

dr hab. inż. Maciej Majewski  
prof. nadzw. Politechniki Koszalińskiej

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Kamila STATECZNEGO  
z Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

nt.: SYSTEM MANUALNEGO PROGRAMOWANIA  
OBRABIARKI CNC Z ZASTOSOWANIEM  
TECHNOLOGII WIRTUALNEJ RZECZYWISTOŚCI

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Pajor  
Profesor nadzwyczajny ZUT

Koszalin, dn. 07.05.2018r.

dr hab. inż. Maciej Majewski  
prof. nadzw. Politechniki Koszalińskiej  
Wydział Mechaniczny  
Katedry Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych

Koszalin, dn. 07.05.2018r.

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Kamila STATECZNEGO  
z Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki  
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

### nt.: SYSTEM MANUALNEGO PROGRAMOWANIA OBRABIARKI CNC Z ZASTOSOWANIEM TECHNOLOGII WIRTUALNEJ RZECZYWISTOŚCI

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Pajor  
Profesor nadzwyczajny ZUT

*Podstawa opracowania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 10 kwietnia 2018 r. (L.dz. WIMiM/76/2018), do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.*

---

*Ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Statecznego z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, której promotorem jest dr hab. inż. Mirosław Pajor, przedstawiam na podstawie tekstu rozprawy, a także znanych mi prac opublikowanych i wykonanych przez Autora.*

---

## 1. Ocena tematu i koncepcji rozprawy

Celem rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Statecznego było opracowanie i badania doświadczalne systemu do manualnego programowania obrabiarki CNC bezpośrednio na maszynie oraz z zastosowaniem jej modelu wirtualnego.

Zwiększaniu możliwości i wydajności systemów obróbczych towarzyszy cel umożliwienia szybszego i bezbłędnego programowania zaawansowanych procesów obróbki, przy jednoczesnym odciążeniu operatorów ilością danych i wymaganiami. Wdrażanie opracowanego systemu wpływa na wprowadzanie skutecznych i efektywnych systemów wytwarzania dla elastycznej, rekonfigurowalnej lub małoseryjnej produkcji.

Opracowane rozwiązanie wnosi wkład w rozwój i wpływa na możliwość wprowadzania cyberfizycznych systemów produkcyjnych, ponieważ zbudowany nowatorski system programowania wraz z manetkami do interakcji daje nowe możliwości w zakresie komunikacji i współpracy człowieka z maszyną. Zastosowanie technologii wirtualnej rzeczywistości do programowania obrabiarek CNC jest nowoczesnym i przyszłościowym kierunkiem badawczym zapewniającym wysoki poziom interakcji projektanta i układu, przyspieszającym projektowanie i zwiększającym niezawodność systemów. Tematyka pracy jest zatem nowatorska i ważna dla obecnych i przyszłych zastosowań.

Podjętą w rozprawie problematykę oceniam jako oryginalną i nowoczesną. Wybór tematu oceniam jako trafny, ważny ze względu na różnorodne możliwe zastosowania w najnowszych i przyszłych systemach obróbki elementów maszyn i urządzeń.

## **2. Ocena celu, hipotezy i zakresu rozprawy**

Główny cel ocenianej rozprawy doktorskiej stanowi opracowanie systemu do manualnego programowania obrabiarki CNC bezpośrednio na maszynie oraz z zastosowaniem jej modelu wirtualnego. Postawiony cel na pewno ma wymiar naukowy, ponieważ wynika on z rzetelnie przeprowadzonej analizy literatury naukowej i wywiadu wśród rozwiązań komercyjnych, opartych również na najaktualniejszych publikacjach z okresu 2016-2017. Ponadto Autor uwarunkował osiągnięcie celu rozprawy opracowaniem kompleksowego systemu, który złożony będzie z warstwy sprzętowej przyrządów pomiarowych oraz stworzonego oprogramowania określonego jako stacja obliczeniowa do umożliwienia programowania operacji technologicznych obrabiarki CNC.

Wybrany główny cel naukowy obejmuje realizację następujących celów pośrednich, wynikających z kompleksowości proponowanego systemu:

1. Opracowanie i budowa systemu do manualnego przesuwu elementów korpusowych obrabiarki (MPEKO).
2. Opracowanie modułów oprogramowania umożliwiających programowanie wybranych operacji technologicznych obrabiarki CNC.

