

WPLYNĘŁO

2025 -01- 20 Szczecin 06.01.2025

Dr hab. Barbara Grochowalska, prof. ZUT
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Elektryczny
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Sikorskiego pod tytułem:
„Opracowanie metod monitorowania i kontroli procesu elektroerozyjnego
drażenia mikrootworów”.**

Podstawa:

Recenzja została przygotowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej
Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne PW,
prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego.

Ogólna i formalna charakterystyka pracy:

Przedstawiona do recenzji praca podejmuje tematykę wykorzystania zaawansowanych technik uczenia maszynowego z uwzględnieniem technik uczenia głębokiego, opartego na różnego rodzaju sieciach neuronowych, do rozwiązania konkretnego problemu technicznego. Problem ten to monitorowanie i kontrola procesu drażenia otworów metodą elektroerozyjną. Metoda ta wykorzystywana jest w produkcji m. in. części silników lotniczych, charakteryzujących się złożoną budową. Dodatkowo bardzo precyzyjna obróbka takich elementów jest bardzo istotna ze względu na fakt, iż często wykonane są one z tzw. superstopów, jak na przykład Inconel. W takim aspekcie pełna kontrola procesu obróbki materiału oraz maksymalna precyzja wykonania detalu jest wysoko pożądana. Autor w swojej rozprawie podjął się zasadniczo rozwiązania dwóch problemów, które są oczywiście ze sobą powiązane. Pierwszym problemem było precyzyjne określenie momentu zakończenia drażenia otworu, co jest istotne ze względu na możliwość niepełnego przebicia materiału przy zbyt wczesnym zakończeniu drażenia oraz możliwość naruszenia integralności innych fragmentów struktury przy zbyt późnym

zakończeniu drążenia. Drugim podjętym przez Autora problemem było wykrycie anomalii procesu drążenia.

Praca zaprezentowana do oceny zawiera zarówno część analityczną, jak i praktyczną, opartą na wynikach eksperymentalnych, które prowadzą do opracowania użytecznych rozwiązań o potencjale wdrożeniowym w przemyśle. W związku z tym, można ją zakwalifikować jako badania stosowane, a zaproponowane rozwiązania mogą mieć praktyczne zastosowanie w działalności badawczej.

Doktorant przedstawił pracę składającą się ze 228 stron maszynopisu obejmujących streszczenie w języku polskim i angielskim, siedem rozdziałów opisujących podjętą tematykę badawczą oraz wykaz literatury zawierający 324 pozycje.

Poniżej przedstawiam krótką charakterystykę przedstawionej pracy:

Rozdział 1 – w tym rozdziale Autor krótko przedstawia zarys pracy, formułuje jej tezę oraz główne cele. Sformułowana przez Autora teza pracy brzmi: *zastosowanie opracowanego innowacyjnego podejścia wykorzystującego analizę sygnałów elektrycznych EDM oraz metody ML i DL do wykrywania przebicia i anomalii w drążeniu otworów wentylacyjnych metodą elektroerozyjną FHD umożliwia dokładną kontrolę procesu oraz wykrywanie przebicia z wysoką dokładnością niedostępną dla innych rozwiązań*. A główne cele badawcze, jakie Autor sobie postawił obejmowały:

- Opracowanie metod akwizycji oraz przetwarzania danych pomiarowych procesu drążenia FHD.
- Analiza procesu drążenia otworów wentylacyjnych w procesie FHD. Identyfikacja możliwych do monitorowania parametrów najlepiej oddających prawidłowość przebiegu oraz etap zadania.
- Poznanie właściwości sygnałów prądu i napięcia zachodzących w czasie drążenia oraz określenie istotnych zmian przebiegów zależących od etapu procesu.
- Przetestowanie różnych metod ML i DL owocujące zbudowaniem funkcjonalnych modeli pozwalających na automatyczną klasyfikację impulsów.
- Analiza statystyczna wyodrębnionych i sklasyfikowanych impulsów oraz ewaluacja zmienności ich generacji w zależności od etapu procesu.

- Zbadanie wydajności różnych podejść i wyłonienie najlepszego rozwiązania do kontroli fazy procesu (w tym wykrycia przebiccia) w oparciu o odczyty z czujników z użyciem podejścia DL.
- Eksperymentalne testy potwierdzające skuteczność zbudowanego podejścia kontroli procesu.
- Opracowanie algorytmu wykrywania błędów i anomalii procesu FHD w oparciu o sygnały elektryczne i metody ML i DL.

