

Recenzja pracy doktorskiej pt.

**Opracowanie metodyki szybkiej oceny dokładności ustawienia  
5-osioowych, wielozadaniowych centrów obróbkowych,  
kompensacji zdiagnozowanych błędów i potwierdzenie zdatności  
obrabiarki do realizacji operacji technologicznych**

Autor pracy: mgr inż. Grzegorz Szyszka

Promotor: prof. dr hab. inż. Jarosław Sęp

*Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria  
Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza  
dra hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz, nr RM-530-24-02/2023,  
z dnia 30 października 2023 roku.*

## 1 Charakterystyka pracy

Opiniowana praca została zrealizowana w ramach programu *Doktorat Wdrożeniowy*, czyli programu Ministerstwa Edukacji i Nauki wspierającego współpracę podmiotów systemu szkolnictwa wyższego z otoczeniem społeczno-gospodarczym i polegającego na kształceniu doktorantów we współpracy z zatrudniającymi ich przedsiębiorstwami lub innymi podmiotami. Efektem kształcenia w Szkole Doktorskiej w ramach doktoratu wdrożeniowego ma być implementacja w podmiocie współpracującym wyników działalności naukowej prowadzonej przez Doktoranta. Praca doktorska Pana mgra inż. Grzegorza Szyszki realizowana była przy współpracy z producentem komponentów do silników lotniczych firmą *Pratt & Whitney Rzeszów S.A.* (PWR), a jej tematyka dotyczy opracowania i wdrożenia rozwiązań w zakresie oceny i poprawy zdolności jakościowej procesów obróbkowych, z szczególnym uwzględnieniem problematyki kompensacji błędów wielozadaniowych 5-osioowych centrów obróbkowych.

Dysertacja składa się z sześciu rozdziałów. W rozdziale 1 Autor przedstawił syntetyczny rys historyczny rozwoju konstrukcji wieloosiowych i wielozadaniowych obrabiarek sterowanych numerycznie oraz uwarunkowania i wyzwania związane z ich zastosowaniem do obróbki wielkogabarytowych części silników lotniczych. W rozdziale 2 dokonano analizy stanu wiedzy

w zakresie zagadnień bezpośrednio związanych z tematyką pracy tj. omówiono źródła błędów oraz scharakteryzowano metody diagnostyki i kompensacji błędów obrabiarek. W rozdziale 3, w oparciu o informacje zawarte we wprowadzeniu oraz rozdziałach 1 i 2, przedstawione zostało uzasadnienie podjęcia tematu oraz sformułowany został cel i zakres pracy. Rozdział 4 zawiera szczegółowe omówienie złożonej metodyki badawczej, w tym charakterystykę stanowisk badawczych oraz omówienie przedmiotu badań oraz metod i narzędzi badawczych. Rozdział 5 to obszernie omówienie i analiza wyników przeprowadzonych badań. W rozdziale 6 przedstawiono podsumowanie, wnioski oraz wskazano możliwe kierunki dalszych badań.

Dodatkowo praca zawiera wprowadzenie, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń wykorzystanych w rozprawie, zestawienie bibliograficzne, spis rysunków i spis tabel oraz siedem załączników zawierających materiały uzupełniające dotyczące kodu programu oraz tabel korelacyjnych.

## **2 Ocena pracy**

### **2.1 Ocena wyboru tematyki**

Produkcja komponentów i podzespołów lotniczych musi spełniać najwyższe wymogi bezpieczeństwa w odniesieniu do jakości wyrobu oraz niezawodności i stabilności procesu obróbki. Szczęólnego znaczenia w tym obszarze mają więc kompleksowe rozwiązania zwiększające zdolność jakościową procesu i ograniczające ryzyko wystąpienia problemów na każdym etapie wytwarzania. Obejmuje to m.in. opracowanie procedur monitoringu i kontroli oraz wdrażanie metod i narzędzi pozwalających na szybką adaptację do zmiennych warunków obróbki.

