

Dr hab. inż. Damian Gąsiorek, prof. PŚ.
Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej
Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Ul. Konarskiego 18A
44-100 Gliwice
e-mail: *Damian.Gasiorok@polsl.pl*

Gliwice 15.01.2025 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Zarzecznego

zatytułowanej

„Budowa inteligentnej obrabiarki do frezowania promieni soczewek”.

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia L.dz. WIMiM/319/2024 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna dr hab. inż. Krzysztofa Danileckiego, prof. ZUT, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

1. Zakres rozprawy

Kiedy w 2011 roku na konferencji w Davos pojawiło się pojęcie 4 rewolucji przemysłowej na świecie poszukiwano technik oraz technologii, które będą ją wspierały. Jedną z ważniejszych technologii, która stała się filarem przemysłu 4.0 była robotyzacja.

Inteligentna maszyna to urządzenie lub system, który potrafi uczyć się, rozumować, podejmować decyzje lub dostosowywać się do zmieniających się warunków, często dzięki zastosowaniu sztucznej inteligencji (AI). Frezarki CNC to przykład inteligentnych maszyn w tym kontekście, ponieważ potrafią realizować zaprogramowane zadania, monitorować swoje działania, a w niektórych przypadkach nawet dostosowywać parametry pracy w zależności od rodzaju obrabianego materiału czy wymagań projektu.

Inteligentna frezarka w kontekście przemysłu 4.0 to przykład maszyny, która nie tylko wykonuje swoje zadania, ale jest także zintegrowana z systemami cyfrowymi i sieciami, co umożliwia optymalizację procesów produkcyjnych oraz większą automatyzację.

Przemysł 4.0 odnosi się do czwartej rewolucji przemysłowej, której celem jest wprowadzenie zaawansowanych technologii takich jak sztuczna inteligencja (AI), Internet rzeczy (IoT), robotyka, analiza danych w czasie rzeczywistym, a także automatyzacja procesów produkcyjnych. W ramach tej rewolucji maszyny, w tym frezarki, powinny być wyposażone w szereg inteligentnych funkcji:

1. **Monitorowanie w czasie rzeczywistym** – Frezarka może być wyposażona w czujniki, które zbierają dane o temperaturze, drganiach, obciążeniu, zużyciu narzędzi, itp. Dzięki tym danym maszyna może przewidywać usterki i zapobiegać awariom.
2. **Autonomiczne podejmowanie decyzji** – Na podstawie danych zebranych w czasie rzeczywistym, maszyna może samodzielnie dostosowywać parametry obróbki (np. prędkość posuwu, głębokość skrawania) w celu uzyskania optymalnej jakości wyrobu.
3. **Integracja z systemami ERP/MES** – Frezarka może być zintegrowana z systemami zarządzania produkcją (np. ERP – Enterprise Resource Planning, MES – Manufacturing Execution Systems). Dzięki temu można śledzić postęp produkcji, zlecać zadania maszynom oraz kontrolować dostępność materiałów i narzędzi.
4. **Analiza danych i predykcja** – Zbierane dane mogą być analizowane przez zaawansowane algorytmy, co pozwala na przewidywanie przyszłych potrzeb, optymalizację procesów oraz redukcję błędów. Może to obejmować np. analizę zużycia narzędzi i zaplanowanie ich wymiany w odpowiednim czasie.
5. **Zdalne sterowanie i diagnostyka** – W ramach Przemysłu 4.0 maszyny, w tym frezarki, mogą być sterowane zdalnie, a także poddawane diagnostyce przez specjalistów, którzy monitorują stan maszyny z dowolnego miejsca na świecie.

Takie podejście sprawia, że produkcja staje się bardziej elastyczna, precyzyjna i efektywna, a także pozwala na szybsze reagowanie na zmiany w zapotrzebowaniu i zwiększenie jakości produktów.

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie i budowa „inteligentnej” obrabiarki do zębatego frezowania soczewek, wyposażonej w zaawansowany system monitorowania stanu powierzchni i geometrii obrabianej soczewki w trybie automatycznym.

