



POLITECHNIKA  
LUBELSKA  
LUBLIN UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY

Dr hab. inż. Jerzy JÓZWIK, prof. Uczelni  
POLITECHNIKA LUBELSKA  
WYDZIAŁ MECHANICZNY  
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji  
Ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

Telefon: + 48 606 296 823; + 48 81 5384230; j.jozwik@pollub.pl

## RECENZJA

*Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Obala pt.: „Sterowanie pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym w warunkach niepewności więzów”, została opracowana w związku z prowadzonym przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa przewodem o nadanie stopnia naukowego doktora*

---

### Zamawiający

*Opinię wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, na podstawie pisma RM-530-01-02/2025 z dn. 26 marca 2025r. oraz stosownej umowy*

---

### Informacje ogólne

*Recenzja obejmuje ocenę treści merytorycznych rozprawy, ocenę wartości naukowej, tez i rozwiązania problemu badawczego, jak również ocenę redakcyjną rozprawy i wnioski końcowe. Promotorem recenzowanej rozprawy jest dr hab. inż. Piotr Gierlak, prof. uczelni, zaś promotorem pomocniczym dr hab. inż. Dariusz Szybicki, prof. uczelni. Recenzowana rozprawa doktorska została przedstawiona na 196 stronach maszynopisu, w logicznym układzie 10 rozdziałów głównych wraz z wykazem ważniejszych oznaczeń, bibliografią obejmującą 125 pozycji, wykazem ilustracji (ok.100 rysunków) oraz wykazem tabel (16 tabel). Pewien niedosyt w pracy budzi brak streszczenia w języku polskim oraz angielskim. Struktura edytorska pracy jest przemyślana i logiczna, obejmując wprowadzenie teoretyczne, przegląd literatury, motywację i cele badawcze, badania eksperymentalne, modelowanie matematyczne, syntezę układu sterowania, badania symulacyjne oraz wnioski końcowe. Praca zawiera obszerny dodatek z materiałami uzupełniającymi, w tym listingi programów oraz szczegółowe wyprowadzenia matematyczne. W części końcowej pracy Autor nakreślił dalsze kierunki prac badawczych. Autor zastosował przejrzysty układ graficzny z licznymi ilustracjami wysokiej jakości, które istotnie wzbogacają prezentowane treści merytoryczne. Szczególnie wartościowe są zaprezentowane wyniki badań eksperymentalnych, ich szczegółowa analiza i konstruktywne wnioski*

---

### Ocena aktualności tematyki

*Tematyka rozprawy dotyczy sterowania pozycyjno-siłowego robotów przemysłowych w warunkach niepewności więzów geometrycznych, co stanowi bardzo aktualny i istotny problem w zakresie robotyki przemysłowej. Autor postawił sobie za cel opracowanie układu sterowania, który połączy zalety dwóch różnych strategii: strategii sterowania ruchem po zadanej ścieżce i strategii sterowania siłą, w ramach jednego algorytmu. W erze Przemysłu 5.0 oraz dynamicznie rozwijającej się koncepcji cyfryzacji i automatyzacji procesów produkcyjnych, zagadnienia związane z precyzyjnym sterowaniem robotów w interakcji z otoczeniem nabierają szczególnego znaczenia. Autor trafnie zidentyfikował lukę*

w dostępnych komercyjnych rozwiązaniach sterowania siłą robotów, gdzie dostępne strategie nie zapewniają optymalnego połączenia sterowania trajektorią ruchu ze sterowaniem siłą interakcji. Problem ten jest szczególnie istotny w aplikacjach obróbki mechanicznej elementów np. odlewanych, kutych a także wyprasek polimerowych, charakteryzujących się ściśle zdefiniowanymi tolerancjami kształtu i wymiaru, a także występowaniem nieprzewidywalnych wpływów. Aktualność tematu potwierdza również dynamiczny rozwój metod sterowania adaptacyjnego w robotyce, gdzie uwzględnienie niepewności parametrów i zakłóceń zewnętrznych stanowi kluczowe wyzwanie. Przedstawione w pracy rozwiązanie wpisuje się w najnowsze trendy badawcze dotyczące inteligentnych systemów produkcyjnych zgodnych z ideą przemysłu 5.0.

