



Recenzja

Rozprawy doktorskiej

„DIAGNOSTYKA POJAZDÓW Z WYKORZYSTANIEM SZTUCZNEJ INTELIGENCJI I METODĘ
CYFROWEGO PRZETWARZANIA SYGNAŁÓW”

Autorstwa Muhammada AHSANA

Recenzję wykonano na podstawie umowy o dzieło nr UMC/1292/2025 z dnia 24.04.2025 zawartej pomiędzy mną a Politechniką Śląską w Gliwicach. Podstawą zawarcia umowy jest uchwała Rady Dyscypliny „Sterowanie, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Politechniki Śląskiej. Tematyka rozprawy doktorskiej mieści się w zakresie dyscypliny „Sterowanie, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne”. Rozprawa została wykonana w Katedrze Pomiarów i Systemów Sterowania, Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jej promotorem był prof. dr hab. inż. Śl. Dariusz Bismor.

Rozprawa doktorska mgr inż. Muhammada Ahsana jest napisana w języku angielskim. Liczy 155 stron. Podzielona jest na 6 rozdziałów, z których pierwszy to Wstęp przedstawiający temat rozprawy, a ostatni to Zakończenie. Rozprawa zawiera również 6 załączników, ponumerowanych od A do F, oraz spis literatury obejmujący 126 pozycji, w tym 8 współautorstwa Kandydata. Osiągnięcia naukowe, w tym 4 artykuły w czasopismach i 4 referaty konferencyjne, zostały przedstawione w osobnym zestawieniu. Rozprawa zawiera 87 rycin w części głównej i 20 w załącznikach, a także 19 tabel w części głównej i 1 w załącznikach. Spisy rycin i tabel poprzedzają część główną rozprawy. Rozprawa zawiera również podziękowania i streszczenia w języku polskim i angielskim. Nie ma wykazu użytych akronimów.

W pierwszej części rozdziału 1 Autor przedstawia tło i motywację podjęcia tematu. Wiążą się one z potrzebą udoskonalenia diagnostyki usterek układu napędowego pojazdów. Rozwijane są metody oparte na cyfrowym przetwarzaniu sygnałów i sztucznej inteligencji. Sygnałami stanowiącymi podstawę tych nowoczesnych metod diagnostycznych są sygnały drganiowe pracy silnika. Potrzebna jest odpowiednia aparatura do rejestracji i wstępnego przetwarzania sygnału drganiowego, a także zaawansowane algorytmy do analizy sygnału, uczenia maszynowego i identyfikacji. Temat rozprawy uważam za ważny zarówno naukowo, jak i użytkowo. Po wyborze zakresu rozprawy Autor przeprowadza przegląd literatury przedmiotu. Przegląd ten podzielony jest na trzy części. Pierwsza część dotyczy sprzętu: akcelerometry MEMS i platformy wbudowane. Do dalszych prac wybrano pojemnościowy akcelerometr ADXL1002 produkcji Analog Devices oraz platformę Beagle Bone Black. W drugiej części przedstawiono metody diagnostyki układu napędowego oparte na cyfrowym przetwarzaniu sygnału drganiowego. Krótko przedstawiono metody oparte na analizie przebiegu czasowego sygnału (wartość szczytowa, RMS, współczynnik szczytu, kurtoza), analizę widma częstotliwości (FFT, widmo obwiedni ES, kurtoza widmowa SK) oraz najbardziej zaawansowane metody czasowo-częstotliwościowe (krótkoczasowa transformata Fouriera STFT, transformata falkowa WT, rozkład modów empirycznych EMD, transformata Hilberta Huanga HHT, rozkład Wignera-Ville'a Distribution WVD). W części trzeciej krótko opisano metody sztucznej inteligencji: sztuczne sieci neuronowe (ANN), splotowe sieci neuronowe (CNN), głębokie CNN: DCNN i DCNN Long-Short-Term Memory (DCNN-LSTM). W kolejnej części rozdziału 1 Autor formułuje cele pracy. Są to: utworzenie odpowiedniej bazy danych zmierzonych sygnałów drgań,

