

Poznań, dnia 04 luty 2025r.

Dr hab. inż. Paweł Twardowski, prof. PP
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Poznańska
pl. Mari Skłodowskiej-Curie 5
60-965 Poznań

R E C E N Z J A

pracy doktorskiej mgr inż. Łukasza Łomozika

pt.

Modelowanie i optymalizacja procesu cięcia elektroerozyjnego z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji

Podstawa opracowania

- praca doktorska mgr inż. Łukasza Łomozika, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Andrzej Sokołowski,
- pismo przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Alicja Piasecka-Belkhayat, z dnia 18 grudnia 2024 roku w sprawie opracowania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Łukasza Łomozika.

Ogólny opis pracy

Problematyka przedstawiona w opiniowanej pracy jest istotna i aktualna z praktycznego punktu widzenia, bowiem dotyczy poprawy jakości gotowych wyrobów po obróbce elektroerozyjnej.

Tematyka podjęta w pracy przez Autora jest aktualnie badana i rozwijana przez ośrodki naukowo-badawcze na całym świecie. Ponadto, praca jest trudna technologicznie, i co najważniejsze, praktyczna.

Praca liczy 169 stron. Składa się z wprowadzenia poprzedzonego spisem treści i wykazem ważniejszych oznaczeń, oraz jedenastu rozdziałów zasadniczych (rozdz. 1–11), podsumowania i wniosków (rozdz. 12) i wykazu literatury. Wykaz literatury obejmuje 104 pozycje.

Pan mgr inż. Łukasz Łomozik wykonał pracę doktorską pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Andrzeja Sokołowskiego z Politechniki Śląskiej.

Uważam, że przedstawiona do opiniowania praca stanowi opracowanie w zakresie określonym tematem podjętym przez Autora.

Biurowo Dziekana

wpłynęło dnia17.02.2025
20.04.01.9.31.5.02.0.25
nrzał.

Ocena merytoryczna

Autor w pracy podjął się zadania modelowania i optymalizacji procesu cięcia elektroerozyjnego, oraz opracowania i wdrożenia oprogramowania optymalizującego w firmie SMHydro Sp. Z o.o. z siedzibą w Katowicach.

W krótkim wprowadzeniu Autor przedstawił na czym polega problem którym się zajął i podkreślił, że czynnikiem determinującym konkurencyjność przedsiębiorstwa na rynku jest jakość produktów i efektywność produkcji. Krótko scharakteryzował też w czym specjalizuje się firma i czego konkretnie będzie dotyczyć jego praca.

W rozdziale 2 (2.1. Cel i zakres badań) Autor przedstawił główny cel pracy, który jest opracowanie i wdrożenie rozwiązań, które odpowiadają na potrzeby przedsiębiorstwa w zakresie optymalizacji procesu cięcia elektroerozyjnego. Cel został sformułowany prawidłowo i nie budzi żadnych wątpliwości. Dodatkowo Autor zdefiniował w jaki sposób zamierza osiągnąć cel podając cztery cele szczegółowe. Formułowanie celu pracy przed analizą literatury jest dyskusyjne. Właśnie w oparciu o analizę literatury i wnioski z niej wypływające należy sformułować cel lub cele pracy. Takie podejście nie jest często spotykane ale jest dopuszczające. W rozdziale 2.2 Autor dość nietypowo przedstawił zakres pracy opisując kolejno co będą zawierać poszczególne rozdziały. Pod pojęciem zakres pracy często rozumie się zakres prowadzonych badań i analiz, jednak nie jest to reguła. Tym niemniej rozdział 2.2 sprawia wrażenie rozbudowanego spisu treści. W rozdziale 2.3 Autor definiuje pojęcia podstawowe, które stosuje w swojej pracy. Na koniec rozdziału 2 (rozd. 2.4) przedstawiono wykaz ważniejszych bibliotek oraz ich zastosowanie.

W rozdziale 3 (Podstawy obróbki elektroerozyjnej) Na początku rozdziału (rozd. 3.1) w ciekawy sposób przedstawiono krótką historię rozwoju obróbki elektroerozyjnej. Następnie Autor przedstawił mechanizm usuwania materiału w wyniku cięcia elektroerozyjnego, charakterystykę procesu oraz budowę obrabiarek.