## **Ocena zdefiniowania problemu badawczego**

Autor precyzyjnie zdefiniował problem badawczy, wskazując na ograniczenia istniejących strategii sterowania siłą w robotach przemysłowych. Problem został sformułowany w kontekście praktycznych potrzeb przemysłu, szczególnie w zakresie zrobotyzowanej obróbki elementów z wykorzystaniem wielu istotnych technologii. Hipoteza badawcza została sformułowana jasno: możliwe jest opracowanie układu sterowania, który połączy zalety strategii sterowania ruchem po zadanej ścieżce ze strategią sterowania siłą w ramach jednego algorytmu, przy uwzględnieniu niepewności więzów geometrycznych. Cel pracy został określony precyzyjnie jako opracowanie i przetestowanie układu sterowania robotem przemysłowym, który zagwarantuje ruch narzędzia wzdłuż zaplanowanej ścieżki z niewielką odchyłką i umożliwi sterowanie siłą nacisku narzędzia na powierzchnię kontaktu. Autor szczegółowo zdefiniował założenia funkcjonalne układu sterowania, co świadczy o dojrzałości metodologicznej podejścia. Zakres pracy został właściwie określony i obejmuje wszystkie niezbędne elementy: od modelowania matematycznego, przez syntezę układu sterowania, aż po weryfikację eksperymentalną. Do opisu kinematyki robota wykorzystano zmodyfikowaną notację Denavit-Hartenberga. Opis dynamiki autor sformułował z wykorzystaniem zarówno formalizmu Eulera-Lagrange'a, jak i formalizmu Newtona-Eulera, co pozwoliło zminimalizować ryzyko błędów obliczeniowych. Przedstawiono szacowanie wartości parametrów fizycznych modelu robota wraz z weryfikacją ich poprawności poprzez analizę zgodności przebiegów momentów uzyskanych z modelu i rzeczywistego robota. Szczególnie cenne jest uwzględnienie zarówno badań symulacyjnych, jak również i eksperymentalnych na rzeczywistym stanowisku robotycznym. Przeprowadzono syntezę układu sterowania w oparciu o algorytm sterowania pozycyjno-siłowego z uwzględnieniem niepewności więzów geometrycznych i wprowadzono do układu sterowania siłą dodatkowy człon jako wirtualną siłę reakcji na zmiany kształtu nominalnej powierzchni kontaktu, wykorzystując model matematyczny robota przekonwertowany do opisu w przestrzeni zadaniowej. Poparto to dowodem stabilności zaproponowanego algorytmu sterowania. Wyniki badań uwiarygadnia weryfikacja poprawności działania przyjętego algorytmu oraz ocena porównawcza opracowanego rozwiązania z wbudowanym układem sterowania siłą, z wykazaniem różnic pomiędzy klasycznym układem hybrydowego sterowania pozycyjno-siłowego, a układem uwzględniającym niepewności więzów. Dokonano również weryfikacji możliwości aplikacji opisywanego układu sterowania w zastosowaniu i odniesieniu do obróbki skrawaniem, która jest podstawową technologią wytwarzania

