

Wykorzystanie współczesnych technologii do dynamicznych pomiarów w kolejnictwie

The use of modern technologies for dynamic measurements in railway infrastructure



Rafał Sienko

Dr inż.

Politechnika Krakowska / Wydział Inżynierii Lądowej, Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych

rafal.sienko@pk.edu.pl
ORCID: 0000-0002-2751-7558



Łukasz Bednarski

Dr inż.

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie / Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Katedra Mechaniki i Wibroakustyki

lukasz.b@agh.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5404-9921



Tomasz Howiacki

Dr inż.

Politechnika Krakowska / Wydział Inżynierii Lądowej, Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych

tomasz.howiacki@pk.edu.pl
ORCID: 0000-0002-6833-7203



Szymon Długosz

Mgr inż.

SHM System / Nerve-Sensors

sd@shmsystem.pl
ORCID: 0009-0005-1626-366X

Streszczenie: Kolej jest jednym z podstawowych środków transportu, którego historia sięga stuleci. Umożliwia przemieszczanie ludzi i towarów na setki, a nawet tysiące kilometrów. Tak rozbudowany system powinien opierać się nie tylko na precyzyjnej synchronizacji i doskonałej organizacji, ale także na niezawodnym monitorowaniu infrastruktury, które zapewni jej bezpieczeństwo oraz prawidłowe funkcjonowanie. W artykule przedstawiono przykład zastosowania różnych technologii pomiarowych na eksploatowanej linii kolejowej, obejmujących metody punktowe, quasi-ciągłe oraz w pełni rozłożone (geometrycznie ciągłe). Połączenie kilku rozwiązań diagnostycznych w jednym systemie pozwala uzyskać kompleksowy obraz pracy toru zarówno w czasie, jak i wzdłuż jego długości. Zaprezentowano i omówiono praktyczne aspekty instalacji oraz przykładowe wyniki pomiarów.

Słowa kluczowe: Kolej; Diagnostyka; Pomiary; Światłowody; Czujniki

Abstract: Railways are one of the fundamental modes of transport, with a history spanning centuries. They enable the movement of people and goods over hundreds and even thousands of kilometres. Such an extensive system should rely not only on precise timing and excellent organisation, but also on reliable monitoring of the infrastructure to ensure its safety and performance. This article presents an example of applying various measurement technologies on an operational railway line, including spot, quasi-continuous and fully distributed approaches. The combination of different diagnostic solutions within a single system provides a comprehensive picture of rail performance in both the time and spatial domains. Practical installation insights and illustrative results are presented and discussed.

Keywords: Railway; Diagnostics; Measurements; Fibre optics; Sensors

Wstęp

Kolej jest jednym z podstawowych środków transportu, którego historia sięga stuleci. Umożliwia przemieszczanie się ludzi i towarów na setki, a nawet tysiące kilometrów. Rozbudowane sieci tras kolejowych na dużych obszarach sprawiają, że są one szczególnie narażone na różnego rodzaju trudne do natychmiastowego wykrycia oddziaływania, zarówno naturalne (np. osuwiska, osiadanie nasypu, postępująca degradacja

materiałowa) jak i ludzkie (np. akty sabotażu). W trakcie eksploatacji linie kolejowe narażone są na trudne warunki atmosferyczne potęgowane współcześnie postępującymi zmianami klimatu, gwałtowne zmiany temperatury, nierównomierne osiadanie podłoża czy też istotne obciążenia pionowe i poziome generowane przez pociągi poruszające się z coraz większymi prędkościami. Oddziaływanie takich czynników może prowadzić do zmian geometrii toru, postępującej degradacji torowiska a w

wielu przypadkach także uszkodzeń, wpływających nie tylko na komfort pasażerów, ale przede wszystkim na ich bezpieczeństwo. Konsekwencje katastrof kolejowych są ogromne - obejmują utratę zdrowia i życia ludzi, ale także skażenie środowiska i zniszczenie infrastruktury krytycznej.

