

Abstract (Polish)

Rosnące uzależnienie od wykorzystywania pojazdów w celach osobistych i komercyjnych podkreśla kluczową potrzebę opracowania wydajnych systemów diagnostyki usterek w celu zapewnienia niezawodności, redukcji emisji i utrzymania integralności mechanicznej tych pojazdów. Wśród tych usterek, problemy z zapłonem silnika oraz uszkodzenia łożysk elementów obrotowych stanowią istotne wyzwania ze względu na ich wpływ na wydajność, efektywność zużycia paliwa i zgodność z przepisami środowiskowymi. Niniejsza praca podejmuje te wyzwania poprzez opracowanie zaawansowanych narzędzi diagnostycznych łączących niskokosztowe, wysokowydajne akcelerometry MEMS, najnowocześniejsze techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP) oraz modele sztucznej inteligencji (AI).

Jako podstawowe urządzenie pomiarowe w niniejszej pracy wykorzystano pojemnościowy akcelerometr MEMS ADXL1002 ze względu na jego wyjątkową czułość, szerokie pasmo przenoszenia i koszt. Zintegrowano go z kontrolerem BeagleBone Black, co umożliwiło akwizycję i przetwarzanie sygnałów wibracyjnych z silników pojazdów w czasie rzeczywistym, w różnych warunkach eksploatacyjnych, w tym przy różnych prędkościach obrotowych, poziomach obciążenia i scenariuszach usterek. Dodatkowo, do analizy włączono zestawy danych dotyczące wibracji łożysk elementów obrotowych z istniejącej literatury, aby uzupełnić badania i rozszerzyć ramy diagnostyczne. Proces kalibracji przeprowadzony z dużą dokładnością zapewnił precyzyjne i wiarygodne pomiary. System wygenerował wysokiej jakości zestaw danych sygnałów wibracyjnych, który był podstawą do dalszych analiz.

Aby wyodrębnić istotne informacje diagnostyczne z tych złożonych i zawierających zakłócenia sygnałów, zastosowano zaawansowane techniki DSP. Obejmowały one Empiryczną Dekompozycję Modów (EMD) do izolacji funkcji modalnych, kurtozę spektralną (SK) do analizy sygnałów przejściowych oraz krótkookresową transformatę Fouriera (STFT) do reprezentacji czasowo-częstotliwościowej. Metody te skutecznie uwypukliły wzorce specyficzne dla usterek, umożliwiając dokładną identyfikację charakterystyk związanych z zapłonem. Wyniki zostały dodatkowo zweryfikowane przy użyciu zestawów danych dotyczących łożysk tocznych, co potwierdziło solidność i ogólną użyteczność podejścia.

Integracja AI z narzędziami diagnostycznymi znacząco zwiększyła zdolność wykrywania usterek. Zastosowano splotowe sieci neuronowe

(CNN) oraz modele hybrydowe, łączące głębokie CNN z jednostkami LSTM (Long Short-Term Memory). Modele te analizowały jednowymiarowe (1D) dane czasowe i dwuwymiarowe (2D) reprezentacje sygnałów wibracyjnych w postaci obrazów. CNN wychwytywały cechy przestrzenne w domenie 2D, podczas gdy hybrydowe modele DCNN-LSTM skutecznie wykorzystywały zależności czasowe w domenie 1D. To podejście dualne zapewniło wysoką dokładność diagnostyczną i odporność w zróżnicowanych warunkach eksploatacyjnych, demonstrując potencjał systemów opartych na AI w rzeczywistych zastosowaniach.

Niniejsze badania wnoszą kilka istotnych wkładów: opracowanie niezawodnego modułu akwizycji wibracji w czasie rzeczywistym, stworzenie nowego zbioru danych wibracji silnika, zastosowanie zaawansowanych technik DSP do ekstrakcji cech usterek oraz implementację modeli AI dostosowanych do diagnostyki zapłonu. Proponowane metodologie wykraczają poza zastosowania motoryzacyjne, mając potencjalne zastosowania w diagnostyce usterek w maszynach przemysłowych, systemach lotniczych i technologiach energii odnawialnej. Dzięki integracji tanich technologii pomiarowych z zaawansowanymi metodami analizy, praca ta wpisuje się w zrównoważone i skalowalne praktyki utrzymania, ustanawiając punkt odniesienia dla przyszłych innowacji w monitorowaniu stanu i predykcyjnym utrzymaniu ruchu.

Słowa kluczowe: Diagnostyka zapłonu silnika, analiza wibracji, akcelerometr ADXL1002, BeagleBone Black, cyfrowe przetwarzanie sygnałów (DSP), sztuczna inteligencja (AI), splotowe sieci neuronowe (CNN), hybrydowe modele DCNN-LSTM, Empiryczna Dekompozycja Modów (EMD), kurtoza spektralna (SK), krótkookresowa transformata Fouriera (STFT), monitorowanie stanu, predykcyjne utrzymanie ruchu.