

**Dr hab. inż. Krzysztof Jacek Bałchanowski, prof. uczelni**  
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Układów Mechatronicznych  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Wrocławska  
ul. Łukasiewicza 7/9  
50-370 Wrocław

## **R E C E N Z J A**

**pracy doktorskiej**

**mgr inż. Pawła Obala**

**pt.: "Sterowanie pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym  
w warunkach niepewności więzów"**

**Promotor: dr hab. inż. Piotr Gierlak, prof. uczelni**

**Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Dariusz Szybicki, prof. uczelni**

### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Obala było pismo Przewodniczącego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej prof. Andrzeja Burghardta nr RM-530-01-01/2025 w związku z wyznaczeniem mnie na recenzenta uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

### **2. Przedmiot recenzji i ogólna charakterystyka pracy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt.: "Sterowanie pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym w warunkach niepewności więzów" zawiera 10 rozdziałów, wykaz bibliografii, spis ilustracji, spis tabel, listę symboli oraz 3 dodatki na łącznie 196 stronach.

Współczesna cywilizacja naukowo-techniczna charakteryzuje się dynamicznym rozwojem technologii oraz powszechną automatyzacją i robotyzacją niemal każdej dziedziny życia. W przemyśle następuje integracja maszyn w inteligentne systemy produkcyjne (Przemysł 4.0), które dzięki sztucznej inteligencji mogą podejmować autonomiczne decyzje. Postęp w robotyce jest możliwy dzięki rozwojowi technologii pomiarowych, napędowych oraz informatycznych, które zwiększają możliwości i miniaturyzują urządzenia sterujące.

W dysertacji Doktorant poruszył problemy robotyzacji procesu obróbki mechanicznej z wykorzystaniem manipulatorów zamiast tradycyjnych obrabiarek CNC. Choć roboty ustępują

maszynom CNC pod względem precyzji, sztywności i szybkości, wyróżniają się większą elastycznością, wszechstronnością oraz niższymi kosztami eksploatacji. Roboty są coraz częściej stosowane do zadań takich jak szlifowanie, gratowanie, polerowanie czy frezowanie detali niewymagających dużej precyzji.

Doktorant wskazał, że dysertacja skupia się na zagadnieniach sterowania robotem w przypadku automatyzacji procesów obróbki mechanicznej detali odlewanych, których geometria zależy od wyniku procesu krzepnięcia. W niniejszej pracy przeanalizowano kwestie związane z syntezą układu sterowania dla manipulatora przemysłowego współpracującego z otoczeniem, co wymagało opracowania matematycznego opisu jego kinematyki, dynamiki oraz modelu interakcji. Autor wskazując na wady dostępnych komercyjnych systemów sterowania zaproponował własne rozwiązanie, które eliminują te niedoskonałości. Szczególną uwagę poświęcił problematyce kontroli siły podczas styku manipulatora z obrabianym elementem.

We wstępie do rozprawy Autor dokonał przeglądu literatury i stanu wiedzy o modelowaniu i sterowania robotów w interakcji ze środowiskiem. W przeglądzie stosowanych metod sterowania interakcją Doktorant wyróżnił metody pasywne i metody aktywne. Pasywne metody opierają się na wykorzystaniu podatności mechanicznej konstrukcji robota lub elementów środowiska. Zaletą metod pasywnych są niskie koszty oraz szybka reakcja na zmiany sił, jednak ich głównymi wadami są mała elastyczność i brak sprzężenia zwrotnego, co ogranicza kontrolę nad interakcją i siłami styku.

Metody aktywnego sterowania interakcją pozwalają przezwyciężyć ograniczenia podejścia pasywnego, opierając się na pomiarze sił i momentów oraz znajomości geometrii otoczenia. Siły interakcji mogą być mierzone bezpośrednio za pomocą czujników lub pośrednio na podstawie parametrów pracy napędów, takich jak prąd silnika czy ciśnienie w siłowniku. W układach sterowania siłą najczęściej stosuje się czujniki sił montowane na końcu końcówki manipulatora, między flanszą efektora końcowego a narzędziem.

Kolejnego przeglądu stanu wiedzy dokonał Autor analizując sposoby modelowania interakcji robota ze środowiskiem wskazując, że rozpatrywane są modele mogące uwzględniać sztywne lub podatne otoczenie, tłumienie i bezwładność otoczenia. Doktorant wskazał, że więzy, pozycyjne i siłowe wynikające z interakcji narzędzia ze środowiskiem są nazywane więzami naturalnymi, zaś więzy narzucone w celu wymuszenia określonego zachowania manipulatora to więzy sztuczne. Zadania jakie ma realizować robot determinuje jakie więzy sztuczne lub naturalne występują w modelu interakcji robota ze środowiskiem.