---

## **Temat, treść rozprawy, tezy i rozwiązanie problemu naukowego**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Obala jest „Sterowanie pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym w warunkach niepewności więzów”. Autor pracy podejmuje bardzo ważny i aktualny problem naukowy oceny sterowania pozycyjno-siłowego robotem przemysłowym w warunkach niepewności więzów w dostępnych współcześnie rozwiązaniach dotyczących układów sterowania interakcją robotów z otoczeniem. Potwierdza to szereg problemów praktycznych poruszanych w fachowej literaturze przedmiotu rozprawy, poczynając od rozwiązań naukowych problemów teoretycznych, jak również ważnych problemów praktycznych sterowania robotami. Praca wykonana jest w ośrodku o długoletnich tradycjach badawczych i dużym potencjale oraz zgromadzonej wiedzy. Bazą dla niniejszej

rozprawy są liczne prace badawcze wykonane wcześniej, w tym również z udziałem Promotora, Promotora Pomocniczego i Autora rozprawy. Treść rozprawy jest spójna i poprawna merytorycznie. Autor przeprowadził gruntowny przegląd literatury (125 pozycji), obejmujący zarówno klasyczne prace z zakresu sterowania robotów, jak i najnowsze osiągnięcia w dziedzinie sterowania pozycyjno-siłowego. Przegląd ten wskazuje na głęboką znajomość problematyki przez Autora rozprawy i umiejętność syntetyzowania wiedzy z różnych obszarów.

Szczególnie wartościowy jest rozdział dotyczący modelowania matematycznego robota ABB IRB 2400. Autor zastosował zarówno formalizm Eulera-Lagrange'a, jak i formalizm Newtona-Eulera do wyprowadzenia równań dynamiki, co pozwoliło na weryfikację poprawności modelu. Przedstawione wyprowadzenia są szczegółowe i matematycznie poprawne.

Kluczowym osiągnięciem w pracy jest opracowanie układu sterowania pozycyjno-siłowego z uwzględnieniem niepewności więzów geometrycznych. Autor zastosował podejście hybrydowe, wprowadzając dodatkowy człon jako wirtualną siłę reakcji na zmiany kształtu nominalnej powierzchni kontaktu. Rozwiązanie to jest innowacyjne i stanowi istotny wkład w rozwój metod sterowania robotów.

Synteza układu sterowania została przeprowadzona w sposób przejrzysty i syntetyczny, z uwzględnieniem analizy stabilności metodą Lapunowa. Przedstawiony dowód stabilności jest poprawny i kompletny. Autor wykazał, że zaproponowany algorytm sterowania zapewnia stabilność układu zamkniętego. Zaprezentowane w pracy badania wpisują się w interdyscyplinarne podejście do sterowania robotami przemysłowymi. Łączą w sobie elementy automatyki, robotyki i nowoczesnego podejścia do projektowania procesów wytwarzania. W przyszłości zaproponowane podejście pozwoli szeroko wykorzystać zaprojektowany algorytm sterowania w wielu aplikacjach w praktyce przemysłowej.

Treści merytoryczne prezentowane w rozprawie są przedstawiane z bardzo dużym poziomem szczegółowości i są adekwatne do rozważanych problemów. Można stwierdzić, że autor przeprowadził szerokie studium literatury i posiada umiejętność syntetyzowania wiedzy oraz planowania eksperymentu. Ponadto, na szczególną uwagę zasługują konstruktywne i twórcze rozwiązania autorskie samego Doktoranta, który udowodnił w pracy swoje wysokie kompetencje. Na szczególną uwagę zasługuje estetyka edytorska. Edycyjne i graficzne opracowanie pracy oceniam na bardzo wysokim poziomie.

Mimo drobnych niedociągnięć, moja ocena pracy w zakresie tematu, treści rozprawy, hipotezy i rozwiązania problemu naukowego jest bardzo pozytywna. Uznaję, że podjęcie problemu badawczego zdefiniowanego w pracy przyniesie istotny wkład w dyscyplinę naukową Inżynieria Mechaniczna i wiele korzyści o charakterze użytkowym

### **Ocena wartości naukowej rozprawy**

Autor pracy podejmuje bardzo ważny i jednocześnie trudny do jednoznacznego rozwiązania problem naukowy. Wartość naukowa rozprawy jest wysoka i przejawia się w kilku aspektach:

**Nowość naukowa:** Autor opracował oryginalny zmodyfikowany algorytm sterowania pozycyjno-siłowego, który łączy zalety różnych strategii sterowania w ramach jednego spójnego podejścia. Wprowadzenie mechanizmu uwzględniającego niepewności więzów geometrycznych stanowi istotny postęp w dziedzinie sterowania robotów.

