Do najważniejszych osiągnięć rozprawy można zaliczyć:

- Zaproponowanie nowego podejścia do linearyzacji systemów nieliniowych i silnie nieliniowych poprzez projekcję modelu dynamiki sytemu nieliniowego lokalnie w otoczeniu punktu referencyjnego na model liniowy filtru impulsowego o nieskończonej odpowiedzi poprzez zastosowanie zmodyfikowanego algorytmu estymacji najmniejszych kwadratów.
- Zaproponowanie uogólnionych algorytmów obliczenia obserwatorów liniowych o wysokim wzmacnieniu i korekcji regulatora LQR w układzie sterowana dla wielu klas systemów nieliniowych, silnie nieliniowych i niepewnych SISO poprzez zastosowanie dodatkowych warunków parametryzowanych za pomocą skalarów.
- Symulacyjna analiza efektywności funkcjonowania opracowanych rozwiązań.

Zaproponowane metody umożliwiają rozwiązanie problemów sterowania, dla których istniejące w literaturze rozwiązania nie dają zadowalających rezultatów. Świadczy to o osiągnięciu przez Autora celu postawionego we wstępnej części pracy, zdefiniowanego w postaci Tezy 1 i 2.

Dorobek naukowy autora rozprawy obejmuje dwa artykuły w czasopismach (lista B MNiSW):

- Latocha, A. (1998). System sterowania procesami silnie nieliniowymi, *Pomiary Automatyka Robotyka* (9): 50-51.
- Latocha, A. (2011b). The use of static optimization to build mathematical models of complex dynamic systems, *Pomiary Automatyka Robotyka* (12): 60-63.

oraz 6 artykułów opublikowanych w materiałach konferencji krajowych i międzynarodowych:

- Latocha, A. (2011a). The use of data exchange standard OPC DA, OPC DX layered control systems to implement non-standard task automation through integration PLC with advanced software, *Kielce Politechnika Świętokrzyska, chapter Postepy automatyki i robotyki Cz.1. KKA 2011*, pp. 182-204.
- Latocha, A. (2013). Optimal discrete-time finite-dimensional inertial filters, *Vol. book of abstracts, AGH University of Science and Technology, chapter 6th French-German-Polish conference on Optimization*, pp. 83-84.
- Latocha, A. (2014). Implementation of mathematical models of complex dynamical systems in the new generation of SCADA systems, *Warszawa Akademyka Oficyna Wydawnicza EXIT 2014, chapter. Aktualne problemy automatyki i robotyki. KKA 2014*, pp. 382-391.
- Latocha, A. (2017). A robust linear-quadratic moving averaging controller for strongly nonlinear systems, in P. Ostalczyk (ed.), *NDC 2017 international conference on Nonlinear Dynamics and Complexity, Lodz University of Technology*, pp. 1-9. post conference materials.

- Latocha, A. (2018a). Fast and robust online dynamic system identification, Vol. 635, Springer, chapter Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 215-228.
- Latocha, A. (2018b). Robust fault detection, location, and recovery of damaged data using linear regression and mathematical models, IFAC-PapersOnLine 51(24): 300-306.

Analizując dorobek publikacyjny doktoranta, można łatwo zauważyć, że część pozycji dotyczy innych zagadnień niż poruszane w rozprawie doktorskiej. Zastanawiający jest również fakt, że we wszystkich wymienionych pozycjach jest on jedynym autorem.

Niewątpliwie największy niedosyt w dorobku publikacyjnym doktoranta budzi brak publikacji w czasopiśmie z tzw. listy filadelfijskiej (lista A MNiSW).

Uwzględniając jednak wymienione osiągnięcia naukowo-badawcze oraz fakt ich częściowego opublikowania w wyżej wymienionych pozycjach, uważam że mgr inż. Andrzej Latocha zrealizował cel rozprawy i udowodnił postawione tezy.

IV. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy

Niestety, widać wyraźnie, że praca była redagowana zbyt pośpiesznie. W związku z tym doktorant nie uniknął bardzo dużej liczby błędów gramatycznych, korektorski oraz merytorycznych związanych z tłumaczeniem nazw pochodzących z języka angielskiego.