Rozprawa doktorska obejmuje 100 stron tekstu bez bibliografii, którą stanowi 60 pozycji literaturowych. Praca podzielona została na 9 rozdziałów wraz z podrozdziałami. Na początku pracy Autor zestawił streszczenie pracy w języku polskim i angielskim.. Zakończenie pracy stanowi podsumowanie pracy.

Recenzowana rozprawa mieści się w szeroko pojętej dyscyplinie naukowej – inżynieria mechaniczna.

Praca Autora zrealizowana została z ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Stanowi doskonały przykład współpracy przemysłu z nauką, a ich efektem jest wdrożenie, które może poszerzyć ofertę Przedsiębiorstwa. Jednostką naukową jest Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, a partnerem przemysłowym (wdrożeniowym) Autocomp Management sp. z o.o.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

We wstępie pracy, który stanowi rozdział pierwszy pracy, Doktorant opisuje bezpośrednią przyczynę podjęcia tematu oraz wymagania stawiane urządzeniom, które są przedmiotem rozprawy. Wstęp stanowi zaledwie pół strony. Ze względu na specyfikę przedsiębiorstwa, z którym realizowany był doktorat wdrożeniowy, Autor zdecydował się na opracowanie autorskiego rozwiązania obrabiarki do frezowania soczewek, wyposażonej w zaawansowany system monitorowania stanu powierzchni i geometrii obrabianej soczewki w trybie automatycznym.

Rozdział drugi stanowi analizę stanu zagadnienia, a w szczególności zastosowania soczewek. Ze względu na potrzeby rynkowe, Auto pracy wskazuje na potrzebę innowacyjnych rozwiązań w zakresie obróbki soczewek, która według Autora jest podyktowana:

- rosnącymi wymaganiami jakościowymi,
- wydajnością produkcji,
- redukcją kosztów.

W podrozdziale 2.1 Autor przedstawia kilka rozwiązań maszyn CNC znanych światowych marek: Satisloh, Optotech, Schneider.

W przedstawionych maszynach tych firm wskazał mocne i słabe strony ich wyposażenia i możliwości przy produkcji soczewek.

W podrozdziale 2.2. Autor opisuje na czym polega dokładność obróbki. Wskazuje na znaczący wpływ temperatury na pracę urządzeń i ich dokładność oraz możliwości stosowania ultradźwięków w procesie frezowania soczewek. Podrozdział ten podsumował akapitem stwierdzającym potrzebę rynkową obrabiarek do frezowania sfer w soczewkach, które posiadały by system kompensacji błędu nastawienia narzędzia względem soczewki w sposób automatyczny.

Rozdział drugi stanowi 12,5 strony pracy.

Rozdział trzeci pracy doktorskiej to cel i zakres pracy. Artur wskazuje że na podstawie analizy literatury produkcja soczewek jest obszarem niszowym, a zakres dostępnej literatury jest sporadyczny. Autor stwierdza, że niniejsza praca wpisuje się w trend automatyzacji procesów produkcyjnych i stawia sobie za cel główny budowę innowacyjnej inteligentnej obrabiarki do zgrubnego frezowania soczewek, wyposażonej w zaawansowany system monitorowania stanu powierzchni i geometrii obrabianej soczewki w trybie automatycznym. Do osiągnięcia celu doktorant proponuje harmonogram działań projektowo badawczych, który realizował w ramach doktoratu wdrożeniowego.

- Opracowanie projektu konstrukcyjnego obrabiarki do frezowania wstępnych soczewek wraz z projektem układu CNC jej sterowania,
- wykonanie prototypu obrabiarki do frezowania wstępnych soczewek, oraz jej układu sterowania,
- analiza błędów wytwarzania soczewek i opracowanie koncepcji wykrywania i korekcji tych błędów opracowanie procedur korekcyjnych,
- analizy symulacyjne procedur korelacji błędów pod kątem ich efektywnego działania i korygowania błędów podczas wstępnej frezowania soczewek,
- implementacja systemu korekcyjnego na prototypie obrabiarki oraz implementacja procedur korekcji w systemie sterowania obrabiarki,
- badania doświadczalne procedur korekcji błędów w rzeczywistych warunkach produkcyjnych,
- analiza porównawcza wyników badań eksperymentalnych procedur korekcji błędów na zaprojektowanej obrabiarce realizowanych w trybie automatycznym w zestawieniu z tradycyjną procedurą wytwarzania i kontroli ręcznej.