**Znaczenie teoretyczne:** Praca wnosi wkład do teorii sterowania robotów poprzez rozszerzenie klasycznego podejścia hybrydowego o mechanizmy adaptacji do zmiennych warunków środowiska. Przedstawiona analiza stabilności i właściwości strukturalnych modelu matematycznego ma charakter fundamentalny.

**Wartość praktyczna:** Opracowane rozwiązanie ma bezpośrednie zastosowanie w przemyśle, szczególnie w procesach zrobotyzowanej obróbki mechanicznej. Przeprowadzone testy eksperymentalne w procesie frezowania potwierdzają praktyczną użyteczność metody.

**Metodologia badawcza:** Autor zastosował kompleksowe podejście badawcze, łączące modelowanie teoretyczne, symulacje komputerowe i weryfikację eksperymentalną. Szczególnie cenne jest opracowanie platformy informatycznej integrującej kontroler robota

z systemem pomiarowym siły oraz środowiskiem MATLAB/Simulink. Zbudowane stanowisko badawcze z robotem ABB IRB 2400 stanowi wartościową platformę do dalszych badań. Rozwiązanie to może być wykorzystane przez innych badaczy w podobnych aplikacjach.

Tak zaproponowane podejście pozwoliło na zebranie wystarczającej liczby danych pomiarowych niezbędnych do potwierdzenia przyjętych założeń i udowodnienia postawionej tezy naukowej. Małym niedociągnięciem pracy jest brak wnikliwej dyskusji uzyskanych wyników, aczkolwiek Autor prezentuje bogaty materiał eksperymentalny w sposób ilościowy i jakościowy pozwalający na udowodnienie swoich osiągnięć i stanowi podstawę do konstruktywnej interpretacji. Szczególnie wartościowe są zaprezentowane uogólnienia wyników tych badań.

Uwzględniając całokształt pracy, zaprezentowane w rozprawie badania naukowe i przeprowadzone rozważania naukowe uznaję za właściwe i przede wszystkim zasadne merytorycznie, a także praktycznie. Cel użyteczny pracy objawia się autorskim innowacyjnym „narzędziem” gotowym do praktycznego wykorzystania w warunkach przemysłowych. Cel poznawczy rozprawy koncentruje się na wykazaniu szerokich i licznych możliwości wykorzystania.

Takie podejście Autora – dające jednocześnie efekty naukowe jak i poznawcze, a jednocześnie zastosowanie praktyczne, uznaję za bardzo cenne i użyteczne.

Za niezwykle wartościowe uznaję wykonane badania i eksperymenty w szczególności przeprowadzenia walidacji na podstawie badań porównawczych jak również ich graficzne opracowanie i perfekcyjną edycję całościową pracy.

Praca jako całość nie budzi zastrzeżeń, nie mniej jednak nasuwają się bardzo nieliczne pytania oraz drobne uwagi. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć:

- Jak zaprezentowana metoda może zostać przetransponowana na inne rodzaje i rozwiązania konstrukcyjne robotów przemysłowych?
- Czy da się zastosować zaproponowane podejście (metodologię) do oceny możliwości innych maszyn o cechach manipulacyjnych niż rozważane w niniejszej rozprawie?
- Podczas pomiarów fizycznych kluczowym zagadnieniem jest określenie i ustalenie temperatury pomiaru. W jaki sposób autor pracy to osiągnął i jakie były warunki pomiaru?
- Czy autor przeprowadził badanie odtwarzalności? Powtarzalność pomiarów ocenia jedynie stopień, w jakim powtarzające się pomiary tego samego obiektu dokonywane przez tego samego operatora (ten sam przyrząd pomiarowy) dają te same wyniki. Odtwarzalność zaś dotyczy stopnia, w jakim różni użytkownicy mierzący ten sam obiekt tym samym przyrządem otrzymują identyczne wyniki.

