WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 29 -06- 2017
DZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP

dr hab. inż. Paweł Dworak
Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, dnia 26 czerwca 2017 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRYCZNEGO POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Application of selected control algorithms for nonlinear systems in unmanned bicycle robot stabilized by an inertial drive**

Autor rozprawy: **mgr inż. Adam Owczarkowski**

I. Cel, zakres i charakter rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy budowy urządzenia stabilizującego jazdę dwukołowego roweru będącego szczególnym przypadkiem różnych pojazdów jednośladowych. Wpisuje się idealnie w tendencje rozwoju współczesnych urządzeń transportu. Uzupełnia znane już rozwiązania jak choćby urządzenie Seagway, czy bardzo rzadkie, pionierskie systemy stabilizacji motocykli, prezentowane – choć niekoniecznie oferowane komercyjnie – przez nieliczne firmy (np. system Honda Riding Assist). Realizacja tego zadania jest trudna zarówno od strony teoretycznej jak i praktycznej. Wymaga znajomości i umiejętności zastosowania skomplikowanych algorytmów teorii sterowania, dużej wiedzy z zakresu mechaniki i elektroniki oraz dużych umiejętności konstrukcyjnych, niezbędnych do zaprojektowania i wykonania prototypu badanych urządzeń.

Autor rozprawy włączył się w nurt badań prowadzonych przez nieliczne grupy badawcze i postanowił zbadać możliwość wykorzystania koła reakcyjnego do stabilizacji roweru. Badania te, mają w mojej ocenie potencjalnie bardzo duże zastosowanie praktyczne. Przyczynią się bowiem do konstrukcji urządzeń znacznie ułatwiających jazdę (czy prowadzenie) roweru z niewielkimi prędkościami, w sytuacji dużego natężenia ruchu ulicznego.

Podejmując próbę realizacji tego zadania Autor sformułował tezę, że zastosowanie koła reakcyjnego oraz wybranych algorytmów sterowania umożliwia poprawę stabilności roweru. Udowodnienia powyższej tezy postanowił dokonać poprzez realizację czterech powiązanych celów naukowo-badawczych. Sformułował je w postaci następujących pytań:

1. Czy koło reakcyjne umożliwia stabilizację odwróconego wahadła? Jak to przetestować? Jakiego algorytmu sterowania należy użyć?

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
29 -06- 2017
DZIEKAN
Wydział Elektryczny
Politechnika Poznańska

2. Jak prawidłowo zamodelować rower wraz z kołem reakcyjnym aby można było przetestować sytuacje, w których manewrowanie i utrzymanie stabilności roweru jest trudne?
3. Jakiego algorytmu należy użyć aby kontrolować stan roweru z kołem reakcyjnym używając dostępnych urządzeń sterujących (kierownicy i koła reakcyjnego)?
4. Czy istnieją warunki, w których koło reakcyjne stabilizuje rower skuteczniej niż manewrowanie kierownicą? Jak to sprawdzić?

Uważam, że tak postawiona teza i określone cele rozprawy są zadaniem ambitnym od strony teoretycznej, ciekawym od strony poznawczej i potrzebnym ze względów praktycznych. Są jasno sformułowane, istotne i aktualne na tle obecnego stanu wiedzy, stanowiąc oryginalne zadanie badawcze.

II. Zawartość merytoryczna rozprawy

Rozprawa liczy 128 stron i została podzielona na pięć rozdziałów oraz dwa dodatki i spis literatury. Ich uzupełnienie stanowią umieszczone na początku rozprawy streszczenia w języku angielskim i polskim oraz lista symboli i skrótów. Praca napisana jest w języku angielskim.

Dwa pierwsze rozdziały stanowią wprowadzenie do zasadniczej części rozprawy. Autor przedstawił w nich swoją motywację, sformułował tezę i nakreślił cele pracy oraz przedstawił krótko aktualny stan wiedzy. Poprzez analizę prezentowanych dotychczas w literaturze rozwiązań przedstawił nowatorskość proponowanego przez siebie sposobu stabilizacji roweru przez zastosowanie koła reakcyjnego.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały trzeci i czwarty. W rozdziale trzecim Autor przedstawia wyniki analizy teoretycznej i eksperymentów praktycznych nad stabilizacją odwróconego wahadła z wykorzystaniem koła reakcyjnego. Rozdział ten podzielono na osiem podrozdziałów, w których opisuje się odpowiednio:

- zasadę pracy koła reakcyjnego,
- model matematyczny odwróconego wahadła z kołem reakcyjnym,
- wykorzystywane w pracy algorytmy sterowania,
- wyniki analizy stabilności stworzonych układów sterowania wahadłem,
- problemy wynikające z niedoskonałości wykorzystywanych urządzeń pomiarowych i wynikające z tego problemy estymacji kąta wychylenia wahadła i działania badanych układów sterowania,
- wyniki symulacji komputerowych badanych układów sterowania położeniem wahadła,
- efektywności energetycznej proponowanych układów sterowania,
- wyniki eksperymentów praktycznych – stabilizacji położenia zbudowanego urządzenia balansującego wykorzystującego koło reakcyjne.

