

dr hab. inż. Wiesław Wszolek, prof. uczelni
Akademia Górniczo Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Kraków, 16.06.2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska zatytułowana *Vehicle Diagnostics using Artificial Intelligence and Digital Signal Processing Methods*. Autorem opiniowanej rozprawy jest mgr inż. **Muhammad AHSAN**, a jego promotorem był Pan **Prof. Pol. ŚI, dr hab. inż. Dariusz BISMOR**.

Podstawy formalne opracowania recenzji:

Recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Muhammada AHSAN opracowano podstawie zlecenia Politechniki Śląskiej (umowa o dzieło nr 06.08/PRR/2024 na opracowanie recenzji) reprezentowaną przez Prof. dr hab. inż. Dariusza Kanię.

Uwagi o wyborze tematyki pracy

Jakość życia człowieka w dziedzinie prywatnej i zawodowej jest mocno uzależniona od wykorzystania pojazdów głównie jako środków transportu. To uzależnienie implikuje potrzebę opracowania skutecznych systemów diagnostyki usterek w pojazdach w celu zapewnienia niezawodności, redukcji emisji i utrzymania integralności mechanicznej pojazdów. Zadaniem każdej diagnostyki a szczególnie diagnostyki technicznej środków transportu jest opracowanie metod i sposobów rozwiązywania zagadnień oceny stanu technicznego pojazdów i maszyn, wykrywanie usterek i przewidywanie przyszłych awarii oraz kwalifikowanie jego lub jego zespołów do dalszych czynności regulacyjnych, naprawczych lub nawet kasacyjnych. Od kilku

ostatnich lat trwają prace związane z intensywnym rozwojem metod badań diagnostycznych maszyn i urządzeń, bazujących na dostępnych wynikach obserwacji działania tego obiektu i obserwacji oddziaływań występujących pomiędzy obiektem i jego otoczeniem. Szczególny rozwój zaobserwowano w zakresie diagnostyki wibroakustycznej. Techniki diagnostyczne oparte na sygnale wibroakustycznym zyskały na znaczeniu jako alternatywne podejście do wykrywania usterek, ponieważ sygnały wibracyjne jako nośniki informacji zawierają wiele informacji o dynamicznym zachowaniu układów mechanicznych. Ponadto, obserwowany intensywny rozwój technik przetwarzania i analizy sygnałów, znacznie zwiększył skuteczność diagnostyki opartej na sygnałach drganiowych.

Uważam, że przedstawiona tematyka pracy jest zasadna. Zasadne są więc wysiłki służące do usprawnienia tego procesu wykorzystujące także nowe technologie przetworników pomiarowych i techniki sztucznych sieci neuronowych.

Uwagi wstępne

Przedstawiona do oceny praca jest dość obszerna liczy 155 stron, jest napisana w języku angielskim, ma klasyczny układ, a jej treść jest logicznie podzielona na 6 rozdziałów, wliczając w to Wprowadzenie i Podsumowanie oraz cztery załączniki. Pracę też ładnie uzupełniają; Wykaz wykorzystywanych źródeł („Bibliografia”) obejmujący 126 pozycji literatury, dobrze dobranych i nowoczesnych, streszczenia w języku polskim i w języku angielskim, wykaz rysunków (85) i tabel (20) a także oddzielnie przedstawiony wykaz publikacji doktoranta z listy ministerialnej (4) i zawartych w materiałach konferencyjnych (4). Większość rysunków zawartych w pracy, przedstawiają oryginalne wyniki badań zrealizowanych przez Doktoranta.

Strukturę pracy oceniam jako bardzo dobrą.

