

Dr hab. inż. Krzysztof Żak, prof. PO
Wydział Mechaniczny
Katedra Technologii Maszyn i Materiałoznawstwa
Politechnika Opolska

Opole, dnia 28.02.2025

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Łomozik nt. *Modelowanie i optymalizacja procesu cięcia elektroerozyjnego z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Sokołowski

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Dyrbuś

Opiekun pomocniczy: dr hab. inż. Henryk Bąkowski

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny dr hab. inż. Alicji Piasecka-Belkahayat, prof. PŚ nr RDIME.512.13.2024 z dnia 18.12.2024 r.

1. Tematyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Łomozik ściśle związana jest z obszarami inżynierii mechanicznej i koncentruje się na modelowaniu procesu cięcia elektroerozyjnego z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. Celem pracy jest optymalizacja tego procesu w kontekście technologii wytwarzania opartej na erozji elektrycznej. W przemysłowych zastosowaniach elektroerozyjne cięcie jest szeroko rozpowszechnione. Należy jednak pamiętać, że proces ten charakteryzuje się wieloma parametrami, które wykazują nieliniowość i zmienność w czasie trwania erozji.

Modelowanie procesu technologicznego z wykorzystaniem sztucznej inteligencji (AI – artificial intelligence), które jest coraz częściej stosowane, umożliwia skuteczniejszą identyfikację złożonych zależności między parametrami procesu a jego wynikami. W porównaniu z tradycyjnym modelowaniem opartym na równaniach fizycznych, które nie zawsze są w stanie dokładnie opisać proces ze względu na jego stochastyczny charakter, podejście oparte na AI oferuje większe możliwości analizy i optymalizacji.

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Łomozik jest niezwykle istotny temat, zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i praktycznego, technologicznego oraz eksploatacyjnego, co zostało przedstawione w niniejszej dysertacji. Pomimo licznych publikacji z zakresu optymalizacji procesów elektroerozyjnych, które ukazywały się w ostatnich dekadach, recenzowana rozprawa doktorska wnosi świeże spojrzenie i prezentuje oryginalne podejście do tego zagadnienia.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 04.03.2025
RDIME/981/51/2025.
nr zał.

W pracy tej Autor podjął się badań eksperymentalno-analitycznych oraz modelowania procesu, aby osiągnąć skuteczniejszą optymalizację cięcia elektroerozyjnego dla wybranej maszyny. Kluczowym elementem pracy jest opracowanie odpowiedniego algorytmu sztucznej inteligencji, który umożliwi optymalizację procesu cięcia. Ponadto, w ramach rozprawy doktorskiej, stworzono oprogramowanie, które wykorzystuje najefektywniejszy, wybrany algorytm. Oprogramowanie to jest dedykowane dla elektrodrażarki drutowej Fanuc α -C600iC i obróbki stali stopowej o nazwie handlowej IMPAX.

Podsumowując, podjętą tematykę rozprawy uważam za bardzo ważną w aspekcie pragmatycznym, a w ten sposób oceniam jak najbardziej pozytywnie.

2. Ogólna ocena treści, układu i zakresu rozprawy

Rozprawa liczy 169 stron i składa się z 12 rozdziałów wraz z podrozdziałami, spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, spisu literatury (bibliografii) obejmującego 104 pozycje.

Rozdział 1 *Wprowadzenie* do rozprawy doktorskiej, Autor dysertacji w tym rozdziale opisuje wyzwania, przed którymi stoi współczesny przemysł w kontekście zwiększania wydajności i dokładności procesów technologicznych. Podkreśla, że jakość produktów i efektywność produkcji są kluczowe dla konkurencyjności przedsiębiorstw. Na przykładzie firmy SMHydro z Katowic, specjalizującej się w produkcji satelitowych silników hydraulicznych dla górnictwa, przedstawił problem precyzyjnej obróbki elementów mechanizmu satelitowego. Firma ta, w celu spełnienia wysokich wymagań jakościowych, wdrożyła technologię obróbki elektroerozyjnej drutem (WEDM). Proces ten, choć precyzyjny, generuje wysokie koszty ze względu na konieczność wielokrotnego cięcia elektrodą drutową. W związku z tym, firma poszukuje możliwości optymalizacji procesu WEDM w celu zredukowania kosztów produkcji przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości i precyzji wytwarzanych komponentów. W tym kontekście, autor podjął się opracowania i wdrożenia sztucznej inteligencji do wspierania procesów optymalizacji w produkcji wykorzystującej obrabiarki elektroerozyjne.