Uwagi ogólne:

- 1) Biorąc pod uwagę wzory (96) i (113) oczywistym jest, że estymator (108) będzie obciążony. Potwierdzają to w oczywisty sposób wyniki przedstawione na rys. 16. Dlaczego doktorant nie spróbował w tym przypadku zastosować metody zmienny instrumentalnych?

Tóth, Roland, et al. "Instrumental variable scheme for closed-loop LPV model identification." Automatica 48.9 (2012): 2314-2320.

- 2) Identyfikację układów nieliniowych przedstawionych w pracy można z powodzeniem rozwiązać za pomocą metod umożliwiających bezpośrednią identyfikację modelu opisanego w przestrzeni stanów, np.:

Van Wingerden, Jan-Willem, and Michel Verhaegen. "Subspace identification of bilinear and LPV systems for open-and closed-loop data." Automatica 45.2 (2009): 372-381.

Wskazane podejście daje większą swobodę modelowania niż rozwiązanie przyjęte w rozprawie.

- 3) Jaki jest związek założeń zaprezentowanych w punktach 4.2.4 i 4.2.5?
- 4) Str. 35: „przeprowadzonym eksperymencie użyto sygnału testującego o zmiennym okresie (141), do wartości zarchiwizowanego sygnału testującego arbitralnie wprowadzono nieliniowości na końcu przedziału linearyzacji oraz na początku przedziału linearyzacji.” Powyższe stwierdzenie jest niezrozumiałe. Podobnych zwrotów jest niestety dużo w całej rozprawie i uniemożliwiają one zrozumienie jej treści.

- 5) Doktorant wprowadza pojęcie „uśrednionego na przedziale obserwatora liniowego” (str. 38). Co autor rozumie poprzez uśrednienie? W jaki sposób dobiera się przedział (linearyzacji)?
- 6) Porównując równania (143)-(144) i (97)-(98) można zauważyć, że bez żadnego uzasadnienia, doktorant pominął błąd estymacji modelu. Jaki byłoby powód tak znacznego uproszczenia? Oczywiście, skutkuje to możliwością zastosowania klasycznego obserwatora Luenbergera (148).
- 7) Sposób przedstawienia (151) i (152) jest nieakceptowalny. Oczywiście, można się domyślić co oznaczają skróty eig i akcer. Podobna sytuacja ma miejsce we wzorach (201) i (202).
Uważam jednak, że w rozprawie doktorskiej nie powinny mieć miejsca tego typu opisy.
- 8) Str. 39: Co doktorant miał na myśli formułując następujące stwierdzenie: „Dla uśrednionego obserwatora liniowego o ujemnych wartościach własnych dążących do zera”?
- 9) Na jakim podstawie doktorant uważa, że opis (157)-(158) wraz (159) jest uzasadniony?
- 10) Dlaczego (126) nie uwzględnia niepewności parametrycznych (A,B,C,D)?
- 11) Co reprezentuje „M” we wzorze (166)? Autor powinien chociaż podać podstawowe charakterystyki parametrów „L” i „M”.
- 12) Opis systemu (192)-(193) nie zawiera członów reprezentujących zakłócenia, szumy, błędy linearyzacji. Takie podejście wydaje się nieuzasadnione w świetle materiału prezentowanego we wcześniejszej części pracy. W powyższym świetle, zastanawiające są również rozważania rozpoczęte Definicją 5.
- 13) W jaki sposób autor przeprowadza optymalizację numeryczną współczynników tau i beta podczas projektowania obserwatora (199)?
- 14) Jakimi są warunki gwarantujące zbieżność obserwatora po wprowadzeniu parametrów tau i beta?
- 15) W rozdziale 5 autor powinien posługiwać się nomenklaturą przyjętą w diagnostyce technicznej:
Uszkodzenie – niepożądana zmiana przynajmniej jednego z parametrów systemu w stosunku do wartości nominalnej, np. uszkodzenie polegające na 20% spadku wydajności pompy.
Awaria – permanentna niezdolność systemu do wykonania zadanej misji.
Kolejne błędne pojęcie to „izolacja”, które powinno być zastąpione słowem „lokalizacja”.
- 16) Str. 83: Co autor rozumie pod pojęciem „detekcja uszkodzonego obszaru danych”?
- 17) Na jakim podstawie autor formułuje zależność (286)?
- 18) Rozwiązania przedstawione w pracy dotyczą sterowania systemami nieliniowymi z zastosowaniem obserwatorów. Niestety w żadnym z punktów doktorant nie rozważa/zakłada spełnienia zasady separowalności?
- 19) Porównanie przedstawione w punkcie 7.6.1 nie jest zbyt przekonujące ponieważ nie bazuje na podejściu statystycznym uwiarygadniającym postawione tezy. Odsyłam doktoranta do przykładowej pracy:
Desing of an extended unknown input observer with stochastic robustness techniques and evolutionary algorithms / Marcin Witczak, Przemysław Prętki // International Journal of Control .- 2007, Vol. 80, no 5, s. 749--762