3. Zbudowanie stanowiska badawczego do realizacji badań doświadczalnych skuteczności działania systemu do manualnego programowania obrabiarki CNC, który będzie złożony z systemu do manualnego przesuwu elementów korpusowych obrabiarki (MPEKO) zintegrowanego z Otwartym Systemem Sterowania O.C.E.A.N., opracowanym w Centrum Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, w ramach realizacji wcześniejszych projektów badawczych.
4. Zbudowanie systemu do manualnego programowania obrabiarki CNC z wykorzystaniem jej wirtualnego modelu. System ten będzie stanowił uzupełnienie systemu MPEKO i będzie umożliwiał programowanie obrabiarki CNC offline bez konieczności korzystania z maszyny. W tym celu opracowano aplikację umożliwiającą odczyt danych z układów peryferyjnych, wizualizację wirtualnego modelu obrabiarki oraz implementację procedur manualnego programowania obrabiarki z wykorzystaniem jej wirtualnego modelu.

Realizacja złożonego celu głównego stanowi podstawę do udowodnienia słuszności hipotezy pracy, która została sformułowana w następujący sposób: *„Zastosowanie programowania manualnego obrabiarki CNC bezpośrednio na maszynie oraz poprzez jej model wirtualny upraszcza procedury jej programowania dla wybranych operacji technologicznych”*. Aby osiągnąć założony cel, przyjęto następujący program pracy:

1. Zaprojektowanie systemu do manualnego przesuwania elementów korpusowych obrabiarki sterowanej numerycznie;
2. Wykonanie stanowiska do manualnego przesuwania elementów korpusowych obrabiarki sterowanej numerycznie;
3. Wykonanie części programowej systemu;
4. Rozwinięcie części sprzętowej i programowej w celu umożliwienia programowania - system MPEKO;
5. Badanie doświadczalne systemu MPEKO;
6. Zaprojektowanie i zaprogramowanie środowiska wirtualnego obrabiarki CNC;
7. Badania porównawcze systemu wirtualnej rzeczywistości z systemem MPEKO dla wybranych technik programowania manualnego z zastosowaniem przestrzeni wirtualnej.

W ramach rozprawy doktorskiej opracowano i przebadano doświadczalnie dwa innowacyjne i w pełni funkcjonalne systemy do intuicyjnego manualnego programowania obrabiarki CNC, które zrealizowano odpowiednio na obrabiarce oraz

z zastosowaniem technologii wirtualnej rzeczywistości i jej modelu wirtualnego. Zbudowane systemy charakteryzują się możliwością programowania wybranych operacji obróbkowych na obrabiarce przez osoby bez specjalistycznych kwalifikacji z zakresu programowania obrabiarek sterowanych numerycznie oraz generowaniem G-kodu na podstawie procedury manualnego programowania, które umożliwia przenoszalność tego kodu na inne urządzenia obróbkowe. Ponadto dokonano zwiększenia funkcjonalności systemu MPEKO poprzez dodanie możliwości zastosowania szybkiego manualnego bazowania przedmiotu obrabianego.

Złożony cel główny oceniam jako jednoznaczny i precyzyjny, wynikający zarówno z tematu rozprawy, jak i z wniosków z analizy literatury. Ponadto precyzyjnie zdefiniowano cele pośrednie do osiągnięcia oraz zakres zadań, analiz i badań dla tych celów podjętych w rozprawie doktorskiej. Sformułowana hipoteza pracy jest w mojej ocenie poprawna i nieoczywista.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje **127** stron druku podzielonego na dziesięć rozdziałów poprzedzonych wykazem symboli i skrótów oraz spisem literatury (**105** pozycji), a także streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozprawa zawiera łącznie **91** rysunków w postaci schematów, wykresów lub fotografii, które w wielu przypadkach zawierają jeszcze po kilka oddzielnych rysunków oraz ponadto **9** tabel. Układ pracy oceniam jako poprawny zarówno co do proporcji poszczególnych części dysertacji, jak i logicznego podziału treści.

W **rozdziale pierwszym** zatytułowanym „*Wprowadzenie*” Autor podaje genezę rozprawy wraz z uzasadnieniem wyboru jej tematu. Przedstawiony tu został również zakres zagadnień zawartych w poszczególnych rozdziałach dysertacji. Ta część stanowi dobre wprowadzenie w tematykę recenzowanej rozprawy.

