



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; + 48 691 035 576; j.jozwik@pollub.pl

## RECENZJA

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Grzegorza Bomby pt.: *System ekspercki oparty o wnioskowanie rozmyte, wspierający produkcję kadłubów ADT, silnika PW1000G, z użyciem centr obróbczych CNC. w związku z prowadzonym przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza przewodem o nadanie stopnia doktora.*

### Zamawiający

Opinię wykonano na zlecenie dra hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRZ. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza (pismo RM-530-08-03/2022, z dn. 30/11/2022r.).

### Informacje ogólne

Recenzja obejmuje ocenę treści merytorycznych rozprawy, ocenę wartości naukowej, tezy i rozwiązanie problemu badawczego jak również ocenę redakcyjną rozprawy i wnioski końcowe. Promotorem rozprawy jest: dr hab. inż. Piotr Gierlak, prof. PRZ zaś funkcję promotora pomocniczego sprawuje dr inż. Madalena Muszyńska. Pracę przedstawiono na 179 stronach maszynopisu w logicznym układzie 10 rozdziałów i podrozdziałów. Rozprawę poprzedza obszerny, 11 stronicowy wprowadzenie oraz krótkie streszczenie w j. angielskim, zaś kończy podsumowanie i wnioski oraz obszerny wykaz literatury. Praca nie zawiera załączników, wykazu ważniejszych oznaczeń, skrótów i akronimów, a także nie posiada streszczenia w j. polskim.

### Treść rozprawy, tezy i rozwiązanie problemu naukowego

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra inż. Grzegorza Bomby jest opracowanie systemu ekspertowego wspomagającego produkcję kadłubów ADT silnika PW1000G z użyciem centr obróbczych CNC, opartego o wnioskowanie rozmyte. W pracy szeroko omówiono funkcjonujące w przemyśle technologie wytwarzania korpusów silników lotniczych ze szczególnym naciskiem na korpus silnika PW1000G (cechy konstrukcyjne, stawiane wymagania, proces wytwarzania, kontrolę jakości obróbki, itp.). W rozdziale drugim zdefiniowano cel główny i szczegółowy oraz tezy, i zakres rozprawy. Zważywszy na charakter doktoratu (doktorat wdrożeniowy), cel pracy w znacznej mierze ma charakter użyteczny zaś w mniejszym stopniu wymiar naukowy. Można jednak wyeksponować aspekty naukowe pracy. Określenie związków przyczynowo skutkowych pomiędzy charakterystykami geometrycznymi badanych korpusów, pozyskanymi z wykorzystaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej na maszynach CMM oraz wewnątrz-obrabiarkowych systemów pomiarowych (sonda inspekcyjna na obrabiarce CNC) a zastosowaną metodyką pomiaru części, technologią wytwarzania i dokładnością geometryczną zastosowanych środków produkcji, wraz z wzajemnym powiązaniem tych składowych wytwarzania oraz zbudowanie stosownych modeli wnioskowania rozmytego, niesie ze sobą istotny wkład naukowy w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. W rozdziale 3 dokonano gruntownej analizy literatury z obszaru poruszanej tematyki naukowo – badawczej. Rozdział ten mimo, że jest bardzo krótki (obejmuje strony 21-38) dość szczegółowo przedstawia zagadnienie wraz ze stosownymi odnośnikami do właściwie dobranej i zgromadzonej przez doktoranta literatury (95 pozycji). W rozdziale 4 autor zapowiada „Badania jakości obrabiarki”. Zastrzeżenie budzi samo słowo „jakości” - zatem nie wiemy co autor ma na myśli, bez doprecyzowania tego sformułowania, gdyż z treści wynika jednoznacznie, że autor podejmuje jedynie próbę omówienia sposobów oceny dokładności geometrycznej obrabiarki. Zupełnie niezrozumiałe w tym miejscu jest usytuowanie charakterystyki obrabianego korpusu (nie detalu). Rozdziały 5 i 6 dotyczą badań eksperymentalnych. Rozdziały te zawierają wiele zbędnych treści w moim odczuciu nie wnoszących istotnych elementów merytorycznych do pracy w kontekście tematyki, celu i zakresu, takich jak np. analiza mocy skrawania. Rozdział 7 poświęcono ocenie otrzymanych wyników badań eksperymentalnych. Autor nie dokuje jednak dość wnikliwej dyskusji i interpretacji tych wyników, prezentując je jedynie na wykresach i w zestawieniach tabelarycznych ich parametry (rys. 7.1 - rys 7.16; 6 stron). W zawartych komentarzach nie wyeksponowano efektów naukowych ani poznawczych. W rozdziale tym (7) autor pracy wskazuje na procesy zagęszczania danych syntetycznych oraz ich generowania celem zwiększenia ich liczności. Dokonuje także analizy ich rozkładów bez istotnej z punktu widzenia czytelnika dyskusji i interpretacji (rys. 7.20 – rys. 7.28). Podobnie, odczuwalny jest brak interpretacji wartości wskaźników rozkładu danych rzeczywistych i wygenerowanych (syntetycznych) zawartych