Rozdział 2 – w tym rozdziale Autor uzasadnia istotność i aktualność podjętej w pracy tematyki. Rozdział został podzielony na 5 podrozdziałów, opisujących kolejno:

- ogólną charakterystykę silników odrzutowych z podkreśleniem wysokich wymagań produkcyjnych dla wykorzystywanych części, co oczywiście generuje wysokie koszty w przypadku produkcji elementów wadliwych;
- zarys technologii obróbki elektroerozyjnej EDM, wraz z opisem procesu drążenia. Autor podkreśla, że praca będzie dotyczyć elektroerozyjnego drążenia otworów – FHD;
- opis procesu wiercenia elektroerozyjnego, przy wskazaniu jak istotne w tym procesie jest bardzo precyzyjne określenie momentu przebiccia;
- przedstawienie ustawialnych parametrów procesu FHD, które służą kontroli procesu;
- przedstawienie procesu oceny jakości produkowanej części poddanej procesowi wiercenia elektroerozyjnego oraz dyskusję możliwych usterek tego procesu, takich jak niepełne przebiccie, overdrilling, czy scarfing.

Rozdział 3 – zawiera bardzo szczegółowy przegląd literaturowy obejmujący w pierwszej kolejności przegląd publikacji dotyczących wykrywania przebiccia w procesie FHD. Autor zauważa, że obecnie badania nad tą tematyką mocno skupiają się na wykorzystaniu sygnałów prądowych i napięciowych do kontroli procesu. Doktorant przedstawia tutaj standardowe charakterystyczne kształty przebiegów napięcia i prądu, które otrzymywane są w procesie elektrodrążenia. Dalej, Autor przedstawia przegląd literatury dotyczący systemów diagnostycznych opartych na algorytmach uczenia maszynowego, przy czym w związku z brakiem takiego podejścia w kontekście FHD, przedstawiona literatura dotyczy ogólnie systemów diagnostycznych. W ostatniej części tego rozdziału Autor przedstawia pojęcie anomalii procesu i przegląd literaturowy związany z wykrywaniem anomalii za pomocą technik ML. Ponownie Autor wskazuje, że jak do tej pory to podejście nie było stosowane w kontekście kontroli procesu FHD.

Rozdział 4 – rozdział ten przedstawia wykonane przez Autora badania eksperymentalne procesu FHD. Doktorant przeprowadził szereg drążeń na przygotowanej próbce wykonanej ze stopu Inconel 718, której geometria pozwalała na prostą symulację budowy elementu silnika. Autor przygotował i oprogramował układ laboratoryjny pozwalający na akwizycję odpowiednich sygnałów podczas pracy drążarki. Zaproponowany układ pozwalał na synchronizację zegarów maszyny i układu akwizycji danych. Po określeniu minimalnej wymaganej częstotliwości próbkowania, Autor wykonał szereg wierceń, które miały na celu budowę odpowiedniej bazy danych na potrzeby technik ML. Aby zapewnić reprezentatywność danych zaproponowano trzy zestawy wartości parametrów drążenia: optymalne, agresywne i błędne, dwie wartości kąta nachylenia elektrody względem próbki (90° i 45°) oraz kilka możliwych sytuacji generujących anomalie: drążenie z błędnymi parametrami, z ograniczonym przepływem dielektryka, z wygiętą elektrodą i drążenia generujące wady w postaci scarfingu. Po wykonaniu drążeń Autor podjął się charakterystyki otrzymywanych sygnałów, dzieląc je ogólnie na 7 wyróżniających się etapów. Jak zauważa Autor po odpowiednim uśrednieniu wartości można określić pewien trend wartości prądu i napięcia, wskazujący na rozpoczęcie i zakończenie procesu przebiccia. Nie jest to jednak zagadnienie trywialne i niemożliwe jest określenie sztywnych wartości progowych tych parametrów. W tym rozdziale Autor dokonuje też analizy charakteru impulsów EDM i przeglądu oraz analizy danych rejestrowanych przez sterownik drążarki.