na końcu rozdziału doktorant formułuje hipotezę: *istnieje możliwość zaprojektowania systemu automatycznej kompensacji błędów wytwarzania dla obrabiarki do wstępnej frezowania soczewek, efektywnie kompensującego wybrane błędy obróbki soczewek.*

Cel i zakres pracy stanowi 2 strony maszynopisu

Rozdział czwarty stanowi „Przykładowy proces technologiczny soczewki”. Wydaje się, że po słowie technologiczny powinien być jeszcze czasownik wykonania. Pod głównym punktem autor nie zawarł tekstu, gdzie można by się było spodziewać, że wymieni punkty składającym się na proces, a następnie je opíše. Autor postanowił zrobić to w poszczególnych podrozdziałach:

- przygotowanie technologii,
- przecinanie na płytki,
- matowanie,
- szlifowanie na równoległość,
- zaokrąglanie,
- frezowanie promienia numer 1,
- frezowanie promienia numer 2,
- szlifowanie, polerowanie strony numer 1,
- szlifowanie, polerowanie strony numer 2,
- centrowanie,
- kontrola jakości.

Rozdział ten to aż 34 strony pracy. Pozwala zrozumieć cały proces jaki potrzebny jest do wytworzenia soczewki. Rozdział ten zawiera dużo rysunków oraz zdjęć, które w większości są autorskie.

Rozdział piąty rozprawy doktorskiej stanowi opis procesu frezowania powierzchni sferycznych. W rozdziale tym znajdują się 2 podrozdziały klasyfikacja błędów wykonawczych w procesie frezowania oraz monitorowanie procesu frezowania stosowane w przemyśle optycznym. W rozdziale tym doktorant wymienia błędy wykonawcze powstałe na powierzchni ze względu na:

- błąd nieciągłości powierzchni promienia w środku osi obrotu soczewki,
- błąd niewłaściwej wartości promienia,
- błąd asferyczny.

Podczas opisywania pomiaru dokładności i monitorowania procesów frezowania stosowanego w przemyśle optycznym autor stwierdza, że pomiar pośredni wykonywany jest manualnie. Producent soczewek musi posiadać rozbudowaną bazę sprawdzianów. Procedura pomiarowa wydaje się mało efektywna w przypadku próby automatyzacji procesu frezowania i automatycznego wyznaczania korekty ustawienia freza.

Rozdział w całości zajmuje 10 stron pracy doktorskiej.

W kolejnym **rozdziale szóstym** inteligentna maszyna do frezowania soczewek doktorant opisał architekturę obrabiarki i strukturę geometryczno-ruchową. Rozdział ten z rysunkami to zaledwie 6 stron pracy.

Rozdział siódmy „Koncepcja monitorowania procesu szlifowania oparta o automatyczny system kompensacji błędu”. Pod głównym rozdziałem brak tekstu. W podrozdziale 7.1 autor opisuje „badania symulacyjne autonomii automatycznego systemu kompensacji błędu”. Doktorant wymienia kilka rodzajów błędów, które mogą powstać w trakcie nastawienia obrabiarki jak i w trakcie obróbki seryjnej:

- naprężenia termiczne spowodowane nagrzewaniem się korpusów maszyny w trakcie obróbki.
- błędy geometryczne części składowych maszyny,
- błędy montażowe maszyny,
- zużycie freza garnkowego.

