

WYDZIAŁ AUTOMATYKI,
ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

01-09-2023

WPŁYNEŁO

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

prof. dr hab. inż. Ignacy Duleba
Katedra Cybernetyki i Robotyki
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wroclawska
ignacy.duleba@pwr.edu.pl

Wroclaw 2023-08-27

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Radosława Patelskiego
"The Problem of the Modeling Uncertainties in the Paradigm of the Active
Disturbance Rejection Control".**

Podstawa prawna.

Recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej, prof. dra hab. inż. Wojciecha Szelaąga, zgodnie z uchwałą Rady z dnia 21.06.2023, powołującej mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim mgra inż. Radosława Patelskiego.

1. Charakterystyka ogólna.

Sterowanie obiektami jest podstawową działalnością techniczną. Teoria układów najprostszych (liniowych) jest bardzo dobrze rozwinięta, dlatego poszukuje się nowych obszarów badawczych, często motywowanych względami praktycznymi. Najbardziej efektywny sposób sterowania bazujący na modelu obiektu ma także swoje wady, gdyż modele wyprowadza się zwykle z założeniami idealizującymi. Mogą one nie uwzględniać (trudno modelowalne) zjawiska dyssypatywne, zmiany modelu wynikające z pracy układu (starzenie, luzy, zmiana własności, np. tarcia), czy też zakłócenia występujące w różnych miejscach układu (wejście, stan, wyjście). Dlatego poszukiwane są techniki, które mogłyby zapewnić porządane własności, pomimo wymienionych rodzajów niepewności, gdy znane są ich cechy i zakres.

W tym nurcie sytuuję recenzowaną rozprawę, której przedmiotem jest problem modelowania i reakcji na różnego rodzaju niepewności rozważane w paradygmacie aktywnej kompensacji zaburzeń (ADRC) dla modelu zaburzanego układu n-integratora z jednym wejściem. Cechą charakterystyczną pracy jest analityczność (dowodliwość) podejścia, a w warstwie praktycznej – informacja jakiego typu zbieżności błędów należy oczekiwać dla poszczególnych typów i zakresu niepewności. Praca wpisuje się w tematykę od bez mała 15 lat uprawianą przez liczne grono poznańskich robotyków, które posiada już ugruntowaną pozycję na arenie międzynarodowej w tej stosunkowo młodej (bo 25-o letniej) tematyce.

Dysertacja leży całkowicie w zakresie dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, będącej nadzbiorem Robotyki, gdzie faktycznie leży przedłożona dysertacja.

2. Forma i kompozycja rozprawy.

Rozprawa doktorska jest napisana po angielsku. Jest bardzo obszerna, gdyż obejmuje 252 strony tekstu podzielonego na pięć rozdziałów, uzupełnionych dwoma dodatkami zawierającymi materiał pomocniczy. Całości dopełnia, ogromna jak na standardy prac doktorskich, bibliografia licząca 351 pozycji z zakresu przedmiotu dysertacji. W spisie literatury znajdują

współautorski dorobek mgra R. Patelskiego, na który składa się: sześć artykułów, cztery prace konferencyjne, jedną w druku zwartym (Springer) oraz dwie w oczekiwaniu na ewaluację. Prace pochodzą z ostatnich pięciu lat, a główne – z ostatnich 2-3.

Rozdział 1 przedstawia typologię rodzajów zakłóceń i standardowe sposoby postępowania w takich przypadkach (PID, SMC, H_∞ , sterowanie adaptacyjne). Przedstawiono cel i zakres pracy, nakreślono cechy rozszerzonego obserwatora stanu leżącego u podstaw paradygmatu ADRC rozważanego w pracy oraz zapowiedziano główne osiągnięcia pracy. Przedstawiono rozłożenie materiału w rozdziałach i wprowadzono podstawowe oznaczenia.

