

przegląd[®] komunikacyjny

3-4
2026
rocznik LXXXI
cena 50,00 zł
w tym 8% VAT



UKAZUJE SIĘ OD 1945 ROKU

200

lat
Politechniki
Warszawskiej



80 lat SITK RP

XXI KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

ROZJĄD
OLEJOWE

12-13 lutego 2026 r.
Warszawa

eISSN
2544-6037

ISSN
0033-22-32

Wybrane uwarunkowania rozwoju konstrukcji i utrzymania rozjazdów kolejowych. Kognitywne wykorzystanie albumu rozjazdów kolejowych i skrzyżowań z 1947 roku. New hybrid model of dynamic rail track response in the vertical direction. Wykorzystanie współczesnych technologii do dynamicznych pomiarów w kolejnictwie. Metody regulacji szerokości toru na podkładach betonowych. Przepustowość kolei dużych prędkości przy różnych prędkościach pociągów na przykładzie projektowanej linii Warszawa – Poznań. Monitorowanie przebiegu drgań toru kolejowego w warunkach eksploatacyjnych. Funkcjonowanie podsystemów strukturalnych systemu kolei na przykładzie prac realizowanych w podsystemie sterowanie. Zwiększenie liczby terminali oraz lepsze ich dostosowanie do przeładunku różnych rodzajów jednostek ładunkowych szansą na wzrost udziału transportu intermodalnego w Polsce. Metodyka pomiarów TDR i możliwości jej zastosowania w ocenie właściwości akustycznych nawierzchni kolejowej. Dwu- i jednostronne poszerzanie nasypów kolejowych. Statyczna analiza braku kontaktu bezstykowego toru kolejowego z podłożem podsypkowym. The concept of utilizing iTwin Capture Modeler in the design of railway infrastructure. Możliwość modernizacji kolei wąskotorowych w świetle obowiązujących warunków technicznych. Charakterystyka infradźwięków generowanych przez pojazdy szynowe. Ogólne równanie rampy przechyłkowej w postaci wielomianu nieparzystego stopnia. Funkcjonalność stacji Poznań Główny jako kluczowy element kształtowania Poznańskiego Węzła Kolejowego. Nowoczesne metody redukcji hałasu kolejowego. Przykłady analiz ruchowo-eksploatacyjnych wąskich gardeł infrastruktury kolejowej i sposoby ich eliminacji

Podstawowe informacje dla Autorów artykułów

„Przegląd Komunikacyjny” publikuje artykuły związane z szeroko rozumianym transportem oraz infrastrukturą transportu. Obejmuje to zagadnienia techniczne, ekonomiczne i prawne. Akceptowane są także materiały związane z geografią, historią i socjologią transportu.

Artykuły publikowane w „Przeglądzie Komunikacyjnym” dzieli się na: „wnoszące wkład naukowy w dyscypliny: inżynieria lądowa i transport; ekonomia i finanse; nauki prawne; nauki socjologiczne. Prosimy Autorów o deklarację (w zgłoszeniu), do której dyscypliny zaliczyć ich prace.

Materiały do publikacji: zgłoszenie, artykuł oraz oświadczenie Autora, należy przysyłać w formie elektronicznej na adres

piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl

W zgłoszeniu należy podać: imię i nazwisko autora, adres mailowy oraz adres do tradycyjnej korespondencji, miejsce zatrudnienia, zdjęcie, tytuł artykułu oraz streszczenie (po polsku i po angielsku) i słowa kluczowe (po polsku i po angielsku). Szczegóły przygotowania materiałów oraz wzory załączników dostępne są na stronie:

www.transportation.overview.pwr.edu.pl

W celu usprawnienia i przyspieszenia procesu publikacji prosimy o zastosowanie się do poniższych wymagań dotyczących nadsyłanego materiału:

