

Dr hab. inż. Krzysztof Stępień, prof. PŚk,
Kierownik Katedry Metrologii i Niekonwencjonalnych
Metod Wytwarzania
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Tel. 41 3424519, e-mail: kstepien@tu.kielce.pl

Kielce, dn. 17.07.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Gruzy
**nt. Symulacyjny model dokładności pomiaru realizowanego laserowymi systemami
nadążnymi**

Promotor: dr hab. inż. Adam Gąska, prof. PK
Promotor pomocniczy: dr inż. Robert Kupiec

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, prof. dr hab. inż. Jerzego Sładka, nr M.00-90/2023 z dnia 02.06.2023 r.

Istotność problematyki rozprawy

W obecnym czasie na globalnym rynku obserwuje się ciągły wzrost wymagań i oczekiwań klientów. W związku z tym, przedsiębiorcy działający w różnych gałęziach przemysłu dokładają wszelkich starań, aby ich wyroby cechowały się jak najwyższą jakością. Podwyższanie jakości wyrobów pociąga za sobą opracowywanie coraz dokładniejszych systemów pomiarowych, które umożliwiłyby wiarygodny i dokładny pomiar wybranych cech danego wyrobu. Bardzo znaczącą grupą przyrządów pomiarowych są systemy do pomiaru wielkości geometrycznych, dzięki którym możliwa jest ocena dokładności wymiarowo-kształtowej wytwarzanych części. Wśród przyrządów do pomiaru wielkości geometrycznych wszechstronnością zastosowań wyróżniają się tzw. współrzędnościowe systemy pomiarowe. Współrzędnościowe systemy pomiarowe wciąż ewoluują, a jedną z nowszych ich odmian są tzw. laserowe systemy nadążne, zwane też laserowymi systemami śledzącymi. Są to niewielkich rozmiarów, całkowicie przenośne systemy o niezwykle dużych zakresach pomiarowych, sięgających kilkudziesięciu metrów. Ze względu na swoje zalety systemy te znalazły zastosowanie w dokładnych pomiarach wyrobów wielkogabarytowych (np. w przemyśle lotniczym, energetycznym, stoczniowym itd.).

Tematyka niniejszej pracy dotyczy opracowania modelu, który może służyć do oceny dokładności pomiaru za pomocą laserowego systemu nadążnego. Dzięki temu, w dalszej kolejności będzie możliwe zwiększenie wiarygodności uzyskiwanych wyników. Dlatego tematykę przedstawionej do recenzji pracy uważam za bardzo istotną z punktu widzenia inżynierii mechanicznej, a w szczególności metrologii wielkości geometrycznych.

Omówienie rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „Symulacyjny model dokładności pomiaru realizowanego laserowymi systemami nadążnymi” zawiera 161 stron i obejmuje: stronę tytułową, spis treści, wykaz oznaczeń, czternaście głównych rozdziałów, spis ilustracji oraz literaturę.

