

1. Piotr CHROSTOWSKI¹, 2. Andrzej WILK², 3. Sławomir GRULKOWSKI¹, 4. Roksana LICOW¹,
5. Michał MICHNA², 6. Leszek JARZĘBOWICZ², 7. Jacek SKIBICKI², 8. Sławomir JUDEK²,
9. Krzysztof KARWOWSKI², 10. Marek SZAFRAŃSKI¹, 11. Tadeusz WIDERSKI¹, 12. Karol DALIGA¹,
13. Paweł BAWOLSKI², 14. Natalia KARKOSIŃSKA-BRZOZOWSKA¹

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska (1), Wydział Elektrotechniki i Automatyki (2)

ORCID: 1. 0000-0002-5454-026X; 2. 0000-0002-5265-6189; 3. 0000-0002-3352-624X; 4. 0000-0002-4368-0064; 5. 0000-0002-9683-7459;
6. 0000-0001-9710-1913; 7. 0000-0003-1373-0961; 8. 0000-0003-4620-8416; 9. 0000-0003-1662-6051; 10. 0000-0001-5802-760X;
11. 0000-0002-9894-9892; 12. 0000-0001-5598-3014; 14. 0000-0002-5485-025X

doi:10.15199/48.2025.03.37

Zintegrowany system monitoringu oddziaływania kolei na środowisko

Streszczenie. W artykule przedstawiono nowy system monitoringu kolei opierający się na koncepcji sieci sensorowej IIoT (ang. Industrial Internet of Things), System charakteryzuje się przenaszalnością obszarową, skalowalnością, możliwościami konfiguracji czujników i synchronizacją pomiarów. Analiza sygnałów umożliwia syntetyczną ocenę wpływu transportu kolejowego na środowisko, a w szczególności pozwoli na rozpoznanie przyczyn zanieczyszczeń środowiska drganiami i hałasem generowanymi przez pojazdy szynowe. Zaprezentowano wstępne wyniki zebrane na linii kolejowej.

Abstract. The article presents a new railway monitoring system based on the IIoT (Industrial Internet of Things) area sensor network. The system is characterized by easy area transferability, scalability, configuration of different sensors and measurement synchronization. Signal analysis allows for a synthetic assessment of the impact of rail transport on the environment, and in particular will allow for the identification of the causes of environmental pollution generated by vehicles with vibrations and noise. The results collected on the railway line were presented. (**Integrated system for monitoring the impacts of railway on environment**).

Słowa kluczowe: infrastruktura transportu kolejowego, tabor kolejowy, badania środowiskowe, sieć sensorowa

Keywords: railway transport infrastructure, rolling stock, environmental research, sensor network

Wstęp

Rozwój techniczny infrastruktury i taboru kolejowego powoduje, że wpływ transportu kolejowego na środowisko jest zagadnieniem coraz bardziej istotnym – zwłaszcza dla tras przeznaczonych do ruchu z dużą prędkością i znacznym natężeniem ruchu [1].

Oddziaływanie transportu kolejowego na środowisko w znacznej mierze polega na emisji drgań i hałasu, powodując dyskomfort zamieszkiwania lub chwilowego przebywania ludzi oraz zwierząt w bliskim otoczeniu linii i stacji kolejowych [2, 3]. Monitorowanie tych zjawisk jest podstawową formą umożliwiającą kontrolę poziomu wybranych do ich opisu parametrów. Przestrzenny i specyficzny dla kolei charakter tych zjawisk, wymusza opracowanie zaawansowanego systemu, integrującego szereg urządzeń i czujników pomiarowych – w nowoczesnych rozwiązaniach, w formie sieci sensorowej IIoT (ang. Industrial Internet of Things) [4]. Istotną cechą systemu jest możliwość jego przenoszenia do różnych obszarów monitorowania linii kolejowych oraz skalowalność i łatwość rekonfiguracji czujników.

Z punktu widzenia celu, tj. identyfikacji szeregu parametrów środowiskowych, ale również technicznych i ruchowych, pomiary hałasu powinny być uzupełnione o pomiary i identyfikację innych parametrów związanych z ruchem pojazdów, jak np.: prędkość pojazdu, typ pojazdu i rodzaj jego napędu, długość pojazdu, liczba osi i wózków, stan techniczny przekładający się poziom drgań itd. Ostatecznie komplet zebranych i połączonych ze sobą informacji pozwoli na syntetyczną ocenę wpływu transportu kolejowego na środowisko. Ocena ta ma swój kontekst formalno-prawny wynikający z Technicznych Standardów Interoperacyjności [5] jak również aktów normatywnych prawa krajowego [6].

Zintegrowany system monitoringu realizowany jest w ramach projektu badawczego pt. „System precyzyjnego monitorowania oddziaływania ruchu kolejowego na środowisko z uwzględnieniem informacji o danych ruchowych, technicznych i środowiskowych” i wykonywany przez Konsorcjum Politechniki Gdańskiej i Politechniki

Wrocławskiej, w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia NCBR – PKP PLK S.A. pn. „Badania i Rozwój w Infrastrukturze Kolejowej – BRIK2”. Celem nadrzędnym projektu jest opracowanie systemu pomiarowego oraz systemu informatycznego, który ułatwi zarządcy dróg kolejowych zbieranie kluczowych informacji o oddziaływaniach systemu tabor–infrastruktura, pozwoli oceniać te oddziaływania i podejmować stosowne i skuteczne kroki zaradcze w celu minimalizowania ich poziomu.