Uwagi merytoryczne:

- Strona 28, rozdział 3.2: Brakuje jasnego sformułowania tezy naukowej - cel pracy jest opisany, ale teza główna nie została *explicite* przedstawiona.
- Strona 65, tabela 5.1: Brak informacji o niepewności pomiarowej parametrów fizycznych modelu, co może wpływać na dokładność symulacji.
- Rozdział 7: W symulacjach brak analizy wrażliwości na zmiany parametrów sterowania, co mogłoby wzbogacić analizę właściwości układu.
- Strona 104: Opis platformy badawczej - brak specyfikacji dokładności pomiarowej czujników, co jest istotne dla oceny wiarygodności wyników.
- Rozdział 8: Ograniczona dyskusja porównawcza z innymi metodami sterowania dostępnymi w literaturze - autor skupia się głównie na porównaniu z komercyjnymi rozwiązaniami ABB.
- Podsumowanie i odniesienie do hipotezy badawczej są bardzo skąpe. Zastosowania użyteczne są również mało uwypuklone.

Konkludując, Autor wykonał bogaty eksperyment naukowy. Wykazał się umiejętnością planowania doświadczeń oraz syntetyzowania wiedzy. Analizując całokształt pracy, należy wskazać na wiele pozytywnych cech aplikacyjnych wykonanych badań. Zaprezentowana dyskusja wyników (choć nieco skromna) oraz podsumowanie świadczą o dużej dojrzałości naukowej Autora rozprawy.

## **Ocena językowa i redakcyjna rozprawy**

Ocena redakcyjna rozprawy obejmuje: strukturę pracy, poprawność językową, stosowanie odpowiednich skrótów, odnośników i cytowań, zamieszczania rysunków, wzorów i tabel wraz z ich właściwym opisem, podpisami i wyjaśnieniami, opracowanie bibliografii, normatywnych aktów prawnych i streszczeń w j. polskim i j. angielskim. Struktura pracy jest logiczna i przemyślana, co ułatwia śledzenie toku rozumowania. Język pracy jest poprawny, fachowy i precyzyjny. Autor posługuje się właściwą terminologią techniczną, zachowując jednocześnie klarowność przekazu.

Jakość edytorska rozprawy jest na wysokim poziomie. Ilustracje są czytelne i dobrze dopasowane do treści. Szczególnie wartościowe są schematy układów sterowania oraz wykresy wyników badań eksperymentalnych. Tabele są przejrzyste i zawierają wszystkie niezbędne informacje. Analiza rozprawy pod kątem redakcyjnym nie budzi większych zastrzeżeń, nie mniej jednak Autor nie ustrzegł się drobnych niedociągnięć i niedoskonałości. Do najważniejszych z nich należą:

1. Rozdział 3.1 i wiele innych: Niekonsekwentne stosowanie terminologii - zamiennie używane "sterowanie siłą" i "kontrola siły".
2. Rysunki np. 4.2: Zbyt małe, nieproporcjonalne i nieco mało czytelne, utrudniające analizę prezentowanych danych.
3. W pracy zaobserwowano wiele zbędnych spacji.
4. Literatura anglojęzyczna w spisie zawiera wtrącenia w j. polskim, określające volumin , page, month np.: t. 253, s. 631– 644; wrz. 2013, s. 1–8, lub ich dwujęzyczne kompilacje np. poz. literatury 114: Sensors 2021, Vol. 21, Page 7463, t. 21, nr 22, s. 7463, lis. 2021.
5. Warto byłoby się zastanowić czy tabele wklejone na rysunkach np. rys. 2.2-2.5 nie powinny być ponumerowane i autonomiczne – wyłączone z rysunków.
6. Bibliografia: brak najnowszych publikacji z lat 2023-2024.

