



**Silesian University  
of Technology**

**Joint Doctoral School**

**Faculty of Transport and Aviation Engineering**

Department of Transport Systems, Traffic Engineering and  
Logistics

**Method of Assessing the Condition of Wheels of  
Wheelsets of Railcar During Railroad Drive**

A dissertation submitted to the Joint Doctoral School of Silesian  
University of Technology in the fulfilment of the Doctor of Philosophy in  
Civil Engineering, Geodesy and Transport

**Author:**

Yohanis Dabesa Jelila (MSc and Doctoral Candidate)

Supervisor: Wiesław Pamuła (PhD, DSc)

Co-supervisor: Adam Mańka (PhD)

May 10, 2024

## Streszczenie

Efektywne utrzymanie w ruchu pojazdów kolejowych wymaga bieżącej diagnostyki stanu technicznego podzespołów pojazdów w szczególności układów jezdnych. Stan kół wózków determinuje sprawność i bezpieczeństwo ruchu pojazdów. Znana metodyka diagnostyki stanu kół opiera się na analizie sygnałów z czujników umieszczonych na piastach kół, na szynach lub w pobliżu torów. Analizowane są drgania kół lub szyn, dźwięki generowane przez koła lub mierzone są przemieszczenia względne elementów wózka kolejowego. Opracowane rozwiązania pomiarowe zawierają czujniki przespieszzeń, mikrofony lub tensometry wymagające starannej obsługi. Analiza sygnałów dokonywana jest w dziedzinie czasu, częstotliwości i czasowo-częstotliwościowej.

Podjęto zadanie weryfikacji metodyki z zastosowaniem pomiaru parametrów sygnału drganiowego. Wybrano jako pole badań ocenę stanu kół pojazdów tramwajowych. Utrzymanie w ruchu pojazdów tramwajowych jest ważnym zagadnieniem dla systemu transportowego Aglomeracji Śląskiej. Komunikacja tramwajowa jest znaczącym elementem systemu i wpisuje się w politykę redukcji śladu węglowego realizowaną przez władze Regionu.

Specyfika konstrukcji pojazdów tramwajowych - znacznie mniejsza waga i niewielkie prędkości poruszania się w porównaniu do taboru kolejowego redukują wymagane zakresy pomiarów parametrów sygnałów. Wykonano wstępne badania i uzyskano widma sygnałów drganiowych, istotne dla diagnostyki uszkodzeń kół, w zakresie częstotliwości 50 – 500 Hz. Maksymalne wartości przyspieszeń drgań nie przekraczały 200 [m/s<sup>2</sup>]. Taki zakres parametrów drgań możliwy jest do pomiaru z użyciem dostępnych czujników przyspieszeń wykonanych w postaci mikroukładów elektromechanicznych - MEMS.

Sformułowano pytanie badawcze: W jaki sposób można użyć czujników przyspieszeń w technologii MEMS do oceny stanu kół wózków pojazdów podczas przejazdu? Zaproponowano użycie analizy sygnałów z czujników w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej

dla uwzględnienia wpływu ruchu pojazdu podczas badań. Postawiono hipotezy badawcze: Analiza obrazu drgań, w przedziale częstotliwości 0-500 Hz, szyn po których porusza się pojazd umożliwia ocenę stanu kół. Energia drgań szyn w charakterystycznych zakresach częstotliwości wskazuje stan kół.

Przyjęto ograniczenia dla realizacji pomiarów wynikające z praktyki dyżurnych ruchu w zajezdni. Obserwowany jest przejazd pojazdu z niewielką prędkością, gdy poziom generowanego hałasu podczas jazdy wzbudza "niepokój" niedopuszcza się do opuszczenia zajezdni przez pojazd. Prędkość ruchu jest ograniczona do kilku km/godz. Czujnik pomiarowy zostaje umieszczony na torze manewrowym w zajezdni i nie wpływa na ruch pojazdu.

Kwerenda literatury pozwala zidentyfikować kilka podejść do zagadnienia oceny stanu kół. Można wyróżnić metody oceny z użyciem czujników pokładowych montowanych na elementach wózków lub na konstrukcji pojazdów. Rozwiązania pokładowe mogą dostarczyć bieżącej informacji i wskazać konieczność podjęcia serwisowania, wiąże się to jednak z dużymi kosztami montażu czujników jak i utrzymania ich w sprawności. Autorzy opracowań dowodzą dużej przydatności pokładowych czujników dla oceny stanu kół oraz dla realizacji zadań utrzymania w ruchu zgodnie z założeniami strategii CBM (utrzymanie w ruchu oparte na ocenie stanu technicznego).

