

Leszek Chałko^{1*}, Łukasz Antolik², Piotr Machała³, Patryk Uchroński³

¹ Uniwersytet Radomski

² Instytut Kolejnictwa

³ ZBM ULTRA sp. z o.o.

Problematyka zapewnienia sprzężenia akustycznego głowic ultradźwiękowych kolejowego wagonu inspekcyjnego poruszającego się z prędkościami powyżej 80 km/h

Problems of ensuring acoustic coupling of ultrasonic probes of a railway inspection wagon moving at speeds above 80 km/h

STRESZCZENIE

W referacie omówiono problematykę zapewnienia sprzężenia akustycznego i sposób rozwiązania w czasie realizacji projektu pt. „Innowacyjne rozwiązanie umożliwiające realizację badań defektoskopowych szyn przy prędkości od 60 km/h do 120 km/h” związane z zapewnieniem odpowiedniego sprzężenia akustycznego głowic ultradźwiękowych. Przedstawiono konstrukcję stanowiska testowego oraz wyniki przeprowadzonych prób dynamicznych. Omówiono wyniki testów w zależności od prędkości, siły docisku, wydatku wody i sposobu jej dostarczenia do strefy współpracy bloku przetworników ultradźwiękowych z powierzchnią badanego przedmiotu.

Słowa kluczowe: ultradźwięki; sprzężenie; szyny; wagon; prędkość.

1. Wstęp

Jednym z priorytetowych zadań zarządcy infrastruktury kolejowej PKP PLK S.A., jest zapewnienie bezpieczeństwa i niezawodności ruchu. Podstawą zapobiegania awariom jest diagnostyka techniczna szyn. W efekcie znacznych obciążeń i zmiennych warunków atmosferycznych ulegają one zużyciu powstającemu w wyniku przejazdu olbrzymiej ilości ładunków. W skrajnym przypadku może nastąpić złamanie szyny, co może doprowadzić do wykolejenia pociągu (Rys. 1 i Rys. 2). W celu eliminacji zagrożeń prowadzone są permanentne badania wizualne oraz ultradźwiękowe wszystkich szlaków kolejowych a ich wyniki klasyfikowane są w oparciu o Katalog wad w szynach [1] bazujący na zeszycie UIC 712R [2]. Także bardzo bogatym źródłem wiedzy o charakterze uszkodzeń eksploatacyjnym szyn jest Federalny przewodnik inspektora szyn [3]. Autorzy w pracy [4] wskazują, że większość identyfikowanych wad w szynach ma charakter powierzchniowy i nie jest wykrywany metodą ultradźwiękową. Badania UT prowadzone są za pomocą

ABSTRACT

The paper refers the problems of acoustic coupling phenomena and their solutions during the implementation of the project entitled "Innovative solution for conducting rail defectoscopic tests at speeds from 60 km/h to 120 km/h" with the provision of an appropriate sound signal from the ultrasonic probes. The construction of test stand was presented as well as dynamic tests that were carried out. The test results depending on the speed, angle of attack (block frontal surface bend), water flow, method of water transfer in front of the blocks and block pressure power were discussed. The concepts and tests results related to centralization of the probes in relation to the rail centre were described.

Keywords: ultrasound; coupling; rail; wagon; velocity.



Rys. 1. Pęknięcie poprzeczne szyny z wżerem korozyjnym
Fig. 1. Transverse crack with corrosion pitting

*Autor korespondencyjny.

