

**Dr hab. inż. Zbigniew Watral, prof. uczelni**

Warszawa, 12 stycznia 2025

Wydział Elektroniki,  
Wojskowa Akademia Techniczna,  
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2,  
00-908 Warszawa 46

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Pana mgr inż. Rafała Sikorskiego

### **Opracowanie metod monitorowania i kontroli procesu elektroerozyjnego drażenia mikrootworów**

przygotowana na podstawie uchwały nr 817/II/2024 podjętej przez Radę Naukową  
Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki  
Warszawskiej w dniu 17 września 2024 r.

#### **1. Jakie zagadnienie naukowo-badawcze jest rozpatrywane w pracy i czy zostało dostatecznie jasno sformułowane?**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska ogólnie dotyczy procesu drażenia elektroerozyjnego otworów metodą FHD (ang. Fast Hole Drill) ze szczególnym zwróceniem uwagi na możliwość kontroli prawidłowości przebiegu tego procesu w czasie rzeczywistym. Doktorant zauważył, że szczególnie ważne znaczenie ma to w przemyśle lotniczym podczas wytwarzania części silników odrzutowych z materiałów specjalnych.

W swojej rozprawie przedstawił dotychczasowe światowe dokonania w tym zakresie, które głównie koncentrują się na prostej identyfikacji impulsów elektrycznych w oparciu o wartości progowe, bez zwrócenia uwagi na kształt tych impulsów. Podejście takie wymaga zaangażowania eksperta i nie jest odporne na zmienne parametry procesu co zmniejsza jego niezawodność i szanse na ewentualną automatyzację. Zdaniem Doktoranta jedną z przyczyn takiej sytuacji jest niewykorzystywanie w pełni możliwości jakie stwarzają nowoczesne metody przetwarzania danych, modelowania i wnioskowania jakie dają technologie oparte o uczenie maszynowe ML (ang. Machine Learning) i uczenie głębokie DL (ang. Deep Learning). To prawdopodobnie sprowokowało Doktoranta do postawienia tezy swojej rozprawy doktorskiej

w której stwierdza, że **jest możliwość opracowania innowacyjnego podejścia wykorzystującego analizę sygnałów elektrycznych EDM oraz metody ML i DL do wykrywania przebicia i anomalii w procesie drążenia otworów wentylacyjnych metodą elektroerozyjną FHD.**

Doktorant spodziewa się, że system kontroli procesu drążenia elektroerozyjnego przy wykorzystaniu metod integrujących zaawansowaną analizę sygnałów pochodzących z procesu drążenia z algorytmami głębokiego uczenia, umożliwi wczesne i niezawodne wykrywanie kluczowego etapu procesu jakim jest zakończenie formowania otworu i sygnalizowanie nieprawidłowości. Spodziewa się dzięki temu zwiększenia precyzji i efektywności procesu FHD, a także minimalizacji ryzyka uszkodzeń i poprawę jakości końcowych produktów. Na drodze do osiągnięcia postawionej tezy doktorant wyznaczył sobie następujące cele:

1. Opracowanie metodologii akwizycji oraz przetwarzania danych pomiarowych procesu drążenia FHD,
2. Analiza procesu drążenia otworów wentylacyjnych w procesie FHD. Identyfikacja możliwych do monitorowania parametrów najlepiej oddających prawidłowość przebiegu oraz etap zadania.
3. Poznanie właściwości sygnałów prądu i napięcia zachodzących w czasie drążenia oraz określenie istotnych zmian przebiegów w zależności od etapu procesu.
4. Przetestowanie różnych metod ML i DL owocujące zbudowaniem optymalnych modeli umożliwiających automatyczną klasyfikację impulsów.
5. Analiza statystyczna wyodrębnionych i sklasyfikowanych impulsów oraz ewaluacja zmienności ich generacji w zależności od etapu procesu.
6. Zbadanie wydajności różnych podejść i wyłonienie najlepszego rozwiązania do kontroli fazy procesu (w tym wykrycia przebicia) w oparciu o odczyty z czujników z użyciem podejścia DL.
7. Eksperymentalne testy potwierdzające skuteczność zbudowanego podejścia kontroli procesu.
8. Opracowanie algorytmu wykrywania błędów i anomalii procesu FHD w oparciu o sygnały elektryczne i metody ML i DL.

