

dr hab. inż. Krzysztof Mendrok, prof. AGH  
Katedra Robotyki i Mechatroniki  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

Kraków, 06.03.2023

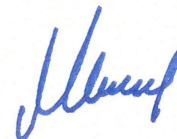
**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgra inż. Adama Ornata  
pt. „Synteza narzędzi dedykowanych  
implementowanych w zrobotyzowanych aplikacjach  
do obróbki części silników lotniczych”**

**1. Wstęp**

Podstawą do wykonania recenzji było zlecenie dra hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz., przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, zgodne z uchwałą tejże Rady Dyscypliny.

Recenzowana rozprawa doktorska powstała w Katedrze Mechaniki Stosowanej i Robotyki Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa PRz. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Andrzej Burghardt, prof. PRz, rolę promotora pomocniczego sprawuje dr inż. Dariusz Szybicki. Praca została zrealizowana w ramach programu „Doktoraty wdrożeniowe” prowadzonego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (obecnie Ministerstwo Edukacji i Nauki).

Głównym celem dysertacji było opracowanie metod robotyzacji obróbki wykańczającej (gratowanie i stępienie krawędzi) elementów silników lotniczych produkowanych w zakładach Pratt and Whitney Rzeszów (PWR). Dla osiągnięcia tak postawionego celu pracy, dokonał Doktorant syntezy dedykowanych narzędzi, poprzez dobór ich typu i geometrii. Opracowanie technologii procesów obróbczych, realizowanych z zastosowaniem wyżej wspomnianych narzędzi, stanowiło kolejne zadanie cząstkowe. W ramach niego zostały przygotowane procedury doboru parametrów procesu i wskazane zakresy wartości parametrów obróbki, dające najlepsze wyniki. Kolejnym zadaniem wykonanym w pracy była implementacja sterowania siłowego podczas zrobotyzowanej obróbki wykańczającej. Aby proponowana technologia mogła być zastosowana w praktyce, konieczne było także zaproponowanie metody precyzyjnego pomiaru obrabianych podzespołów. Do tego celu wybrał Autor rozwiązanie bazujące na zrobotyzowanym stanowisku z laserowym skanerem 3D. Potwierdzeniem poprawności uzyskanych wyników było ich wdrożenie w zakładach



PWR w procesie wytwarzania trzech podzespołów silników lotniczych: przekładni FDGS (z ang. Fun Drive Gear System) silnika turbowentylatorowego PW 1000G, przekładni ADT (z ang. Accessory Drive Train) tego samego silnika oraz dyfuzora silnika turbowentylatorowego V2500.

## 2. Zakres i treść rozprawy

Praca zawarta jest na 166 stronach (bez uwzględnienia stron tytułowych, spisu treści i streszczeń). Składa się z 9 rozdziałów. Dodatkowo Autor zamieścił w niej streszczenie w języku angielskim i polskim, spis bibliografii, który obejmuje 119 pozycji literaturowych oraz załącznik zawierający spis narzędzi do obróbki przekładni ADT.

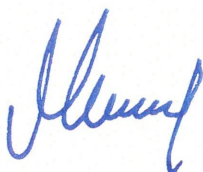
Pierwszy rozdział poświęcił Autor na przedstawienie informacji wprowadzających takich jak: historia zakładów lotniczych w Rzeszowie (obecnie Pratt and Whitney Rzeszów), bieżące portfolio firmy oraz trzy podzespoły, których obróbka jest robotyzowana w dysertacji. Rozdział zawiera szereg interesujących informacji, jednak w opinii recenzenta zyskałby na przejrzystości, gdyby podzielić go na trzy podrozdziały.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawia genezę problemu badawczego oraz wynikający z niej cel pracy. Ostatni podrozdział przedstawia krótkie opisy zawartości kolejnych części pracy.

Rozdział trzeci poświęcony jest podstawowym pojęciom z zakresu obróbki części silników lotniczych oraz przeglądowi literatury w tematyce robotyzacji wskazanych procesów technologicznych, zastosowania sprzężenia siłowego w sterowaniu robotami, a także bezkontaktowym układom pomiaru ruchu robota i sposobom rejestracji parametrów procesowych. Zaprezentowany przegląd jest obszerny, choć nie znalazł w nim recenzent kilku wartościowych pozycji, jak np. prac zespołu profesora Petko, gdzie stosowano manipulator równoległy do frezowania. Ponownie można było poprawić odbiór przedstawionych treści, dzieląc rozdział na kilka tematycznych podsekcji.

