

Zielona Góra, 15.12.2023r.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki
Uniwersytet Zielonogórski
Ul. Podgórna 50
65- 246 Zielona Góra
M.Witczak@issi.uz.zgora.pl

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 20.12.2023
nr zał.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgra inż. Pawła Fica
pod tytułem

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

opracowana na zlecenie

Politechniki Śląskiej

I. Problem naukowy i obszar rozprawy

Problemem naukowym stanowiącym przedmiot recenzowanej rozprawy doktorskiej jest opracowanie i analiza wdrożeń przemysłowych, narzędzi chmurowych oraz algorytmów sztucznej inteligencji w celu umożliwienia predykcji awarii urządzeń przemysłowych przy uwzględnieniu danych procesowych i wibrodiagnostycznych. Przemysł jest branżą podatną na innowacje, na co dowodem jest dążenie do obniżenia kosztów wytwarzanych produktów oraz zwiększenia niezawodności procesów technologicznych. Na przestrzeni ostatnich lat zostało opracowanych wiele koncepcji, takich jak Przemysł 4.0 oraz Internet rzeczy, które są intensywnie wspierane za pomocą szeroko rozumianej sztucznej inteligencji. Na szczególną uwagę zasługują metody przetwarzania i analizowania danych pochodzących z narzędzi Internetu rzeczy. Jego zastosowanie pozwala na efektywne wykorzystanie danych w celu opracowania hipotez analitycznych zapewniających oszczędności dla poszczególnej branży biznesu. Na znaczną uwagę zasługuje także aspekt fuzji sztucznej inteligencji, pomiarów

procesowych oraz danych wibracyjnych, które pozwalają na odnalezienie rozwiązań przynoszących przedsiębiorstwu wymierne korzyści. W pracy zostało przedstawione podejście, które cechuje możliwość stworzenia nowych obszarów badawczych, które są bogate w potencjał do tworzenia i wdrażania innowacji. W szczególności, zagadnienie predykcyjnego utrzymania ruchu jest bardzo ważnym i aktualnym problemem, który wymaga znalezienia optymalnych rozwiązań. Przegląd literatury przedstawiony w rozprawie przedstawia znaczącą liczbę takowych rozwiązań.

Przedstawiona do recenzji rozprawa skupia się na wdrożeniach przemysłowych, wykorzystujących dostępne na rynku narzędzia chmurowe oraz na autorskich algorytmach sztucznej inteligencji do predykcji awarii urządzeń przemysłowych uwzględniających dane procesowe i wibrodiagnostyczne. Celem przedstawionych badań było udowodnienie następującej tezy:

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

Natomiast, do najważniejszych zadań badawczych należy zaliczyć:

- Stworzenie klasyfikacji i predykcji uszkodzeń pompy wielotłoczkowej za pomocą analizy wibrodiagnostycznej przy użyciu sztucznej inteligencji.
- Wzbogacenia i poszerzenie zakresu klasyfikacji i predykcji awarii pomp wielotłoczkowych.
- Zbadanie ekstrakcji cech związanych z pomiarem wibracji i fuzji sensorycznej przy wykorzystywaniu analizy statystycznej, analizy widmowej oraz sztucznej inteligencji.
- Przedstawienie koncepcji zebranych w literaturze w ramach jednego algorytmu oraz rozwinięcie algorytmów sztucznej inteligencji.

Podsumowując, należy podkreślić, że rezultatem praktycznym pracy jest również aplikacja pozwalająca na weryfikację efektywności opracowanych technik.

II. Koncepcja i struktura rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera 4 rozdziały oraz bibliografię obejmującą 147 pozycji. Podstawę pracy stanowią rozdziały od 2ego do 4ego, które prezentują oryginalne wyniki naukowe Doktoranta w zakresie opisu wdrożeń przemysłowych przy użyciu dostępnych na rynku narzędzi chmurowych oraz autorskich zastosowań algorytmów sztucznej inteligencji do predykcji awarii urządzeń przemysłowych uwzględniających dane procesowe i wibrodiagnostyczne.

Kolejne rozdziały pracy zorganizowane są w następujący sposób:

- **Rozdział 1** stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy. Prezentuje on podstawowe cele i zakres pracy. Obejmuje także podstawowe definicje, zastosowania oraz motywacje podjęcia tematu przez Autora. Rozdział przedstawia również obszerny

przegląd stanu wiedzy w zakresie innowacyjności oraz optymalizacji kosztów w przemyśle. Doktorant w bardzo interesujący i staranny sposób przedstawia szerokie spektrum metod wdrożeń przemysłowych, dzięki którym można osiągnąć cele rozprawy.