Uwagi szczegółowe:

- 1) Strona 20: „System i szum muszą być wykrywalne” – co doktorant przez to rozumie.
- 2) We wzorze (76) powinna występować norma Euklidesowa w miejsce wartości bezwzględnej.
- 3) Jaki jest związek prac (Ton, 1971), (Browder, 1964), (Lions, 1965) z równaniami (77)-(78)
- 4) Równania (77)-(78) zostały błędnie zapisane. Równania (77)-(78) powinny mieć postać analogiczną jak równania (1.10) i (1.11) w pracy Doktoranta, p.t. *A robust linear-quadratic moving averaging controller for strongly nonlinear systems*. Ponadto z (77) wynika, że wektor stanu jest po prostu zmienną rzeczywistą.
- 5) Jakie relacje wiążą zmienne w opisach (77)-(78) i (95) oraz (94) i (95).
- 6) Wzór (96) nie jest sformułowany zbyt szczęśliwie, ponieważ z lewej i z prawej strony występuje ten sam symbol. Dodatkowo, lewa strona powinna również zależeć od k .
- 7) Biorąc pod uwagę (114) we wzorze (102) nieprawidłowo wprowadzono transpozycję.
- 8) W równaniu (98) błąd estymacji powinien zależeć od k .
- 9) W wzorze (104) błędnie użyto symbolu „ t ” zamiast „ k ”.
- 10) Str. 27. Poprzez użycie zwrotu „spełnia kryterium zmienności” doktorant miał zapewne na myśli, że sygnał wejściowy musi być stale pobudzający (ang. permanently exciting).
- 11) Pozycja literaturowa [?] nad wzorem (94) jest niezdefiniowana.
- 12) Co oznacza symbol $\#10a$ nad wzorem (136)
- 13) Co oznacza symbol „ E ” we wzorze (268)? Jeżeli wartość oczekiwaną, to w jaki sposób autor ją wyznacza? $\tau(k)$ powinno być zastąpione $k(\tau)$.
- 14) Str. 96, ostatnia linia: $Q=1$. Q powinno być macierzą jednostkową o wymiarze 3.
- 15) Str. 98: Co oznaczają zmienne $L176$ i $L175$?

V. Podsumowanie recenzji

Reasumując, podniesione wyżej uwagi krytyczne i komentarze nie wpływają finalnie na pozytywną ocenę oryginalnych i opublikowanych osiągnięć naukowo-badawczych, zasadniczych wyników zawartych w recenzowanej pracy oraz jej ogólną pozytywną ocenę.

Należy jednak zaznaczyć, że praca jest poniżej przeciętnego poziomu rozpraw doktorskich w dyscyplinie automatyka i robotyka.

Przedstawione wyniki stanowią niewątpliwie rozwiązanie problemu naukowego, a także świadczą o wiedzy Doktoranta w zakresie *automatyki i robotyki*. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Andrzeja Latocha rozprawa spełnia warunki określone w artykule 13 ust. 1 i ust. 2 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku i wnioskuję o dopuszczenie go do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak

Marcin Witczak