W **rozdziale drugim** zatytułowanym „*Analiza stanu zagadnienia i przegląd literatury*” Autor przedstawia stan badań z zakresu tematu rozprawy w świetle analizy literatury, kolejno analizując zagadnienia dotyczące:

- pulpitów układów sterowania,
- sposobów programowania obrabiarek,
- manualnego sterowania i programowania obrabiarek CNC,
- wirtualnej rzeczywistości i jej zastosowania w obrabiarkach.

Przedstawiono najaktualniejszą analizę stanu zagadnień wraz z przeglądem literatury z zakresu badań nad technologią manualnego programowania

i zastosowaniem technologii VR w obrabiarkach, na podstawie pozyskanych najnowszych raportów w publikacjach z różnych jednostek naukowo-badawczych, zarówno komercyjnych jak i instytucji naukowych specjalizujących się w tej interdyscyplinarnej dziedzinie.

Autor wykazuje aktualność tematyki rozprawy, uzasadnia ważność nowatorskich prac nad rozwojem naturalnych i intuicyjnych sposobów programowania obrabiarek, w celu odciążenia pracą operatora i szybkiego przyuczania nowych operatorów do obsługi zaawansowanych systemów CNC w warunkach elastycznej i małoseryjnej produkcji.

Należy jednak stwierdzić, że Autor nie ustrzegł się uchybienia tworząc wykaz literatury, które polega na braku konsekwencji w stosowaniu wybranego stylu bibliograficznego. W spisie literatury występują pozycje, w których określone rodzaje informacji są poprzestawiane (dotyczy pozycji nr 1, 4-6, 13, 16, 74), albo widnieje tylko tytuł (nr 28) lub jedynie długa nazwa pliku stanowiąca tytuł publikacji i kończąca się rozszerzeniem PDF (nr 30).

Stwierdzam, że w odniesieniu do zaproponowanego tematu analiza literatury została przeprowadzona w sposób zwięzły, przejrzysty i na poziomie potwierdzającym bardzo dobre przygotowanie mgr inż. Kamila Statecznego do podjęcia tego złożonego problemu naukowego.

W **rozdziale trzecim** zatytułowanym „*Cel, hipoteza, zakres pracy*” Autor definiuje precyzyjnie zakres niezbędnych do zrealizowania zadań mających na celu rozwiązanie postawionych problemów badawczych. Zakres został określony z uwzględnieniem zdefiniowanego tematu, złożonego celu głównego z celami pośrednimi oraz hipotezy rozprawy doktorskiej.

W **rozdziale czwartym** zatytułowanym „*Koncepcja systemu do manualnego programowania obrabiarki CNC*” scharakteryzowano wybrane problemy programowania obrabiarek CNC i określono ograniczenia aktualnych systemów sterowania nimi. Określono cele do zrealizowania, aby powstało innowacyjne rozwiązanie. Przedstawiono opracowany schemat ideowy systemu manualnego przesuwu elementów korpusowych obrabiarki (MPEKO).

W **rozdziale piątym** zatytułowanym „*Konstrukcja systemu MPEKO*” przedstawiono prace dotyczące opracowania konstrukcji manetki sterującej i przeprowadzone testy wybranych rozwiązań konstrukcyjnych z użyciem komercyjnie dostępnych kontrolerów. Doświadczalnie zbadano przebiegi prędkości zadanej i pozycji stołu dla zastosowanych zadajników typu joystick, myszka 3D oraz fizycznie wykonanej manetki z siłomierzem piezoelektrycznym na podstawie opracowanego własnego projektu. Badania wykonano docieklewie z odpowiednią dyskusją wyników przedstawionych na wykresach oraz

uwidoczniono zastosowanie urządzeń na fotografiach. W dalszej konkluzji badań przystąpiono do opracowania manetki z tensometrycznym pomiarem siły, która została przetestowana z zastosowaniem modelowania MES poprzez przeprowadzenie symulacji działania pod obciążeniem. W badaniach symulacyjnych wyznaczono wartości przemieszczeń i naprężeń wywołanych wpływem sił oddziałujących na rękojeść manetki w określonych kierunkach. Ponadto przeprowadzono testy zaprojektowanej manetki z pomiarem tensometrycznym polegające na poruszaniu osią  $X$  obrabiarki VC760, w których uzyskano analogiczne charakterystyki jak dla wykonanej manetki z siłomierzem piezoelektrycznym. Badania potwierdziły tezę, że zastosowanie manipulatorów umieszczonych bezpośrednio na maszynie eliminuje błędy związane z poruszaniem w złym kierunku i zwrocie w stosunku do zamierzonego.