W rozdziale 4 (Przegląd badań doświadczalnych cięcia elektroerozyjnego) Autor przedstawił wyniki najnowszych badań, które pokazują wpływ różnych parametrów na jakość i wydajność obróbki. W rozdziale tym Autor powołuje się na różne źródła pokazując jednocześnie przykładowe wyniki badań w postaci wykresów. Wyniki te pochodzą często z literatury angielskojęzycznej i takie też opisy pojawiają się na wykresach. Praca doktorska jest napisana w języku polskim więc opis wykresów czy rysunków powinien zostać przetłumaczony na język polski. Na niektórych rysunkach brakuje wyraźnego opisu osi, jak np. rys. 4.12 i 4.14 gdzie nie podano jaki parametr chropowatości był analizowany i w jakich jednostkach podano wydajność procesu. Cała analiza była przeprowadzona w oparciu o ok. 40 pozycji literaturowych z czego znaczną część poświęcono na opis wykorzystania metod sztucznej inteligencji w procesie WEDM. W podsumowaniu analizy literatury (rozd. 4.3) Autor definiuje luki badawcze, które wymagają dalszych badań. Najważniejszym wnioskiem jest to, że wiele badań opiera się na niewielkiej liczbie obserwacji. Jest to trafna uwaga nie tylko w przypadku zakresu badań jakim Autor się zajmuje, ale w ogóle wymóg ten można rozszerzyć na wszystkie aspekty badań naukowych w obszarze nauk inżynierskich i przyrodniczych. Drugi wniosek jaki Autor sformułował dotyczy braku analizy szerokiego spektrum parametrów technologicznych w procesie WEDM. Autor podaje, że prace badawcze koncentrują się

tylko na analizie natężenia prądu, czasu trwania impulsu i napięcia elektrycznego. Wydaje się, że wniosek ten oparty jest tylko na kilku pozycjach literaturowych w związku z czym nie do końca można się z tym zgodzić. W ostatnim wniosku Autor Podaje, że istnieje niewiele badań, które skutecznie rozwiązują problemy optymalizacji wielokryterialnej. Być może w odniesieniu do procesu WEDM jest to prawda, jednak publikacji na temat optymalizacji wielokryterialnej jest bardzo dużo. Żeby z nich skorzystać to wcale nie musi być spełniony warunek zastosowania ich w odniesieniu do procesu WEDM. Optymalizacja wielokryterialna jest problemem ogólnym i to od nas zależy do jakich celów ją zastosujemy. Wartościową uwagą jest dążenie do zwiększenia reprezentatywności wyników poprzez większą liczbę obserwacji. Wydaje się to oczywiste jednak wielu badaczy o tym zapomina.

Rozdział 5 (Przegląd zastosowanych metod i algorytmów) W rozdziale tym Autor opisał 13 różnych metod i algorytmów, rozpoczynając od opisu regresji a kończąc na metodach optymalizacji. Autor opisuje co to jest analiza korelacji, regresja liniowa, regresja wielomianowa, sieci neuronowe itp. Nie podaje jednak żadnych przykładów zastosowania tych metod w odniesieniu do tematu pracy. Nasuwa się więc wniosek, czy na poziomie pracy doktorskiej podawanie podstawowych pojęć, znanych od wielu lat, jest zasadne. Jeśli te metody były zastosowane w pracy wystarczyło podać źródła z których się korzystało. Podobne uwagi można mieć do *rozdziału 6 (Zasady i techniki symulacji komputerowych)*. Jednak w tym przypadku opis był bardziej ukierunkowany na dalsze analizy, co czyni ten rozdział bardziej wartościowy. Dyskusyjne jest też zastosowanie analizy korelacji i regresji. Łatwo było przewidzieć, że metody sztucznej inteligencji okażą się lepsze, więc można było pominąć te analizy bez uszczerbku na jakość pracy. Mimo to należy podkreślić, że Autor włożył dużo pracy w celu przeanalizowania wszystkich proponowanych metod i algorytmów.

