

Białystok, 27.03.2024 r.

Dr hab. inż. Małgorzata Poniatowska  
Katedra Inżynierii Materiałowej i Produkcji  
Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej  
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45 C  
Tel. 692 543 901

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Urszuli Kmieciak-Sołtysiak  
nt. **Analiza metody porównywania parami w szacowaniu podobieństwa  
zarysów okrągłości części maszyn**

opracowana na zlecenie Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna  
Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 14.07.2023 r.

### 1. Ocena problematyki rozprawy

Rosnące wymagania dotyczące jakości części maszyn wymuszają wzrost dokładności wytwarzania, w konsekwencji poszukuje się nowych rozwiązań technicznych i metod celem polepszenia procesów technologicznych oraz zapewnienia właściwej oceny dokładności wymiarowej i geometrycznej.

Najliczniej reprezentowaną grupą elementów maszyn są części zawierające powierzchnie obrotowe, których specyfikacje geometryczne zawierają wymagania dotyczące struktury geometrycznej powierzchni, w tym tolerancje kształtu, takie jak np. tolerancja okrągłości. Struktura geometryczna powierzchni wpływa na właściwości eksploatacyjne współpracujących elementów. W połączeniach ruchomych stan geometryczny powierzchni wpływa na poziom drgań, szumów, zmiany oporu ruchu oraz dokładność przemieszczeń względnych. Szczególne wymagania stawiane są elementom tocznym łożysk. W przypadku elementów tocznych łożysk

W ocenie profili okrągłości wykorzystuje się najczęściej metodę bezodniesieniową polegającą na pomiarze zmian promienia – rezultatem pomiaru jest profil okrągłości (w układzie biegunowym), z którego wyznaczania jest m.in. odchyłka okrągłości. Profile okrągłości niosą wiele informacji, które można wykorzystać nie tylko do oceny dokładności elementów, ale także do diagnozowania procesów wytwarzania oraz oceny technik pomiarowych. Z profili okrągłości można wyznaczyć wiele parametrów i funkcji, które mogą posłużyć do porównywania tych profili. Wyniki badań podobieństw profili okrągłości można wykorzystać do wnioskowania o cechach wyprodukowanych elementów lub o właściwościach technik/przyrządów pomiarowych. Porównywanie parami pozwala na



wybór obiektu o „lepszych” właściwościach ze względu na zastosowane kryterium, jeśli porównywanych elementów jest wiele, to na przeprowadzenie ich selekcji. Stosowanie takich metod ma szczególne znaczenie w ocenie dokładności elementów maszyn, którym stawiane są wysokie wymagania dokładnościowe, takich jak np. elementy łożysk tocznych.

W zamierzeniu Doktorantki, podjęte przez nią zadanie, to przeprowadzenie analizy metody porównywania parami w szacowaniu podobieństwa profili okrągłości części maszyn na podstawie wybranych parametrów oraz funkcji korelacji wzajemnej. Wyniki badań, w założeniu, miały zweryfikować tezę pracy o możliwości wykorzystania tej metody do kompleksowej oceny części maszyn. Mogłoby to być podstawą do wyselekcjonowania elementów o zbliżonych profilach, bądź do wskazania elementów o profilach zbliżonych do profilu wzorcowego.

Z punktu widzenia walorów poznawczych i aplikacyjnych recenzowana praca doktorska jest aktualna i ważna. Dostarcza nowej wiedzy i rozwiązuje problem istotny w pomiarach części maszyn, którym stawiane są wysokie wymagania dotyczące kształtu. Zaproponowana metoda porównywania parami jest nowa wśród metod badań profili okrągłości a wyniki badań wykazują jej przydatność.

Stwierdzam, że tematyka i zakres pracy **spełniają wymagania, jakie można wiązać z tematem pracy doktorskiej**. Dobrze wkomponowuje się we współczesne potrzeby badawcze, związane z poszukiwaniem nowych rozwiązań dla potrzeb zwiększania dokładności oceny i wytwarzania części maszyn.

## 2. Opis rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Urszuli Kmiecik-Sołtysiak, napisana na 151 stronach, składa się z 6 rozdziałów, w tym „Wprowadzenia” i „Wniosków”. Praca zawiera łącznie 71 rysunków, w tym większość to wykresy, i 26 tabel, w tym większość z wynikami badań. Pracę zamyka spis literatury zawierający 90 pozycji oraz wykaz 11 norm.