Rozdział 2. zawiera szczegółowe przedstawienie matematycznej strony techniki ADRC. Wprowadza się, poczynając od najprostszych intuicyjnych modeli, zasadę działania rozszerzonego obserwatora stanu kompresującego w jednej dynamicznej współrzędnej wpływ różnorodnych zakłóceń działających na układ. Pokazano literaturowe podejścia do ADRC i techniki dowodowe, na których bazują. Właściwe rozważania zaczynają się w podrozdziale 2.2, którego przedmiotem jest analiza stabilności różnorodnych klas systemów warunkowanych typami niepewności. Po zdefiniowaniu układu rozszerzonego i standardowego dla techniki ADRC prawa sterowania, wprowadzono kwadratową funkcję Lapunowa z danymi bazującymi na opisie układu i jego rozszerzenia oraz dobraćnymi macierzami dodatnio-określonymi spełniającymi odpowiednie równania Lapunowa. Dalsza część jest techniczna i podaje warunki jakie muszą spełniać dane by pochodna funkcji Lapunowa była niedodatnia (co zapewnia stabilność układu z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego) dla specyficznych postaci zakłóceń. W serii dziewięciu twierdzeń pokazuje się jak rodzaj zakłóceń determinuje rodzaj zbieżności oraz jak należy dobrać parametry by maksymalnie ograniczać (lub całkowicie kompensować) potencjalnie dodatnie składniki tej pochodnej. W kolejnych podrozdziałach przeprowadzono analizę wpływu niepewności w statycznej amplitudzie sygnału sterującego na stabilność układu z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego. Określono (badając zależność własności macierzy Hurwitza od parametrów), bądź symulacyjnie bądź analitycznie, dla jakich wartości parametrów stabilność jest zachowana oraz jaki wpływ ma też liczba zmiennych bezpośrednio mierzalnych. Przedmiotem badań symulacyjnych była także szybkość zbieżności, mierzona wprowadzonym współczynnikiem jakości, dla niskowymiarowych układów $n = 2, 3$. W podrozdziale 2.3 poszerzono obszar badań na sytuację, gdy amplituda sygnału wejściowego posiada swą własną dynamikę, a w ostatnim podrozdziale zbadano scenariusze praktyczne zachowania techniki ADRC dla teleskopu (symulowanego i rzeczywistego) wynikające z tarcia i kompensacji zakłóceń harmonicznym, pokazując, że rozwiązanie bazujące na przyjętej metodologii zapewnia lepsze charakterystyki niż klasyczne ESO.

Rozdział 3. poszerza rozważania ADRC o element adaptacyjności. W podrozdziale 3.2 adaptacyjność jest realizowana dla nieznaności parametrycznej modelu (ze znanym regresorem zależnym tylko od czasu, lub także od stanu). Pokazano autorską metodę nazwaną PIESO (parametryczna identyfikacja wykorzystująca rozszerzony obserwator stanu), która dla odpowiednio zdefiniowanych praw sterowania i adaptacji nieznanymi parametrami gwarantuje (co najmniej asymptotyczną) zbieżność do zera zarówno błędu identyfikacji jak i estymacji. Twierdzenia opisujące takie zbieżności potwierdzono symulacjami dla obiektu trzeciego rzędu wskazując nieoczywiste zależności zbieżności od parametrów projektowych. Potwierdzono też literaturową prawidłowość, by unikać adaptacji parametrów w początkowej fazie, gdy dynamika układu jest duża, a stosować ją dopiero wtedy, gdy metoda EOB zbliży regresor do stanu ustalonego. W ostatniej części podrozdziału 3.2 pokazano, że metoda PIESO może z powodzeniem być stosowana także dla przypadków niektórych systemów, gdzie ściśle warunki jej stosowalności nie są zachowane. W podrozdziale 3.3 przeprowadzono analizę

podobną do rozdziału poprzedniego, lecz z dodatkowym elementem polegającym na śledzeniu zadanej trajektorii. Specyfika tego zadania polega na niemożliwości sprawdzenia *explicite* warunków stosowalności podejścia PIESO. Zaproponowano metodę sterowania z kompensacją zaburzeń wzbogaconą o identyfikację parametryczną, PIDRC. Przedstawiono analogony twierdzeń uprzednio dowiedzionych dla strategii PIESO, pokazując (w zależności od typu regulatora i warunków adaptacji) co najmniej asymptotyczną zbieżność do zera błędów stanu (także rozszerzonego) oraz nieznanymi parametrów obiektu. Zawartości rozdziału dopełnia weryfikacja eksperymentalna PIESO i PIDRC na robocie mobilnym oraz sterowcu, wskazująca także na możliwość skutecznego stosowania zaproponowanych strategii dla układów nie w pełni spełniających warunki określone w twierdzeniach (z dowodliwymi własnościami).