Rozdział 7 (Opis badań eksperymentalnych) jest kluczowy dla całej pracy, ponieważ opisuje eksperyment w wyniku którego pozyskano wyniki do dalszej analizy. Na początku zdefiniowano materiał obrabiany i obrabiarkę, a następnie pokazano wycinane próbki. Pokazano widok próbek, ale bez szczegółowego rysunku czy schematu. Nie wiadomo które powierzchnie były wycinane i jak przygotowano szczeliny. Rozdział 7.1.4 stanowi najłabszą część rozdziału 7. Podano tylko jakim przyrządem mierzona była chropowatość, a to jest zdecydowanie za mało. Nie wiadomo na jakiej powierzchni mierzono chropowatość, jaki był odcinek pomiarowy ani w jakim kierunku w stosunku do wektora prędkości posuwowej był wykonywany pomiar. Niestety ale są to istotne braki. Podobne uwagi można mieć do rozdziału 7.1.5, w którym pokazano dwa mikroskopy nie podając metodyki pomiaru szerokości szczeliny. Dlaczego zastosowano 2 mikroskopy? skoro wystarczyłby jeden np. mikroskop Keyence. Szczegółowo za to zostały opisane metody badań eksperymentalnych. W tabeli 7.4 pokazano zestawienie parametrów technologicznych przyjętych jako zmienne niezależne, natomiast w tabeli 7.6 zmienne zależne, czyli – prędkość usuwania materiału, parametry chropowatości powierzchni, szerokość szczeliny erozyjnej i ciągłość procesu. Wybór ten wydaje się zasadny i poprawnie zdefiniowany. W dalszej części rozdziału Autor prezentuje plan eksperymentu wprowadzając znormalizowane zmienne niezależne. Jest to standardowe podejście, jednak w przypadku niniejszej pracy nie pokazano wartości rzeczywistych. Dopiero na stronie 139 w tabeli 10.2 podano zakresy wartości parametrów technologicznych. Wystarczy-

łaby jedna tabela która przedstawiałaby wartości rzeczywiste i odpowiadające im wartości znormalizowane. Taka sytuacja powoduje, że nie wiadomo w jakich warunkach przeprowadzony był eksperyment. Na stronie 93 Autor podaje, że „Analiza wyników przeprowadzonych badań według dwupoziomowego selekcyjnego planu eksperymentu wykazała jednak słabą zmienność pomiarów chropowatości pomiędzy obserwacjami. Zapewne chodzi o parametry chropowatości a nie o pomiary. Szkoda, że Autor nie pokazał przykładowych wyników zmiennych zależnych w funkcji dowolnej zmiennej niezależnej. W dalszej części pracy nie można znaleźć przykładowych wyników eksperymentalnych. Tego typu wizualizacje lepiej wyjaśniałyby problem badawczy i konieczność zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji. W dalszej części Autor stosuje inny plan eksperymentu uzyskując „zadowalające” wyniki badań. W tym miejscu znów brakuje przykładowych wyników w postaci wykresów. Ostatnie zdanie rozdziału 7 mówi, że ostatecznie przeprowadzono badania eksperymentalne, które obejmowały łącznie 731 obserwacji, nie tłumacząc nic na ten temat. W zasadzie nigdzie nie ma informacji czym różniły się obserwacje. Można jedynie się domyślać na podstawie zamieszczonych tabel przy opisie planu eksperymentu.

Rozdział 8 (Analiza statystyczna wyników pomiarów) dotyczy analizy statystycznej zmiennych zależnych tzn. MMR, Ra, Rq, Rz i Kw. W tabeli 8.1 pokazano podstawowe statystyki dla wszystkich wartości. Czy należy to rozumieć, że wszystkich wyników dla np. parametru Rz było 563 i z nich sporządzono statystyki? Nie jest to wyjaśnione więc należy się tylko domyślać, że wszystkie wyniki różniły się innymi wartościami zmiennych niezależnych. Na stronie 96 Autor podaje, że ze względu na bardzo duże podobieństwo rozkładów wartości parametrów chropowatości Ra, Rq i Rz, zdecydowano się na zaprezentowanie tylko rozkładu zmiennej Ra. Ze wszystkich parametrów chropowatości (a jest ich ponad 200) jest to najbardziej niekorzystny wybór. Zgodnie z definicją Ra jest to *średnie arytmetyczne odchylenie zarysu od linii średniej* (linia średnia - wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów). Jak sama nazwa wskazuje jest to wartość średnia i bardzo często nie jest wielkością reprezentatywną do mikronierówności tworzących daną warstwę. Wg metrologów bazowanie na tej wartości (choć w pewnych przypadkach daje poprawne wyniki) jest niepewne a sam parametr Ra nie oddaje charakteru mikronierówności powierzchni obrobionej. Zdecydowanie lepszym parametrem jest Rz. W dalszej części rozdziału Autor podaje histogramy, wyniki analizy korelacji i na końcu formułuje wnioski. Znów pojawia się informacja, że parametr Ra jest najbardziej reprezentatywny, trudno się z tym zgodzić. Pozostałe wnioski sformułowane są poprawnie i nie wymagają komentarza.

Rozdział 9 (Badania modelowe procesu WEDM) dotyczy badań modelowych z wykorzystaniem wybranych modeli statystycznych oraz uczenia maszynowego. Łatwo przewidzieć, że uczenie maszynowe da lepsze wyniki niż modele statystyczne. Stąd nasuwa się uwaga odnośnie stosowania modeli statystycznych. Jeśli Autor chciał pokazać różnice pomiędzy modelami wtedy takie podejście jest zasadne. W tabeli 9.1 przedstawiono wszystkie modele zastosowane w pracy (łącznie 8). Następnie przedstawiono analizę dla badanych zmiennych zależnych stosując wcześniej zaproponowane modele. Na rysunku 9.1 pokazano krzywą uczenia modelu w oparciu o błąd liczony na zbiorze treningowym i na zbiorze testowym. Wydaje się, że opis zbioru treningowego i testowego jest niejasny. Trudno zorientować

się co do szczegółowych danych tych zbiorów. Uwaga to dotyczy wszystkich badanych wartości zmiennych zależnych. Na rysunku 9.2 po raz pierwszy pojawiły się rzeczywiste wartości parametru chropowatości R_a , choć znowu nie jest wyjaśnione co to za dane. Szkoda, że Autor wcześniej ich nie zaprezentował w dowolnej konfiguracji. Te same uwagi dotyczą pozostałych zmiennych zależnych. Na rysunku 9.9 na osi X podana jest liczba obserwacji o maksymalnej wartości ok. 1150. Proszę o wyjaśnienie jak to rozumieć? Dla każdej zmiennej zależnej liczba obserwacji jest inna. W rozdziale 9.5.1. omówiono wpływ parametrów technologicznych na chropowatość powierzchni. Na rysunku 9.14 pokazano wpływ zmiennych niezależnych na wynik modelu, a następnie szczegółowo najważniejsze z nich. Podobną analizę wykonano dla pozostałych zmiennych zależnych, uzyskując ciekawe i wartościowe wyniki. Zwięzłe podsumowanie badań modelowych zawiera rozdział 9.6. Wnioski sformułowano poprawnie i nie wymagają komentarza.

Rozdział 10 (Optymalizacja procesu WEDM) zawiera optymalizację parametrów technologicznych obróbki elektroerozyjnej z wykorzystaniem różnych algorytmów optymalizacyjnych. Na początku zdefiniowano to co w optymalizacji jest najważniejsze, a mianowicie kryteria optymalizacji. Zastosowano optymalizację wielokryterialną (3 kryteria – R_a , MRR i K_w), oraz zdefiniowano funkcję celu. Na stronie 139 Autor podaje, że poszczególne wartości maksymalne zmiennych R_a i MMR zostały dobrane na podstawie wstępnych badań optymalizacyjnych. Szkoda, że nie pokazano tych wyników. W tabeli 10.2 po raz pierwszy w pracy pojawił się zakres wartości dla parametrów technologicznych. Analizę porównawczą zastosowanych algorytmów optymalizacji wykonano w oparciu o kryteria takie jak czas obliczeniowy, wartość funkcji celu i stabilność wyników. Zastosowano cztery algorytmy optymalizacji opisane w tabelach 10.3 – 10.6. Następnie przeprowadzono proces optymalizacji dla różnej konfiguracji parametrów, oraz zweryfikowano eksperymentalnie uzyskane wyniki. Weryfikacja eksperymentalna polegała na wycięciu nowych próbek testowych, pomiarze chropowatości powierzchni, prędkości usuwania materiału i szerokości szczeliny erozyjnej. W tym miejscu niestety brak informacji o badaniach weryfikacyjnych, poza tym, że je przeprowadzono. W podsumowaniu rozdziału Autor stwierdził, że najskuteczniejszy okazał się algorytm genetyczny. Cały rozdział zawiera ciekawe i interesujące wyniki, szkoda tylko, że nie został dopracowany graficznie. Odpowiednie wykresy poglądowe pozwoliłyby na czytelniejszą interpretację uzyskanych wyników.

Rozdział 11 (Opracowanie i wdrożenie oprogramowania optymalizującego) stanowi istotną część doktoratu wdrożeniowego. Autor wdrożył w firmie SMHydro opracowane oprogramowanie z pozytywnym efektem. Obecna forma wdrożenia ma charakter testowy co umożliwia ocenę funkcjonalności oprogramowania w warunkach przemysłowych. W momencie gdy nastąpi pełne wdrożenie będzie to stanowić duży sukces Autora.

