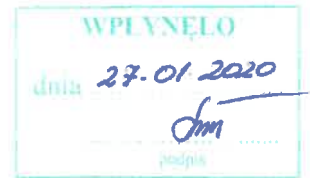


dr hab. inż. Dariusz Horla, prof. PP  
Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej  
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki  
Politechnika Poznańska

Poznań, dnia 24. stycznia 2020r.



## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Algorytmy stabilizacji pojazdów jednośladowych**

Autor rozprawy: **mgr inż. Maciej Różewicz**

Promotor rozprawy: **dr hab. inż. Adam Piłat, prof. AGH**

Dziedzina: **nauki techniczne**

Dyscyplina: **Automatyka i Robotyka**

### 1. Uwagi ogólne

Tematyka rozpatrywana w opiniowanej rozprawie dotyczy zagadnień matematycznego modelowania pojazdu jednośladowego oraz zastosowania tego modelu do syntezy algorytmów sterowania, które stabilizują pojazd w pionie, dzięki czemu przykładowo uzyskane rozwiązanie może wspomagać bezpieczeństwo użytkownika pojazdu, choćby przy obsłudze przez dzieci czy osoby o ograniczonych zdolnościach ruchowych. Współczesny przemysł musi skupić się na zagadnieniach związanych z bezpieczeństwem użytkownika i bezpieczeństwem ruchu, w tym bezpieczeństwem kierowcy/pasażerów pojazdów. Rozróżnić tutaj można dwa podejścia, polegające na budowaniu systemów aktywnego bezpieczeństwa oraz systemów wspomagania decyzji podejmowanych przez kierowcę pojazdu. Oczywiście z powyższymi wiążą się liczne problemy, choćby homologacyjne, a także praktycznie brak możliwości prostego przełożenia wypracowanych rozwiązań na pojazdy jednośladowe.

Opracowanie efektywnego algorytmu sterowania wymaga dostępności dobrego modelu matematycznego. Modele takie różnią się przykładowo liczbą stopni swobody, uwzględnianymi nieliniowościami czy szczegółowością opisu. Sam jednak model jest często niewystarczającym czynnikiem przy opracowaniu strategii regulacji i jest wymagane zaproponowanie odpowiedniego podejścia do zagadnień związanych ze sterowaniem. Należy jeszcze wspomnieć oczywiście o możliwości przeprowadzenia symulacji wstępnie weryfikujących uzyskane rozwiązania, które są standardowym etapem przy wprowadzaniu rozwiązania do fazy przygotowującej do produkcji. Symulacje wymagają zaimplementowania modelu w odpowiednim stopniu szczegółowości i rozciągają się od prostych, traktujących układ jako bryłę sztywną, do tych zawierających wieloobiektowe modele (MBD, ang. *multibody dynamic models*)

Zagadnienie stabilizacji dla pojazdów jednośladowych jest bardzo ważne przy jeździe motocyklem, przy czym w tej kwestii liderem na rynku jest firma Lit Motors Inc. z San Francisco, której jednośląd C-1 stabilizowany żyroskopowo pozwala nawet na jazdę wsteczną, chroniąc jednocześnie kierowcę w zadaszanej kabinie. Podobnie Honda Motor Co., Ltd. zaprezentowała Honda Riding Assist-e podczas targów Tokyo Motor Show w 2017 roku – samostabilizujący się motocykl.

Stąd cennym jest opracowanie algorytmu pozwalającego na wspomaganie kierowcy pojazdu, czy wręcz wykonywanie autonomicznej stabilizacji w pionie pojazdu, biorąc pod uwagę różnego rodzaju ograniczenia techniczne.

Celem opiniowanej rozprawy jest zaproponowanie nieliniowego algorytmu regulacji stabilizującego pojazd jednośladowy w pionie przy postoju, przedstawienie matematycznego modelu jednoślada ze stabilizatorem żyroskopowym, porównawcza symulacja komputerowa, implementacja na rzeczywistym układzie i finalnie – ocena jakości działania, nowego algorytmu sterowania.

Zakres pracy wynikający z przedstawionego celu rozprawy jest bardzo szeroki i obejmuje następujące zagadnienia:

- a) przeglądu metod stabilizacji pojazdów jednośladowych,
- b) matematycznego modelowania stabilizatora żyroskopowego i włączenia jego do modelu jednoślada,
- c) przeglądu wybranych algorytmów sterowania,
- d) implementacji zaproponowanych rozwiązań na zbudowanym stanowisku badawczym, w postaci rowerka dziecięcego,
- e) analizy jakości pracy układu zamkniętego podzielonej na 4 etapy zgodnie z metodologią V-modelu,
- f) podsumowania uzyskanych wyników.