Według autora czynniki te mają bezpośredni wpływ na sumaryczny błąd. Koncepcja automatycznej korekcji narzędzia zakłada śledzenie odchyłek obrabianej soczewki i na tej podstawie opracowanie procedur kompensacji. Autor nie zakłada monitorowania konstrukcji obrabiarki oraz zużycia narzędzia ze względu na szereg problemów technicznych i trudności do implementacji technicznej z uwagi na stopień komplikacji i koszty. Do monitorowania przygotówki zaproponował sensor laserowy w postaci profilometru firmy Microepsilon typ: ScanControl 2500-50/BL. Decyzję wyboru narzędzia pomiarowego w postaci profilometru

laserowego dokonał porównując wyniki pomiarów narzędziem tradycyjnym jakim jest sferometr i profilometru laserowego. Wyniki pomiarów zostały zestawione w tabeli 7.1 oraz na wykresie 7.2. W następnym kroku dzięki reprezentacji Denavita-Hartenberga na rysunku 7.3 przedstawił schemat kinematyki obrabiarki z przypisanymi układami współrzędnych. Dla każdego członu wyznaczył macierz transformacji jednorodnej T. Dla analizowanej obrabiarki wyznaczył 6 takich układów współrzędnych. Następnie wyznaczył model kinematyki prostej zaprojektowanej obrabiarki. W kolejnym kroku wskazał metodę obliczenia średnicy D, która faktycznie obrabia soczewkę i zależna będzie od 4 wspomnianych wcześniej w pracy błędów położenia narzędzia względem soczewki. W kolejnym kroku doktorant przygotował symulację wirtualne, które polegają na wygenerowaniu pojedynczej ścieżki narzędzia, którego oś jest przesunięta względem osi obrotu soczewki o wartość f. Autor dokonał podziału soczewek na 3 grupy ze względu na stosunek promienia do średnicy R do d. Dla przyjętych 3 grup wykonał symulację, a na wykresach 7.11-7.16 przedstawił wyniki badań. Zaproponowaną procedurę do korygowania błędów zaproponował do zastosowania na zaprojektowanej obrabiarence do obróbki wstępnej soczewek. W kolejnym kroku doktorant prowadził badania eksperymentalne automatycznego systemu kompensacji błędu. Badania eksperymentalne polegały na wykorzystaniu modeli matematycznych zbudowanych na potrzeby automatycznego systemu kompensacji błędu pozycji narzędzia względem soczewki do nastawienia frezarki na promień $R = 34,04$. Na rysunkach 7.18-7.19 przedstawił wyniki badań eksperymentalnych. Na końcu rozdziału porównał metody monitorowania procesu wersji tradycyjnej i zaproponowanej w niniejszej rozprawie. Zestawienie porównawcze zostało ujęte w tabeli 7.2.

Kolejnym elementem pracy – **rozdział ośmy** - jest podsumowanie i wnioski do pracy doktorskiej. w których Doktorant odniósł się do wyników badań doświadczalnych. Na koniec w podrozdziale 8.1 doktorant przedstawił wpływ wykonanej pracy na bezpośrednią działalność firmy, w której doktorat był wdrażany.

3. Najważniejsze osiągnięcia pracy

Doktorant w Celu pracy postawił hipotezę: *istnieje możliwość zaprojektowania systemu automatycznej kompensacji błędów wytwarzania dla obrabiarki do wstępnego frezowania soczewek, efektywnie kompensującego wybrane błędy obróbki soczewek.*

Do najważniejszych osiągnięć badawczych przedstawionej pracy doktorskiej należy zaliczyć:

- W ramach pracy Autor opracował i wykonał fizyczną obrabiarkę CNC – frezarkę do frezowania wstępnego soczewek, wyposażonej w system automatycznej kompensacji błędów ustawienia narzędzia.
- Zaprojektowano i wytworzono prototyp obrabiarki, która umożliwiła redukcję strat materiałowych, wynikających z niedokładności procesu frezowania.
- Przeprowadzono badania symulacyjne procedur korekcji błędów, a wyniki badań symulacyjnych pozwoliły na wstępną weryfikację skuteczności proponowanej procedury kompensacji błędów ustawienia narzędzia frezującego.
- Wyniki badań symulacyjnych frezowania soczewki z zastosowaniem automatycznego systemu korekcji błędów ustawienia narzędzia poddano analizie porównawczej z tradycyjną ręczną technologią korygowania błędów. W wyniku porównania okazało się, że zaproponowana w pracy doktorskiej metoda znacznie przewyższa metody tradycyjne.
- Zaproponowany automatyczny system kompensacji błędów pozwala w przyszłości na możliwość pełnej automatyzacji procesu produkcyjnego.
- Wprowadzenie obrabiarki zintegrowanej systemem kompensacji pozwala na zminimalizowanie wpływu czynnika ludzkiego na precyzję i jakość produkcji.
- Zaproponowane rozwiązanie należy traktować jako innowacyjne i wzmacniające dobry wizerunek firmy, dla której wykonany był doktorat wdrożeniowy.
- Innowacyjna obrabiarka z automatycznym systemem kompensacji błędów pozwala na szybsze i bardziej elastyczne dostosowanie procesów produkcyjnych do potrzeb klienta i specyfikacji technicznych.
- Doktorant potwierdził zawartą w pracy hipotezę, która zakłada, że istnieje możliwość zaprojektowania systemu automatycznej kompensacji błędów wytwarzania dla obrabiarki do wstępnego frezowania soczewek efektywnie kompensującego wybrane błędne obróbki soczewek.

4. Uwagi do pracy

Praca dotyczy złożonych i trudnych zagadnień, co zrodziło kilka pytań i wątpliwości:

Uwaga ogólna:

Wydaje się że część pracy teoretycznej, opisowej przedstawia zbyt podstawowe elementy, które niekoniecznie są potrzebne w niniejszej pracy, czego przykładem może być opis podstawowych czynności przy wykonywaniu materiałów na soczewki.

- W rozdziale drugim „analiza stanu zagadnienia” doktorant przedstawia jedynie klasyczne techniki wytwarzania soczewek. Autor nie wspomniał o innych metodach wytwarzania soczewek na przykład za pomocą druku 3D. W pracy można było porównać klasyczne zastosowanie maszyn CNC, czyli wytwarzania ubytkowego i wytwarzania przyrostowego, co więcej można było porównać wady i zalety tych metod. Przykładem druku 3D do wytwarzania soczewek jest technika firmy Luxexcel.
- W rozdziale drugim autor przedstawia maszyny CNC stosowane do frezowania soczewek. Wydaje się jednak że opis jest nieco chaotyczny, a na końcu podrozdziału 2.1 brakuje zestawienia tabelarycznego porównujące opisywane maszyny CNC trzech światowych potentatów w tej dziedzinie.
- Rysunki w pracy: podpisy pod rysunkami zawierają dodatkowe informacje o źródle, z którego pochodzą. W podpisie rysunków wystarczyło w nawiasie podać numer pozycji z bibliografii, co uczyniłoby podpis bardziej czytelnym.
- Autor czasami posługuje się słownictwem pospolitym i niedostosowanym do pracy naukowej, czego przykładem jest opis rysunku 4.16 na stronie 39, gdzie wprowadza pojęcie „materiał poświęcony na cięcie”. W nomenklaturze naukowej to jest tak zwany odpad lub naddatek technologiczny itp.
- Część opisów na rysunkach wykonana jest w języku angielskim, a część w języku polskim. Należałoby ujednoczyć opis wszystkich rysunków, praca napisana jest w języku polskim, opisy na rysunkach również powinny być w języku polskim.
- Czytając hipotezę badawczą zaproponowaną przez doktoranta i jego prace doktorską należy zwrócić uwagę i zapytać autora, czy to rzeczywiście hipoteza badawcza czy może jednak teza pracy.
- Rozdział szósty inteligentna maszyna do frezowania soczewek znajduje się dopiero na stronie sześćdziesiątej siódmej, a pod tytułem rozdziału nie zawarto żadnej treści wprowadzającej do rozdziału.
- Opis dla podrozdziału 6.1 struktura geometryczno-ruchowa wydaje się niepełny. W rozdziale brakuje opisu dla przedstawionej struktury geometrycznej ruchowej projektowanej obrabiarki przedstawionej na rysunku 6.1. Ośmiu wersowy opis dla powyższego rysunku jest niewystarczający.