1. Tekst artykułu powinien być napisany w jednym z ogólnodostępnych programów (np. Microsoft Word). Wzory i opisy wzorów powinny być wkomponowane w tekst. Tabele należy zestawić po zakończeniu tekstu. Ilustracje (rysunki, fotografie, wykresy) najlepiej dołączyć jako oddzielne pliki. Można je także wstawić do pliku z tekstem po zakończeniu tekstu. Możliwe jest oznaczenie miejsc w tekście, w których autor sugeruje wstawienie stosownej ilustracji lub tabeli. Obowiązuje odrębna numeracja ilustracji (bez rozróżniania na rysunki, fotografie itp.) oraz tabel.
2. Całość materiału nie powinna przekraczać 12 stron w formacie Word (zalecane jest 8 stron). Do limitu stron wlicza się ilustracje załączane w odrębnych plikach (przy założeniu że 1 ilustracja = ½ strony).
3. Format tekstu powinien być jak najprostsz (nie stosować zróżnicowanych stylów, wcięć, podwójnych i wielokrotnych spacji itp.). Dopuszczalne jest pogrubienie, podkreślenie i oznaczenie kursywą istotnych części tekstu, a także indeksy górne i dolne. **Nie stosować przypisów.**
4. Nawiązania do pozycji zewnętrznych - cytaty (dotyczy również podpisów ilustracji i tabel) oznacza się numeracją w nawiasach kwadratowych [...]. Numerację należy zestawić na końcu artykułu (jako „Materiały źródłowe”). Zestawienie powinno być ułożone alfabetycznie.
5. Jeżeli Autor wykorzystuje materiały objęte nie swoim prawem autorskim, powinien uzyskać pisemną zgodę właściciela tych praw do publikacji (niezależnie od podania źródła). Kopie takiej zgody należy przesyłać Redakcji.

Artykuły wnoszące wkład naukowy w dyscypliny: inżynieria lądowa i transport, inżynieria lądowa i transport; ekonomia i finanse; nauki prawne; nauki socjologiczne podlegają procedurom recenzji merytorycznych zgodnie z wytycznymi MNIŚW, co pozwala zaliczyć je, po opublikowaniu, do dorobku naukowego oraz uwzględnić w ewaluacji jakości działalności naukowej (Dz.U. 2019 poz. 392).

Liczba uwzględnianych punktów wg listy czasopism punktowanych przez MNIŚW wynosi 20.

Do oceny każdej publikacji powołuje się co najmniej dwóch niezależnych recenzentów spoza jednostki. Zasady kwalifikowania lub odrzucenia publikacji i ewentualny formularz recenzencki są podane do publicznej wiadomości na stronie internetowej czasopisma lub w każdym numerze czasopisma. Nazwiska recenzentów poszczególnych publikacji/numerów nie są ujawniane.

Przygotowany materiał powinien obrazować własny wkład badawczy autora. Redakcja wdrożyła procedurę zapobiegania zjawisku Ghostwriting (z „ghostwriting” mamy do czynienia wówczas, gdy ktoś wniósł istotny wkład w powstanie publikacji, bez ujawnienia swojego udziału jako jeden z autorów lub bez wymienienia jego roli w podziękowaniach zamieszczonych w publikacji). Tekst i ilustracje muszą być oryginalne i niepublikowane w innych miejscach (w tym w internecie). Możliwe jest zamieszczanie artykułów, które ukazały się w materiałach konferencyjnych i podobnych (na prawach rękopisu) z zaznaczeniem tego faktu i po przystosowaniu do wymogów publikacyjnych „Przeglądu Komunikacyjnego”.

Na stronie internetowej czasopisma dostępne są pełne wersje artykułów wraz ze streszczeniami w języku polskim (od 2010) i angielskim (od 2016) jako OPEN ACCESS. Pod koniec 2018 roku „Przegląd Komunikacyjny” rozpoczął indeksowanie artykułów angielskich z użyciem numerów cyfrowych DOI. Czasopismo ubiega się o partycypowanie w bazie SCOPUS. Rejestrowane jest w międzynarodowej bazie DOAJ <https://doaj.org/>.

Redakcja pisma oferuje objęcie patronatem medialnym konferencji, debat, seminariów itp.

Ceny zamieszczone w cenniku na stronie: www.transportation.overview.pwr.edu.pl są negocjowane indywidualnie w zależności od zakresu zlecenia. Możliwe są atrakcyjne upusty. Patronat obejmuje:

- ogłaszanie przedmiotowych inicjatyw na łamach pisma,
- zamieszczanie wybranych referatów / wystąpień po dostosowaniu ich do wymogów redakcyjnych,
- publikację informacji końcowych (podsumowania, apele, wnioski),
- kolportaż powyższych informacji do wskazanych adresatów.