W krótkim rozdziale 4. Autor przedstawia swój udział w powstawaniu platform eksperymentalnych dla modelu sterowca oraz teleskopu astronomicznego, które to modele wykorzystano w części eksepymentalnej i symulacyjnej w poprzednich rozdziałach.

Ostatni, rozdział 5. zawiera podsumowanie głównych osiągnięć dysertacji ze specyfikacją jak poszczególne podzadania zostały zrealizowane. Po nim następują trzy dodatki przedstawiające materiał pomocniczy. Całości dopełnia bardzo obszerny spis literatury przedmiotu dysertacji.

3. Wyniki uzyskane w rozprawie.

Za oryginalne osiągnięcia Autora uważam:

- Systematyczny opis i zbadanie, zgodnie z paradygmatem Aktywnej Kompensacji Zaburzeń, wpływu zakłóceń (nie-)modelowalnych, w torze wejściowym i dryfie układu. Bardzo wiele dowodów odpowiedniego typu zbieżności przypadków szczegółowych w zależności od założonej wiedzy o typie (charakterze) i skali zakłóceń.
- Propozycja metody PIESO (identyfikacji parametrycznej z wykorzystaniem rozszerzonego obserwatora stanu) pokazująca w serii twierdzeń pożądane cechy (zbieżność co najmniej asymptotyczna błędów estymacji parametrów).
- Propozycja metody PIDRC (sterowanie z identyfikacją parametryczną, również wykorzystująca rozszerzony obserwator stanu) pokazująca w serii twierdzeń własności układu z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, i poszerzająca możliwości techniki PIESO, na przypadek, gdy pewne założenia konstytuujące technikę PIESO nie mogą być zweryfikowane *a priori*.
- Liczne testy zarówno symulacyjne jak i praktyczne, których celem było zbadanie różnych aspektów wpływu zakłóceń na jakość identyfikacji parametrów, estymacji, czy śledzenia zadanej trajektorii. Na bazie testów, sformułowanie wniosków z nich wynikających: nie tylko jakościowych, ale także ilościowych (właściwy dobór parametrów może być ważny dla praktyków chcących stosować zaproponowane techniki).
- Docenić należy wszechstronność mgra R. Patelskiego nie tylko w części teoretycznej (wiele dowodów znacznie przekracza średnie) i symulacyjno-praktycznej części testowej, lecz także udział w opracowaniu platform testowych układów służących do egzemplifikacji teorii.

4. Kwestie do dyskusji, komentarze, uwagi polemiczne.

1. Def. str.11 $h_m = \lambda_{\min}(\mathbf{H}) \in \mathbb{R}$. Dla dowolnej macierzy o elementach rzeczywistych wartość



ta (wartość własna z minimalną częścią rzeczywistą) może być zespolona. Chyba, że o macierzy \mathbf{H} założymy coś więcej.

2. W ważnym i często wykorzystywanym przejściu, np. (2.56) \Rightarrow (2.57), stosowana jest elementarna nierówność między średnią arytmetyczną a geometryczną w postaci

$$\forall x, z, \epsilon, c \in \mathbb{R}_+ \quad \frac{\epsilon x^2 + c^2 z^2 / \epsilon}{2} \geq \sqrt{\epsilon x^2 c^2 z^2 / \epsilon} = cxz,$$

której należy się domyślać po przekształceniach, a powinna być explicite wzmiankowana.

3. W twierdzeniach warto było przypomnieć, że $\omega_0, \omega_c \in \mathbb{R}_+$
4. Stwierdzenie, przykładowo, 49₁₅, "for any positive constant $\epsilon \in \mathbb{R}_+$ " jest zbyt mocne. Autor za chwilę wyjaśnia, że chodzi o małe ϵ , lecz może warto było napisać $\mathbb{R}_+ \ni \epsilon < \omega_c$ dla formalnej poprawności.
5. Str. 15, dla macierzy stosowana jest indukowana norma euklidesowa. Czy ta norma ma jakieś szczególne zalety analityczne (np. do normy Frobeniusa)?
6. Jakich trudności technicznych należy oczekiwać, gdy badane są układy o wielu wejściach (w porównaniu do rozważanych w pracy układach jednowejściowych)?