Oceniana praca dotyczy realizowanego w PWR procesu wytwarzania zaawansowanych konstrukcyjnie i wielkogabarytowych komponentów silników lotniczych. Produkowane elementy wykonywane są z materiałów trudnoskrawalnych i charakteryzują się skomplikowanym kształtem, a firma w ostatnich latach stanęła przed wyzwaniem technologicznym wynikającym ze znacznego wzrostu gabarytów wykonywanych komponentów. Analizowany przez Autora proces ma charakter jednostkowy, charakteryzuje się złożonością technologii, długim, wynoszącym nawet do kilkudziesięciu godzin, czasem obróbki i jest realizowany w zmiennych warunkach otoczenia. Istnieje więc duża liczba czynników wpływających na stabilność geometryczną i dokładność kinematyczną obrabiarki, co istotnie zwiększa ryzyko wystąpienia niezgodności. W takich warunkach produkcyjnych spełnienie wymagań jakościowych w odniesieniu do wszystkich aspektów technologii, w tym również stanu obrabiarki, jest dużym wyzwaniem. Warto także podkreślić, że w przypadku wielkogabarytowych i złożonych elementów obróbka skrawaniem jest końcowym etapem procesu technologicznego i ewentualne

problemy lub braki produkcyjne narażają producenta na duże straty finansowe, w tym wynikające z niedotrzymania uzgodnionego harmonogramu dostawy do klienta.

W ramach analizy literatury Autor uzasadnił, że ze względu na pracochłonność, stopień zaawansowania i czas realizacji całej procedury pomiarowej stosowane w przemyśle zaawansowane metody diagnostyki mają ograniczone zastosowanie w warunkach regularnej ciągłej i bardzo specyficznej produkcji realizowanej w PWR. W związku powyższym Doktorant zaproponował rozwiązanie problemu poprzez opracowanie dedykowanej do konkretnego obszaru zastosowania oraz obrabiarek metodyki szybkiej diagnostyki i kompensacji błędów 5-osioowych wielozadaniowych centrów obróbkowych. Takie podejście daje szansę na ciągłe utrzymanie wymaganej dokładności, powtarzalności i niezawodności obrabiarek czyli prowadzi do zwiększenia efektywności produkcji.

Wymienione powyżej przesłanki jednoznacznie uzasadniają potrzebę realizacji podjętych przez Pana mgr inż. Grzegorza Szyszkę badań. **Uważam, że tematyka opiniowanej rozprawy jest aktualna i wpisuje się w potrzebę poszukiwania przez PWR przystosowanych do profilu produkcji metod diagnostyki i kompensacji wybranych parametrów systemu obróbkowego, a jej wybór uważam za słuszny, zwłaszcza ze względów utylitarnych.**

## 2.2 Ocena merytoryczna

Celem opiniowanej rozprawy było *opracowanie metodyki szybkiej oceny dokładności ustawienia 5-osioowych, wielozadaniowych centrów obróbkowych, kompensacji zdiagnozowanych błędów i potwierdzenie zdolności obrabiarki do realizacji operacji technologicznych*. W oparciu o analizę literatury oraz doświadczenia własne Doktorant przyjął, że opracowanie i zastosowanie procedur pomiarowych wykorzystujących obrabiarkowe sondy przedmiotowe umożliwi szybką diagnostykę i kompensację błędów obrabiarki, a tym samym ograniczy czas przestoju urządzenia i wynikające z tego straty finansowe.

Przedmiotem badań były wybrane parametry systemu obróbkowego tj. obrabiarki oraz dedykowanego systemu sond przedmiotowych. Analizie poddano trzy grupy parametrów tj. parametry struktury geometryczno-ruchowej (10), parametry kalibracyjne głównej sondy przedmiotowej (9) oraz parametry ustawczo-kontrolne badanego systemu obróbkowego (17.) Wszystkie główne prace badawcze przeprowadzone zostały na dwóch 5-osioowych centrach obróbkowych Yamazaki Mazak Integrex e-1600V eksploatowanych regularnie w PWR i dedykowanych do obróbki wielkogabarytowych cienkościennych elementów kadłuba silnika turbinowego z rodziny PWC PW800. Dodatkowo część opracowanych rozwiązań testowano i wdrożono do bieżącej produkcji na obrabiarce Yamazaki Mazak Integrex e-1550V. Autor, na bazie wymie-

nionych obrabiarek, zbudował obiekt badań, rozumiany jako system obróbkowych obejmujący: 5-osiowe centrum obróbkowe wraz systemem sterowania, system pomiarowy z sondami przedmiotowymi i dedykowanym pakietem oprogramowania pomiarowego, przyrządy kalibracyjne i testowe z artefaktami kontrolnymi oraz wzorce długości.

Zrealizowane prace badawcze zostały podzielone na cztery etapy tj.