Teza rozprawy oraz towarzyszące jej cele zostały sformułowane w sposób jasny i zrozumiały. Zasadność tak postawionej tezy potwierdzają przykłady skutecznego wykorzystania sieci neuronowych i metod uczenia maszynowego w wielu różnych dziedzinach techniki. Doktorant w kolejnych rozdziałach rozprawy wprowadza nowe zagadnienia prowadzące do udowodnienia poprawności postawionej tezy. Praca zawiera istotne elementy

eksperymentalne świadczące o doświadczeniu inżynierskim Doktoranta.

Tematyka pracy doktorskiej jest jak najbardziej aktualna z uwagi na nieustanne dążenie do optymalizacji procesów produkcyjnych a szczególnie w obszarze techniki lotniczej i bez wątpienia **kwalifikuje się ona jako przedmiot rozprawy doktorskiej w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.**

## **2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej?**

W obszernej bibliografii dołączonej do rozprawy doktorskiej umieszczono aż 324 pozycje literatury z czego tylko 2 to odwołania do stron internetowych. W zdecydowanej większości są to artykuły naukowe i monografie. Lista publikacji nie zawiera pozycji autorskich Doktoranta. Wszystkie zacytowane pozycje literatury zostały właściwie opisane i użyte w sposób poprawny. Przedstawiony przez Doktoranta spis wykorzystywanych źródeł i publikacji jest wyczerpujący.

Należy zauważyć, że literatura, do której odwołuje się Doktorant jest współczesna i historyczna, ale w zdecydowanej większości wydana po roku 2000. Jest jednak niewielka część bibliografii pochodzącej z końca XX wieku. Zdarzyła się nawet jedna pozycja literaturowa pochodząca z 1895 roku. Korzystanie nie tylko z literatury współczesnej, ale i historycznej w danej dziedzinie świadczy o wnikliwości i dociekliwości autora. Wszystkie pozycje literaturowe dotyczą technicznych, prawnych i normatywnych aspektów omawianego zagadnienia. Doktorant w trzecim, obszernym rozdziale rozprawy, bo liczącym aż 39 stron, umiejętnie wprowadza czytelnika w zagadnienie obróbki elektroerozyjnej materiałów. Można ten przegląd literatury podzielić na część dotyczącą monitorowania procesu FHD dzięki analizie przebiegów prądu i napięcia w celu wykrywania momentu przebiccia otworu oraz metod wykrywania anomalii pojawiających się w procesie elektrodrażenia.

Jak wykazała analiza literaturowa, pomimo powstawania bardzo licznych publikacji w temacie analizy anomalii, takie podejście nie było do tej pory stosowane w analizie danych pomiarowych procesu FHD. Wykrywanie anomalii może posłużyć jako dodatkowe narzędzie w kontroli procesu drażenia otworów wentylacyjnych.

**Przeprowadzona analiza literaturowa dowodzi, że Doktorant posiada gruntowną wiedzę teoretyczną i praktyczną w obszarze prowadzonych badań.** Warto podkreślić, że analiza została wykonana w sposób prawidłowy i przejrzysty umożliwiając czytelnikowi na właściwe umiejscowienie proponowanych rozwiązań w nurcie prowadzonych prac na arenie międzynarodowej.

### **3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył do tego właściwej metody badawczej i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

W odniesieniu do postawionego głównego celu rozprawy jakim jest drażnienie otworów techniką FHD oraz stworzenie metody monitorowania przebiegu oraz kontroli stanu procesu i wykrywania anomalii w oparciu o narzędzia sztucznej inteligencji uważam, że przyjęte założenia badawcze są słuszne i w pełni uzasadnione. Zadania, które nakreślił sobie Doktorant na drodze do osiągnięcia postawionej tezy, są merytorycznie uzasadnione i ułożone chronologicznie poprawnie. Świadczy to o dużej wiedzy teoretycznej i praktycznym doświadczeniu Doktoranta.