Po podsumowaniu części dotyczącej zrealizowanych badań doświadczalnych, przedstawiono opracowaną konstrukcję manetki głównej systemu MPEKO, która została wykonana przez zespół badawczy Instytutu Technologii Maszyn ZUT w Szczecinie oraz stanowiła drugi stworzony prototyp zadajnika. Zbudowana manetka z tensometrycznym pomiarem siły charakteryzuje się ergonomicznym uchwytem oraz została wyposażona w przyciski. Umożliwia ona pomiar momentu skręcającego i mierzenie siły w kierunkach ortogonalnych. Rozpatrzono również różne warianty konstrukcyjne elementów podatnych skrętnej manetki sterującej oraz przeprowadzono ich analizę MES. W pracy przedstawiono model zaprojektowanej i fotografie wykonanej fizycznie manetki MPEKO do pomiaru sił w dwóch kierunkach, z rękojeścią zamontowaną na dwóch niezależnych równoległych konstrukcjach złożonych z dwóch belek tensometrycznych.

Według opracowanej koncepcji system MPEKO ma składać się z manetek, układu pomiarowego, układu do przetwarzania sygnałów, modułu do realizacji programowania manualnego obrabiarki, układu sterowania obrabiarki CNC i wyświetlacza operatora. Przedstawiono wybraną warstwę pośrednią w zbudowanym interfejsie operator-maszyna, którą stanowi platforma pomiarowo-kontrolna PXI firmy National Instruments, z możliwością programowania z użyciem dedykowanego języka LabVIEW, do której zadań należy: pomiar i odczyt sygnałów z manetek, przetwarzanie sygnałów, wysyłanie sygnałów do systemu sterowania obrabiarki oraz realizacja procedur programowania manualnego obrabiarki CNC.

Następnie przedstawiono schemat blokowy zaprojektowanego systemu do manualnego programowania obrabiarki MPEKO, który składa się z elementów wejściowych: manetek i sondy pomiarowej, elementu wejściowo-wyjściowego: monitora do wspomagania programowania manualnego, platformy PXI do przetwarzania sygnałów i generowania programu do wykonania oraz obrabiarki CNC wraz z systemem sterowania. Przedstawiono obrabiarkę do której zrealizowano

sterowanie systemem MPEKO - obrabiarka z Fabryki Obrabiarek Precyzyjnych AVIA typ VC760.

Autor bardzo starannie i precyzyjnie opisuje otwarty system sterowania O.C.E.A.N., pokazując fotografie zbudowanych układów systemu, a w tym warstwę aplikacyjną systemu MPEKO, zawierającą m.in. diagramy opracowanych bloków programowych, pętli programowania, podprogramów do generowania danych sterujących obrabiarką. Przedstawiono przetwarzanie sygnałów w systemie MPEKO, komunikację pomiędzy systemem MPEKO i O.C.E.A.N., interfejs operator-obrabiarka obejmujący manetki i monitor dotykowy, zrealizowany graficzny interfejs użytkownika systemu mający wiele możliwości, moduły programowe do manualnego programowania obrabiarki, opracowane procedury programowania manualnego wraz z przykładami ilustrującymi, i inne.

W **rozdziale szóstym** zatytułowanym „*Badania doświadczalne systemu MPEKO*” Autor prezentuje kompletne stanowisko badawcze do manualnego programowania obrabiarki CNC uwidocznione na fotografii. Przedstawiono plan badań eksperymentalnych zaprojektowanego, zbudowanego i oprogramowanego systemu MPEKO do manualnego programowania obrabiarki CNC, który sprawdza funkcjonalność tego systemu na podstawie reprezentatywnych operacji technologicznych, mających szerokie zastosowanie w praktykach przemysłowych, a dotyczących pomiarów i operacji obróbki przedmiotów. Przeprowadzone badania udokumentowano w sposób bardzo rzetelny i obrazowy, konsekwentnie realizując cel weryfikacji systemu w sprawnym działaniu.