w Tab.7.4 – Tab. 7.12 oraz Rys. 7.29 – rys. 7.37. Można powiedzieć, że autor zaplanował bardzo szeroki zakres prac eksperymentalnych i taki przebieg eksperymentu należy uznać za właściwy. Natomiast stwierdzone braki interpretacyjne należy uznać za pewne niedociągnięcie wymagające od doktoranta w przyszłej pracy naukowej nadrobienia i „doskonalenia warsztatu”. Mimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych, obszerną częśći prezentowanych treści pracy uważam za dobraną w sposób trafny i adekwatny do przyjętego tematu rozprawy, a także postawionego celu, tez i zakresu pracy. Opracowanie modeli predykcji odchyłek dla analizowanych cech pozwoliło doktorantowi na osiągnięcie nie tylko celu poznawczego, ale również umożliwiło osiągnięcie efektów naukowych i użytkowych rozprawy. W podsumowaniu (rozdz. 10) autor rozprawy w sposób usystematyzowany przedstawia najważniejsze osiągnięcia badawcze i efekty naukowe oraz wynikające z nich wnioski. W moim odczuciu są one ujęte zbyt jakościowo, zaś w mniejszym stopniu ilościowo. Warto było wyeksponować uzyskane efekty naukowe pracy również w aspekcie ilościowym. Brakuje pewnych uogólnień, które można by przenieść, na inne części czy też cechy geometryczne kadłuba ADT silnika PW1000G, analizowane w pracy. Uwzględniając całość przedstawionych treści merytorycznych zarówno w części teoretycznej jak i praktycznej pracy, oceniam je pozytywnie, aczkolwiek autor nie ustrzegł się pewnych sformułowań w sferze językowej o charakterze „przemysłowym”. Struktura pracy i treści merytoryczne, odpowiadają wymaganym standardom stawianym rozprawom doktorskim.