Doktorant słusznie zauważył, że wydobyte cechy z zarejestrowanych przebiegów prądu i napięcia mogą dostarczyć istotnych informacji na temat zakłóceń w procesie lub potencjalnych uszkodzeń powierzchni obrabianych otworów. Rejestrowano parametry procesu elektrodrażenia oraz wysokoczęstotliwościowe przebiegi prądu oraz napięcia z pomocą zewnętrznych czujników. Doktorant dokonując analizy czasowej zarejestrowanych przebiegów zidentyfikował i opisał siedem charakterystycznych etapów procesu drażenia w celu łatwiejszej ich identyfikacji. W części eksperymentalnej pracy, Doktorant z pomocą opracowanego systemu pomiarowego wykonał szereg drażeń testowych, które posłużyły jako dane wejściowe do pracowania inteligentnych narzędzi analizy i kontroli procesu FHD. Wykonywano drażenia na elementach odwzorowujących prawdziwe części silników odrzutowych. Zastosowano materiały, budowę próbek testowych oraz zestawy parametrów procesu, które umożliwiły na opracowanie i potwierdzenie skuteczności tworzonych metod. Wykonano szereg drażeń testowych stosując 3 różne zestawy parametrów drażenia nazwane jako: zestaw parametrów optymalnych, zestaw parametrów agresywnych i zestaw parametrów błędnych. Rejestrację sygnałów wykonywano dla różnych częstotliwości próbkowania szukając minimalnej wymaganej wartości częstotliwości próbkowania.

Dane z pomiarów posłużyły do uzyskania charakterystyki procesu a w kolejnym etapie odpowiednio przygotowane dane zostały zastosowane do procesu wytrenowania modeli używanych do wykrywania przebiecia oraz wykrywania anomalii. Zestawy danych uczących tworzone były z dużej ilości danych zarejestrowanych w różnych drażnieniach. Każdy kolejny otwór wykonywany był elektrodą o zmienionej długości, od długości maksymalnej do minimalnej standardowo używanej w procesie produkcyjnym. Pomiedzy grupami drażeń, kilkakrotnie wykonywana była zmiana elektrod. Miało to na celu uwzględnienie w populacji uczącej danych z otworów wykonywanych w wielu następujących po sobie drażnieniach. Analiza

wyników przeprowadzonych drżeń testowych pokazała złożoność zagadnienia jakim jest prawidłowe wykrywanie przełomu i całkowitego przebicia otworu w procesie FHD w warunkach zmiennego procesu generacji wyładowań. W związku z tym konieczna była bardziej dogłębna analiza charakteru poszczególnych impulsów występujących w różnych etapach procesu elektrodrażenia oraz opracowanie metod wykrywania przebicia biorących pod uwagę tę zmienność procesu wyładowań. Dążąc do zautomatyzowania procesu klasyfikacji impulsów prądu i napięcia występujących w procesie FHD Doktorant dokonał tzw. klastrowania impulsów dzieląc je na 9 różniących się od siebie kategorii. Opracowana metoda umożliwiła podział impulsów prądowych na istotne z punktu widzenia ich charakterystyki grupy opisujące w literaturze metody identyfikacji przebicia FHD. Proces klastrowania wykonano dla trzech różnych grup drżeń wykonanych z parametrami optymalnymi, agresywnymi i błędnymi stosując klasyfikator oparty o głębokie sieci neuronowe.

W celu doboru optymalnego narzędzia do klasyfikowania impulsów dokonano serii prób uczenia stosując różne metody, wartości parametrów algorytmów i architektury sieci neuronowych stosując różne metody optymalizacji.

W ramach prac zbudowano skuteczne narzędzia automatycznej klasyfikacji impulsów EDM osiągające skuteczność przekraczającą 99,6% oraz dokonano analizy statystycznej i przeglądu zmienności występowania impulsów w zależności od etapu procesu.

W pracy oparto się na wykorzystaniu sieci neuronowych i metod maszynowego oraz metod głębokiego uczenia, co w mojej ocenie umożliwiło osiągnięcie zamierzonego efektu diagnostycznego.

Zastosowana metoda badawcza i sposób rozwiązania pojawiających się problemów uwiarygadnia osiągnięte rezultaty oraz pokazuje, że Doktorant **potrafi samodzielnie i skutecznie prowadzić prace naukowe** a także umiejętnie przedstawiać i komentować uzyskane wyniki badań oraz analiz i formułować właściwe wnioski.

#### **4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

W niniejszej rozprawie opisano autorskie podejście do analizy i kontroli procesu FHD będącego obecnie główną metodą wykonywania otworów wentylacyjnych filmowego chłodzenia wysokotemperaturowych elementów silników lotniczych. Ze względu na stale postępujący rozwój tej technologii opracowane rozwiązania mają duży potencjał wdrożeniowy

w przemysłowym produkowaniu tych części. Efektem prac było między innymi zbudowanie dwóch niezależnych modeli opartych na różnych podejściach: analizie całych pakietów surowych danych w oparciu o głębokie sieci CNN (ang. Convolutional Neural Network) i analizie częstości występowania poszczególnych grup impulsów w oparciu o sieć CNN-GRU (ang. Gated Recurrent Unit). Obie testowane metody osiągnęły 100% trafność oraz dobrą dokładność w wykrywaniu momentu przebicia.

