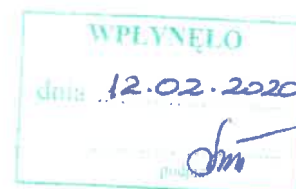


dr hab. inż. Maciej Ławryńczuk, prof. uczelni
Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych
Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 15/19
00-665 Warszawa

5.2.2020 r.



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Różewicza pt. „Algorytmy stabilizacji pojazdów jednośladowych”

wykonana na zlecenie Rady Dyscyplina Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Adam Piłat, prof. uczelni.

Dyscyplina naukowa: automatyka i robotyka.

1. Ogólna charakterystyka, zakres, cel i teza rozprawy

Praca doktorska Pana Macieja Różewicza dotyczy modelowania i algorytmów stabilizacji jednoślada, przy czym symulacje komputerowe i wyniki badań eksperymentalnych dotyczą roweru. Jak zauważa Doktorant, we współczesnej motoryzacji coraz większą rolę odgrywają systemy bezpieczeństwa. Są one nie tylko obszarem badań teoretycznych i eksperymentalnych, ale seryjnie produkowane pojazdy wyposażone są w systemy tego typu. Rozwijane są systemy wspomaganie kierowcy i aktywnego bezpieczeństwa. Niektóre z nich jedynie monitorują stan pojazdu i jego otoczenia, a następnie ostrzegają kierowcę przed niebezpieczeństwem. Bardziej zaawansowane systemy, w sytuacji zagrażającej bezpieczeństwu, przejmują kontrolę nad pojazdem, aby uniknąć niebezpieczeństwa lub zminimalizować jego skutki. W większości przypadków są to systemy projektowane dla samochodów i nie jest możliwe ich bezpośrednie zastosowanie w jednośladach. Jest to spowodowane istotnie innymi właściwościami dynamicznymi jednośladów (bardzo łatwa możliwość utraty stabilności). Pożądane jest więc zaprojektowanie podobnych systemów bezpieczeństwa dla jednośladów. Jak podkreśla Doktorant, statystycznie ryzyko śmierci motocyklisty w wypadku drogowym jest 37 razy większe niż pasażera samochodu.

Jednoślady są nieliniowymi i niestabilnymi układami dynamicznymi, zaprojektowanie sprawnych algorytmów stabilizacji jest problemem badawczym należącym do głównego nurtu współczesnej automatyki. Tematyka badań podjętych przez Doktoranta jest ciekawa i ważna nie tylko z naukowego punktu widzenia, ale również ma bardzo duże znaczenie praktyczne.

Celem prowadzonych pracy było wykazanie słuszności trzech tez pracy, wymienionych na s. 22 i 23:

a) *Możliwe jest zaprojektowanie nieliniowego regulatora stabilizującego jednoślada w warunkach postoju.*

- b) *Dzięki zastosowaniu regulatora nieliniowego można uzyskać większy obszar atrakcji niż przy zastosowaniu regulatorów liniowych.*
- c) *Projektowane regulatory charakteryzują się odpowiednio dużą odpornością na zmiany parametrów procesu.*

Doktorant rozważa zadanie stabilizacji w warunkach postoju, ponieważ jednośląd w pewnym zakresie prędkości ma właściwości samostabilizacji.

Problem badawczy i tezy pracy są sformułowane w sposób wystarczająco jasny. Rozprawa ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Do treści teoretycznych zaliczyć należy wyprowadzenie modelu matematycznego procesu, przedstawione w rozdziale 4, oraz zaprojektowanie (i dostosowanie istniejących) algorytmów sterowania, co jest treścią rozdziału 5. W rozdziale 6 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, wykonanych przy wykorzystaniu stanowiska badawczego, które zostało samodzielnie zaprojektowane i zbudowane przez Doktoranta.

2. Zawartość merytoryczna rozprawy

Rozprawa liczy 182 strony, zawiera 7 rozdziałów, 5 załączników oraz spis literatury. Na początku rozprawy podano streszczenie, wykaz oznaczeń oraz spis rysunków.