- W **rozdziale 2** autor skupia się na architekturze oprogramowania. Celem rozdziału jest wytłumaczenie przejrzystości hipotez wypracowanych przez algorytmy z punktu widzenia klienta oraz wysoką jakość działania algorytmów przy minimalnym koszcie aparatury pomiarowej oraz z uwzględnieniem możliwości montażu tejże aparatury. Doktorant skupia się na realizacji rozwiązania on-premise, które ulega konkretyzacji poprzez wykorzystanie autorskich aplikacji, które również zostały opisane w tym rozdziale. Autor szczegółowo opisał architekturę implementacji i sposób posadowienia systemu detekcji i predykcji awarii.
- **Rozdział 3** skupia się na algorytmach predykcji awarii. W rozdziale przeprowadzono wdrożenia laboratoryjne we współpracy z firmą PONAR Wadowice S.A. dotyczące pomp wielotłoczkowych. Autor poprzez algorytmy detekcji anomalii udowodnił, że umożliwiają one analizę stanu maszyny w sposób wielowymiarowy. Poprzez jedno z wdrożeń przedstawił działanie systemu detekcji anomalii wraz z użyciem danych wibracyjnych i innych pomiarów procesowych. Doktorant przeprowadził wdrożenia mające na celu analizę trendu, stworzenie klasyfikacji oraz predykcję horyzontu czasowego po którym maszyna ulegnie awarii. W warunkach laboratoryjnych, korzystając z hali RD firmy PONAR Wadowice S.A. doktorant przeprowadził szereg badań mających na celu dostarczenie danych będących podstawą do wypracowania modeli klasyfikacji i predykcji uszkodzeń pomp wielotłoczkowych. We współpracy z ekspertami poddał pompę obciążeniom przy użyciu zaprojektowanego przez siebie układu pomiarowego. Autor przeanalizował zmienne procesowe, estymaty wibracji, obciążenie stałe, widmo drgań oraz modele wytrenowane na syntetycznych spektrogramach. Każdy z przeanalizowanych przypadków został poparty rysunkami i tabelami oraz wykresami, co świadczy o staranności i wnikliwości autora w przeprowadzenie badania.
- W **zakończeniu pracy, którego funkcję pełni rozdział 4**, autor podsumował całość doświadczeń. Doktorant stwierdził, że na podstawie przeprowadzonych badań, że efektywne wdrożenie dające biznesową wartość dodaną nowych, zaproponowanych algorytmów jest trudne do przeprowadzenia. Auto wymienił i wyargumentował trudności związane z badaniami maszyn przemysłowych. W rozdziale 4 zostało zawarte podsumowanie aspektów, na które autor głównie położył nacisk. W rozdziale zostały również postawione wnioski, które zostały wypracowane przez przeprowadzenie badań na konkretnych modelach. Autor podał również listę sposobów na dotrenowanie algorytmów.

- **Wykaz bibliograficzny** obejmuje 147 pozycji, które bardzo dobrze odzwierciedlają istniejący stan wiedzy.

III. Oryginalne osiągnięcia i znaczenie poznawcze

Przedmiotem pracy badawczej było opracowanie i analiza wdrożeń przemysłowych, narzędzi chmurowych oraz algorytmów sztucznej inteligencji w celu umożliwienia predykcji awarii urządzeń przemysłowych przy uwzględnieniu danych procesowych i wibrodiagnostycznych. Autor zauważył i przeanalizował szereg interesujących aspektów problemu, które były pomijane lub stanowiły marginalny element w innych opracowaniach. Stąd też konieczne okazało się rozwiązanie wielu cząstkowych zadań. Do najważniejszych osiągnięć rozprawy można zaliczyć:

- Stworzenie klasyfikacji i predykcji uszkodzeń pompy wielotłoczkowej za pomocą analizy wibrodiagnostycznej przy użyciu sztucznej inteligencji.
- Wzbogacenia i poszerzenie zakresu klasyfikacji i predykcji awarii pomp wielotłoczkowych;
- Zbadanie ekstrakcji cech związanych z pomiarem wibracji i fuzji sensorycznej przy wykorzystywaniu analizy statystycznej, analizy widmowej oraz sztucznej inteligencji
- Przedstawienie koncepcji zebranych w literaturze w ramach jednego algorytmu oraz rozwinięcie algorytmów sztucznej inteligencji.

Zaproponowane metody umożliwiają rozwiązanie problemów związanych z przewidywaniem awarii urządzeń przemysłowych w oparciu o analizę wibrodiagnostyczną z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. Świadczy to jednoznacznie o osiągnięciu przez autora celu postawionego we wstępnej części pracy, zdefiniowanego w postaci tezy.

Dorobek naukowy autora rozprawy obejmuje 1 artykuł czasopiśmie indeksowanym w JCR:

- Future Internet (40 pkt.);

trzy prace w materiałach narodowych konferencji naukowych:

- Konferencja POB5 na Politechnice Śląskiej, 2020
- Nowe Wyzwania dla Polskiej Nauki edycja XI, 2022

oraz jeden artykuł w pracy zbiorowej "Zagadnienia aktualnie poruszane przez młodych naukowców".