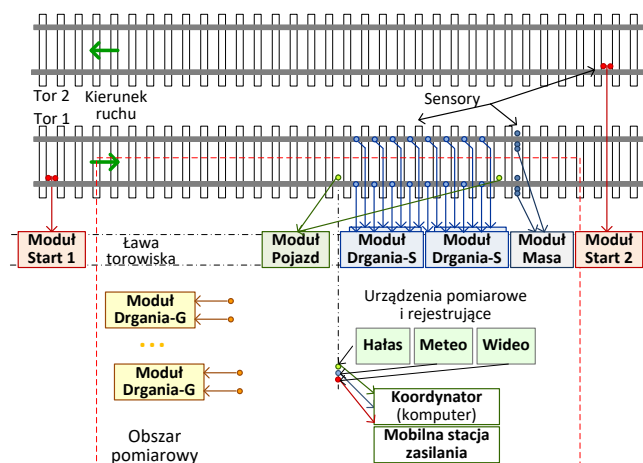
Ogólna charakterystyka systemu monitoringu

Dotychczasowe systemy monitoringu infrastruktury kolejowej oraz taboru stosowane na liniach PKP PLK (m.in. detekcja stanów awaryjnych pantografów DSAP, detekcja stanów awaryjnych taboru DSAT) opierają się na instalowaniu w określonych punktach na liniach kolejowych dedykowanych urządzeń pomiarowych o ściśle określonym przeznaczeniu i parametrach, np. monitoring sieci trakcyjnej, odbieraków prądu, temperatury maźnic, hamulców pojazdów czy uszkodzeń szyn itd. Nowsze koncepcje rozwijają układy wielosensorowe z fuzją danych i uczeniem maszynowym [7-11].

Proponowany przez autorów nowy zintegrowany system monitoringu składa się z dwóch podsystemów: pomiarowego i informatycznego. Podsystem pomiarowy wykonany jest w postaci specyficznej obszarowej sieci sensorowej (zwanej dalej OSS) ze specjalizowanymi układami pomiarowymi. Część informatyczna to głównie oprogramowanie komputerowe do akwizycji, archiwizacji i analizy danych pomiarowych oraz do oceny wskaźników i prezentacji wyników. Istotnym zagadnieniem tego systemu pomiarowo–informatycznego jest odpowiednia topologia i geolokalizacja elementów sieci sensorowej. Przykładowy schemat topologii systemu pokazano na rysunku 1.

System pomiarowo-informatyczny powinien zapewnić pozyskanie i przetwarzanie informacji ruchowych, technicznych i środowiskowych. Do głównych parametrów ruchowych zaliczamy: czas przejazdu i prędkość pojazdu, natężenie ruchu, typ pojazdu wraz z jego długością, liczbą wagonów oraz masą. Parametry techniczne to: liczba osi

pojazdu, nacisk na oś, rodzaj hamulców, średnica kół oraz stan powierzchni tocznych szyn i kół (uszkodzenia). Hałas i vibracje wywołane eksploatacją linii kolejowej są głównymi parametrami środowiskowymi.



Rys. 1. Koncepcja monitoringu z OSS na przykładzie opomiarowania jednego toru linii dwutorowej

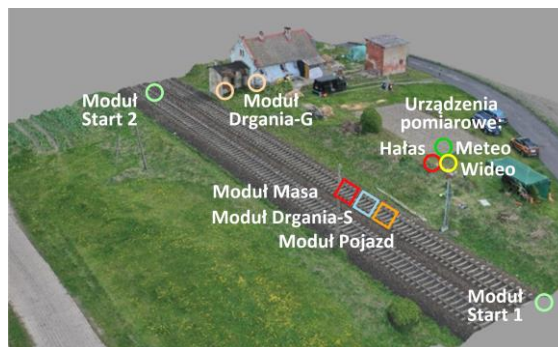
W skład OSS wchodzi moduły pomiarowe obsługujące pojedyncze sensory lub ich grupy. Główne moduły to:

- moduł S (Start) wykrywania początku i końca pociągu dla określonego kierunku jazdy,
- moduł P (Pojazd) wyznaczający prędkość chwilową pociągu, liczbę osi i odległości między osiami,
- moduł D (Drgania) w wersji jednoosiowego pomiaru drgań szyny kolejowej D-S i trójosiowego pomiaru drgań D-G (gruntu lub innych obiektów),
- moduł M (Masa) do szacowania nacisku osi pojazdu na tok szynowy,
- inne, np. moduł pola akustycznego pociągu.

Elementem nadrzędnym OSS jest koordynator systemu pomiarowego (KSP) stanowiący komputer przemysłowy wraz z dedykowanym specjalistycznym oprogramowaniem. Niektóre urządzenia pomiarowe podłączone są bezpośrednio do KSP, w tym przypadku to: miernik poziomu dźwięku klasy 1 (Hałas), stacja parametrów meteorologicznych (Meteo) oraz kamera wideo (Wideo) rejestrująca obraz przejeżdżającego pociągu.