zaprojektowanie odpowiednich filtrów cyfrowych w celu wyodrębnienia pożądaných informacji z zarejestrowanych sygnałów, identyfikacja i diagnostyka wypadania zapłonu oraz diagnostyka stanu łożysk przy użyciu wybranych metod DSP, a także diagnostyka wypadania zapłonu przy użyciu algorytmów AI. Na końcu rozdziału 1 przedstawiono strukturę rozprawy.

Rozdział 2 opisuje sprzęt użyty do badań. Składa się on z akcelerometru MEMS ADXL1002 i platformy deweloperskiej BeagleBoneBlack. W rozdziale opisano podstawowe właściwości obu modułów, a ich szczegółowe dane techniczne można znaleźć w załącznikach A i B. Zadaniem autora było zintegrowanie obu modułów, ich skalibrowanie i przetestowanie pod kątem zbierania danych o drganiach i ich wstępnego przetwarzania. W ten sposób uzyskano wysoce wydajne narzędzie pomiarowe. Rozdział nie ma charakteru naukowego, lecz inżynierskiego. Nie jest to zarzut. Praca naukowa z zakresu nauk technicznych musi zawierać część inżynierską, która jest niezbędnym wprowadzeniem do dalszych działań o charakterze ściśle badawczym. Zarówno akcelerometr ADXL1002, jak i platforma BeagleBoneBlack są narzędziami komercyjnymi dostępnymi na rynku, a ich integracja jest również działaniem inżynierskim. Działanie to wymaga wysokich kwalifikacji i zostało wykonane przez autora znakomicie.

Rozdział 3 przedstawia metody i rodzaje danych pomiarowych przy użyciu systemu opisanego w rozdziale 2. Dane zostały zebrane dla różnych trybów i różnych warunków pracy silnika. Były to prędkości obrotowe silnika 1500 obr./min (25 Hz), 2500 obr./min (41,667 Hz) i 3000 obr./min (50 Hz), bez obciążenia oraz przy połowie i pełnym obciążeniu, a dane zostały również zebrane z silnika sprawnego i w warunkach wypadania zapłonu. Następny podrozdział przedstawia inne zestawy danych o drganiach znane z literatury na temat diagnostyki łożysk. Są to: zestaw danych IMF Test-to-Awaria Vibration Dataset opracowany w Center for IMS na Uniwersytecie w Cincinnati i zestaw danych MFPT Bearing Fault Dataset znajdujący się w bazie danych Society for Machinery Failure Prevention Technology (MPTF). Diagnostyka łożysk jest jednym z głównych zagadnień omawianych w rozdziale 4, w którym do celów diagnostycznych wykorzystuje się metody cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP). Rozdział 4 jest pierwszym rozdziałem, w którym Kandydat przedstawia wyniki swoich badań na temat diagnostyki drgań silników pojazdów. Rozdział 4 przedstawia metody przetwarzania sygnałów cyfrowych. Metody te są stosowane do diagnostyki łożysk i diagnostyki wypadania zapłonów w silnikach. W diagnostyce łożysk podstawowym zadaniem jest ekstrakcja częstotliwości sygnałów drgań, które są spowodowane uszkodzeniem łożyska. Ekstrakcji dokonuje się przy użyciu zaawansowanych algorytmów, takich jak HSA – Harmony Search Algorithm i PSO – Particle Swarm Optimization. Do analizy za pomocą HSA autor wykorzystał parametry i charakterystyki, takie jak kurtoza widmowa (SK) i krótkoczasowa transformata Fouriera (STFT), natomiast metoda PSO wykorzystuje ciągłą transformatę falkową (CWT). Na uwagę zasługuje brak wykorzystania cepstrum sygnału drgań. Analiza cepstralna jest często stosowana w diagnostyce łożysk. Autor rozprawy wspomina o niej tylko raz mimochodem w podrozdziale 1.2.2 na stronie 13. Autor wdrożył, zaprogramował i przeprowadził badania optymalizacji filtrów pasmowo-przepustowych przy użyciu algorytmu HSA na potrzeby diagnostyki uszkodzeń łożysk. Optymalizacja dotyczyła wykrywania częstotliwości środkowej filtra, jego szerokości pasma i rzędu. Badania symulacyjne przeprowadzono na zbiorach danych IMS zawierających sygnały z błędami Fundamental Train Frequency i Output Race oraz na zbiorach danych MFPT łożysk z błędami Output Race (OR). W dalszej części rozdziału 4 autor opisuje algorytm PSO zaimplementowany przez niego do optymalizacji ARL (Asymmetric Real Laplace) - Wavelet BPF oraz symulacje przeprowadzone z jego wykorzystaniem OR oraz pierwszej i drugiej linii bazowej detekcji błędów sygnałów ze zbioru danych MFPT. Uzyskano znaczny wzrost stosunku sygnału do szumu, co pozwoliło na wykrycie częstotliwości błędów widma obwiedni. Wypadanie zapłonów silnika objawia się zmianami częstotliwości i amplitudy