Rozdział 2 *Cel i zakres badań* zawiera cztery podrozdziały, w których Autor przedstawia podstawowe cele podzielone na cztery cele szczegółowe które mają zostać osiągnięte po zakończonej analizie i wdrożone do przedsiębiorstwa, następnie w podrozdziale 2.2 został przedstawiony logiczny, szczegółowy zakres prac podejmowanych w celu osiągnięcia głównego założenia którym jest wdrożenie i opracowanie oprogramowania wspomagającego optymalizację procesu cięcia na elektrodrażarce drutowej. Kolejny podrozdział 2.3 jest przedstawienie podstawowych pojęć związanych z zagadnieniem uczenia maszynowego oraz sztucznej inteligencji.

Ostatni podrozdział 2.4. autor pokrótce przedstawia oprogramowanie w którym prowadzone były prace obliczeniowe, którym był Python który jest językiem programowania wysokiego poziomu, ale posiadający prostą i czytelną składnię do wszechstronnego zastosowania. W tabeli 2.1 doktorant również przedstawił zastosowane biblioteki i frameworki bazujące na języku JavaScript niezbędne w osiągnięciu założonego celu.

Podsumowując, rozdział 2 został przedstawiony w sposób czytelny i kompletny, jasno określając cele, zakres badań oraz wykorzystywane narzędzia programistyczne.

W rozdziale 3 autor przedstawił podstawową charakterystykę procesu obróbki elektroerozyjnej. Podzielił go na dwa główne podrozdziały: w podrozdziale 3.1 w syntetyczny sposób opisał historię rozwoju tej technologii, natomiast w podrozdziale 3.2, składającym się z czterech części, omówił mechanizmy usuwania materiału w obróbce WEDM, scharakteryzował podstawowe parametry procesu oraz przedstawił jego fizyczne etapy. W ostatniej, czwartej części tego podrozdziału opisał budowę typowej obrabiarki WEDM, wyróżniając jej kluczowe i wspólne komponenty dla tego typu maszyn. W mojej opinii rozdział ten jest wystarczający i został przedstawiony w sposób czytelny, bez zbędnych szczegółów.

Rozdział 4 rozprawy poświęcony był przeglądowi badań doświadczalnych dotyczących cięcia elektroerozyjnego. Autor skupił się na analizie aktualnego stanu wiedzy, opierając się na wynikach badań prowadzonych w krajowych i zagranicznych ośrodkach naukowych. Szczególną uwagę poświęcił zagadnieniom związanym z dokładnością geometryczną po obróbce, chropowatością powierzchni, prędkością usuwania materiału oraz stabilnością procesu.

Należy jednak zauważyć, że w analizie zabrakło szerszego omówienia efektów powierzchniowych i podpowierzchniowych, które odgrywają kluczową rolę w ocenie jakości obróbki elektroerozyjnej. Uwzględnienie tych aspektów mogłoby znacząco wzbogacić przegląd literatury i dostarczyć bardziej kompleksowego obrazu omawianego zagadnienia.

W kolejnym etapie analizy autor przedstawił koncepcję wykorzystania sztucznej inteligencji przez badaczy w celu lepszego zrozumienia problemu oraz optymalizacji procesu cięcia. **Jednak w tym podrozdziale (4.2) brakuje bardziej szczegółowego zdefiniowania przedstawionych modeli i różnic między nimi, np. na stronie 34 czy 35, lub informacji, że zostaną one omówione w kolejnych częściach pracy.**

W podsumowaniu doktorant trafnie zauważył, że dotychczasowa analiza procesu cięcia elektroerozyjnego jest niepełna, gdyż koncentruje się jedynie na wybranych zmiennych niezależnych, pomijając inne istotne aspekty wpływające na efektywność i jakość obróbki.