E-mail: Leszek.Chalko@uthrad.pl

ręcznych wózków jednotokowych (Rys. 3) lub pojazdów inspekcyjnych (Rys. 4). Wszystkie wady powierzchniowe mogą zatem być oznaczone na protokole przez operatorów wózków ręcznych. Z kolei pojazdy inspekcyjne będące na wyposażeniu PKP PLK S.A. umożliwiają prowadzenie badań zautomatyzowanych maksymalnie z prędkością 60 km/h. Jest to wartość zbyt niska w stosunku do aktualnych potrzeb. Prowadzenie badań na odcinkach o prędkościach eksploatacyjnych co najmniej 100 km/h jest problematyczne z uwagi na blokowanie szlaku przez pojazd diagnostyczny. W związku z tym spółka PKP PLK S.A. wraz z NCBiR sfinansowała projekt badawczy pt. „Innowacyjne rozwiązanie umożliwiające realizację badań defektoskopowych szyn przy prędkości od 60km/h do 120 km/h”. Jest on realizowany przez Konsorcjum w składzie: Instytut Kolejnictwa, IPPT PAN, ZBM ULTRA sp. z o.o. oraz CILANTRO. Celem projektu jest budowa systemu diagnostycznego z optymalnym rozkładem przetworników ultradźwiękowych, macierzy defektoskopów oraz systemem informatycznym umożliwiającym zapis przebiegu badania i automatyczną ocenę wskazań przy prędkościach dotychczas niestosowanych. Każdy proponowany na rynku system

diagnostyczny jak na przykład opisany w pracy [5] stanowi interesującą alternatywę. Jednak specyficzne wymagania każdego z zarządców powodują, że każde rozwiązanie musi zostać dostosowane do tych wymagań i niekiedy budowa systemu od podstaw ma swoje zasadnicze zalety. Jednym z podstawowych zagadnień przy projektowaniu mechanicznej części systemu jest zapewnienie odpowiedniego sprzężenia akustycznego oraz prowadzenia głowic w osi szyny przy jednoczesnym umożliwieniu przejazdu systemu badawczego przez rozjazd w pozycji roboczej. Jednocześnie system musi zapewniać badanie ultradźwiękowe objętości szyny w sposób określony w normach [6, 7].

2. Problematyka zapewnienia sprzężenia akustycznego przy dużych prędkościach

Badanie ultradźwiękowe polega na generowaniu fali akustycznej w przetworniku. Powstały sygnał musi zostać wprowadzony do materiału badanego i odebrany z niego przy możliwie najmniejszych stratach. W tym celu w szczelinę pomiędzy przetwornikiem a materiałem badanym wprowadza się medium sprzegające – np. wodę lub znane z badań medycznych USG żele.



Rys 2. Wypadek w Semmering, Austria
Fig. 2. Accident in Semmering, Austria



Rys 3. Jednotokowy wózek badawczy.
Fig. 3. Single-track test trolley.



Rys 4. Wagon inspekcyjny.
Fig. 4. Inspection wagon.

Prowadzenie badań z dużymi prędkościami przemieszczeń – w przedstawianym projekcie do 120 km/h – generuje problemy natury podstawowej wynikające ze zjawisk dynamicznych zachodzących pomiędzy powierzchnią bloku przetworników a powierzchnią szyny kolejowej.

Bezpośredni kontakt powierzchni głowicy z materiałem badanym będzie powodował szybkie jej zużycie i gwałtowny wzrost temperatury. Zjawisko to szczególnie nasila się, gdy pojazd porusza się po szynach świeżo reprofilowanych (szlifowanych) (Rys. 5), skorodowanych, zapiaszczonych lub o łuszczących się powierzchniach (Rys. 6).



Rys. 5. Chropowatość powierzchni szyny po reprofilacji
Fig. 5. Rail surface roughness after reprofiling



Rys. 6. Zużycie bloków głowic: 1) wbite w głowicę opilki metalu z łuszczących się szyn; 2) zmiana kształtu powierzchni bloku poprzez wytarcie na nieregularny łuk.