Uwzględniając wymienione osiągnięcia naukowo-badawcze oraz fakt ich opublikowania w wyżej wymienionych pozycjach, uważam że mgr inż. Paweł Fic zrealizował cel rozprawy, udowodnił postawioną tezę oraz wykazał się wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów teoretycznych i praktycznych szeroko rozumianej współczesnej automatyki i robotyki w zakresie przewidywania awarii urządzeń przemysłowych w oparciu o analizę wibrodiagnostyczną z wykorzystaniem sztucznej inteligencji.

IV. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy

Uwagi ogólne:

- 1) We wstępie rozprawy, autor skupia się wyłącznie na metodach wibroakustycznych. Nie są one jednak jedyną drogą do analizy pozostałej żywotności różnego rodzaju elementów wykonawczych, w tym pomp. W literaturze można znaleźć dziesiątki znaczących prac, prezentujących efektywne rozwiązania problemu w dziedzinie czasu.
- 2) W analizie rezultatów pracy, przydatne byłoby wprowadzenie odpowiednich definicji. Dobrym przykładem jest tutaj awaria, która może być rozumiana w różny sposób. W tym celu konieczne byłoby zdefiniowanie normalnego stanu pracy oraz fazy pośredniej między nim a awarią, tzn. uszkodzenia. Podobne odczucie budzi brak definicji anomalii. Uważam, że w tym kontekście pomocna będzie powszechnie stosowana terminologia IFAC TC6.4: <https://tc.ifac-control.org/6/4/terminology/terminology-in-the-area-of-fault-management>
- 3) Opis autorskich bibliotek przedstawiony w pkt. 2.5 jest bardzo pobieżny. Niewątpliwie bardziej atrakcyjne byłoby przedstawienie odpowiednich schematów funkcjonalnych oraz analiza ich funkcjonowania.
- 4) Na stronie 29, doktorant wskazuje, że wartość współczynnika kierunkowego prostej regresji wykazała, że trend wartości prędkości skutecznej drgań (VRMS) jest niezauważalnie wzrostowy. Tego typu rozważania na empirycznym modelu liniowym względem parametrów, nie wydają się właściwe. Niewątpliwie skuteczniejszym podejściem byłoby zastosowanie weryfikacji hipotez statystycznych. Autor mógłby również przedstawić przedziały ufności estymowanych parametrów, które w sposób ewidentny kształtowałyby wyobrażenie użytkownika o aktualnym przebiegu procesu degradacji.
- 5) Spostrzeżenie doktoranta przedstawione na stronie 32: "Modele wypracowane w rozdziale 3.2.2 związane były z jednego rodzaju obciążeniem. Oznacza to, że przykładowo nie należy stosować modelu wytrenowanego na danych pochodzących z obciążenia stałowartościowego o wartości 70% podczas pracy pompy z obciążeniem stałowartościowym o wartości 30%. W pracy w podrozdziale 3.2.2 dokonano natomiast syntezy modeli, które nie są dedykowane konkretnym wartości obciążenia stałego." jest nieprecyzyjne. Wynika z niego, że konieczne jest zaprojektowanie nieskończonej liczby modeli odzwierciedlającej obciążenie od 0 do 100%.
- 6) Konstruowania modeli rozpoznających dane uszkodzenia wymaga odpowiednich danych pomiarowych, które nie zawsze są dostępne. Doktorant powinien przeprowadzić odpowiednią analizę praktycznej możliwości opracowania takich modeli oraz związanych z nim ograniczeń i wymagań.
- 7) Pracę niewątpliwie uatrakcyjniłby bardziej szczegółowy opis trenowanych modeli oraz algorytmów związanych z ich uczeniem i oceną niepewności.

- 8) W pracy brakuje oceny niepewności rezultatów klasyfikacji. Podane wyniki nie dotyczą nieskończonej liczby eksperymentów pomiarowych. Oznacz to, że powinny być prezentowane w formie przedziałowej.
- 9) Zaproponowane przez doktoranta algorytmy estymacji pozostałej żywotności (ang. Remaining Useful Life, RUL) stosowane są zazwyczaj w celu optymalizacji procesów utrzymania ruchu. Umożliwia to zastąpienie standardowych przeglądów okresowych, przeglądami bazującymi na predykcji pozostałej żywotności. Czy doktorant rozważał takie zastosowania?

V. Podsumowanie recenzji

Reasumując, podniesione wyżej uwagi krytyczne i komentarze nie wpływają jednak na wysoką ocenę oryginalnych i opublikowanych osiągnięć naukowo-badawczych, zasadniczych wyników zawartych w recenzowanej pracy oraz jej ogólną pozytywną ocenę. Przedstawione wyniki stanowią niewątpliwie rozwiązanie istotnego problemu naukowego o praktycznym wymiarze, a także dobrze świadczą o erudycji Doktoranta. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Pawła Fica rozprawa pt. „Przewidywanie awarii urządzeń przemysłowych w oparciu o analizę wibrodiagnostyczną z wykorzystaniem sztucznej inteligencji” spełnia w pełni kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgra Pawła Fica do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak