

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Zastosowanie sprzężeń zwrotnych w liniowych deskryptorowych układach dynamicznych

Autor rozprawy: mgr inż. Kamil Borawski

Promotor rozprawy: prof. zw. dr hab. inż. Tadeusz Kaczorek, prof. zw. PB

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Rogowski

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej dra hab. inż. Mirosława Świercza, prof. PB, z dnia 2019-03-29.

1. Cel, zakres i charakter rozprawy; teza rozprawy

Matematyczne podstawy układów deskryptorowych mają swój początek w XIX wieku, kiedy to Weierstrass, a następnie Kronecker opracowali podstawy regularnych oraz singularnych pęków macierzy. Jednak prawdziwy rozkwit zainteresowania naukowego tymi systemami nastąpił w drugiej połowie XX wieku, a szczególnie w latach 1970-2000. To w tym czasie powstała zasadnicza część podstaw teoretycznych związanych w analizą i syntezą systemów deskryptorowych, jak również wiele prac związanych z zastosowaniem w/w teorii do modelowania oraz sterowania obiektami dynamicznymi. Tak duże zainteresowanie tym obszarem wiedzy jest podyktowane faktem, że wiele układów fizycznych można znacznie łatwiej modelować z wykorzystaniem teorii układów deskryptorowych. Przykładem mogą być obwody elektryczne, które są rozważane jako jedno z zastosowań w recenzowanej rozprawie doktorskiej. W ostatnich latach można zauważyć ponownie znaczny wzrost zainteresowania zagadnieniami związanymi z układami deskryptorowymi, szczególnie w kontekście połączenia z teorią układów dodatnich, jak również w odniesieniu do układów opisanych pochodnymi/różnicami niecałkowitego rzędu. Wiodący udział w tych obszarach badań należy do promotora rozprawy, Prof. zw. dra hab. inż. Tadeusza Kaczorka. Jednak, jak zauważa Autor rozprawy, pomimo dużej liczby różnych opracowań w światowej literaturze, brakuje prac pokazujących syntetyczne podejście do teorii układów deskryptorowych uwzględniających jednocześnie różne metody analizy tych układów, tj. metody rozwinięcia w szereg Laurenta, metody macierzy odwrotnej Drazina, czy metody dekompozycji Weierstrassa-Kroneckera. Ponadto nie przeprowadzono dotychczas analizy superstabilności tej klasy systemów oraz syntezy sprzężeń zwrotnych w celu uzyskania określonych cech układu, takich jak dodatniość, stabilność oraz superstabilność.

Autor rozprawy postawił sobie zatem ambitny i ważny cel analizy dodatniości, stabilności oraz superstabilności układów deskryptorowych, zdefiniowanych zarówno w czasie ciągłym, jak również dyskretnym, a następnie syntezy sprzężenia zwrotnego.



Zakres rozprawy wynika bezpośrednio z postawionego celu i koncentruje się na dogłębnym zbadaniu obszaru zainteresowania pracy, co można scharakteryzować w następujących punktach:

- Przegląd światowej literatury przedmiotu z zakresu układów deskryptorowych zdefiniowanych w czasie ciągłym i dyskretnym oraz narzędzi matematycznych, które zostały wykorzystane w pracy.
- Analiza ciągłych układów deskryptorowych. Przedstawienie trzech alternatywnych metod rozwiązywania liniowych deskryptorowych układów ciągłych opartych na a) metodzie rozwinięcia odpowiedzi układu w szereg Laurenta, b) metodzie macierzy odwrotnej Drazina oraz c) metodzie dekompozycji Weierstrassa-Kroneckera. Opracowanie szeregu analitycznych, koniecznych i wystarczających warunków dodatniości ciągłych układów deskryptorowych, wyznaczanych na podstawie w/w metod. Opracowanie szeregu koniecznych i wystarczających kryteriów stabilności oraz superstabilności ciągłych układów deskryptorowych.
- Analiza układów deskryptorowych zdefiniowanych w czasie dyskretnym. Przedstawienie trzech alternatywnych metod rozwiązywania liniowego deskryptorowego układu dyskretnego opartych na w/w metodach Laurenta, Drazina oraz Weierstrassa-Kroneckera. Opracowanie szeregu analitycznych, koniecznych i wystarczających warunków dodatniości dyskretnych układów deskryptorowych. Opracowanie szeregu koniecznych i wystarczających kryteriów stabilności oraz superstabilności dyskretnych układów deskryptorowych. Opracowanie szeregu kryteriów zachowania dodatniości, stabilności oraz superstabilności w układach dyskretnych otrzymanych w procesie dyskretyzacji układu ciągłego z zastosowaniem metody Eulera.
- Synteza układów deskryptorowych ze sprzężeniem zwrotnym. Opracowanie szeregu rezultatów związanych z syntezą układów ze sprzężeniem zwrotnym, zarówno od wektora stanu, jak również od wyjść systemu. Synteza układu z dynamicznymi sprzężeniami zwrotnymi. Określenie analitycznych warunków koniecznych i wystarczających dla układów objętych pętlą sprzężenia zwrotnego, niezbędnych do osiągnięcia określonych cech układu, tj. dodatniość, stabilność oraz superstabilność.
- Implementacja teorii opracowanej w Rozdziałach 1-3 na przykładowych zastosowaniach obejmujących manipulator planarny o trzech stopniach swobody oraz 3-fazowy obwód elektryczny z odbiornikiem pojemnościowym.

