Rzeszów, 24.01.2022

prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Konstrukcji Maszyn
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

WPŁYNĘŁO DNIA
01.02.2022
data
Kierownik administracyjny
nr pisma wydziału podpis
mgr Kamila Czerniak

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Romana Michalskiego

WERYFIKACJA I REWERYFIKACJA PARAMETRÓW DOKŁADNOŚCIOWYCH FREZARKI W OPARCIU O PROCEDURY STOSOWANE WE WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWYCH SYSTEMACH POMIAROWYCH

Podstawa recenzji

Pismo dra hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej numer DIM.075.244.2021 z dnia 30.11.2021 roku oraz umowa nr 0600/2021/286 dotycząca wykonania ponownej recenzji pracy doktorskiej mgr. inż. Romana Michalskiego pt. Weryfikacja i reweryfikacja parametrów dokładnościowych frezarki oparciu o procedury stosowane we współrzędnościowych systemach pomiarowych.

1. Wprowadzenie

Przedstawiona do recenzji dysertacja doktorska tematycznie jest związana z wytwarzaniem obrabiarek, głównie z procedurą odbiorczą gotowych maszyn technologicznych. Tematyka pracy wynika z faktu, że doktorant jest pracownikiem firmy FAMOT zajmującej się produkcją tego typu urządzeń, a praca ma charakter przemysłowy i wdrożeniowy. Zagadnienia poruszane w rozprawie są aktualne i istotne z punktu widzenia bieżących trendów naukowych i potrzeb przemysłu. Produkcja obrabiarek na świecie stanowi ważny element gospodarki i nauki w obszarze inżynierii mechanicznej. Biorąc pod uwagę zmiany parametrów dokładności, rozszerzenie możliwości obróbczych i stosowanych akcesoriów, obróbka różnorodnych materiałów w produkcji części maszyn, narzędzia do niej stosowane cały czas tworzą istotną gałąź przemysłu i stymulator rozwoju nauki. Idea Przemysł 4.0 funkcjonująca od kilku lat na całym świecie stawia dalsze wyzwania dla naukowców, a konkurencyjny rynek zmusza producentów do poszukiwania oszczędności na każdym etapie produkcji. Recenzowana praca doktorska wpisuje się w ten właśnie obszar, dotyczy istotnej modernizacji i wdrażania procedur odbioru gotowej obrabiarki co za tym idzie skrócenia czasu jej wprowadzania na rynek. Można stwierdzić, że jest to też etap pośredni, w kierunku opracowania i wdrożenia obrabiarki zintegrowanej ze

współrzędnościową maszyną pomiarową, realizującą zarówno zadania obróbcze jak i pomiarowe.

Praca składa się z części teoretycznej i praktycznej, która zawiera bardzo obszerny materiał badawczy. Jest on wynikiem długotrwałych pomiarów na dużej liczbie elementów obrabiarek, co samo w sobie jest istotną wartością tej pracy. W odniesieniu do przedstawionych zagadnień podjęcie tematu rozprawy przez Doktoranta należy uznać za w pełni uzasadnione, zarówno pod względem naukowym, jak i utylitarnym.

2. Omówienie rozprawy

Przedstawiona do oceny praca składa się z ośmiu zasadniczych rozdziałów i zawiera wraz z załącznikami 237 stron. Oprócz rozdziałów numerowanych w pracy znajdują się jeszcze części nienumerowane, kolejno Spis treści, Wykaz ważniejszych oznaczeń, Streszczenie, Abstract, Literaturę oraz Załączniki. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów tworzy logiczny i spójny układ, kolejno przedstawiane treści rozwijają i uzupełniają myśli zawarte w częściach poprzedzających. Zawartość merytoryczna pracy jest odpowiednio i starannie zilustrowana, co pomaga we właściwym zrozumieniu zawartości merytorycznej.