W pierwszym rozdziale pracy Autor przedstawił motywację do podjęcia badań, sformułował problem badawczy, cele pracy oraz omówił jej organizację.

W drugim rozdziale pracy Doktorant dokonuje przeglądu literatury, który dotyczy metod stabilizacji jednoślądu. Omawia 4 metody, a mianowicie: sterowanie ruchem kierownicy, balansowanie dodatkową masą, zastosowanie koła reakcyjnego oraz stabilizację żyroskopową. Podano zalety i wady każdej z metod, zamieszczono wiele odniesień do literatury. Szkoda tylko, że Doktorant w trakcie przeglądu literatury nie wyróżnił prac opisujących symulacje komputerowe od tych, które dotyczą projektowania i testowania rzeczywistych układów sterowania. Doktorant uzasadnił wybór stabilizacji żyroskopowej, która jest bardziej uniwersalną metodą stabilizacji niż sterowanie kierownicą. Co więcej, pozwala ona na generowanie większych momentów niż balansowanie dodatkową masą lub w przypadku zastosowania koła reakcyjnego. Pomimo tych zalet, Doktorant jest świadomy wad wybranej metody stabilizacji, którymi są: wysoka energochłonność oraz dość skomplikowana budowa.

W trzecim rozdziale pracy Doktorant wyprowadził model matematyczny stabilizatora żyroskopowego, który następnie jest zastosowany do stabilizacji jednoślądu. Autor przedstawia krótki przegląd literatury, w którym omawia różne zastosowania stabilizacji żyroskopowej.

W czwartym rozdziale rozprawy Doktorant szczegółowo omawia model matematyczny jednoślądu ze stabilizatorem żyroskopowym. Sposób prezentacji poszczególnych zagadnień i dobór cytowanej literatury świadczy o dużej wiedzy Autora w zakresie fizyki i teorii nieliniowych układów dynamicznych.

W piątym rozdziale pracy omówiono projektowanie różnych strategii sterujących dla omawianego jednoślądu, a także wyniki symulacji komputerowych. Autor rozważa algorytmy liniowe: regulator PID, regulator liniowo-kwadratowy oraz regulator H_∞ , a także algorytmy nieliniowe: linearyzujące sprzężenie zwrotne, metodę sterującej funkcji Lapunowa, sterowanie ślizgowe, sterowanie z redukcją wpływu zakłóceń oraz algorytm sterowania odpornego. Autor prawidłowo powołuje się na literaturę i na wyniki uzyskane we wcześniejszych częściach pracy, jedynym wyjątkiem jest podrozdział 5.3.5, na początku

którego nie ma wytłumaczenia jaka jest motywacja Autora do zastosowania prawa regulacji w postaci danej wzorem (5.67).

W szóstym rozdziale rozprawy opisano projekt i realizację stanowiska badawczego, a następnie wyniki eksperymentów uzyskane z wykorzystaniem platformy sprzętowej, w której zastosowano komputer jedнопłytkowy Raspberry Pi.

W siódmym rozdziale pracy zawarto podsumowanie oraz sformułowano kierunki przyszłych prac badawczych.

Spis literatury jest bogaty, zawiera 129 pozycji. Doktorant cytuje nie tylko współczesne pozycje dotyczące modelowania i stabilizacji jednoślądów, ale również historyczne prace, jak np. pracę Whipple'a z 1899 r., będącą pierwszą znaczącą publikacją z zakresu modelowania rozważanych układów dynamicznych. Reasumując, w przeglądach literatury Doktorant przedstawił aktualny stan wiedzy i wykorzystywane metody modelowania i stabilizacji jednoślądów. Doktorant ma również dużą wiedzę podstawową w zakresie fizyki i teorii nieliniowych układów dynamicznych. Szkoda tylko, że w spisie literatury brak jest w wielu przypadkach istotnych szczegółów, co omówiłem w pkt. 3.2 recenzji.

3. Ocena rozprawy

3.1. Ogólna ocena rozprawy

Doktorant zrealizował założone cele pracy, wykazał słuszność postawionych w pierwszym rozdziale tez. Użył poprawnego aparatu matematycznego, wykorzystał wiedzę podstawową z zakresu fizyki, teorii nieliniowych układów dynamicznych, a także znane z literatury algorytmy sterowania, odpowiednio je modyfikując, aby mogły być wykorzystane do rozwiązania postawionego zadania stabilizacji jednoślądu.