Rozdział pierwszy rozprawy to wstęp, w którym opisane zostało uzasadnienie podjętego tematu pracy, koncepcja oraz zaplanowanie zadania badawcze, wynikiem realizacji których jest recenzowana rozprawa. W rozdziale drugim Doktorant przedstawił metody wyznaczania dokładności pomiaru współrzędnościowych systemów pomiarowych, uwzględniając przy tym zagadnienie tzw. maszyn wirtualnych. W rozdziale tym podane zostały także podstawowe informacje na temat zasady działania, budowy oraz obszarów zastosowania laserowych systemów nadążnych. W rozdziale trzecim Doktorant sformułował problem badawczy, który chciał rozwiązać oraz zawarł tezę pracy, brzmiącą: *„Istnieje możliwość wyznaczenia niepewności jednokrotnego pomiaru realizowanego na laserowych systemach nadążnych z wykorzystaniem modelu symulacyjnego uwzględniającego zmienność wartości błędów wpływających na dokładność pomiaru”*. Oprócz tego, Doktorant podał założenia do opracowania modelu, a także cele szczegółowe, których osiągnięcie zapewniałoby udowodnienie postawionej przez Doktoranta hipotezy badawczej. Uważam, że zarówno problem badawczy, hipoteza pracy, jak i cele pracy zostały sformułowane w sposób odpowiedni. Sformułowane przez Doktoranta cele są ambitne, a ich realizacja istotna z punktu widzenia rozwoju metrologii w inżynierii mechanicznej. W rozdziale czwartym przedstawiona została koncepcja oraz charakterystyka opracowanego przez Doktoranta modelu symulacyjnego laserowego systemu nadążnego. W rozdziale piątym opisana została opracowana przez Doktoranta metoda identyfikacji błędów systemu przy pomiarach długości. Z kolei, rozdział szósty dotyczy takiej identyfikacji dla układu pomiaru orientacji kątowej głowicy systemu. W rozdziale siódmym rozprawy przedstawione zostały badania nad wpływem czynnika ludzkiego na wynik pomiaru przeprowadzanego za pomocą modelowanego systemu. Tematyka rozdziału ósmego obejmuje zagadnienia związane z badaniem zgodności rozkładu uzyskanych uprzednio wyników z rozkładem normalnym. Doktorant zastosował w tym celu test Shapiro-Wilka. W rozdziale dziewiątym przedstawione zostały rozwiązania informatyczne, umożliwiające przygotowanie funkcjonalnego modelu symulacyjnego systemu. W tym celu Doktorant opracował specjalny program w środowisku Python, który miał za zadanie współpracować z oprogramowaniem metrologicznym wykorzystywanym w modelowanym systemie. W rozdziale dziesiątym przedstawiono wyniki badań nad stabilnością wyników, wygenerowanych przez program, który został opisany w rozdziale poprzednim. Rozdział jedenasty zawiera wyniki weryfikacji opracowanego modelu. Wnioski z przeprowadzonych badań Doktorant zawarł w rozdziale dwunastym. Rozdział trzynasty dotyczy planowanych kierunków dalszych badań Doktoranta w obszarze, którego dotyczy prezentowana rozprawa. Ostatni rozdział rozprawy, czternasty, zawiera podsumowanie.

Spis literatury zawiera 156 pozycji, w tym również publikacje Autora rozprawy. Zaprezentowano także dokumenty normalizacyjne, artykuły w czasopismach naukowych oraz źródła internetowe. W pracy zawarto 80 rysunków i fotografii.

Praca napisana jest poprawnym językiem. Używana w pracy terminologia świadczy o biegłości Doktoranta w obszarze metrologii wielkości geometrycznych. Praca jest przejrzysta, czytelna, rysunki w większości są wyraźne i wysokiej jakości. Błędy literowe i gramatyczne są

stosunkowo nieliczne. Niestety, Doktorant nie ustrzegł się licznych błędów interpunkcyjnych, które sprawiają, że niektóre zdania są trudne do zrozumienia.

Szczegółowe uwagi redakcyjne przekazałem Autorowi rozprawy w osobnym dokumencie.

Nawiązując do tematyki rozprawy, podkreślam jeszcze raz, że problem badawczy, którego rozwiązanie podjął się Doktorant jest ambitny i istotny z punktu widzenia rozwoju metrologii wielkości geometrycznych. Jednocześnie uważam, że praca całkowicie mieści się w zakresie dyscypliny naukowej *inżynieria mechaniczna*.

