Dr hab. inż. Krzysztof Stępień, prof. PŚk,
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach,
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn,

Kielce, dn. 17.01.2022 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Sławomira Jurkowskiego

nt. **Metoda poprawy zdolności procesu wytwórczego poprzez korekcję błędu systematycznego współrzędnościowego ramienia pomiarowego**

Promotor: dr hab. inż. Ksenia Ostrowska, prof. PK
Promotor pomocniczy: dr inż. Małgorzata Kowalczyk

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, prof. dr hab. inż. Jerzego Sładka, nr M.00-520-207/2021 z dnia 16.12.2021r.

Istotność problematyki rozprawy

W warunkach obserwowanego współcześnie wzrostu wymagań i oczekiwań klientów globalnego rynku, konieczne jest, aby wytwarzane produkty cechowały się jak najwyższą jakością. Dotyczy to także części maszyn i urządzeń. Z zapewnieniem wysokiej jakości produkowanych wyrobów związana jest konieczność zastosowania odpowiedniego sprzętu pomiarowego, który umożliwiłby wiarygodną weryfikację poprawności wykonania wyrobów. W chwili obecnej jedną z dominujących grup przyrządów pomiarowych w przemyśle są tzw. współrzędnościowe systemy pomiarowe. Istota pomiaru współrzędnościowego polega na tym, że system pomiarowy dokonuje identyfikacji współrzędnych wybranych punktów na powierzchni wyrobu, a nie konkretnych cech geometrycznych, np. długości czy średnicy. Takie cechy są wyznaczane na późniejszym etapie za pomocą odpowiedniego programu komputerowego. Taka filozofia pomiaru sprawia, że współrzędnościowe systemy pomiarowe są niezwykle uniwersalne i z tego powodu stają się nieodzowną częścią wyposażenia nowoczesnych laboratoriów pomiarowych. Generalnie systemy takie można podzielić na maszyny stacjonarne oraz przenośne. Stacjonarne współrzędnościowe maszyny pomiarowe cechują się dużą dokładnością pomiaru, maksymalny błąd dopuszczalny pomiaru długości niektórych z nich wynosi nawet poniżej 1 mikrometra. Przenośne systemy współrzędnościowe to tzw. współrzędnościowe ramiona pomiarowe. Mają one niezaprzeczalną zaletę, ich przenośność powoduje, że jesteśmy w stanie dokonywać pomiaru elementów np. bezpośrednio na stanowisku roboczym. Jednakże ze względu na wiele stopni swobody układu kinematycznego, ramiona pomiarowe cechują się znacznie mniejszą dokładnością niż systemy stacjonarne.

Tematyka niniejszej pracy dotyczy identyfikacji i eliminacji błędów systematycznych z wyniku pomiaru dokonywanego za pomocą współrzędnościowego ramienia pomiarowego. Rezultatem takiego postępowania jest zwiększeniem 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. „Metoda poprawy zdolności procesu wytwórczego poprzez korekcję błędu systematycznego współrzędnościowego ramienia pomiarowego" zawiera 155 stron i obejmuje: stronę tytułową, uwagi o poufności przedstawionych wyników, wykaz oznaczeń, spis treści, sześć głównych rozdziałów, spis rysunków, spis tabel, literaturę oraz załączniki.
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 zawarł cel i tezę pracy. Celem pracy jest „sformułowanie metody określania błędu systematycznego pomiaru, realizowanego z wykorzystaniem współrzędnościowego ramienia pomiarowego oraz metody analizy wpływu korekcji błędu systematycznego na poprawę zdolności procesu produkcyjnego, a następnie zaimplementowanie niniejszego rozwiązania do wirtualnego redundantnego systemu pomiarowego". Z kolei, zawarta również w rozdziale drugim teza pracy brzmi: „Korekta procesu wytwórczego przeprowadzona w oparciu o dane z pomiarów realizowanych WRP w połączeniu z WWRP z uwzględnieniem błędu systematycznego generuje poprawę zdolności procesu wytwórczego". Uważam, że zarówno cel, jak i teza pracy zostały sformułowane w sposób odpowiedni. Cel pracy jest ambitny, a jego realizacja istotna z punktu widzenia rozwoju metrologii w inżynierii mechanicznej. W rozdziale drugim zawarto również plan i zakres prac prowadzących do realizacji celu pracy.
Rozdział trzeci pracy zawiera analizę literatury. Analizowana przez Doktoranta literatura oraz dokumenty normalizacyjne dotyczyły:
- wzorcowania współrzędnościowych ramion pomiarowych.
- definiowania i obliczania niepewności pomiarów, w tym obliczania niepewności w oparciu o wyniki pomiarów elementów wzorcowych.
- obliczania wskaźników zdolności systemu pomiarowego przy wykorzystaniu różnego rodzaju przewodników, podręczników i norm (np. podręcznika MSA, zaleceń zgodnych z VDA 5 oraz z przewodnikiem Q-DAS).
- obliczania wskaźników zdolności procesu produkcyjnego (w tym podsumowania metod obliczania tych wskaźników),
- koncepcję metodyki poprawy zdolności procesu,
- opisu metody strat jakości.
Rozdział trzeci rozprawy zakończony jest podsumowaniem, w którym ponownie podano tezę pracy. Analiza literatura została przeprowadzona w sposób bardzo rzetelny i stanowi dobre wprowadzenie do eksperymentalnej części pracy. Jednakże uważam, że niektóre zależności są oczywiste i nie musiały być podawane w pracy, np. wzór na wartość średniej arytmetycznej (zależność 3.17).