- W podrozdziale 5.2, który został źle oznaczony, bo stanowi on podrozdział 6.2 architektura maszyny doktorant wspomina, że na potrzeby budowy prototypu maszyny korpus łoża został wykonany z płyty treser. W przypadku projektowania elementów maszyn powinna być wykonana analiza wytrzymałościowa na przykład metodą elementów skończonych w celu sprawdzenia stanu naprężeń i odkształceń w konstrukcji. W pracy nie ma żadnych analiz MES. Nie wiadomo na jakiej podstawie doktorant projektuje elementy, które mają stanowić konstrukcję obrabiarki.
- W pracy nie ma załączników, w których powinna znajdować się dokumentacja konstrukcyjna i ewentualne mapy naprężeń i odkształceń nowych elementów konstrukcyjnych obrabiarki.
- W pracy brakuje schematów kinematycznych obrabiarki.
- Na stronie 85 doktorant wspomina że wyniki symulacji zamieszczono na rysunkach 7.9-7.12. Pierwszy rysunek z wynikami to rysunek 7. 11, w rozdziale siódmym duplikują się numery rysunków.
- W rozdziale siódmym autor na 8 wykresach przedstawił wyniki badań. Pod wykresami brakuje analizy dla otrzymanych wyników badań przez co nie wiadomo, po co wstawione są wykresy i jakie mają znaczenie dla dalszych badań.
- Na stronie 67 doktorant stwierdza, iż ważnym aspektem jest zwarta i sztywna konstrukcja, co zapewnia przedstawiona koncepcja struktury geometryczno- ruchowej. Autor nie potwierdza tego faktu obliczeniami, a jedynie rysunkiem, który stanowi koncepcję struktury geometrycznej ruchowej projektowanej obrabiarki.
- Streszczenie pracy mogło być bardziej obszerne.
- Wydaje się, że bibliografia przygotowana jest mało starannie, katalogi firm powinny być w literaturze oddzielone od artykułów i monografii. Z 60 pozycji literaturowych nie wszystkie są bezpośrednio cytowane w pracy. Ta część pracy opracowana jest słabo.
- Innowacyjne urządzenie zasługuje na zgłoszenie patentowe. W pracy niestety brak informacji o takowym zgłoszeniu.

Uwagi krytyczne nie umniejszają osiągnięć Autora, często mają charakter dyskusji naukowej. Ponadto należy stwierdzić, że praca została zredagowana mało starannie ale zgodnie z zasadami przygotowania rozpraw o charakterze naukowym.



5. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z treścią recenzowanej rozprawy stwierdzam, iż stanowi ona istotny przyczynek naukowy do badań dotyczących możliwości zastosowania metod kompensacji błędów we frezarkach CNC do frezowania wstępnego soczewek.

Poprawna realizacja celu i zakresu badań wymagała wiedzy z różnych obszarów nauki. W trakcie prac Doktorant zapoznał się z metodami modelowania matematycznego układów mechanicznych, metodami doświadczalnymi oraz pracami konstrukcyjnymi, które pozwoliły na opracowanie nowatorskiej obrabiarki CNC. Wyniki prac zostały wdrożone w przemyśle i stanowią podstawę do dalszego ulepszania procesu wytwarzania specjalistycznych soczewek. Praca ma charakter wdrożeniowy, a opracowany system kompensacji działa zgodnie z założeniami pracy doktorskiej. Doktorant wykazał się umiejętnością właściwego przygotowania warsztatu naukowego, przeprowadził ciekawe i trudne do realizacji badania modelowe i doświadczalne. Uwagi krytyczne nie umniejszają osiągnięć Autora, często mają charakter dyskusji naukowej.

*Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że w ocenie całościowej praca ta spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z zm.). Zrealizowana przez **mgr inż. Michała Zarzecznego praca pt. „Budowa inteligentnej obrabiarki do frezowania promieni soczewek”**, stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego i wnosi istotny wkład w dyscyplinę inżynieria mechaniczna. Ponadto wskazuje na zadowalający poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej jej Autora. Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.*

Recenzent



.....