

Gliwice, 30.03.2023 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
mgr. inż. Grzegorza Bomby

pod tytułem:

**„System ekspercki, oparty o wnioskowanie rozmyte, wspierający  
produkcję kadłubów ADT, silnika PW1000G,  
z użyciem centr obróbczych CNC”**

podstawa opracowania: pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny  
Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego  
Łukasiewicza dr hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz nr RM-530-08-  
02/2022 z dnia 30.11.2022 r., do którego dołączono egzemplarz pracy  
doktorskiej.

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Piotr Gierlak, prof. PRz, natomiast  
promotorem pomocniczym dr inż. Magdalena Muszyńska.



## 1. Ocena aktualności wybranego tematu

Aktualnie mamy do czynienia z kolejną generacją przemysłu tzw. Przemysłem 4.0. Koncepcja Przemysłu 4.0 obiecuje większą elastyczność produkcji, a także masową personalizację, lepszą jakość i lepszą produktywność. W ten sposób umożliwia firmom sprostanie wyzwaniom związanym z wytwarzaniem coraz bardziej zindywidualizowanych produktów o krótkim czasie wprowadzania na rynek i wyższej jakości. Inteligentna produkcja odgrywa ważną rolę w Przemysle 4.0. Typowe zasoby są przekształcane w inteligentne obiekty, dzięki czemu są w stanie wyczuwać, działać i zachowywać się w inteligentnym środowisku.

Inteligentna produkcja to szeroka koncepcja wytwarzania mająca na celu optymalizację procesów produkcyjnych poprzez pełne wykorzystanie zaawansowanych technologii informacyjnych i wytwórczych. Jest uważana za nowy model produkcji oparty na inteligentnej nauce i technologii, który znacznie ulepsza projektowanie, produkcję, zarządzanie i integrację całego cyklu życia typowego produktu.

Jedną z form realizacji tej koncepcji jest inteligentny system produkcyjny (IMS), który jest uważany za system produkcyjny nowej generacji, uzyskany poprzez przyjęcie nowych modeli, nowych form i nowych metodologii w celu przekształcenia tradycyjnego systemu produkcyjnego w inteligentny system.

Jak sam Autor zauważa, tematyka zawarta w pracy jest zbieżna z realizowaną w przemyśle ideą „Przemysłu 4.0” oraz koncepcją obróbki za zamkniętymi drzwiami realizowaną na poziomie przedsiębiorstwa. Biorąc powyższe pod uwagę, wybrany temat pracy doktorskiej uważam za aktualny zarówno pod względem naukowym, jak również pod względem zastosowania wyników badań w praktyce. Tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”.

## 2. Przegląd treści pracy

Rozprawę doktorską podzielono na dziesięć rozdziałów, uzupełnionych spisem literatury oraz streszczeniem zamieszczonym jedynie w języku angielskim. W pracy ewidentnie brakuje wykazu oznaczeń co byłoby bardzo przydatne podczas lektury niektórych jej fragmentów. Rozprawa została napisana na 179 stronach maszynopisu formatu A4.

Pierwszy rozdział nazwany „Wprowadzenie”, jak stanowi tytuł zawiera wprowadzenie do treści zasadniczych analizowanych w ramach recenzowanej dysertacji. Autor przedstawił w nim obiekt swoich badań tj. kadłub i pokrywę przekładni akcesoryjnej silnika PW1000G wymagania, które wyrób musi spełniać po przeprowadzonej obróbce. Ponadto opisano koncepcję obróbki za zamkniętymi drzwiami oraz problematykę kontroli jakości wykonania korpusów przekładni lotniczych akcesoryjnych.

W rozdziale drugim Autor przedstawił cel, tezę pracy i metodykę badań. Za cel szczegółowy prowadzonych badań Doktorant uznał „opracowanie autorskiej koncepcji oraz budowę systemu z bazą wiedzy i wnioskowaniem, który rozwiąże problem interpretacji wyników pomiarów geometrycznych prowadzonych na maszynie CNC w procesie produkcji pokryw kadłubów przekładni akcesoryjnej silnika lotniczego serii PW1000G”. Tak więc Autor dysertacji postawił sobie ambitny cel, aby jedynie na podstawie pomiarów realizowanych na maszynie wytwórczej opracowane narzędzie informatyczne było zdolne do oceniania jakości wytworzonego detalu.