W rozdziale czwartym pracy przedstawione zostały zakres i wyniki badań wstępnych przeprowadzonych przez Doktoranta. Badania te miały na celu przede wszystkim sprawdzenie czy czynnik ludzki nie jest źródłem zbyt dużych zakłóceń o charakterze losowym, utrudniających identyfikację błędu systematycznego ramienia pomiarowego oraz oszacowanie czy istnieje potencjał wykorzystania metody zaproponowanej przez Doktoranta w praktyce przemysłowej. W rozdziale tym Doktorant dokonał identyfikacji źródeł

niepewności pomiaru dzieląc te źródła na cztery główne grupy: tj. na źródła związane z ramieniem pomiarowym, operatorem, przedmiotem mierzonym oraz wpływem czynników otoczenia na wyniki pomiarów. Przeprowadzone w tym rozdziale badania dotyczyły przede wszystkim ustalenia wpływu operatora na wynik pomiaru. Doktorant zastosował w tym celu metodę R&R. W rozdziale czwartym Doktorant opisał także koncepcję działania wirtualnego współrzędnościowego ramienia pomiarowego opracowanego w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej wraz z zaproponowaną ideą wykorzystania tego ramienia w badaniach. Wyniki pokazujące różnice wyników uzyskane przez operatorów są bardzo interesujące. Doktorant stwierdza, że rozbieżności między wynikami są spowodowane różnym stopniem biegłości operatorów w przeprowadzaniu pomiarów. Jednak, takie stwierdzenie wydaje mi się dość ogólne. Poza tym, jak ocenić różnicę doświadczenia operatorów? Nasuwa się także pytanie czy różnice będą takie same w przypadku różnych głowic pomiarowych, np. głowicy elektrostykowej, skaningowej i optycznej? Kwestie te nie zostały poruszone przez Doktoranta.

Rozdział piąty pracy dotyczy badań własnych Doktoranta przeprowadzonych głównie w warunkach produkcyjnych przeprowadzonych w firmie NEWAG S. A., której pracownikiem był Doktorant. Rozdział ten stanowi główną część badawczą rozprawy. Doktorant przeprowadzał pomiary fizyczne w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej PK, w firmie NEWAG S. A., a także w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Nowym Sączu. Oprócz tego Doktorant wykorzystywał w badaniach wyniki z wirtualnego ramienia pomiarowego znajdującego się na wyposażeniu Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej PK. Mierzone części, w tym przedmioty wzorcowe, zostały dostarczone przez firmę NEWAG S. A. Pierwsza część badań dotyczyła pomiarów wyłącznie przedmiotów wzorcowych i miała na celu wykazanie, że dla współrzędnościowych ramion pomiarowych istnieje możliwość wyliczenia błędu systematycznego, a w konsekwencji wykorzystanie tej informacji w ustaleniu korekty procesu produkcyjnego. Badania te w większości były prowadzone przez dwóch operatorów, w celu oszacowania wpływu czynniki ludzkiego na otrzymane wyniki.