Tak rozbudowany system powinien opierać się nie tylko na precyzyjnej synchronizacji i doskonałej organizacji, ale także na niezawodnym monitorowaniu, zapewniającym bezpieczeństwo oraz

prawidłowe funkcjonowanie. Dlatego tak ważna jest odpowiednia kontrola i diagnozowanie potencjalnych niebezpieczeństw [9] w czasie rzeczywistym.

W niniejszym artykule przedstawiono przegląd współczesnych technologii pomiarowych na przykładzie rzeczywistej realizacji, która ze względu na swój zakres, rodzaj zastosowanych czujników oraz zautomatyzowany proces instalacji, jest jedną z największych i najbardziej innowacyjnych tego typu na świecie [7]. Projekt został zrealizowany w w. świętokrzyskim, a pierwsze pomiary wykonano na początku 2023 r. System zaprojektowano na potrzeby długoterminowej oceny stanu technicznego linii kolejowej pracującej w trybie normalnej eksploatacji w czasie zmieniających się warunków zewnętrznych, w tym ekstremalnie dużych gradientów temperatur (rzędu 80°C w skali roku), ale także do krótkotrwałych pomiarów dynamicznych w czasie przejazdów pociągów z różnymi prędkościami (w zakresie od 160 do 250 km/h). Ponadto, wykorzystano trzy wzajemnie uzupełniające się, niezależne techniki pomiarowe, obejmujące czujniki punktowe (instalowane w wybranych punktach szyny), quasi ciągłe (czujniki punktowe połączone szeregowo w obrębie wspólnej linii pomiarowej) oraz czujniki geometryczne ciągłe, pozyskujące informacje na całej

długości monitorowanego odcinka [2].

Tak zaprojektowany system hybrydowy maksymalizuje jakość uzyskiwanych danych pomiarowych oraz zwiększa niezawodność (redundancję) i wiarygodność informacji m.in. poprzez możliwość porównania uzyskanych wyników. Schemat działania poszczególnych technik pomiarowych przedstawiono na Rys. 1.

Zastosowane technologie pomiarowe

Do budowy systemu hybrydowego wykorzystano następujące technologie pomiarowe:

- punktowe akcelerometry piezoelektryczne [9], realizujące pomiary przyspieszeń drgań [m/s²] w wybranych lokalizacjach na długości – łącznie 8 czujników montowanych na magnesie od spodu stopki szyny na potrzeby pomiarów krótkotrwałych,
- quasi-ciągłe światłowodowe siatki Bragga FBG (ang. *Fibre Bragg Gratings* [1], [3]), rozmieszczone punktowo w ramach wspólnych linii pomiarowych (łącznie 24 siatki rozmieszczone co 2 m na długości ponad 20 m w dolnej i górnej części szyny, trwale połączone z jej powierzchnią), realizujące dynamiczne

pomiary odkształceń [με],

- monolityczne, geometrycznie ciągłe czujniki światłowodowe DFOS (ang. *Distributed Fibre Optic Sensing* [4]), zainstalowane bezpośrednio do powierzchni szyjki szyny. Łączna długość zastosowanych czujników wynosi 2200 m, przy czym trasy składają się z czujnika dolnego i górnego w rozstawie 50 mm.