Uwagi techniczne, językowe, redakcyjne:

1. Niedokładność we wzorze (2.54) - lewy dolny.
2. Bardzo nieliczne literówki (np. 25₄, 53₆, 49₈, 144₁₄).
3. Praca zyskałaby na przejrzystości, gdyby spis akronimów i najważniejszych oznaczeń znalazł się przed wstępem (w jednym miejscu). Oznaczenia są wyjaśnione, lecz porozrzucane po tekście i trudno śledzić, gdzie zostały wprowadzone, a czasem warto byłoby je przypomnieć, szczególnie, gdy długą pracę czyta się w częściach.
4. Kolor wzmiankowany w podpisie tabeli 2.3 niewidoczny.
5. Uwaga terminologiczna: (3.1) str. 109, to jest układ sterowania (zawiera sterowanie), a nie jak napisano układ dynamiczny.

Przedstawione uwagi, pytania czy komentarze mają charakter głównie polemiczny czy poznawczy i nie wpływają ani na prawdziwość tezy dysertacji (czy elementów składowych jej uzasadnienia) ani jej rangę naukową.

5. Podsumowanie.

Praca jest bardzo dobrze osadzona w obszernej literaturze przedmiotu. Ciekawa, i niestandardowa, jest analiza częstościowa zainteresowania badaczy poszczególnymi technikami na podstawie analizy danych z baz IEEE. Dysertacja posiada także walory dydaktyczne, bowiem dokładnie przedstawia idea (także w ujęciu historii ich powstawania), ich ilustrację na prostych przykładach, a następnie uogólnienia, bez odwoływania się do prac źródłowych. W ten sposób czytelnik ma możliwość prześledzenia także historii osiągnięć. Syntetyczne przedstawienie, systematyczny wywód pozwalający wyniki własne lub literaturowe przedstawić w zwnifikowany i czytelny sposób. W wartwie dowodowej jest używana technika funkcji Lapunowa z szacowaniem od góry wielkości wektorowo-macierzowych i eliminacją (lub ograniczaniem) składowych niekwadratowych w celu dowodu odpowiedniego typu zbieżności.

Wyróżnikiem pracy jest formalny i analityczny sposób traktowania zadań, bez uciekania się do niedowodliwych technik ostatnio chętnie wykorzystywanych, a bazujących raczej na

heurezach i indukcji niżli dedukcji. W ten sposób uzyskuje się uniwersalną pewność co do efektów sterowania, identyfikacji, estymacji.

Przydatność dysertacji dla nauk inżynierskich nie budzi wątpliwości, gdyż zakłócenia i walka z nimi zawsze będą towarzyszyć jakiegokolwiek działalności inżynierskiej.

6. Konkluzja.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgra inż. Radosława Patelskiego wyrażam opinię, że jej Autor wniósł oryginalny wkład do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Problemy naukowe dotyczące różnych aspektów sterowania z niepewnościami (zakłóceniami) występującymi w różnych fragmentach układu sterowania sformułowano w dysertacji w sposób jasny. Tematyka wynika z praktycznych wymogów rzeczywistych układów podlegających różnym rodzajom niepewności. Autor wykazał, że opanował odpowiednio warsztat naukowy, zna obszerną literaturę przedmiotu także w ujęciu historycznym, posiada wiedzę i sprawność w dowodzeniu bardzo licznych twierdzeń pokazujących nowe własności lub potwierdzających wyniki literaturowe. Badania poparł nie tylko odpowiednio dobranymi przykładami symulacyjnymi, lecz także testami na rzeczywistych obiektach.

Udokumentowany w rozprawie doktorskiej wkład Autora w rozwój metod sterowania i identyfikacji układów z niepewnościami należy uznać za znaczny.

Stwierdzam zatem, że **przedłożona do recenzji rozprawa spełnia z dużym nadmiarem wymagania zawarte w ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława Patelskiego do publicznej obrony.** Biorąc pod uwagę przytoczone powyżej argumenty oraz uwzględniając jakość i liczbę publikacji, stawiam także formalny wniosek o wyróżnienie rozprawy.