drgań. Do ich wykrycia za pomocą DSP wykorzystuje się analizę czasową i częstotliwościową sygnału. Należą do nich FFT, Envelope Spectrum ES i Spectral Kurtosis SK. Bardziej złożone metody obejmują STFT lub falki i EMD (Empirical Mode Decomposition). Metoda oparta na IMF (Intrinsic Mode Function) wykorzystująca powyższe charakterystyki do diagnostyki zapłonów została zaimplementowana przez Autora i opisana w rozdziale 4.5. Sygnały do analizy uzyskano z pomiarów drgań akcelerometrem ADXL1002 z kartą BeagleBone Black. W rozdziale 4.6. Autor przeprowadził krytyczną analizę porównawczą zaimplementowanych metod pod kątem ich zdolności do wykrywania uszkodzeń. Badania potwierdziły przydatność metod HSA i PSO do optymalizacji parametrów filtrów pasmowo-przepustowych, co pozwoliło na obniżenie SNR i przyczyniło się do zwiększenia skuteczności wykrywania uszkodzeń łożysk. FFT nie było zbyt skutecznym narzędziem do identyfikacji zapłonów. Znaczną poprawę uzyskano stosując ES. Jednak najlepszym narzędziem okazała się EMD. Badania Autora wykazały przydatność metod DSP do diagnostyki silników pojazdów.

W rozdziale 5 Kandydat przedstawia metody diagnozowania silnika pojazdu przy użyciu sztucznej inteligencji. Przedstawione metody diagnostyczne dotyczą wyłącznie usterki wypadania zapłonu. Autor opisuje różne modele AI we wstępie. W praktyce wykorzystuje głębokie sieci neuronowe splotowe (DCNN), pamięć długoterminową DCNN-Long Short Term Memory (DCNN-LSTM) i wielojądrową sieć DCNN-LSTM. Kolejne algorytmy są udoskonaleniami oryginalnego modelu DCNN, umożliwiając coraz bardziej wydajną diagnostykę. Autor wykorzystuje nagrania uzyskane przy użyciu akcelerometru MEMS ADXL1002 i platformy BeagleBoneBlack jako zestawy danych. Nagrania te poddawane są wstępnemu przetwarzaniu, które polega na przetwarzaniu nagrań za pomocą EMD, co skutkuje uzyskaniem zestawu komponentów zwanych IMF (Intrinsic Mode Functions), ich segmentacji, co skutkuje zestawem danych 1D w dziedzinie czasu, a następnie konwersji zestawów 1D na zestawy 2D prezentowane w skali szarości i wizualizacji segmentów za pomocą t-rozłożonego Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE). Szczegóły (kody Pythona) dotyczące konwersji danych 1D na 2D przedstawiono w Załączniku D, a implementacja oprogramowania t-SNE (również w Pythonie) została przedstawiona w Załączniku E. Uważam tę procedurę za uzasadnioną, ponieważ konwersja danych 1D-2D i wizualizacja to tylko narzędzia wykorzystywane w celach diagnostycznych. Zestaw danych składa się z 4 różnych stanów silnika: silnika bez wypadania zapłonu i silnika z wypadaniem zapłonu dla 1500 RPM (25 Hz), 250 RPM (41, 67 Hz) i 3000 RPM (50 Hz). Każdy z tych stanów zawiera 882400 punktów danych. Diagnostykę przeprowadzono zarówno na zestawach danych 1D, jak i 2D. W przypadku danych niepoddanych treningowi przy użyciu modeli AI, wizualizacja segmentów t-SNE skutkuje mieszanym zestawem punktów, co nie pozwala na postawienie diagnozy.