Niewątpliwą zaletą czujników DFOS jest możliwość podpięcia ich do różnych rejestratorów optycznych (interrogatorów) w celu symultanicznych pomiarów różnych wielkości fizycznych [5]. Dzięki odpowiedniemu rozmieszczeniu czujników oraz zdefiniowaniu odpowiednich modeli fizycznych, możliwy jest pomiar/wyznaczenie następujących wielkości: odkształceń [με], temperatur [°C], krzywizn [1/m] i przemieszczeń [mm]. Wśród podsystemów DFOS, na szczególną uwagę zasługuje DAS (ang. *Distributed Acoustic Sensing*) [6], umożliwiający pomiar prędkości zmian odkształceń z ekstremalnie wysoką czułością [nε/s], z rozdzielczością przestrzenną od 1 [m], z częstotliwością rzędu 40 kHz oraz na odcinkach ponad 100 km. Dzięki temu możliwa jest nie tylko analiza dynamiczna zachowania się toru w czasie przejeżdżających pociągów, ale także identyfikacja potencjalnie niebezpiecznych źródeł drgań zewnętrznych (np. aktów sabotażu). Drgania od przechodzących wokół torowiska ludzi przenoszą się bezpośrednio na szynę z przyklejonym czujnikiem i mogą zostać wykryte przez system w czasie rzeczywistym.

Zestawienie zastosowanych technologii wraz z podsumowaniem ich podstawowych możliwości przedstawiono w Tab. 1.

Omówione technologie zainstalowane bezpośrednio w obrębie szyny wspomagane były automatycznymi kątomierzami dwukierunkowymi rozstawionymi co 25 m w obrębie nasypu na długości monitorowanego odcinka oraz ręcznymi pomiarami inklinometrycznymi (do wyznaczenia przemieszczeń poziomych) z wykorzystaniem dedykowanych przewodnic pionowych rozmieszczonych co 100 m. Techniki te nie są jednak przedmiotem niniejszego artykułu.



1. Schemat działania czujników punktowych, quasi-ciągłych oraz geometrycznie ciągłych DFOS (ang. distributed fibre optic sensing)

Tab. 1. Zestawienie technologii pomiarowych wykorzystanych do diagnostyki toru kolejowego w ramach przedmiotowego projektu

Technologia	Mierzona wielkość fizyczna	Rodzaj pomiarów			Częstotliwość pomiarów	
		Punktowe	Quasi-ciągłe	Geometrycznie ciągłe	Pomiary statyczne	Pomiary dynamiczne
Akcelerometry piezoelektryczne	Przyspieszenie (m/s ²)	X			X	
Światłowodowe siatki Bragga FBG	Odształcenie (με)	X	X		X	X
Geometrycznie ciągłe czujniki światłowodowe DFOS	Odształcenie (με) Prędkość zmian odkształcenia (nε/s) Temperatury (°C) Przemieszczenia (mm)	X	X	X	X	X

Instalacja

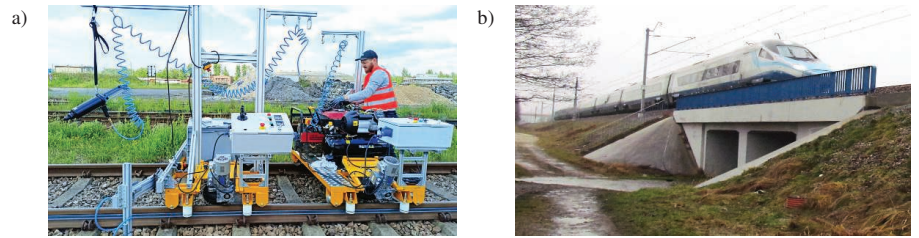
Czujniki światłowodowe DFOS zostały dostarczone na miejsce instalacji w odcinkach zwiniętych w kręgi i docelowo połączone ze sobą w jedną długą pętlę (istnieje możliwość szeregowego łączenia ze sobą czujników w celu m.in. ograniczenia liczby kanałów pomiarowych). Wykorzystano czujniki EpsilonFlat [11] mające formę kompozytowych płaskowników o przekroju poprzecznym 6,5 x 2,5 mm ze zintegrowanymi w ich wnętrzu światłowodowymi włóknami pomiarowymi (Rys. 2).