Rozdział 12 (Podsumowanie i wnioski końcowe) wnioski końcowe jak i plan przyszłych badań zostały sformułowane poprawnie i czytelnie. Jedyne co można by dodać to głębsza analiza przyczynowo skutkowa pomiędzy zmiennymi niezależnymi a zmiennymi zależnymi. Podsumowanie i wnioski potwierdzają osiągnięcie założonego celu i nie budzą zastrzeżeń pod względem merytorycznym i formalnym.

Ocena redakcyjna

Praca doktorska mgr inż. Łukasza Łomozika stanowi kompletne opracowanie naukowe zgodne z tematem określonym w tytule, logiczne pod względem struktury, podziału treści, kompletności celów i wniosków końcowych.

Autor stosuje w pracy poprawną terminologię oraz jednostki układu SI.

Z edytorskiego punktu widzenia praca przygotowana jest bardzo dobrze. Jest jednak wyjątek polegający na tym, że Autor w kilku miejscach pozostawia dużo wolnego miejsca na stronach. Wynika to z tego, że tego miejsca nie jest na tyle dużo aby zmieścić kolejny rysunek lub tabelę. W takich sytuacjach puste miejsca wypełnia się tekstem z kolejnej strony lub dobiera taką wielkość rysunków aby tego nie było. Ponadto w pracy trudno było znaleźć błędy redakcyjne lub stylistyczne, co świadczy o dobrym przygotowaniu pracy.

Nie znaleziono też rażących błędów dotyczących poprawności języka polskiego.

Spis literatury jest przedstawiony w kolejności cytowania. Ma to swoje wady i zalety. Wadą jest to, że chcąc znaleźć konkretnego autora, należy przeglądać cały spis. Uważam, że spis alfabetyczny jest lepszą opcją, jednak jest to sprawa dyskusyjna. Przedstawione pozycje literaturowe są dobrane odpowiednio do tematyki pracy.

Wartość naukowa i przydatność praktyczna pracy

Problemem naukowym rozwiązany w pracy doktorskiej Pana mgr inż. Łukasza Łomozika było modelowanie i optymalizacja procesu cięcia elektroerozyjnego z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji. W tak określonym obszarze zagadnienie zostało przez Autora rozwiązane poprawnie.

Podjęta tematyka w pracy jest trafna i ma duże znaczenie praktyczne. Wybór tematyki pracy w aspekcie praktycznej przydatności osiągniętych rezultatów, jest słuszny.

Silną stroną pracy są obszernie analizy dotyczące zastosowanych różnych metod i algorytmów. Autor włożył dużo pracy w szczegółową analizę tych metod i odpowiednio zastosował je do uzyskanych wyników badań. Cenny jest też opis programów badań, gdzie autor przeanalizował różne warianty wybierając najbardziej korzystny. Ciekawie prezentują się też badania modelowe procesu WEDM i sam proces optymalizacji wielokryterialnej. Autor nie skupił się na jednej konkretnej metodzie tylko przeanalizował ich kilka wybierając najlepszą. Takie podejście gwarantuje uzyskanie wiarygodnych wyników, które posłużyły do opracowania aplikacji przemysłowej. Powstałe oprogramowanie optymalizujące jest aktualnie testowane w warunkach przemysłowych.

Problematyka którą zajął się Autor jest rozwijana przez różne ośrodki naukowo-badawcze i dotyczy nie tylko problemów optymalizacji w odniesieniu do procesu elektrodrażenia, ale także do sposobów obróbki skrawaniem. Optymalizacja wielokryterialna była i jest zagadnieniem trudnym. Zastosowaniu uczenia maszynowego w procesie optymalizacji daje możliwości jakie jeszcze nie tak dawno były nieosiągalne. Dlatego też decyzja Autora aby wykorzystać te metody w optymalizacji jest jak najbardziej trafna.

Dalsze rozwijanie prac w podjętym przez Autora kierunku, już w krótkim czasie powinno zaowocować jeszcze większą liczbą aplikacji przemysłowych.

Wniosek końcowy

Rozprawa spełnia wszystkie wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. - **Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 poz. 1668)** tj.:

- prezentuje rozległą wiedzę teoretyczną oraz praktyczną Autora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna w zakresie budowy działania i testowania systemów oraz wiedzę interdyscyplinarną powiązaną z tym obszarem,
- potwierdza umiejętność samodzielnego definiowania problematyki badań naukowych, ich prowadzenia oraz analizowania i interpretacji ich wyników,
- stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego przedstawione w postaci odpowiedniego opracowania.

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Łukasza Łomozika do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej rekomendując nadanie stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Prof. P. Twardowski

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)