W kolejnym, trzecim rozdziale, doktorant zawarł przegląd istniejącego stanu wiedzy i techniki w zakresie tematyki pracy, który to pozwolił na wystosowanie istotnej konkluzji, że dokonywanie pomiarów geometrycznych na obrabiarkach w połączeniu z modelowaniem neuronowo – rozmytym, może doprowadzić do opracowania narzędzia zastosowanego w obszarze kontroli jakości produkcji.



Rozdział czwarty recenzowanej dysertacji zatytułowany „Badanie jakości obrabiarki” dotyczył przedstawienia badań zmierzających do określenia dokładności obróbczej 5-osiowej frezarki. W rozdziale tym przedstawiono zaproponowaną metodykę, w tym wybór elementu próbnego, rodzaj i kolejność operacji obróbczych.

Kolejny rozdział - piąty, poświęcono przedstawieniu zastosowania systemu pomiarowego złożonego z maszyny CNC i sond pomiarowych. W rozdziale tym Autor wykazał możliwość zastąpienia CMM przez precyzyjne centra obróbcze CNC, co pozwoli z wykorzystaniem adekwatnego systemu pomiarowego na uzyskanie wiarygodnych raportów pomiarowych. W celu badania użyteczności układu pomiarowego obrabiarki Autor zaproponował badania R&R oraz metodę statystycznej kontroli procesu. Badania zrealizowano z wykorzystaniem trzech rodzajów sond pomiarowych oraz pierścienia wzorcowego dla zadanych sekwencji pomiarowych. Zastanawiającym jest trend obserwowany na rys. 5.10 błędu pomiaru współrzędnej Z powierzchni bazowej szczególnie widoczny dla sond T2 i T3. Autor albo nie zauważył albo przemilczał ten fakt.

W rozdziale szóstym zatytułowanym „Dane pomiarowe” przedstawiono badania eksperymentalne sprzężeń pomiędzy temperaturą otoczenia a odchyłkami położenia charakterystyk kluczowych wyznaczonych na obrabiarkie CNC oraz na maszynie pomiarowej CMM. Z przeprowadzonej analizy wyników badań Autor wysunął wniosek, że „wstępna koncepcja systemu wnioskującego może bazować na wynikach pomiarów charakterystyk geometrycznych prowadzonych na maszynie CNC z uwzględnieniem pojedynczego wejścia kalibrującego, bazującego na pomiarach CMM”.

Rozdział siódmy „Dane syntetyczne” zawiera opis metod i procedur zastosowanych dla pozyskania dodatkowych informacji pomiarowych. Dodatkowe dane pomiarowe Autor uzyskał z zastosowaniem metod interpolacji danych rzeczywistych, które to następnie posłużyły do wygenerowania dodatkowych punktów danych. Dla celów pozyskania danych syntetycznych rozpatrywano sześć metod interpolujących rzeczywiste zbiory danych, uzyskując najlepsze rozwiązanie czyli najlepsze odwzorowanie pierwotnych danych pomiarowych metodą „makima” i „splajnem”.

W rozdziałach ósmym i dziewiątym przedstawiono formuły zastosowane do uczenia oraz oceny jakości układów neuronowo rozmytych zastosowanych do wspomaganie kontroli jakości pokryw przekładni, przeprowadzonych dla dwóch wariantów. W wariancie pierwszym użyto wyników pomiarów uzyskanych z maszyn CNC i CMM a w przypadku wariantu drugiego tylko z maszyny CNC.

Rozprawa kończy się podsumowaniem, które to wydaje się bardzo ubogie w odniesieniu do ilości i zakresu badań przeprowadzonych w trakcie realizacji pracy.



### 3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana rozprawa posiada przejrzysty układ treści. W większości jej treść napisana jest poprawną polszczyzną chociaż zdarzają się nieliczne błędy stylistyczne. Doktorant stopniowo wprowadza czytelnika w problematykę, od zagadnień podstawowych do zagadnień ściśle związanych z realizacją postawionego celu pracy.