Zagadnienie badawcze

Opiniowanie rozpraw doktorskich zwykle rozpoczyna się od oceny tezy naukowej (lub jej odpowiednika), którą Doktorant chce udowodnić swoją rozprawą, wprowadzając w ten sposób nowy wynik do zasobów nauki światowej. Zwykle oczekuje się, że owa teza naukowa pojawi się na początku rozprawy. Takie podejście umożliwia recenzentowi ustalenia, do czego Autor zmierza i które

fragmenty rozprawy zmierzają do wskazania prawdziwości tej tezy. Niestety ów cel w opiniowanej rozprawie przywołany jest dopiero na stronie 21. Gdy recenzent dociera do rozdziału „Cele badawcze”, to stwierdza, że zostały przedstawione 3 cele. Drugi cel koncentrował się na zastosowaniu technik DSP do analizy sygnałów wibracyjnych w celu diagnozowania usterek. I wreszcie trzeci przedstawiony przez Autora dysertacji jako cel ostateczny, czyli wykorzystanie metod uczenia maszynowego do poprawy dokładności i niezawodności diagnostyki przerw zapłonu silnika. Uznaję i doceniam, że Pan mgr inż. Muhammad AHSAN jasno przedstawił cel i zakres swoich badań. Na podstawie formalnie przedstawionego celu rozprawy i sposób jego realizacji nie ulega wątpliwości, że zagadnienie badawcze, podjęte w opiniowanej rozprawie doktorskiej, pod względem znaczenia naukowego zaproponowanych badań i praktycznej przydatności ich wyników, odpowiada ustawowym i zwyczajowym oczekiwaniom stawianym procom doktorskim, które je w pełni akceptuję.

Analiza źródeł literaturowych

Autor ocenianej rozprawy doktorskiej wykazał się dużą erudycją i umiejętnością łączenia wielu dziedzin nauki, niewątpliwie ma obszerną i nowoczesną wiedzę w obszarze problemowym, które są podstawą badań naukowych, które podjął w swoim doktoracie. Dowodem jego szerokiej erudycji jest zawartość rozdziału 1, gdzie najpierw przedyskutowane są pozycje literatury dotyczące obiektu badań i stosowanych metod jego diagnozowania, bazujących na nowych technologiach sprzętowych i obliczeniowych. Potwierdzenie tej szerokiej wiedzy zostało przedstawione także w dalszych podrozdziałach i rozdziałach dysertacji. W pierwszej kolejności przedyskutowane są te pozycje literaturowe dotyczące profesjonalnych metod pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, ze szczególnym omówieniem przetworników wykonanych w technologii MEMS i ich wykorzystaniu w rejestracji sygnałów drganiowych. W drugiej kolejności przedstawiono informacje zaczerpnięte z literatury dotyczące metod przetwarzania sygnałów w dziedzinach; czasowej, częstotliwościowej i czasowo-częstotliwościowej, przydatnych w poszukiwaniu cech dystynktywnych niezbędnych w diagnozowaniu stanów pracy silnika podczas przerwy w zapłonie i usterek łożysk. W dalszej kolejności

przedstawiono analizę przydatności technik sztucznej inteligencji w analizie sygnałów i diagnostyce silnika.

Po przestudiowaniu tego materiału zawartego w początkowych rozdziałach rozprawy, mogę stwierdzić, że Doktorant ma wiedzę dotyczącą prac innych autorów zajmujących się problematyką podobną do tej, jaką realizuje własnymi badaniami. Potrafi także z tej literatury wyciągać właściwe wnioski, czerpiąc z niej inspiracje do własnych koncepcji naukowych i dalszych badań.

Analiza oryginalnej części rozprawy

Prezentując badania własne i ich wyniki mgr inż. Muhammad AHSAN, najpierw przedstawił pierwszy krok realizacji badań (w rozdziale 2) jakim jest dokładna analiza pracy systemu pomiarowego wykorzystywanego w dalszych badaniach. W rozdziale tym została opisana struktura układu pomiarowego z wykorzystaniem akcelerometru ADXL1002 współpracującego z kontrolerem BeagleBone Black. Doktorant przedstawił propozycję kalibracji systemu pomiarowego a także analizę przyczyn powstawania błędów. Opis konfiguracji układu i jego kalibracji jest solidny. Mam jednak do tego rozdziału pewne uwagi, które przedstawię w końcowej części recenzji.