Rozdział czwarty rozprawy otwiera przegląd literatury dotyczącej modelowania roweru po czym Autor przedstawia kolejno:

- przyjęty model matematyczny roweru oraz wyprowadzony model matematyczny roweru z kołem reakcyjnym,
- sposób i wyniki syntezy analizowanych w pracy układów sterowania rowerem z kołem reakcyjnym,
- analizę stabilności stworzonych układów sterowania,
- wyniki symulacji wybranych układów sterowania rowerem wraz z dogłębną ich analizą.

W rozdziale piątym Autor podsumował wyniki pracy oraz przedstawił wnioski wyciągnięte po ich analizie i możliwe kierunki dalszych badań.

Dwa dodatki do pracy zawierają wzory wykorzystane w obliczeniach oraz przyjęte w pracy wartości parametrów roweru i koła reakcyjnego.

Spis literatury zawiera 110 pozycji. Są one prawidłowo dobrane i cytowane w treści pracy. 7 z nich stanowią cytowania własnych prac – jedna współautorska praca dyplomowa magisterska i 6 współautorskich artykułów naukowych, wśród których w 4 przypadkach Doktorant jest pierwszym autorem.

III. Ogólna ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa bardzo dobrze wpisuje się w wyniki prac innych grup badawczych zajmujących się stabilizacją pojazdów jednośladowych. Spotykane dotychczas rozwiązania tego problemu wykorzystują żyroskopy (jak w rozwiązaniu firmy Lit Motors) czy sterowanie wychyleniem kierownicy (rozwiązanie firmy Honda). Autor proponuje tymczasem wykorzystanie koła reakcyjnego i udowadnia możliwość i skuteczność jego pracy. W poszczególnych rozdziałach rozprawy konsekwentnie przedstawia kolejne elementy systemu sterowania oraz prowadzi analizę zasadności i efektywności ich pracy.

W mojej opinii teza pracy została udowodniona a wszystkie ze związanych z nią celów zrealizowane. Choć, należy zauważyć, że pierwszy z nich, odpowiedź na pytanie: Czy koło reakcyjne umożliwia stabilizację odwróconego wahadła? został już rozwiązany i udowodniony choćby przez, przywołaną w pracy, grupę badaczy z Swiss Federal Institute of Technology w Zurychu (ETH Zurich) realizujących projekt Cubli. Realizację tego celu w recenzowanej rozprawie postrzegam jednak jako przygotowanie i gruntowną analizę odpowiedniego modelu wahadła z kołem reakcyjnym. Modelu, który mógł zostać użyty w dalszej części pracy, jako część opisu roweru stabilizowanego kołem reakcyjnym. Za dodatkowy atut tej części rozprawy uważam weryfikację praktyczną przyjętego modelu i układu sterowania odwróconym wahadłem.

Generalnie do głównych osiągnięć Autora zaliczam:

- syntezę i kompleksową analizę pracy układu stabilizacji położenia odwróconego wahadła z wykorzystaniem koła reakcyjnego,
- praktyczną implementację analizowanych algorytmów sterowania, w tym w szczególności analizę i kompensację wpływu niedoskonałości wskazań urządzeń pomiarowych, tu dryfu prędkości kąta wychylenia wahadła,
- rozbudowanie przyjętego z literatury modelu roweru o model koła reakcyjnego,
- zaproponowanie właściwych i skutecznych, a jednocześnie prostych w implementacji w mikrokontrolerze, algorytmów stabilizacji pozycji roweru z kołem reakcyjnym,
- kompleksową analizę warunków stabilnej pracy układu przy sterowaniu kołem reakcyjnym oraz wychyleniem kierownicy.