Rozdział pierwszy pracy to Wstęp, w którym Doktorant przedstawia krótki rys historyczny rozwoju techniki obrabiarkowej i jej uwarunkowania z punktu widzenia dnia obecnego stanu techniki.

Drugi rozdział poświęcony został frezarkom i frezarskim centrom obróbkowym. Autor rozpoczyna go od przeglądu wybranych rozwiązań frezarek i centrów frezarskich, dzieląc je na 3-, 4- i 5-osiowe, do obróbki z pręta i o zamkniętej strukturze kinematycznej. Podział ten może wydawać się niejednoznaczny, ponieważ np. w rozwiązaniach do obróbki z pręta znajdują się układy cztero- i pięcioosiowe. Przedstawiono również podstawowe elementy obrabiarek, opisano pokrótce: systemy automatyzacji, magazyny narzędziowe, paletowe systemy wymiany przedmiotów obrabianych, systemy diagnostyczne i systemy do pomiaru narzędzia i wykonywanego elementu. Rozdział kończy przegląd i opis wybranych maszyn technologicznych produkowanych przez Firmę FAMOT Pleszew.

W rozdziale trzecim zostały zaprezentowane podstawy współrzędnościowej techniki pomiarowej. Opisano układy współrzędnych i podstawowe elementy geometryczne, wraz z minimalną liczbą punktów niezbędnych do ich wyznaczenia. Przedstawiono zagadnienia tolerancji geometrycznej, związanej z kształtem, kierunkiem, położeniem i biciem. Każdą z występujących tu odchyłek opisano bardzo szczegółowo, wraz z pewnymi zagadnieniami dla nich specyficznymi. Opisano elementy odniesienia w pomiarach współrzędnościowych, gdzie Autor szczególnie skupił się na okręgach wyznaczanych jako różne elementy zastępcze. Po tym opisie następuje przegląd typów współrzędnościowych maszyn pomiarowych, przeprowadzony na podstawie normy ISO 10360 i w oparciu o inne opracowania literaturowe. Omówiono też skrótowo impulsowe i skaningowe głowice pomiarowe. Przedstawione jest również omówienie błędów współrzędnościowych maszyn pomiarowych oraz głównych źródeł ich występowania. Omawiając weryfikacje i reweryfikację funkcjonowania współrzędnościowych maszyn pomiarowych Doktorant odniósł się do zagadnień poruszanych w części drugiej, czwartej i piątej normy ISO 10360. Dalsza część rozdziału poświęcona jest analizie mocowań stosowanych podczas pomiarów na WMP. Jest to zagadnienie o tyle istotne, że nawiązuje do niego część przeprowadzonych badań. Kończąc

rozdział, Autor przedstawia metody szacowania niepewności pomiarów w technikach współrzędnościowych. Uwzględnił tutaj metody: wykorzystującą obiekt wykalibrowany, wykorzystującą obiekt niewykalibrowany oraz symulacyjną wykorzystująca wirtualną maszynę pomiarową.

Czwarty rozdział dotyczy badań odbiorczych frezarek sterowanych numerycznie. Scharakteryzowano tu krótko rodzinę norm ISO 10791, a szczególnie dużo miejsca poświęcono części, dotyczącej dokładności obrabianego przedmiotu próbnego. Zaprezentowano przedmiot próbny typu A i B oraz przedstawiono stosowne wymiary z tolerancjami i wytyczne odnośnie skrawania.