Ramowa oferta dla „Sponsora strategicznego” czasopisma Przegląd Komunikacyjny

Sponsor strategiczny zawiera umowę z wydawcą czasopisma na okres roku kalendarzowego z możliwością przedłużenia na kolejne lata. Uprawnienia wydawcy do zawierania umów posiada Zarząd Oddziału SITK RP sp. z o.o. Wrocław. Przegląd Komunikacyjny oferuje dla sponsora strategicznego następujące świadczenia:

- zamieszczenie logo sponsora w każdym numerze,
- zamieszczenie reklamy sponsora w jednym, kilku lub we wszystkich numerach,
- publikacja jednego lub kilku artykułów sponsorowanych,
- publikacja innych materiałów dotyczących sponsora,
- zniżki przy zamówieniu prenumeraty czasopisma.

Możliwe jest także zamieszczenie materiałów od sponsora na stronie internetowej czasopisma.

Przegląd Komunikacyjny ukazuje się jako miesięcznik.

Szczegółowy zakres świadczeń oraz detale techniczne (formaty, sposób i terminy przekazania) są uzgadniane indywidualnie.

Osoba kontaktowa w tej sprawie:

Małgorzata Skowronek

malgorzata.skowronek@pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Wyspiańskiego 41, 50-370 Wrocław, tel.: +48 71 320 35 45

Cena za świadczenia na rzecz sponsora uzależniana jest od uzgodnionych szczegółów współpracy. Zapłata może być dokonana jednorazowo lub w kilku ratach (na przykład kwartalnych). Część zapłaty może być w formie zamówienia określonej liczby prenumerat czasopisma.





Na okładce: "Drogi Kolejowe 2026"

W numerze

Wybrane uwarunkowania rozwoju konstrukcji i utrzymania rozjazdów kolejowych. Kognitywne wykorzystanie albumu rozjazdów kolejowych i skrzyżowań z 1947 roku Eligiusz Mieloszyk, Anita Milewska, Sławomir Grulkowski	2
New hybrid model of dynamic rail track response in the vertical direction Piotr Fielek, Piotr Kozioł	8
Wykorzystanie współczesnych technologii do dynamicznych pomiarów w kolejnictwie Rafał Sienko, Łukasz Bednarski, Tomasz Howiacki, Szymon Długosz	13
Metody regulacji szerokości toru na podkładach betonowych Grzegorz Stencel	18
Przepustowość kolei dużych prędkości przy różnych prędkościach pociągów na przykładzie projektowanej linii Warszawa – Poznań Jeremi Rychlewski, Konrad Rychlewski	23
Monitorowanie przebiegu drgań toru kolejowego w warunkach eksploatacyjnych Piotr Chrostowski, Sławomir Judek, Michał Michna, Krzysztof Karwowski	30
Funkcjonowanie podsystemów strukturalnych systemu kolei na przykładzie prac realizowanych w podsystemie sterowanie Paweł Gradowski	42
Zwiększenie liczby terminali oraz lepsze ich dostosowanie do przeładunku różnych rodzajów jednostek ładunkowych szansą na wzrost udziału transportu intermodalnego w Polsce Robert Kruk, Beata Piwowar, Krzysztof Ochociński	49
Metodyka pomiarów TDR i możliwości jej zastosowania w ocenie właściwości akustycznych nawierzchni kolejowej Michał Urbaniak, Roksana Licow	53
Dwu- i jednostronne poszerzanie nasypów kolejowych Michał Pawłowski, Adam Duda	61
Statyczna analiza braku kontaktu bezstykowego toru kolejowego z podłożem podsypanym Włodzimierz Bednarek	66
The concept of utilizing iTwin Capture Modeler in the design of railway infrastructure Kamila Szwackiewicz, Aleks Gołąbek, Łukasz Sobkiewicz, Marcin Stolz	73
Możliwość modernizacji kolei wąskotorowych w świetle obowiązujących warunków technicznych Filip Janowiec, Przemysław Maraszek	80
Charakterystyka infradźwięków generowanych przez pojazdy szynowe Natalia Karkosińska-Brzozowska	88
Ogólne równanie ramy przechyłkowej w postaci wielomianu nieparzystego stopnia Robert Wojtczak	92
Funkcjonalność stacji Poznań Główny jako kluczowy element kształtowania Poznańskiego Węzła Kolejowego Jeremi Rychlewski, Bruno Walerych, Kacper Włoch	96
Nowoczesne metody redukcji hałasu kolejowego Kamil Hajduk, Roksana Licow, Christoph Gramowski, Mikołaj Pachniewski, David Słuchocki	105
Przykłady analiz ruchowo-eksploatacyjnych wąskich gardel infrastruktury kolejowej i sposoby ich eliminacji Przemysław Brona, Michalina Chrzanowska, Marta Rogowska – Jędra	113

