

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Korczaka pt.

„Dynamika i stabilność układów niedosterowanych  
z wymuszeniem sprzężonym”

## 1. Zawartość Rozprawy

Rozprawa jest napisana w języku polskim, ma 137 stron, jest podzielona kolejno na Streszczenie w języku polskim i angielskim, Spis treści, 6 rozdziałów, tj.:

1. Wstęp;
2. Podstawy teoretyczne;
3. Wybrane zagadnienia teorii sterowania;
4. Śledzenie trajektorii przez układ niedosterowany z wymuszeniem sprzężonym;
5. Badania doświadczalne;
6. Podsumowanie

oraz Bibliografię i 6 dodatków załączonych na końcu książki, tj.:

- A. Zestawienie własności układów niedosterowanych;
- B. Zbiory osiągalne przykładowych układów niedosterowanych;
- C. Nawias Liego;
- D. Homeomorfizm i dyfeomorfizm;
- E. Zestawienie form zapisu modelu bryły napędzanej siłą niecentralną;
- F. Informacje techniczne o platformie mobilnej.

Na początku Rozprawy nie zawarto jednolitego spisu oznaczeń, jak również nie wszędzie zostały one objaśnione w tekście w miejscach ich wprowadzenia.

W punkcie 1.2 sformułowano zakres, tezę i zasadnicze cele pracy, którymi są:

- a. zbadanie problemu sterowania wybranymi układami niedosterowanymi, zawierającymi sprzężenie wymuszeń;
- b. zaproponowanie nowego i łatwego w zastosowaniu algorytmu sterowania takimi układami.

## 2. Zasadność podjęcia tematu pracy

Planowanie ruchu autonomicznych maszyn mobilnych to obecnie jeden z najważniejszych i najprężniej rozwijających się kierunków teorii i praktyki różnych odmian sterowania nadążnego. Automatyzacja ruchu maszyn kroczących, jeżdżących czy też latających wymaga zaprojektowania układu sterowania automatycznego, nadającego wymienionym obiektom cech samosterowności przy zachowaniu stabilności dynamiki oraz optymalności trajektorii ruchu, często w zadanym horyzoncie czasowym. Wymienione aspekty stanowią o nowoczesności użytecznych rozwiązań technicznych, które w dziedzinie budowy i konstruowania różnych typów maszyn powinny łączyć mechanikę klasyczną, elektronikę,

optymalizację procesów oraz zaawansowane techniki projektowania wsparte modelowaniem matematycznym, metodami numerycznymi i analizą dynamiczną. Dostrzegając zatem złożoność i aktualność problematyki otaczającej zagadnienia kontrolowanego wpływu na dynamikę układów niedosterowanych uważam, że tematyka przedstawionej mi do oceny pracy doktorskiej jest zasadna i ważna w zakresie dynamiki maszyny oraz teorii i zastosowań układów dynamicznych.

### 3. Ocena sposobu i stopnia rozwiązania problemu

Autor Rozprawy podjął się rozwiązania dwóch zadań śledzenia trajektorii przez układ niedosterowany, tzn. przedstawił rozwiązanie podstawowe, opierające się na uproszczonym sterowaniu położeniem badanego obiektu i rozwiązanie rozszerzone, opierające się na dwuwymiarowym wektorze sterowania położeniem oraz kątem obrotu (orientacją) tego obiektu na płaszczyźnie. Przyjęte podejście jest prawidłowe, a opracowanie nowego algorytmu sterowania wartościowe. Wśród słabszych fragmentów pracy dotyczących aspektów technicznej realizacji sterowania obiektem rzeczywistym należy wymienić: a) brak schematów blokowych opisujących przepływ sygnałów sterujących i wykonawczych pomiędzy podzespołami platformy mobilnej; b) brak algorytmów numerycznych implementowanych na mikroprocesorowej jednostce obliczeniowej (mikrokontrolerze); c) stopień rozwiązania postawionego problemu w zakresie budowy układu sterowania okazał się wystarczający do zrealizowania zaplanowanych zadań, jednakże przechodząc od modeli matematycznych w ciągłej dziedzinie czasu do opisu w dziedzinie czasu dyskretnego można by podać dyskretne formy implementowanych algorytmów, uwzględniających przyjętą częstotliwość próbkowania sygnałów pomiarowych i sterujących na mikrokontrolerze.