W rozdziale piątym przedstawiono cel i tezę pracy jako wynik opisanych w pierwszych rozdziałach zagadnień, które były podstawą do sformułowania celu i tezy pracy. Jako tezę główną Autor postawił sobie stwierdzenie, że dla nowoczesnych obróbkowych centrów frezarskich sterowanych numerycznie, możliwe jest przeprowadzenie badań i weryfikacja cech dokładnościowych obrabiarki za pomocą pomiaru elementu testowego bezpośrednio po jego wykonaniu na stole obrabiarki przy użyciu sondy przedmiotowej. Sformułowana w ten sposób teza dotyczy obszaru nowego, w którym dotychczas tego typu badań nie prowadzono. Teza została wsparta tezami pomocniczymi, mówiącymi że dla nowoczesnych centrów frezarskich sterowanych numerycznie możliwe jest wyznaczenie na bazie procedury ISO 10360 błędu granicznego pomiaru (*MPEobr*) za pomocą obrabiarki, a także że możliwe jest określenie metody mocowania, która minimalizuje odkształcenie mierzonego elementu i określenie najlepszej strategii pomiarowej. Główny cel pracy określono jako opracowanie nowej metody pomiaru wzorcowego elementu testowego, wcześniej zmierzonego na WMP oraz koncepcji wdrożenia w warunkach przemysłowych zgodnie z wytycznymi normy ISO 10360-2 wykonanego za pomocą centrum frezarskiego wyposażonego w sondy mierzące. Można stwierdzić, że jest to cel o charakterze praktycznym, wymagający jednak podejścia naukowego opartego o przeprowadzenie szeregu badań i analiz.

Rozdział szósty poświęcono przedstawieniu przedmiotu badań i stanowisk badawczych z wykorzystaniem infrastruktury badawczej laboratorium pomiarowego Firmy FAMOT. W pierwszej części zaprezentowano pomiary elementów korpusowych przy różnych układach podparcia. Autor omówił wykorzystaną współrzędnościową maszynę pomiarową oraz metodykę realizacji procedury badawczej. Scharakteryzował kolejno cechy geometryczne sań X, Y i Z, przedstawiając dla każdych z nich rodzaje podparcia lub mocowań oraz analizę MES. Druga część to pomiary elementów korpusowych przy różnych bazach i strategiach pomiarowych. Tutaj również przedstawiono stanowisko badawcze i metodykę realizacji pomiarów pokazano badane cechy geometryczne oraz układy baz i strategie pomiarowe. Podobnie zaprezentowana została część pracy związana z badaniami powtarzalności WMP, która zawiera metodykę prowadzenia badań, opis badanych cech geometrycznych i procedurę wyznaczenia niepewności pomiaru, wraz z zależnością na niepewność rozszerzoną i jej składowymi. Kolejna część rozdziału dotyczy badania powtarzalności sondy przedmiotowej na frezarce. Opisano w nim przedmiot badania z uwzględnieniem materiału, z jakiego został on wykonany, proces technologiczny wykonania elementu próbnego (obróbka zgrubna i wykańczająca) oraz badane cechy geometryczne. Przedstawiono założenia do programu pomiarowego, opisano sondę przedmiotową i metodykę badania. Następnie Autor zaprezentował badanie elementu testowego za pomocą sond przedmiotowych stosowanych na frezarce sterowanej numerycznie oraz badanie parametrów dokładnościowych tej frezarki przy zastosowaniu procedury opartej

o normę ISO 10360-2. Tutaj także omówił stanowisko badawcze, czyli obróbkowe centrum frezarskie CMX 70 U i przedmiot badań (wzorzec długości), a także przedstawił metodykę realizacji pomiarów (uwzględniając orientacje położenia wzorca długości na stole obrabiarki) wraz z opisem sond przedmiotowych.

Rozdział siódmy zawiera przykładowe wyniki badań i pomiarów oraz ich analizę, reszta wyników stanowi załącznik do pracy, będący bardzo obszernym materiałem źródłowym. Wyniki podzielono na poszczególne procedury badawcze, czyli:

- wyniki pomiarów elementów korpusowych przy różnych mocowaniach, wraz z analizą dla sań osi X, Y, Z,
- wyniki pomiarów cech geometrycznych sań przy różnych bazach i strategiach pomiarowych,
- wyniki pomiarów powtarzalności współrzędnościowej maszyny pomiarowej, wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru,
- wyniki pomiarów cech za pomocą sondy na frezarce, wraz z wyznaczeniem niepewności pomiaru realizowanego za pomocą obrabiarki z sondą,
- wyniki badań elementu testowego za pomocą sond przedmiotowych stosowanych na frezarkach sterowanych numerycznie,
- wyniki badań parametrów dokładnościowych frezarki sterowanej numerycznie w oparciu o normę PN-EN ISO 10360–2.

