

dr hab. inż. Rafał Stanisławski, prof. uczelni
Katedra Informatyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska
e-mail: r.stanislawski@po.edu.pl

Opole, 29.12.2023

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Przewidywanie awarii urządzeń przemysłowych w oparciu o analizę wibrodiagnostyczną z wykorzystaniem sztucznej inteligencji

Autor rozprawy: mgr inż. Paweł Fic

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Adam Czornik

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚ, z października 2023 roku.

1. Zawartość pracy i ocena formalna

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska zawiera łącznie 116 stron podzielonych na cztery rozdziały, literatury liczącej 147 pozycji, streszczenia przedstawionego w języku polskim oraz spisu rysunków i tabel. Dysertacja została napisana w języku polskim. Zawartość rozprawy zaprezentowano poniżej.

W Rozdziale pierwszym przedstawiono krótkie wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy. Scharakteryzowano w nim kontekst pracy, zaprezentowano szczegółowo zakres przeprowadzonych badań i tezę dysertacji. Również w rozdziale pierwszym szczegółowo odniesiono pracę do obecnego stanu wiedzy i na tej podstawie zaprezentowano główne osiągnięcia dysertacji.

W Rozdziale drugim omówiono architekturę autorskiego oprogramowania przeznaczonego do predykcji awarii i analizy danych z zastosowaniem sygnałów wibroakustycznych. Opracowany system zarówno daje możliwość implementacji chmurowej, jak również lokalnej. W pracy omówiono główne komponenty funkcjonalne opracowanego systemu obejmujące wizualizację wyników, narzędzia do opracowywania i udostępniania hipotez, oraz magazyn danych i moduł do obsługi tego magazynu. W rozdziale omówiono również problematykę kompatybilności danych i algorytmów oraz ogólnie opisano strukturę systemu. W rozdziale przedstawiono autorskie komponenty funkcjonalne. Jednak omówienie autorskich bibliotek ograniczyło się do prezentacji ich funkcjonalności na tle zbudowanego systemu. Rozdział ten ma charakter wprowadzający i prezentuje opracowane rozwiązanie informatyczne.

Szczegóły związane z przeprowadzonymi badaniami w środowisku przemysłowym oraz ich rezultatami omówione zostały w Rozdziale trzecim. Wdrożenie opracowanych narzędzi zrealizowano

we współpracy z firmą PONAR Wadowice S.A. i dotyczyło ono klasyfikacji i predykcji pomp wielotłoczkowych. Kluczowymi punktami rozdziału trzeciego i zarazem całej dysertacji są punkty 3.2.2 i 3.2.3. Rozdział 3.2.2 implementuje narzędzia klasyfikacji do wykrywania rodzaju uszkodzenia. Poddano analizie klasyfikatory w postaci drzew decyzyjnych, regresji logistycznej i konwolucyjnych sieci neuronowych. Dokonano szczegółowej analizy efektywności algorytmów dla różnych lokalizacji sensorów oraz różnych zmiennych procesowych, obejmujących czujniki wibracji, temperatury i częstotliwościowego widma drgań. Ponadto badania zostały przeprowadzone w różnych warunkach pracy badanego urządzenia. Rozdział 3.2.3 podejmuje próbę opracowania narzędzi predykcji uszkodzeń pomp wielotłoczkowych z zastosowaniem narzędzi opracowanych w punkcie 3.2.2. Ze względu na braki w danych pomiarowych, badania wsparto na sygnałach sztucznie generowanych. W przedmiotowym zadaniu oparto się na algorytmie PCA (ang. *Principal Component Analysis*), metodzie regresji i konwolucyjnych sieci neuronowych. Wyniki analizy efektywności pokazują, że opracowanie narzędzia są efektywne zarówno w kontekście klasyfikacji jak i predykcji. Rozdział ten, stanowi główny wkład pracy, który opiera się na wynikach praktycznych obejmujących implementację algorytmów prowadzących od osiągnięcia celu pracy i dowiedzenia jej tezy.

W Rozdziale czwartym zostało zawarte podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań, wraz z odniesieniem do postawionej tezy dysertacji. W Rozdziale przedstawiono również kierunki potencjalnych przyszłych prac Doktoranta. Ponadto w podsumowaniu Autor zawarł uwagi dotyczące przejrzystości opracowanych wyników, oceny efektywności działań algorytmów i możliwości uogólnienia wyników pracy na inne urządzenia przemysłowe.

