



**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 15, 2024

Declaration

I, Yohanis Dabesa Jelila, declare that the work presented in this dissertation entitled as "Method of Assessing the Condition of Wheels of Wheelsets of Railcar During Railroad Drive," is original and has been carried out by me under the supervision of dr hab. inż. Wiesław Pamuła Professor of Silesian University of Technology and co-supervisor dr inż. Adam Mańka. This work has not been submitted for any degree or examination in any other university or institution.

I carefully referenced all the sources used in my work and provided complete details of the references in the bibliography section of the dissertation. I understand that plagiarism is a serious academic offence and declare that the work presented in this dissertation is my own and does not contain any material previously published or written by another person without proper acknowledgement or any material that has been submitted for the award of any other degree or examination.

Yohanis Dabesa Jelila

Katowice, May 15, 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 przespiesznień, 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/s²]. 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 czule 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.

15th May, 2024

Extended Summary

Effective maintenance of railway vehicles requires ongoing diagnostics of the technical condition of vehicle components, in particular the wheel systems. The condition of the railcar wheels determines the efficiency and safety of vehicle traffic. A well-known methodology for diagnosing the condition of wheels is based on the analysis of signals from sensors located on wheel hubs, on rails or near tracks. The vibrations of the wheels or rails, the sounds generated by the wheels, or the relative displacements of the wheelset components are measured. The developed measurement solutions include speed sensors, microphones or strain gauges that require careful handling. The analysis of the signal is performed in the time, frequency and time-frequency domains.

The task of verifying the methodology using the measurement of vibration signal parameters were undertaken. The assessment of the condition of tram wheels was chosen as the field of research. Maintenance of tram vehicles is an important issue for the transport system of the Silesian Agglomeration. Tram transport is a significant element of the system and is part of the policy of reducing the carbon footprint implemented by the authorities of the Region.

The specifics of tram vehicles are: much lower weight and low speeds of movement in comparison to rolling stock this leads to the reduction of required ranges of signal parameter measurements. Preliminary tests were carried out and spectra of vibration signals, important for the diagnosis of wheel condition, in the frequency range of 50 – 500 Hz were obtained. The maximum values of vibration accelerations did not exceed 200 [m/s²]. Such a range of vibration parameters can be measured with the use of available acceleration sensors made in the form of electromechanical microcircuits - MEMS.

The research question is formulated: How can MEMS acceleration sensors be used to assess the condition of wheels of wheelsets of railcars during a railroad drive? The analysis of sensor signals in the time-frequency domain is proposed to take into account

the influence of vehicle movement during tests. The following research hypotheses are formulated: The analysis of the vibration image in the frequency range of 0 – 500 Hz of the rails on which the vehicle moves enables the assessment of the condition of the wheels. The vibration energy of the rails in characteristic frequency bands indicates the condition of the wheels.

Limitations for the implementation of measurements resulting from the practice of traffic dispatchers in the depot are adopted. In practice a vehicle is observed passing at a low speed and when the level of noise generated while driving causes "anxiety" for the dispatcher he prevents the vehicle from leaving the depot. Movement speed is limited to a few km/h. The measuring sensor is placed on the manoeuvring track in the depot and does not affect the movement of the vehicle.

A literature query allows us to identify several approaches to the issue of wheel condition assessment. A distinction can be made between evaluation methods using onboard sensors mounted on bogie components or vehicle structures. Onboard solutions can provide real-time information and indicate the need for maintenance, but this is associated with the high costs of installing sensors and maintaining them in working order. The authors of the studies prove the high usefulness of onboard sensors for the assessment of the condition of the wheels and for the implementation of maintenance tasks in accordance with the assumptions of the CBM strategy (maintenance based on the assessment of technical condition).

The use of sensors outside the vehicle is the domain of methods based on measurements of the impact of the vehicle's wheels on the rails or on measurements of the generated noise in the track environment. Measuring the degree of rail deformation or recording the parameters of vibrations caused by the wheels allows for mapping the course of the impact and reveals anomalies when the vehicle has damaged wheels. The authors of the attempts presented in the literature to analyze signals from sensors for the assessment of the condition of wheels define significant limitations for obtaining correct evaluation results. First of all, the speed of travel, the condition of the track, the type and technical condition of the bogie are mentioned as factors determining the ability to correctly describe the technical condition of the wheels.

The developed methods based on the assessment of vehicle passing noise are sensitive to ambient noise. Published studies recommend subjecting the acoustic signals from the sensors to filtration in the frequency domain to eliminate interference. The authors draw attention to the necessity of careful assessment of sources in the environment in order to

identify the frequency ranges of masking the passage sounds.

The solutions of measurement systems presented in the literature provide data streams that are subject to analysis in the time, frequency or time-frequency domain. The authors propose the use of well-known methods of analysis based primarily on Fourier and wavelet transformations. Discussions of the properties of the selected methods do not give a clear indication of the best method of analysis. An important premise for the choice of the analysis method, emphasized by the authors of the papers, is the non-stationary nature of the sensor data. Effective analysis requires the linking of time and frequency characteristics to obtain a description that will be useful for determining waveform anomalies and linking them to the technical condition of the wheels. Wavelet transformations are distinguished due to their ability to describe waveforms at different time scales and at different frequency resolutions.

When reviewing the properties of wavelet transformations, attention was paid to the MODWPT transform based on decomposition with the use of wavelet packets. Packet analysis based on a binary decomposition tree provides a description in higher resolution both in time and in the frequency domain, hence the ability to describe the measurement data in more detail is obtained. The selection of the base wave and the level of decomposition is the subject of optimisation in order to obtain an effective tool for assessing the condition of the wheels. There are no papers in the literature undertaking the task of optimising MODWPT parameters for the assessment of the technical condition of wheels.

A method was developed to assess the condition of the wheels using data from an acceleration sensor that records rail vibrations during the passage of the vehicle. The MODWPT transform and vibration energy in characteristic frequency intervals were chosen as the basis for the processing. As a criterion for optimisation, the relative difference between the vibration energy of "good" and damaged wheels in a given frequency range was proposed. Optimisation of transform parameters was carried out, the type of base wavelet, the required level of decomposition and characteristic frequency ranges that are important for the assessment of the condition of the wheels were determined. The optimisation task was carried out using data from initial measurements of vibrations during tram journeys in the depot.

The method was validated during test runs of trams on the depot's shunting tracks. A prototype of an acceleration sensor based on a 3-axis accelerometer made in MEMS technology was used. Accelerations of vibrations of rails on which the vehicle was moving

at a frequency of 1 kHz were recorded. The vehicle was fitted with wheels damaged to varying degrees. The energy of the recorded signals was calculated using the MODWPT transform coefficients with the Coiflet3 base wave at the 8th decomposition level in the frequency range of 420 – 422 Hz.

The results of the validation confirm that the possibility of using sensors in MEMS technology to assess the condition and, above all, to signal passages with damaged wheels. The use of the MODWPT transform effectively allows the description of vibration anomalies and thus indicates wheel conditions. The established parameters of the MODWPT transform may need to be corrected when the drives are made on tracks in poor technical condition and when the travel speeds exceed a few km/h. The developed method has been successfully used to detect wheel fault conditions while driving.

Keywords: wheel fault condition assessment; MEMS-based sensor; MODWPT; wavelet coefficient; weighted difference; decomposition level; vibration energy; frequency band.

15th May, 2024