W rozdziale 5.4 testowany jest model DCNN, w rozdziale 5.5 model DCNN-LSTM, a w rozdziale 5.6 wielojądrowy model DCNN-LSTM. W rozdziale 5.6 przeprowadzono analizę porównawczą wyników uzyskanych w wyniku działania poszczególnych algorytmów. Wykazano, że nawet najprostszy algorytm DCNN ma wysoką zdolność diagnostyczną. Średnia dokładność na zbiorze danych 1D wyniosła 92,01%, a na zbiorze 2D – 97,61%. Dla algorytmu DCNN-LSTM odpowiednie dokładności wyniosły 94,70% i 97,95, a dla najbardziej rozbudowanego wielojądrowego algorytmu DCNN-LSTM 96,97% i 99,32%. Jak widać, dokładność wzrasta wraz ze złożonością algorytmu. Ciekawym zagadnieniem jest koszt każdego algorytmu. Autor zajmuje się tym zagadnieniem, porównując pracę algorytmów dla zbiorów danych 1D i 2D. Zwiększenie dokładności (czy ogólniej – jakości) danych 2D jest oczywiście droższe, ponieważ wymagany jest krok konwersji z danych 1D do 2D. Nie wiem jednak, czy niewielki wzrost dokładności uzasadnia

stosowanie bardziej złożonych algorytmów. Podsumowując, Autor wykazał duży potencjał metod sztucznej inteligencji w diagnostyce usterek w napędach silników pojazdów.

Ostatni, 6. rozdział pracy zawiera podsumowanie uzyskanych wyników. Jest to w dużej mierze powtórzenie wniosków, które można znaleźć na końcu każdego rozdziału. Taka jest również struktura rozdziału 6. W częściach 6.1 i 6.6 rozdziału Autor przedstawia wyniki uzyskane podczas adaptacji akcelerometru ADXL1002 i karty BeagleBoneBlack do zadań związanych z głównym tematem pracy. Jak wspomniałem wcześniej, wykorzystanie akcelerometru i karty do konkretnych zadań będących przedmiotem rozprawy jest aspektem inżynierskim, a nie naukowym. Moim zdaniem Autor poświęca temu nieproporcjonalnie dużo uwagi. Rozumiem jednak Autora, który, jak się wydaje, poświęcił temu zagadnieniu wiele wysiłku. Wnioski dotyczące wykorzystania DSP i AI do diagnostyki silników pojazdów są powtórzeniem wniosków, które można znaleźć w głównych rozdziałach rozprawy, tj. w rozdziałach 4 i 5. Wnioski podsumowujące całą rozprawę można znaleźć w rozdziałach 6.5-6.8. Rozdział 6.5 przedstawia analizę porównawczą opracowanych metod. Metody diagnostyczne oparte na DSP są doskonałym narzędziem do wykrywania prostych usterek, ale w sytuacjach bardziej złożonych wykazują istotne ograniczenia. Z kolei lepsze wyniki uzyskuje się stosując metody AI, zwłaszcza algorytm multi-Kernel-DCNN-LSTM. Autor wskazuje, że metoda ta ma duże możliwości, zwłaszcza w połączeniu z metodą wstępnego przetwarzania sygnału, taką jak EMD. W podrozdziale 6.7 autor stwierdza, że zwraca uwagę na możliwości związane z wykorzystaniem technik wieloczułnikowych z udziałem tradycyjnych akcelerometrów piezoelektrycznych. Po części głównej pracy znajdują się dodatki A-F, które zawierają materiały uzupełniające wykorzystane w trakcie pracy, których uwzględnienie w części głównej zaburzyłoby logiczny tok wyводу. W szczególności dodatek F zawiera kompletny zestaw wyników uzyskanych podczas 10 przebiegów poszczególnych modeli AI, tj. DCNN, DCNN-LSTM i Multi-Kernel DCNN-LSTM. W części głównej rozprawy przedstawiono tylko najbardziej reprezentatywne wyniki, na podstawie których wyciągnięto wnioski. Uważam, że takie postępowanie jest uzasadnione.