Następny rozdział (rozd. 3) dotyczy pozyskiwania danych drganiowych uzyskanych na stanowisku badawczym w Laboratorium Drgań Pojazdów na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej. Do akwizycji danych wibracyjnych wykorzystano system pomiarowy omówiony w rozdziale 2 niniejszej pracy. Doktorant w tym rozdziale szczegółowo przedstawił przebieg eksperymentu (stany pracy obiektu – silnika samochodu) a także podkreślił jakie znaczenie ma dokładne gromadzenie danych pomiarowych. Rozdział ten zawiera szczegółową analizę zbiorów danych drgań uzyskanych z pomiarów na opracowanym przez Doktoranta stanowisku badawczym (drgania wywołane niesprawnością zapłonu silnika) a także zbioru danych NASA (Drgania wywołane wybranymi niesprawnościami łożysk) podkreślając ich kluczową rolę w analizie i diagnostyce układów mechanicznych. Przedstawiając opis eksperymentu pozyskiwania danych, Doktorant wykazał w nim swoją zdolność do dobrego przygotowania warsztatu naukowego przed rozpoczęciem dalszych badań.

Opis metodyki badawczej, tworzenia eksperymentu pozyskiwania danych diagnostycznych jest rzetelny. Generalnie moja ocena tego rozdziału jest zdecydowanie pozytywna.

Kluczowym dla ocenianej rozprawy doktorskiej jest też rozdział 4, w którym Doktorant przedstawił swoje wyniki badań, które mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia niezawodności działania silnika i bezpieczeństwa jego użytkowania. Sygnały wibracyjne, pochodzące z mechanizmów spalania wewnętrznego i elementów obrotowych, takich jak łożyska, stanowią bogate źródło informacji diagnostycznych. Parametry zawarte w tych sygnałach umożliwiają dokładne wykrywanie usterek, takich jak przerwy w zapłonie i awarie łożysk. Autor zastosował różnorodne techniki Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów (DSP) w celu ekstrakcji istotnych informacji diagnostycznych z zebranych sygnałów wibracyjnych i przygotowania danych do dalszej analizy. Metody te miały na celu izolowanie i wzmacnianie sygatur błędów, minimalizację wpływu zakłóceń oraz przygotowanie danych dla modeli sztucznej inteligencji. Autor przedstawił kompleksową analizę zaawansowanych technik DSP do diagnozowania usterek przy użyciu zarówno zestawów danych łożysk, jak i zestawów danych przerw w zapłonie silnika pojazdu. Poprzez zastosowanie tych metod do różnorodnych i złożonych sygnałów wibracyjnych, Autor wykazał ich skuteczność w określaniu cech specyficznych dla usterki, czy to związanych z wadami łożysk, czy z przerwami w zapłonie silnika. Do nowatorskich metod przetwarzania i analizy sygnałów zastosowanych w diagnostyce obiektu opisanego w pracy mogę zaliczyć; optymalizację adaptacyjnego filtra pasmowo przepustowego (BPF) opartą na algorytmie Harmony Search (HSA), optymalizację adaptacyjnego filtra pasmowo przepustowego (BPF) opartą na algorytmie Harmony Search (HSA) oraz diagnostykę przerw w zapłonie silnika opartą na empirycznej dekompozycji modów (EMD) i analizie pierwszych wewnętrznych funkcji modów (IMF). Te nowatorskie metody DSP, w połączeniu z odpowiednim sprzętem do akwizycji danych (jak akcelerometr ADXL1002 i kontrolerem BeagleBone Black), stanowią podstawę do stworzenia zaawansowanych systemów diagnostyki pojazdów, zdolnych do radzenia sobie ze złożonością i niestacjonarnym charakterem sygnałów wibracyjnych w rzeczywistych warunkach. W rozdziale tym przedstawiono kilka nowatorskich metod cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP) w celu diagnozowania usterek pojazdów. Koncentrują się one na precyzyjnym wykrywaniu usterek łożysk

oraz przerw w zapłonie silnika poprzez analizę sygnałów wibracyjnych. Zgromadzono i usystematyzowano materiał empiryczny, będący ważnym wkładem naukowym Doktoranta, co bardzo doceniam.

