

Recenzja rozprawy doktorskiej

Doktorant:

mgr inż. Karol Falandys

Tytuł rozprawy:

Wielokryterialna optymalizacja procesu szczotkowania zamka łopatki turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A

Promotor:

dr hab. inż. Krzysztof Kurc, prof. PRz

Promotor pomocniczy:

dr inż. Jacek Tutak

Dyscyplina naukowa:

Inżynieria Mechaniczna

Jednostka doktoryzująca:

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Podstawa opracowania:

Postępowanie w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 26 listopada 2025 r.

1. Przedmiot i cel rozprawy

Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest optymalizacja procesu szczotkowania (gratowania) zamka łopatki turbiny niskiego ciśnienia silnika lotniczego LEAP-1A, realizowanego w warunkach przemysłowych. Autor koncentruje się na doborze takich parametrów procesu, aby:

- wydłużyć czas eksploatacji narzędzia (szczotki) przy zachowaniu wymaganej jakości krawędzi obrabianej łopatki,
- ograniczyć koszty jednostkowe operacji oraz zużycie zasobów,

- wykazać skuteczność uzyskanych zmian na podstawie badań laboratoryjnych, analiz numerycznych oraz weryfikacji produkcyjnej.

Teza rozprawy zakłada istnienie w rozpatrywanym zakresie zmienności parametrów procesu szrotkowania lokalnego minimum zużycia materiałów ściernych, którego ustalenie przekłada się na wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia.

Celem głównym pracy jest wyznaczenie oraz wdrożenie w środowisku produkcyjnym zoptymalizowanego zestawu parametrów procesu szrotkowania, skutkującego wydłużeniem okresu eksploatacji narzędzia i redukcją kosztów jednostkowych operacji.

Cele szczegółowe obejmują m.in.:

- identyfikację istotnych parametrów wejściowych i wyjściowych procesu,
- przeprowadzenie testów laboratoryjnych z rejestracją obciążeń oraz oceną rezultatów procesu,
- opracowanie modelu numerycznego procesu z wykorzystaniem MES i modelu Archarda oraz porównanie z wynikami eksperymentalnymi,
- realizację testów w środowisku przemysłowym i analizę wyników,
- wdrożenie nowych parametrów procesu i ocenę skutków jakościowych oraz kosztowych.

2. Struktura i główne treści rozprawy

Rozprawa ma logiczny układ i odpowiada kolejnym etapom realizacji zadania badawczo-wdrożeniowego. W pracy przedstawiono wprowadzenie i przegląd literatury, badania laboratoryjne, testy przemysłowe, modelowanie numeryczne MES, wdrożenie parametrów procesu wraz z weryfikacją, analizę kosztów oraz wnioski i kierunki dalszych badań. Przyjęta struktura umożliwia ocenę kompletności całego cyklu badawczo-wdrożeniowego, obejmującego etap badań, modelowania, wdrożenia, walidacji oraz analizy kosztowej.

W celu poprawy jakości uzyskiwanych wyników zdecydowano się na implementację skryptu przygotowanego w języku APDL (Ansys Parametric Design Language). Należy pozytywnie ocenić tę decyzję, ponieważ zastosowanie podejścia parametrycznego zwiększa powtarzalność analiz, ogranicza ryzyko błędów wynikających z manualnej ingerencji w model oraz umożliwia systematyczne badanie wpływu zmiennych parametrów procesu na wyniki symulacji. Wykorzystanie APDL świadczy o dojrzałym podejściu do zagadnień numerycznych i dobrej znajomości środowiska MES. Automatyzacja obliczeń pozwala nie tylko na usprawnienie procesu symulacyjnego, ale również na przeprowadzanie analiz wariantowych i badań parametrycznych w sposób kontrolowany i metodyczny. Ma to

szczególne znaczenie w pracy, której celem jest optymalizacja procesu technologicznego, ponieważ umożliwia konsekwentne porównywanie wyników dla różnych zestawów parametrów wejściowych. Jednocześnie warto byłoby szerzej omówić strukturę zastosowanego skryptu (np. sposób parametryzacji geometrii, warunków brzegowych i kontaktu), co dodatkowo podniosłoby walor metodologiczny pracy.

3. Ocena spełnienia wymogów art. 187 ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce

Zgodnie z art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, rozprawa doktorska powinna:

1. prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie (lub dyscyplinach),
2. wykazywać umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
3. stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne osiągnięcie o charakterze projektowym / wdrożeniowym.

3.1. Ocena ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata

Rozprawa zawiera uporządkowany przegląd literatury z zakresu optymalizacji procesów technologicznych, zagadnień zużycia ściernego (w tym modelu Archarda) oraz metodyki analizy kosztów procesu produkcyjnego. Autor poprawnie opisuje kontekst przemysłowy oraz uzasadnia wybór metod eksperymentalnych i obliczeniowych.

Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa potwierdza posiadanie przez Doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna, adekwatnej do tematyki pracy.

3.2. Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Rozprawa dokumentuje sformułowanie tezy i celów, realizację badań laboratoryjnych, przygotowanie i wykonanie badań w środowisku przemysłowym, opracowanie modelu numerycznego MES, porównanie wyników obliczeń z wynikami eksperymentalnymi oraz wdrożenie nowych parametrów procesu wraz z oceną skutków kosztowych.

W świetle powyższego oceniam, że praca potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

3.3. Ocena oryginalności osiągnięcia o charakterze wdrożeniowym

Oryginalny wkład Doktoranta ma przede wszystkim charakter wdrożeniowy w warunkach produkcji wraz z jej weryfikacją. W pracy przedstawiono wykorzystanie modelowania numerycznego (MES) z uwzględnieniem zużycia ściernego na bazie modelu Archarda oraz odniesienie wyników symulacji do danych pomiarowych. Opracowana metodyka doboru parametrów procesu szrotkowania oraz przeprowadzone badania i analizy prowadzą do wskazania parametrów korzystnych z punktu widzenia zużycia narzędzia.

Warto podkreślić, że choć zasadniczy charakter osiągnięcia ma wymiar wdrożeniowy, to istotny wkład naukowy stanowi także zaproponowana metodyka łączenia badań eksperymentalnych, modelowania numerycznego z wykorzystaniem modelu zużycia ściernego oraz analizy kosztowej w spójny schemat decyzyjny. Takie zintegrowane podejście zwiększa wartość poznawczą pracy i może stanowić punkt odniesienia dla analogicznych procesów technologicznych.

Na podkreślenie zasługuje konsekwentne prowadzenie badań zgodnie z logiką eksperymentu inżynierskiego: identyfikacja zmiennych, plan testów, weryfikacja eksperymentalna, porównanie z symulacją oraz implementacja w warunkach przemysłowych.

Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa stanowi oryginalne osiągnięcie o charakterze wdrożeniowym w obszarze optymalizacji procesu technologicznego.

4. Uwagi krytyczne i sugestie

Poniższe uwagi mają charakter rozwojowy i nie wpływają na ogólną, pozytywną ocenę spełnienia wymagań ustawowych.

1. **Formalizacja wielokryterialności.** Tytuł rozprawy wskazuje na wielokryterialną optymalizację procesu, podczas gdy opis kryteriów i sposobu ich łączenia ma w pracy charakter w większym stopniu opisowy niż formalny. Dla zwiększenia jednoznaczności wskazane byłoby przedstawienie syntetycznego zapisu problemu optymalizacji (funkcje celu, ograniczenia oraz zakres zmiennych decyzyjnych).
2. **Walidacja i wrażliwość modelu zużycia.** Model Archarda jest podejściem klasycznym. W pracy przedstawiono jego zastosowanie w analizie procesu, jednak zasadne wydaje się uzupełnienie dyskusji o wpływ doboru parametrów modelu na wynik oraz o ograniczenia wynikające ze specyfiki szrotkowania włosem.
3. **Powtarzalność i niepewność.** W części eksperymentalnej warto rozważyć zebranie informacji o powtarzalności pomiarów i niepewności, zwłaszcza w kontekście wskazywania minimum lokalnego.

4. **Zakres uogólnienia.** Praca dotyczy konkretnego procesu, narzędzia i geometrii. Wskazane byłoby krótkie doprecyzowanie wniosków w zakresie możliwości wykorzystania wyników na innych typach szczotek lub innych geometriach krawędzi oraz warunków, dla których należałoby ponowić identyfikację optimum. Komentarza wymaga fotografia szczotki umieszczona na Rys. 32, na którym widoczna jest prędkość "max. 6000/min", podczas gdy na stronie 29 Doktorant stwierdza, że "... producenta szczotki dopuszcza nawet 5000 rpm".

Na Rys. 19 przedstawiono zależność grubości włosa po przeprocowaniu 30 i 60 sztuk. Biorąc pod uwagę wzajemne przecięcia się charakterystyk pojawia się pytanie, czy nie warto zrobić pomiary również po przeprocowaniu 40 i 50 sztuk?

Również wyjaśnienie wymaga średnia wartość pomiaru grubości włosa dla szczotki: nowa 1.14, zużyta 1.15.

W kontekście dalszych badań interesujące byłoby rozszerzenie modelu o nieliniowe mechanizmy zużycia włókien szczotki oraz uwzględnienie sprzężenia zjawisk cieplno - mechanicznych, co mogłoby zwiększyć dokładność predykcijną modelu.

5. Uwagi redakcyjne

W zakresie uwag redakcyjnych warto zunifikować terminologię: „gratowanie / szczotkowanie / zatępienie krawędzi”, ujednolicić zapis liczb dziesiętnych oraz jednostek i symboli oraz konsekwentne stosowanie pojęć „liczba” zamiast „ilość” dla wielkości policzalnych. W wykazie ważniejszych oznaczeń R oraz r oznaczają wartość promienia zatępienia krawędzi, podczas gdy na str. 58, Rys. 26 R jest odległością od środka narzędzia do punktu styku włosa z detalem, z kolei na stronie 63 R^2 jest współczynnikiem determinacji.

Dla lepszego porównania charakterystyki z Rys. 6 i Rys. 7 mogłyby być umieszczone na jednym rysunku.

Rys. 16 zawiera cztery zdjęcia, jednak brakuje opisu, która z fotografii została wykonana przed obróbką a która po obróbce. Również perspektywa z jakiej zrobiono ujęcia powinna być zunifikowana.

Podobnie fotografie na Rys. 36 - 42 wykonane zostały w różnej perspektywie, przez co ich analiza jest utrudniona.

Tabela nr 20 zawiera kolumnę dotyczącą liczby sztuk spełniających kryteria, jednak jako parametr wyjściowy określony jest warunek usunięcia wszystkich zadziorów.

Są to jednak drobne propozycje poprawek edycyjnych, które nie umniejszają jakości wykonanych badań.

Ponadto w pracy nie znaleziono skryptu, o którym Doktorant wspomina na stronie 58.

6. Konkluzja końcowa

Po analizie rozprawy stwierdzam, że:

- praca prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie odpowiadającej tematyce rozprawy,
- praca potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- praca stanowi oryginalne osiągnięcie o charakterze wdrożeniowym w zakresie optymalizacji procesu technologicznego.

W związku z powyższym **wniosuję o dopuszczenie mgr. inż. Karola Falandysa do publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Uważam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.**

17.02.2026

Data



Podpis Recenzenta