Kolejny wyczerpujący przegląd literaturowy dotyczył sposobów modelowania robotów i projektowania układów sterowania. Podstawowe metody opisy kinematyki i dynamiki

zakładają sztywną budowę członów manipulatora. Bardziej zaawansowane uwzględniają podatność członów i par kinematycznych, opory ruchu, luzy oraz siłę interakcję z otoczeniem ze sprzężeniem zwrotnym.

Doktorant zakończył przegląd stanu wiedzy konstatacją, że pomimo wielu lat badań, zainteresowanie problematyką sterowania interakcją robota z otoczeniem nie spada i ciągle wprowadzane są nowe rozwiązania, algorytmy i strategie w tego typu sterowaniu.

Rozdział 3 zawiera opis naukowego zakresu pracy w postaci sformułowanych celów i zakresu rozprawy. W pierwszej części tego rozdziału zawarty jest opis motywacji podjęcia badań naukowych związanych z tematyką niniejszej rozprawy doktorskiej. W Politechnice Rzeszowskiej prowadzone były w latach 2010-2024 prace nad implementacją sterowania siłą w operacjach obróbki skrawaniem odlewanych elementów silnika lotniczego z wykorzystaniem robotów przemysłowych firmy ABB. Układy sterowania tych robotów oferują trzy gotowe postępowania do zastosowań wymagających sterowania interakcją z otoczeniem: strategia montażowa, strategia zmiany prędkości efektora końcowego pod wpływem sił oporu, strategia sterowania siłą nacisku. W trakcie prac nad zastosowaniem sterowania siłą w zrobotyzowanej obróbce odlewów Autor stwierdził, że dostępne strategie nie zapewniają wymaganej jakości ani wydajności procesu. Przyczynami tego są duże nieregularności kształtu odlewane go detalu, które mogą powodować podczas obróbki odsunięcie narzędzia od zakładanej ścieżki i utratę styku narzędzia z detalem. Algorytm sterowania w odpowiedzi może w wyniku zwiększania prędkości spowodować gwałtowne zderzenie narzędzia z odlewem i doprowadzić do uszkodzenia obrabianej powierzchni materiału. Zidentyfikowane ograniczenia komercyjnych systemów stały się impulsem do opracowania nowego układu sterowania siłą interakcji pozbawionego tych niedoskonałości. Powyższa konkluzja stanowiła główną motywację Doktoranta do uczynienia przedmiotem dysertacji zadania opracowania układu sterowania, który integruje zalety dwóch odmiennych strategii: sterowania ruchem po zadanej ścieżce oraz sterowania siłą – w ramach jednego spójnego algorytmu.

Przeprowadzone analizy stanu wiedzy pozwoliły Autorowi na sformułowanie podstawowego celu pracy, jakim *„było zatem 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 w bliskim otoczeniu ścieżki ruchu”*. W związku z tak postawionym celem pracy Doktorant przyjął następujące założenia dotyczące funkcjonalności układu sterowania:

- układ sterowania ma być oparty o algorytm hybrydowego sterowania pozycja-siła,

- układ sterowania ma zapewnić utrzymanie siły styku w interakcji z obrabianym detalem o ile nie wymaga to nadmiernego odejścia od zadanej ścieżki ruchu,
- sterownie siłą interakcji ma odbywać się w ograniczonym obszarze wyznaczonym względem nominalnej pozycji powierzchni styku,
- algorytm sterowania ma umożliwiać dobór wpływu składowych strategii sterowania, czyli wzmacnianie strategii realizującej zadaną ścieżkę ruchu lub wzmacnianie strategii realizującej zadaną siłę nacisku.

W rozdziale 4 Doktorant opisał i przedstawił budowę zaproponowanego stanowiska badawczego do zrobotyzowanej obróbki mechanicznej, które będzie bazą do implementacji opracowanych metod i algorytmów sterowania. Podstawę stanowiska stanowi sześciooosiowy robot ABB IRB 2400-16 i współpracujący z nim pozycjoner ABB IRBP A-250. Końcówka robota ma zamontowany sześciooosiowy czujnik sił i momentów 3HAC048735-001 do którego przyłączone jest wrzeciono PDS XLC70 z automatyczną zmieniarą narzędzi. Robot jest wyposażony w fabryczny system sterowania siłą, który wykorzystuje sygnały z tego czujnika sił i momentów.