Szczegółowe rozwinięcie wyżej wymienionych zagadnień stanowi zawartość rozprawy. Uwzględniając postawiony cel pracy i przedstawiony zakres rozprawy, Autor sformułował następującą tezę: *możliwe jest utworzenie nieliniowego regulatora stabilizującego jednoślada w warunkach postoju, a także tezę pomocniczą: dzięki zastosowaniu regulatora nieliniowego można uzyskać większy obszar atrakcji niż przy zastosowaniu regulatorów liniowych.* Tezę oceniam jako poprawną i oryginalną, a określone zadanie naukowe w postaci powyższej tezy zostało postawione jasno i pozwala na weryfikację oraz ocenę efektów jego rozwiązania. Tematyka rozprawy jest aktualna i dotyczy zagadnień naukowych o istotnej wartości użytecznej, a jej podjęcie uważam za w pełni uzasadnione.

Rozprawa ma charakter symulacyjno-eksperymentalny, z silną motywacją wdrożeniową, w szczególności dotyczących zastosowania nowoczesnych metod teorii sterowania w zagadnieniach robotycznych.

## 2. Przedmiot, zakres i ocena merytoryczna pracy

### 2.1. Zawartość rozprawy

**Rozdział 1.** rozprawy jest krótki i zawiera uzasadnienie podjęcia tematyki badań przez Autora, zgrubne przedstawienie motywacji, funkcjonujących rozwiązań wspomagających kierowcę, jak i krótką prezentację zagadnień rozpatrywanych w pracy. Rozdział zawiera również sformułowanie tezy rozprawy oraz przedstawienie celu prowadzonych badań.

**Rozdział 2.** zawiera przegląd literatury dotyczącej metod stabilizacji jednośladow, w tym balansowania kierownicą, balansowania masą, stabilizacją za pomocą napędu reakcyjnego czy wreszcie stabilizacją żyroskopową. Na podstawie przeglądu literatury Autor wymienia interesujące Go zagadnienia badawcze, które są jednocześnie częścią rozprawy.

**Rozdział 3.** pracy szczegółowo omawia zakres zastosowań stabilizacji żyroskopowej, model matematyczny samego stabilizatora, wraz z rozważeniem efektywności i celowości trojakiemu ułożeniu osi obrotu stabilizatora, zagadnienie projektowania koła zamachowego stabilizatora i pobieżnie – analizy naprężeń za pomocą profesjonalnego oprogramowania.

W **rozdziale 4.** poruszono dogłębnie zagadnienia modelowania jednośladu ze stabilizatorem żyroskopowym, przy prowadzeniu pewnych uproszczeń. Przedstawiono między innymi metody linearyzacji modelu dokładnego, dyskretyzacji, wprowadzono model kinematyki, model dynamiki, rozważając model sterowania momentem oraz napięciem zadawanym na człon wykonawczy (silnik prądu stałego), przedstawiając również model uproszczony.

**Rozdział 5.** omawia algorytmy sterowania, rozważając podejścia klasyczne, jak i zapewniające odporność. Spośród klasycznych algorytmów Autor wybrał algorytm PID, liniowo-kwadratowy, algorytm regulacji  $H_\infty$ , natomiast wśród algorytmów nieliniowych znalazło się linearyzujące sprzężenie zwrotne, metoda sterującej funkcji Lapunowa, algorytm sterowania ślizgowego, podejście zawierające obserwator zakłóceń, a także autorska metoda sterowania odpornego. W rozdziale Autor przedyskutował również zagadnienie istnienia ograniczeń sygnału sterującego.

Prezentację wyników badań eksperymentalnych rozpatrywanego układu sterowania Autor przedstawia w **rozdziale 6.**, omawiając laboratoryjny model badawczy, w tym jego poszczególne komponenty, przedstawiając zagadnienie filtracji danych z IMU, podejście testowe oparte na V-modelu procesu (model-in-the-loop, software-in-the-loop, processor-in-the-loop, hardware-in-the-loop approach). Dalej następuje przedstawienie wyników badań eksperymentalnych, wraz z omówieniem jakości regulacji przy różnych algorytmach sterowania. Finalnie, posługując się macierzą Pugh'a Autor dowodzi wyższości zaproponowanego rozwiązania nad rozwiązaniami alternatywnymi.