Następnie przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dla procesu programowania i bazowania za pomocą systemu MPEKO, które potwierdziły możliwości uproszczenia programowania obrabiarki, łatwości użytkowania kompleksowego systemu programowania i efektywności pracy. Otrzymane wyniki skuteczności, a w tym czasy wykonania operacji, porównano z czasami tych samych działań z wykorzystaniem komercyjnie dostępnej obrabiarki CNC obsługiwanej przez doświadczonego operatora wykorzystującego standardowe interfejsy dostarczane przez producenta. Wyniki badań doświadczalnych pozwoliły na wyciągnięcie obszernych i istotnych wniosków, które ukazują skuteczność opracowanego rozwiązania i jego jakość użytkową.

W **rozdziale siódmym** zatytułowanym „*Model środowiska wirtualnego w zastosowaniu do obrabiarki CNC*” Autor przedstawia opracowane rozwiązanie, które stanowi system manualnego programowania obrabiarki CNC z zastosowaniem technologii wirtualnej rzeczywistości, mający wiele zalet i łączący nowe możliwości. Opracowany interfejs zawiera komputer klasy PC, urządzenia do pomiaru położenia kończyn górnych operatora, rękawice do pomiaru położenia palców, urządzenie do pomiaru orientacji głowy, wyświetlacz typu HMD (Head Mounted Display)



przystosowany do wirtualnej lub rozszerzonej rzeczywistości dla obserwacji obrabiarki i efektów pracy.

Na odpowiednim poziomie szczegółów i z solidną analizą zagadnienia, przedstawiono budowę układów do skanowania położenia kończyn górnych operatora, a w tym układy pomiarowe wraz z platformą obliczeniową. Ta część pracy stanowi również duże i ważne zadanie. Zarówno testy opracowanych układów jak i analizy ich możliwości zostały zrealizowane ze starannością oraz dobrze udokumentowane poprzez zbiory wyników i oceny porównawcze, aż po powiązane ze sobą fotografie pracy z systemem.

Ponadto przedstawiono opracowaną aplikację wirtualnej rzeczywistości VR, która obejmuje wiele typów plików dając aktualnie duże możliwości, umożliwiającą rozwój rozwiązania. Aplikacja VR realizuje m.in. zarządzanie danymi w procesie ich przetwarzania, generowanie środowiska VR z procedurami manualnego programowania obrabiarki CNC, obsługiwane urządzeń składających się na interfejs operatora (w tym skanery ruchu), generowanie programu wyjściowego w postaci G-kodu, generowanie obrazu 3D w sposób stereoskopowy. Autor przedstawia również procedury programowania manualnego obrabiarki CNC z zastosowaniem technologii wirtualnej rzeczywistości, opatrzone sekwencjami obrazów weryfikacji ich działania.

W **rozdziale ósmym** zatytułowanym „*Badania porównawcze technik programowania manualnego z zastosowaniem przestrzeni wirtualnej*” Autor kontynuując realizację zadań badawczych według „*Planu badań eksperymentalnych systemu MPEKO*”, dokonał oceny funkcjonalności opracowanego systemu do manualnego programowania obrabiarki CNC, z zastosowaniem wirtualnej rzeczywistości. Przedstawiono zestawienie wyników eksperymentów dotyczące porównania czasów programowania z wykorzystaniem komercyjnie dostępnej obrabiarki CNC, manualnego programowania z manetkami MPEKO oraz manualnego programowania w środowisku wirtualnym. Dokonano podsumowania analizą wyników, które świadczą o jakości rozwiązania.

W **rozdziale dziewiątym** zatytułowanym „*Praktyczne zastosowanie systemu*” zostało przytoczonych kilka ważnych informacji z punktu widzenia użyteczności stworzonego rozwiązania, które po prezentacji na Międzynarodowych Targach Poznańskich MACHTOOL Innowacje-Technologie-Maszyny zostało wyróżnione Złotym Medalem w dziedzinie Nauka dla Gospodarki 2014 za „*System do manualnego programowania obrabiarki CNC*”. Osiągnięcia zostały również uznane jako mające istotne znaczenie dla innowacyjnej gospodarki regionu Pomorza Zachodniego (certyfikat wydany przez Marszałka woj. Zachodniopomorskiego). Ponadto aktualnie trwa proces komercjalizacji wybranych elementów pracy doktorskiej w formie wdrożeń w porozumieniu z firmą Promotech i międzynarodowym koncernem Cargotec.