Należy stwierdzić, że układ przedstawionej rozprawy jest prawidłowy. Mgr inż. U. Kmiecik-Sołtysiak zastosowała właściwą kolejność rozdziałów, zaczynając od opisu wiedzy literaturowej poprzez postawienie celów, określenie zakresu prac badawczych, postawienie tezy, podstawy teoretyczne, badania, analizę statystyczną, co doprowadziło do podsumowania i wniosków końcowych. Praca jest napisana zwięźle, poprawnym językiem, z zastosowaniem aktualnej/właściwej terminologii i zredagowana z dużą starannością.

W rozdz. 1 Autorka wprowadza czytelnika w tematykę pomiarów wielkości geometrycznych i zwraca uwagę na znaczenie metrologii w procesach wytwarzania, w tym znaczenie oceny struktury geometrycznej powierzchni, wprowadza jej definicję oraz podkreśla wpływ na właściwości eksploatacyjne; koncentruje się na odchyłkach kształtu, przytaczając definicje tolerancji geometrycznych z normy. Zgodnie z tematyką pracy skupia uwagę na odchyłce okrągłości i ocenie profili elementów łożysk tocznych, w tym wpływie

profilu okrągłości elementów łożysk na ich cechy funkcjonalne. Autorka wymienia techniki pomiaru profili okrągłości i przechodzi do opisu możliwości szacowania ich podobieństw z możliwością zastosowania wyników takich badań do porównań profili otrzymywanych za pomocą różnych przyrządów pomiarowych, co, jak wskazano w zacytowanych źródłach, może być podstawą do badań dokładności tych przyrządów.

W rozdz. 2 Autorka podaje aktualny stan wiedzy obejmujący pomiary profili okrągłości oraz opisuje sposoby szacowania ich podobieństw, zamieszczając obszerne opisy podzielone na podrozdziały tematyczne. Znajduje się w nim konieczne odniesienie do aktualnych norm, w tym terminy i definicje związane z oceną profili okrągłości. Wprowadzenie czytelnika do tematyki badań poprzez zacytowanie obowiązujących terminów i definicji ma fundamentalne znaczenie, pozwala zrozumieć czytelnikowi prowadzone eksperymenty, analizę wyników i wnioski z przeprowadzonych badań. Kolejno, znajdujemy charakterystyki stosowanych filtrów odcinających, stosowanych do filtracji sygnałów pomiarowych/profilu powierzchni, które wpływają na efekt modyfikacji linii obwodowej, a tym samym profil kształtu i wartości wyznaczonych z niego odchyłek, opisy metod pomiaru odchyłki okrągłości wykorzystanych w realizacji badań, a także alternatywnych metod pomiaru wraz ze wskazaniem możliwości stosowania tych metod w praktyce przemysłowej, w odniesieniu do wymagań zawartych w specyfikacjach geometrycznych. Autorka zwraca uwagę na przewagę metody pomiaru zmian promienia ze względu na jej wysoką dokładność, oraz uwagę na uniwersalność współrzędnościowej techniki pomiarowej. Wszystkie opisy prowadzone są w odniesieniu do oceny dokładności i współpracy elementów łożysk tocznych. Nieodłączną częścią tych opisów jest związany z tematem pracy opis metod porównywania profili okrągłości. Doktorantka przedstawia możliwość zastosowania porównań ilościowych nie tylko w odniesieniu do elementów maszyn, ale także w ocenie dokładności przyrządów pomiarowych wykorzystywanych w badaniach, wskazuje zasadność zastosowania takich parametrów jak: współczynniki korelacji liniowej Pearsona, współczynnik korelacji rangowej Spearmana oraz współczynnik korelacji wzajemnej, zamieszcza odpowiednie zależności wraz z wyczerpującymi wyjaśnieniami. Należy podkreślić prawidłowy dobór metod analiz matematycznych/statystycznych oraz powiązanie wyników takich analiz z oceną właściwości elementów maszyn. Rozdział kończy podsumowanie. Analiza stanu wiedzy pozwoliła na sformułowanie przez Doktorantkę krytycznego podejścia w zakresie prowadzonych badań, i w rezultacie do wskazania konieczności uwzględnienia i zastosowania nowych kryteriów w ocenie dokładności profili okrągłości, parametrów uwzględniających wartości amplitud dominujących składowych harmonicznych. Taka wielokryterialna ocena profili znajduje zastosowanie w produkcji elementów łożysk tocznych, którym stawiane są szczególnie wysokie wymagania dotyczące dokładności geometrycznej – poszukiwanie nowych rozwiązań zasługuje więc na szczególną uwagę. Doktorantka zaproponowała nowatorskie zastosowanie metod porównywania parami do selekcji elementów łożysk tocznych ze względu na cechy ich profili, podkreśliła możliwość efektywnego wykorzystanie takiego



rozwiązania w produkcji masowej łożysk, umiejętnie budząc zainteresowanie czytelników wynikami przeprowadzonych eksperymentów i analiz.