Układ pracy jest akceptowalny, choć w ocenie Recenzenta nie jest optymalny. Treści dysertacji zostały logicznie podzielone na poszczególne rozdziały i podrozdziały pracy. Jednak niektóre treści zostały zbyt mocno zagnieżdżone. W związku z tym wielkość podrozdziałów i sekcji jest bardzo nierówna. Przykładowo podrozdział 3.2 zajmuje ponad 56 stron, co stanowi połowę całej dysertacji, a ponadto stanowi zdecydowaną większość wkładu merytorycznego. Biorąc pod uwagę, że Doktorant wielokrotnie odnosi się do poszczególnych sekcji, które zawierają kilkadziesiąt stron, utrudnia czytanie przedmiotowej dysertacji i szukanie źródeł tych odniesień. Również pewne wątpliwości budzi nazewnictwo poszczególnych rozdziałów i sekcji. Np. nazwa rozdziału "*Predykcja awarii - algorytmy*" nie zawiera wyłącznie predykcji awarii, a w większości analizuje wyniki klasyfikacji. Co więcej problematyce algorytmów nałożono w tym rozdziale znacznie mniejszy nacisk niż na analizę ich efektywności. Ponadto pewne uwagi budzi podział poszczególnych treści w dysertacji (ta uwaga została przedstawiona w punkcie 4 recenzji).

Warta podkreślenia jest dobra strona edycyjna pracy. Rozdziały, podrozdziały, sekcje, nagłówki, stopki itp. utrzymane są tej samej konwencji, przez co praca bardzo dobrze wygląda. Rysunki są bardzo starannie przygotowane z dbałością o estetyczne i precyzyjne przedstawienie graficzne zastosowanych algorytmów i wyników badań. Język użyty w pracy jest czytelny i precyzyjny, przez co pracę czyta się dobrze. Pewną wątpliwość budzi w tym aspekcie niewyjaśnienie niektórych skrótów i symboli, co wymaga domyslenia się ich znaczenia. Rozprawa jest również dobrze przygotowana redakcyjnie. Występujące drobne błędy typograficzne i stylistyczne zostały wypunktowane w dalszej części recenzji.

2. Ocena merytoryczna pracy

Diagnostyka urządzeń przemysłowych w oparciu o sygnały wibroakustyczne to jeden z popularnych i dość dojrzałych obszarów nauki, który obejmuje kilka dyscyplin nauk inżynierijno-technicznych obejmujących *inżynierię mechaniczną i automatykę, elektronikę, elektrotechnikę i technologie kosmiczną*. Pierwsze prace polskich naukowców w tym zakresie zostały opublikowane w latach 60-tych zeszłego wieku i obszar ten jest ciągle eksploatowany. Nie podlega wątpliwości, że pojawienie się nowych, inteligentnych narzędzi modelowania i klasyfikacji otworzyło zupełnie nowe możliwości diagnostyki urządzeń w oparciu o sygnały wibroakustyczne. O popularności tego kierunku badań świadczą setki artykułów naukowych opublikowanych na ten temat w ostatnich latach, które były opublikowane również w czołowych periodykach dotyczących inżynierii mechanicznej i automatyki. Ponadto zastosowanie inteligentnych narzędzi w diagnostyce urządzeń przemysłowych wpisuje się we współczesną koncepcję *Industry 4.0*. Jednak należy pamiętać, że implementacja narzędzi inteligentnych, szczególnie w kontekście głębokich sieci neuronowych, generuje nowe wyzwania w związku z koniecznością zapewnienia odpowiednich mocy obliczeniowych niezbędnych do przetwarzania danych w czasie rzeczywistym. W tym przypadku szczególnie efektywne się wydają rozwiązania chmurowe, które przenoszą obliczenia do przestrzeni wirtualnej. Jednak takie rozwiązania wymagają złożonych systemów informatycznych zapewniających koordynację poszczególnych elementów systemu. W tą problematykę wpisuje się recenzowana dysertacja doktorska, dlatego obrany przez Doktoranta kierunek badań jest interesujący, perspektywiczny i daje możliwości uzyskania nowych, interesujących rezultatów.