Fig. 6. Wear of blocks of probes: 1) metal filings from peeling rails stuck in the probes; 2) change of shape of blocks surface by wiping of into an irregular arc

Aby uniknąć niekontrolowanego zużycia, bloki głowic muszą być oddzielone od powierzchni tocznej głowki szyny warstwą filmu sprzęgającego akustycznie oba elementy i jednocześnie spełniającego rolę rozdzielającego smaru. Zbyt duża odległość przetwornika od powierzchni badanej, choć korzystna ze względu na zużycie, w wyniku zachodzących zjawisk falowych spowoduje jednak znaczny spadek amplitudy sygnału ultradźwiękowego i uniemożliwi skuteczne wykonywanie badań. Wyznaczenie optymalnej w praktyce grubości filmu jest więc kluczowym zagadnieniem. W tym celu wykorzystano układ testowy zbudowany w Instytucie Kolejnictwa oparty o docisk bloku głowic do badanej powierzchni za pomocą sprężyn o regulowanym napięciu oraz jego unoszeniu w wyniku zmian sposobu i wydajności podawania wody.

Sprzężenie akustyczne może być zapewnione poprzez podawanie wody w szczelinę pomiędzy głowicę a powierzchnię toczną szyny. W tym celu należy określić optymalne ciśnienie i ilość podawanej wody w funkcji prędkości. Zbyt mała ilość cieczy nie zapewni powstania ciągłego filmu i przejścia fali ultradźwiękowej do badanego materiału i z powrotem. Z drugiej strony wagon inspekcyjny posiada ograniczoną objętość zbiorników na wodę, a w związku z tym wydatek wody nie może również być zbyt duży.

Oslabienie sygnału ultradźwiękowego może być również spowodowane złą zwilżalnością powierzchni szyny jak i powstawaniem pęcherzy gazowych w strefie kontaktu. Eliminacja tych zjawisk przez dodanie do wody środków powierzchniowo czynnych (np. płynu do mycia naczyń) może powodować poprawę zwilżalności przy jednoczesnym narażeniu na ułatwienie powstawania piany w strefie kontaktu. Zjawisko to będzie jednak przedmiotem kolejnych etapów prac.

Przewidywane w przypadku zastosowania niewłaściwych parametrów zwilżania (potwierdzone empirycznie) jest ryzyko wystąpienia niekorzystnego zjawiska kawitacji przy prędkościach już niewiele wyższych od 60 km/h. Niekontrolowane zjawisko może nie tylko osłabić sygnał ultradźwiękowy a wręcz uniemożliwić prowadzenia badania. Kawitacja jest związana z tendencją do przepływu turbulentnego cieczy lub oderwaniem strugi cieczy od powierzchni. W wyniku powstania gwałtownych zmian ciśnień np. przy miejscowym rozszerzeniu kanału przepływu w wyniku niedoskonałości powierzchni przesuwu (Rys.7), woda może przechodzić w stan gazowy. Przy zakładanych prędkościach przesuwu ograniczenia reologiczne cieczy uniemożliwiają wypełnienie gwałtownie powiększającej się przestrzeni, co w praktyce będzie skutkowało zawirowaniami przepływu cieczy. Przedmiotowe zjawiska są nieuniknione, jednak konstrukcja przyłgi bloku powinna zapewnić optymalne formowanie warstwy sprzęgającej niezależne od zmiennych warunków eksploatacji.

Jak zilustrowano na Rys. 6, w czasie pracy kształt powierzchni współpracujących zmienia się. W trakcie eksploatacji zmienia się kształt przyłgi bloku głowic, który podlega wytarceniu. Dodatkowo kształt powierzchni tocznej głowki szyny tj. powierzchni przesuwu pozostaje poza



Rys. 7. Głębokie uszkodzenia powierzchni toczonej szyny mogące mieć wpływ na film cieczy sprzęgającej

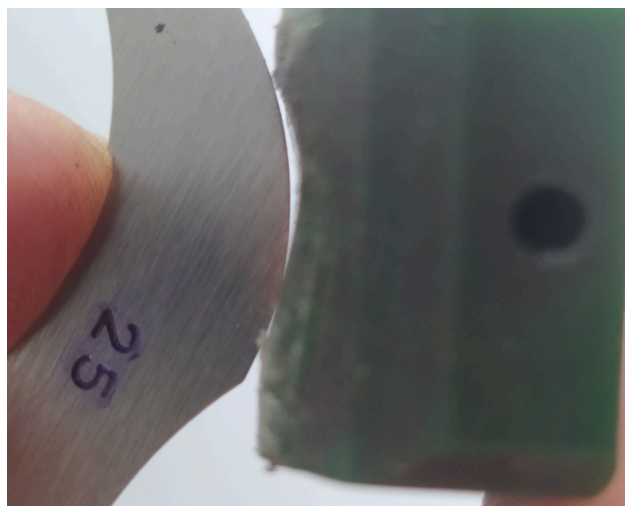
Fig. 7. Deep damage to the rail running surface that may affect the coupling fluid film

kontrolą. Szyny o nominalnym promieniu powierzchni toczonej R300 mogą zwiększać lub zmniejszać swój promień w zależności od stopnia zużycia i położenia w torze, co przedstawiono na Rys.8.

Opisane niekorzystne zjawiska prowadzą do tego, że poziom sprzężenia przy badaniach szyn eksploatowanych z prędkością 60-120 km/h jest dynamicznie zmienny. Aby skompensować straty przeniesienia w stosunku do warunków quasi statycznych można zastosować algorytmy cyfrowe poprawiający analizowany sygnał, np. technikę deep learning w oprogramowaniu analitycznym oraz rozważyć możliwości dynamicznego pomiaru jakości sygnału i sprzężenia w celu uniezależnienia wyników od chwilowych fluktuacji.

3. Stanowisko testowe

Aby określić jakość sprzężenia akustycznego w funkcji prędkości, docisku bloków głowic oraz wydatku podawanej cieczy zaadaptowano istniejące stanowisko Instytutu Kolejnictwa (Rys. 9). W tym celu skonstruowano i wykonano specjalny blok z głowicą ultradźwiękową normalną i czujnikiem indukcyjnym BAW0067 firmy Balluff. Do pomiarów wykorzystano ręczny defektoskop ultradźwiękowy z zobrazowaniem A-scan i repetycją na poziomie 1kHz z możliwością ciągłego zapisu odbieranego sygnału. Wartość ta jest wystarczająca do przeprowadzenia



Rys. 8. Zużycie bloku głowic, wytarcie o promieniu $R < 25$ w wyniku badania zużytych szyn o nominalnym, początkowym promieniu R300

Fig. 8. Wear of block of probes, abrasion with radius of $R < 25$ as a result of tests of worn rails with nominal, initial radius of R300



Rys. 9. Stanowisko badawcze z blokiem o kącie natarcia 90°

Fig. 9. Test stand with block with an angle of attack of 90°

badan wstępnych opartych na pomiarze spadku poziomu echa odbitego od ciągłego reflektora nieskończonego. Blok przetworników ustawiony na powierzchni koła jest prowadzony sposobem opisanym w zgłoszeniu patentowym nr P447343. Parametryzacji poddano różne kąty natarcia i sposoby podawania cieczy sprzęgającej. Rozwiązanie



Rys. 10. Testowy blok głowic z rozdzielonym przetwornikiem 0°, pomiarem grubości filmu sprzęgającego oraz kanałem i zbiornikiem cieczy sprzęgającej

Fig. 10. Test block of probes with separated transducer 0°, measuring the thickness of the coupling film and the coupling fluid channel and tank

ze zbiornikiem cieczy przedstawiono na Rys. 10. Wykorzystany model na tym etapie w wystarczającym stopniu odpowiada badaniom głowicą normalną szyny z powierzchni tocznej.

4. Parametryzacja wyników pomiarów

W przedstawionych wybranych efektach badań zmianom nie ulegała geometria badana, masa bloku oraz kąt natarcia w stosunku do badanej powierzchni. Echo reflektora nieskończonego uzyskano z odległości około 130 mm.

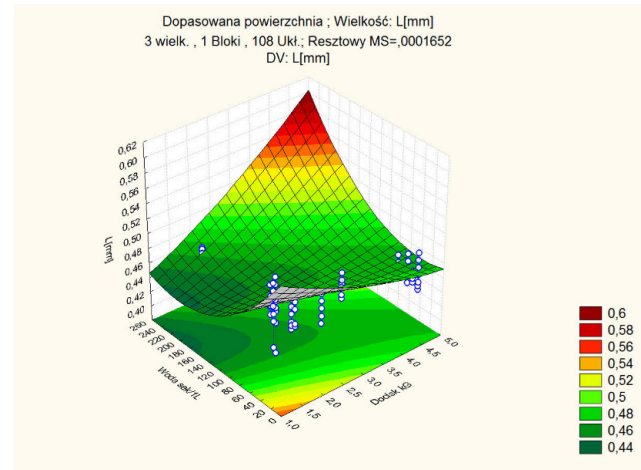
Wykorzystane stanowisko badawcze pozwala na płynną zmianę prędkości obrotowej. Wychodząc ze średnicy tocznej koła, wykonano pomiary dla prędkości obrotowej od 0 do 800 obr/min, gdzie prędkość obrotowa 700 obr/min odpowiada prędkości przesuwu 118 km/h.

Docisk bloku do powierzchni przesuwu zrealizowano z użyciem dwóch sprężyn o regulowanej sile naciągu, umieszczonych z przodu i tyłu bloku i przekazujących reakcję na blok przez zespół specjalnych przewodników.

Podawanie wody zrealizowano wariantowo poprzez króciec wykonany w bloku głowic oraz poprzez natrysk przed blokiem. Miało to na celu symulację pracy drugiego i kolejnych bloków systemu, które współpracują już z mokrą powierzchnią „przygotowaną” przez poprzedzający blok. W trakcie testów zauważono, że część wody rozplywała się w wyniku działania grawitacji i siły odśrodkowej i nie tworzyła filmu pod blokiem, co jest zgodne z rzeczywistymi warunkami pracy systemu w torze.

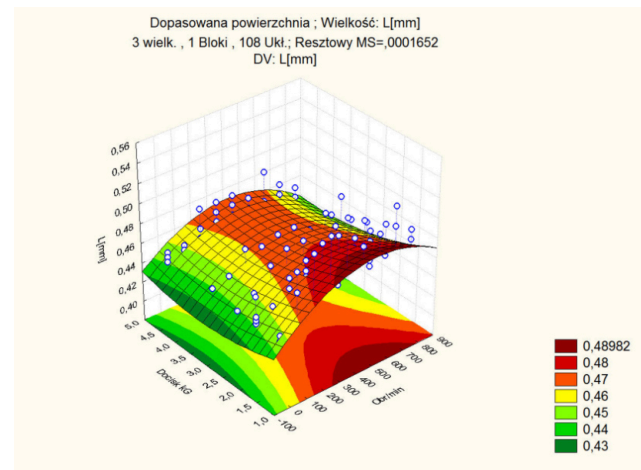
5. Otrzymane wyniki

Na Rys. 11. i 12. przedstawiono przykładowe wyniki pomiaru odległości przetwornika w stosunku do powierzchni koła. Na wykresach podano tę odległość, a nie grubość filmu. Grubość warstwy środka sprzęgającego to zmiana odległości pomiędzy blokiem a powierzchnią badaną przy różnych prędkościach badania.



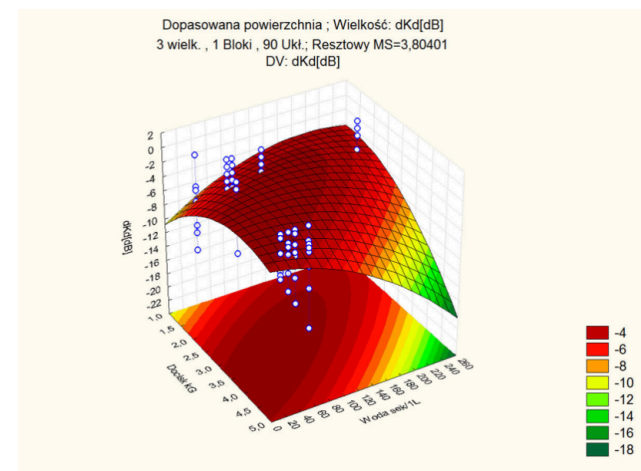
Rys. 11. Odległość bloku od koła w funkcji docisku i wydatku wody

Fig. 11. Distance between block and wheel as a function of pressure and water flow



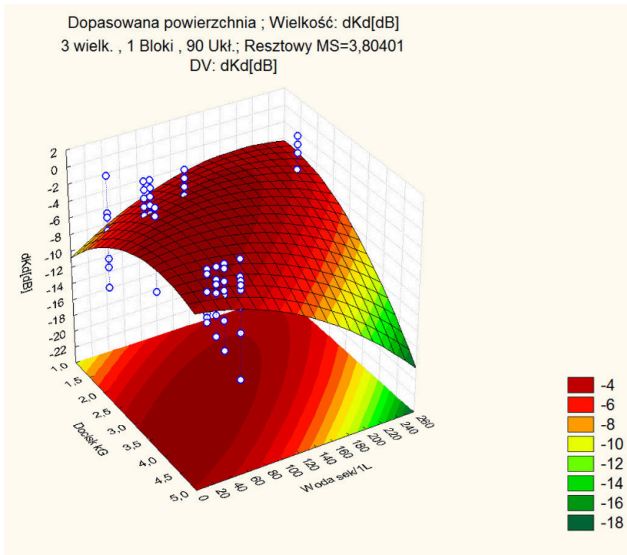
Rys. 12. Odległość bloku od koła w funkcji docisku i prędkości obrotowej

Fig. 12. Distance between block and wheel as a function of pressure and rotation speed



Rys. 13. Zmiana sygnału ultradźwiękowego w funkcji docisku i wydatku wody

Fig. 13. Change of ultrasonic signal as a function of pressure and water flow



Rys. 14. Zmiana sygnału ultradźwiękowego w funkcji prędkości obrotowej i docisku.

Fig. 14. Change of ultrasonic signal as a function of rotation speed and pressure

Na Rys. 13. i 14. przedstawiono przykładowe wyniki spadku wartości sygnału ultradźwiękowego w stosunku do echa referencyjnego dla sygnału dna.

Przeprowadzone doświadczenia potwierdziły wstępnie przewidywane założenia. Z analizy wyników testów wynika bezpośrednia zależność grubości tworzącego się filmu wodnego od prędkości przemieszczenia. Wraz ze wzrostem prędkości "jazdy" powiększa się grubość filmu wodnego.

Zmiana wartości docisku bloku wpływa na jakość sygnału znacząco słabiej niż prędkość skanowania. Zwłaszcza przy dużych prędkościach charakterystyczna jest proporcjonalnie mniejsza zależność grubości tworzącego się filmu wodnego od siły docisku.

Na prezentowanych wynikach można zaobserwować, że po przekroczeniu około 500 obr/min następował spadek grubości filmu wodnego. W omawianym przykładzie

związane było to z ograniczeniem wydatku dostarczonej wody wynikającym z geometrii układu zasilania. Miało to wpływ także na pozostałe parametry.

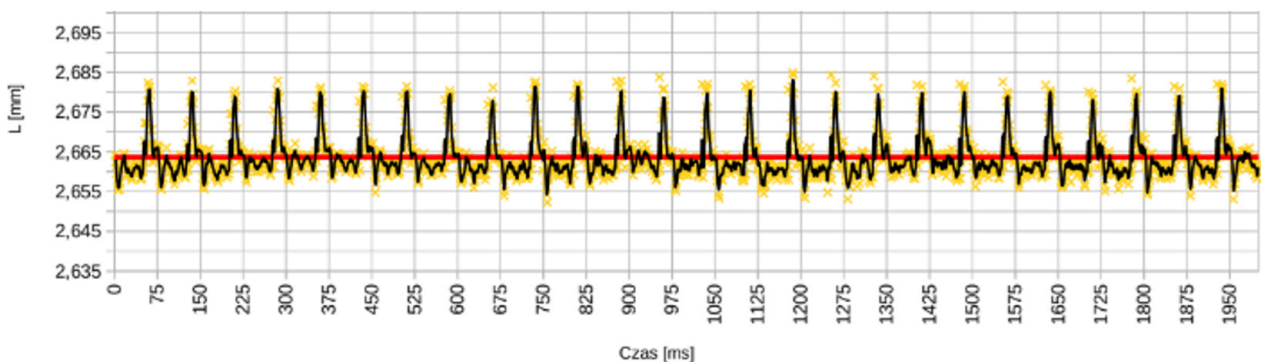
Siła docisku ma istotny wpływ na dynamiczne zachowanie się układu pomiarowego. W czasie prowadzenia pomiaru z prędkością docelową 120 km/h (33,3 m/s) poderwanie bloku np. w wyniku zderzenia z przeszkodą czy nierównością na 0,01 sekundy spowoduje uniemożliwienie przeprowadzenia poprawnego pomiaru 333 mm szyny. Wymusza to zastosowanie dużych sił docisku, które zostaną wyznaczone na zasadzie kompromisu pomiędzy dynamiką układu a nieuchronnym zużyciem ściernym.

Stosowane w układach pomiarowych pracujących z prędkościami do 60 km/h rozwiązania z amortyzatorami bloków utrudniającymi oderwanie ich od powierzchni tocznej mogą powodować istotne uszkodzenia przy pokonywaniu pęknięć i rozjazdów w wyniku uderzenia ze znaczącą prędkością o wystające krawędzie w postaci np. złączy szynowych w torze o stykowej technologii łączenia.

Na Rys. 15. przedstawiono wykres zmiany odległości bloku z głowicą ultradźwiękową od powierzchni koła w funkcji czasu prowadzenia badania dla prędkości obrotowej 800 obr/min. Widoczne odchylenie wynika z zastosowania znacznika położenia koła koniecznego dla synchronizacji pomiarów oraz kontroli dynamicznego zachowania układu. Powtarzalność przebiegu świadczy o poprawności wykonywanych prób. Na Rys. 16. przedstawiono przykładowy wykres zależności wpływu prędkości badania na zmiany odległości bloku od powierzchni koła i wartości sygnału ultradźwiękowego przy stałej sile docisku 46,1 N oraz wydatku wody 2,4 dm³/min.

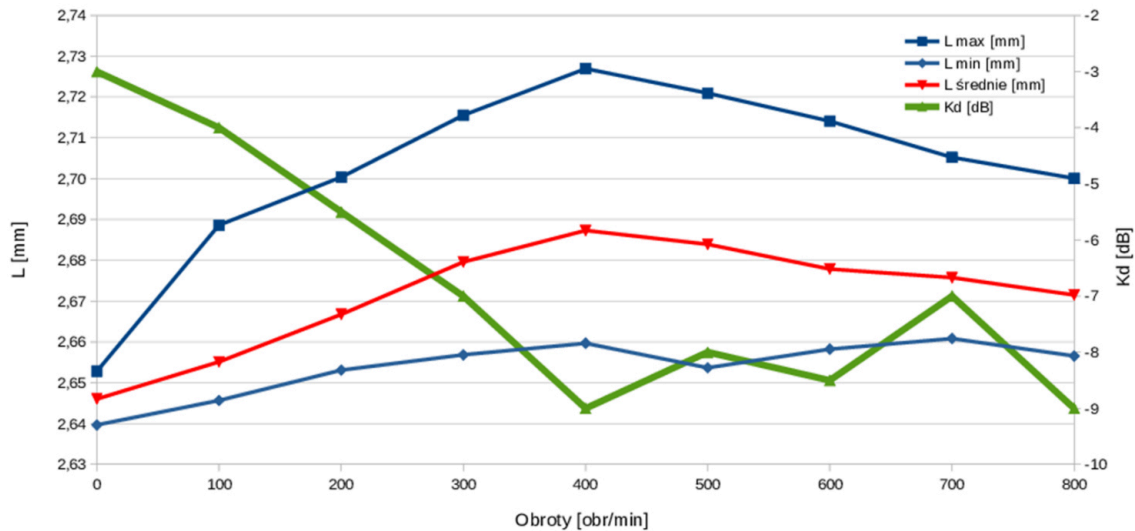
Wartości odpowiadające linii L_{max} i L_{min} określają maksymalny rozrzut wyników pomiaru odległości czujnika pomiarowego od powierzchni koła. Uwzględniają tak znacznik referencyjny jak i inne błędy pomiarowe.