Rozdział 3, to przedstawienie celu i sposobu realizacji pracy. Sprecyzowany jasno cel główny podzielono na cele szczegółowe i co bardzo cenne, sformułowano również tezę pracy. Drobną uwagę – tytuł podrozdziału 3.3 sugeruje opis sposobu realizacji pracy, treść tego podrozdziału zawiera opis zawartości rozdziałów dysertacji, który tylko częściowo zawiera treści zasygnalizowane w tytule.

Rozdział 4 to pełne przedstawienie procedury pomiarów odchyłki okrągłości. We wstępie do rozdziału podkreślono wagę stosowania w przeprowadzaniu pomiarów zasad, określanych jako *dobra praktyka pomiarowa*, w realizacji badań zastosowano wszystkie te zasady, na co wskazuje dalszy tekst tego rozdziału. Po zaprezentowaniu charakterystyk mierzonych elementów łożysk, ich fotografii oraz specyfikacji geometrycznych, opisano czynności przygotowujące do przeprowadzenia prac eksperymentalnych, zmierzających do realizacji celu i weryfikacji tezy pracy, w tym niezbędne analizy źródeł błędów i oszacowanie tych błędów. Kolejne kroki postępowania uzasadniono i szczegółowo wyjaśniono, a także bogato udokumentowano za pomocą rysunków, fotografii i wykresów. Zamieszczono specyfikację systemu pomiarowego Talyrond 73, wraz z oprzyrządowaniem, oraz charakterystyki metrologiczne. Opisano szczegółowo przeprowadzone testy i adjustacje przyrządu oraz przebieg pomiarów, podano parametry pomiaru. Kompleksowość analizy wpływu źródeł błędów pomiaru zasługuje na uznanie, to prawdziwie metrologiczne podejście do eksperymentu. Na podstawie analiz sporządzono budżet niepewności pomiaru – tekst zawiera opis szacowania składowych niepewności wraz z niezbędnymi wzorami i szczegółami, wyniki tych analiz podsumowano czytelnie w tabeli zbiorczej. Bardzo cenna dla użytkowników jest interpretacja końcowa tych analiz.

W rozdz. 5 Autorka dokumentuje swoimi wynikami badań przydatność wybranej metody. Rozpoczyna od przybliżenia czytelnikowi parametrów wykorzystanych do oceny wielokryterialnej profili okrągłości, oraz uzasadnienia ich wyboru, a także wskazuje na znaczenie porównań parami w szacowaniu podobieństwa profili. Wybrane parametry poszczególnych profili porównywano parami przypisując wynikom stopnie z określonej skali, dla przyjętych kryteriów obliczono wagi, co umożliwiło przypisanie ocen profilom badanych baryłek. Ta procedura umożliwiła wyselekcjonowanie baryłek o profilach referencyjnych. Do wybranych kryteriów należą: odchyłka okrągłości  $RONt$ , całkowitą wysokość profilu falistości  $Wt$  dla 15-50 i dla 15-500 fal na obwodzie, współczynniki nieregularności profili oraz numer dominującej składowej harmonicznej. Bardzo trafnie wybrane kryteria oceny mają związek z właściwościami eksploatacyjnymi elementów. W ostatnim etapie, do badania podobieństw profili wykorzystano funkcję korelacji wzajemnej, która pozwoliła na wyselekcjonowanie profili o zbliżonej charakterystyce. Autorka uzasadniła wybór tej metody badań – dobór elementów tocznych o zbliżonej charakterystyce profili kształtu skutkuje