Rozdział 5 – zawiera opis prac Autora związanych z opracowaniem narzędzi rozpoznawania zarówno przebiccia, jak i anomalii procesu FHD. Pracę na tym złożonym zagadnieniu Autor przeprowadził w kilku etapach. W pierwszym etapie podzielił przebiegi na poszczególne impulsy – czyli pakiety odpowiadające okresowi T . W związku z zaobserwowanym brakiem synchronizacji między układem NI rejestrującym sygnały, a maszyną konieczne było zbudowanie autorskiego algorytmu realizującego to zadanie. W następnym etapie impulsy dzielone były na odpowiednie kategorie. W swojej pracy Autor często opisuje również te podejścia, które nie dały dobrych rezultatów, co stanowi również pozytywny aspekt tej pracy | i pokazuje, że Doktorant prowadził swoje badania w sposób przemyślany i systematyczny. W przypadku zagadnienia klastrowania impulsów, zastosowanie algorytmu k-means dla danych surowych nie dało odpowiednich rezultatów. Dalej podjęto próbę zastosowania metody PCA do redukcji liczby cech, co też nie dało jednoznacznego podziału na kategorie. Trzecie podejście zakładało użycie odpowiednio wytrenowanego autoenkodera. Autor analizuje też tutaj i uzasadnia dobór liczby klas, ustalając ją na 9.

W kolejnym etapie zaproponowano narzędzie do automatycznej klasyfikacji impulsów. Tutaj znowu Autor zaproponował i przetestował szereg technik uczenia maszynowego, uwzględniając regresję logistyczną, SVM, drzewa decyzyjne, lasy losowe, kNN sztuczne sieci neuronowe, oraz sieci CNN, RNN, LSTM i DBN. Autor zebrał przykładowe wyniki dokładności klasyfikacji różnymi metodami w tabeli 9, wskazując, że najlepsze wyniki klasyfikacji osiągnięto dla sieci CNN 1D o określonej architekturze. Na podstawie przeprowadzonej klasyfikacji Autor podjął się analizy zmienności impulsów FHD – tutaj szczególnie interesujące wydają się być wyniki przedstawione na rysunkach 75 i 76 – czyli wykresy średnich kroczących ilości wystąpień danego rodzaju impulsu w procesie, gdzie można wyraźnie zauważyć istotną zmianę w momencie przebicia elektrody przez płytkę.

Na podstawie wcześniej uzyskanych wyników Autor następnie przedstawia proces opracowania narzędzia do wykrywania przebicia zbudowanego w oparciu o metody głębokiego uczenia. Autor podjął się trudnego zadania opracowania modelu, który cechować powinien się bardzo wysoką dokładnością i jednocześnie złożonością obliczeniową na tyle małą, żeby możliwa była kontrola procesu w trybie on-line. Znowu zaproponowano dwa odrębne podejścia do tego zagadnienia: oparcie klasyfikatora o analizę paczek danych i budowę klasyfikatora na stworzonym we wcześniejszych etapach pracy klasyfikatorze impulsów. Po wstępnej weryfikacji dokładności kilku metod uczenia maszynowego, podjęto decyzję o skupieniu się na metodach opartych na głębokim uczeniu. Zbudowany dalej model sieci CNN 2D okazał się być niepraktyczny ze względu na dużą złożoność obliczeniową. Ostatecznie Autor zdecydował się na wykorzystanie ponownie sieci CNN 1D. Dla budowanego modelu Autor określa odpowiedni typ oraz liczbę danych wejściowych, analizuje wydajność różnych wariantów klasyfikatora. Dla danych testowych zbudowany klasyfikator osiągnął 100% dokładności. Przeprowadzone testy wskazują, że tak zbudowany model mógłby być zaimplementowany w elektrodrażarce, jednak Autor wskazuje, że w procesie walidacji dało się zauważyć pewną liczbą drażeń, dla której klasyfikator zadziałał z dużym opóźnieniem.

W drugim podejściu Autor zaproponował oparcie projektowanego narzędzia do wykrywania przebicia na zaprojektowanym wcześniej klasyfikatorze impulsów. Aby umożliwić pracę narzędzia w czasie rzeczywistym w pierwszym etapie Autor postanowił uprościć zbudowany wcześniej klasyfikator impulsów. Po analizie korelacji między impulsami udało się zredukować liczbę wykrywanych klas impulsów z 9 do 4. Na podstawie przeprowadzonej klasyfikacji impulsów, jako dane wejściowe wykorzystano krzywe procentowej zawartości kolejnych

rodzajów impulsów zliczanych w odpowiednich wycinkach przebiegów procesu. Zaprojektowany model do wykrywania przebicia został oparty na połączeniu sieci konwolucyjnych z rekurencyjnymi (GRU). Po zbudowaniu modelu był on testowany za pomocą danych walidacyjnych nie biorących udziału w procesie uczenia sieci. Zbudowana sieć osiągnęła bardzo dobre wyniki wykrywania przebicia, jednocześnie osiągając nieco lepszą terminowość wykrycia, niż zaproponowane wcześniej narzędzie oparte na analizie danych surowych.