Sterowanie robotem odbywa się z wykorzystaniem kontrolera robota IRC5, który wykonuje kod programu zapisany w jego pamięci. Oprócz tego kontroler posiada dodatkową opcję programową o nazwie External Guided Motion (EGM), która stanowi interfejs umożliwiający sterowanie ruchem robota przez zewnętrzny układ sterowania. Zbudowane zrobotyzowane stanowisko do obróbki mechanicznej oraz przygotowana platforma informatyczna posłużyło Doktorantowi do przeprowadzenia syntezy układu sterowania oraz badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

W rozdziale 5 Autor zawarł kompletny matematyczny model robota ABB 2400. W pierwszej części rozdziału została opisana kinematyka robota przy wykorzystaniu zmodyfikowanej notacji Denavita-Hartenberga. Autor po wyprowadzeniu odpowiednich macierzy transformacji sformułował ogólne równanie kinematyki opisując położenie efektora (narzędzia) względem układu bazowego w funkcji kątów obrotu osi robota. Do zbudowania dynamicznego modelu manipulatora niezbędna jest znajomość prędkości oraz przyspieszeń poszczególnych członów, stąd w kolejnym etapie zostały wyprowadzone równania opisujące prędkości liniowe i kątowe poszczególnych członów i narzędzia względem układu bazowego. Równania prędkości zostały przedstawione w formie ogólnej macierzy jacobianowej oraz w postaci równań z wyróżnionymi jacobianami dla prędkości liniowej i kątowej.

Kolejne podrozdziały dotyczyły budowy modelu dynamicznego wyprowadzonego korzystając z formalizmu Eulera-Lagrange'a. Wyznaczając energie kinetyczną i potencjalną

członów robota potrzebne do wyznaczenia funkcji Lagrange'a oraz wektor siły uogólnionej  $\Omega$ . Autor wyprowadził ogólne równania dynamiki w klasycznej formie. W wektorze sił uogólnionych uwzględniono wektor momentów napędowych manipulatora oraz wektor momentów oporów ruchu poszczególnych członów.

Doktorant uznał, że należy dokonać weryfikacji poprawności uzyskanych dynamicznych równań ruchu manipulatora ABB IRB 2400 i w tym celu przeprowadził analizę dynamiki tego samego robota przy użyciu formalizmu Eulera Newtona. W tym formalizmie analizuje się ruch obrotowy i liniowy każdego członu manipulatora osobno, uwzględniając oddziaływania w postaci sił i momentów pochodzących od pozostałych członów.

Rozdział 5 zamyka zbiorczy spis parametrów fizycznych badanego układu. Parametry masowe i geometryczne Autor określił na podstawie dokumentacji technicznej i modeli CAD poszczególnych elementów stanowiska badawczego. Współczynniki tarcia niezbędne w modelu oporów ruchu manipulatora określił na drodze badań eksperymentalnych.

W rozdziale 6 zatytułowanym „Sterowanie pozycyjno-siłowe z uwzględnieniem niepewności więzów” Autor zawarł naukowe rozwiązanie problemów sformułowanych w podstawowym celu rozprawy. W niniejszym rozdziale przedstawiono opracowanie prawa sterowania pozycyjno-siłowego z uwzględnieniem niepewności związanych z geometrycznymi ograniczeniami powierzchni interakcji. Równanie opisujące dynamikę manipulatora w przestrzeni konfiguracyjnej przedstawiono w ogólnej postaci do którego wprowadzono dodatkowe wektory ograniczonych zakłóceń oraz wektor sił i momentów interakcji z otoczeniem wyrażony w przestrzeni zadaniowej. Siły i momenty wynikające z oddziaływania manipulatora na otoczenie są określane na podstawie pomiaru z czujnika siły.

Następnie opisano właściwości strukturalne powstałego modelu, sformułowano przyjęte założenia oraz przeprowadzono syntezę prawa sterowania. Podstawy algorytmu sterowania pozycyjno-siłowego z uwzględnieniem niepewności więzów do realizacji sterowania robotem manipulacyjnym IRB 2400 Doktorant zaczerpnął z pracy [116]. Zaproponowany algorytm sterowania bazuje na teorii sterowania odpornego. Celem układu sterowania jest realizacja trajektorii zadanej, czyli minimalizacja błędu nadążania. Autor zamknął rozdział 6 przedstawieniem dowodu stabilności opracowanego układu sterowania oparty na teorii stabilności Lapunowa.