W rozdziałach 5 i 6 doktorant przedstawił teoretyczne metody oraz algorytmy wykorzystane w swojej dysertacji, a także zasady i techniki symulacji komputerowych zgodnych z ogólnie przyjętymi regułami badawczymi. Opisane podejścia są szczególnie przydatne w efektywnym badaniu złożonych systemów, zwłaszcza w sytuacjach, gdzie metody analityczne byłyby zbyt pracochłonne lub wręcz niemożliwe do zastosowania.

Podsumowując, rozdziały 5 i 6 w mojej opinii został przedstawiony w sposób czytelny i kompletny dla czytelnika.

W rozdziale 7 pod tytułem *Opis Badań Eksperymentalnych* autor przedstawił obrabiarkę wykorzystaną w badaniach którą była elektrodrażarka drutowa Fanuc α -C600iC, przedstawił jedynie model 3D obrabiarki, a nie zdjęcie rzeczywiste i podstawowe dane techniczne w których brakuje danych o parametrach technologicznych tej maszyny rodzaju sterowania itp. Przedstawiono tabelarycznie skład chemiczny i wybrane właściwości mechaniczne materiału badawczego, którym była stal stopowa o nazwie handlowej IMAX. Następnie zaprezentowano zbudowane stanowisko do badań jakości powierzchni po obróbce oparte na przyrządzie do pomiaru chropowatości metodą stykową SJ-210 firmy Mitutoyo i urządzenia do pomiaru szczeliny po cięciu elektroerozyjnym.

W metodyce badań eksperymentalnych omówiono i zaprezentowano koncepcje badawczą która została przedstawiona za pomocą schematu rys. 7.5 w sposób przejrzysty racjonalny. W tabelach 7.4, 7.5 czy 7.6 zestawil parametry technologiczne, przyjęte warunki badań i zmienne zależne rozpatrywane w badaniach. Analizując całościowo ten rozdział doktorant w jasny i zrozumiały sposób przedstawił plan eksperymentu motywując i uzasadniając swoje wybory.

Rozdział 8 przedstawia wstępną analizę statystyczną wyników eksperymentalnych, mającą na celu identyfikację kluczowych właściwości zbioru danych. W podrozdziale 8.1 zaprezentowano statystyki opisowe, za które ujawniły rozbieżności w liczbie obserwacji dla zmiennych zależnych, wynikające z trudności w utrzymaniu ciągłości procesu cięcia które wskazuje doktorant. Analiza histogramów wykazała wielomodalność rozkładów zmiennych Ra, MRR i Kw, co sugeruje istnienie podgrup w danych.

Podrozdział 8.2 koncentruje się na analizie obserwacji odstających, przy czym przedstawione wykresy pudełkowe nie wykazały ich obecności. W podrozdziale 8.3 omówiono analizę korelacji, która ujawniła silną zależność między parametrami chropowatości a parametrami elektrycznymi procesu. Brak istotnej korelacji liniowej dla MRR i Kw jak stwierdził słuzenie doktorant może sugerować istnienie bardziej złożonych zależności.

Pomimo rzetelnie przeprowadzonej analizy statystycznej, rozdziałowi brakuje pogłębionej interpretacji przyczynowo skutkowej. Konieczne jest wyjaśnienie przyczyn

wielomodalności rozkładów, dokładniejsze zbadanie złożonych zależności MRR i Kw oraz identyfikacja czynników wpływających na zmienność danych. Warto również było rozważyć zastosowanie dodatkowych metod analizy, takich jak regresja wieloraka czy analiza wariancji, które mogłyby ujawnić ukryte wzorce i zależności w danych.

W rozdziałach 9 i 10 dysertacji doktorskiej autor przedstawił kompleksową analizę modelowania procesu WEDM oraz rezultaty jego optymalizacji. W rozdziale 9 dokonano selekcji optymalnych modeli prognostycznych dla kluczowych parametrów technologicznych, tj. chropowatości powierzchni (Ra), prędkości usuwania materiału (MRR), szerokości szczeliny erozyjnej (Kw) oraz ciągłości procesu obróbki (C). Przeprowadzono również analizę wpływu parametrów wejściowych procesu na wartości zmiennych zależnych, co umożliwiło sformułowanie wniosków stanowiących podstawę do dalszych działań optymalizacyjnych.