Czwarty rozdział, jeden z dwóch najważniejszych w pracy, w całości poświęcony jest syntezie narzędzi do wybranych procesów technologicznych obróbki części lotniczych. W podrozdziale 4.1, na przykładzie korpusu przekładni ADT, przedstawiono prace badawcze polegające na doborze parametrów procesu i rodzaju narzędzi pasywnych. Narzędzia z progresją siły docisku stanowią temat kolejnego podrozdziału. Tutaj, dla procesu fazowania krawędzi dyfuzora silnika V2500, wyznaczono parametry procesu z uwzględnieniem ich zaburzeń podczas rozpoczęcia obróbki. W ostatniej sekcji rozdziału czwartego zastosowano sterowanie siłowe w interakcji z narzędziami dostępnymi na rynku oraz narzędziami specjalnie projektowanymi.

W piątym rozdziale opisuje Doktorant aspekty konfigurowania oprogramowania dedykowanego do monitorowania pracy stacji zrobotyzowanych. Autor dokonuje syntetycznej oceny zalet i wad wykorzystanych programistycznych narzędzi inżynierskich. Rozdział ma raczej charakter przeglądowy.



Rozdział szósty prezentuje syntezę układów pomiarowych stosowanych w prowadzonych pracach testowych. Kryterium doboru zastosowanym przez Autora była tutaj szeroko rozumiana funkcjonalność systemów sensorycznych. Ważną częścią tej sekcji jest opracowanie autorskiego algorytmu określania centralnego punktu narzędzia (z ang. Tool Center Point, TCP), które nie ma materialnej reprezentacji, dla laserowego układu pomiarowego.

Metoda wyznaczania TCP skanera 2D zaimplementowanego na robocie wraz z testami i weryfikacją poprawności działania pokazał Autor w rozdziale siódmym.

Bardzo wartościowy jest rozdział ósmy, gdzie prezentuje Doktorant trzy przykłady wdrożenia zrobotyzowanych technologii obróbki wraz z opracowanymi narzędziami. Aplikacje w warunkach przemysłowych znalazły miejsce przy produkcji: dyfuzora silnika V2500, korpusu przekładni ADT oraz kół zębatach przekładni FDGS. Wdrożenia zostały udokumentowane zdjęciami. W treści rozdziału przytoczono także wymogi jakościowe na podstawie dokumentacji technicznej wyrobów. Wszystkie typy dobranych narzędzi dla poszczególnych procesów zawarto w załączniku.

Ostatni, dziewiąty rozdział pracy, zawiera podsumowanie, wnioski końcowe oraz zestawienie oryginalnych osiągnięć pracy i formułuje kierunki dalszych badań.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

Głównym celem pracy było opracowanie metod robotyzacji obróbki wykańczającej (gratowanie i stępienie krawędzi) elementów silników lotniczych produkowanych w zakładach Pratt and Whitney Rzeszów (PWR).

Uzasadniając temat podjęty przez Doktoranta należy zauważyć, że w ramach idei przemysłu 4,0, mocno obecnie eksploatowanej zarówno w teorii jak i w praktyce, dąży się do całkowitej autonomiczności produkcji przemysłowej. W skrajnych przypadkach ma ona doprowadzić do bezludnych fabryk, gdzie garstka personelu będzie pełniła rolę monitorującą i kontrolną. Zgodnie z tą koncepcją, klient wybiera specyfikację produktu, ta informacja jest przekazywana do autonomicznej fabryki, gdzie z magazynu pobierane są niezbędne komponenty, przekazywane na linię produkcyjną do obróbki i dalej do montażu. W zaawansowanych przykładach także kontrola jakości realizowana jest automatycznie. Takie podejście wymaga automatyzacji i robotyzacji wszystkich czynności od magazynowania, przez transport, po obróbkę i montaż. Tymczasem istnieją procesy technologiczne, gdzie z uwagi na dużą niestandardowość przypadków, wciąż niezastąpiona jest praca ludzka. Przykładem może tu być wstępna obróbka odlewów, gdzie konieczne jest usunięcie układu wlewowego lub zeszlifowanie materiału na łączeniach form. Podobnym procesem jest usuwanie ostrych krawędzi powstałych w obróbce skrawaniem. Czynności te z jednej strony są trudne do automatyzacji, z drugiej uciążliwe dla operatora narzędzi. Dlatego istnieje duże zapotrzebowanie na robotyzację tego typu czynności. Dzięki niej zwiększona zostanie wydajność produkcji, a pracownicy nie będą narażeni na choroby zawodowe jak np. pylica