Autor Rozprawy trafnie opisał większość wybranych zagadnień teorii sterowania, dając możliwość oceny istniejących technik realizacji postawionych zadań sterowania. Opisał cele w zadaniach sterowania, zadanie stabilizacji poprzez odpowiednie kształtowanie sygnałów wejściowych do układu i zadania śledzenia zadanych trajektorii próbnych, które zostały rozwiązane w pracy doktorskiej na stanowisku doświadczalnym. Wybór pewnych zagadnień z obszernej teorii sterowania, powinien skutkować ich wyraźnym wykorzystaniem do rozwiązania podjętego problemu. Niektóre z przytoczonych fragmentów teoretycznych nie znajdują bezpośredniego zastosowania lub Autor nie odniósł się do nich w dalszej części Rozprawy, co wyszczególniono poniżej w punktach 4.1 i 4.3 tej recenzji.

### 4. Uwagi krytyczne ogólne i pytania

1. Podstawy teoretyczne przytoczone w podrozdziałach 2.1-2.5 z odniesieniami do literatury odnoszą się ściśle do podejmowanej problematyki, ale tytuł podrozdziału 2.6 wskazuje na szerszą analizę dynamiczną pewnych niedosterowanych układów dynamicznych. Ten fragment zawiera tylko dwa akapity opisujące model matematyczny dynamiki ruchu w stanie ustalonym oraz rysunki (zamieszczone już w kolejnym podrozdziale teoretycznym) z wynikami symulacji numerycznych. Wymagane jest: a) podanie przejść matematycznych, prowadzących do uzyskania rozwiązań przybliżonych, danych równaniami (2.108)-(2.111) uzyskanych z równań różniczkowych (2.25)-(2.27); b) podanie wartości parametrów do przedstawionych symulacji numerycznych.
2. Podrozdział 2.7 należało umieścić w Dodatku C.