**Rozdział 7.** zawiera podsumowanie oraz propozycję dalszych kierunków badań.

W **Dodatkach** Autor prezentuje kompletną postać macierzy obserwowalności pełnego modelu sterowania momentem, macierzy obserwowalności oraz wyniki eksperymentalne dla wybranych rozwiązań w obecności zakłóceń.

Ostatnia część rozprawy (**Bibliografia**) zawiera 129 pozycji, a około 30% pozycji literaturowych jest z ostatnich 5 lat. Bibliografia stanowi reprezentatywny przegląd prac poświęconych zagadnieniom stanowiącym temat rozprawy doktorskiej, choć w mojej ocenie jest zredagowana na niskim poziomie (często brakuje ważnych danych bibliograficznych, jak wydawcy czy roku wydania).

## **2.2. Merytoryczna ocena pracy**

Celem rozprawy jest ocena jakości działania nowego algorytmu sterowania w zagadnieniu stabilizacji pojazdu jednośladowego. Realizacja celu wymagała wykonania szeregu działań podkreślających interdyscyplinarny charakter pracy, manifestującego się choćby przez integrację podejść do zagadnień sterowania, pomiarów, implementacji, modelowania przez co jednak Autor pokazał, że założony cel rozprawy został w pełni osiągnięty.

Do najważniejszych osiągnięć badawczych pracy zaliczam:

- opracowanie szczegółowego, wieloparametrowego, modelu matematycznego złożonego układu ze stabilizatorem żyroskopowym,
- zaproponowanie nieliniowego regulatora zapewniającego odporność na zmienność parametrów w pewnych znanych przedziałach,
- analityczno-symulacyjną weryfikację tezy i zestawienie jej z wynikami eksperymentalnymi

Na podkreślenie zasługuje duża staranność w prezentowaniu wprowadzanych pojęć, co umożliwia łatwe śledzenie niekiedy bardzo złożonych formuł matematycznych, a niezręczności edycyjne, jak: brak rozróżnienia w opisie macierzy (np. pismem wytłuszczonym), wektorów (np. przez podkreślenie), brak spójności w oznaczeniach i wielokrotne wykorzystywanie symboli oznaczeń w różnych, wykluczających się kontekstach (np. symbolu Q), utrudniające tok śledzenia pracy są nieliczne i ich waga jest mało istotna. Można do nich zaliczyć też bezkontekstowe przetłumaczenie anglojęzycznego słowa *control* jako *kontrola*, czy zamienne stosowanie określeń: moment, moment obrotowy i moment siły. Rysunki i tabele są celowo dobrane, dobrze dopracowane graficznie, choć pewne zastanowienie budzi kolejność niektórych rysunków względem tekstu (przykładowo rys. 4.1., 4.2. powinny znajdować się na początku rozdziału). Dodatkowo, czytanie pracy utrudnia brak stosowania nawiasów przy uwzględnianiu argumentów funkcji trygonometrycznych, patrz wyrażenie (4.24).

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne o charakterze ogólnym:

- 1) w pracy przyjęto wartości pewnych charakterystycznych parametrów, jak parametry modelu rowerka dziecięcego (s. 43) czy parametry z Tabeli 4.1; w jaki sposób uzyskano te wartości, jaka była metodologia ich wyznaczania?
- 2) w rozdziale 3.2.2.2 przedstawiono wyniki analizy naprężeń pomijając nazwę oprogramowania, którego użyto, informację o założonym materiale, jego własnościach, wartości naprężenia dopuszczalnego;
- 3) przedstawiony i wykorzystany w rozprawie nieliniowy model został zlinearyzowany w jednym punkcie pracy – dlaczego Autor nie pokusił się o analizę uzysku w jakości sterowania przy zastosowaniu modeli przełączanych, otrzymanych dla różnych punktów pracy wraz z określeniem prawa przełączania między modelami; czy tego rodzaju badanie zostało przeprowadzone i są dostępne jakiegokolwiek wnioski odnośnie wprowadzonego uproszczenia?
- 4) przy przedstawieniu modelu pełnego (rozd. 4.7) nie poddano dyskusji, lub nie usprawiedliwiono pominięcia, efektów uwzględnienia współczynnika wypełnienia w sygnale PWM, co byłoby potencjalnie źródłem nowej nieliniowości;
- 5) brakuje wykresu lub analizy usprawiedliwiającej przyjęcie niezmienności funkcji  $J(x_1, x_2)$  w (4.30) względem jej argumentów;
- 6) dlaczego nie zdecydowano się na uwzględnienie algorytmów sterowania adaptacyjnego, ograniczając wyniki rozdziału 5 do algorytmów sterowania odpornego (analiza przydatności)?
- 7) w jaki sposób strojono regulatory przedstawione w rozprawie, jak zapewniono porównywalność i przenośność wyników np. z układu z regulatorem liniowo-kwadratowym i PD?
- 8) proszę o wyjaśnienie metodologii doboru wektora  $S$  z (5.53) pod kątem wartości własnych macierzy procesu;
- 9) w pracy brakuje informacji o analizie wpływu np. początkowej wartości wychylenia  $x_1(0)$  na jakość regulacji w układzie zamkniętym – czy można ten wpływ oszacować i przedstawić wyniki, w zakresie zapewniającym zdolność stabilizacji w niestabilnym punkcie równowagi?