W rozdziale 7 opisano przeprowadzone badania symulacyjne i przedstawiono wyniki symulacji. Badania miały na celu zilustrowanie zasady działania opisywanego algorytmu sterowania. W środowisku Matlab/SIMULINK odwzorowano stanowisko badawcze. Opracowany model został wykorzystany do przeprowadzenia badań symulacyjnych systemu

sterowania siłą, z uwzględnieniem niepewności związanych z ograniczeniami stykowymi. W modelu zawarto wszystkie elementy układu sterowania pozycyjno-siłowego robotem ABB IRB2400 z uwzględnieniem niepewności więzów. W ramach zaproponowanego scenariusza testowego Doktorant założył, że manipulator rozpoczyna ruch by nawiązać styk z otoczeniem, po czym wykonuje ruch prostoliniowy narzędzia względem metalowej powierzchni utrzymując zadaną wartość siły styku. W celu analizy zachowania układu sterowania w sytuacji, gdy geometria interakcji nie jest w pełni znana lub jest obciążona niepewnością zostało wprowadzone zaburzenie w ciągłości powierzchni detalu w postaci uskoku.

Wyniki przeprowadzonych symulacji Autor zaprezentował na licznych wykresach przedstawiając m.in. sygnały sterowania w przestrzeni zadaniowej oraz sygnały błędów sterowania (błędy przemieszczeń i prędkości na kierunkach stycznych, błędy siły normalnej, odchylenie punktu charakterystycznego narzędzia od założonych więzów powierzchni interakcji). Widoczne zaburzenia sygnałów w postaci gwałtownych zmian wartości występują w momentach zmian prędkości robota oraz w chwilach wystąpienia zaburzeń powierzchni detalu. Największe wartości sygnały błędów osiągają w momentach zmian prędkości ruchu oraz zmian siły nacisku narzędzia na powierzchnię interakcji.

Przeprowadzono przez Doktoranta badania symulacyjne, w trakcie których oceniono zachowanie robota podczas interakcji ze środowiskiem pozwoliły potwierdzić skuteczność zaprojektowanego systemu sterowania.

Rozdział 8 koncentruje się na opisie przeprowadzanych badań eksperymentalnych. Do badań Doktorant wykorzystał stanowisko badawcze opisane w rozdz. 4. Własny algorytm sterowania pozycyjno-siłowego robotem ABB IRB2400 z uwzględnieniem niepewności więzów został zaimplementowany w środowisku Matlab/SIMULINK. Komunikacja ze sterownikiem robota jest realizowana przez moduł *External Guided Motion*, który stanowi interfejs umożliwiający sterowanie ruchem robota przez zewnętrzny układ sterowania.

Doktorant przeprowadził 3 eksperymenty badawcze: sterowanie pozycyjno-siłowe z uwzględnieniem niepewności więzów, klasyczne sterowanie pozycyjno-siłowe, implementacja algorytmu sterowania w zrobotyzowanym frezowaniu. Plan eksperymentów był analogiczny do opisanych badań symulacyjnych. W powierzchni roboczej detalu zawarto zaburzenie w postaci uskoku o stałej głębokości.

W pierwszym teście do stanowiska badawczego dodano urządzenie umożliwiające regulację podatności otoczenia. Poprzez regulację ciśnienia zasilającego siłowniki urządzenia możliwe jest dostosowanie sztywności całego układu. Podobnie jak w badaniach symulacyjnych, za sterowanie w kierunku normalnym podczas realizacji całej zadanej trajektorii odpowiadał układ

wykorzystujący opracowaną strategię sterowania. Dotyczyło to zarówno odcinka, na którym dochodziło do interakcji z otoczeniem, jak i fazy podejścia do powierzchni oraz jej opuszczania.

W drugim teście w celu porównania działania opracowanego algorytmu sterowania z klasycznym podejściem pozycyjno-siłowym przeprowadzono test z wykorzystaniem wbudowanego w kontroler robota ABB systemu sterowania siłą (strategia regulacji siły nacisku). Eksperyment przeprowadzono na tym samym stanowisku, co w poprzednim teście, programując ścieżkę ruchu pomiędzy punktami o identycznych współrzędnych i o takim samym zaburzeniu w postaci uskoku.