Do analizy systemów produkcyjnych Doktorant wybrał, po konsultacji z Działem Jakości firmy NEWAG S.A., narzędzia zgodne z podręcznikiem MSA. Szkoda, że nie sprecyzowano jakie czynniki sprawiły, że wybrano akurat te narzędzia, a nie na przykład wytyczne zgodne z VDA 5. Środowiskiem pracy, jakie Doktorant wybrał do tworzenia i modyfikacji narzędzi i arkuszy analizy był pakiet Excel firmy Microsoft z wykorzystaniem języka VBA. Metody analizy zaproponowane w MSA zostały przez Doktoranta rozbudowane, a konkretnymi narzędziami stanowiącymi autorski wkład Doktoranta do badanego zagadnienia są: arkusz zarządzania bazą danych: Operator - Przyrząd - Problem, moduł analizy błędu systematycznego ramienia pomiarowego (lub dowolnego systemu pomiarowego po adaptacji stosownej karty), moduł analizy strat jakości Taguchi'ego, analiza zdolności procesu produkcyjnego. Również autorskim wkładem Doktoranta było opracowanie interfejsu, który ułatwia zarządzanie analizami. Funkcje opracowane oprogramowania, przykłady wybranych okien programów oraz kody źródłowe wybranych procedur także podano w rozdziale piątym.

Pomiary przedmiotów wzorcowych oraz opracowanie narzędzi analizy systemu było w zasadzie wstępem do zasadniczej części badań produkcyjnych, które opisano w podrozdziale 5.3. Pomiary zrealizowano w dwóch niezależnych laboratoriach zlokalizowanych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej oraz w Instytucie Technicznym Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Nowym Sączu, jak również w firmie NEWAG S.A. Pomiarom poddano zestaw pierścieni mocujących pobranych bezpośrednio z linii produkcyjnej przedsiębiorstwa NEWAG S.A. Dalej Doktorant przedstawił szereg analiz wyników pomiarów przemysłowych i

obliczeń przy uwzględnieniu i bez uwzględnienia wyznaczonego błędu systematycznego. Wyniki te uważam za szczególnie interesujące. Szkoda, że przeprowadzona analiza dotyczyła jedynie narzędzi zaproponowanych w podręczniku MSA. Uważam, że wartość naukowa rozprawy byłaby znacząco wyższa, gdyby użyto także narzędzi zaproponowanych w dokumentach VDA 5 i dokonano analizy porównawczej.
Rozdział szósty pracy stanowią wnioski oraz kierunki dalszych badań proponowane przez Doktoranta. Wnioski te generalnie uważam za słuszne. Niemniej jednak niektóre z nich są dość oczywiste, np. stwierdzenie, że metoda strat jakości Taguchi'ego pozwala na wyliczenie kosztów wynikających ze strat jakości wyrobów. Uważam także, że niektóre z wniosków należałoby bardziej uszczegółowić. Na przykład po stwierdzeniu, że zaproponowana przez Doktoranta korekcja procesu powoduje zmniejszenie kosztów jakości, warto byłoby podać chociażby szacunkową wartość zmniejszenia tych kosztów.

Spis literatury zawiera 94 pozycje, w tym również publikacje Autora rozprawy. Zaprezentowano także dokumenty normalizacyjne, artykuły w czasopismach naukowych oraz źródła internetowe. W pracy zawarto, (poza załącznikami), 57 rysunków i fotografii oraz 13 tabel.
Praca zawiera także 19 stron załączników, w tym na przykład rysunki części mierzonych, raporty pomiarowe, wybrane procedury pomiarowe oraz projekty kart analizy.

Układ, treść i zakres recenzowanej rozprawy doktorskiej uważam za prawidłowy. Korzystna byłaby zmiana proporcji objętości analizy literatury i badań własnych. Jak już zaznaczyłem wcześniej, w badaniach własnych można byłoby na przykład dodać przynajmniej skrótową analizę poprawy zdolności procesu zgodnie z VDA 5. Niektóre z wykresów omówiono zbyt skrótowo (np. wykresy z rysunków 5.10 i 5.11). Na niektórych wykresach (np. na rysunku 4.8) brakuje jednostek w opisach osi.
Należałoby także podać więcej szczegółów dotyczących przyrządów pomiarowych, które zostały użyte w badaniach (np. podać maksymalny błąd dopuszczalny głowicy, typ głowicy pomiarowej, zakres, itp.).
Niektóre rysunki są nieczytelne, czcionki są zbyt małe. Praca napisana jest poprawnym językiem, chociaż należałoby się wystrzegać takich błędów, jak użycie słowa „ilość" zamiast „liczba" w stosunku do rzeczowników policzalnych. W tekście występuje też dość dużo błędów literowych oraz gramatycznych.
Szczegółowe uwagi redakcyjne przekazałem Autorowi rozprawy.