Co bardzo istotne, zbudowane narzędzie zostało zintegrowane z maszyną FHD, a następnie przetestowane na walidacyjnych eksperymentach wiercenia otworów przelotowych. Implementacja narzędzi na docelowej maszynie obejmowała też dodanie elementów kontrolnych procesu: kodów odpowiedzialnych za zatrzymanie ruchu maszyny i generacji iskier w przypadku wykrycia przebicia. W trakcie testów potwierdzono bardzo wysoką efektywność zaprojektowanych narzędzi: zarówno dla modelu opartego na danych surowych, jak i drugiego – opartego na klasyfikatorze impulsów, nie zaobserwowano ani przedwczesnego wykrycia przebicia, ani zjawiska overdrillingu dla dwóch zestawów parametrów i dwóch różnych orientacji elektrody względem płytki. Co ciekawe zaproponowane przez Autora modele łatwo wytrenować na stosunkowo niewielkiej liczbie otworów testowych – w pracy potwierdzono to, wykonując odpowiednie testy na innym zestawie parametrów wiercenia.

Ostatnim zaprezentowanym w omawianym rozdziale etapem było zaprojektowane metodyki wykrywania anomalii procesu FHD. Podobnie jak poprzednio, i tutaj Autor przedstawia dokładnie swoją koncepcję rozwiązania tego problemu, opisując również te podejścia, które ocenia jako niewystarczająco dobre. Jako dane wejściowe zaproponowano pakiety 10 000 kolejnych wartości pomiarowych prądu i napięcia. Takie podejście miało zagwarantować terminowe wykrywanie anomalii oraz niwelowanie wpływu krótkookresowych zmian przebiegu. Pierwsze podejście do tematu zakładało przetestowanie skuteczności szeregu technik uczenia maszynowego. Najlepsze rezultaty otrzymano dla metody lasów izolacyjnych, osiągając bardzo dobre (powyżej 80%) wyniki rozpoznawania anomalii w postaci błędnych parametrów wiercenia, wiercenia z ograniczonym przepływem dielektryka czy zagiętą elektrodą oraz scarfingu. Niestety Autor zauważa, że takie podejście nie nadaje się do rozpoznawania przebiegów otrzymanych z wierceń wykonanych na zestawie parametrów określanych w rozprawie jako „agresywne”. Drugim zaproponowanym podejściem było zastosowanie głębokiego uczenia w postaci autoenkodera opartego na gęstych sieciach neuronowych. Taki model miał na celu najlepsze odwzorowanie danych poprawnych

i wykrycie anomalii na podstawie określonego współczynnika błędu rekonstrukcji. Po analizie wyników rekonstrukcji otrzymanych dla takiego modelu, Autor zauważa, że spora część pakietów danych oznaczonych jako anomalie miała wartości błędu rekonstrukcji na poziomie danych normalnych, co skutkowałoby błędnym oznaczeniem anomalii. W związku z tym zaproponowano trzecie rozwiązanie – budowę autoenkodera opartego na sieciach konwolucyjnych. Takie podejście znacznie poprawiło zdolności rekonstrukcyjne autoenkodera – wyniki przedstawione na rysunku 101 wyraźnie pokazują, że tym razem możliwe jest niemal całkowite rozdzielanie danych anomalnych od normalnych za pomocą dobrze określonego współczynnika błędu rekonstrukcji. Walidacja zbudowanego autoenkodera, przeprowadzona na danych syntetycznych złożonych z danych poprawnych z dodanymi odcinkami danych niepoprawnych, wykazała, że średnia skuteczność tego narzędzia wynosi niemal 100% (99.48%). Mniejszą niż 100% skuteczność osiągnięto tylko dla danych anomalnych pochodzących z wierceń przeprowadzonych na błędnych parametrach (96.85%).