płuc czy choroby wibracyjne. Ma to szczególne znaczenie w przemyśle lotniczym, gdzie dodatkowo wchodzi jeszcze aspekt bezpieczeństwa eksploatacji wyrobów, które może być zachwiane przez błąd ludzki. Wedle wiedzy recenzenta obecnie w przemyśle jest bardzo niewiele tego typu zrobotyzowanych procesów i trwają intensywne prace dążące do wypełnienia tej luki. Dlatego też chęć opracowania technologii, która zrobotyzuje procesy gratowania, zatępienia krawędzi części silników lotniczych należy zakwalifikować jako podążanie za najnowszymi trendami światowymi. W tym kontekście cel postawiony przez Doktoranta oceniam jako aktualny i ważny z praktycznego punktu widzenia.

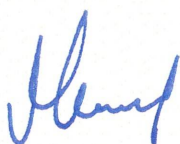
Przegląd literatury wykonany przez Autora jest wystarczający – bibliografia obejmuje 119 pozycji i zawiera istotne prace z zakresu wiedzy związanego z tematyką pracy, choć jak wcześniej wskazano, niektóre prace zostały pominięte.

Metodyka pracy naukowej przyjęta przez Doktoranta ma mocno praktyczny i empiryczny charakter, nie odbiega jednak znacząco od klasycznego schematu badań naukowych. Praca rozpoczyna się od przeglądu stanu wiedzy światowej w zakresie automatyzacji i robotyzacji procesów obróbczych, bezdotykowych układów pomiarowych oraz zastosowania sterowania siłowego w robotyce. Następnie dokonuje Autor syntezy niezbędnych narzędzi tworząc przy tym procedury doboru parametrów procesów technologicznych. Aby w pełni zautomatyzować proces, projektuje odpowiedni system pomiarowy. Każda z opracowanych metod jest testowana w warunkach przemysłowych na rzeczywistych podzespołach silników lotniczych. Potwierdza to aplikacyjny charakter pracy. W ostatnim kroku realizuje Autor skuteczne wdrożenie dla aż trzech różnych części silników lotniczych w zakładach PWR, którego wyniki potwierdzają skuteczność przyjętych założeń.

Do oryginalnych osiągnięć pracy należy zaliczyć:

- opracowanie technologii obróbki dyfuzora silnika V2500 realizowanej z wykorzystaniem robota ze sterowaniem siłowym i realizacją ścieżek w ruchach zależnych oraz narzędzia z pneumatyczną progresją siły nacisku,
- opracowanie stacji zrobotyzowanej i technologii obróbki obudowy przekładni ADT z wykorzystaniem robota oraz narzędzi podatnych,
- opracowanie technologii obróbki elementów przekładni FDGS,
- opracowanie algorytmu pomiarowego realizowanego z wykorzystaniem skanera 2D do pomiarów wielkości faz i promieni zatępień przekładni ADT,
- opracowanie algorytmu wyznaczania punktu TCP robota wyposażonego w skaner 2D,
- opracowanie oprogramowania robota wyposażonego w skaner 3D GOM wykorzystany do weryfikacji jakości obróbki w pracach dotyczących dyfuzora i obudowy przekładni ADT.

Jeżeli chodzi o stronę redakcyjną, dysertacja ma klasyczny układ typowy dla tego typu opracowań. Nieco brakuje zestawienia rysunków i tabel. Język pracy jest zasadniczo poprawny, choć można znaleźć pojedyncze przypadki dyskusyjne, o których będzie szerzej w kolejnej części recenzji. Jak już wcześniej wspomniano, praca zyskałaby na przejrzystości,



gdyby niektóre rozdziały podzielić na sekcje. Kilka uwag ma także recenzent do strony graficznej pracy.

#### 4. Uwagi dyskusyjne

Autor niniejszej recenzji nie doszukał się w pracy żadnych większych błędów ani zaniedbań. Poprawność opracowanych technologii i algorytmów została potwierdzona przez skuteczne wdrożenie. Z obowiązku poniżej zamieszczone są pewne wątpliwości i kwestie dyskusyjne:

- Praca zawiera kilka niewłaściwych określeń, niezgodnych z terminologią przyjętą zwyczajowo w polskim piśmiennictwie naukowym. Najbardziej rażącym przykładem jest tutaj ciągle stosowane określenie kontrola siły, które wydaje się być kalką językową z angielskiego. Tymczasem w języku polskim mówimy o sterowaniu siłowym, a kontrola ma nieco inne znaczenie. Autor stosuje też określenie stabilność, bądź jej brak, w znaczeniu potocznym, mając na myśli zmienną wartość parametrów podczas obróbki. W teorii sterowania stabilność to ważne pojęcie, ściśle zdefiniowane. W pracy doktorskiej dotyczącej robotyki takie kolokwializmy nie powinny mieć miejsca. Dodatkowo można jeszcze zwrócić uwagę, że w języku technicznym mówimy raczej o masie, a nie wadze (waga to przyrząd do pomiaru masy), znamy też czujniki wizyjne, a nie wizualne.