W związku z powyższym Autor podejmuje pracę w ważnym i aktualnym obszarze badań, który ma swoje podstawy w światowej literaturze naukowej, jak również daje możliwości osiągnięcia nowych, istotnych wyników szczególnie w ujęciu praktycznym. Recenzent umiejscawia przedmiotową dysertację na styku trzech dyscyplin naukowych tj. *Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i Inżynieria Mechaniczna* w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych. Zastosowane narzędzia klasyfikacji i predykcji, zdaniem Recenzenta, pozwala z powodzeniem zaliczyć przedmiotową dysertację do dyscypliny *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*.

Doktorant postawił sobie ambitny i ważny cel opracowania narzędzia do klasyfikacji i predykcji awarii urządzeń przemysłowych na przykładzie pompy wielotłoczkowej, oraz jego implementacji w środowisku przemysłowym. Autor przedstawił następującą tezę rozprawy:

Widmo prędkości drgań pozyskane z odpowiednio umiejscowionego czujnika drgań jest wystarczające, aby poprawnie klasyfikować i w przejrzysty sposób prezentować stan pompy z rozróżnieniem kilku rodzajów uszkodzeń i wartości obciążenia.

Zwartość rozprawy, opisana w poprzednim punkcie recenzji, wynika bezpośrednio z postawionych celów pracy i prowadzi do dowiedzenia w/w tezy. Jako główne narzędzia klasyfikacji zastosowano narzędzia sztucznej inteligencji w postaci drzew decyzyjnych oraz konwolucyjnych sieci neuronowych. Zastosowane narzędzia, jak również metody oceny ich efektywności nie budzą większych wątpliwości Recenzenta. Pewne wątpliwości i uwagi dotyczące tych metod zostały zawarte dalszej części recenzji. Ostatecznie, do podstawowych osiągnięć dysertacji można zaliczyć:

- Analiza porównawcza efektywności klasyfikacji za zastosowaniem drzew decyzyjnych i regresji logistycznej dla różnych źródeł sygnałów procesowych.

- Dobór, wyznaczenie i implementacja w czasie rzeczywistym modelu w postaci konwolucyjnej sieci neuronowej do wykrywania i klasyfikacji uszkodzenia pompy wielotłoczkowej.
- Rzutowanie wielowymiarowych, abstrakcyjnych cech uzyskanych za pomocą konwolucyjnej sieci neuronowej na płaszczyznę 2D pozwalającej na zaproponowanie predykcji uszkodzenia urządzenia.
- Wyznaczenie na trajektorii przejścia między stanami sprawnymi i uszkodzonymi urządzenia oraz analiza pewności tej klasyfikacji.
- Opracowanie narzędzia do szacowania długości pracy urządzenia na podstawie w/w krzywej.

Finalnie w ramach pracy powstało nowe, oryginalne narzędzie klasyfikacji i predykcji uszkodzeń w pompie wielotłoczkowej. Zaproponowane narzędzie pozwolić może w przyszłości, po uogólnieniu opracowanych rozwiązań, na optymalizację harmonogramowania napraw i remontów, co należy zaliczyć do istotnych osiągnięć praktycznych pracy.

Recenzent nie ma istotnych uwag do procesu modelowania, doboru metod algorytmicznych i procesu analizy wyników. Główne uwagi należy jednak zauważyć w opisie dysertacji. Autor potraktował bardzo marginalnie wiele aspektów teoretycznych związanych z metodami stosowanymi w pracy, które niemal w całości opierają się na odniesieniach do literatury. W pracy nie zawarto żadnej zależności matematycznej, co jest dość zaskakujące w prach w tym obszarze. Również prezentacja wyników badań wywołuje pewne wątpliwości. W wielu przypadkach Doktorant nie zawarł szczegółów dotyczących badań tj. np. długości serii pomiarowych, itp. Ww. problemy utrudniały czytanie i ocenę dysertacji. Szczegółowe wątpliwości zostały zestawione w punkcie czwartym recenzji.

Pomimo pewnych uwag Recenzenta do niektórych wyników prezentowanych w dysertacji należy jednoznacznie stwierdzić, że wszystkie wyżej wymienione osiągnięcia są znaczące i stanowią istotny wkład Kandydata w rozwój dyscypliny *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne* oraz finalnie doprowadziły do osiągnięcia celów pracy. Ponadto otrzymane w dysertacji wyniki jednoznacznie udowadniają postawioną tezę rozprawy.