Oдноśnie potencjalnych osiągnięć kolejnego rodzaju: *Jeśli Autor chciałby podzielić się tą informacją, to co może stanowić wynalazek w świetle ewentualnych patentów do uzyskania przez Autora i współautorów, z rozwiązań związanych z rozprawą doktorską? Jakie są możliwości patentowania opracowanych rozwiązań?*

W **rozdziale dziesiątym** zatytułowanym „Wnioski końcowe” Autor przedstawia szeroko efekty końcowe realizacji celów rozprawy doktorskiej i aspekty dalszych możliwości rozwoju opracowanych rozwiązań.

Zamieszczony po rozdziale dziesiątym spis literatury zawiera 105 pozycji, do których Autor prawidłowo odwołuje się w tekście pracy.

#### **4. Ocena poziomu naukowego rozprawy**

Pod względem poziomu naukowego, pracę mgr inż. Kamila Statecznego oceniam bardzo dobrze, przede wszystkim ze względu na oryginalne osiągnięcia w zakresie opracowania, rozwoju i wdrażania nowych sposobów programowania obrabiarek CNC.

W ramach pracy zaproponowano koncepcję manualnego programowania obrabiarki CNC, pozwalającą na rezygnację ze znużającego pisania programów obróbkowych z wykorzystaniem typowych języków programowania obrabiarek. Postęp w dziedzinie robotyki na świecie, w zakresie efektywnego i skutecznego sterowania różnymi konfiguracjami robotów był wyzwaniem do stworzenia innowacyjnego rozwiązania dla systemu manualnego programowania obrabiarki CNC, który stworzono w dwóch wariantach: na rzeczywistej maszynie za pomocą systemu MPEKO oraz na maszynie wirtualnej z zastosowaniem wirtualnej rzeczywistości.

Zbudowano układ pozwalający na przesuwanie elementów korpusowych obrabiarki CNC zależnie od siły wywieranej przez operatora na specjalne manetki umocowane na tych elementach, co pozwoliło na zrezygnowanie z konwencjonalnego sterowania za pomocą przycisków lub pokręteł, które sprzyjają powstawaniu typowych błędów polegających na wybraniu nieodpowiedniej osi lub jej zwrotu. Wykorzystanie zaproponowanego i wykonanego fizycznie układu jako interfejsu pozwoliło na opracowanie procedur do programowania manualnego obrabiarki, poprzez zapamiętywanie punktów charakterystycznych i generowanie na ich podstawie programu dla systemu sterowania obrabiarką.

W ramach pracy zaprojektowano również system z technologią wirtualnej rzeczywistości, który pozwala na programowanie obrabiarki w dowolnej odległości od stanowiska obróbki. Nowatorskie rozwiązanie umożliwia wykorzystanie wirtualnej rzeczywistości z technologiami immersyjnymi, które oparto na wykorzystaniu: okularów z projekcją stereoskopową, systemu śledzącego w postaci rękawic, czujników

orientacji, odpowiednio generowanego obrazu. Operator uzyskuje efekt przebywania w środowisku trójwymiarowym, które umożliwia sterowanie i programowanie wirtualnej obrabiarki z możliwością podglądu efektu pracy narzędzia, poprzez symulacje obróbki skrawaniem w czasie rzeczywistym.

Zrealizowano badania eksperymentalne i symulacyjne opracowanych systemów pod kątem możliwości ich zastosowań do komercyjnie dostępnych wybranych systemów programowania urządzeń obróbkowych. Stwierdzono, że programowanie jest intuicyjne i upraszcza procedury przygotowania wybranych operacji technologicznych, redukuje możliwość popełniania błędów związanych z wybraniem nieodpowiedniej osi ruchu lub jej zwrotu oraz umożliwia jednoczesne poruszanie wszystkimi osiami maszyny, co skraca czas operacji bazowania przedmiotu obrabianego. Porównano czasy programowania manualnego z komercyjnym systemem, które są porównywalne, sprawdzono, że opracowane rozwiązanie pozwala na uproszczenie procedury programowania wybranych operacji technologicznych, ponieważ zdefiniowanie parametrów początkowych trwa krócej.