W rozdziale ósmym przedstawione zostały wnioski i kierunek dalszych badań Doktoranta. Wnioski odnoszą się do badań przeprowadzonych za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej oraz do badań przeprowadzonych na obróbkowym centrum frezarskim. W podsumowaniu zawarte jest stwierdzenie, w którym Autor potwierdza udowodnienie postawionej tezy.

Wykaz literatury będący rozdziałem nienumerowanym zawiera 217 pozycji, w tym współautorskie publikacje Doktoranta, a także normy i strony internetowe.

Pracę uzupełniają załączniki (jest ich łącznie 40), zawierające wyniki pomiaru cech geometrycznych i obliczeń statystycznych sań X, Y i Z dla różnych mocowań, wyniki pomiaru i obliczeń statystycznych sań X, procedurę wyznaczenia powtarzalności pomiaru współrzędnościowej maszyny pomiarowej, wyniki pomiarów elementu i obliczenia statystyczne dla próbnego przedmiotu na obrabiarce, wyniki badania powtarzalności obrabiarki oraz wyniki pomiarów i odchyłki wzorca długości na różnych egzemplarzach obrabiarki CMX 70 U.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa zawiera bardzo bogaty materiał badawczy, który jest wynikiem tysięcy dokonanych pomiarów. Wkład pracy Autora jest z pewnością dużą wartością, wymagał ogromnego zaangażowania i wymagał wsparcia ze strony macierzystej firmy. Wsparcie to umożliwiło dokonanie pomiarów wielu elementów obrabiarek oraz dostęp do stosowanych urządzeń pomiarowych. Praca stanowi klasyczny przykład doktoratu aplikacyjnego, wpisującego się w założenia ministerialne dedykowane dla programu doktoratów wdrożeniowych, przygotowana została jednak poza tym programem.

W rozprawie można zauważyć działania o charakterze badawczym i rozwojowym, które doprowadziły do opracowania i wdrożenia zmodyfikowanej procedury.

Autor udowodnił tezę i zrealizował cel, polegający na opracowaniu nowej metody pomiaru wzorcowego elementu testowego, wcześniej zmierzonego na WMP oraz koncepcji wdrożenia w warunkach przemysłowych, który wymagał naukowego podejścia do analizy wyników badań i rozpatrywanych zagadnień. Do szczególnych wartości pracy - oprócz zrealizowanych badań i pomiarów - zaliczyć należy:

- zaproponowanie koncepcji obrabiarki funkcjonującej jako współrzędnościowa maszyna pomiarowa,
- opracowanie procedury analizy obrabiarki z punktu widzenia czynności przewidzianych dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych,
- rozwinięcie standardowych programów dla sond pomiarowych do zadań realizujących pomiary odchyłek związanych z kształtem i położeniem,
- przygotowanie wstępnych danych do opracowania i realizacji obrabiarki jako jednego urządzenia ze współrzędnościową maszyną pomiarową.

Wartości te posiadają charakter nowatorski, takie podejście nie jest spotykane w publikacjach, choć firmy obrabiarkowe i pomiarowe wytyczają sobie wspólne cele, zmierzające do efektów podobnych jak prace Doktoranta.