Uwagi krytyczne i pytania

1. Mam wątpliwości, czy temat rozprawy jest sformułowany wystarczająco precyzyjnie. Sformułowanie „korekcja błędu systematycznego" sugeruje, że mamy do czynienia z jednym błędem systematycznym, a przecież błędów o charakterze systematycznych w ogólnym przypadku może być wiele (błędy temperaturowe, błędy przyrządu, itp.).
2. Zgodnie z tym, co napisałem w omówieniu rozprawy uważam, że praca byłaby lepsza, gdyby zmieniono proporcje objętości analizy literatury i badań własnych, na korzyść badań własnych.

3. Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń: dwukrotnie pojawia się termin „współrzędnościowe ramię pomiarowe" i przyporządkowane mu są dwa skróty, raz jest to WRP, raz AACMM. Wprowadza to niepotrzebne zamieszanie.
4. Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń: skrót „q_j"jest objaśniony jako j-ta obserwacja wielkości mierzonej. Według mnie precyzyjne objaśnienie powinno brzmieć „j-ta obserwacja wielkości mierzonej q".
5. Wstęp, str. 12: autor pisze „Uwzględniając analizę funkcjonowania Działu Jakości firmy Newag S.A., sformułowano koncepcję badań, w których jako punkt wyjścia znalazło się ograniczenie kosztów wynikających z produkcji wyrobów niezgodnych z dokumentacją. Zidentyfikowano jako kluczowy element system pomiarowy oparty na współrzędnościowym ramieniu pomiarowym, jako elementowi, z którego czerpane są informacje zwrotne w procesie produkcji". Formy „sformułowano", „zidentyfikowano" sugerują, że wspomniane działania nie są samodzielną pracą Doktoranta. Dlatego proszę o sprecyzowanie, jaki był wkład Autora rozprawy w sformułowanie koncepcji badań i identyfikację kluczowego elementu systemu pomiarowego.
6. Cel i zakres pracy, str. 15. Doktorant używa sformułowania „redundantny system pomiarowy". Ponieważ nie jest to sformułowanie, które jest powszechnie znane, proszę o wyjaśnienie, co ono oznacza.
7. Rozdział 3, str. 24. W tekście do oznaczenia wielkości mierzonej użyto dużej litery Q, natomiast w zależności (3.1) występuje mała litera q.
8. Rozdział 3, str. 26. Podane zależności (3.5) i (3.6) rzeczywiście przedstawiają estymatę (wartość oczekiwaną) oraz wariancję. Należy jednak podkreślić, że wzory te odnoszą się do rozkładu równomiernego, czego autor rozprawy nie zaznaczył. Ogólna zależność umożliwiająca obliczenie estymaty ma postać
$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx$$
z kolei wariancję V(X) można policzyć z zależności
$$V(X) = E(X^2) - E^2(X)$$
gdzie: x jest zmienną losową, natomiast p(x) opisuje rozkład prawdopodobieństwa tej zmiennej.
9. Rozdział 3, str. 27. Autor podaje wartość współczynnika rozszerzenia k dla poziomu ufności P=0,95 i rozkładu Gaussa równą 2. Należy zauważyć, że dokładna wartość tego współczynnika w podanym przypadku wynosi 1,96. Według mnie w pracy należałoby zaznaczyć, że podana wartość 2 to jedynie przybliżenie.
10. Rozdział 3, str. 28. W pierwszym akapicie Doktorant stwierdza: „współrzędnościowe ramiona pomiarowe są urządzaniami obsługiwanymi w sposób manualny, przez co predyspozycje operatora oraz potencjalne trudności wynikające z geometrii przedmiotu mają kluczowe znaczenie z punktu widzenia niepewności pomiarowej". Nasuwa się tu pytanie, czy jest to zdanie słuszne dla wszystkich typów ramion pomiarowych. Wydaje mi się, że znaczenie manualnej biegłości operatora ma mniejsze znaczenie w przypadku ramion wyposażonych w głowice optyczne. Ciekaw jestem opinii Doktoranta w tej kwestii.
11. Rozdział 3, rysunek 3.1. w odniesieniu do zmienności przedmiotu mierzonego Autor wymienia „Odchyłki kształtu, współczynnik rozszerzalności cieplnej, Struktura Geometryczna Powierzchni". Nie jest to poprawne, ponieważ odchyłki kształtu stanowią jedną ze składowych struktury geometrycznej powierzchni (wraz z falistością oraz chropowatością).