Opracowane rozwiązanie pozwala na poruszanie osiami obrabiarki ze zmienną prędkością, która zależy od przyłożonej siły oraz w trybie dokładnym charakteryzującym się dużą rozdzielczością, w którym przesunięcie wyrażone jest nawet w pojedynczych mikrometrach. Ponadto system MPEKO wyposaża obrabiarkę CNC w możliwość ręcznego sterowania. Programowanie obrabiarki CNC ulepszono pod względem zwiększenia efektywności i intuicyjności do tego stopnia, że w celu stworzenia prostego programu wystarczy wykorzystywać dwa podstawowe przyciski na zbudowanej manetce i kilka przycisków na monitorze. W systemie wykorzystującym wirtualną rzeczywistość, operator interaktywnie komunikując się z maszyną może programować ją poprzez kilka prostych gestów. Powyższe osiągnięcia stanowią istotny wkład naukowy w dziedzinę interaktywnego sterowania urządzeniami technologicznymi.

Opracowane systemy dostarczają możliwości programowania podstawowych procesów technologicznych w sposób intuicyjny, zwalniając operatora z konieczności znajomości języków programowania, automatycznie generując G-kod z zastosowaniem techniki uczenia maszyny ruchów składowych definiujących trajektorię obróbki. Takie podejście ogranicza liczbę błędów popełnianych podczas programowania.

Potwierdzono możliwości szerszych zastosowań opracowanego systemu manualnego programowania obrabiarki CNC poprzez prowadzone prace nad komercjalizacją tego rozwiązania. Rozprawa doktorska wskazuje na duże możliwości rozwoju zaproponowanego rozwiązania oraz na jego potencjał wdrożeniowy. Natomiast opracowany system manualnego programowania na maszynie wirtualnej z zastosowaniem wirtualnej rzeczywistości dostarcza możliwości pozwalające na

przeprowadzenie pionierskich i trudnych eksperymentów symulacyjnych odkrywających nowe metody i możliwości programowania obrabiarek CNC. Ponadto Autor, w efekcie swoich prac nad autorskim interfejsem sprzętowym i programowym dla operatora, wskazał istnienie szerokich możliwości rozwoju tych rozwiązań, a w tym zmianę sposobów reprezentacji i prezentacji danych, zastosowanie komunikacji głosowej oraz stosowanie wzorców i kreatorów dla programowania maszyn CNC.

Zaproponowane podejście do programowania obrabiarek CNC w ramach rozprawy doktorskiej oceniam jako nowatorskie i niespotykane w komercyjnych systemach. Opracowane układy i oprogramowanie są na wysokim poziomie innowacyjności i technologii. Wymienione powyżej najważniejsze osiągnięcia świadczą o dociekliwości naukowej i eksperymentalnej Autora oraz o konsekwentnym dążeniu do kompleksowego rozwiązania problemów naukowych określonych przez hipotezę i złożony cel pracy.

## 5. Ocena poziomu redakcyjnego rozprawy

Rozprawa została napisana poprawnym językiem technicznym i zredagowana bardzo starannie. W niektórych jej fragmentach występują drobne i nieliczne literówki, które zaznaczyłem bezpośrednio w pracy. Zapewne wynikają one z pośpiechu w pracach nad ukończeniem niektórych części dysertacji. Uwagi dotyczące strony edytorskiej pracy są następujące:

Lp.	Strona:	Linijka:	Jest:	Powinno być:
1	27	7	... w kilku osiach jednocześnie ...	... w kilku osiach jednocześnie ...
2	33	6	... przemieszania ...	... przemieszczania ...
3	33	18	... niepotrzebne ...	... niepotrzebnie ...
4	45	5	... których ...	... której ...
5	70	10	... 4-rech ...	... 4-ech ...
6	117	30	... udało się pozycjonować obrabiarkę ...	... udało się pozycjonować elementy obrabiarki lub przedmiotu ...

Należy jednak podkreślić, że Autor ustrzegł się bardzo wielu powszechnie popełnianych błędów redakcyjnych, a wykazane uchybienia są nieliczne w odniesieniu do objętości rozprawy. W rezultacie nie wpływają one na czytelność przekazywanych treści, a tym samym na poziom merytoryczny rozprawy i nie pomniejszają jej wartości.