Kolejnym ważnym elementem ocenianej rozprawy jest rozdział 5. Zagadnienia które Pan mgr inż. Muhammad AHSAN „wziął na warsztat” w tym rozdziale to zagadnienia, które wcześniej uczynił przedmiotem swoich eksperymentów, omawiając wyniki swoich badań na obszernym i dobrze dobranym tle literaturowym. Przedmiotem dyskusji czyni pytanie, czy połączenie technik sztucznej inteligencji ze strukturą diagnostyczną znacznie zwiększa zdolność wykrywania usterek, oferując bardziej dokładne, niezawodne i skalowalne rozwiązania w diagnostyce pojazdów, które wykraczają poza możliwości tradycyjnych metod przetwarzania sygnałów

Autor przedstawił i przeanalizował metody sztucznej inteligencji (AI) bazujące na sztucznych sieciach neuronowych, stosowane w diagnostyce pojazdów, ze szczególnym uwzględnieniem wykrywania przerw w zapłonie silnika na podstawie informacji zawartych w sygnałach wibracyjnych. Analiza dotyczyła wpływu topografii modelu neuronowego jak i procesu jego uczenia na poprawność wyodrębniania cech dystynktywnych i klasyfikacji usterek. Metody te koncentrują się na ciągle rozwijających się technikach sztucznej inteligencji (AI) w diagnostyce pojazdów, ze szczególnym uwzględnieniem wykrywania przerw w zapłonie silnika też na podstawie informacji zawartych w sygnałach wibracyjnych. Mają na celu minimalizację ograniczeń tradycyjnych technik diagnostycznych, oferując automatyczną ekstrakcję cech, precyzyjne rozpoznawanie wzorców i adaptacyjne uczenie się. Do najważniejszych osiągnięć przedstawionych przez Doktoranta w tym rozdziale to: wprowadzenie zaawansowanych architektur sieci głębokiego uczenia, szczególnie Modele Multi-Kernel-DCNN-LST (rozd. 5.6), przydatność reprezentacji danych 1D i 2D pod względem dokładności diagnostycznej, szczególnie widoczna w modelu Multi-Kernel-DCNN-LSTM, dokonanie analizy porównawczej na podstawie wyników symulacji dla każdego modelu (DCNN, DCNN-LSTM, Multi-Kernel-DCNN-LSTM) z wykorzystaniem zarówno danych 1D, jak i 2D, oceniając ich dokładność. Materiał zawarty w tym rozdziale jest ważnym wkładem naukowym Doktoranta, który bardzo doceniam.

Oczywiście najważniejszym elementem ocenianej rozprawy są Wnioski zawarte w rozdziale 6. Generalnie przyjęto w ocenach rozpraw doktorskich, że wnioski przedstawiane w rozdziale podsumowującym osiągnięcia w realizowanej pracy, są

potwierdzeniem hipotez w niej zawartych. Niestety w opiniowanej rozprawie hipotezy pracy nie zostały w jawny sposób przedstawione. W efekcie czytelnik musi ponownie studiować rozdziały (np. 1, 2, 3) by te hipotezy odczytać.

Najważniejsze osiągnięcia i wnioski przedstawione w opiniowanej dysertacji to:

1. Potwierdzenie wykonalności i skuteczności akcelerometru MEMS ADXL1002 w diagnostyce wibracyjnej pojazdów.
2. Opracowanie kompleksowego procesu pozyskiwania i wstępnego przetwarzania danych wibracyjnych:
3. Znaczący rozwój metod sztucznej inteligencji w diagnostyce usterek, minimalizujące ograniczenia tradycyjnych metod DSP.
4. Opracowano i zaimplementowano zaawansowane algorytmy DSP (m.in. optymalizacja filtrów adaptacyjnych z wykorzystaniem algorytmów Harmony Search Algorithm (HAS) i Particle Swarm Optimization (PSO) oraz FFT oparte na IMF) do diagnozowania usterek łożysk i silników pojazdów.
5. Praktyczne implikacje i przyszłe kierunki badań.