Uwagi krytyczne i pytania

1. Treść i zakres recenzowanej rozprawy doktorskiej uważam za prawidłowy. Mam jednak uwagi do układu pracy. Praca jest podzielona na czternaście rozdziałów. Uważam, że niektóre z tych rozdziałów mogłyby być połączone z innymi, z korzyścią dla układu pracy. Na przykład, rozdział dziewięć i dziesięć dotyczą różnych opracowania i weryfikacji programu komputerowego opracowanego przez Doktoranta. Moim zdaniem, można było te rozdziały połączyć w jeden. Podobnie jest w przypadku rozdziałów: dwunastego, trzynastego i czternastego. Zawierają one wnioski z przeprowadzonych badań, kierunki dalszych badań i podsumowanie. Wydaje się logicznie uzasadnione, żeby połączyć te rozdziały w jeden.
2. W wykazie oznaczeń brak jest skrótowca LT, bardzo często używanego w rozprawie.
3. Doktorant bardzo często używa słowa „ilość”, zamiast „liczba” w odniesieniu do rzeczowników policzalnych (np. na stronie 8 Doktorant pisze: „*Jest to związane ze znaczną ilością powtórzeń pomiarów...*”).
4. Str. 8. Doktorant używa sformułowania „*...wyznaczania dokładności laserowych systemów nadążnych...*”. Jest to sformułowanie nieprecyzyjne. Należałoby napisać „*wyznaczania dokładności pomiaru laserowych systemów nadążnych*”.
5. Na stronie 11 Doktorant wymienia grupy metod oceny dokładności pomiarów. Wspomniana jest tutaj metoda wiedzy eksperta, jako budząca kontrowersje. Uważam, że należałoby chociaż w skrócie napisać, na czym ta metoda polega i czemu budzi kontrowersje.
6. Doktorant używa terminu „rozwiązanie softwareowe” (np. na stronie 11 i 108). Uważam, że zamiast słowa „softwareowe” należałoby użyć jakiegoś odpowiednika lepiej brzmiącego w języku polskim np. „rozwiązanie programowe”.
7. Na stronie 13 Doktorant pisze „*Wielkość błędów w punktach referencyjnych siatki...*”. W tym kontekście należy użyć słowa „wartość” a nie „wielkość”.
8. Równanie 7 –kąt β występujący w tej zależności nie został zdefiniowany w tekście. Nie jest on także przedstawiony graficznie.
9. Str. 23. Doktorant odnosi się tutaj do systemu „Laser Tracer”. Uważam, że należałoby, przynajmniej w skrócie opisać cechy charakterystyczne i zasadę działania takiego systemu. Jest to istotne, zwłaszcza, że nazwa tego systemu jest pisana podobnie do systemu „Laser Tracker”. Czytelnicy mniej zaznajomieni z metrologią wielkości geometrycznych mogą te dwa typy systemów mylić.
10. Str. 23. W drugim akapicie Doktorant pisze: „*Jej odchyłka kształtu powinna być mniejsza niż $0,2 * P_{FTU}$ wg [143].*”. Brak jest w tekście wyjaśnienia, co oznacza skrót P_{FTU} .
11. Str. 26, równanie 9. Znak „-” przed współczynnikiem rozszerzalności termicznej materiału wzorca wskazuje, że wzorec będzie zmniejszał swoją długość przy wzroście temperatury. Zakładam, że to pomyłka Doktoranta.

12. Na stronie 29 Doktorant pisze „*Poniżej zamieszczono podstawowe informacje na temat budowy, zasady działania oraz dokładności LSN na przykładzie systemu Laser Tracker wykorzystywanego w badaniach przedstawionych w dalszej części*”. Taki zapis sugeruje, że chodzi o jakiś określony system nadążny o handlowej nazwie Laser Tracker. A przecież A przecież laserowe systemy nadążne są produkowane przez co najmniej kilku producentów (np. firmę Faro, Leica, Api). Każdy z tych systemów producenci nazywają „laser trackers”.
13. Str. 41, równanie 12. Jest to równanie podobne do równania 11. Dla czytelników mniej zaznajomionych w temacie, może być mylące podawanie dwóch bardzo podobnych wzorów bez skomentowania tego faktu. Dlatego uważam, że należałoby po równaniu 12 dodać komentarz, że system, którego MPE opisane jest zależnością 12 jest po prostu nieco dokładniejszy od standardowego, którego MPE opisane jest zależnością 11.
14. Str. 42. Równanie 13 stanowi praktycznie powtórzenie równania 10. Należałoby skomentować w tekście to podobieństwo.
15. Str. 42. Zamiast „...zapewnić stałą wartość zarówno enkoderów kątowych jak i systemu...”, należałoby napisać „...zapewnić stałą wartość wskazań zarówno enkoderów kątowych jak i systemu...”.
16. Str. 45, równanie 14. W opisie oznaczeń zmiennych w równaniu występuje „ $\gamma()$ ”, zamiast „ $\gamma(l)$ ” lub po prostu „ γ ”.
17. Doktorant używa terminu „punkt birdbath” (na przykład na stronie 49 i 50). Uważam, że należałoby dokładniej opisać, co oznacza ten termin.
18. Str. 60. Autor w Tabeli 1 podaje wyniki dla trzech mierzonych odległości. Uważam, że aby analiza była bardziej wiarygodna, należałoby te badania przeprowadzić dla znacznie większej liczby odległości. Wyciąganie wniosków w oparciu o trzy wartości jest bardzo ryzykowne.
19. Str. 65, równanie 16. Należałoby tutaj doprecyzować, czy równanie to oznacza MPE w przy pomiarze w jednej osi czy w przestrzeni.
20. Str. 70. Wykresy na rysunku 5.23 są mało czytelne, szczególnie legendy i wartości na osiach układu współrzędnych. Nie jest też jasne, co przedstawiają wykresy w kolorze czerwonym, a co w kolorze niebieskim. Uważam także, że wyniki przedstawione na tych wykresach należałoby nieco dokładniej skomentować.
21. Str. 78. Wykres na rysunku 5.26 jest mało czytelny. Być może, w celu zwiększenia czytelności należałoby pokazać tylko wybrane serie pomiarowe.
22. Str. 91. Doktorant pisze „...można zauważyć pogorszenie (...) odchylenia standardowego, jak i rozstępu...). Słowo „pogorszenie” nie jest tutaj właściwe. Parametry takie, jak odchylenie standardowe nie mogą się polepszać czy pogorszać, lecz po prostu zmniejszać lub zwiększać swoje wartości.
23. Str. 94. W tabelach 3, 4 i 5 podano między innymi wartości niepewności pomiaru. W tekście rozprawy napisano jedynie, że „obliczono (...) niepewność pomiaru typu A”. W jaki sposób dokładnie te wartości zostały obliczone?
24. Str. 94, ostatnie zdanie. Doktorant pisze „...niepewność zadania pomiarowego..”. W metrologii nie istnieje pojęcie niepewności zadania pomiarowego, lecz po prostu niepewność pomiaru.
25. Str. 101. Rysunek 8.1 jest słabej jakości.
26. Str. 101. Doktorant pisze „...niewielką statystycznie liczbę próby...”. Prawdopodobnie chodzi o licznosc próby/próbki?