Oba eksperymenty zostały zilustrowane licznymi przebiegami sygnałów zadanych i zrealizowanych. W szczególności interesujące są przebiegi sygnałów będących efektem realizowanego sterowania w miejscach deformacji powierzchni. Zaburzenie na powierzchni detalu powoduje przemieszczenie narzędzia. W przypadku opisywanego układu sterowania pozycyjno-siłowego, uwzględniającego niepewności więzów geometrycznych, takie zachowanie jest korygowane przez wirtualną siłę, wyliczaną na podstawie odchylenia narzędzia od założonych więzów geometrycznych.

W przypadku zastosowania fabrycznego systemu sterowania, narzędzie wchodzi w interakcję z otoczeniem w miejscu rozsunęcia płaskowników, osiągając zadaną siłę styku i utrzymując ją na całej szerokości tego obszaru. Po dotarciu do krawędzi drugiego płaskownika dochodzi jednak do zderzenia, które – przy większych deformacjach – może prowadzić do uszkodzenia narzędzia. Natomiast układ sterowania pozycyjno-siłowego, uwzględniający niepewności związane z więzami, pozwala ograniczyć odchylenie narzędzia w styku z obrabianą powierzchnią detalu do założonego zakresu, dzięki odpowiedniemu doborowi współczynnika kooperacji.

W trzecim teście, który Doktorant zrealizował, było badanie zastosowania sterowania pozycyjno-siłowego z uwzględnieniem niepewności więzów do operacji frezowania. W tym celu przygotowano prostopadłościenny detal w formie aluminiowego płaskownika, w którym wykonano defekt powierzchni interakcji w formie uskoku. Eksperyment polegał na przeprowadzeniu operacji frezowania płaskownika. Zadaniem robota jest utrzymanie styku z detalem podczas obróbki, przy stałej sile, z jednoczesnym unikaniem zagłębiania się narzędzia w materiał w miejscu defektu.

Przedstawione przez Autora wyniki testu frezowania potwierdziły, że układ sterowania pozycyjno-siłowego, uwzględniający niepewności więzów, może być skutecznie wykorzystany w procesach obróbczych. System ten umożliwia kompensację niepewności dotyczących

rzeczywistych więzów geometrycznych, kontrolując siłę interakcji robota z detalem, przy jednoczesnym zachowaniu precyzyjnego sterowania ruchem robota.

W rozdziale 9 Doktorant zawarł wnioski i podsumowanie, będące wyszczególnieniem dokonań i osiągnięć uzyskanych w czasie realizacji pracy, zestawiając je zgodnie z przyjętym na początku planem. Odnosząc się do wniosków, które Autor zawarł w tym rozdziale, można stwierdzić, że Autor zrealizował postawione cele pracy.

W rozdziale 10 Doktorant przedstawił możliwości kontynuacji badań w szczególności wskazując, że w pierwszej kolejności należy wykonać pracę nad przeniesieniem modelu rozwiązania sterowania pozycyjno-siłowego z informatycznego środowiska badawczego jakim jest pakiet Matlab/SIMULINK na platformę sprzętową kontrolera robota, aby umożliwić użytkowanie go w warunkach normalnej produkcji.

### **3. Ocena podsumowująca recenzowaną pracę doktorską**

Problemy naukowe podjęte w pracy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Obala dotyczące sterowania pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym w warunkach niepewności więzów mechanicznych są aktualne badawczo. Stosowane obecnie metody sterowania i zaimplementowane komercyjne przemysłowe modele sterowania robotami nie w pełni zaspokajają wszystkie potrzeby technologiczne, wymagają zmian, poprawy i uzupełnienia. Przegląd stanu wiedzy dokonany przez Autora w rozdziałach 1, 2 i 3 oraz wynikający z doświadczenia recenzenta wskazuje na ważkość podjętej tematyki naukowej.

Zagadnienia związane z sterowaniem siłą w operacjach obróbki skrawaniem są powszechne w codziennej praktyce badawczej i inżynierskiej, a metody stosowane do ich rozwiązania nie są do końca skuteczne. Standardowe strategie sterowania interakcją z otoczeniem zaimplementowane w układach sterowania robotów przemysłowych (np. ABB) nie są wystarczające, aby zapewnić wymaganą jakość i wydajność obróbki mechanicznej. Problemy mogą pojawić się w przypadku obróbki detalu o nieregularnym kształcie powierzchni, np. podczas operacji usuwania wypływek w odlewanych elementach. Duże wypływki mogą spowodować odsunięcie narzędzia od zakładanej ścieżki obróbki i w połączeniu z nieregularnym kształtem doprowadzić do utraty styku narzędzia z powierzchnią części. Skutkować to może przerwaniem operacji albo doprowadzeniem do gwałtownego zderzenia narzędzia z detalem, a w konsekwencji do uszkodzenia narzędzia lub ramienia manipulatora.