Szczegółowe, imponujące rozwinięcie tych zagadnień stanowi zawartość rozprawy. Podsumowując należy zaznaczyć, że wszystkie rozdziały z wyjątkiem Rozdziału 4 mają charakter teoretyczny, tworząc spójne podstawy teoretyczne do analizy i syntezy układów deskryptorowych. Ostatni Rozdział 4 ma charakter praktyczny, w którym Autor prezentuje zastosowanie opracowanej wcześniej teorii na przykładowych implementacjach. Należy zatem stwierdzić, że praca ma generalnie charakter teoretyczny.

Autor przedstawił następującą tezę rozprawy:

Dla ciągłego i dyskretnego liniowego deskryptorowego układu dynamicznego opisanego w przestrzeni stanu można dokonać syntezy sprzężeń zwrotnych mających na celu uzyskanie dodatniości, stabilizację i superstabilizację układu.



Teza została udowodniona w Rozdziale 3. Jednak dowody twierdzeń tam przedstawionych opierają się bezpośrednio na wynikach z Rozdziału 1 w przypadku układów ciągłych oraz Rozdziału 2 w przypadku układów dyskretnych. Dlatego we wszystkich Rozdziałach 1, 2 i 3 należy upatrywać głównego wkładu autorskiego Kandydata w rozwój dyscypliny Elektrotechnika. Potwierdza to również implementacja praktyczna wyników w obwodach elektrycznych przeprowadzona w Rozdziale 4 oraz opis wkładu Autora w przedmiotową dysertację dokonany w Podsumowaniu pracy. Ponadto w Podsumowaniu zawarte zostały interesujące kierunki dalszych badań, które będą przedmiotem dalszych prac Kandydata.

2. Analiza źródeł, pozycja rozprawy, znaczenie wyników Autora, umiejętność przedstawiania wyników

Motywacja dla podjęcia tematu rozprawy wynika z przykładowo przeprowadzonej przez Autora analizy literatury przedmiotu, liczącej 106 pozycji. Dzięki szerokiej wiedzy Autora został poprawnie odzwierciedlony aktualny stan wiedzy na temat zagadnień związanych z analizą i syntezą układów deskryptorowych oraz narzędzi matematycznych wykorzystanych w pracy, tj. metody rozwinięcia w szereg Laurenta, teorii uogólnionej macierzy odwrotnej Drazina, metody dekompozycji Weierstrassa-Kroneckera i wielu innych zagadnień.

Należy podkreślić, że pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy reprezentowanej w literaturze światowej jest zdecydowanie wyróżniająca. W pracy przedstawiono szereg kompleksowych, nowych rezultatów, które stanowią istotne rozszerzenie teorii systemów deskryptorowych, zarówno ciągłych, jak i dyskretnych. Zdecydowana większość dysertacji pokazuje nieopublikowane dotychczas wyniki, jednak jej zawartość daje potencjał do przygotowania cyklu istotnych publikacji w renomowanych czasopismach naukowych. Ponadto, warto również podkreślić jest współautorstwo Kandydata dwóch cennych artykułów spoza zakresu recenzowanej rozprawy doktorskiej, które zostały opublikowane w prestiżowych międzynarodowych czasopismach indeksowanych w bazie JCR, tj. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* oraz *Archives of Control Sciences*.

Autor posiadał umiejętność poprawnego, przekonującego i precyzyjnego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Zarówno rozprawę, jak również artykuły cechuje zwięzłość, jasność języka oraz precyzja. Rozprawa jest bardzo dobrze przygotowana redakcyjnie, nieliczne błędy typograficzne zostały wypunktowane w kolejnej części recenzji.

3. Główne wady rozprawy, słabe strony, uwagi i pytania

Jak już wcześniej zostało podkreślone, recenzowana rozprawa doktorska napisana jest bardzo precyzyjnie oraz przedstawia szereg nowych, interesujących i ważnych w ujęciu naukowym zagadnień. Poziom merytoryczny rozprawy wymagał od recenzenta dużego zaangażowania w czytaniu i analizie prezentowanych wyników. Jednakże, pomimo braku istotnych wad i niedostatków, warto wskazać na pewne, w większości drobne uchybienia oraz niejasności. Ponadto, w trakcie poznawania pracy recenzentowi nasunęły się pytania ogólne, o ustosunkowanie się do których prosi Autora. Pytania i uwagi zostały podzielone na dwie grupy, a) uwagi dyskusyjne i pytania oraz b) drobne uchybienia typograficzne i stylistyczne.



