

Dr hab. inż. Andrzej Waindok, prof. Uczelni
Katedra Elektrotechniki i Mechatroniki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole
tel. (77) 449 8027
E-mail: a.waidnok@po.edu.pl

Opole, dn. 06.12.2023

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia 13.12.2023

nr zał.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Romana Pawełczyka

pt. Diagnostyka elektrycznego napędu rogatekowego z wykorzystaniem uczenia maszynowego

wykonanej po kierunku dr hab. inż. Damiana Grzechca z Politechniki Śląskiej w Gliwicach

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne dr hab. inż. Moniki Kwoka
– pismo z dnia 23.10.2023.

1. Ocena wyboru tematu i tezy naukowej rozprawy

Napędy rogatekowe są jednym z kluczowych elementów zapewniających bezpieczeństwo w obszarze przejazdów kolejowo-drogowych. Liczba wypadków na tego typu przejazdach waha się w okolicy 200 rocznie. W związku z tym stale prowadzone są prace mające na celu zwiększenie bezpieczeństwa tego typu przejazdów. Pewnym utrudnieniem we wprowadzaniu zmian jest konieczność spełnienia przez sygnalizację przejazdową najwyższego stopnia bezpieczeństwa SIL-4. W związku z tym, jakkolwiek ingerencja w napęd rogatekowy wiąże się z koniecznością przeprowadzenia kosztownych i czasochłonnych testów. Rozwiązaniem może być wykorzystanie systemów zwiększających bezpieczeństwo bez bezpośredniej ingerencji czy to w obwód elektryczny, czy też mechaniczny.

W opiniowanej pracy przedstawiono badania autorskiego systemu diagnostycznego dla elektrycznego napędu rogatekowego. Jedną z istotnych cech przedstawionego systemu jest brak ingerencji w istniejącą strukturę napędu, co pozwala na jego wdrożenie bez konieczności prowadzenia kosztownych testów. Ciekawym i nowatorskim aspektem pracy jest wykorzystanie szeregu metod uczenia maszynowego do analizy sygnału przebiegu prądu zasilania silnika celem określenia aktualnego położenia drąga, predykcji czasu jego ruchu oraz klasyfikacji diagnostycznej. **Opiniowana praca mieści się w dyscyplinie naukowej "Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne", a temat rozprawy uważam za ważny zarówno pod względem naukowym, jak również poznawczym i praktycznym.**

Autor sformułował 3 tezy pracy:

- a) Analiza czasowa przebiegu prądu zasilającego elektryczny napęd rogatekowy z wykorzystaniem algorytmu uczenia maszynowego umożliwia wyznaczenie aktualnego położenia kąta drąga bez konieczności ingerencji w konstrukcję urządzenia jednocześnie zwiększając poziom bezpieczeństwa poprzez wygenerowanie dodatkowej informacji dla systemu sterującego.

- b) Algorytm uczenia maszynowego wraz z informacją o aktualnym kącie położenia drąga na podstawie przebiegu prądu zasilającego umożliwia predykcję czasu otwierania i zamykania z zachowaniem wymagań normatywnych w kolejnictwie.
- c) Detekcja zaistnienia nieprawidłowości, zaburzenia w trakcie ruchu drąga na podstawie przebiegu prądu zasilającego elektryczny napęd rogatekowy z wykorzystaniem algorytmu uczenia maszynowego pozwala na wypracowanie dodatkowej informacji dla system nadzrędnego.

Biorąc pod uwagę zawartość pracy tezy są sformułowane poprawnie. Określenie kąta położenia drąga, predykcja czasu otwierania i zamykania drąga oraz detekcja zaistniałych nieprawidłowości na podstawie jedynie pomiaru przebiegu prądu zasilania silnika jest zadaniem trudnym. Wykorzystanie w tym celu metod uczenia maszynowego jest jak najbardziej zasadne.

2. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 139 stron. Rozprawę podzielono na 8 rozdziałów, nie wliczając wykazu literatury oraz dodatku, które zostały zamieszczone na końcu rozprawy. Na początku rozprawy zamieszczono szczegółowy wykaz stosowanych skrótów i oznaczeń, który potraktowano jako rozdział 1. Rozprawa nie zawiera załączników ani dokumentacji technicznej prezentowanych rozwiązań. Bibliografia zawiera 109 pozycje, w tym 2 pozycje współautorskie Doktoranta w dobrych czasopismach zagranicznych. Literatura jest poprawnie dobrana i cytowana oraz zawiera aktualne pozycje z zakresu uczenia maszynowego, diagnostyki oraz napędów.

We wstępie (rozdział 2) przedstawiono umotywowanie badań, opisano koncepcję pracy diagnostyki napędu rogatekowego, scharakteryzowano najczęściej występujące usterki, opisano aspekty związane z bezpieczeństwem przejazdów kolejowych, a także podano cele, zakres i tezy pracy.

Rozdział 3 zawiera opis działania napędu rogatekowego jako elementu sygnalizacji przejazdowej. Podrozdział 3.2 zawiera opis budowy wewnętrznej elektrycznego napędu rogatekowego, ze szczególnym naciskiem na elementy związane z bezpieczeństwem i niezawodnością. Jest to stosunkowo krótki, ale istotny podrozdział, stanowiący wprowadzenie do badań przedstawionych w dalszej części rozprawy. W podrozdziale 3.3 obszernie i szczegółowo opisano aktualny stan badań związanych z diagnostyką elektrycznego napędu rogatekowego, aktualne prace badawcze związane z poprawą bezpieczeństwa przejazdów drogowo-kolejowych oraz wykorzystanie uczenia maszynowego i metod sztucznej inteligencji w diagnostyce. W tym miejscu należy zaznaczyć, że tytuł podrozdziału „Analiza aktualnych badań związanych z diagnostyką elektrycznego napędu rogatekowego” nie oddaje w pełni jego zawartości, która jest większa niż sugeruje sam tytuł. W kolejnych podrozdziałach opisano wykorzystane metody diagnostyczne, stanowisko eksperymentalne do badań elektrycznego napędu rogatekowego, pozyskiwane dane treningowe i testowe, a także parametry oceny jakości proponowanych w pracy metod.

W rozdziale 4 opisano szczegółowo autorską metodę detekcji kąta położenia drąga elektrycznego napędu rogatekowego nazwaną BMAD (Barrier Machine Angle Detection). W kolejnych podrozdziałach zawarto informacje o sposobie opracowania metody, sposobie wytworzenia danych treningowych i testowych, wykorzystanych modelach ML (DT, RF, MLP oraz P) oraz przeprowadzonych badaniach porównawczych tych modeli.

W rozdziale 5 opisano szczegółowo autorską metodę predykcji całkowitego czasu ruchu drąga elektrycznego napędu rogatekowego nazwaną BMMT (Barrier Machine Movement Time). W kolejnych podrozdziałach zawarto informacje o sposobie opracowania metody, danych treningowych i testowych,

wykorzystanych modelach predykcyjnych ML (NM, LR, MLP oraz RF) oraz przeprowadzonych badaniach porównawczych tych modeli. Ciekawe rozwinięcie prowadzonych badań stanowi strojenie modeli predykcyjnych, przeprowadzenie badań dla modeli zespołowych (wykorzystanie dwóch najlepszych modeli po strojeniu) oraz sprawdzenie odporności modeli na uszkodzone dane.

Rozdział 6 zawiera opis metody detekcji wybranych zdarzeń pojawiających się w trakcie pracy napędu rogatekowej nazwanej BMFD (Barrier Machine Failure Detection). Rozdział zawiera opis wytworzenia danych treningowych i testowych, a także opis modeli dla wybranych zdarzeń występujących podczas pracy elektrycznego napędu rogatekowego, tj. uderzenie w przeszkodę stałą, uderzenie w przeszkodę sprężystą, uszkodzenie mechanizmu napędowego. Jako modele ML wykorzystano MLP oraz RF. Podobnie jak w rozdziale 5, opisano strojenie modeli i przeprowadzono ocenę skuteczności działania opracowanej metody z wykorzystaniem danych rzeczywistych.

W rozdziale 7 przedstawiono projekt wdrożeniowy oparty o elektryczny napęd rogatekowy firmy ALSTOM ZWUS Sp. Z o.o. Należy nadmienić, że prace wdrożeniowe zostały pozytywnie ocenione przez przedstawicieli firmy ALSTOM i przekazane do dalszego procedowania.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie badań przeprowadzonych w rozprawie.