Opracowane w ramach rozprawy doktorskiej metody znacznie przewyższyły skuteczność wbudowanego algorytmu wykrywania przebicia elektrodrażarki i mogą stanowić lepszą alternatywę w warunkach produkcyjnych.

Dotychczasowe badania, opisywane w cytowanej literaturze, w odróżnieniu do prowadzonych przez Doktoranta nie korzystały w pełni z nowoczesnych metod przetwarzania danych, modelowania i wnioskowania jakie dają technologie oparte o uczenie maszynowe ML (ang. Machine Learning) i uczenie głębokie DL (ang. Deep Learning).

Opisane w rozprawie badania i testy umożliwiły Doktorantowi zbudowanie kilku skutecznych narzędzi diagnozowania i kontroli procesu FHD. W ramach prac zbudowano skuteczne narzędzia automatycznej klasyfikacji impulsów EDM osiągające skuteczność przekraczającą 99,6% oraz dokonano analizy statystycznej i przeglądu zmienności występowania impulsów w zależności od etapu procesu. Na bazie tych doświadczeń zaproponowano, zbudowano i przetestowano dwie metody wykrywania przebicia (skuteczność 100%) oraz klasyfikator anomalii (wykrywalność anomalii 99,48%). Prace prowadzone były z zastosowaniem metod uczenia maszynowego i uczenia głębokiego, szczególnie z wykorzystaniem głębokich sieci neuronowych co potwierdziło ogromny potencjał tych narzędzi, także w procesie FHD. Możliwość pracy na surowych danych, zdolność do uogólniania wnioskowania i zmniejszenie nakładu pracy inżynierskiej w znacznym stopniu ułatwiły i przyspieszyły procesy badawcze. W pracy udowodniono także, że metody sztucznej inteligencji stanowią nie tylko narzędzie do analizy danych offline, ale z zastosowaniem odpowiednich podejść i optymalizacji, mogą także być silnymi rozwiązaniami do kontroli procesów w czasie rzeczywistym. Podejście takie dało dobre wyniki nawet w przetwarzaniu wysokoczęstotliwościowych sygnałów prądu i napięcia jakie zachodzą przy drążeniu EDM. Dzięki wykazanym umiejętnościom Doktorant uzyskał interesujące wyniki badań i analiz pokazując przy tym dobre przygotowanie teoretyczne i dużą zręczność zarówno w pomiarach laboratoryjnych jak i w procesie produkcyjnym. **Moim zdaniem przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego zdefiniowanego w tezie rozprawy.**

**5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska ma objętości 227 stron i została podzielona na 8 rozdziałów. Do rozdziałów zaliczono cel i tezę rozprawy, wstęp oraz obszerną, bo aż 36 stronicowy wykaz bibliografii. Przed spisem treści zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim, które bardzo syntetycznie opisuje dokonania naukowe autora. W rozdziale 3 na 39 stronach przedstawiono obszerny przegląd literatury odwołujący się do 324 pozycji literatury cytowanej w rozprawie doktorskiej a rozdziały 4 i 5 stanowią zasadniczą część rozprawy. W pracy zamieszczono 103 rysunki i 28 tabel, które są staranne i czytelne. Rozprawa jest napisana w sposób poprawny i zrozumiały a układ pracy stanowi opis logicznego ciągu rozważań opracowania naukowego. Na końcu każdego rozdziału zamieszczono syntetyczne podsumowanie treści rozdziału. Doktorant używa w większości poprawnych sformułowań technicznych i symboli. Sposób prezentowania uzyskanych wyników jest poprawny i zrozumiały. Odnośniki literaturowe wskazują, że Doktorant posiada także niezbędną orientację w bibliografii obejmującej rozważane zagadnienia. W stosunku do całej rozprawy można stwierdzić, że Doktorant opanował warsztat pisania rozpraw naukowych w stopniu bardzo dobrym. Uwagi do rozprawy, głównie edytorskie przedstawiono poniżej.