Rozdział 6 – w tym rozdziale Autor podsumowuje przeprowadzone prace badawcze. Przedstawiono listę osiągniętych celów oraz podsumowanie głównych kierunków badawczych przedstawionych w ocenianej dysertacji. Autor deklaruje tutaj, że w trakcie rozprawy osiągnął wszystkie zamierzone cele oraz udowodnił tezę pracy.

Rozdział 7 – prezentuje dalsze kierunki badań wskazywane przez Autora, wśród których wymieniono:

- przetestowanie zaproponowanych metodologii podczas prowadzenia prawdziwego procesu produkcyjnego;
- integrację opracowanych metod z obrabiarką.
- stworzenie aplikacji eksperckiej wizualizującej i ułatwiającej etapy przygotowania danych i uczenia sieci;
- integrację z systemami bazodanowymi wspierającymi procesy produkcyjne;
- rozszerzenie stosowalności opracowywanych systemów poza środowisko laboratoryjne i wdrożenie ich w produkcji seryjnej;
- modyfikację samego procesu drążenia poprzez zastąpienie dielektryka roztworem soli.

Ocena tematu, celu i zakresu pracy:

Przedstawiona do oceny dysertacja zawiera dość precyzyjnie sformułowaną tezę oraz jasno określone cele badawcze. Praca cechuje się wysoką spójnością, a przeprowadzone badania i analizy są logicznie powiązane, konsekwentnie realizując założone cele. W swojej tezie Autor wskazuje, że opracowane narzędzia mają umożliwić dokładną kontrolę procesu wiercenia oraz zapewnić wykrywalność przebiega na poziomie niedostępnym dla innych rozwiązań. Jednak sformułowanie to wydaje się zbyt stanowcze – sugeruję rozważenie dodania frazy „obecnie stosowanych”, co zmieniłoby ostatnią część tezy na: „(...) wykrywanie przebiega z wysoką dokładnością niedostępną dla innych, obecnie stosowanych rozwiązań.”

Tematyka pracy dotyczy konkretnego problemu technicznego, który został przez Autora szczegółowo i jasno nakreślony. Kluczowe jest wskazanie w dysertacji istotnej luki badawczej, którą Autor postanowił uzupełnić. Już w pierwszych rozdziałach pracy podkreślono, jak znaczący i wymagający jest to problem – nie budzi wątpliwości, że wytwarzanie złożonych struktur stosowanych w przemyśle lotniczym wymaga technologii charakteryzujących się najwyższą precyzją i niezawodnością. Dzięki badaniom przedstawionym w dysertacji możliwe stanie się udoskonalenie pracy elektrodrażarki, co ma istotne znaczenie praktyczne.

Biorąc pod uwagę powyższe, uważam, że podjęcie zaproponowanej tematyki jest **w pełni uzasadnione, celowe i użyteczne**. Praca, obejmująca badania zarówno eksperymentalne, jak i symulacyjne, posiada istotny walor użytkowy. Na szczególną uwagę zasługuje również przedstawienie wstępnej implementacji narzędzia do wykrywania przebiega na dostępnej elektrodrażarce, co dodatkowo wzmacnia praktyczne znaczenie tej dysertacji.

Ocena rozprawy:

Nie mam żadnych wątpliwości, że wybór tematyki pracy jest zarówno trafny, jak i niezwykle potrzebny. Autor w sposób kompleksowy i przemyślany przedstawił proces badawczy, który prowadzi do realizacji wyznaczonych celów. Pracę otwiera szczegółowy i wnikliwy przegląd literatury, w którym analizowane są dostępne narzędzia oraz techniki stosowane w kontroli procesu FHD. Autor nie ogranicza się jedynie do opisu istniejących rozwiązań, lecz podejmuje krytyczną ocenę ich ograniczeń, co stanowi solidną podstawę dla zaproponowania nowatorskiego podejścia wykorzystującego techniki uczenia maszynowego.

Badania zostały podzielone na logiczne i jasno określone etapy, co świadczy o systematycznym podejściu i dążeniu do osiągnięcia praktycznych rezultatów. Warto podkreślić techniczne kompetencje Doktoranta, który zaprojektował i wykonał autorski układ pomiarowy do zbierania danych z maszyny FHD. Co więcej, układ ten został zintegrowany z opracowaną przez Autora aplikacją w środowisku LabView, co umożliwiło efektywną akwizycję danych oraz integrację wyników badań z maszyną. Działania te wskazują na wysoki poziom zaawansowania technologicznego pracy i dużą samodzielność badawczą Autora.