Praca jest dobrze i starannie zredagowana. Kolejne rozdziały prezentują wyniki pracy jako logiczny i spójny ciąg, ukierunkowany na realizację celów pracy i potwierdzenie założonych tez. Rysunki są czytelne i dobrej jakości. Pewną uwagę można mieć do formatowania wykazu literatury (przydałyby się większe odstępy między kolejnymi pozycjami) oraz sporej ilości wolnego miejsca pozostawionego na niektórych stronach (np. 25, 50, 85, 102, 103). Nieco osobliwa jest również niezgodność (a właściwie przesunięcie o 1) numeru rozdziału z numerem wzorów (np. w rozdziale 3 wzory są numerowane jako 2.x), co powoduje pewną trudność w odszukaniu wzoru w momencie odwołania do niego z innego rozdziału. Można było zrezygnować z numerowania spisu najważniejszych oznaczeń i skrótów jako osobnego rozdziału i problem by się nie pojawił.

3. Ocena wartości naukowej rozprawy

3.1. Podstawowe założenia i wybór metod diagnostyki elektrycznego napędu rogatekowego

Diagnostyka napędów elektrycznych jest procesem złożonym, wymagającym dużej wiedzy eksperckiej. Obecnie często jest ona wykonywana w oparciu o metody deterministyczne w połączeniu z wiedzą eksperta analizującego rejestrowane sygnały. W celu przeprowadzenia tego typu diagnostyki napędów elektrycznych wykonuje się pomiary zarówno sygnałów elektrycznych (np. prąd, napięcie) jak i mechanicznych (np. położenie kątowe, prędkość obrotowa). W wielu przypadkach jednakże, ilość oraz jakość dostarczonych danych mogą być niewystarczające dla eksperta diagnozującego napęd (np. w przypadku badanego napędu, ze względu na brak możliwości ingerencji w jego strukturę, nie można w sposób ciągły mierzyć kąta położenia rogatki). W związku z tym coraz częściej można spotkać zastosowania metod sztucznej inteligencji w diagnostyce urządzeń, w tym napędów elektrycznych, które wnioskuje na podstawie ograniczonego zestawu danych. Wykorzystane przez Autora rozprawy nauczanie maszynowe (ML – machine learning) niewątpliwie wpisuje się w ten trend. Jednocześnie brakuje publikacji, które obejmowałyby szczególnie przypadek diagnostyki elektrycznego napędu rogatekowego z wykorzystaniem ML. Autor podjął się więc trudnego i istotnego problemu badawczego. W celu jego realizacji wykonał badania skuteczności działania różnych modeli ML dla trzech celów diagnostycznych oraz opracował autorskie metody diagnostyki. W celu przygotowania danych treningowych i testowych dla modeli wykonał autorskie stanowisko

pomiarowe na którym przeprowadził szereg czasochłonnych pomiarów. **Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że przyjęte przez Autora metody badawcze zostały dobrane poprawnie.**