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie układu sterowania, który łączy zalety dwóch odmiennych strategii: sterowania ruchem wzdłuż zadanej trajektorii oraz sterowania siłą. Zadanie polegało na opracowaniu i przetestowaniu algorytmu umożliwiającego jednoczesne

prowadzenie narzędzia robota przemysłowego po zaplanowanej ścieżce z minimalnym odchyleniem oraz kontrolowanie siły nacisku narzędzia na powierzchnię styku w bezpośrednim otoczeniu tej ścieżki.

Pierwsze osiągnięcia naukowe Autora zrealizowane na drodze do realizacji celu dysertacji dotyczyło opisu kinematyki i dynamiki robota ABB IRB 2400. Opracowane teoretyczne modele kinematyki bazowały na zmodyfikowanej notacji Denavita-Hartenberga. Równania prędkości zostały przedstawione w formie ogólnej macierzy jacobianowej oraz w postaci równań z wyróżnionymi jacobianami dla prędkości liniowej i kątowej. Celem analizy dynamicznej było wyznaczenie równań ruchu robota, które wykorzystano do budowy i zaprojektowania układu sterowania robotem. Modele dynamiki zostały wyprowadzone przez Doktoranta przy użyciu dwóch podejść: formalizmu Eulera-Lagrange'a i Newtona-Eulera. W wyniku przeprowadzonych postępowań w obu modelach otrzymano takie same postacie macierzy dynamicznych równań ruchu. Pozwoliło to Autorowi postawić konkluzję o poprawności uzyskanych równań ruchu manipulatora. Warty wskazania przy ocenie tego osiągnięcia jest docenienie opracowania dodatkowego postępowania do uzyskania wartości parametrów fizycznych modelu robota, które było wykorzystane do określenia m.in. współczynników tarcia w modelu oporu ruchu. Uzyskany model dynamiki był niezbędny do syntezy układu sterowania pozycyjno-siłowego z uwzględnieniem niepewności więzów i utworzenia cyfrowego bliźniaka stanowiska badawczego.

Podstawowym osiągnięciem naukowym Doktoranta było dokonanie syntezy układu sterowania w oparciu o algorytm sterowania pozycyjno-siłowego z uwzględnieniem niepewności więzów geometrycznych. Algorytm wprowadza do układu sterowania siłą dodatkowy człon jako wirtualną siłę reakcji na zmiany kształtu nominalnej powierzchni styku. Model sterowania oparty jest na wyprowadzonym matematycznym modelu dynamiki robota transformowanym do opisu przestrzeni zadaniowej. Nowy autorski algorytm sterowania, oparty na hybrydowym podejściu pozycja-siła, umożliwia utrzymanie wymaganej siły styku podczas wzajemnego oddziaływania narzędzia z obrabianym przedmiotem, o ile nie wiąże się to z istotnym odejściem od zadanej trajektorii ruchu. Dodatkowo, układ sterowania reguluje siłę oddziaływania w ograniczonym obszarze określonym względem nominalnej pozycji powierzchni styku, umożliwiając jednocześnie analizę wpływu poszczególnych składowych strategii sterowania.

Kolejnym osiągnięciem naukowym Autora było opracowanie realistycznego modelu symulacyjnego interakcji robota z otoczeniem, który umożliwiał konfigurowanie ukształtowania środowiska oraz precyzyjne definiowanie położenia punktu

charakterystycznego narzędzia i przeprowadzenie badań symulacyjnych. Opracowany model został wykorzystany do przeprowadzenia symulacji systemu sterowania siłą, uwzględniających niepewności wynikające z ograniczeń stykowych. W modelu uwzględniono wszystkie elementy układu sterowania pozycyjno-siłowego robota ABB IRB2400, wraz z wpływem niepewności związanych z więzami stykowymi.