W warstwie merytorycznej pracy można ją podzielić na trzy etapy. W pierwszym zawarto rozważania obejmujące problematykę oceny zdolności obrabiarki do wykonania elementów kadłuba z jednoczesną możliwością dokonania na niej pomiarów z wymaganą dokładnością. W drugim dokonano wyboru charakterystyk geometrycznych kluczowych z punktu widzenia jakości wykonania detali. Natomiast trzeci etap poświęcono budowie i uczeniu układu neuronowo – rozmytego oraz przygotowaniu danych uczących. Przeprowadzenie tych wszystkich etapów było kluczowe w osiągnięciu zamierzonego celu czyli przedstawieniu koncepcji, która umożliwiła opracowanie systemu wnioskującego z bazą wiedzy, dla zadania interpretacji wyników kluczowych parametrów geometrycznych przeprowadzonych w celu kontroli jakości na obrabiarce sterowanej numerycznie w procesie obróbki wykończeniowej korpusu akcesoryjnej przekładni lotniczej.

Główną wartością pracy jest to, że Autor podjął się trudnego zadania: opracowania modeli matematycznych o właściwościach aplikacyjnych, dotyczących możliwości predykcji odchyłek położenia obrabianych powierzchni, przy wykorzystaniu do pomiarów jedynie systemu pomiarowego obrabiarki CNC bądź uzupełniając bazę wymiarową o nieliczne pomiary dokonane na maszynie CMM.

Autor zaproponował i zweryfikował metodykę zmierzającą do zredukowania liczby pomiarów na współrzędnościowej maszynie pomiarowej, bądź też całkowitego ich wyeliminowania na rzecz dokonywania pomiarów na maszynie CNC dokonywanych w procesie obróbki wykańczającej dla celu kontroli jakości wykonania pokryw korpusów akcesoryjnych przekładni lotniczych.

Osiągnięcie postawionego celu wymagało od Autora przeprowadzenia pomiarów obrabianego detalu na obrabiarce CNC oraz opracowanie modeli matematycznych adaptacyjnego neuronowo – rozmytego systemu wnioskującego. Opracowane modele oraz algorytmy stanowią nowatorskie podejście do problemu kontroli jakości prowadzonej na obrabiarce w trakcie procesu obróbki wykończeniowej.

Recenzowana praca wskazuje, że Doktorant wykazał się umiejętnością łączenia wiedzy teoretycznej i praktycznej pochodzącej z wielu dyscyplin nauki: mechaniki, automatyki i informatyki.

Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne, dotyczy bowiem istotnych zagadnień zwiększania możliwości aplikacyjnych obrabiarek CNC, szczególnie w kierunku ich wielozadaniowości. Prowadzi to do scalania operacji technologicznych w tym kontroli jakości wykonanych detali na jednej maszynie.

Lektura dysertacji nasuwa jednak pewne komentarze i uwagi krytyczne, częściowo dyskusyjne, takie jak:

- Wykorzystanie przez Autora, do określenia dokładności obróbczej, detalu o zdecydowanie większej sztywności niż korpus przekładni lotniczej, w związku z czym, nasuwa się pytanie, czy wyciągnięte z tych badań wnioski będą słuszne również w przypadku obróbki elementu o znacząco mniejszej sztywności. Autor nie przedstawia sposobu dokonanych pomiarów a jedynie zamieszcza w pracy informację, że pomiary przeprowadzono zgodnie ze standardową procedurą zatwierdzoną w zakładzie. Na jakich przesłankach Autor oparł swoją tezę o tym, że dokładność wykonania operacji obróbczych detalu próbnego przełoży się na satysfakcjonującą dokładność korpusów przekładni lotniczej? Czy rozważane były inne postacie geometryczne przedmiotu testowego?