Generalnie praca ma charakter praktyczny. Główny wkład Kandydata stanowi Rozdział trzeci, a w szczególności podrozdział 3.2. Dysertacja ma charakter praktyczny.

3. Analiza źródeł, pozycja rozprawy, znaczenie wyników Autora, umiejętność przedstawiania wyników

Motywacja dla podjęcia tematu rozprawy wniknęła z dobrze przeprowadzonej przez Autora analizy literatury przedmiotu, liczącej 147 pozycji. Dzięki szerokiej analizie literaturowej został poprawnie odzwierciedlony aktualny stan wiedzy na temat wszystkich zagadnień podejmowanych w pracy.

Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy reprezentowanej w literaturze światowej jest dobra. Autor dysertacji jest współautorem dwóch artykułów w czasopiśmie indeksowanych na liście JCR, tj. *Future Internet* i *Applied Sciences* oraz kilku referatów na konferencjach *Process automation and Industry 4.0* i *Nowe Wyzwania dla Polskiej Nauki – XI edycja*. Ponadto jest autorem rozdziału w monografii wieloautorskiej. Dorobek publikacyjny Doktoranta spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim, a aktywność publikacyjną Kandydata uplasować należy w

okolicach przeciętnej. Brak dużej aktywności publikacyjnej Autora można tłumaczyć charakterem dysertacji, który jest praktyczny.

Autor posiadał umiejętność poprawnego, przekonywującego i precyzyjnego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Zarówno część merytoryczną rozprawy, jak również artykuły cechuje zwięzłość, jasność języka oraz precyzja.

4. Wady rozprawy, słabe strony, uwagi i pytania

Uwagi do dysertacji zostały wypunktowane i podzielone na dwie grupy, a) uwagi dyskusyjne i pytania oraz b) drobne uchybienia typograficzne i stylistyczne.

Uwagi dyskusyjne i pytania:

- 1) VRSM jest w istocie skrótem, pod którego nazwą kryje się metoda wyznaczania wartości tego współczynnika. Pierwsza, drobna uwaga jest taka, że warto by było wskazać rozwinięcie stosowanego skrótu. Druga, Poważniejsza uwaga dotyczy tego, że Doktorant nie przedstawił zależności wyznaczającej wartość współczynnika, jak również parametrów jego wyznaczania np. długości serii pomiarowej.
- 2) Analiza kosztów zaprezentowana w punkcie 2.4.1 jest w ocenie Recenzenta zbyt ogólna. Trudno w niej znaleźć jakiegokolwiek informacje ilościowe dotyczące sprzętu i oprogramowania. Ponadto Recenzent ma wątpliwości, czy podpunkt *Analiza dużej liczby urządzeń w chmurze* powinien być w istocie częścią punktu 2.4.1.
- 3) Podrozdział 2.5 przedstawia autorskie komponenty funkcjonalne. Wygląda na to, że opisany podrozdział stanowi podstawowy wkład teoretyczny Doktoranta w tym rozdziale. Jednak omówienie autorskich bibliotek ograniczało się do prezentacji ich funkcji w zbudowanym systemie. Biorąc pod uwagę dyscyplinę, w której broniąca jest dysertacja, jak również fakt, że to główny wkład teoretyczny Kandydata, rozdział ten powinien być przedstawiony szczegółowo, ze skupieniem się na zaimplementowanych algorytmach.
- 4) W pracy w wielu miejscach brakuje konkretów. Np. W rozdziale 3.1.2 Autor omawia wyniki oparte na analizie trendu z zastosowaniem regresji liniowej. Jedyną konkluzją, jaką przedstawia Doktorant jest stwierdzenie, że *"...trend wartości VRMS jest niezauważalnie wzrostowy. Co za tym idzie, obliczana wartość pozostałego czasu poprawnego użytkowania maszyny jest bardzo duża i przekracza kilka lat."*. Uwagi Recenzenta dotyczą braku poparcia przedstawianych tez w rezultatach badań, które nie zostały przedstawione w pracy. Brak wyników praktycznie uniemożliwia weryfikację poprawności przeprowadzonych badań. Ponadto same podsumowanie trendu jako *niezauważalnie wzrostowego* budzi wątpliwość logiczną i raczej nie opisuje precyzyjnie omawianego procesu.
- 5) Tabela 3.1. Brak opisu zboczy w wymuszeniu trapezowym, które mogą mieć istotny wpływ na wyniki badań.
- 6) W kilku miejscach rozdziału 3.2.2 znajduje się komentarz *"Dyskusja dotycząca wyboru wskaźników jakości znajduje się w rozdziale 3.2.2."*. Biorąc pod uwagę, że odwołanie jest dokładnie