Najważniejsze osiągnięcia Doktoranta są następujące:

- a) Opracowanie modelu matematycznego jednoślądu ze stabilizatorem żyroskopowym.
- b) Synteza kilku algorytmów sterowania jednoślądu, przeprowadzenie badań symulacyjnych.
- c) Zaprojektowanie i zbudowanie stanowiska laboratoryjnego, przeprowadzenie badań eksperymentalnych.

Pracę przeczytałem z przyjemnością. Należy wymienić następujące zalety pracy:

- a) Tematyka rozprawy jest oryginalna. Rozważany problem badawczy jest stosunkowo oryginalny, choć jest obecny w literaturze światowej i znajduje się w jej głównym nurcie.
- b) Praca jest interdyscyplinarna, wymagała wiedzy i umiejętności z różnych dziedzin: fizyki, teorii układów dynamicznych, algorytmów regulacji, projektowania, budowy i programowania systemów sterujących czasem rzeczywistego.
- c) Bardzo pozytywnie oceniam fakt, że Doktorant samodzielnie zaprojektował i zbudował stanowisko laboratoryjne, a następnie przeprowadził eksperymenty, których wyniki podane zostały w rozdziale 6. W pierwszej części tego rozdziału rozważa się dwa scenariusze testowe: a) regulator musi sprowadzić rower bez prędkości postępowej ze stanu początkowego do punktu równowagi, b) rower porusza się z pewną prędkością, regulator musi zachować stabilność przy działającym zakłóceniu (ruchu kierownicą). Szkoda, że w dalszej części rozdziału Autor ograniczył się tylko do pierwszego scenariusza.
- d) Przedstawione w rozprawie osiągnięcia Doktoranta świadczą o tym, że na podstawie dotychczas znanych metod, omówionych w literaturze światowej, potrafi

identyfikować ciekawe obszary badawcze, formułować cele badawcze oraz je realizować.

3.2. Poprawność językowa i redakcyjna rozprawy

Praca napisana jest starannie pod względem językowym. Autor używa języka właściwego dla zagadnień naukowych i technicznych, używane sformułowania są jasne i precyzyjne. Zauważyłem jedynie następujące uchybienia językowe:

- a) W tekście pracy występują bardzo nieliczne literówki i błędy interpunkcyjne.
- b) Termin „sterowanie w reżimie ślizgowym” powinien być zastąpiony przez określenie „sterowanie ślizgowe” (ang. sliding mode control), które jest powszechnie stosowane w literaturze krajowej. Zamiast stosowanej w pracy nazwy „sterowanie z redukcją zakłóceń” bardziej precyzyjny jest termin „sterowanie z redukcją wpływu zakłóceń”. Zakłóceń działających na regulowany obiekt nie można zredukować lub wyeliminować, ale w układzie regulacji można ograniczyć lub całkowicie skompensować ich wpływ.
- c) Moją wątpliwość budzą sformułowania żargonowe: „...które są spowodowane występującym jitterem na interfejsie komunikacyjnym” oraz „Histogram jitteru...” (s. 132). Podkreślam, że w całej pracy znalazłem tylko dwa takie sformułowania.

W ogólności, praca zredagowana jest poprawnie, lecz zauważyłem następujące uchybienia redakcyjne (niektóre niestety powtarzają się wielokrotnie):

- a) W tekście brakuje odniesienia do niektórych rysunków, nie są one omówione, np. rys. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 (podałem tylko kilka przykładów z początku pracy). Co prawda z tekstu i tych nieopisanych rysunków można wyciągnąć odpowiednie wnioski, ale od publikacji naukowych wymagamy odniesienia się do każdego rysunku i tabeli oraz omówienie otrzymanych wyników.
- b) W wielu cytowanych pozycjach literatury brak jest istotnych informacji. Dla pierwszych pięćdziesięciu pozycji literatury brak jest następujących szczegółów:
 - numerów stron (prace [6,11,12,13,16,17,18,20,27,31,33,35,36,37,39,40,46,48,49,50]),
 - roku wydania (prace [26,46]),
 - miejsca konferencji (prace [12,17,18,20,23,28,33,37,46,47,50]),
 - czasami nawet nie wiadomo jaki jest typ publikacji (książka, rozdział, artykuł w czasopiśmie czy praca konferencyjna) (prace [21,22,25,26,29,45]).