Podstawowym mankamentem rozprawy jest jednak sposób prezentacji poszczególnych elementów układu sterowania. Przyjęta kolejność prezentacji (rozdział 3): najpierw modelu wahadła, proponowanych algorytmów sterowania, analizy ich stabilności, a następnie badań symulacyjnych i eksperymentalnych wydaje się na pierwszy rzut oka właściwa. W formie jakiej została zrealizowana w rozprawie staje się jednak uciążliwa dla jej czytelnika. Na przykład, Autor rozprawy w rozdziale 3.3.5 nie uzasadnia potrzeby stosowania układu sterowania LQI, wyprowadza jednak model układu zamkniętego, dokonuje stosowanych obliczeń i przedstawia rezultaty liczbowe. Cel stosowania układu LQI wyjaśnia się dopiero w rozdziale 3.5 a przyjmowane wartości liczbowe poszczególnych parametrów układu w rozdziale 3.8 (Tablica 3.7). Sytuacji nie ułatwia przy tym co najmniej kilka błędów w odwołaniach do przytaczanych w tekście pracy wzorów. Podobnie np. na stronie 18 przedstawia się model dyskretny wahadła z kołem reakcyjnym a sposób jego wyprowadzenia opisano dopiero w kolejnym rozdziale na stronie 20.

Podczas lektury rozprawy nasunęło mi się kilka pytań i uwag, których wyjaśnienie pozwoliłoby poprawić rezultaty i przekaz pracy:

1. W wyprowadzonym modelu wahadła (3.15)-(3.18) zastosowano bardzo uproszczone modele: silnika (równanie (3.8)) i tarcia (równania (3.9)-(3.11)). Czy modele te nie powinny zostać rozbudowane? Dynamika silnika czy zmieniające się nieliniowo wartości siły tarcia przy niewielkich wartościach prędkości koła reakcyjnego i możliwie częstej pracy nawrotnej koła mogą decydować o stabilnej pracy układu.
2. Skąd wywodzi się potrzeba wyprowadzenia modelu dyskretnego wahadła z kołem reakcyjnym? Czy model ten został wykorzystany w jakikolwiek sposób w pracy? Czy równanie (3.45) zostało zaimplementowane mikrokontrolerze i jest wykorzystywane w bieżącej syntezie układu sterowania wahadłem?
3. W jaki sposób przyjęte zostały wartości liczbowe macierzy R i Q (3.48) oraz wartość parametrów wektora (3.70)?

4. Przedstawiona w rozdziale 3.4 analiza stabilności z wykorzystaniem (transmitancji) odpowiedzi układu na skokową zmianę wartości sygnału wymuszającego jest moim zdaniem całkowicie zbędna. Potwierdza ona jedynie rezultaty otrzymane już wcześniej na podstawie analizy wartości własnych macierzy stanu analizowanych układów.
   Podobnie oceniam taki sam sposób analizy stabilności układów stabilizacji roweru przedstawiony w rozdziale 4.4.
5. Ciekawym elementem pracy jest przedstawiona analiza wpływu wybranych parametrów na stabilność układu sterowania wahadłem. Niestety rysunek 3.7 jest mało czytelny a zakresy zmian parametrów nieuzasadnione.
6. Przedstawiona w rozdziale 3.5 analiza wpływu dryfu wskazań wartości prędkości zmian kąta wychylenia wahadła ξ jest generalnie poprawna, nie prowadzi jednak do estymacji ani tego parametru ani właściwej wartości kąta wychylenia wahadła.
7. Generalnie opracowany układ regulacji LQI, jak pokazuje analiza, jest układem wewnętrznie niestabilnym. Pozwala on wprawdzie na stabilizację kąta wychylenia wahadła, jednak jest to stan „krótkotrwały". Układ wymaga bowiem sprzężeń zwrotnych od stale rosnących wartości wybranych zmiennych stanu, co w ogólności, i w szczególności w systemie mikrokomputerowym, będzie zawsze prowadzić do błędów numerycznych i ostatecznie utraty stabilności wahadła.
8. W Symulacji nr 3 w rozdziale 3.6 symulowane jest zakłócenie w postaci stałego zewnętrznego momentu działającego na wahadło. Jak, gdzie w przyjętym modelu wahadła z kołem reakcyjnym (3.15)-(3.18) jest to zakłócenie uwzględnione?
9. W analizie efektywności energetycznej (rozdział 3.7) założono możliwość odzysku energii podczas hamowania koła reakcyjnego. Czy Autor rozprawy rozważał opracowanie takiego układu sterowania? Dla przedstawionego w rozprawie układu sterowania, w którym nie ma takiej możliwości, właściwą wydałaby się kolejna analiza przedstawiająca jego faktyczną efektywność energetyczną.
10. Moim zdaniem olbrzymie zamieszanie w rozdziale 4 wprowadza „błąd w tabeli 4.2", według której macierz wagowa Q ma wymiar $4x4$, podczas gdy przyjęty model roweru z kołem reakcyjnym, opisany równaniami (4.32)-(4.33) ma wektor stanu o wymiarze równym 6. Również w symulacjach prezentowanych w rozdziale 4.5 Doktorant konsekwentnie pokazuje jedynie wybrane 4 zmienne stanu, czyli niepełny wektor zdefiniowany równaniem (4.26).