Równie imponująca jest wiedza Doktoranta w obszarze technik uczenia maszynowego, co znajduje odzwierciedlenie w każdym etapie prowadzonych badań symulacyjnych. Szczególnie interesujące jest zastosowanie klasyfikatora impulsów do identyfikacji momentu przebiccia. Tego rodzaju podejście wymagało dokładnej analizy danych i głębokiego zrozumienia procesu, co pokazuje znakomite przygotowanie Autora do prowadzenia zaawansowanych badań.

Doceniam również sposób, w jaki Autor prezentuje wyniki swoich badań. Oprócz rezultatów pozytywnych przedstawia także te, które uznaje za mniej satysfakcjonujące. Taka transparentność pozwala czytelnikowi w pełni zrozumieć proces badawczy i świadczy o rzetelności naukowej.

W pracy można dostrzec pewną dysproporcję między stopniem szczegółowości opisu narzędzia do wykrywania przebiccia a opisem narzędzia do wykrywania anomalii. Pierwszy z tych tematów został potraktowany znacznie głębiej, choć to drugi problem wydaje się bardziej złożony. Niemniej jednak wszystkie opracowane narzędzia są skuteczne, co potwierdzają wyniki badań, i mają znaczący potencjał aplikacyjny.

Na podstawie przedstawionych badań, zarówno symulacyjnych, jak i eksperymentalnych, przeprowadzonych z wykorzystaniem autorskich modeli oraz stanowisk pomiarowych, stwierdzam, że Autor wykazał się wysokim poziomem wiedzy teoretycznej i praktycznej w dziedzinie, której dotyczy dysertacja. Praca wnosi istotny wkład do rozwoju badań nad kontrolą procesu FHD. **W mojej ocenie Autor udowodnił postawioną tezę, jak również zrealizował wszystkie wymienione cele.**

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem opisu przedstawionych problemów, wyboru metod i zakresu badań oraz sposobów ich rozwiązania zaliczam:

- praktyczną tematykę rozprawy i bardzo dogłębny przegląd literaturowy identyfikujący właściwe kierunki badań;

- kompleksowe podejście do tematu obejmujące zarówno stworzenie autorskiego układu pomiarowego, wykonanie badań eksperymentalnych oraz dogłębną analizę otrzymanych danych;
- szczegółową analizę sygnałów otrzymywanych w procesie FHD;
- opracowanie klasyfikatora impulsów opartego na głębokich sieciach neuronowych odznaczającego się bardzo wysoką skutecznością działania;
- opracowanie dwóch narzędzi opartych na głębokich sieciach neuronowych do właściwie niezawodnego wykrywania przebiecia;
- opracowanie skutecznego narzędzia do wykrywania anomalii procesu opartego o autoenkoder bazujący na sieciach konwolucyjnych;
- możliwość wykorzystania wyników do implementacji w rzeczywistych układach produkcyjnych.

Jak każda obszerna praca, również i ta nie jest wolna od różnego rodzaju błędów. Pragnę jednocześnie podkreślić, że strona edycyjna pracy wygląda bardzo dobrze i znalazłam zaledwie kilka literówek lub błędów stylistycznych. Do wad edycyjnych pracy zaliczam:

- w związku z formatem pracy (książka w formacie B5) niektóre rysunki (szczególnie te przedstawiające architektury opracowywanych sieci) miały zbyt małą czcionkę,
- niewielka liczba literówek, np.
 - strona 17 jest: (...) *zmian ich przebiegów w zależących od etapu procesu (...)*, a powinno być: (...) *zmian ich przebiegów zależących od etapu procesu (...)*,
 - strona 38 na rysunku 16 jest: *Niedana naprawa po nakładania powłoki ceramicznej*, a powinno być: *Nieudana naprawa po nałożeniu powłoki ceramicznej*,
 - strona 189, jest: *Podsumowując, w ramach rozporowy (...)*, a powinno być: *Podsumowując, w ramach rozprawy (...)*
- Autor dość często niewłaściwie używa słowa „ilość”, tam gdzie powinien użyć słowa „liczba”, np. strona 47: *Zbyt duża ilość cech zwiększa koszt obliczeniowy*, powinno być: *liczba cech*.

Pytania i wątpliwości jakie pojawiły się podczas analizy niniejszej pracy są następujące:

1. Prace badawcze opisane w rozprawie mają, w mojej opinii, duże znaczenie z naukowego punktu widzenia (znaczenie aplikacyjne jest tutaj oczywiste), dlatego

zwraca uwagę brak publikacji Autora z zakresu prezentowanego w pracy. Czy planowana jest publikacja wyników?