- badania wstępne, w ramach których oceniono precyzję układu pomiarowego w oparciu o metodę Repeatability and Reproducibility (R&R) wyznaczając wskaźniki powtarzalności i odtwarzalności dla badanego systemu tj. obrabiarki i sondy przedmiotowej z dedykowanym oprogramowaniem sterującym,
- badania skuteczności czynnej kompensacji automatycznej błędów położenia osi obrotu stołu roboczego,
- analiza porównawcza sond przedmiotowych o odmiennej konfiguracji technologicznej i eksploatowanych w obrabiarkowym systemie pomiarowym,
- długoterminowa analiza stanu obrabiarki na podstawie danych procesowych.

Realizacja wymienionych prac badawczych wymagała od Doktoranta znajomości zagadnień z obszaru budowy, eksploatacji i programowania obrabiarek sterowanych numerycznie, obróbki skrawaniem, podstaw metrologii, inżynierii jakości czy analizy danych przemysłowych. Znalazło to odzwierciedlenie w przeprowadzonych przez Autora pracach badawczych i wdrożeniowych, które objęły:

- opracowanie zautomatyzowanej metody akwizycji wybranych parametrów układu sterowania obrabiarki,
- rozwiązanie problemu dostępu do wybranych parametrów kompensacyjnych obrabiarki z poziomu programów NC,
- opracowanie strategii kompensacji i przeprowadzenie długoterminowych testów,
- opracowanie i analizę wyników (tj. analiza wpływu temperatury, wyznaczenie wartości granicznych, analiza wzajemnej korelacji wybranych parametrów kompensacyjnych),
- analizę możliwości i zakresu zastosowania oraz wdrożenie w warunkach regularnej produkcji,

**W wyniku realizacji pracy opracowano m.in. metodykę aktywnej kompensacji błędów położenia środka obrotu osi stołu roboczego, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu czynników zewnętrznych (tj. zmiana temperatury) na dokładność obróbki elementów o zróżnicowanej wysokości oraz metodykę analizy porównawczej i oceny wydajności sond przedmiotowych o odmiennej konfiguracji technologicznej (zbadano sześć sond o zróżnicowanym typie). Pewien niedosyt budzi jednak fakt, że analizę wyników tej części badań w dużym stopniu ograniczono do prezentacji i omówienia statystyk**

**opisowych.** Zastosowanie w tej części pracy metod i narzędzi typowych dla statystyki matematycznej (np. testy statystyczne w celu porównania własności zbiorów danych) pozwoliłoby na jednoznaczne wykazanie efektów kompensacji oraz ocenę wydajności sond pomiarowych, a nie tylko prowadzenie dyskusji w oparciu o wymagania i niewątpliwie bogate doświadczenia Autora dotyczące realizowanych w PWR procesów obróbkowych.

**Spośród zrealizowanych przez Doktoranta prac badawczych największy potencjał naukowy i wdrożeniowych mają prace dotyczące opracowania metody ciągłej oceny stanu obrabiarek** (paragraf 5.4). Analiza ta została przeprowadzona na obszernej, liczącej ponad 600 zestawów parametrów, próbie statystycznej zebranej w trakcie dwóch lat eksploatacji badanych systemów obróbkowych. Zmierzone parametry zostały zestawione w postaci tabelarycznej oraz wykresów przedstawiających zmienność mierzonych parametrów w zależności od nr kolejnej akwizycji. **Przeprowadzona na tej podstawie dyskusja wyników ma charakter opisowy, a sformułowane na tej podstawie wnioski w dużym stopniu opierają się na doświadczeniach własnych Autora związanych z realizacją i diagnostyką procesów obróbkowych oraz wymaganiach dotyczących obrabianych elementów.** Potwierdzeniem tego może być np. przyjęcie w sposób arbitralny wartości granicznych dla wybranych parametrów czy formuł kontrolnych. Postawione w ten sposób wymagania reprezentują stan oczekiwany a nie zdolność jakościową procesu. W mojej ocenie zebrane w tak długim okresie eksploatacji dane pozwalały na zastosowanie sprawdzonych metod i narzędzi statystycznego sterowania procesem i poprzez analogię do kart kontrolnych opracowanie uniwersalnej metody pozwalającej na sprawdzenie zdolności jakościowej systemu obróbkowego. Umożliwiłoby to m.in. wyznaczenie wartości kontrolnych (granicznych) na podstawie wyników pomiarów parametrów rzeczywistego systemu obróbkowego czyli uwzględnienie jego właściwości statystycznych. W ramach tej części badań Doktorant wykazał, że istnieje wzajemna korelacja pomiędzy wybranymi parametrami kompensacyjnymi oraz wybranymi parametrami systemu i temperaturą otoczenia. Było to podstawą przedstawienia liniowych zależności regresyjnych (równania 12, 13, 18, 19), jednak ze względu na brak informacji dotyczących adekwatności funkcji przedstawiona analiza w tym zakresie jest niekompletna.