Szanowni Czytelnicy

Z przyjemnością oddajemy Czytelnikom numer specjalny Przeglądu Komunikacyjnego wydanego z okazji XXI Konferencji Naukowo-Technicznej „Drogi Kolejowe 2026”. Konferencja organizowana wspólnie przez Politechnikę Warszawską Wydział Transportu, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Kolejnictwa oraz Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Warszawie odbędzie się w dniach 12 i 13 lutego 2026 r. Konferencję ta jest wydarzeniem cyklicznym organizowanym przez polskie ośrodki naukowe i miejscowe Oddziały SITK. Należy ona do znaczących wydarzeń naukowych i od 45 lat gromadzi na forum wybitnych specjalistów z branży transportu szynowego, naukowców i praktyków. Historia konferencji „Drogi Kolejowe” sięga roku 1981, kiedy to odbyły się pierwsze obrady zorganizowane przez Politechnikę Gdańską w Wierzyca. Od tego czasu konferencja organizowana była co dwa lata przez różne ośrodki naukowe w Polsce, a jej celem było zapoznanie użytkowników dróg szynowych z nowościami technicznymi i pracami naukowymi w zakresie budowy oraz utrzymania infrastruktury kolejowej.

Wydarzenie to jest kierowane do branży infrastruktury szynowej, a przede wszystkim osób związanych z pracą badawczo-dydaktyczną, firmami projektowymi, budownictwem liniowym i punktowym oraz utrzymaniem szynowych dróg kolejowych. Celem Konferencji jest wymiana doświadczeń pomiędzy przedstawicielami nauki a praktykami reprezentującymi przemysł.

Tematyka Konferencji oraz prezentowane artykuły obejmują szeroki wachlarz zagadnień dotyczących: nawierzchni kolejowej, podtorza, torów i rozjazdów, projektowania linii kolejowych i wspomagających technik obliczeniowych w projektowaniu, nowoczesnych technologii stosowanych w kolejnictwie, cyberbezpieczeństwa i cyfryzacji transportu szynowego, zwiększenia prędkości jazdy pojazdów szynowych oraz zmniejszenie hałasu.

Uzupełnieniem jest diagnostyka i utrzymanie predykcje dróg szynowych co z kolei przekłada się na komfort i bezpieczeństwo techniczne przewozu pasażerów i transportu towarów.

Z poważaniem

Za komitet Organizacyjny

inż. Ireneusz Jasiński, Prezes Oddziału SITK RP w Warszawie

dr hab. inż. Jacek Kukulski - Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

dr inż. Wioletta Jackiewicz - Rek - Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

hab. inż. Andrzej Massel - Instytut Kolejnictwa

Wydawca:

Zarząd Oddziału, ul. Marszałka Józefa Piłsudskiego 74,
pok. 216, 50-020 Wrocław
Leszek Krawczyk - Prezes
sitk.pkpik.pl

Partner:

Adam Bisek: konstruktor, wynalazca, przedsiębiorca i autor wielu innowacyjnych technologii i wdrożeń, wizjoner z wielką pasją lotnictwa i kosmonautyki, laureat wielu prestiżowych nagród i odznaczeń m. in. Wybitny Inżynier, Honorowy Złoty Inżynier, Błękitne Skrzydła, Złota Lotka, Brylantowa Lotka - delegat Polski w ONZ ds. zagospodarowania przestrzeni kosmicznej, organizator 5 zjazdów kosmonautów.

Redaktor Naczelny:

Antoni Szydło

Redakcja:

Maciej Kruszyna (Z-ca Redaktora Naczelnego), Agnieszka Kuniczuk - Trzcinowicz (Redaktor językowy), Piotr Mackiewicz (Sekretarz), Wojciech Puła (Redaktor statystyczny), Eryk Mączka (obsługa techniczna, strona internetowa), Krzysztof Gasz, Jarosław Kuźniewski, Łukasz Skotnicki, Bartłomiej Krawczyk, Igor Gisterek, Karina Korycka (obsługa anglojęzyczna)

Adres redakcji do korespondencji:

Pocztą elektroniczną:
piotr.mackiewicz@pwr.edu.pl
Pocztą „tradycyjną”:
Piotr Mackiewicz, Maciej Kruszyna
Politechnika Wrocławska,
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
Faks: 71 320 45 39