Pracę doktorską zwieńczyło zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentalnych badań weryfikacyjnych systemu sterowania robotem. Przeprowadzono podstawowe trzy eksperymenty obejmujące: badanie w bezpiecznych warunkach działanie zaprojektowanego układu sterowania, test działania wbudowanego w kontrolerze robota układu sterowania siłą, który reprezentuje klasyczny algorytm hybrydowego sterowania pozycyjno-siłowego oraz test opracowanego układu sterowania pozycyjno-siłowego do operacji zrobotyzowanego frezowania. Przeprowadzone przez Doktoranta badania symulacyjne i eksperymenty w pełni potwierdziły poprawność działania opracowanego układu sterowania. Narzędzie utrzymywało styk z otoczeniem zadaną siłą, jeżeli rzeczywiste i zakładane więzy geometryczne pokrywały się ze sobą.

Warto podkreślić duże znaczenie użyteczne opracowanych przez autora metod. Możliwość przeniesienia opracowanego sterowania pozycyjno-siłowego z informatycznego środowiska badawczego jakim jest pakiet Matlab/SIMULINK na platformę sprzętową kontrolera przemysłowego robota, w znaczący sposób może rozszerzyć funkcjonalność standardowych układów sterowania komercyjnych robotów przemysłowych o nowe strategie i przyczynić się do poprawy jakości ich funkcjonowania.

Przechodząc do ogólnej oceny pracy stwierdzam, że praca Pana mgr inż. Pawła Obala stanowi oryginalne podejście do rozwiązania problemu naukowego, którym było badanie sterowania pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym w warunkach niepewności więzów. Rozprawa doktorska, przeprowadzone badania i uzyskane wyniki teoretyczne, symulacyjne i eksperymentalne są na wysokim naukowym poziomie.

Cel postawiony w pracy: „*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 w bliskim otoczeniu ścieżki ruchu*” został osiągnięty. Przedstawione w rozdziałach 4 - 8 rozważania dokumentują teoretycznie i na przykładach liczbowych możliwości opracowanych metod.

Na podstawie przedstawionych w dysertacji opisów przeprowadzonych badań oraz rezultatów eksperymentów badawczych i symulacyjnych można stwierdzić, że zaproponowane rozwiązania stanowią istotny wkład w rozwój metod sterowania robotami przemysłowymi w

warunkach wzajemnego oddziaływania robota z otoczeniem. Zaproponowane podejście może być z powodzeniem zastosowane w procesach produkcyjnych, w szczególności w obróbce mechanicznej, gdzie istotne jest precyzyjne śledzenie zadanej trajektorii ruchu przy jednoczesnej kompensacji niepewności kształtu obrabianego elementu.

Do pozytywnych efektów i wyników pracy zaliczyć należy również znaczący dorobek publikacyjny Doktoranta w postaci 9 artykułów, 1 referat konferencyjnych (źródło Google Scholar).

#### **4. Uwagi szczegółowe i ocena treści**

1. Doktorant w rozdz. 5 opracował matematyczne modele kinematyki i dynamiki analizowanego robota wykorzystując notacje Denavita-Hartenberga (kinematyka) i formalizmy Eulera-Lagrange'a i Newtona-Eulera (dynamika) oraz jednocześnie wskazał, że jest to oryginalne osiągnięcie Autora. Ponieważ podobne modele kinematyki i dynamiki oparte na powyższych formalizmach są opisane w literaturze, czy Autor za osiągnięcie uznaje opracowany model wybranego robota, czy sposób wyprowadzenia równań?
2. Model dynamiki został wyprowadzony przy użyciu dwóch metod. W obu przypadkach otrzymując takie same postacie macierzy dynamicznych równań ruchu. Posłużyło to Doktorantowi do postawienia konkluzji, że model dynamiki został sformułowany poprawnie. Doceniając kunszt analityczny Autora, wydaje się, że budowa drugiego modelu opartego o odmienny formalizm tylko do wyciągnięcia wniosku o poprawności równań nie była niezbędna w pracy.
3. W modelu dynamiki w wektorze sił uogólnionych na etapie wyprowadzania równań są uwzględnione wektor momentów napędowych generowanych przez napędy manipulatora oraz wektor momentów oporów ruchu poszczególnych członów, a nie są uwzględnione siły i momenty od narzędzia oraz interakcji z detalem. Dlaczego Doktorant nie zdecydował się włączyć sił interakcji do modelu dynamiki na tym etapie budowy modelu?
4. Niewątpliwie podstawowym autorskim osiągnięciem naukowym Doktoranta było opracowanie układu sterowania robotem przemysłowym, który zagwarantuje ruch narzędzia wzdłuż zaplanowanej ścieżki z niewielką odchyłką i umożliwi sterowanie siłą nacisku narzędzia na powierzchnię styku w bliskim otoczeniu ścieżki ruchu. W opisie naukowym osiągnięcia Doktorant wskazuje źródła literaturowe w których zawarte były

odniesienia do znanych już metod. Zabrakło w dysertacji wyraźnego wskazania co jest autorskim rozwiązaniem Doktoranta, a które części stanowią rozwinięcie znanych rozwiązań.