Z uwagi na konieczność klejenia ponad 2 km czujników przy ograniczonym czasowo dostępie oraz ze względu na trudne dla pracy ręcznej warunki (niewielka odległość szyny od tłoczni kolejowego), opracowano w tym celu odpowiednie procedury oraz specjalistyczną platformę (Rys. 3a), umożliwiającą automatyzację procesu instalacji. Uzyskana prędkość klejenia wynosiła ok. 200 m/h, znacząco przyspieszając prace instalacyjne, ale także zapewniając odpowiednią precyzję położenia czujników liniowych na długości. Pomiar odkształceń osiowych wymaga dobrego zespolenia czujnika z monitorowym elementem. Dlatego powierzchnia szyny została wcześniej odpowiednio oczyszczona z wykorzystaniem strumienia wody pod ciśnieniem. Warto podkreślić, że wzorem polskiego przykładu analogiczna instalacja została zrealizowana w Niemczech, a prace przygotowawcze trwały już w Anglii i na Tajwanie.

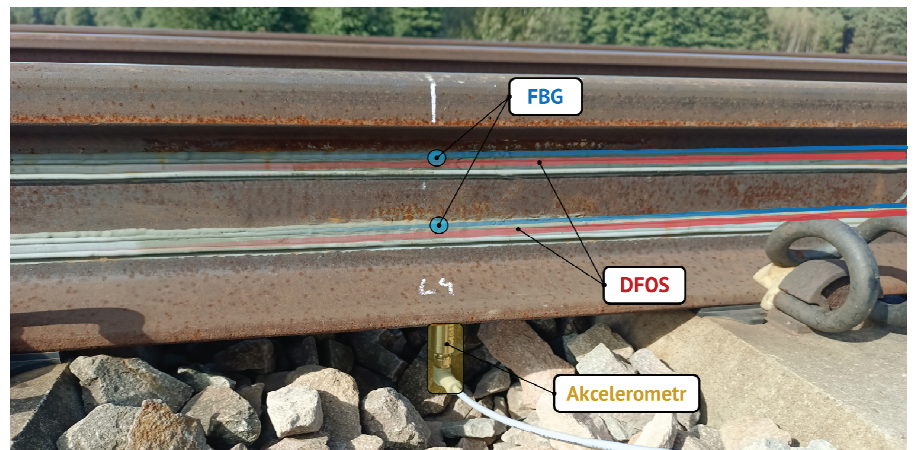
Jednym z zagadnień podejmowanych w ramach projektu była analiza strefy przejściowej (potencjalnie uskokowej) pomiędzy nasypem oraz betonowym obiektem mostowym w ciągu monitorowanego odcinka (Rys. 3a). Dlatego w tym obszarze zainstalowane zostały dodatkowo (w sposób ręczny) 24 światłowodowe siatki Bragga połączone ze sobą szeregowo w obrębie czterech linii pomiarowych: dwie zlokalizowane były bezpośrednio nad dolnym czujnikiem DFOS, a dwie kolejne nad górnym. Do klejenia czujników światłowodowych (zarówno DFOS jak i FBG) wykorzystano dwuskładnikową żywicę poliuretanową, zweryfikowaną uprzednio w warunkach laboratoryjnych. Ponadto, w wybranych punktach w obrę-



2. Wizualizacja światłowodowego czujnika monolitycznego EpsilonFlat [11]



3. a) Platforma do automatycznego klejenia czujników światłowodowych do powierzchni szyny; b) widok betonowego obiektu mostowego w ciągu monitorowanego odcinka



4. Zbliżenie na fragment szyny z zainstalowanymi trzema rodzajami czujników

bie strefy przejściowej, przymocowano na magnesach osiem akcelermetrów od strony dolnej powierzchni stopki. Zbliżenie na obszar szyny z zainstalowanymi wszystkimi typami czujników przedstawiono na Rys. 4.

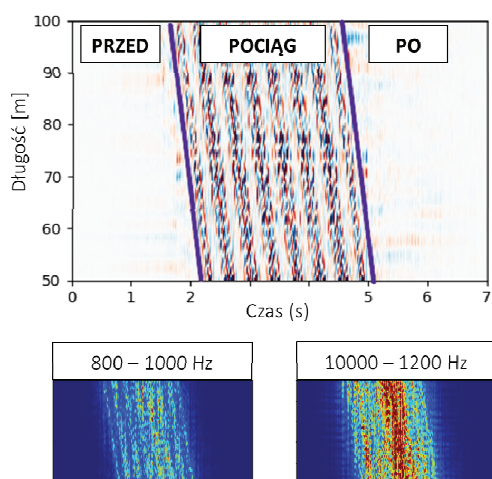
Przykładowe wyniki pomiarów

Dane surowe rejestrowane przez interogatory DAS mają postać macierzy prędkości zmian odkształceń (ang. *strain rate*) zarówno w funkcji czasu, jak i długości. Cały monitorowany odcinek podzielić można na ciąg połączonych ze sobą szeregowo (przylegających do siebie) baz pomiarowych, reprezentowanych w ich środkach przez wartości dyskretne stanowiące średnią z danej bazy. Całkowanie sygnału w czasie umożliwia zrekonstruowanie wartości odkształceń względem stałego pomiaru zerowego (np. zdefiniowanego przed przejazdem) – wielkości bardziej intuicyjnej z inżynierskiego punktu widzenia i łatwiejszej w interpretacji w porównaniu do prędkości zmian odkształceń.

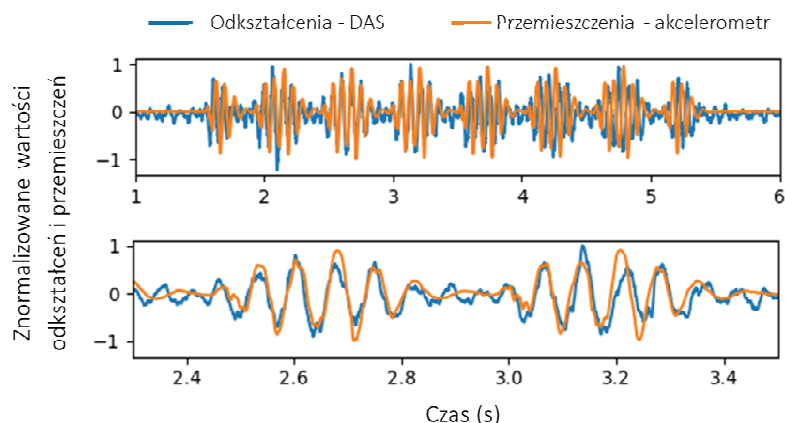
Zarejestrowany sygnał dostarcza wy-

sokiej jakości informacji o procesach dynamicznych zachodzących w szynie podczas przejazdu pociągu dużych prędkości. W głównej części sygnału (strefie bezpośredniego przejazdu), osiem skośnych linii na mapie (Rys. 5) przedstawia momenty w czasie (oś pozioma), w których wózki kolejowe znajdowały się w konkretnych lokalizacjach wzdłuż szyny (oś pionowa). Liczba linii odpowiada liczbie wózków. Puste przestrzenie między liniami odzwierciedlają przesła poszczególnych wagonów pomiędzy kolejnymi wózkami. Wyróżnić też można dwie strefy: przed (ang. *bow*) i po (ang. *tail*) przejeździe pociągu, odpowiadające znacznie mniejszym drganiom parasejsmicznym rozchodzącym się wzdłuż szyny.

Ze względu na dynamiczny charakter sygnału możliwe jest stosowanie dowolnych klasycznych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów. Przykładowo, głębsze zrozumienie danych można uzyskać poprzez zastosowanie analizy energii pasmowej FBE (Frequency Band Energy). Metoda ta umożliwia porównanie poziomów energii w określonych



5. Przykładowy sygnał DAS (skala kolorów ± 3000 nε/s) w czasie przejazdu pociągu wraz z wizualizacją w różnych pasmach częstotliwości



6. Porównanie znormalizowanych wartości odkształceń [$\mu\epsilon$] i przemieszczeń [mm] wyznaczonych na podstawie przyspieszeń [m/s^2] w trakcie przejazdu pociągu

pasmach częstotliwości. Energia dysonkretnego sygnału o skończonym czasie trwania, jest sumą kwadratów wartości bezwzględnej sygnału w odpowiednich granicach czasu. Takie podejście umożliwia identyfikację charakterystycznych wzorców na podstawie ich właściwości widmowych oraz zapewnia czytelną wizualizację wyników. Gdy pociąg porusza się po torze, oprócz zmian mechanicznych powstają również inne zjawiska generujące hałas akustyczny. Główne źródła tego hałasu to urządzenia pokładowe pociągu, system hamowania oraz – w największym stopniu – interakcja koła z szyną. Większość tych zjawisk koncentruje się w zakresie częstotliwości powyżej 500 Hz [10]. Jednak mechaniczne drgania wywołane hałasem mają postać fal o małej amplitudzie i dużym tłumieniu, co oznacza, że nie wpływają istotnie na stan mechaniczny szyny. Autorzy przeanalizowali empirycznie całe widmo częstotliwościowe i ustalili, że zakres $<0; 2,5>$ kHz jest najbardziej istotny.

Wyniki pomiarów dynamicznych zmian odkształceń DAS można porównać z niezależnymi akcelerometrami. Biorąc pod uwagę hipotezę Bernoulliego – zakładającą, że przekroje płaskie pozostają płaskie i prostopadłe do osi obojętnej po odkształceniu – wynika z niej, że przemieszczenia pionowe oraz odkształcenia podłużne są ze sobą jednoznacznie powiązane. W przypadku stalowych szyn pracujących w zakresie małych przemieszczeń ($< 1,5$ mm), założenie to jest szczególnie dobrze spełnione, również ze względu na wysoką

sztywność i jednorodność stali. Przyspieszenia drgań zmierzone za pomocą akcelerometrów zostały poddane dwukrotnemu całkowaniu względem czasu, aby uzyskać wartości przemieszczeń pionowych w określonych punktach. Ponieważ porównywane wielkości są proporcjonalne, lecz dokładny współczynnik proporcjonalności nie jest w praktyce znany, porównano wartości znormalizowane, osiągając bardzo wysoki stopień korelacji – Rys. 6.

Siatki Bragga rejestrowały dynamiczne odkształcenia w dolnej i górnej linii z częstotliwością równą 1000 Hz. Na podstawie uzyskanych w terenie danych pomiarowych, a także z wykorzystaniem zbudowanego modelu numerycznego obiektu mostowego (uwzględniającego m.in. dwuprzęsłowy schemat statyczny), możliwe było wyznaczenie rozkładów przemieszczeń pionowych (ugięć toku szynowego) w trakcie przejazdu pociągu. Przykładową wizualizację wyników dla wybranej chwili czasowej (wybranego położenia pociągu względem obiektu mostowego) przedstawiono na Rys. 7. Na górnym wykresie widoczny jest profil przemieszczeń pionowych, lokalizacja pociągu (początek składu) oraz przyjęte warunki brzegowe. Z kolei dolny wykres przedstawia historię zmian odkształceń liczoną od momentu wjazdu do wybranej chwili czasowej. Przeprowadzona analiza umożliwia interpretację deformacji przęsła mostu, ale także sposobu pracy stref przejściowych.

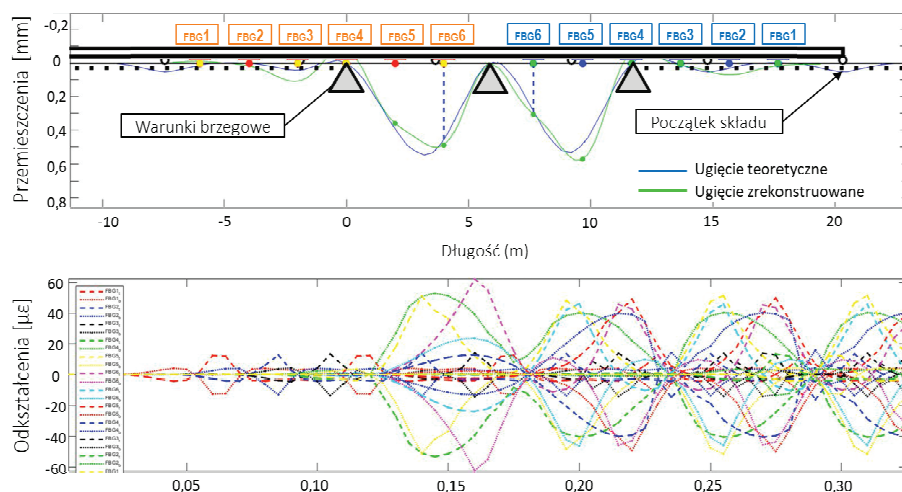
Przedstawione w niniejszym artykule informacje skupiały się na pomiarach

dynamicznych i stanowią jedynie niewielki fragment szerszej analizy, prowadzonej m.in. na potrzeby zwiększenia dopuszczalnej prędkości przejazdów pociągów na monitorowanym odcinku trasy kolejowej do 250 km/h. Inne wyniki, m.in. z pomiarów statycznych, zaprezentowano w pracach [2] i [7].

Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono na konkretnym przykładzie realizacji możliwości wykorzystania współczesnych technologii pomiarowych w kolejnictwie. Obejmują one czujniki punktowe, quasi-ciągłe lub w pełni geometrycznie ciągłe (ang. *distributed*). Połączenie kilku niezależnych technik pomiarowych w ramach zintegrowanego systemu hybrydowego umożliwia kompleksową ocenę stanu technicznego linii kolejowych, zarówno w zakresie samych szyn, jak i nasypu kolejowego. Analiza odbywa się zarówno w funkcji czasu, jak i w funkcji długości liczonej w dziesiątkach, a nawet setkach kilometrów, dostarczając informacji nieosiągalnych dla klasycznych technik punktowych. Ponadto, podejście takie zwiększa redundancję całego systemu, minimalizuje niepewności oraz zwiększa wiarygodność uzyskiwanych danych poprzez możliwość porównania wyników uzyskanych z niezależnych technik pomiarowych.

Przedstawiony w niniejszej pracy system, którego działanie zostało zweryfikowane w okresie rocznej pracy w rzeczywistych warunkach terenowych



7. Przykładowa wizualizacja przemieszczeń pionowych (wykres górny) na podstawie zarejestrowanych siatkami FBG odkształceń (wykres dolny)

na eksploatowanej linii kolejowej, dostarczył istotnych danych pomiarowych pozwalających m.in. na:

- wyznaczenie kilku wielkości fizycznych jednocześnie (m.in. odkształcenia, przemieszczenia, drgania, temperatury) na całej monitorowanej długości,
- analizę wpływu ekstremalnie dużych gradientów temperatur w skali roku,
- analizę wpływu podkładów na deformację szyn, zarówno na ich długości, jak i wysokości,
- detekcję obszarów z występującymi koncentracjami naprężeń,
- analizę pracy stref przejściowych (potencjalnie uskokowych) pomiędzy ziemnym nasypem kolejowym i betonowych obiektach mostowych w ciągu tej linii przy przejazdach różnych typów pociągów z różnymi prędkościami.

Zaproponowane podejście do diagnostyki infrastruktury krytycznej, jaką są linie kolejowe, umożliwia analizę efektów dynamicznych w krótkim okresie (w czasie przejazdu), jak i statycznych (wolno zachodzące zmiany w długim okresie). Dzięki zautomatyzowanemu procesowi instalacji i bardzo dużym zasięgom pomiarowym współczesnych interogatorów, system może być skalowalny na dowolnie długie odcinki. Równorzędną wartością systemu jest możliwość identyfikacji i oceny różnego rodzaju ponadnormatywnych oddziaływań dynamicznych, zarówno wewnętrznych (np. składy generujące nadmierne drgania z uwagi na owalizację kół) jak i zewnętrz-

nych (np. akty dywersji i sabotażu).

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania firmie SHM System, realizującej projekt dofinansowany z Funduszy Europejskich pt. „Ciągły geometrycznie światłowodowy czujnik temperatury, odkształceń i kształtu (Distributed Temperature, Elongation and Shape Sensor – DTES Sensor)”. Projekt otrzymał dofinansowanie w ramach ścieżki SMART programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki na lata 2021-2027. Wartość projektu: 29 345 160,82 PLN, wartość dofinansowania z Funduszy Europejskich: 23 414 153,53 PLN. Konsorcjum w składzie: SHM System (lider), Politechnika Krakowska (zespół Wydziału Inżynierii Lądowej) oraz Pracownia Technologii Światłowodów Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Alhussein A.N.D., Qaid M.R.T.M., Agliullin T., Valeev B., Morozov O., Sakhabutdinov A. Fiber Bragg Grating Sensors: Design, Applications, and Comparison with Other Sensing Technologies. *Sensors*, 2025, 25, 2289. <https://doi.org/10.3390/s25072289>.
- [2] Bednarski Ł., Howiacki T., Sieńko R., Zuziak K. Distributed Fibre Optic Sensors (DFOS) in Measurements of Rail Strain and Displacements. *Procedia Structural Integrity* 2024, 64, 1681–1688. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.173>.
- [3] Garbacka M., Howiacki T., Sieńko R.,

Bednarski Ł.. New sensing solutions based on fibre Bragg gratings for engineering applications. 29th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2025, 344. <https://doi.org/10.1117/12.3062221>.

- [4] Güemes A., Fernández-López A., Soller B. Optical Fiber Distributed Sensing - Physical Principles and Applications. *Structural Health Monitoring*, 2010, 9, 233–245. <https://doi.org/10.1177/1475921710365263>.
- [5] Piątek B., Howiacki T., Kulpa M., Siwowski T., Sieńko R., Bednarski Ł., Strain, crack, stress and shape diagnostics of new and existing post-tensioned structures through distributed fibre optic sensors. *Measurement*, 2023, Volume 221, 15 November, 113480; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113480>.
- [6] Shang Y., Sun M., Wang C., Yang J., Du Y., Yi J., Zhao W., Wang Y., Zhao Y., Ni J. Research Progress in Distributed Acoustic Sensing Techniques. *Sensors*, 2022, 22, 6060. <https://doi.org/10.3390/s22166060>.
- [7] Sieńko R., Bednarski Ł., Howiacki T., Badura K. Czujniki światłowodowe DFOS w pomiarach odkształceń i przemieszczeń szyn kolejowych. *Drogi Kolejowe, Materiały Konferencyjne* 2023.
- [8] Vivanco J.R., Breul P., TALON A., Benz-Navarrete M.A., Barbier S., Haddani Y. Importance of geotechnical diagnosis in railway management: A review. *Transportation Engineering*, 2024, 18, 100293. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100293>.
- [9] Wu T., You D., Gao H., Lian P., Ma W., Zhou X., Wang C., Luo J., Zhang H., Tan H. Research Status and Development Trend of Piezoelectric Accelerometer. *Crystals*, 2023, 13, 1363. <https://doi.org/10.3390/cryst13091363>.
- [10] Yang X., Yan C. Simulation of Wheel/Rail Noise of High Speed Train Running on the Slab Track. *IC-CTP 2009*, 2009, 1–6. [https://doi.org/10.1061/41064\(358\)469](https://doi.org/10.1061/41064(358)469).
- [11] <https://nerve-sensors.com/products/epsilonflat/> (dostęp 4.12.2025 r.).