**Uwagi do pracy:**

1. W tezie rozprawy Doktorant napisał cyt...*do wykrywania przebiecia i anomalii*...co jest niezrozumiałe o jakim przebieciu mowa. Gdyby dodać słowo „*otworu*” to brzmiałoby bardziej klarownie tzn. ... *do wykrywania przebiecia **otworu** i anomalii*...
2. VII etapów drażenia opisane w tekście powinno być również zaznaczone na przebiegach czasowych co znacznie ułatwiłoby skojarzenie opisu z przebiegami czasowymi.
3. Na stronie 82 Doktorant pisze cyt... *W pracy z premedytacją nie wykonywano bardzo dużej ilości otworów. Założeniem pracy jest udowodnienie, że już relatywnie nieduża ilość otworów testowych*... W tej sytuacji pojawia się pytanie **co ma wpływ na ustalenie odpowiedniej liczby wierconych otworów?**
4. Nazwa podrozdziału **4.4. Charakteryzacja przebiegów czasowych** kojarzy się z procesem „upiększania” danych, co nie jest zgodne z opisem działań przeprowadzonych przez Doktoranta.
5. Co oznacza pojęcie cyt. *wartość wygładzona prądu?*

6. Co oznacza określenie cyt... *trendy zmienności średnich napięć i prądów*...?
7. Doktorant na stronie 95 używa określenia „wartość wygładzona prądu”, które jest niejasne i raczej niepoprawnie sformułowane.
8. Niepoprawnie wielokrotnie autor używa określenia *ilość* w stosunku do rzeczowników policzalnych.
9. W rozprawie autor używa słowa *pozwała* w odniesieniu do czynności lub rzeczy nieożywionych. W takiej sytuacji, moim zdaniem, lepszym określeniem byłoby np. *umożliwia, itp.*
10. W tekście pojawiają się niewłaściwie użyte słowa lub niepoprawne formy gramatyczne słów np... *Niniejsza praca skupiać się będzie na opracowaniu opartych o dane inteligentnych rozwiązań...* lub ...*Choć impulsy w bocznej i dolnej szczeliny mogą być trudno odróżnialne, spodziewa się, że ilość wystąpień różnych typów wyładowań...*, itp.
11. Autor w wielu przypadkach używa niewłaściwie słowa *metodologia*, w których bardziej pasowałyby określenia *metoda* lub *sposób*.

## 6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych

Rozprawa doktorska p. mgr. inż. Rafała Sikorskiego ma charakter zdecydowanie praktyczny i implementacyjny, co stanowi jej istotny walor. Wytwarzanie elementów silników odrzutowych jest procesem bardzo kosztownym i dlatego ogromne znaczenie, oprócz ulepszania samej technologii silnika, ma również wprowadzanie rozwiązań mających potencjał ograniczenia kosztów oraz wykrywania defektów produkcyjnych. To wyzwanie, zdaniem Autora, stało się główną motywacją towarzyszącą przy tworzeniu niniejszej rozprawy.

Ze względu na wysokie ceny części oraz skomplikowany, pracochłonny i kosztowny proces kontroli produkowanych elementów, bardzo istotnym staje się wprowadzenie metod, które umożliwią maksymalne ograniczenie defektów produkcyjnych. Jednymi z podstawowych defektów jakie mogą wystąpić w czasie procesu drążenia otworów są: zbyt wczesne zakończenie drążenia oraz tzw. overdrilling, double-drilling i scarfing.

Całość procesu drążenia otworu w zależności od grubości ścianki i średnicy elektrody, może trwać zaledwie kilka sekund co sprawia, że zastosowane metody muszą wykrywać etapy procesu w czasie rzeczywistym. Opracowane metody pomiaru, przetwarzania danych i wnioskowania na ich podstawie muszą charakteryzować się wystarczającą wydajnością, niezawodnością oraz terminowością tzn. wykrywaniem zaistniałych zjawisk w poprawnym czasie i z niskim opóźnieniem. Według mojej oceny, przedstawione wyniki zdecydowanie



świadczą o możliwości zastosowania w praktyce zaproponowanych rozwiązań.

Uważam, że rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne oraz spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, zgodnie z przepisami ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U z 2023 r. poz.742), w związku z czym wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Rafała Sikorskiego, pt. **„Opracowanie metod monitorowania i kontroli procesu elektroerozyjnego drażenia mikrootworów”** do publicznej obrony oraz procedowania dalszych etapów procedury nadawania stopnia doktora.

*Zbigniew Watral*