Uwagi dyskusyjne i pytania:

- Autor w Rozdziale 1 wyznacza rozwiązania oraz dokonuje analizy wybranych własności systemów deskryptorowych z uwzględnieniem trzech różnych metod analizy, tj. metody Laurenta, Drazina oraz Weierstrassa-Kroneckera. Jednak zarówno dokładne rozwiązania, jak również własności systemu są zasadniczo niezależne od stosowanej metody. W związku z tym nasuwa się pytanie, czy w/w metody prowadzą do ekwiwalentnych wyników?
- W Rozdziale 2 Autor pokazuje bardzo interesujące wyniki, w których przedstawia kryteria stabilności układów dyskretnych otrzymanych w wyniku dyskretyzacji układów ciągłych. Otrzymuje rezultaty określające maksymalny okres próbkowania gwarantujący utrzymanie stabilności, minimalnofazowości oraz superstabilności układu dyskretnego. Jednak podano warunki wyłącznie dla przypadku zastosowania różnicy 'przedniej' Eulera. Czy stosowanie innych schematów dyskretyzacji, tj. Tustina, czy różnicy wstecznej Eulera prowadziłyby do takich samych wyników?
- Na str. 48 w Twierdzeniu 1.20 Autor przedstawia kryteria stabilności deskryptorowych układów ciągłych. Wątpliwość budzi stwierdzenie "... układ jest asymptotycznie stabilny wtedy i tylko wtedy, gdy spełniony jest jeden z powyższych warunków...". Należy zaznaczyć, że spełnienie warunku 1 zwykle implikuje spełnienie warunku 2. Dlatego rodzi się pytanie, czy spełnienie obu warunków prowadzi do układu stabilnego, czy nie?
- W Rozdziale 3 Autor prezentuje badania dla układów deskryptorowych ze sprzężeniem zwrotnym. Przyjmuje w tym rozdziale konwencję, w której prezentuje wspólnie wyniki dla układu ciągłego i dyskretnego. Pomysł generalnie jest bardzo interesujący, jednak generuje pewne problemy w odniesieniu do czytelności i strony formalnej zapisu. Poczynając od równania (3.1), jeśli w przypadku ciągłym $x^\Delta = \dot{x}(t)$, to Autor powinien oznaczyć $x = x(t)$ i $y = y(t)$. Analogicznie w przypadku dyskretnym $x^\Delta = x_{i+1}$, to $x = x_i$ i $y = y_i$. Dotyczy to również dalszych rozważań w rozdziale.

Drobne uchybienia typograficzne i stylistyczne:

- str. 47, akapity po równaniach (1.139) oraz (1.140). Autor powinien wziąć pod uwagę, że $\det T \in \mathbb{R}$ a nie $\det T \in \mathbb{R}^{n \times n}$.
- str. 47 równanie (1.140). Brakuje nawiasu w równaniu.
- str. 110 (Lemat 3.2) oraz str. 122 (Twierdzenie 3.7). Może bardziej właściwe byłoby zdefiniowanie $v^{\Delta_j} = v^{(j)}(t)$ dla układu ciągłego oraz $v^{\Delta_j} = v_{i+j}$ dla układu dyskretnego, gdzie $j = 0, \dots, k$.

Należy podkreślić, że przedstawione powyżej uchybienia i uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i nie obniżają w żaden sposób bardzo pozytywnej oceny pracy. Ponadto należy zauważyć, że pomimo dużej obszerności pracy oraz matematycznej złożoności prezentowanych wyników recenzent zauważył zaledwie kilka drobnych błędów typograficznych. Dowodzi to bardzo dużej staranności Autora w redakcji recenzowanej dysertacji.



4. Podsumowanie recenzji

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi, zdaniem recenzenta, oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego oraz wykazuje dużą ogólną wiedzę teoretyczną i aplikacyjną Kandydata w dyscyplinie naukowej Elektrotechnika, a także Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zatem stwierdzam, że **rozprawa ta spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.**

5. Wniosek końcowy

Uwzględniając oryginalność rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w rozprawie, głęboką specjalistyczną wiedzę Kandydata w dyscyplinie Elektrotechnika oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej **wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Borawskiego do publicznej obrony.**

Ponadto należy zauważyć wyróżniające się cechy recenzowanej dysertacji i Kandydata, do których należy zaliczyć:

- a) Wyróżniający wkład naukowy rozprawy w rozwój teorii układów deskryptorowych, mierzony przede wszystkim ilością nowych, interesujących wyników analitycznych. Autor dysertacji przedstawił łącznie 87 Twierdzeń i Lematów, z czego znakomita większość została zaproponowana i udowodniona w pracy.
- b) Współautorstwo dwóch publikacji w renomowanych czasopismach międzynarodowych indeksowanych w bazie JCR.

Powyższe cechy sprawiają, że dodatkowo **wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.**