Zastosowanie czujników poza pojazdem to domena metod opartych na pomiarach oddziaływania kół pojazdu na szyny lub na pomiarach generowanego hałasu w otoczeniu toru. Pomiar stopnia odkształcenia szyny lub rejestracja parametrów drgań wywołnych przez koła pozwala odwzorować przebieg oddziaływania i ujawnia anomalie gdy pojazd posiada uszkodzone koła. Autorzy prezentowanych w literaturze prób analizy sygnałów z czujników dla oceny stanu kół definiują istotne ograniczenia dla uzyskania poprawnych wyników oceny. Wymieniane są przede wszystkim prędkość przejazdu, stan torowiska, rodzaj i stan techniczny wózka kolejowego jako czynniki determinujące zdolność do poprawnego opisu stanu technicznego kół.

Opracowane metody oparte na ocenie hałasu przejazdu pojazdu czułe są na hałas w otoczeniu. Publikowane opracowania zalecają poddanie sygnałów akustycznych z czujników filtracji w dziedzinie częstotliwości dla eliminacji zakłóceń. Autorzy zwracają uwagę na konieczność uważnej oceny źródeł w otoczeniu dla identyfikacji zakresów częstotliwości maskowania dźwięków przejazdu.

Prezentowane w literaturze rozwiązania układów pomiarowych dostarczają strumienie danych, które podlegają analizie w dziedzinie czasu, częstotliwości lub w dziedzinie

czasowo-częstotliwościowej. Autorzy proponują zastosowanie znanych metod analizy opartych na transformacjach przede wszystkim Fouriera i falkowych. Przeprowadzone dyskusje właściwości wybranych metod nie dają jednoznacznego wskazania najlepszej metody analizy. Ważną przesłanką dla wyboru metody analizy, podkreślaną przez autorów prac, jest niestacjonarny charakter danych z czujników. Efektywna analiza wymaga powiązania cech czasowych i cech częstotliwościowych dla uzyskania opisu, który będzie użyteczny do określenia anomalii przebiegów oraz powiązania ich z stanem technicznym kół. Wyróżniono transformacje falkowe ze względu na zdolność do opisu przebiegów w różnych skalach czasowych jak i w różnych rozdzielczościach częstotliwości.

Dokonując przeglądu właściwości transformacji falkowych zwrócono uwagę na transformację MODWPT opartą na dekompozycji z użyciem pakietów falkowych. Pakietowa analiza oparta na binarnym drzewie dekompozycji dostarcza opisu w większej rozdzielczości zarówno w czasie jak i w dziedzinie częstotliwości stąd uzyskuje się zdolność do bardziej szczegółowego opisu danych pomiarowych. Dobór falki bazowej oraz poziomu dekompozycji jest przedmiotem optymalizacji dla uzyskania efektywnego narzędzia do oceny stanu kół. W literaturze brak prac podejmujących zadanie optymalizacji parametrów MODWPT dla oceny stanu technicznego kół.

Opracowano metodę oceny stanu kół z zastosowaniem danych z czujnika przyspieszeń rejestrującego drgania szyny podczas przejazdu pojazdu. Wybrano jako podstawę przetwarzania transformację MODWPT oraz energię drgań w charakterystycznych przedziałach częstotliwości jako miarę stanu technicznego. Jako kryterium optymalizacji zaproponowano względną różnicę między energią drgań "dobrych" i uszkodzonych kół w danym przedziale częstotliwości. Przeprowadzono optymalizację parametrów transformacji, ustalono rodzaj falki bazowej, wymagany poziom dekompozycji oraz charakterystyczne zakresy częstotliwości istotne dla oceny stanu kół. Zadanie optymalizacji wykonano z użyciem danych ze wstępnych pomiarów drgań podczas przejazdów tramwajów w zajezdni.

Przeprowadzono walidację metody podczas próbnych przejazdów tramwajów na torach manewrowych zajezdni. Użyto prototypu czujnika przyspieszeń opartego na akcelrometrze 3-osiowym wykonanym w technologii MEMS. Rejestrowano przyspieszenia drgań szyn po których przemieszczał się pojazd z częstotliwością 1 kHz. W pojeździe zamontowano uszkodzone w różnym stopniu koła. Obliczono energię zarejestrowanych sygnałów z użyciem współczynników transformacji MODWPT z falką bazową Coiflet3 na 8 poziomie dekompozycji w przedziale częstotliwości 420-422 Hz. W celu selekcji "dobrych" i uszkodzonych kół wyznaczono próg detekcji.

Wyniki walidacji potwierdzają możliwość zastosowania czujników w technologii MEMS do oceny stanu a przede wszystkim do sygnalizacji przejazdów z uszkodzonymi kołami. Zastosowanie transformacji MODWPT skutecznie pozwala opisać anomalie drganiowe i tym wskazać uszkodzone koła. Ustalone parametry transformacji MODWPT mogą wymagać korekty gdy przejazdy wykonywane będą na torach w złym stanie technicznym i gdy prędkości przejazdów przekroczą kilka km/godz. Opracowana metoda została z powodzeniem wykorzystana do wykrywania usterek kół podczas jazdy.

**Słowa kluczowe:** ocena stanu kół; MEMS czujnik drgań; MODWPT; energia drgań; przedział częstotliwości.