- W pracy można znaleźć szereg uchybień jeżeli chodzi o stronę graficzną. I tak część ilustracji i zdjęć, które wydają się nie być wykonane przez autora nie posiada odnośników do źródeł, np.: 1.3 i 1.4. Dwie ilustracje się powtarzają: 4.32b i 6.18b. Sporo wykresów nie ma opisów osi lub w opisach brakuje jednostek, np.: 4.47 czy 4.52, który dodatkowo jest nieproporcjonalnie mały. Na wykresach 4.57 i dalszych nie ma informacji co zwiera wykres w lewym górnym rogu – co oznaczają sygnały 201. 202 i 203.

- Wykresy z rysunków 4.12 i 4.14 zostały, wg opisu, wykonane dla stałej prędkości posuwu, tymczasem sam wykres to zależność promienia zaokrąglenia od prędkości posuwu, a więc z założenia nie może ona być stała.

- Drobne błędy literowe i redakcyjne jak np. brak decyzji Autora czy używać w pracy pierwszej, czy trzeciej osoby liczby pojedynczej (a zdarza się i pierwsza osoba liczby mnogiej), zostaną przekazane na życzenie Autorowi do ewentualnego wykorzystania przy późniejszej publikacji efektów pracy.

Nasuwa się też kilka pytań:

- W podrozdziale 4.3.2 wyznacza Autor doświadczalnie najlepsze parametry możliwe do osiągnięcia. Najpierw dla ustalonej wartości siły i prędkości jej zmiany znajduje najlepszą wartość współczynnika tłumienia D. Dla wartości 75 % uzyskuje najlepsze wyniki – przebieg siły z niewielkimi odchyleniami od wartości zadanej i bez przeregulowania. Następnie szuka najlepszej wartości parametru: prędkość zmiany siły. I tutaj rodzi się pytanie: dlaczego przyjął Autor do tych badań wartość współczynnika tłumienia D = 100%, a nie najlepsze z uprzednio

znalezionych  $D = 75\%$ ? I dalej, skoro problem znalezienia optymalnych parametrów sterowania siłowego ma charakter wielowymiarowy dlaczego autor rozpatrywał go jako kilka niezależnych problemów jednowymiarowych? Czy takie podejście da rzeczywiście najlepszy wynik?

- Czym kieruje się Autor dobierając parametry wstępne w algorytmie z rysunku 6.16 (początkowa i maksymalna szerokość pola pomiarowego).

- Czy do obróbki uzębień kół zębatych przekładni FDGS nie lepiej zastosować robota o bardziej sztywnej strukturze (np. równoległy typu Delta)? Autor sam zauważa, że przy obróbce frezami generowane są drgania, które obniżają jakość wykonywanej obróbki.

## 5. Wniosek końcowy

Problematyka badawcza ocenianej pracy doktorskiej mgr inż. Artura Ornata poświęcona jest opracowaniu zrobotyzowanych stanowisk i technologii do gratowania elementów silników lotniczych produkowanych przez PWR. Doktorant dokonał skutecznego wdrożenia dla swoich stacji obróbczych w PRz, co jest najlepszą rekomendacją.

Temat rozprawy jest aktualny i istotny z praktycznego punktu widzenia. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań badawczych, a osiągnięte oryginalne wyniki stanowią istotny wkład w rozwój metod obróbki elementów silników lotniczych. Na podkreślenie zasługuje użyteczny charakter otrzymanych rezultatów. Przedstawione uwagi i pytania nie umniejszają wartości pracy.

Realizując pracę doktorską, Autor precyzyjnie określił cel, który chce osiągnąć i w pełni go zrealizował. Wykazał się przy tym dobrym rozeznaniem w rozpatrywanej problematyce naukowej. Poszczególne etapy pracy świadczą o dobrym przygotowaniu Autora oraz o jego umiejętności prowadzenia prac badawczych. Warto tu zwrócić uwagę na wielorakość stosowanych narzędzi i metod, których właściwe używanie wymaga solidnej podbudowy teoretycznej i doświadczenia.

Praca spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dn. 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami i dlatego proponuję przyjęcie jej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej i dopuszczenie do publicznej obrony.