3. Jaki był cel zamieszczenia podrozdziałów 2.8 o płaskości różniczkowej, 2.9 o innych zagadnieniach i 3.3 o warunku koniecznym Brocketta w kontekście opracowanych metodologii sterowania?
4. Na stronie 87<sub>3</sub> Autor odwołuje do wzorów (4.42)-(4.44) celem obliczenia zależności na siłę  $F_u$ . Wzór (4.105) nie wynika bezpośrednio z tych wzorów, dlatego należy podać odpowiednie wyprowadzenie.
5. Autor często odnosi się do „sterowania położeniem i obrotem”. Jest to prawidłowe stwierdzenie, choć niekiedy w stosunku do przedmiotowej platformy mobilnej lepsze byłoby użycie sformułowania „sterowanie położeniem i orientacją na płaszczyźnie”.
6. Nieznajomość odpowiedzi dynamicznej silnika napędowego jest słabszym punktem modelowania dynamicznego opisanego w Rozprawie. Jakie są sposoby włączenia modelu silnika napędowego i jego parametrów do algorytmów regulacji automatycznej i jak wpłynąłby taki model na postać algorytmu sterowania przy użyciu opracowanej metody odwrotności uogólnionej, obliczanego momentu i regulatora PD?
7. W eksperymentach numerycznych i doświadczalnych na obiekcie rzeczywistym mamy do czynienia z ciągnięciem wózka, niekiedy również przy jednoczesnej korekcji położenia i orientacji platformy na płaszczyźnie. Dodatkowo, w pewnych wariantach sterowania zmniejszeniu błędu orientacji platformy towarzyszy zwiększenie niedokładności śledzenia wybranej trajektorii próbnej. Czy była sprawdzana i jaka jest efektywność zaprojektowanych wariantów układu sterowania w przypadku śledzenia ścieżki nieregularnej, wymagającej chociażby chwilowego zatrzymania i zmiany kierunku ruchu o  $90^\circ$ ?
8. W jaki sposób można by potraktować nieregularne zmiany orientacji kół trolejowych w kontekście wejść do układu sterowania?
9. Widoczną przyczyną błędów w odzwierciedleniu zadanej orientacji platformy mobilnej są niedokładności wykonania i być może niewystarczający zakres kąta skrętu koła napędowego oraz wariacje skrętu kół trolejowych. Czy sterowanie kątem skrętu koła napędowego oraz zwykłych kół skrętnych zastępujących, na przykład, użyte koła trolejowe mogłyby odbywać się za pomocą silników krokowych?
10. Platforma mobilna musi istnieć w jakimś celu. Domniemane przeznaczenie tej opisywanej w Rozprawie, pełniącej funkcję podwozia robotów mobilnych lub chociażby wózka transportowego może świadczyć o tym, że ona powinna coś przewozić. Czy przeprowadzono eksperymenty realizacji tych samych zadań sterowania, ale z dodatkowym obciążeniem, odsuwającym środek masy całego układu w kierunku do góry w stosunku do płaszczyzny kontaktu kół jezdnych (podłoża)? To jest zagadnienie raczej istotne, ponieważ celem zabezpieczenia platformy przed utratą kontaktu kół jezdnych z podłożem, wprowadzałoby m.in. dodatkowe ograniczenia na sygnały wymuszające. Tę niestabilność powodowałyby dodatkowe momenty skręcające, działające na przedmiotową bryłę sztywną w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża. Oczywiście, istniejące na stanowisku doświadczalnym ciała sztywne zamocowane na platformie odsuwają jej środek ciężkości w kierunku do góry (patrząc od strony podłoża) i wpływają na dynamikę poruszanej bezwładności, ale stanowią one tylko elementy konstrukcji.
11. Temat pracy mógłby wskazywać na monografię lub podręcznik. Dlatego pojawia się pewna wątpliwość, czy temat nie powinien być lepiej doprecyzowany, np. poprzez wskazanie przedmiotu pracy doświadczalnej Doktoranta, obejmującej rzeczywiste dwu-wymuszeniowe sterowanie platformą mobilną, poddaną działaniu niecentralnej siły napędzającej.

## 5. Uwagi krytyczne szczegółowe i pytania

1. Symbole użyte we wzorach (2.3)-(2.8) nie zostały objaśnione.
2. Zmienne wektorowe w zapisie macierzowym wprowadzone w podrozdziałach 2.1-2.4 wstępu teoretycznego nie znajdują odniesienia w modelach matematycznych przykładowych układów niedosterowanych zamieszczonych w punktach 2.5.1-2.5.9. Dążąc do zachowania spójności pomiędzy tymi opisami, należało wzbogacić modele matematyczne przytoczonych układów dynamicznych o definicje poszczególnych wektorów i macierzy, takich jak  $\mathbf{q}_s$ ,  $\dot{\mathbf{q}}_s$ ,  $\mathbf{h}_x$ ,  $\mathbf{F}_x$ ,  $\boldsymbol{\tau}$  i pozostałych.
3. Podpis pod rysunkiem 2.2 zawiera błędne sformułowanie, tzn. „Bryła sztywne w globalnym układzie współrzędnych oraz jej prędkości w układzie związanym z bryłą”. Należy lepiej wyjaśnić lokalny układ współrzędnych, ponieważ w opisanej sytuacji, obie składowe prędkości wzdłużnej i poprzecznej tej bryły w związanym z nią układzie współrzędnych będą zawsze równe 0. W przyjętym zagadnieniu ruchu płaskiego zmianie może ulegać w tym układzie tylko zaznaczona na rysunku prędkość kątowna  $\omega$ .
4. Na stronie 19<sub>1</sub> definicja w postaci sformułowania ”moment bezwładności  $I_c$  wokół środka masy (punkt C)” jest nieprecyzyjna. Może ono przyjąć np. formę „moment bezwładności  $I_c$  w ruchu obrotowym bryły sztywnej względem osi przechodzącej przez środek masy (punkt C) i prostopadłej do płaszczyzny  $XY$ ”. W następnych odwołaniach można już używać formy skróconej.
5. Na stronie 50<sup>2</sup> użyto sformułowanie: „... układ niedosterowany opisany układem równań (3.37) może być globalnie częściowo zlinearyzowany”. Co to oznacza?
6. Równania (3.45)-(3.47) wymagają podania odnośnika do literatury.
7. Tytuł punktu 3.4.10 mógłby brzmieć „Metoda regulacji PID” lub „Algorytm PID”.

## 6. Wartość i znaczenie Rozprawy

Opracowana przez Doktoranta metoda sterowania, wykorzystująca odwrotność uogólnioną i jej kontynuację w postaci metody najmniejszych kwadratów do śledzenia wybranych typów trajektorii sprawdza się dobrze, przynajmniej przy niskich prędkościach ruchu rozpatrzonej, niedosterowanej platformy mobilnej oraz odpowiednio w przypadku trajektorii ósemkowej. Na polu teorii układów dynamicznych, którą Doktorant wykorzystał do rozwiązania trudnego zadania sterowania przy zaangażowaniu modeli dynamicznych i analizy stabilności błędów algorytmów sterujących, należy silnie zaakcentować wysoką wartość i znaczenie recenzowanej Rozprawy. Opracowany algorytm sterowania pełnego (w stosunku do sterowania niepełnego) powoduje na stanowisku doświadczalnym większe niedokładności śledzenia zadanej trajektorii, gdzie być może wymagane jest nałożenie kryterium czasowego, a być może przejście do opisu układów sterowania z opóźnieniem czasowym, ale należy zaznaczyć, że rzeczywisty obiekt regulacji jest konstrukcją niskobudżetową o wielu mankamentach wymienionych we wnioskach na końcu rozdziału piątego oraz w Podsumowaniu. Na tej podstawie, opracowane algorytmy sterowania sprawdzone na przyjętych trajektorii próbnych mają walory aplikacyjne i należy uznać to za znaczące osiągnięcie Doktoranta. Autor załączył do pracy Dodatek F, mający formę opisową, ale jej wartość podniosłaby dokumentacja techniczna, zawierająca schematy połączeń pomiędzy częściami składowymi stanowiska doświadczalnego i opisująca zaprojektowaną platformę mobilną wraz z jej układem elektronicznym. Wymienione braki nie wpływają na obniżenie końcowej – wysokiej oceny recenzowanej Rozprawy.

## 7. Uwagi redakcyjne

Niektóre zauważone błędy redakcyjne wypisano poniżej.