lepszymi właściwościami funkcjonalnymi łożyska, równomiernym rozkładem obciążenia, minimalizacją tarcia i równomiernym zużyciem elementów. Badania przeprowadzono na 44 baryłkach, po wykonaniu pomiarów dokonano analizy statystycznej wyników, zweryfikowano normalność rozkładów prawdopodobieństwa oraz korelację pomiędzy wyznaczonymi parametrami profili, co umożliwiło wyłonienie parametrów do kompleksowej oceny kształtu elementów – do ostatecznej oceny wytypowano parametry: odchyłkę okrągłości  $RONt$ , całkowitą wysokość profilu faliści  $Wt$  dla profilu 15-50 fal na obwodzie, współczynnik nieregularności profilu okrągłości obliczony ze stosunku amplitud drugiej do pierwszej dominujących składowych harmonicznym oraz numer dominującej składowej harmonicznym w szeregu Fouriera. Na podstawie porównań parami tych parametrów przypisano wagi poszczególnym parametrom, najwyższą wagę przypisano odchyłce  $RONt$ , po czym dokonano kompleksowej oceny profili kształtu wszystkich baryłek. Wyniki tych analiz czytelnie zilustrowano za pomocą tabel oraz wykresów. W kolejnym kroku porównywano profile parami, stosując funkcję korelacji wzajemnej na podstawie amplitud składowych po wykonaniu analizy harmonicznym profili kształtu. Wyniki badań poddano analizie statystycznej i porównawczej, co obszernie udokumentowano. W podsumowaniu Doktorantka trafnie wskazała znaczenie wyników takich badań, zarówno w odniesieniu do możliwości selekcjonowania elementów, jak i do monitorowania stabilności procesu wytwarzania tych elementów. Tę samą metodę zastosowano do porównania wszystkich profili z profilem wzorca, słusznie wskazując cel badania i możliwość wykorzystania wyników.

Prace eksperymentalne, ich analizy i wypływające z nich wnioski doprowadziły Doktorantkę do podsumowania swoich prac w Rozdziale 6.

Opisane atrybuty dysertacji pozwoliły na wykonanie zaplanowanych badań, realizację celu pracy oraz potwierdzenie sformułowanej przez Doktorantkę tezy pracy.

Można więc podsumować, że praca stanowi kompletne dzieło. Wybrane i analizowane zagadnienie oraz zrealizowane i udokumentowane w rozprawie doktorskiej badania – **swą celowością, wynikającą ze znaczenia naukowego i potrzeby aplikacyjnej, skalą złożoności, przekazu nowej wiedzy, poprawnie postawionego i sformułowanego zadania badawczego, a także sposób opracowania i przekazu wyników tych badań, spełniają wymogi stawiane rozprawom doktorskim.**

### 3. Ocena merytoryczna pracy

**Temat pracy można uznać za rozwiązany na poziomie zadania doktorskiego.** Kolejne rozdziały rozprawy opisują we właściwy sposób przyjęty tok myślowy, zastosowane metody i techniki pomiarowe, w tym analizę i budżet niepewności pomiarów, badania i analizę statystyczną wyników wykonane przez Doktorantkę w celu rozwiązania postawionego przez nią zadania badawczego.



Zawartość recenzowanej rozprawy doktorskiej ma istotną wartość poznawczą dla inżynierów mechaników zajmujących się oceną oraz poprawą dokładności wytwarzania elementów obrotowych maszyn, a w szczególności elementów łożysk tocznych, którym stawiane są wysokie wymagania dokładności zarówno wymiaru jak i kształtu w kontekście ich funkcjonowania.

Do istotnych osiągnięć pracy doktorskiej zaliczam:

- dostarczenie nowej bazy wiedzy, obejmującej autorski materiał dokumentujący wykonane badania nad możliwością zastosowania metody porównywania parami w szacowaniu podobieństwa profili okrągłości części maszyn;
- kompleksową analizę metrologiczną wybranej metody oceny podobieństw profili okrągłości, poczynając od identyfikacji źródeł niepewności, przez ocenę ilościową wpływu tych źródeł po wyznaczenie niepewności złożonej pomiaru, co jest szczególnie cenne i świadczy o prawdziwie metrologicznym podejściu do prowadzenia prac badawczych.
- dostarczenie nowej metody wielokryterialnej oceny profili okrągłości możliwej do zastosowania m.in. w szacowaniu podobieństwa profili elementów łożysk tocznych, umożliwiającej wyselekcjonowanie elementów o zbliżonym charakterze profili, której zastosowanie może istotnie przyczynić się do poprawy właściwości eksploatacyjnych łożysk tocznych.

Mgr inż. Urszula Kmiecik-Sołtysiak wykazała się wystarczającymi zdolnościami naukowymi wymaganymi przy zdobywaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych, a w szczególności:

- znajomością najnowszej literatury związanej z tematyką oceny kompleksowej profili okrągłości i oceną dokładności pomiarów,
- ugruntowaną, dogłębną wiedzą z zakresu tych zagadnień,
- umiejętnością formułowania problemów badawczych i stawiania tez,
- swobodą w stosowaniu technik badawczych,
- umiejętnością wykorzystywania różnych narzędzi w analizie metrologicznej wyników badań,
- umiejętnością trafnej interpretacji wyników i wyciągania wniosków z wyników badań.