## **Ocena wartości naukowej rozprawy**

Autor pracy podejmuje bardzo ważny i aktualny problem naukowy dotyczący możliwości predykcji i generowania odchyłek wymiaru i położenia w warunkach produkcyjnych a także realizuje istotny z użytkowego punktu widzenia cel pracy obejmujący opracowanie narzędzia w postaci systemu ekspertowego opartego o wnioskowanie rozmyte. Opracowanie systemu eksperckiego i jego wdrożenie jest największym osiągnięciem doktoranta. Mimo istotnego i niezaprzeczalnego znaczenia użytkowego i naukowego pracy, autor nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć. W części teoretycznej pracy (rozdział 3) doktorant zbyt dużo miejsca poświęcił opisowi wybranych do modelowania narzędziom, zamiast skupić się na przedstawieniu aktualnego stanu zagadnienia w kontekście naukowym i osiągnięć w tym zakresie, prezentowanych w krajowej i światowej literaturze. Na rys 4.1-4.4 autor definiuje cechy zamiast konkretnych wymiarów (średnic, wymiarów położenia, itd.) oraz w tab. 4.1 i 4.2 podaje tolerancje, które bez odniesienia do konkretnego wymiaru nie mają większego sensu (różne są wartości tolerancji dla różnych wymiarów, np. tolerancja dla średnicy otworu 10 mm będzie zupełnie inna niż dla średnicy 100 mm). Operowania cechami, zamiast wymiarami, uważam za niedociągnięcie doktoranta. W rozdziale 4.3 autor pisze, że przedmiot próbny jest znacząco inny niż ten prezentowany w normie ISO /DIS 10791-7 (Test conditions for machining centres — Part 7: Accuracy of finished test pieces) i za chwilę podaje, że jest to przedmiot, cytuję, „... mający poświadczyć o zdolności obrabiarki do wykonania kadłuba przekładni lotniczej...”. Skoro jest to nieznormalizowana część w sensie oceny dokładności obrabiarki, to w oparciu o jakie standardy została zaprojektowana i dopuszczona do oceny maszyny? Jak zatem porównać wyniki oceny dokładności geometrycznej innych badaczy? Czym jest podyktowany taki wybór i z czego konkretnie wynika wybór przedmiotu testowego? Ważnym niedociągnięciem pracy i niezwykle istotnym z punktu widzenia pozyskanych wyników badań eksperymentalnych jest to, że autor nie określił w pracy budżetu niepewności pomiaru ani na współrzędnościowej maszynie pomiarowej CMM, ani budżetu niepewności dla pomiarów z wykorzystaniem inspekcyjnej sondy pomiarowej na obrabiarce CNC. Brak budżetowania i ocena pozyskanych wyników bez uwzględnienia niepewności pomiaru sprawia, że modelowane na podstawie wyników wielkości nie są obiektywne w sensie ich jakości i nie dają pełnego obrazu rzeczywistości. Nie oznacza to, że sama koncepcja zbudowanego narzędzia wnioskowania rozmytego jest niewłaściwa ale z pewnością dane nie są określone w sposób jednoznaczny i pewny. W rozdziale 5.2, akapit 2 autor pisze, że do badań wybrano 3 sondy RPM600. Skoro jest to ten sam typ sondy, to sonda jest jedna. Zatem jaki był cel wyboru aż trzech sond do realizacji tego samego zadania? Rozumiem, że mierzono różne elementy geometryczne, tym samym typem sondy ale innymi końcówkami pomiarowymi (długość, średnica kulki lub dysku), ale z czego wynika taki wybór i czym jest to uzasadnione oprócz powyższego. Czy wszystkie wybrane sondy (T2,T3,T4 – dlaczego nie ma T1?) były kalibrowane niezależnie, i czy w ogóle były skalibrowane? Wyniki zaprezentowane na rys. 5.10 – 5.12 nie zostały zinterpretowane, ani poddane obróbce statystycznej. Co prawda określono powtarzalność wyników (dla pomiaru pierścienia), ale nie jest to jedyny parametr oceny właściwego doboru sond. W rozdziale 6 (Dane pomiarowe) na rys. 6.4 ze str. 71 zaprezentowano rozkład pomiaru temperatury w funkcji numeru części mierzonej. Widoczny na wykresie duży zakres zmian (od 21,6°C do 27,6°C) jest bardzo zastanawiający. Dlaczego nie prowadzono pomiarów w warunkach ustabilizowanych, tylko przy tak dużym rozrzucie wartości temperatury (można było też podać standardowe miary rozrzutu)? Nie dziwią zatem wyniki odchyłek położenia przedstawione na rys 6.5 oraz rys. 6.6 i niska wartość korelacji Pearsona. Jaki jest cel rozdziału 6.3 (Moc skrawania), czemu miał on służyć? W rozdziale 7 autor pomija bardzo ważne aspekty naukowe, które powinny wynikać z dyskusji i interpretacji pozyskanych danych eksperymentalnych. Rozdział 8 i 9 poświęcono zastosowaniu algorytmu ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) do określania odchyłek położenia gniazd łożysk. Stanowi on połączenie sieci neuronowych i systemów rozmytych. Umożliwia on wykorzystanie zarówno regułowej reprezentacji wiedzy systemów rozmytych jak i metod uczenia stosowanych w przypadku sieci neuronowych, wykorzystując zarówno proces optymalizacji z zastosowaniem algorytmów gradientowych jak i algorytm propagacji wstecznej. Zastosowano model Takagi – Sugeno, posiadający 2 wejścia (błąd położenia określony na CMM i CNC otworu bazowego oraz odchyłka położenia zidentyfikowana z wykorzystaniem CMM) i jedno wyjście (znormalizowaną odchyłkę położenia otworu wyznaczoną na CMM). Przeprowadzono badania mające na celu wybór najlepszej konfiguracji układu polegającego na doborze liczby i kształtu funkcji przynależności. Jako kształt funkcji