Rozdział 10 koncentruje się na etapach prac optymalizacyjnych. Określono cel optymalizacji oraz wybrano kryterium optymalizacyjne oparte na **formule ważonej**. Na podstawie przeprowadzonej analizy i badań optymalizacyjnych wytypowano **algorytm genetyczny** jako najbardziej efektywne narzędzie do optymalizacji analizowanego procesu cięcia elektroerozyjnego.

Podsumowując, w mojej opinii analiza modelowania i optymalizacji procesu WEDM, przedstawiona w rozdziałach 9 i 10, została przeprowadzona w sposób systematyczny i wyczerpujący. Zastosowana metodologia badawcza, dostarczyła istotnych wyników dla dalszych badań nad procesem WEDM.

Rozdział 11 to ostatni etap prac prowadzonych przez doktoranta związanych z opracowaniem i wdrożeniem oprogramowania wspomagającego optymalizację procesu cięcia elektroerozyjnego WEDM i wdrożenia testowego w firmie SMHydro z Katowic.

Ostatni rozdział 12 dysertacji to podsumowanie przeprowadzonych prac i wnioski końcowe które zostały sformułowane trafnie. Przedstawiony plan przyszłych badań jest również trafny i pozwoli skuteczniej dopracować istniejący model lub opracować nowy jak stwierdził autor pracy dla innych procesów obróbki jak toczenie czy frezowanie.

Rozdział 12 dysertacji stanowi syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych badań oraz prezentuje kluczowe wnioski końcowe. Sformułowane konkluzje charakteryzują się trafnością i rzetelnością, wynikającą z dogłębnej analizy uzyskanych danych, co świadczy o wysokim poziomie naukowym autora. Proponowany plan przyszłych badań jest adekwatny i stanowi logiczne rozszerzenie dotychczasowej pracy, umożliwiając dalszą optymalizację opracowanego modelu lub

adaptację uzyskanych wyników do innych procesów obróbki, zgodnie z sugestiami autora.

Podsumowując, przeprowadzone badania dostarczyły znaczących wyników dotyczących modelowania i optymalizacji procesu WEDM. Zaproponowane kierunki dalszych prac badawczych posiadają potencjał, aby w istotny sposób przyczynić się do implementacji w innych procesach obróbki.

Bibliografia obejmuje zestawienie łącznie 104 pozycji, zarówno książek, artykułów naukowych, źródeł internetowych. **Dobór literatury uważam za poprawny i aktualny.**

Ogólna kompozycja rozprawy zasługuje na ocenę pozytywną. Autor poprawnie przyjął kolejność rozdziałów i w większości przypadków dokonał prawidłowego podziału treści na rozdziały i podrozdziały. W pracy napotkałem w moim odczuciu na pewne braki co dla czytających może stanowić utrudnienie oraz zrozumienie, a także nieścisłości.

Niniejsze niedoskonałości mają jednak znaczenie drugorzędne i nie umniejszają znaczących walorów naukowych pracy.

Podsumowując ogólną ocenę treści rozprawy chciałbym przedstawić jej najważniejsze zalety naukowe, wskazujące jednocześnie na osiągnięcia naukowe autora:

- kompleksowe podejście do problemu badawczego obejmujące nie tylko przeprowadzenie badań eksperymentalnych, lecz także analizę statystyczną i modelową procesu cięcia elektroerozyjnego, prowadzącą do wytypowania **algorytmu genetycznego** jako najskuteczniejszego modelu procesu WEDM.
- opracowanie autorskiego oprogramowania optymalizacyjnego, które zostało z powodzeniem testowo wdrożone w firmie SMHydro z Katowic.

3. Uwagi do rozprawy doktorskiej

W niniejszej części recenzji zaprezentuję nurtujące pytania/uwagi, wymagające dodatkowych komentarzy i wyjaśnień ze strony Autor. Chciałbym zaznaczyć, iż w większości przypadków uwagi te mają charakter dyskusyjny, a nie stanowią bezpośredniego stwierdzenia niedociągnięć lub błędów.