## 6. Wniosek końcowy

W świetle dokonanej analizy i sformułowanych ocen rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila STATECZNEGO z Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie nt.: SYSTEM MANUALNEGO PROGRAMOWANIA OBRABIARKI CNC Z ZASTOSOWANIEM TECHNOLOGII WIRTUALNEJ RZECZYWISTOŚCI, której promotorem jest dr hab. inż. Mirosław Pajor prof. nadzw. ZUT, mogę stwierdzić, iż Autor:

- wybrał nowoczesną tematykę rozprawy, ważną dla opracowania, rozwoju i wdrażania nowych sposobów programowania obrabiarek CNC;
- zaproponował nowatorskie i niespotykane w komercyjnych systemach podejście do programowania obrabiarek CNC - rozwiązał wiele dużych zadań i ważnych problemów naukowych, a opracowane układy i oprogramowanie są na wysokim poziomie;
- opracował innowacyjny system do manualnego programowania obrabiarki CNC bezpośrednio na maszynie;
- opracował innowacyjny system do manualnego programowania obrabiarki CNC z zastosowaniem jej modelu wirtualnego (środowiska wirtualnej rzeczywistości dla obrabiarki CNC);
- opracował system do manualnego przesuwania elementów korpusowych obrabiarki CNC;
- opracował innowacyjną konstrukcję i fizycznie wykonał manetkę z siłomierzem piezoelektrycznym;
- opracował innowacyjną konstrukcję manetki głównej systemu do manualnego programowania obrabiarki CNC, z tensometrycznym pomiarem siły;
- przyjął szeroki i spójny zakres zagadnień rozpatrywanych w rozprawie;
- wykazał się umiejętnościami w zakresie planowania badań eksperymentalnych i symulacyjnych oraz obiektywnością naukową w ocenie uzyskanych wyników;
- uzyskał wyniki, które mogą być wykorzystane w innych pracach badawczych i rozwojowych;
- w prawidłowy i metodyczny sposób przeprowadził proces dowodzenia hipotezy rozprawy doktorskiej;
- stworzył podstawy do dalszych badań i zastosowań.

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do ważnego obszaru badawczego, związanego z opracowaniem innowacyjnych sposobów sterowania maszynami CNC i ich programowania. Godna podziwu jest pracowitość Autora, który wykonał wartościową pracę eksperymentalną i symulacyjną oraz wykazał się dogłębną znajomością warsztatu naukowego.

Pracę oceniam jako bardzo przydatną dla celów praktycznych. Według mnie jest to szczególnie ważne w obecnych czasach, kiedy wymaga się konkretnych rozwiązań problemów technicznych. Autor w sposób jasny i jednoznaczny wykazał czego dokonał w trakcie realizacji zadań badawczych i eksperymentalnych, potrafił wyciągnąć z nich poprawne i logiczne wnioski sformułowane w oparciu o odpowiednią podbudowę teoretyczną.

Mgr inż. Kamil STATECZNY opanował na wymaganym poziomie współczesne metody organizacji badań i właściwe dla nich narzędzia, w tym narzędzia informatyczne, służące do rozwiązywania złożonych, wielowariantowych problemów badawczych. Opracowane rozwiązanie wpisuje się do osiągnięć o światowym zasięgu, zespołu badawczego Instytutu Technologii Maszyn ZUT w Szczecinie.

Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie „budowa i eksploatacja maszyn” posiada oryginalne cechy nowości. Koncepcję rozwiązania problemów naukowych oceniam wysoko. Zakres zagadnień ujętych w rozprawie jest komplementarny, a uzyskane wyniki mają dużą wartość naukową i użyteczną. Należy również podkreślić fakt zdobycia Złotego Medalu dla stworzonych rozwiązań, w dziedzinie Nauka dla Gospodarki na Międzynarodowych Targach Poznańskich.

Na podstawie przedstawionej analizy stwierdzam, że rozprawa doktorska w bardzo dobrym stopniu spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Ponadto mając na uwadze uzyskane efekty, wysoką merytoryczną wartość recenzowanej rozprawy i wysoki poziom jej opracowania, **przedkładam Wysokiej Radzie wniosek o jej wyróżnienie.**



.....  
/ Maciej Majewski /