12. Rozdział 3, objaśnienia do zależności 3.22 – brakuje tu objaśnienia wielkości P_d (domyślam się, że jest to najmniejsza wartość zmierzona dla danej części).
13. Rozdział 3, str. 33. Zgodnie z uwagą zawartą w omówieniu pracy, zamiast terminów „ilość operatorów", „ilość mierzonych części" Doktorant powinien używać terminów „liczba operatorów", „liczba mierzonych części".
14. Rozdział 3, str. 34. W odniesieniu do współczynników powtarzalności i odtwarzalności Autor używa skrótów A.V. i E.V., z kolei w spisie oznaczeń podane są oznaczenia „AV", „EV".
15. Rozdział 3, rys. 3.5. Autor słusznie zwraca uwagę, że „szerokość obszaru zgodności zmienia się wraz ze zmianą niepewności". Należałoby doprecyzować jednak, dlaczego niepewność może ulegać zmianie. Czy Doktorant mógłby to wyjaśnić?
16. Rozdział 3, str. 46, zależność (3.43). Z podanego równania wynika, że wartość funkcji strat jakości jest zależna od współczynnika proporcjonalności k. W jaki sposób ten współczynnik jest dobierany? Czy Doktorant mógłby to wyjaśnić?
17. Rozdział 3, str. 56. Uważam, że powtórzenie tezy podanej już w rozdziale 2 jest niepotrzebne.
18. Rozdział 4, str. 60. Uważam, że byłoby wskazane przedstawienie fotografii stanowisk i mierzonych wzorców.
19. Rozdział 4, str. 67. Rysunek 4.8 byłby bardziej czytelny, gdyby nieco zmniejszono zakres wartości na osi Y.
20. Rozdział 4, str. 71. Ostatni blok algorytmu przedstawionego na rysunku 4.10 jest błędny (powinien to być „Stop", a nie „Start").
21. Rozdział 4, str. 72. Oznaczenia na rysunku 4.11 są mało czytelne - rysunek powinien być większy.
22. Rozdział 5, str. 80. Oznaczenia wymiarów na rysunku 5.6 są mało czytelne.
23. Rozdział 5, str. 82. Na rysunku 5.8. brakuje jednostki na osi Y. Ta sama uwaga dotyczy też innych rysunków, np. 5.9 i 5.10.
24. Rozdział 5, str. 83. Zgodnie z tym, co już zaznaczyłem w omówieniu pracy, należałoby uściślić, jakie dokładnie czynniki zdecydowały o wyborze do analizy narzędzi zgodnych z MSA.
25. Rozdział 5, str. 94. Rysunek 5.20 jest mało czytelny.
26. Rozdział 5. Naniesienie wartości docelowej graficznie na rysunkach 5.25, 5.26 i 5.27 ułatwiłoby analizę wartości podanych na tych rysunkach.
27. Rozdział 5, str. 100. Zależność (5.1) została podana już wcześniej w rozdziale 3, jako zależność (3.43).

Wniosek końcowy

Większość z przedstawionych w niniejszej recenzji uwag ma charakter dyskusyjny i nie wpływa na pozytywną ocenę merytoryczną rozprawy doktorskiej, która jest aktualnym i interesującym opracowaniem Doktoranta, dotyczącym niepewności pomiarów za pomocą współrzędnościowych ramion pomiarowych. Podjęty problem jest istotny z punktu widzenia podnoszenia dokładności tego typu pomiarów. Zrealizowane przez Doktoranta zadanie badawcze było trudne, a przedstawiony materiał jest oryginalnym dorobkiem Doktoranta, zarówno pod względem poznawczym jak i utylitarnym, który wpisuje się w zakres dyscypliny inżynieria mechaniczna. Przedstawione w pracy badania i informacje wskazują, że Doktorant dobrze orientuje się w literaturze przedmiotu oraz posiada wiedzę teoretyczną w obszarze

tematyki pracy. Zakres badań jest dobrze uzasadniony i może być kontynuowany w przyszłości. Szczególnie pozytywnie oceniam próbę oszacowania wpływu czynnika ludzkiego na wyniki pomiarów uzyskiwanych przy użyciu współrzędnościowych ramion pomiarowych. Pozytywnie oceniam wnioski końcowe oraz kierunki dalszych badań.

Na podstawie przedstawionej recenzji stwierdzam, że rozprawa mgra inż. Sławomira Jurkowskiego pt. „Metoda poprawy zdolności procesu wytwórczego poprzez korekcję błędu systematycznego współrzędnościowego ramienia pomiarowego" spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Krzysztof Stępień

Kielce, dn. 17.01.2022 r.