- W odniesieniu do treści przedstawionych w rozdziale piątym, czy zmiana położenia elementu referencyjnego na stole obróbczym wpłynęłaby na otrzymane wyniki pomiarów?
- Autor w pracy zwraca dużą uwagę na zróżnicowanie wartości dokonywanych pomiarów ze względu na odkształcenia detalu spowodowane rozszerzalnością ciepłą, stąd w przedstawionych badaniach w rozdziale szóstym wydaje się właściwszym dokonywanie pomiarów temperatury w trakcie przeprowadzania pomiarów geometrycznych na powierzchni detalu niż pomiar temperatury otoczenia obrabiarki, zwłaszcza że Autor nie uściśla miejsca dokonywania pomiaru. Ponadto czy prowadzone były badania określające wpływ rzeczywistej temperatury pokrywy na otrzymywane wyniki pomiarów?
- Na podstawie pomiarów położenia gniazd łożysk dokonywanych na obrabiarce CNC i maszynie CMM Autor wnioskuje o deformacjach detalu powstałych wskutek konfiguracji zamocowania. W pracy brakuje narzędzia, badań modelowych np. MES czy pomiarów tensometrycznych potwierdzających wpływ mocowania na powstałe odkształcenia. Szczególnie model MES mógłby stanowić swoisty „bliźniak cyfrowy” wykorzystywany w procesie wytwórczym detalu.
- 

Występujące w pracy błędy edytorskie, stylistyczne czy językowe nie wpływają znacząco na jakość przekazywanych informacji. Zauważone błędy redakcyjne zostały przekazane autorowi, np.:

- s. 16 anglojęzyczne opisy przedstawionych schematów na rys. 1.8,
- w opisie rys. 9.3, 9.9, 9.18, 9.21 napisano, że kolorem czarnym przedstawiono na rysunku zbiór rozmyty nr 4, jednakże rysunek nie przedstawia takiego rozwiązania,
- błędy stylistyczne wynikające z niepotrzebnego dzielenia wyrazów wewnątrz wiersza np. str. 37 „we-dług” być może będące wynikiem wcześniejszego formatowania pracy,
- inne, tj. wyrazy pojawiające się w niewłaściwej odmianie.

Przedstawione uwagi i komentarze zostaną zapewne wyjaśnione, bądź skomentowane w trakcie publicznej obrony.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych, realizację postawionego zadania należy ocenić pozytywnie ze względu na:

- prawidłowe zdefiniowanie przedmiotu badań,
- wykazane przez Autora dobre rozeznanie w wielu dziedzinach wiedzy, w tym umiejętności praktyczne budowy modeli matematycznych i ich numerycznych odpowiedników opracowanych w środowisku programu Matlab, przeprowadzenie szerokiej gamy badań eksperymentalnych,
- wymierne osiągnięcia teoretyczno-aplikacyjne, pozwalające na szereg spostrzeżeń i wyciągnięcie interesujących wniosków.

#### 4. Ocena końcowa

Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny, nie pomniejszają jednak osiągnięć Doktoranta w uzyskiwaniu wartościowych wyników naukowych i poznawczych. Mają zwrócić uwagę na dalszą pracę i uczulić na staranność w przygotowaniu samodzielnych opracowań naukowych, wnikliwą analizę oraz zgłębianie realizowanych przez Autora problemów badawczych.

Oceniając ogólnie przedstawioną rozprawę doktorską, należy podkreślić aktualność jej tematyki i potrzebę wynikającą z implementacji nowoczesnych rozwiązań technicznych, jak np. systemu do samokontroli przez obrabiarkę jakości produkcji, znajdujących zastosowanie w tzw. inteligentnym systemie produkcji.

Ze względu na charakter recenzowanej pracy - doktorat wdrożeniowy, celem jest rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego oraz zagadnienia praktycznego, w taki sposób, aby powstałe rozwiązanie można było wdrożyć. Cel uważam za osiągnięty, gdyż opracowana podczas realizacji niniejszej dysertacji metodyka dokonywania pomiarów geometrycznych na obrabiarkach w połączeniu z modelowaniem neuronowo – rozmytym, pozwala na generowanie raportów pomiarowych przekazywanych służbom kontroli jakości pomocnych w organizacji procesu produkcji.

Recenzowana praca spełnia wymogi odnośnie do przewodu doktorskiego, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) oraz Ustawy o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 2018 roku.

Biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta mgr inż. Grzegorza Bomby do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Stanisław Duda