5. W wynikach badań symulacyjnych i eksperymentalnych Autor zilustrował skuteczne działania zaproponowanego układu sterowania. Wskazał, że istotę zastosowanego algorytmu sterowania najlepiej oddają przebiegi realizacji zadanej siły i realizacji zadanej pozycji efektora w funkcji wpływu współczynnika kooperacji  $w_k$ . Wraz ze wzrostem wartości współczynnika wzmocnienia kooperacji maleje znaczenie utrzymania zadanej wartości siły, kosztem utrzymania zadanej ścieżki ruchu. Jak dobierany jest współczynnika kooperacji  $w_k$  dla konkretnego zadania sterowania? Czy jest wyliczany czy należy go przyjąć arbitralnie korzystając z wniosków przedstawionych w pracy przez Doktoranta? Czy nie należałoby opracować zaleceń dotyczących określania wartości współczynnika dla konkretnych strategii ruchu?
6. Struktura zaprojektowanego układu sterowania do realizacji zadania zawiera szereg parametrów projektowych (Tabela 7.3) stanowiących współczynniki wzmocnień sterowania oraz sterowania odpornego. Jaką metodą Doktorant dobrał wartości wskazanych parametrów? Czy przyjęcie innych wartości parametrów znaczący zmieni jakość wynikowego sterowania?
7. Badania symulacyjne i eksperymentalne miały opisywać taki sam proces ruchu robota. Dlaczego w modelach zaburzeń uskok w powierzchni detalu ma głębokość 5 mm (symulacja) i 1 mm (eksperyment)?
8. W badaniach eksperymentalnych stanowisko badawcze doposażono w urządzenie pozwalające regulować podatność otoczenia. Czy i jak regulowana sztywność podłoża miała wpływ na wyniki przeprowadzonych eksperymentów?
9. W wielu miejscach pracy Doktorant dokonując oceny wyników badań wykorzystuje opisy jakościowe typu: „przebiegi, mają podobny kształt i zbliżone wartość”, „zmiany momentu pod wpływem siły interakcji są mniej zauważalne”, „siła interakcji jest niewielka” zamiast dokonać oceny wartościowej i ilościowej.
10. Autor w dysertacji używa pojęć kontakt, zjawiska kontaktowe, siły kontaktowe. Wydaje się, że poprawnie powinno być styk, zjawiska stykowe, siły stykowe.
11. Praca jest dobrze napisana pod względem językowym, stylistycznym i gramatycznym. Znalaziono tylko nieliczne tzw. błędy literowe i stylistyczne. Pomyłki w tekście o znacznej objętości są oczywiście nieuniknione. Z recenzenckiego obowiązku

wspominam o dostrzeżonych pomyłkach, których – ze względu na ich nieistotność dla odbioru pracy – nie warto tu szczegółowo dyskutować.

## 5. Wniosek końcowy

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Pawła Obala, pt. **„Sterowanie pozycyjno-siłowe robotem przemysłowym w warunkach niepewności więzów”** jest oryginalna i spełnia wymagania, jakie stawia pracom doktorskim, obowiązująca Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Opiniowana rozprawa doktorska, przeprowadzone badania i uzyskane wyniki teoretyczne są na bardzo wysokim poziomie. Praca posiada oryginalne cechy nowości oraz znaczące walory użyteczne. Mając na uwadze aktualność i unikatowy charakter badań, ich wysoki poziom merytoryczny i duże znaczenie praktyczne oraz sposób ich prezentacji w postaci starannie opracowanej dysertacji wnioskuję o wyróżnienie.

Merytorycznie praca odpowiada jednocześnie standardom stawianym pracom doktorskim w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i na tej podstawie stawiam wniosek o dopuszczenie przedmiotowej pracy do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej.

*M. Bolchowski*

Wrocław, dn. 10.06.2025 r.