**Analizując przedstawiony do oceny materiał nasuwa się spostrzeżenie, że Autor, jako osoba posiadająca duże doświadczenie zawodowe i od wielu lat pracująca w przemyśle, do rozwiązania postawionych problemów zastosował podejście inżynierskie.** Dlatego też przedstawione w pracy rozważania skoncentrowały się wokół aspektów utylitarnych a jej wyniki, zgodnie z wymogami programu *Doktorat Wdrożeniowy*, ukierunkowane zostały na zastosowanie praktyczne. **Praca dotyczy bardzo specjalistycznego**

obszaru i adresowana jest do bardzo wąskiej grupy odbiorców, zwłaszcza spośród personelu PWR, dlatego też znaczenie naukowe uzyskanych wyników jest ograniczone, jednak w mojej ocenie posiada ona duże znaczenie praktyczne. W ocenie merytorycznej na szczególne podkreślenie zasługują:

- bardzo dobrze opracowane, syntetyczne i osadzone w specyfice branży lotniczej, ujęcie rozwoju, specyfiki i znaczenia wielozadaniowych obrabiarek CNC,
- szczegółowo omówiona, poprawnie uzasadniona i bogato zilustrowana metodyka oraz wykorzystane w pracy specjalistyczne narzędzia i dedykowane oprzyrządowanie badawcze,
- podjęcie próby kompleksowej oceny zachowania zmiennego w czasie i skomplikowanego obiektu badań, jakim jest analizowany w pracy system produkcyjny obejmujący obrabiarki i zautomatyzowany system paletowy, sondy pomiarowe, specjalistyczne oprzyrządowanie i oprogramowanie,
- przeprowadzenie badań w rzeczywistych warunkach produkcyjnych i na obrabiarkach eksploatowanych w warunkach regularnej produkcji,
- przeprowadzenie analizy stanu obrabiarek na relatywnie dużej próbie statystycznej, obejmującej ponad 600 zestawów parametrów zebranych w okresie 2 lat eksploatacji systemu obróbkowego,
- uwzględnienie w procedurze kalibracyjnej położenia środka obrotu osi stołu roboczego wysokości obrabianego elementu, co ma duże znaczenie podczas wielogodzinnych operacji obróbkowych.

Dlatego też, pomimo wymienionych wcześniej uwag dotyczących zastosowanej przez Autora metodyki analizy danych, **uwzględniając ważność i znaczenie tematyki, bardzo obszerny zakres przeprowadzonych prac badawczych oraz specyfikę pracy doktorskiej realizowanej w ramach programu *Doktorat Wdrożeniowy* dysertację Pana mgr inż. Grzegorza Szyszki oceniam pozytywnie. Doktorant podjął się analizy złożonego problemu badawczego i zaproponował rozwiązanie uwzględniające ograniczenia związane z realizowanym w PWR procesem obróbkowym.** Wdrożenie opracowanych procedur kontrolno-pomiarowych ma szansę przyczynić się do podwyższenia efektywności wykorzystania obrabiarek oraz zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia wad produkcyjnych wynikających z błędów geometrycznych i kinematycznych urządzeń technologicznych.

## 2.3 Ocena strony formalnej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa napisana została w języku polskim i wraz ze streszczeniami w języku polskim i angielskim, wykazem ważniejszych skrótów i symboli, zestawieniem

bibliograficznym, spisem rysunków, spisem tabel oraz załącznikami obejmuje 196 stron. Autor podczas przygotowania rozprawy skorzystał z wiedzy zawartej w 98 pozycji bibliograficznych, a swoje rozważania udokumentował licznymi schematami, zdjęciami, tabelami oraz wykresami. Praca ma poprawną strukturę, posiada starannie opracowaną szatę graficzną i stojącą na dobrym poziomie dokumentację z badań, a dobrane przez Autora rysunki i schematy dobrze uzupełniają prowadzoną dyskusję wyników.