przynależności autor wybrał: trójkątną, trapezową, gaussowską, dzwonową,  $\pi$ -kształtną i dzwonową niesymetryczną. Dane do uczenia miały charakter danych syntetycznych (generowanych). Autor wskazuje, że efektem modelowania było określenie odchyłek położenia gniazd łożysk, dobór rodzaju i funkcji przynależności. Utworzył bazy reguł i zaprezentował je odpowiednio w pracy. Odchyłki położenia gniazd dla analizowanych cech przedstawiono w tabelach 8.1-8.22 i wykresach. Oceny jakości modeli dokonano w postaci graficznej na rys. 8.23-8.31, tab. 8.15-8.22. Identyczne zestawienia podano dla wariantu drugiego – wyznaczenia błędu położenia z obrabiarki CNC. Podobnie jak wcześniej, autor zaprezentował dużą ilość wyników, niestety bez gruntownej ich analizy i uogólnienia oraz interpretacji merytorycznej. Lektura tych rozdziałów powoduje istotny niedosyt interpretacyjny prezentowanych, najważniejszych w rozprawie wyników. Ponadto każde badania przedstawiane w pracy są niezależnie i prezentowane bez większego powiązania ze sobą, przez co sprawiają wrażenie mało spójnych (element chaosu, utrudniający ocenę pracy). Nie mniej jednak uważam omawiane problemy niezwykle istotne z punktu widzenia predykcji wspomagającej i wspierającej produkcję a zastosowane narzędzia wnioskowania rozmytego za właściwie dobrane i bardzo istotne. Natomiast, pewne usystematyzowanie pracy pozwoliłoby łatwiej wyciągnąć wnioski naukowe i poznawcze. Podobnie, podsumowanie i wnioski pracy uważam za minimalne i bardzo skromne w kontekście zakresu pracy. Autor powinien odnieść się do rezultatów nie tylko jakościowych ale i ilościowych. Żałuję, że Autor tak mało miejsca poświęcił, analizie i dyskusji wyników.

Analiza pracy, jako całości stanowi podstawę do oceny, że autor wykonał bardzo dużą liczbę badań, ale nie dokonał ich wyczerpującej dyskusji, szczególnie w powiązaniu ze sobą. Dostrzegam jednak wiele pozytywnych cech aplikacyjnych wykonanych badań. Mogą one przynieść dużo efektów użytkowych z zastosowania w praktyce. Biorąc pod uwagę całość pracy, zaprezentowane wyniki posiadają również wymiar poznawczy i naukowy. Podsumowując aspekty naukowe pracy, pomimo wielu jej niedoskonałości uważam, że autor osiągnął przyjęte w pracy założenia i pozyskał wystarczający materiał badawczy do udowodnienia postawionej w rozprawie tezy. Zagadnienia będące przedmiotem rozprawy doktora są aktualne i cały czas rozwijane. Do ważniejszych zalet pracy, co nie było nawet jej zasadniczym celem, zaliczam wyniki pomiarów i modelowania. Za bardzo cenne uznaję zastosowanie nowoczesnych i niezwykle ważnych w kontekście Przemysłu 4.0 narzędzi inteligentnych. Zatem każda nowa wiedza z tego zakresu może znaleźć swoje odzwierciedlenie w użytkowych zastosowaniach praktycznych.

### **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 literatury, normatywnych aktów prawnych, wykazu oznaczeń, skrótów, akronimów i streszczeń w j. polskim i j. angielskim.

Analiza rozprawy pod kątem reakcyjnym nie budzi większych zastrzeżeń, nie mniej jednak autor nie ustrzegł się wielu niedociągnięć i niedoskonałości. Do najważniejszych z nich należą:

- Autor buduje bardzo długie i niewłaściwie gramatycznie zdania, co powoduje że czytelnik ma czasami problem ze zrozumieniem, co autor miał na myśli,
- Autor rozprawy popełnia błędy interpunkcyjne, stylistyczne, zastrzeżenia budzi często sens zdania, jego szyk, brak akapitów w odpowiednich miejscach, przeskoki tekstu do drugiego wiersza,
- Autorowi pracy zdarza się niewłaściwie stosować skróty, nie znajdujące uzasadnienia formalnego
- Autor wyrażając niektóre wartości wielkości stosuje zapis jednostki w nawiasie kwadratowym (np.  $F=10[N]$ ) zamiast  $F=10N$ , zupełnie w sposób nieuzasadniony. Wyrażając wartość wielkości nie ma potrzeby używać nawiasu dla jednostki w jakiej jest ona wyrażona. Definiując wielkość (zmienną) zastosowanie nawiasu jest jak najbardziej uzasadnione, np.  $F [N]$ ,
- Autor pracy kończy niejednokrotnie rozdział lub podrozdział rysunkiem, wzorem lub tabelą, co jest raczej rzadko spotykane w pracach naukowych
- Rysunki w tabelach 8.1; 8.3; 8.5; 8.7; 8.9; 8.11; 8.13 są bardzo słabo czytelne,
- podpisy pod rysunkami wielokrotnie nie posiadają stosownych odniesień do prezentowanych figur (rysunki wieloelementowe) np. a)....., b).....c)....., d).....,
- wykaz literatury nie jest sporządzony wg jednolitych standardów, wiele pozycji literaturowych jest sformatowana inaczej od pozostałych, brak niejednokrotnie wydawnictw lub są one źle wpisane, brak jednolitego sposobu zapisu rozdziałów, woluminów, stron, tytułów czy samych imion i nazwisk autorów.
- sposób cytowania budzi zastrzeżenia, szczególnie w zakresie cytowań grupowych, obejmujących często bardzo dużą liczbę pozycji ([3-8] str.10; [3,5,10,15] str.14; [17-21] str.17; i inne), oraz brak przypisów źródeł literaturowych do rysunków (jeśli nie są wykonane przez autora), np.: rys.1.1; rys.1.2-1.6; rys. 3.2-3.10; rys. 3.12-3.15; rys. 4.3; rys. 5.5 – kopia rysunku ze strony Renishaw, i wiele innych).
- Liczne literówki w rozdz. 4.1, str. 39 i innych miejscach,
- Autor używa czasami niezrozumiałych sformułowań: Test laserowy (str. 39); Tolerancja dystansu ? (str. 41, tab. 4.1 oraz 4.2), kinematyczna metoda wykonania ? (str. 43),
- Sformułowanie typu „wartość współczynnika korelacji Pearsona ...wynosi 0,189 i jest słaba” jest nieodpowiednio dookreślona (str. 73)
- W rozdz. 4.4 liczne błędy zapisu zmiennych fizycznych oraz ustalonych w obróbce skrawaniem parametrów i ich jednostek (np. 20 stopni Celsjusza zamiast 20°C,  $S=1500rpm$  zamiast  $n = 1500 obr/min$ ,  $S=2000rpm$  zamiast  $n = 2000 obr/min$ ,  $V_F$  zamiast  $v_f$ ,  $V_c$  zamiast  $v_c$  i inne)
- Za niewłaściwe uznaję posługiwanie się tzw. „charakterystykami” zamiast konkretnymi wymiarami liniowymi (średnicami, długościami, itd.) tab 6.2-6.4

- Zapis posuwu  $Fr$  oraz przypisanie prędkości obrotowej zmiennej  $S$  z tab. 6.2, jest niepoprawny, Ponadto zmienne te oprócz mocy skrawania, powinny być zapisane małymi literami z indeksami
- Zapis operatorów i zmiennych w równaniach (6,1) oraz (6,2) są niepoprawne,
- Rys. 5.10 – 5.12 prezentują wyniki odchyłek położenia – zaś wszystkie opisy na rysunkach są zaprezentowane w języku angielskim.
- separatorem części dziesiątych, setnych itd. w języku polskim jest przecinek, autor natomiast w rozdziale dane pomiarowe na str. 69 stosuje kropkę,
- ciśnienie 70 bar, należało podać w MPa (str. 70)

Podsumowując, przytoczone niedociągnięcia, mimo iż są liczne, nie obniżają wartości naukowej i poznawczej pracy.

### **Wniosek końcowy**

Uwzględniając przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską i jej naukowy wkład w Dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna stwierdzam, że mgr inż. Grzegorz Bomba, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003r. (Dz.U. nr 65, poz. 595), tekst ujednolicony z dnia 29 września 2014 r. wraz z późniejszymi rozporządzeniami z dnia 20 września 2018r.) i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie Autora do publicznej obrony rozprawy.

Lublin, dnia 28 lutego 2023 r.

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