Badania otwierają drogę do opracowania skalowalnych i opłacalnych systemów diagnostycznych dla przemysłu motoryzacyjnego (i innych, takich jak lotnictwo, produkcja), przyczyniając się do zwiększenia wydajności operacyjnej, skrócenia przestojów i zwiększenia niezawodności systemów mechanicznych.

Badania wykazały ponadto możliwość wykorzystania tanich czujników, takich jak np. akcelerometr ADXL1002, w połączeniu z zaawansowanymi modelami sztucznej inteligencji. Takie połączenie stanowi obiecujące podejście do opracowywania skalowalnych opłacalnych systemów diagnostycznych dla przemysłu motoryzacyjnego.

Podsumowując stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty.

Uwagi redakcyjne

Rozprawa jest napisana poprawnie, ale w kilku miejscach zauważyłem drobne usterki redakcyjne, które mam obowiązek wskazać. Jednym z mankamentów jest

brak przedstawienia spisu oznaczeń stosowanych w pracy (a jest ich bardzo dużo), co utrudnia czytanie i analizę tekstu.

- Uwaga generalna dotycząca rysunków: 1.6, 1.7, 1.8, 2.11, 4.2, 4.3 do 4.25, 5.2, 5.3. Na tych rysunkach jest brak opisu jednostek na osi pionowej.
- rysunki 4.2, do 4.13, co oznaczają podane numery sygnału błędu (np. „fault signal 6075”, „vibration signal 1598”)
- strony 70 i 71 brak numeracji wzorów a w pozostałych rozdziałach występują
- wykresy o numerach 4.19 do 4.24 przedstawiają wyniki analizy FFT, autor nie podaje parametrów tej analizy

Pytania

1. W rozdziale 2.3 przedstawił Pan procedurę kalibracji akcelerometru ADXL 1002. Na rysunku 2.7 przedstawiono propozycję zestawu pomiarowego do kalibracji. Brak jest w tym systemie wzorcowego przetwornika pomiarowego z którego można dokonać odczytu sygnału wyjściowego z wzbudnika zarówno częstotliwościowego (np. w Hz) jak i amplitudowego (np. m/s^2). Zatem to co Pan zarejestrował na wyjściu ADXL 1002 nie można porównać z wzorcem. Nic Pan nie wspomniał z jakiego urządzenia pobiera sygnał wzmacniacz pomiarowy?
2. Proszę omówić przydatność zastosowania filtracji Kalmana w diagnostyce silników.

Ocena rozprawy

Przechodząc do finalnej oceny rozprawy stwierdzam, że (Biorąc powyższe pod uwagę) opiniowana rozprawa doktorska mgra. inż. Muhammada AHSANA „*Vehicle Diagnostics Using Artificial Intelligence and Digital Signal Processing Methods.*” spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z art.187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, Dziennik Ustaw z 2022.06.07. Wyliczając kolejno warunki ustawowe mogę stwierdzić co następuje:

1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej. **Spełnione.**

2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne. **Spełnione.**
3. Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej. **Spełnione.**
4. Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku polskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie e języku polskim. W przypadku gdy rozprawa doktorska nie jest pracą pisemną, dołącza się opis w językach polskim i angielskim. **Spełnione**

Biorąc po uwagę powyższe konstatacje wnioskuję do wysokiej Rady Dyscypliny Naukowej, Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej o **przyjęcie** rozprawy i dopuszczenie jej Autora, mgr inż. Muhammada AHSANA do jej publicznej obrony, a po jej pozytywnym zakończeniu będę głosował za nadaniem mu stopnia naukowego doktora.