- **Rozdział 8.1. „Ogólna charakterystyka zbioru danych”, str. 96:** zdanie: *„Poniżej przedstawiono serię histogramów dla rozpatrywanych ciągłych zmiennych zależnych, które ilustrują rozkład zgromadzonych danych. Ze*

względu na bardzo duże podobieństwo rozkładów wartości parametrów chropowatości R_a , R_q i R_z , zdecydowano się na zaprezentowanie tylko rozkładu zmiennej R_a ." Proszę o wyjaśnienie podjętej decyzji, ponieważ jak wiadomo parametr chropowatości R_a określa średnią wysokość profilu chropowatości, jednak nie dostarcza informacji o cechach powierzchni ani długościach fal przestrzennych tworzących jej teksturę, parametr R_z , czyli najwyższa wysokość profilu chropowatości, ma istotne znaczenie dla cech funkcjonalnych powierzchni. Z kolei parametr R_q , będący średnim kwadratowym odchyleniem profilu, jest bardziej wrażliwy na ekstremalne wartości w porównaniu do R_a .

- **Rozdział 9.1.3. „Analiza jakości modelu”, str. 106:** Opis dotyczący rys. 9.2 zdanie: „Punkty na wykresie zdają się układać wzdłuż linii idealnej, co sugeruje prawidłowe dopasowanie modelu do rzeczywistych wartości R_a . Potwierdza to obliczony współczynnik korelacji liniowej Pearsona dla wartości przewidywanych i wartości rzeczywistych, wynoszący 0.943. Rozproszenie punktów staje się większe przy wyższych wartościach R_a (około 4.0 do 5.0), co sugeruje, że model może być mniej dokładny przy takich wartościach. Widać, że przy niższych wartościach R_a (około 2.0 do 3.5), punkty są bliżej linii idealnej, co wskazuje na większą jakość modelu w tym zakresie.” Proszę o wyjaśnienie tego stwierdzenia, ponieważ współczynnik korelacji Pearsona, choć mieści się w przedziale od -1 do 1, sam w sobie nie określa kierunku zależności. Nie daje on jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o jakość dopasowania modelu. Warto również rozważyć, jakie znaczenie ma wysoki współczynnik korelacji Pearsona (0.943) w ocenie modelu oraz dlaczego model cechuje się większą dokładnością dla niższych wartości R_a w porównaniu do wyższych.
- W rozdziale 10.7 „Podsumowanie optymalizacji procesu WEDM” brakuje informacji na temat stabilności wybranego algorytmu genetycznego. Czy doktorant testował tę stabilność? Jak wypada ona w porównaniu z innymi modelami?
- Proszę o wyjaśnienie przyczyn braku postawionej tezy w pracy.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując recenzję stwierdzam, że mgr inż. Łukasz Łomozik zdefiniował, a następnie rozwiązał istotny i aktualny problem naukowy dotyczący modelowania procesu cięcia elektroerozyjnego z wykorzystaniem sztucznej inteligencji.

W ramach przeprowadzonych badań i optymalizacji procesu cięcia elektroerozyjnego, autor wytypował algorytm genetyczny (GA) jako najskuteczniejszy model procesu WEDM. Rezultatem tych prac było opracowanie autorskiego oprogramowania, które z powodzeniem wdrożono w firmie SMHydro z Katowic.

Tak szeroka analiza przedstawiona w niniejszej pracy wymagała od Autora dużej wiedzy związanej z technologią obróbki jak i systemów obliczeniowych. Świadczy to o wysokim poziomie naukowym Doktoranta i jednocześnie potwierdza jego gotowość do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie inżynierii mechanicznej.

W świetle dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Łukasza Łomozik pt. *Modelowanie i optymalizacja procesu cięcia elektroerozyjnego z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji* w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20.07.2018 r. (Dz.U. z dn. 24.10.2024 r., poz. 1571) i może stanowić podstawę do nadania Autorowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Może być, zatem dopuszczona do publicznej obrony.