IV. Uwagi szczegółowe

Rozprawa zawiera niestety bardzo dużą liczbę błędów redakcyjnych i edytorskich. Tekst (praca napisana jest po angielsku) zawiera też sporą liczbę błędów językowych. Poniżej wskażę jednak jedynie wybrane, dając pogląd na styl przekazu treści rozprawy:

1. W streszczeniu (wersja polska i angielska) Doktorant pisze: „Układ jest nieliniowy i zaproponowano takie techniki sterowania, które są w stanie go ustabilizować". Jeśli zdanie

to ma zrównywać pojęcie nieliniowości i stabilności układu to jest to oczywisty błąd.

2. W liście symboli stałą grawitacji g nazywa się wektorem grawitacji.
3. Na str. 13 w pierwszym akapicie rozdziału 3.2 Autor powtarza wyjaśnienie fizycznego znaczenia zmiennej stanu x_3 pomijając stan x_4.
4. Przyjęty równaniami (3.13)-(3.14) ogólny sposób opisu modelu wahadła jest jawną funkcją czasu. Doktorant sugeruje więc, że model wahadła z kołem reakcyjnym jest niestacjonarny, nie znajduje to jednak potwierdzenia w kolejnych, wersjach modelu.
5. W równaniach (3.13)-(3.14) sygnał sterujący przedstawia się jako skalar, gdy tymczasem w wyjaśnieniach do wzoru Doktorant pisze już $\underline{u} \in R^m$.
6. W modelu opisanym równaniami (3.13)-(3.14) przyjmuje się p wyjść i m wejść, a po jego linearyzacji (3.21)-(3.22) oznacza się go jako układ o q wyjściach i p wejściach.
7. Równanie (3.43) jest niepoprawne.
8. Na rysunku 3.5 przy węźle sumacyjnym powinien być znak '-'.
9. Macierze A i B w równaniu (3.64) nie zostały poprawnie zdefiniowane. Nie są to na pewno macierze opisane równaniami (3.28) i (3.29) ponieważ nie zgadzają się nawet ich wymiary.
10. W tablicy 3.5, w kolumnie regulator, wykazano „LQR tracking" i „LQI tracking" choć takich specyficznych układów w pracy się nie analizuje.
11. Oznaczenie x_m jako stanu mierzonego wprowadzono w (3.76), wykorzystano w (3.80) ale x_m nie występuje ani w modelu (3.15)-(3.18), ani modelu (3.64) (dla którego zdefiniowano stan opisany równaniem (3.60)) wykorzystanych w symulacjach prezentowanych w rozdziale 3.6.
12. Model roweru z kołem reakcyjnym opisany jest wzorem (4.23. Dlaczego więc w wynikowym modelu (4.32)-(4.33) i (4.34)-(4.36) używane są oznaczenia przyjęte w (4.5)-(4.8) dla modelu roweru bez koła reakcyjnego?

Błędy, choć liczne, nie decydują jednak o mojej generalnie pozytywnej ocenie rozprawy.

V. Wnioski końcowe

Dyplomant w recenzowanej Rozprawie jednoznacznie dowiódł swoich umiejętności systematycznej analizy problemu technicznego, dużej wiedzy z zakresu teorii sterowania, umiejętności konstrukcyjnych, projektowania i programowania komputerowych systemów sterowania. Wykazał wiedzę i umiejętności właściwe dyscyplinie naukowej *automatyka i robotyka* oraz potwierdził predyspozycje do prowadzenia badań naukowych.

Przedstawione w pracy wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych stanowią cenne uzupełnienie osiągnięć innych grup badawczych w zakresie stabilizacji pozycji pojazdów jednośladowych.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgra inż. Adama Owczarkowskiego, pt. „Application of selected control algorithms for nonlinear systems in unmanned bicycle robot stabilized by an inertial drive" spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595, z późn. zm.) stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.