Rozprawa doktorska mgr inż. Muhammada Ahsana dotyczy zagadnienia naukowego o dużym znaczeniu praktycznym. Wykorzystuje najnowsze metody i algorytmy przetwarzania sygnałów oraz sztucznej inteligencji do diagnostyki silników pojazdów. Wykrywanie usterek i uszkodzeń na wczesnym etapie ich występowania zapobiega poważnym uszkodzeniom, prowadzącym do zniszczenia, a także niebezpiecznym dla życia i zdrowia ludzi. Wyniki osiągnięte w rozprawie można wdrożyć przy niskim koszcie. Osiągnięte wyniki naukowe są częściowo publikowane, inne są przygotowywane do publikacji. Praca jest napisana poprawnym językiem, a tok argumentacji jest spójny i logiczny. Jest łatwa do czytania, co jest szczególnie ważne przy przedstawianiu zagadnień, które wcale nie są łatwe i proste. Nie znalazłem w niej żadnych istotnych błędów, pomyłek ani niejasności.

Na stronie 17, w 4. wierszu od dołu pojawia się zwrot noise-to-signal ratio. Zwykle jest on używany w odwrotnej kolejności: signal-to-noise ratio (SNR). Czy to było celowe?

Na stronie 85, w podpisie pod rysunkiem 5.2, zamiast 2500 ROM powinno być 2500 RPM.

Jedyną poważną wadą rozprawy, o charakterze redakcyjnym, jest brak wykazu skrótów. Autor użył ich bardzo dużo, co znalazło odzwierciedlenie również w mojej recenzji. Część z nich jest powszechnie znana i używana, ale wiele dotyczy konkretnych zagadnień. Zazwyczaj są one

wyjaśniane w tekście rozprawy, zazwyczaj jednokrotnie. Jeśli taki skrót pojawia się wielokrotnie w dalszej części rozprawy, poszukiwanie wyjaśnienia w tekście jest uciążliwe.

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr inż. Muhammada Ahsana pt. „Diagnostyka pojazdów z wykorzystaniem sztucznej inteligencji i metod cyfrowego przetwarzania sygnałów” potwierdza ogólną wiedzę doktoranta w dyscyplinie „Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne” oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Tematem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w praktyce. Tym samym rozprawa spełnia wymogi art. 187 ust. 1-2 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, w związku z czym wnoszę o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Rozprawę zaliczam do kategorii „Spełniająca wymogi z wyraźnym nadmiarem, zasługująca na wyróżnienie”. W związku z tym składam również wniosek o wyróżnienie rozprawy.

Wrocław, 3 czerwca 2025