### **Główne osiągnięcia pracy:**

1. Rozwinięcie i wdrożenie w pracy oryginalnego algorytmu sterowania łączącego sterowanie pozycją i siłą.
2. Uwzględnienie niepewności więzów geometrycznych w syntezie układu sterowania.
3. Kompleksowa weryfikacja teoretyczna i eksperymentalna.
4. Praktyczne zastosowanie w procesie frezowania robotycznego.

### **Znaczenie dla dyscypliny:**

Praca wnosi istotny wkład do rozwoju teorii i praktyki sterowania robotów przemysłowych. Przedstawione rozwiązania mogą znaleźć szerokie zastosowanie w przemyśle, szczególnie w procesach wymagających precyzyjnej interakcji z otoczeniem.

### **Przygotowanie do samodzielnej pracy naukowej:**

Autor wykazał się umiejętnością prowadzenia samodzielnych badań naukowych, od identyfikacji problemu, przez modelowanie teoretyczne, aż po weryfikację eksperymentalną. Poziom merytoryczny pracy świadczy o dojrzałości naukowej kandydata. Mimo wskazanych powyżej uwag, nie obniżają wartości naukowej pracy, a mają one jenie charakter konstruktywny.

## **Podsumowanie i wniosek końcowy**

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi wartościowe i oryginalne osiągnięcie naukowe w dziedzinie Inżynierii Mechanicznej, szczególnie w obszarze sterowania robotów przemysłowych. Autor wykazał się wysokimi kompetencjami teoretycznymi i praktycznymi, opracowując innowacyjne rozwiązanie problemu sterowania pozycyjno-siłowego w warunkach niepewności więzów. Autor osiągnął postawione cele i pozyskał wystarczający materiał badawczy pozwalający na wykazanie osiągnięcia postawionych celów pracy. Należy stwierdzić, że autor jest przygotowany do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Wydatnie poszerzył swoją wiedzę w obszarze badań naukowych z zakresu dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Podsumowując moją ocenę stwierdzam, że:

- rozprawa spełnia wymóg oryginalnego rozwiązania zagadnienia naukowego, wykonanego przez Autora,
- dokumentuje wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna,
- praca ma istotny wkład w rozwój i podniesienie ogólnego poziomu wiedzy w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna,
- Autor wykazał się umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, planowania eksperymentu i wyciągania poprawnych wniosków.

Uwzględniając przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską i jej naukowy wkład w dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna stwierdzam, że zaprezentowana przez mgr inż. Pawła Obalę praca pt.: „Sterowanie pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym w warunkach niepewności więzów” to oryginalne i wartościowe pod względem naukowym, ale także praktycznym, osiągnięcie naukowe oraz rozwiązanie problemu określonego w tytule, celu i zakresie pracy a jednocześnie oryginalne rozwiązanie w zakresie implementacji wyników własnych badań naukowych noszących znamiona praktycznego przemysłowego zastosowania.

Rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2023r. poz. 742 z późn. zm.) Uwzględniając wysoką wartość naukową i praktyczną przedstawionej rozprawy, jej oryginalność oraz staranne opracowanie, wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, o jej przyjęcie oraz dopuszczenie Autora do publicznej obrony rozprawy.

Jednocześnie, zważywszy na unikatowość zaprezentowanych badań, ich wysoki poziom merytoryczny i znaczenie oraz wyjątkowo staranne opracowanie, formułuję wniosek o jej wyróżnienie.

Politechnika Lubelska  
WYDZIAŁ MECHANICZNY  
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji  
  
dr hab. inż. Jerzy Jóźwik  
profesor uczelni

Lublin, dnia 30 czerwca 2025 r.

Dr hab. inż. Jerzy JÓŻWIK, prof. uczelni