Przedstawiona na Rys.16 zależność wskazuje na zmianę wielkości sygnału echa odbitego od przeciwległej powierzchni o 6 dB, tj. z -3 dB w warunkach statycznych do -9dB przy 800 obr/min odpowiadającej jeździe z prędkością 134,9 km/h.



Rys. 15. Zmiana odległości bloku z głowicą ultradźwiękową od powierzchni koła w funkcji czasu dla prędkości obrotowej 800 obr/min i wydatku wody 1,4 dm³/min.

Fig. 15. Change in the distance of the block with the ultrasonic probe between the wheel surface as a function of time for a rotation speed of 800 rpm.



Rys. 16. Zmiana odległości bloku z głowicą od koła i spadek wartości sygnału ultradźwiękowego w funkcji prędkości obrotowej przy docisku 46,1 N i wydatku wody 2,4 dm³/min

Fig. 16. Change in the distance of the block with the probe between the wheel and the decrease of the ultrasonic signal as a function of rotation speed at a pressure of 46,1 N.

Z wykresu wynika korzystny wpływ spadku grubości filmu wodnego jak i zmniejszenia fluktuacji jego grubości na jakość odbieranego sygnału.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone testy wykazały możliwość prowadzenia badań ultradźwiękowych przy prędkościach z zgodnych z założeniami projektu – znacznie powyżej 80 km/h. Aby wykrywanie wad w szynach było możliwe należy jednak kontrolować odległość bloku głowic od badanej powierzchni i wydatek wody. Wyniki potwierdzają istnienie różnych optimumów wydatku wody zależnych od prędkości pomiaru. Należy więc określić właściwe warunki badań (grubość filtra) co pozwoli na poprawną interpretację otrzymywanych wskazań.

7. Literatura

- [1] Katalog wad w szynach, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2005
- [2] Zeszyt UIC 712 R, edycja 4, styczeń 2002
- [3] Track Inspector Rail Defect Reference Manual, rev. 2, Office

of Railroad Safety, U.S. Department of Transportation, 2015

- [4] D. Kowalczyk, Ł. Antolik, I. Mikłaszewicz, „Wady szyn kolejowych a badania ultradźwiękowe, vol. 4, pp. 9-13, 2019, doi:10.26357/BNiD.2019.016
- [5] V. Jemec, J. Grum, Automated non-destructive testing and measurement system for rails., <https://www.researchgate.net/publication/229039969>.
- [6] PN-EN 16729-1:2016 Kolejnictwo – Infrastruktura - Badania nieniszczące szyn w torze -Część 1: Wymagania dotyczące badań ultradźwiękowych i zasad oceny.
- [7] PN-EN 16729-3:2018 Kolejnictwo – Infrastruktura - Badania nieniszczące szyn w torze - Część 3: Wymagania dotyczące identyfikacji wad - wewnętrznych i powierzchniowych szyn.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr BRIK-II/0013/2022 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju i PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia BRIK II.