3.2. Ocena sposobu rozwiązania zagadnienia

W celu udowodnienia trzech postawionych przez siebie tez pracy Autor przeprowadził szereg badań eksperymentalnych i obliczeniowych. Każda z przedstawionych tez dotyczyła innego zagadnienia, dla którego konieczne było stworzenie osobnego modelu nauczania maszynowego. Każdy z modeli wymagał niezależnego przygotowania danych treningowych i testowych, pozyskanych z pomiarów. Na uwagę zasługuje porównanie przez Autora rozprawy szeregu różnych modeli uczenia maszynowego, charakteryzujących się różnym stopniem złożoności (od prostych, jak Perceptron, do złożonych, jak np. Random Forest). W przypadku wyznaczania aktualnego kąta położenia drąga porównano ze sobą cztery modele ML z różnymi klasyfikatorami: Decision Tree Classifier (DT), Random Forest Classifier (RF), MLP Classifier (MLP), Perceptron (P). W przypadku predykcji czasu ruchu drąga, który jest wielkością ciągłą, porównano ze sobą cztery modele predykcyjne ML: Naive Model Mean (NM) z wykorzystaniem modelu Dummy Regresor, Linear Regression (LR), MLP Regresor (MLP), Random Forest Regresor (RF). W przypadku detekcji wybranych zdarzeń porównano dwa modele ML z klasyfikatorami: Random Forest Classifier (RF), MLP Classifier (MLP). Modele te stanowiły najważniejszą część trzech autorskich metod diagnostyki elektrycznego napędu rogatekowego: predykcji położenia drąga (BMAD), czasu ruchu drąga (BMMT) oraz detekcji wybranych zdarzeń (BMFD). Należy zaznaczyć, że w przypadku metod BMMT i BMFD zostało przeprowadzone dodatkowo strojenie modeli z wykorzystaniem algorytmu RandomizedSearchCV oraz zastosowano walidację krzyżową do weryfikacji skuteczności strojenia. Przedstawione modele zostały zrealizowane z wykorzystaniem biblioteki *scikit-learn* w języku *Python*. Opracowane metody zostały z powodzeniem zweryfikowane pomiarowo na autorskim stanowisku badawczym.

Zaprezentowany w pracy doktorskiej sposób rozwiązania zagadnienia diagnostyki elektrycznego napędu rogatekowego jest oryginalny i poprawny.

3.3. Osiągnięcia Autora i ocena wyników rozprawy

Autor podjął się trudnego zadania opracowania metod diagnostyki elektrycznego napędu rogatekowego bez ingerencji w jego konstrukcję. Wykorzystał w tym celu zaawansowane metody sztucznej inteligencji w postaci uczenia maszynowego, co stanowi o interdyscyplinarności pracy doktorskiej, jak również **wskazuje na szeroką i ogólną wiedzę Doktoranta**. Osiągnięcie zakładanych celów pracy wymagało dużego nakładu pracy zarówno od strony obliczeniowej, jak i doświadczalnej. **Przedłożona praca doktorska świadczy o dobrym warsztacie naukowym Doktoranta oraz wskazuje na jego umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych i inżynierskich.**

Do wartościowych cech rozprawy doktorskiej zaliczam:

- 1) Opracowanie autorskich metod predykcji położenia drąga (BMAD), czasu ruchu drąga (BMMT) oraz detekcji wybranych zdarzeń (BMFD) z wykorzystaniem uczenia maszynowego.

- 2) Szeroki zakres wykorzystanych i porównanych ze sobą klasyfikatorów dla uczenia maszynowego w przypadku metody BMAD: Decision Tree Classifier (DT), Random Forest Classifier (RF), MLP Classifier (MLP), Perceptron (P).
- 3) Szeroki zakres wykorzystanych i porównanych ze sobą modeli predykcyjnych dla uczenia maszynowego w przypadku metody BMMT: Naive Model Mean (NM) z wykorzystaniem modelu Dummy Regresor, Linear Regression (LR), MLP Regresor (MLP), Random Forest Regresor (RF).
- 4) W przypadku metod BMMT i BMFD przeprowadzenie strojenia modeli z wykorzystaniem algorytmu RandomizedSearchCV.
- 5) Opracowanie stanowiska badawczego pozwalającego na wygenerowanie danych treningowych i testowych dla poszczególnych modeli ML.
- 6) Przeprowadzenie praktycznych i pracochłonnych testów opracowanych metod diagnostyki elektrycznego napędu rogatekowego.
- 7) Implementację opracowanych metod w języku C na mikrokontrolerze STM32 oraz sterowniku PLC X20 firmy B&R.
- 8) Wdrożenie otrzymanych wyników badań w praktycznym rozwiązaniu elektrycznego napędu rogatekowego.

Podsumowując, przedstawione wyniki badań upoważniają do stwierdzenia, że **tezy rozprawy zostały udowodnione oraz osiągnięto założone cele pracy**. Opracowane stanowisko badawcze, metody diagnostyki oparte o uczenie maszynowe oraz przeprowadzone badania i analizy **stanowią oryginalny i wartościowy wkład Autora w tematykę diagnostyki elektrycznych napędów rogatekowych**.

4. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Nie mam większych zastrzeżeń do strony redakcyjnej pracy doktorskiej. Liczba błędów stylistycznych oraz literówek jest znikoma i nie wpływa w żadnym stopniu na jakość pracy. Niemniej jednak, podczas lektury zauważyłem drobne błędy edytorskie oraz nasunęły mi się pewne uwagi szczegółowe (na które nie wymagam odpowiedzi od Autora):

- 1) Podrozdział 3.4 (niepełna 1 strona) zatytułowany „Nowe metody diagnostyczne” mógłby być włączony do podrozdziału 3.5.
- 2) Str. 22, ostatnie dwa wiersze – niejasne zdanie.
- 3) Str. 29, 2-gi akapit, wiersze 4-5 – można było podać angielskie nazwy algorytmów ACO i DMOP.
- 4) Str. 41, wiersz 3 – podwójne użycie „jest”.
- 5) Str. 43, ostatni wiersz – powinno być „przedstawiono na rys. 3.8”.
- 6) Str. 44 (wiersz 7 od końca), str. 45 (ostatni wiersz) i str. 106 (wiersz 3) – pojawia się „rozdział 0” (błąd w powołaniu na numer rozdziału).
- 7) Równania (2.10) do (2.14) mogłyby być lepiej wyjaśnione.
- 8) We wzorze (2.15) w mianowniku powinno być N , zamiast $N-1$.
- 9) W kilku wzorach (np. 3.6, 3.7, 5.1) pojawia się i_i (zarówno nazwa zmiennej, jak i indeks mają to samo oznaczenie „i”). Dla czytelności zapisu lepiej byłoby zróżnicować oznaczenia.
- 10) Str. 80, wiersz 5 – słowo „najniższy” jest nadmiarowe.
- 11) Str. 113, wiersz 3 – na końcu zdania zamiast „MLP1” powinno być „RF1”.

- 12) Wyniki przedstawione na rys. 5.13 wydają się dość oczywiste, jeżeli wziąć pod uwagę badania zaprezentowane na str. 79-81 (uwzględnienie kierunku i prędkości wiatru nie wpływa istotnie na jakość predykcji).

Po lekturze rozprawy nasunęły mi się także pewne **uwagi dyskusyjne oraz pytania**. Uwagi te nie wpływają na moją ocenę końcową, jednak prosiłbym Pana mgr inż. Romana Pawelczyka o ustosunkowanie się do nich:

- 1) Na jakiej podstawie została przyjęta liczebność zbiorów uczących opisana na str. 43-45?
- 2) Dlaczego do realizacji celów pracy wybrano język Python, a nie Matlab?
- 3) Na jakiej podstawie dobrano parametry poszczególnych klasyfikatorów na str. 56?
- 4) Rys. 4.5 (str. 61) nie jest do końca jasny. Prosiłbym o jego precyzyjniejsze wyjaśnienie.
- 5) W jaki sposób został przygotowany zestaw danych dla metody BMMT? Czy dane były rejestrowane w różnych porach roku i podczas różnych warunków atmosferycznych? (str. 66)
- 6) Dlaczego w przypadku modelu predykcyjnego RF przyjęto liczbę badanych nastaw hiperparametrów równą 500, a dla modelu predykcyjnego MP równą 1000? (str. 83)
- 7) W opisie do wzoru (5.1) pojawia się oznaczenie yc_i , które nie występuje w tym wzorze. Prosiłbym o ich wyjaśnienie. (str. 96)
- 8) W opisie do wzoru (5.8) pojawia się wektor C_{FFO} , który nie występuje w tym wzorze. Prosiłbym o wyjaśnienie. (str. 100)
- 9) W 2-iej zależności we wzorze (5.11) „A” jest wielkością bezwymiarową, a „M” jest w [s]. W związku z tym A_{step} jest w [1/s=Hz]. Czy ta zależność jest poprawna? (str. 101)

5. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę zakres prowadzonych badań i poziom naukowy recenzowanej rozprawy doktorskiej, a także jej bezpośredni związek z praktyką inżynierską oraz brak poważnych uwag merytorycznych stwierdzam, że **spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022r. poz. 574 z późn. zm.)**. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr inż. Romana Pawelczyka do publicznej obrony Jego rozprawy.

Dr hab. inż. Andrzej Waindok