2. Według deklaracji Autora praca była realizowana we współpracy z Zespołem Rozwoju i Utrzymania Ruchu Laboratoriów oraz pracownikami Laboratorium Zaawansowanych Technologii Produkcyjnych (Sieć Badawcza Łukasiewicz), co oczywiście jest całkowicie uzasadnione biorąc pod uwagę tematykę i zakres pracy. Wskazuje to jednak na pracę w pewnym zespole i w związku z tym proszę o wskazanie własnych osiągnięć Autora lub określenie zgrubnego wkładu procentowego Autora w wykonane prace.
3. Autor w swoich analizach używa sygnałów bazujących na przebiegach prądu, napięcia lub *kombinowanych przebiegach prądu i napięcia* (strona 130). W jaki dokładnie sposób przebiegi te były łączone?
4. Autor nie wskazuje nigdzie środowiska w jakim przeprowadził obliczenia. Nie ma także informacji, czy Autor sam implementował wymieniane metody ML i DL. Proszę o doprecyzowanie tych kwestii.
5. Autor w toku swoich prac testuje wiele technik uczenia maszynowego oraz proponuje różne rodzaje i architektury głębokich sieci neuronowych, w związku z tym proszę tutaj o doprecyzowanie w jaki sposób przeprowadzona była optymalizacja architektury narzędzi opartych na głębokich sieciach neuronowych (użytych w klasyfikatorze impulsów, w wykrywaniu przebiecia oraz wykrywaniu anomalii).
6. W przypadku narzędzia do wykrywania przebiecia, Autor prezentuje przykładową jego integrację z drążarką i przedstawia wyniki testowania w warunkach produkcyjnych. Jednak w przypadku narzędzia do wykrywania anomalii przedstawiono jedynie testy na danych syntetycznych. Czy jest możliwa integracja tego narzędzia z drążarką i przeprowadzanie testów podobnych w warunkach produkcyjnych?
7. Czy można powiedzieć, że narzędzie do wykrywania anomalii działa, podobnie jak narzędzie do wykrywania przebiecia – w trybie on-line? Jaka jest procedura postępowania przy wykryciu anomalii, jeżeli narzędzie działa w trybie on-line?
8. W przypadku opracowywania narzędzia do wykrywania przebiecia Autor pracował na sygnałach otrzymanych z szeregu wierceń testowych, które obejmowały również wiercenia kątowe (kąt 45°). Czy narzędzie było walidowane przy użyciu również innych kątów nachylenia elektrody względem płytki?
9. Podobnie w przypadku narzędzia do wykrywania anomalii wszystkie testowe otwory były wiercone przy założeniu, że elektroda jest umieszczona prostopadle do płytki

(tabela 6). Czy tak opracowane narzędzie byłoby w stanie wykryć anomalie w procesie drążenia kątownego?

10. W jaki sposób określano optymalną wartość błędu rekonstrukcji w narzędziu do wykrywania anomalii?

11. Wszystkie badania wykonano na jednym rodzaju materiału. Jak rodzaj materiału wpłynąłby na skuteczność opracowanych narzędzi?

Wszystkie wymienione wyżej uwagi mają oczywiście charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości merytorycznej pracy, którą oceniam jednoznacznie jako bardzo wysoką.

Wniosek końcowy:

Praca doktorska przedstawiona przez mgr. inż. Rafała Sikorskiego oraz jej zawartość i forma, pomimo przedstawionych drobnych nieścisłości, wskazuje na jego bardzo dużą wiedzę i doświadczenie w zakresie badań eksperymentalnych, szczególnie w kontekście procesu FHD oraz analiz związanych z szeroko pojętym data miningiem. Należy podkreślić, że zakres przedstawionej pracy jest bardzo duży i świadczy o bardzo dobrej organizacji pracy badawczej Autora. Na podstawie przedstawionej pracy uważam, iż Doktorant umie samodzielnie przygotować i zrealizować rozwiązanie problemu naukowego na podstawie badań analitycznych i eksperymentalnych. **Podsumowując uważam, że poziom przedstawionej pracy spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz.1668, z późn. zm.).** W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Rafała Sikorskiego do obrony jego rozprawy.

Barbara Gprchowska