Podział tekstu rozprawy na rozdziały jest prawidłowy, materiał ilustracyjny jest bogaty i czytelny, a przedstawiona bibliografia jest reprezentatywna dla problematyki poruszanej przez Autora.

Praca nie ma zasadniczych wad, można jednak wykazać drobne uchybienia lub elementy dyskusyjne:

- teza pracy mogłaby zawierać informację o stabilizacji jednoślada w warunkach postoju w pozycji pionowej,

- s. 22<sub>7</sub>: niestabilność jednoślądu powinna zostać sprecyzowana: jakie zadanie, jaki sygnał wejściowy/wyjściowy,
- s. 25<sup>6</sup>: brak indeksów czasu, pojawiających się dopiero od (4.7) utrudnia czytanie rozdziału,
- s. 27<sub>7</sub>: balansowanie masą,
- s. 30<sup>5</sup>: moment stabilizujący jest generowany, nie produkowany (kalka terminu anglojęzycznego),
- s. 33: brakuje podania większej liczby przykładów, pozwalających lepiej wyjaśnić omawiane w rozdz. 3.1 zagadnienia,
- s. 37, rys. 3.1: nie wyjaśnia jak przyjęto osie X, Y, Z (czy jest to np. konwencja NED), dodatkowo  $\delta$  w równaniu (5.17) oznacza niepewność,
- s. 43, rys. 3.5: nie jest spójny w opisie jednostek i oznaczeń z tekstem rozprawy,
- s. 47<sub>10</sub>: brak podania powodu, dla którego masa kierownicy jest przyjęta jako pomijalnie mała;
- s. 51<sub>11</sub>: czy Autor nie myli częstotliwości z pulsacją/częstotliwością kołową;
- s. 52<sup>15</sup>: siła odśrodkowa jest efektem, a nie skutkiem; dodatkowo, nie zdefiniowano kierunku obrotu i osi obrotu;
- s. 57<sub>12</sub>: nie sprecyzowano do jakiej postaci jest przekształcane równanie (4.24);
- s. 57<sub>6</sub>: brak dyskusji nad efektami wprowadzenia dodatkowej nieliniowości;
- s. 63<sup>12</sup>: co jest źródłem nieminimalnofazowości w przyjętym modelu?
- s. 63, rys. 4.5 i podobne: brak jednostek na osiach rzędnych;
- s. 87<sub>14</sub>: na jakiej podstawie zostały przyjęte wagi o tej wartości?
- s. 125<sub>17</sub>: względem ilu pomiarów uśredniano wyniki?
- w pracy odczuwa się niedosyt testów symulacyjnych czy eksperymentalnych dla złych parametrów nominalnych układu..

### 3. Ocena końcowa i wnioski

Mimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych, które nie dotyczą zasadniczego dorobku Doktoranta, uważam, że postawiony cel pracy ma charakter naukowy i został konsekwentnie zrealizowany. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej, opanował ogólną wiedzę teoretyczną w zakresie prezentowanym w rozprawie oraz wykazał wysoki poziom umiejętności praktycznych przy integracji i obsłudze stanowiska badawczego.

Wobec powyższych uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Różewicza *Algorytmy stabilizacji pojazdów jednośladowych* spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim oraz mieści się w dyscyplinie Automatyka i Robotyka. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

/Dariusz Horla/