W prezentacji obszernego materiału badawczego zawsze pojawiają się błędy, zarówno merytoryczne, terminologiczne, interpretacyjne, jak i edytorskie oraz sformułowania budzące wątpliwości, o charakterze dyskusyjnym. Do takich błędów można zaliczyć:

- w całej pracy:
  - brak konsekwencji w formie podawania wyników pomiarów, wyniki pomiaru podane są zarówno w nanometrach jak i w mikrometrach z różną liczbą miejsc po

przecinku, w tym w tabeli dotyczącej wyznaczania niepewności pomiaru, oraz np. tab. 19, tab. 24 i tab. 26 – w tej samej tabeli podano wartości odchyłki okrągłości  $RONt$  w  $\mu m$  zarówno z jednym, dwoma jak i trzema miejscami po przecinku, co sugeruje, że wyniki pomiarów uzyskano na różnych przyrządach; zacytowane w pracy parametry metrologiczne przyrządu Talyrond 365, wzięte ze świadectwa wzorcowania przeprowadzonego w GUM, zostały podane w  $\mu m$  do dwóch miejsc po przecinku;

- kilkakrotnie zastosowane określenia „tolerancja wymiarowo-geometryczna” i odchyłka wymiarowo-geometryczna”, np. str. 39, nie są poprawne;
- czy „wyłonienie części” i „wyselekcjonowanie części” to ta sama czynność?
- czy sformułowania „kategoria oceny” i „kryterium oceny” są równoznaczne, np. str. 103?
- czy sformułowanie „pobranie określonej ilości punktów” oznacza to samo, co „pomiar określonej liczby punktów”, np. str. 72?
- Rozdz. V
  - sformułowanie „zadane prawdopodobieństwo rozszerzenia” (np. str. 87) nie jest poprawne.
  - zamienne używanie określeń „korelacja” i „współczynnik korelacji” (np. str. 102) nie jest poprawne (tak, jak nie byłoby poprawne zamienne używanie np. „okrągłość” i „odchyłka okrągłości”);
  - jak należy rozumieć zdanie: „numer dominującej harmonicznej  $C_{n1}$  powyżej 5 został oceniony najwyżej, gdyż taki zarys/profil jest zarysem/profilem bardziej pożądanym w przypadku elementów łożysk tocznych”, str. 106?
  - str. 111, wyjaśnienie symbolu  $n$  nie jest poprawne;

Wskazane w pracy błędy i niedociągnięcia, to błędy głównie interpretacyjne, terminologiczne, nieścisłości i niedomówienia, które nieznacznie obniżają ocenę pracy. **Pod względem merytorycznym oceniam pracę pozytywnie. Praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Ponadto nasuwają się następujące pytania, które wymagają wyjaśnienia ze strony Autorki.**

1. Jak należałoby precyzyjnie wyjaśnić cel i sposób badań powtarzalności i odtwarzalności pomiarów, np. w kontekście eksperymentów opisanych na stronach 77, 79 i 122?
2. Jaki był cel badania normalności rozkładów prawdopodobieństwa wyznaczanych parametrów profili okrągłości?
3. Jaką zasadę należy stosować przy odczytywaniu/podawaniu wyników pomiarów oraz wyników przeprowadzonych na nich obliczeń?
4. Jak należy rozumieć sformułowanie „wartości kompleksowej oceny” w kontekście interpretacji rysunków 58 i 59 str. 109?

Przedstawiony w recenzji szczegółowy opis pracy świadczy o tym, że mgr inż. Urszula Kmieciak-Sołtysiak jest doświadczonym eksperymentatorem, prawidłowo posługującym się

różnymi technikami badawczymi. Oprócz niezbędnej wiedzy teoretycznej prezentuje inżynierskie/metrologiczne podejście do rozwiązywanego problemu oraz doświadczenie. Wyniki jej prac zostały docenione przez recenzentów siedmiu publikacji, z których trzy są tematycznie związane z tematyką rozprawy, jedną z nich opublikowano w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym.

### **Konkluzja końcowa**

Opiniowana praca stanowi samodzielne, oryginalne rozwiązanie problemu naukowo-badawczego z zakresu pomiarów geometrycznych części maszyn. Tematyka ta wpisuje się zatem w problematykę dyscypliny *inżynieria mechaniczna*.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Urszuli Kmiecik-Sołtysiak zatytułowana „**Analiza metody porównywania parami w szacowaniu podobieństwa zarysów okrągłości części maszyn**” spełnia wymagania określone w obowiązującej Ustawie i w związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Urszuli Kmiecik-Sołtysiak do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