W pracy można też dostrzec pewne niedociągnięcia, których źródłem może być szczególne skupienie na utylitarnym celu realizowanych badań, co jest charakterystyczne dla doktorantów na co dzień pracujących zawodowo w przemyśle. Objawia się to w niezbyt precyzyjnym formułowaniu myśli, stosowaniem skrótów myślowych i pojęć nie do końca zgodnie z ich definicjami. Stąd można odnieść wrażenie, że nie wszystko w pracy wyjaśnione jest w sposób zadawalający, co z kolei wymaga miejscami dużo bardziej wnikliwej analizy ze strony recenzenta.

Przedstawiona do oceny dysertacja jest jej drugą wersją wynikającą z potrzeby wprowadzenia poprawek. Zapoznając się z treścią manuskryptu można stwierdzić, że generalnie Autor uwzględnił większości uwag, biorąc powyższe nie będę ich przytaczał, z poprzedniej recenzji a niektóre uwagi miały charakter dyskusyjny, z tego względu decyzją Autora było ich uwzględnienie.

Cel pracy został sformułowany jako opracowanie nowej metody pomiaru wzorcowego elementu testowego, wcześniej zmierzonego na WMP, za pomocą sondy przedmiotowej OMP 400 po wykonaniu na stole obrabiarki oraz wytycznymi pomiaru zgodnie z normą ISO 10360-2 wykonanego za pomocą centrum frezarskiego wyposażonego w sondy mierzące. Takie sformułowanie celu uwzględnia zastosowanie procedur badawczych i analizy opartej o metody naukowe dające w efekcie możliwość uzyskania nowej metody pomiarowej mającej również, a może głównie charakter utylitarny.

Oceniając stronę edytorską należy stwierdzić, że praca napisana została poprawnym językiem polskim, ze stosunkowo dobrą stylistyką, zawiera bogaty materiał rysunkowy, zestawienia tabelaryczne a w tekście widnieją w większości stosowne odniesienia do rysunków, tabel i wzorów, a także odpowiednie powołania na źródła literatury. Można znaleźć drobne niedociągnięcia w postaci zbyt małej rozdzielczości rysunków (np. rys. 57, 63, 74, 79, 100) lub opisu na rysunku w języku innym niż język pracy (np. rys. 88), które nie wpływają jednak zasadniczo na wartość merytoryczną pracy. Autor przyjął numeracje rysunków i wzorów w kolejności następującej po sobie, niezależnie od numeracji rozdziałów,

natomiast numerację tabel odniósł do numeracji rozdziałów. Uwzględniając czytelność pracy lepszym rozwiązaniem byłoby przyjęcie jednego schematu numeracji np. odnoszącego się do numeracji rozdziałów.

4. Wnioski

Przedstawiona do oceny rozprawa porusza bardzo szeroki i ważny temat, jakim jest koncepcja realizacji pomiarów współrzędnościowych na obrabiarce. Temat ten biorąc pod uwagę obecne trendy w nauce i przemyśle z pewnością jest tematem przyszłościowym, w tym kierunku rozwijać będą się centra obróbcze włączane do struktury produkcyjnej opartej o ideę Przemysł 4.0. Tematyka pracy została zatem wybrana w sposób trafny, a zakres przedstawionego manuskryptu spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Formalny układ pracy jest prawidłowy. Dysertacja odnosi się do aktualnej wiedzy, a w wielu elementach wnosi treści nowe. Praca składa się z części teoretycznej stanowiącej również analizę stanu zagadnienia oraz części badawczej wynikającej z założonego i osiągniętego celu polegającego na opracowaniu nowej metody pomiaru wzorcowego elementu testowego, wcześniej zmierzonego na WMP oraz koncepcji wdrożenia w warunkach przemysłowych. Postawiona w początkowej części pracy teza została przez Autora udowodniona. Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne pozwalające na prowadzenie prac badawczych o charakterze utylitarnym.

5. Podsumowanie

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Romana Michalskiego pt. *Weryfikacja i reweryfikacja parametrów dokładnościowych frezarki w oparciu o procedury stosowane we współrzędnościowych systemach pomiarowych*, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. Nr 65,poz. 595, z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Grzegorz Budzik