Praca generalnie jest napisana poprawnym technicznie i branżowym językiem. Rozdział 5, czyli wyniki badań i ich analiza, ma charakter szczegółowego raportu, w którym dla każdego etapu prowadzonych badań skoncentrowano się przede wszystkim na omówieniu ilościowym uzyskanych wyników. W mojej ocenie dyskusja wyników powinna mieć bardziej syntetyczny charakter i w znacznie większym stopniu uwzględniać związki przyczynowo-skutkowe określające charakter uzyskanych zależności. Pewnym utrudnieniem analizy przedstawionego materiału badawczego jest bardzo duża liczba symboli i oznaczeń wykorzystanych w pracy. Wynika to oczywiście z dużej liczby analizowanych parametrów systemu obróbkowego, jednak Autor nie zachował w tym zakresie konsekwencji, stosując w pracy zamiennie terminologię typową dla systemów CNC (paragraf 5.2) oraz terminologię opartą o indeksy (paragraf 5.4). Pewne wątpliwości budzi także treść przedstawionych w rozdziale 6 wniosków, które w zdecydowanej większości nie są konkluzjami wynikającymi z przeprowadzonych prac badawczych, tylko zawierają ich syntetyczny opis i wyniki.

Autor nie ustrzegł się drobnych błędów terminologicznych, edytorskich i stylistycznych. Warto chociażby wspomnieć o nieintuicyjnym oznaczeniu na schematach (tj. grot tylko po jednej stronie linii wymiarowej) parametrów kompensacyjnych systemu obróbkowego (np. rys. 4.1) czy niezbyt trafnym opisie osi poziomych na wykresach przedstawiających zmienność parametrów (w paragrafie 5.4.), gdzie zamiast *ilość prób* należało w mojej ocenie zastosować opis *nr kolejnej próby*.

Powyższe uwagi dotyczące strony formalnej nie wpływają w sposób zasadniczy na wartość i ocenę merytoryczną pracy.

### 3 Uwagi krytyczne

Po wnikliwym przestudiowaniu pracy należy stwierdzić, że jest ona generalnie poprawna pod względem merytorycznym i metodycznym, jednak wybrane aspekty dotyczące zastosowanej przez Autora metodyki oraz narzędzi badawczych wymagają sprecyzowania. Najważniejsze z nich zostały już wskazane w poprzednich paragrafach. Poniżej wymienione zostały uwagi i zagadnienia, które w mojej ocenie wymagają dodatkowego wyjaśnienia ze strony Doktoranta:

- w pracy nie przedstawiono przekonującego uzasadnienia wyboru tak dużej liczby analizowanych parametrów systemu obróbkowego,
- opis wykorzystanego w pracy oprzyrządowania kontrolno pomiarowego nie obejmuje informacji o dokładności wykonania i ewentualnym sposobie wzorcowania (dotyczy to w szczególności oprzyrządowania zaprojektowanego i wykopanego w PWR),
- uzasadnienia wymaga postać wzoru formułę kontrolna  $y_4$  (wzór nr 16, str. 138),
- w pracy dość pobieżnie omówiono efekty wdrożenia opracowanych przez Autora procedur kontrolno-pomiarowych i nie przedstawiono danych ilościowych w jaki sposób te rozwiązania przełożyły się na zmniejszenie liczby niezgodności czy podwyższenie stopnia wykorzystania obrabiarek.

## 4 Wniosek końcowy

Praca doktorska mgr inż. Grzegorza Szyszki pt.: *Opracowanie metodyki szybkiej oceny dokładności ustawienia 5-osiowych, wielozadaniowych centrów obróbkowych, kompensacji zdiagnozowanych błędów i potwierdzenie zdolności obrabiarki do realizacji operacji technologicznych* ma charakter eksperymentalny i jest zorientowana na wdrożenie wyników w praktyce przemysłowej. **Przyjęty przez Autora sposób rozwiązania problemu odzwierciedla uwarunkowania realizowanych w PWR operacji technologicznych i został zorientowany na wdrożenie metod i narzędzi poprawiających zdolność jakościową procesu obróbki wielkogabarytowych cienkościennych kadłubów silników odrzutowych nowej generacji.**

Praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy, w tym również wymagania dotyczące programu *Doktorat Wdrożeniowy*, jej tematyka mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i może być dopuszczona do publicznej dyskusji przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej.