27. Str. 101-107. Doktorant przeprowadzał testy normalności rozkładu Shapiro-Wilka. Warto byłoby tutaj podać wartości krytyczne w tym teście dla przyjętej liczby stopni swobody oraz poziomu ufności.
28. Str. 121. Dane w tabeli 15 są podane ze zdecydowanie zbyt dużą dokładnością (do szóstego miejsca po przecinku, czyli do nanometrów). Uważam, że biorąc pod uwagę MPE badanego systemu wystarczyłoby podać te dane z dokładnością do trzeciego, ewentualnie czwartego miejsca po przecinku).

Ogólna ocena rozprawy

Treść rozprawy jest zgodna z tematem zaakceptowanym przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Krakowskiej. Podjęty temat jest ważny zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i praktycznego. Zdefiniowany problem badawczy Doktorant rozwiązał w sposób wystarczająco wyczerpujący. Sformułowane w punkcie poprzednim uwagi nie umniejszają wartości naukowej rozprawy. Pod względem metodycznym rozprawa jest poprawna. Literatura specjalistyczna została dobrana w sposób odpowiedni. Strona ilustracyjna pracy jest bardzo dobrej jakości. Analiza rozprawy wskazuje, że Doktorant jest osobą bardzo pracowitą i sumienną. Doktorant przygotowując rozprawę wykazał się dobrą znajomością warsztatu naukowego. Zadania badawcze zostały zaplanowane oraz zrealizowane w sposób nie budzący zastrzeżeń. Na podstawie analizy rozprawy można stwierdzić, że Doktorant jest przygotowany do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Podsumowując, na podstawie oceny przedstawionej rozprawy, stwierdzam, że:

- rozprawa spełnia wymóg oryginalnego rozwiązania przez Autora zagadnienia naukowego,
- rozprawa spełnia wymóg wykazania ogólnej wiedzy teoretycznej w uprawianej dyscyplinie,
- rozprawa wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Doktoranta pracy naukowej.

Wniosek końcowy

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana sposobem merytorycznie bardzo dobry. Jest ona oryginalnym osiągnięciem mgr inż. Macieja Gruzy i stanowi ona istotny wkład w rozwój badań nad zwiększaniem dokładności pomiaru za pomocą laserowych systemów nadążnych.

Na podstawie dokonanej analizy przedstawionej pracy, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Gruzy, pt. „Symulacyjny model dokładności pomiaru realizowanego laserowymi systemami nadążnymi” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy i rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 roku, poz. 261); ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668). Tym samym rozprawa może stanowić podstawę do nadania autorowi rozprawy stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna* i może być dopuszczona do publicznej obrony.