- W tekście na stronach 16, 21, 30, 35, 39-40, 77, 81, 83, 85, 86, 96, 97, 131 pojawiają się pola nie wypełnione tekstem lub elementami graficznymi;
- Tytuł „Rakieta” punktu 2.5.9 Rozprawy nie oddaje jego zawartości;
- Tytuł podrozdziału 2.6 nie odpowiada w pełni swojej zawartości, a jego umiejscowienie pomiędzy rozdziałami o charakterze czysto teoretycznym nie jest właściwe. Zasadne byłoby przeniesienie prezentowanych wyników symulacji do punktu 2.5.2;
- Niektóre grafiki, np. rysunki 2.13, C1 są mało czytelne. Zastosowano zbyt małą czcionkę lub zbyt małe wymiary obszaru okna graficznego;
- Na stronie 43<sup>5</sup>: jest „zadań” powinno być „zadaniem”;
- 43<sub>2</sub>: jest „sprawdzenie” powinno być „sprawdzeniem”;
- 51<sub>16</sub>: jest „nieskończoności” powinno być „nieskończoność”;
- 53<sup>12</sup>: jest „metody metody” powinno być „metody”;
- 57<sub>3</sub>: jest „Rutha” powinno być „Routha”;
- 59<sub>7</sub>: jest „modelu (4.1-4.3)” powinno być „samolotu (4.1-4.3)”;
- 60<sub>2</sub>: jest „zachowaniu” powinno być „zachowanie”;
- 64<sub>6</sub>: jest „równania” powinno być „wektora”;
- 64<sub>4</sub>: jest „Dokonując przekształcenia” powinno być „Dokonując przekształcenia równania (4.23) do postaci”;
- 65<sub>10</sub>: jest „pełen” powinno być „pełny”;
- 85<sub>7</sub>: jest „trajektorii” powinno być „trajektoria”;
- 87<sub>6</sub>: jest „do ruchu obiektu” powinno być „do wywołania ruchu”;
- 118<sup>7</sup>: jest „skupiona być powinna” powinno być „powinna skupiać się”;
- 125<sub>11</sub>: jest „Toczący dysk” powinno być „Toczący się dysk”.

Zauważono ponadto wiele brakujących przecinków i kilkanaście zdań, których składnię należałoby nieco poprawić.

Autor dobrze posługuje się językiem technicznym, poprawnie stosuje odpowiednie określenia matematyczne i fizyczne oraz zna ich odpowiedniki anglojęzyczne.

## 8. Ocena Doktoranta

Doświadczalny fragment Rozprawy dotyczący metod komputerowych jest doskonałym przykładem wykorzystania metod numerycznych w modelowaniu dynamiki układu rzeczywistego o kilku stopniach swobody, sprawdzenia skuteczności, a następnie implementacji algorytmów sterowania niedosterowaną, rzeczywistą platformą mobilną. Doktorant poprawnie wykorzystał złożony aparat matematyczny, zbudował obiekt rzeczywisty, a następnie wysterował ten obiekt przy jednoczesnej znajomości uwarunkowań realizacji technicznej, jakości sterowania podczas śledzenia wyznaczonej trajektorii ruchu oraz jego stabilności i dokładności. Opisany sposób rozwiązania postawionego problemu charakteryzuje dojrzałe prace doświadczalne o zacięciu nowatorskim, a zarazem nie pozbawione czynników utrudniających uzyskanie oczekiwanych efektów końcowych. W moim przekonaniu, Doktorant jest doświadczalnikiem, który udowodnił, że posiada również umiejętności operowania matematyką wyższą, stosowaną na użytek rozwiązań inżynierskich oraz wiedzę techniczną z zakresu mechaniki klasycznej i dynamiki maszyn.

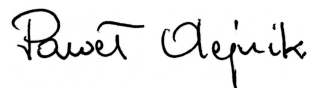
## 9. Wniosek końcowy

Przedstawione przeze mnie uwagi krytyczne, komentarze i sugestie mają na celu wskazanie słabszych i silniejszych stron recenzowanej Rozprawy, a przy tym nie wpływają w istotny sposób na jej oryginalność, wartość naukową i poznawczą.

Stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji praca doktorska mgr inż. Sebastiana Korczaka pt. „Dynamika i stabilność układów niedosterowanych z wymuszeniem sprzężonym”, stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie postawionego problemu naukowego.

Recenzowana Rozprawa spełnia wymagania Ustawy z dnia 14.03.2003 r. „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki” (Dz.U. 65/2003 z późn. zm.) sformułowane w stosunku do prac doktorskich.

Stawiam wniosek o dopuszczenie ocenianej pracy doktorskiej do publicznej obrony celem nadania jej Autorowi, mgr inż. Sebastianowi Korczakowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie Mechanika.



dr hab. inż. Paweł Olejnik

Katedra Automatyki, Biomechaniki i Mechatroniki  
Wydział Mechaniczny Politechniki Łódzkiej