Dla pozycji literatury [51]-[129] występują podobne braki.

- c) Czasami brakuje omówienia znaczenia używanych symboli matematycznych po wzorach, w których są używane po raz pierwszy w pracy (np. symbole x^{eq} i u^{eq} we wzorze (4.1)). Wymienione symbole x^{eq} i u^{eq} można odnaleźć na liście oznaczeń, podanej na początku pracy. Niestety, lista ta jest bardzo krótka, obejmuje jedynie kilkanaście symboli, podczas gdy w całej pracy Doktorant stosuje znacznie więcej symboli. Nie wiadomo dlaczego lista symboli i skrótów nie jest ułożona alfabetycznie.
- d) Rysunki są bardzo czytelne, dobrej jakości, wielkość znaków jest dobrze dobrana. Wyjątkiem jest rys. 4.1, który ma dość niską jakość (rozdzielczości). Pewną niekonsekwencją jest stosowanie różnych wielkości rysunków w kolejnych podrozdziałach pracy. W większości przypadków rysunki mają odpowiednią wielkość, jedynie w przypadku charakterystyk częstotliwościowych Bodego zamieszczonych na rys. 4.5, 4.8 i 4.11 nieco przeszkadza zbyt mała wysokość poszczególnych wykresów (każdy z tych rysunków powinien zajmować jedną stronę pracy).

- e) W pracy jest bardzo dużo symboli matematycznych z indeksami, ale nie wszystkie z nich są użyte prawidłowo. Warto przypomnieć, że indeksy, podane czcionką pochyłą, przyjmują wartości liczbowe, natomiast dodatkowe oznaczenia powinny być podane czcionką prostą. Np. zamiast q_{ij}^{torque} powinno być q_{ij}^{torque} (s. 58-59), zamiast M_{voltage} powinno być M_{voltage} (wzór (4.45)) itd.
- f) W wielu miejscach pracy Autor stosuje następujący styl: tekst (zakończony kropką), a następnie wzór (wzory). Dobrze, gdy w poprzedzającym tekście Autor powołuje się na wzór, podając jego numer (np. tak jest np. w przypadku wzoru (4.38)), natomiast znacznie gorzej, gdy w tekście nie ma odniesień do symboli użytych we wzorze, jego numeru, ani nawet występujący po tekście wzór nie jest omówiony (np. wzór (4.41) i poprzedzający go tekst). Taka oszczędność miejsca jest przesadą, szczególnie, że lista symboli jest bardzo krótka.

3.3. Słabe strony rozprawy i jej główne wady

Dostrzegam następujące wady rozprawy:

- a) Autor otrzymuje ciekawe wyniki, ale często ich nie komentuje lub omówienie wyników jest bardzo krótkie, np. charakterystyki częstotliwościowe Bodego zamieszczone na rys. 4.5, 4.8 i 4.11 nie są omówione, nie wiadomo o czym świadczy przebieg tych charakterystyk i różnice między nimi. Również wyniki działania algorytmów regulacji zamieszczone na rys. 5.1 (regulator PID_{\cos}), 5.2 (regulator LQ), 5.6 (regulator H_{∞}), 5.8 (linearyzujące sprzężenie zwrotne), 5.9 (metoda sterującej funkcji Lapunowa), 5.15 (regulator NDBROC) i 5.16 (regulator odporny) nie zostały omówione. Nie porównano pracy rozważanych algorytmów regulacji w postaci podsumowania rozdziału piątego. W rozdziale szóstym podano porównanie ilościowo wyników badań eksperymentalnych w tab. 6.1, 6.2 i 6.3, jednak ich omówienie też jest bardzo krótkie.
- b) Regulator H_{∞} (s. 85 i dalsze): nie opisano przyjętej niepewności. Charakterystyki Bodego (rys. 5.4 i 5.5) nie są omówione. Dopiero z legend tych charakterystyk widać, jaki był zakres zmian masy, ale nie wiadomo czy taki sam zakres zmian był stosowany przy symulacji algorytmów regulacji
- c) Wzór (5.1): czy uchyb regulacji nie powinien być zdefiniowany jako różnica wartości zadanej i mierzonego sygnału wyjściowego procesu (w pracy jest odwrotnie)?
- d) Wzór (5.2): pierwsze wystąpienie symbolu dt powinno być zastąpione przed dt .
- e) Implementacja sprzętowa (rozdział 6): platforma sprzętowa Rapsberry Pi z systemem Linux nie jest systemem czasu rzeczywistego. Nie wiadomo czy i jak w dyskretnych algorytmach regulacji zapewniono stały okres próbkowania, nie podano szczegółów implementacji. Warto podkreślić, że zastosowano krótki okres próbkowania jest bardzo krótki, rzędu 10 ms. Czas obliczeń prawa regulacji może być wówczas znaczący w porównaniu z okresem próbkowania.
- f) Rys. 6.21 i 6.22: spodziewamy się porównania testów MiL i PiL, podane są pojedyncze przebiegi.

Pomimo wymienionych uchybień językowych i redakcyjnych, a także powyższych słabych stron rozprawy, całą pracę oceniam bardzo pozytywnie.

4. Ocena dorobku publikacyjnego Doktoranta

Baza Scopus podaje, że w dorobku Doktoranta znajduje się 8 prac:

- a) jedna praca zamieszczona w czasopiśmie *SAE International Journal of Passenger Cars – Electronic and Electrical Systems* (CiteScore za rok 2015, w którym ukazała się praca wynosi 0,54),
- b) dwie prace konferencyjne zamieszczone w *SAE Technical Papers*,
- c) jedna praca konferencyjna zamieszczona w *IFAC-PapersOnLine*,
- d) jedna praca konferencyjna zamieszczona w *ACM International Conference Proceeding Series*,
- e) trzy prace konferencyjne zamieszczone w materiałach konferencji *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*.

W trzech z wymienionych prac Doktorant jest pierwszym autorem, drugim autorem jest prof. Adam Piłat. Pozostałe prace mają wielu autorów (od 3 do 11).

Dorobek publikacyjny Doktoranta oceniam pozytywnie.

5. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Przedstawione w rozprawie osiągnięcia naukowe są ciekawe i bardzo istotne dla rozwoju współczesnej automatyki. Przeprowadzone badania są istotne nie tylko z teoretycznego punktu widzenia (modelowanie matematyczne jednoślądu, synteza algorytmów regulacji), ale również z praktycznego punktu widzenia. Systemy wspomaganie kierowcy i aktywnego bezpieczeństwa jednoślądów nie są tak popularne jak w przypadku samochodów (lub nie ma ich wcale w seryjnie budowanych pojazdach), natomiast ich potrzeba jest oczywista.

6. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
- b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c/ spełniająca wymagania,
- d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,**
- e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

7. Podsumowanie

Pan mgr inż. Maciej Różewicz w pełni zrealizował sformułowane na wstępie cele rozprawy. Wykazał się wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów w zakresie modelowania matematycznego i projektowania algorytmów regulacji. Samodzielnie zaprojektował i zbudował stanowisko badawcze, sprawdził w praktyce skuteczność zaprojektowanych algorytmów. Wymienione w recenzji uwagi krytyczne nie wpływają na wysoką ogólną ocenę rozprawy. Doktorant wykazał, że posiada dużą wiedzę i umiejętności w zakresie dyscypliny naukowej automatyka i robotyka.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr. inż. Macieja Różewicza pt. *Algorytmy stabilizacji pojazdów jednoślądowych* spełnia wymagania ustawowe oraz kryteria zwyczajowo przyjęte w tym zakresie w krajowym środowisku naukowym w dyscyplinie automatyka i robotyka i wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.