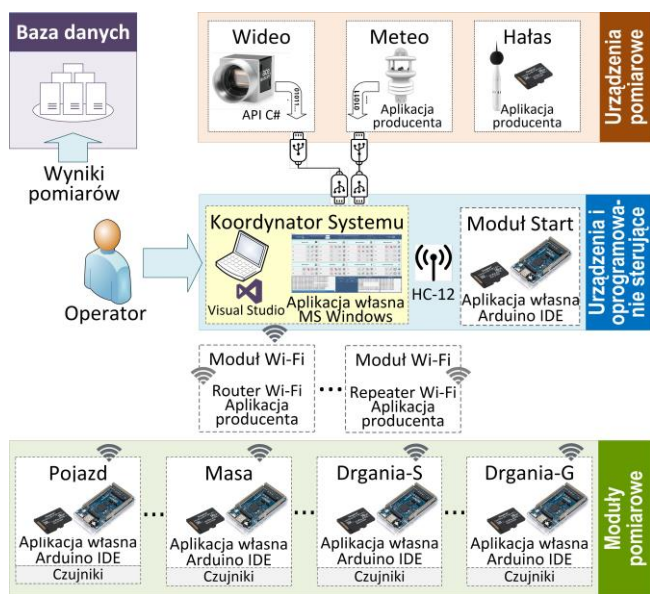
Poza specyficzną topologią sieci sensorowej istotne są również warunki terenowe i środowiskowe obszaru, w którym wykonywane są pomiary. W tym celu wykonywane są pomiary geodezyjne topologii OSS w otoczeniu linii kolejowej. Jest to istotne ze względu na zróżnicowanie konstrukcji linii kolejowej na jej długości w zakresie nawierzchni, obiektów inżynierskich oraz innych urządzeń przytorowych. Przykładowo w otoczeniu przejazdów kolejowo-drogowych czy też w pobliżu obiektów mostowych obserwuje się miejscową zmianę poziomów dźwięku i drgań emitowanych do otoczenia. Na rysunku 2 pokazano przykładowy numeryczny model pokrycia terenu (NMTP) wraz z opisem rozmieszczenia urządzeń OSS na tle planu sytuacyjnego. Pomiar terenowy obejmował wykonanie nalotu fotogrametrycznego za pomocą bezałogowego statku powietrznego, wyposażonego w kamerę cyfrową [9]. Konfiguracja przestrzenna OSS (aktywne sensory i ich rozmieszczenia) oraz NMPT są zapisywane w KSP.

Podstawowym zadaniem KSP jest zarządzanie procesem pomiarowym OSS. Jako Koordynator Systemu rozumiany jest zarówno program jak i kontroler systemu pomiarowego, na którym jest on uruchomiony. Na rysunku 3 przedstawiono implementowaną strukturę programową obsługi modułów pomiarowych systemu monitoringu.



Rys. 2. Przykładowy NMPT wraz z dodatkowym opisem rozmieszczenia urządzeń monitoringu

Urządzenia pomiarowe (stacja monitoringu hałasu, kamera i stacja meteo) przyłączone są przewodowo do koordynatora. Moduły pomiarowe OSS szkalizowane w większych odległościach od KSP zarządzane są z koordynatora z wykorzystaniem transmisji Wi-Fi, za wyjątkiem modułów S, które – ze względu na znaczne odległości (nawet rzędu kilkuset metrów) – wykorzystują wolniejszą transmisję typu HC-12. Oprogramowanie KSP uruchamia synchroniczną rejestrację pomiarów przez moduły OSS i urządzenia pomiarowe na podstawie odebranych sygnałów wykrycia pociągu przez moduły S. Zarejestrowane dane pomiarowe przesyłane są na dysk KSP, a następnie do bazy danych i przetwarzania końcowego w analizie danych w celu oceny wyników z parametrami normatywnymi.



Rys. 3. Struktura modułów programistycznych związana z OSS

Rejestracja wybranych parametrów hałasu kolejowego

Do głównych zagrożeń środowiskowych związanych z eksploatacją linii kolejowych należy emisja hałasu i drgań, zwłaszcza dla kolei dużych prędkości [1, 2, 3, 6]. Europejskie akty normatywne jak i krajowe rozporządzenia ściśle określają wymagania dotyczące prowadzenia pomiarów poziomu hałasu kolejowego [12-14].

Przypadki, w których uznaje się zmierzony sygnał akustyczny za sygnał niespełniający wymogów to:

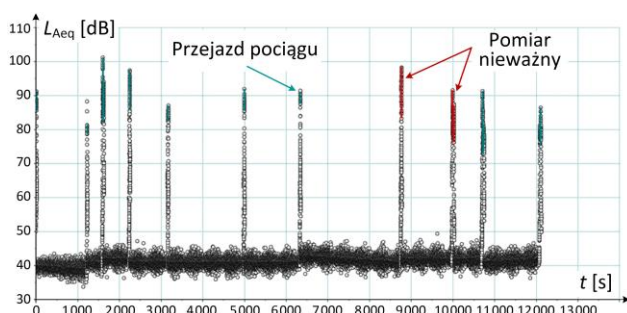
- przejazd dwóch pociągów w tym samym czasie,
- wykonywanie rozruchu bądź hamowania pojazdu szynowego na odcinku badawczym,
- pomiar, w którym hałas tła akustycznego przekracza dopuszczalne wartości graniczne [6, 12] od

zmierzonego poziomu dźwięku wynikającego z przejazdu pociągu,

- pomiar podczas warunków meteorologicznych niezgodnych z wytycznymi zawartymi w [6].

Zastosowana stacja monitoringu hałasu – z miernikiem poziomu dźwięku klasy 1 – rejestruje sygnał akustyczny jako pomiar ciągły zapisując pliki w formacie wav na karcie pamięci SD. W celu określenia czy sygnał został zarejestrowany prawidłowo i czy uznaje się go za sygnał spełniający wymogi [6, 12], wykorzystuje się moduły pomiarowe OSS, w szczególności moduły: S (Start), P (Pojazd) oraz stację meteorologiczną. Istotną jest identyfikacja badanego pojazdu w zarejestrowanym sygnale akustycznym [12].

Na rysunku 4 przedstawiono wybrane wyniki zarejestrowanych pojedynczych zdarzeń akustycznych wynikających z przejazdów pojazdów szynowych. Na wykresie przedstawiono przykładowe wyniki równoważnego poziomu dźwięku z korekcją A z uwzględnieniem sytuacji ruchowych i przypadków, w których analizowany pomiar zostaje uznany za nieważny.



Rys. 4. Przebieg pojedynczych zdarzeń akustycznych (przejazdów pociągów)

Na rysunku 5 przedstawiono wynik sygnału pojedynczego zdarzenia akustycznego reprezentującego przejazd pojazdu szynowego (p. rys. 4) z uwzględnieniem zakresów czasu zbliżania i oddalania się pojazdu z wymaganą różnicą 10 dB oraz zaznaczono zakres użyteczny do dalszej analizy [12]. Linia pozioma to wyznaczony wskaźnik hałasu jakim jest równoważny poziom dźwięku $L_{Aeq, Tp}$ dla zdarzenia akustycznego ważony względem korekcji A [6, 12].

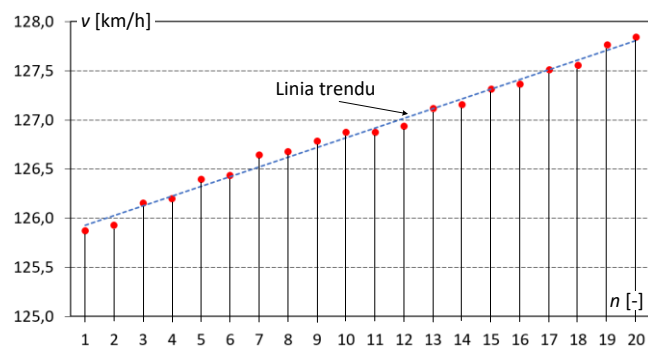


Rys. 5. Wynik obliczenia równoważnego poziomu dźwięku (wskaźnika hałasu) według metodyki opisanej w [12]

Rejestracja wybranych parametrów ruchowych i technicznych pojazdu

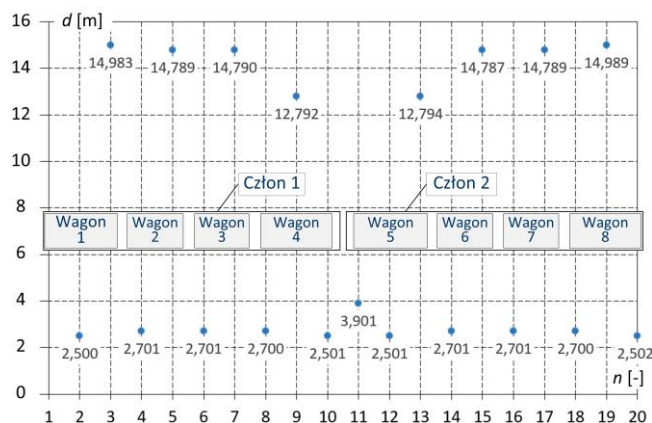
Do parametrów ruchowych pojazdu można między innymi zaliczyć: czas przejazdu, prędkość pojazdu, liczbę osi, liczbę wagonów oraz całkowitą długość. Przykładowe rejestracje parametrów ruchowych przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Rejestracja dokonywana jest przez moduł P, który poprzez dwa czujniki indukcyjne umieszczone przy toku szynowym wykrywa obrzeże kół pojazdu i rejestruje

poziomy ich sygnałów w pamięci mikrokontrolera. Działanie to jest zbliżone do wykorzystywanych w systemie sterowania ruchem kolejowym detektorów kół. Czujniki rozmieszczone są w znanej, kilkumetrowej odległości a zarejestrowany czas detekcji kół pozwala na wyznaczenie prędkości chwilowej dla poszczególnych osi pojazdu. Tak wyznaczana prędkość pozwala na wyliczenie odległości między osiami i określenie wymiarów geometrycznych składu pociągu. Prędkość pociągu na odcinku pomiarowym może się zmieniać. Z zarejestrowanego przejazdu przedstawionego na rysunku 6 wynika, że konieczne jest uwzględnienie prędkości chwilowej w obliczeniach odległości między osiami pojazdu.



Rys. 6. Przykładowa prędkość chwilowa pociągu v (dla każdej z osi pojazdu n) wyznaczona na podstawie danych z modułu P

Wynik wyznaczenia odległości między kolejnymi osiami pociągu przedstawiono na rysunku 7. W tym przypadku mniejsze odległości odpowiadają rozstawowi osi w wózkach. Większe wartości to odległości pomiędzy wewnętrznymi skrajnymi osiami w poszczególnych wagonach. Moduł pomiarowy podaje długość pomiędzy skrajnymi osiami pojazdu – nie jest uwzględniana odległość od osi do skraju bufora. W dalszym przetwarzaniu końcowym z wykorzystaniem bazy danych pojazdów możliwe jest bardziej dokładne wyznaczenie długości pociągu.

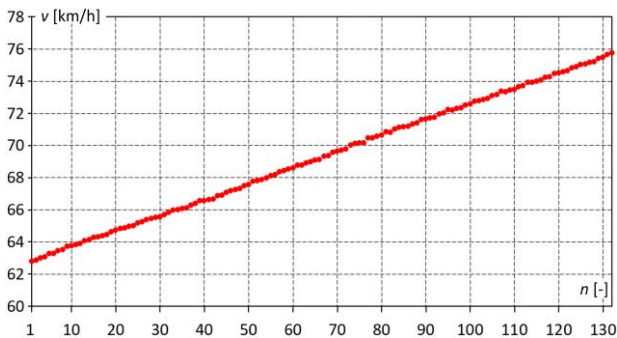


Rys. 7. Odległości d pomiędzy kolejnymi osiami n pojazdu z wyróżnionymi wagonami i członami pociągu

Zidentyfikowany pojazd to dwuczłonowy elektryczny zespół trakcyjny o ośmiu wagonach typu Flir i oznaczeniu ED160 w układzie 20 osi Bo'2'2'2'2'+2'2'2'2'Bo'. Rozstaw nominalny osi wózków napędnych i tocznych wynosi 2500 mm, a wózków międzywagonowych Jakobsa 2700 mm. Orientacyjne długości wagonów zespołu to: skrajne wagony silnikowe – 15,0 m, wagony środkowe – 14,82 m, a wagony końcowe – 12,86 m. Nominalna długość

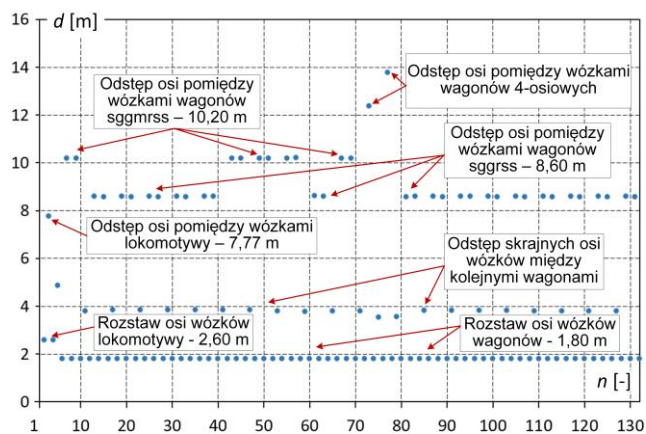
zespołu trakcyjnego wynosi 152,9 m, zaś wyznaczona z pomiarów i dodaniem wymiaru od osi do skraju bufora – 152,99 m. Poszczególne wymiary pomiędzy osiami zestawów kołowych różnią się od wymiarów nominalnych w zakresie kilku centymetrów.

Przykładową bardziej złożoną rejestrację przejazdu długiego składu pociągu z lokomotywą i 22 wagonami przedstawiono na rysunkach 8 i 9. Na rysunku 8 widoczna jest prędkość wszystkich 132 osi pojazdu. W tym przypadku pojazd przyspiesza i jego prędkość znacząco się zmienia na odcinku pomiarowym.



Rys. 8. Zarejestrowana prędkość chwilowa v długiego składu pociągu (dla każdej z 132 osi pojazdu n) wyznaczona na podstawie danych z modułu P

Zidentyfikowany pojazd to czteroosiowa lokomotywa E186 ciągnąca 22 wagony platformy w kolejności: 1 x 6-osiowy typu sggmrss, 5 x 6-osiowy sggrrs, 3 x 6-osiowy sggmrss, 6-osiowy sggrrs, 6-osiowy sggrrs, 4-osiowy sgnss, 4-osiowy, 9 x 6-osiowy sggrrs. Znamionowy rozstaw osi wózków lokomotywy wynosi 2,600 m, a rozstaw osi czopów skrzętu 10440 mm. Wartości zmierzone to odpowiednio 2,60 m oraz 10,37 m. W przypadku wagonów wszystkie mają znamionowy rozstaw osi wózków równy 1,800 m. Na 64 zarejestrowane wózki średnia zmierzona wartość rozstawu wynosi 1,80 m z odchyleniem standardowym 2 mm. Wybrane wymiary charakterystyczne wagonów i ich typy podano na rysunku 9.

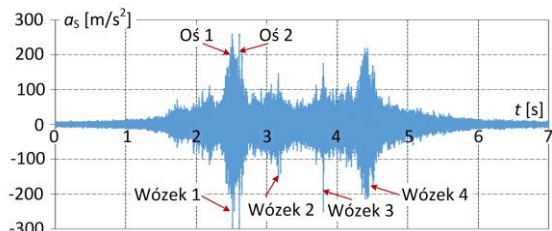


Rys. 9. Odległości d pomiędzy kolejnymi osiami n dla pociągu towarowego z lokomotywą i 22 platformami wagonowymi

Porównanie wymiarów lokomotywy i wagonów na podstawie dokumentacji technicznej oraz wyników pomiarów pokazuje, że uwzględniając prędkość chwilową poszczególnych osi pojazdu szynowego, można z dobrą dokładnością wyznaczyć wymiary składu pociągu.

Rejestracja drgań szyny, gruntu i obiektów w otoczeniu linii kolejowej

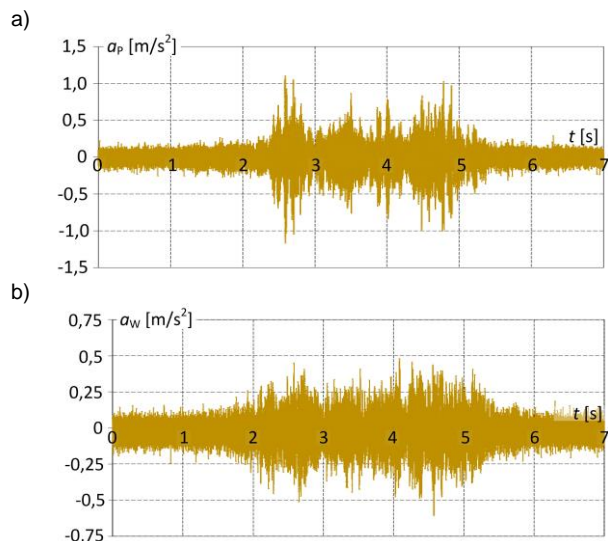
Zadaniem modułu drgań szyny D-S jest wykrycie defektów kół pojazdu, które mogą wywoływać nadmierny hałas. W szczególności dotyczy to tzw. płaskich miejsc na kole (uszkodzenia powierzchni tocznej koła) mogących generować duże obciążenia uderzeniowe szyny. Na rysunku 10 przedstawiono przyspieszenie w osi pionowej zarejestrowane za pośrednictwem jednoosiowego akcelerometru MEMS zamontowanego do stopki szyny podczas przejazdu pociągu SA-136. Widać wyraźną korelację występowania impulsów przyspieszenia z obecnością osi pojazdu.



Rys. 10. Przyspieszenie pionowe stopki szyny podczas przejazdu pociągu SA-136 z prędkością 24,4 m/s

W docelowym układzie pomiarowym D-S zostanie zainstalowany zestaw 8 akcelerometrów na każdym toku szynowym, między kolejnymi podkładami, co pozwoli wykryć punktowe defekty na całym obwodzie kół pojazdu.

Drgania mechaniczne generowane są na styku kół pojazdu z szyną i propagują przez konstrukcję nawierzchni oraz podtorza do podłoża gruntowego, oddziałując na otoczenie linii kolejowej, w tym istniejące obiekty budowlane [3]. W celu określenia wielkości tych drgań wykorzystano moduł D-G, zbudowany analogicznie jak D-S, ale wyposażony w trójosiowe akcelerometry MEMS. Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe drgania gruntu w otoczeniu linii kolejowej zarejestrowane przez moduł D-G.



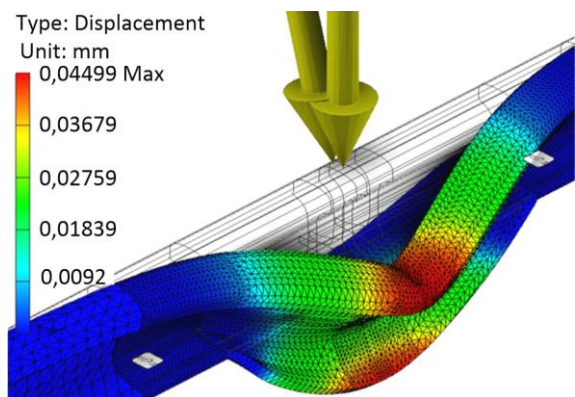
Rys. 11. Przyspieszenie gruntu w odległości 7,5 m od linii kolejowej podczas przejazdu szynobusa SA-136 z prędkością 24,4 m/s: a) w osi poprzecznej do toru; b) w osi wzdłużnej względem toru

Widoczna jest zbieżność sygnałów drgań gruntu i szyny, przy czym drgania gruntu wzdłuż osi toru są znacznie słabiej słyszalne. W przetwarzaniu końcowym (ang. post processing) można uzyskać wskaźniki analizy trójowej drgań [2].

Szacowanie masy pojazdu

Zagadnienie nacisków kół pojazdów na szyny związane jest bezpośrednio z masą konstrukcyjną pojazdu oraz z masą jego ładunku. Problem wyznaczenia masy pojazdu w trakcie jego ruchu jest szeroko opisywany w literaturze i określane skrótem WIM (ang. Weight in Motion) [15,16]. W ramach projektu opracowywany jest układ pomiarowy monitorujący efekty oddziaływania kół na szynę (w konkretnym punkcie pomiarowym) w trakcie przejazdu pociągu z jego rozkładową prędkością. Układ pomiarowy oraz algorytm przetwarzania przebiegów sygnałów z sensorów muszą uwzględniać złożoność zjawiska obciążenia toru. Przyjęta przez autorów metoda oszacowania masy przypadającej na przejeżdżające osie polega na pomiarze przemieszczenia względnego głowki szyny w stosunku do jej stopki – umownie określona mianem ściśnięcia szyny. W celu doboru odpowiednich sensorów i ich zakresu przeprowadzono symulacje statyczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES).

Na rysunku 12 pokazano wyniki komputerowych badań symulacyjnych obciążenia modelu szyny ułożonej na podkładach podczas statyczną siłą o stosunkowo niewielkiej składowej pionowej ($F_y = 29,6$ kN) i znacznie mniejszej składowej poprzecznej ($F_x = 3,44$ kN). Pod wpływem zadanego obciążenia głowka szyny względem stopki podlega asymetrycznemu przemieszczeniu. Obserwowane (symulowane) przemieszczenia względne doprowadziły do zaprojektowania układu sensorów (wraz z montażem) umożliwiających rejestrację sygnału przemieszczeń głowki po obydwu stronach toku szynowego.



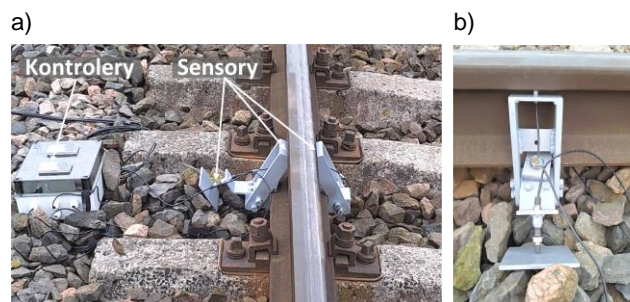
Rys. 12. Wynik symulacji odkształcenia szyny (mapa kolorów) przy uwzględnieniu działania wektora siły o składowej pionowej i poprzecznej

Przeprowadzona analiza wyników symulacji MES pozwoliła oszacować rozdzielczość pomiarową sensorów na poziomie 1 μm . Taką rozdzielczość zapewniają wybrane do prototypu modułu M sensory indukcyjne działające na zasadzie generacji prądów wirowych w obiekcie pomiarowym.

Prototyp modułu M, w skład którego wchodzi: kontrolery modułu, uchwyt mechaniczny do montażu sensorów, sensory do pomiaru ściśnięcia szyny pod obciążeniem kołem kolejowym oraz sensor do pomiaru ugięcia szyny ugięcia szyny względem podłoża (podsypki) pokazano na rysunku 13.

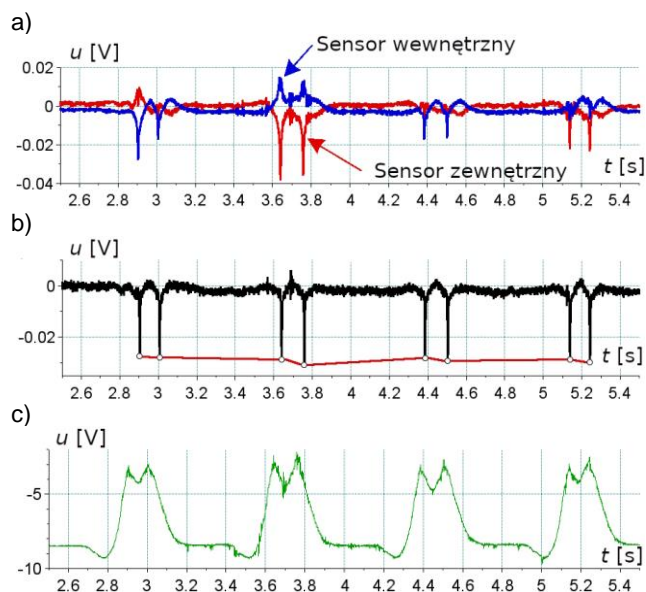
Na rysunku 14 przedstawiono przebiegi elektrycznych sygnałów pomiarowych z czujników wiropędowych podczas przejazdu pociągu typu SA-136 (szynobus) o masie służbowej 108 t i długości 55,57 m. Ekstremalne lokalne przebiegi wskazują na chwilę przejazdu koła nad czujnikami. Widoczne różnice czasów między impulsami są

związane z różnymi wymiarami wózków skrajnych i wózków międzywagonowych szynobusu. Uzyskano zakładaną precyzję pomiarów.



Rys. 13. Widok zestawu pomiarowego dla jednego toku szynowego: a) trzy sensory indukcyjne, kontrolery, okablowanie oraz uchwyt mechaniczny; b) widok sensorów w uchwycie mechanicznym

Algorytm oceny wypadkowej siły nacisku uwzględnia sygnały z dwóch sensorów nacisku umieszczonych symetrycznie po obu stronach toku szynowego. Dodatkowo rejestrowany jest sygnał z sensora ugięcia. Umożliwia to obserwację wpływu składowej wertykalnej i horyzontalnej siły nacisku na stan odkształcenia szyny w czasie przejazdu koła nad punktem pomiarowym. Odpowiednim wskaźnikiem jest suma obydwu sygnałów, która niweluje wpływ zginania profilu szyny.



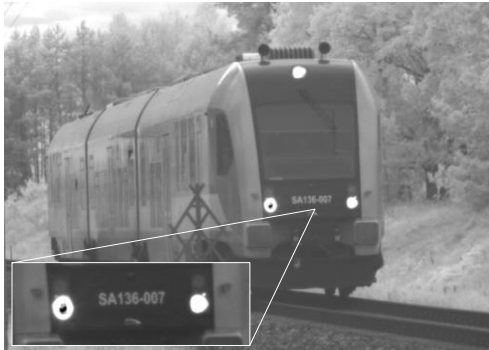
Rys. 14. Przebieg elektrycznych sygnałów pomiarowych z czujników wiropędowych modułu szacowania masy: a) sygnały ściśnięcia; b) suma sygnałów czujników ściśnięcia; c) sygnał ugięcia toku szynowego

Układ pomiarowy wymaga odpowiedniej kalibracji. Dla szacowania masy i wykrywania stanów anormalnych wystarczające będzie skalowanie dla wszystkich osi pociągu z uwzględnieniem znanych nacisków pojazdów trakcyjnych stanowiących wzorzec.

Rejestracja wideo pojazdu

Zadaniem urządzenia Wideo (kamery) jest rejestracja obrazu pojazdu szynowego, w celu późniejszej identyfikacji jego typu poprzez analizę obrazu. Wykorzystano kamerę Basler NIR (ang. Near-Infrared) o rozdzielczości 4 MPix wraz z obiektywem oraz dolnoprzepustowym filtrem optycznym. Kamera pracuje w paśmie podczerwonym, aby

zminimalizować zaburzający wpływ reflektorów pojazdu na jakość rejestrowanego obrazu. Dzięki temu światło reflektorów czołowych nie powoduje prześwietlenia rejestrowanego obrazu, co przekłada się na możliwość poprawnego odczytania numeru pojazdu szynowego. Przykładowy obraz pojazdu wraz z powiększonym fragmentem obejmującym jego serię i numer pokazano na rysunku 15.



Rys. 15. Obraz pojazdu szynowego zarejestrowany w paśmie podczerwieni kamerą NIR wraz z powiększonym fragmentem zawierającym jego serię i numer

Podsumowanie

Realizowany projekt wpisuje się w nowe trendy badawcze obejmujące obszarowe pomiary z wykorzystaniem wielopunktowych, a także wektorowych bądź hybrydowych układów sensorowych.

System pomiarowo-informatyczny charakteryzuje się: skalowalnością w zakresie możliwości stosowania jej na rozległych obszarach sieci kolejowej, pozyskiwaniem informacji w lokalizacjach charakteryzujących się różnorodną topografią obszaru, ciągłością informacji obszarowej, automatyczną analizą sygnałów pomiarowych z estymacją parametrów technicznych/ruchowych i środowiskowych związanych z lokalizacją pomiaru i z prowadzonym ruchem pociągów, wskazaniem poziomu drgań i hałasu generowanych przez ruch kolejowy na pobliskie obiekty budowlane, wspomaganie decyzji na podstawie syntetycznych wskaźników oceny.

Z wstępnych badań systemu monitoringu na linii kolejowej uzyskano adekwatne sygnały pomiarowe, których synchronizacja wskazuje na wzajemną korelację między innymi hałasu, drgań i zestawów kołowych pojazdów. Analiza tych sygnałów pozwala nie tylko na ocenę wpływu pociągów na środowisko, ale także na wykrycie przekroczeń normatywnych dla poszczególnych wagonów czy zestawu kołowego w składzie pociągu.

Informacja o projekcie: projekt pt. „System precyzyjnego monitorowania oddziaływania ruchu kolejowego na środowisko z uwzględnieniem informacji o danych ruchowych, technicznych i środowiskowych” realizowany jest w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia NCBR – PKP PLK S.A. pn. „Badania i Rozwój w Infrastrukturze Kolejowej – BRIK2” w okresie od 1.11.2022 do 31.10.2025 r.; akronim projektu: InfraNoise

Autorzy:

dr hab. inż. Piotr Chrostowski, E-mail: piotr.chrostowski@pg.edu.pl; dr hab. inż. Andrzej Wilk, E-mail: andrzej.wilk@pg.edu.pl; dr inż. Sławomir Grulkowski, E-mail: slawomir.grulkowski@pg.edu.pl; dr inż. Roksana Licow, E-mail: roksana.licow@pg.edu.pl; dr hab. inż. Michał Michna, E-mail: michal.michna@pg.edu.pl, dr hab. inż.

Leszek Jarzębowski, E-mail: leszek.jarzebowski@pg.edu.pl, dr hab. inż. Jacek Skibicki, E-mail: jacek.skibicki@pg.edu.pl; dr inż. Sławomir Judek, E-mail: slawomir.judek@pg.edu.pl; dr hab. inż. Krzysztof Karwowski, E-mail: krzysztof.karwowski@pg.edu.pl; dr inż. Marek Szafranski, E-mail: marek.szafranski@pg.edu.pl; dr inż. Tadeusz Widerski, E-mail: tadeusz.widerski@wilis.pg.gda.pl; dr inż. Karol Daliga, E-mail: karol.daliga1@pg.edu.pl; inż. Paweł Bawolski, E-mail: pawel.bawolski@pg.edu.pl; mgr inż. Natalia Karkosińska-Brzozowska, E-mail: natalia.brzozowska@pg.edu.pl. Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12 80-233 Gdańsk

LITERATURA

- [1] Yan H., Xie S., Jing K., Feng Z.: A Review of Recent Research into the Causes and Control of Noise during High-Speed Train Movement. *Appl. Sci.* 2022, 12, 7508. <https://doi.org/10.3390/app12157508>
- [2] Thompson D., Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling and Means of Control, *Elsevier* 2024. ISBN: 9780128219799
- [3] Shao Z., Bai W., Dai J., Yu H., Tong Y., Monitoring and analysis of railway-induced vibration and structure-borne noise in a transit oriented development project, *Structures*, Volume 57, 2023, 105097, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105097>
- [4] Alsina-Pagès R.M., Bellucci P., Zambon G., Smart Wireless Acoustic Sensor Network Design for Noise Monitoring in Smart Cities. *Sensors* 2020, 20. <https://doi.org/10.3390/s20174765>
- [5] Wróblewska D.: Techniczne specyfikacje interoperacyjności dotyczące hałasu od pojazdów kolejowych. *Technika Transportu Szynowego*, 4/2007
- [6] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem (Dz.U. 2011 nr 140 poz. 824)
- [7] Wróbel J., Bury P., Zając M., Kierzkowski A., Tubek S., Blaut J., Fault Detection and Diagnostic Methods for Railway Systems – A Literature Survey, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(6), 361–391. <https://doi.org/10.12913/22998624/191762>
- [8] Ghiasi R., Lestoille N., Diaine C., Malekjafarian A., Unsupervised domain adaptation for drive-by condition monitoring of multiple railway tracks, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 139, Part A, 2025, 109516, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109516>
- [9] Aela P., Cai J., Jing G., Chi H.L., Vision-based monitoring of railway superstructure: A review, *Construction and Building Materials*, Volume 442, 2024, 137385, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137385>
- [10] Licow R.: Ocena uszkodzeń powierzchni tocznej szyn kolejowych za pomocą zjawisk wibroakustycznych. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2018
- [11] Skibicki J., Wizyjne metody pomiarowe w diagnostyce górnej sieci trakcyjnej. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2018. ISBN 978-83-7348-746-8
- [12] EN ISO 3095: 2014 Acoustics - Railway applications - Measurement of noise emitted by railbound vehicles, 2014
- [13] Głodek K., Makosz E., Dudzikowski Ł., Kowalczyk K., Bereda A., Kuta G.: Strategiczna mapa hałasu dla odcinków linii kolejowych, po których przejeżdża ponad 30 000 pociągów rocznie, *PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.*, Warszawa, 2022
- [14] Rosin C., Sineau M., Regairaz J.P., Cordoliani T., Railway noise monitoring – a tool to analyse in detail the evolution of noise over time, 10th Convention of the European Acoustics Association. Turin, Italy 11th – 15th September 2023, 225, <https://doi.org/10.61782/fa.2023.0726>
- [15] Zakharenko, M.; Frøseth, G.T.; Rönnquist, A. Train Classification Using a Weigh-in-Motion System and Associated Algorithms to Determine Fatigue Loads. *Sensors* 2022, 22, 1772. <https://doi.org/10.3390/s22051772>
- [16] Sujon M., Dai F., Application of weigh-in-motion technologies for pavement and bridge response monitoring: State-of-the-art review, *Automation in Construction*, Volume 130, 2021, 103844. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103844>