w tym punkcie (który ma kilkadziesiąt stron), trudno nadażyć za wprowadzonymi przez Autora odniesieniami.

- 7) W Tabelach 3.2-3.4 Doktorant pokazuje wyniki klasyfikacji osiągane przez drzewa decyzyjne. Wyniki są interesujące szczególnie w kontekście różnic ich efektywności. Stąd nasuwają się pytania:
 - a) w jaki sposób zostały dobrane głębokości drzew decyzyjnych? Autor wskazuje, że głębokość drzewa zależy od liczby zmiennych procesowych, ale głębokości drzewa istotnie zmieniają się również w funkcji obciążenia.
 - b) Jakie wnioski wg. Doktoranta płyną z zestawienia wyników w Tabeli 3.3 i Tabeli 3.4? W którym przypadku mamy do czynienia ze znacznie prostszym i bardziej skutecznym klasyfikatorem?
- 8) Wyniki otrzymane z zastosowaniem regresji logistycznej w zasadzie są wyłącznie raportem z badań. Opis parametrów metody sprowadza się wyłącznie do wskazań do pozycji literaturowych. Ponadto Autor używa skrótów i nazw własnych bez ich właściwego wprowadzenia, np. ROC, L1, L2, VP2P, R&D...
- 9) Praca nie zawiera w żadnej zależności matematycznej, co biorąc pod uwagę obszar poruszanych badań jest dość zaskakujące. Rozważania teoretyczne niemal w całości opierają się na odniesieniach do literatury. Rozumiem, że w przypadku publikacji zwartych, wiele czasopism wymaga zastępowania redundantnych wywodów teoretycznych odnośnikami do źródeł. Jednak mam wątpliwości, czy w rozprawie doktorskiej w formie rękopisu to właściwe podejście. Ponadto unaocznia to, że Autor nie miał ambicji osiągać nowych wyników w zakresie teorii. Nowe, interesujące, wyniki dysertacji dotyczą aspektów praktycznych dotyczących implementacji stosowanych metod.
- 10) W pracy nie zamieszczono streszczenia w języku angielskim.

Drobne uchybienia typograficzne i stylistyczne:

- Strona II. Bibliografia zaczyna się na stronie 93 a nie 107.
- Strona 6, linia 25-26. Błąd stylistyczny.
- Strona 8, linia 12-13. Błąd stylistyczny.
- Strona 12, linia 18. Błąd stylistyczny.
- Strona 22, linia 6-7. Błąd stylistyczny.
- Strona 33, linie 17-18. Błąd interpunkcyjny.
- Strona 50. Błąd stylistyczny w opisie rysunku 3.10.
- Cała praca. Recenzent ma wątpliwość, czy nazwy języków programowania jak np. Python, czy Docker mogą być spolszczone i odmieniane.

- Cała Praca. Brak w konsekwencji w interpunkcji przy wypunktowywaniu (czasem kropki, czasem bez).

Należy podkreślić, że przedstawione powyżej uwagi, mają w większości charakter dyskusyjny i w związku z tym nie obniżają one pozytywnej oceny pracy.

5. Podsumowanie recenzji i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi, zdaniem Recenzenta, oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego oraz wykazuje dużą ogólną wiedzę teoretyczną i aplikacyjną Kandydata w dyscyplinie naukowej *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*, a także Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zatem stwierdzam, że **rozprawa mgr inż. Pawła Fica spełnia** kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.).

W związku z powyższym, uwzględniając oryginalność rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w rozprawie, specjalistyczną wiedzę Kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej **wnoszę o dopuszczenie mgr Pawła Fica do dalszych etapów przewodu doktorskiego** w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*.