Rada naukowa:

Antoni Szydło (Wrocław), Grzegorz Brychczyński (Warszawa), Marek Ciesielski (Poznań), Sylvia Capayowa (Bratysława), Antanas Klibavičius (Wilno), Jozef Komačka (Žilina), Andrzej S. Nowak (Auburn University), Tomasz Nowakowski (Wrocław), Jacek Sebastian Paś (Warszawa), Victor V. Rybkin (Dniepropietrowsk), Wiesław Starowicz (Kraków), Hans-Christoph Thiel (Cottbus), Tomasz Siwowski (Rzeszów), Jiri Straský (Brno), Piotr Wrzecioniarz (Wrocław), Andrea Zuzulova (Bratysława)

Deklaracja o wersji pierwotnej czasopisma

Główną wersją czasopisma jest wersja elektroniczna. Na stronie internetowej czasopisma dostępne są pełne wersje artykułów wraz ze streszczeniami w języku polskim (od 2010) i angielskim (od 2016). Redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania zmian w materiałach nie podlegających recenzji.

Artykuły opublikowane w „Przeglądzie Komunikacyjnym” są dostępne w bazach danych 20 bibliotek technicznych oraz są indeksowane w bazach:

BAZTECH: <http://baztech.icm.edu.pl>
Index Copernicus: <http://indexcopernicus.com>
Międzynarodowa baza DOAJ <https://doaj.org/>

Prenumerata:

Szczegóły i formularz zamówienia na stronie:
<http://www.transportation.overview.pwr.edu.pl>

Obecna Redakcja dysponuje numerami archiwalnymi poczynając od 4/2010. Numery archiwalne z lat 2004-2009 można zamawiać w Oddziale krakowskim SITK, ul. Siostrzana 11, 30-804 Kraków, tel./faks 12 658 93 74, mrowinska@sitk.org.pl

Druk:

Grupa Intromax Sp. z o.o., ul. Biskupińska 21, 30-732 Kraków, <http://www.intromax.com.pl/>
Nakład: 800 egz.

Reklama:

Dział Marketingu:
malgorzata.skowronek@pwr.edu.pl

Wybrane uwarunkowania rozwoju konstrukcji i utrzymania rozjazdów kolejowych. Kognitywne wykorzystanie albumu rozjazdów kolejowych i skrzyżowań z 1947 roku

Selected conditions for the development of the construction and maintenance of railway turnouts. Cognitive use of the 1947 album of railway switches and crossings

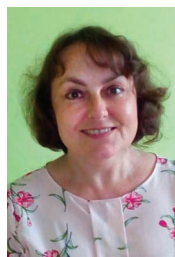


Eligiusz Mieloszyk

Prof. dr hab. inż.

Politechnika Gdańska / Wydział
Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Transportowej

eligiusz.mieloszyk@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3363-9260



Anita Milewska

Dr

Politechnika Gdańska / Wydział
Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Transportowej

anita.milewska@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0003-4515-7629



Sławomir Grulkowski

Dr inż.

Politechnika Gdańska / Wydział
Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Transportowej

Slawomir.grulkowski@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3352-624X

Streszczenie: Rozjazdy kolejowe i skrzyżowania torów, jako ważne elementy nawierzchni kolejowej mają wpływ na przepustowość linii kolejowej lub stacji, a także na bezpieczeństwo ruchu. W związku z tym elementy te muszą być diagnozowane. Kluczem jest określenie cykli podstawowych diagnozowania rozjazdów i skrzyżowań torów. Pomocna przy określaniu podstawowych cykli c_0 diagnozowania rozjazdów i skrzyżowań torów może być powierzchnia c_0 zdefiniowana i przedstawiona jako funkcja zmiennych q i V . Jest to funkcja zależna od natężenia przewozów q [Tg/rok] oraz prędkości V [km/h]. Konstrukcje rozjazdów, ze względu na zwiększanie maksymalnych prędkości jazdy pojazdów kolejowych, automatyzację, stosowane systemy ogrzewania, technologię obróbki i bezpieczeństwo w największym stopniu zmieniały się na przestrzeni lat. Badania i innowacje dotyczące tego urządzenia w różnym zakresie trwały, trwają i będą trwały. Doprowadziły one przede wszystkim do standaryzacji i ujednolicenia ich konstrukcji. Wykorzystany w tym artykule album rozjazdów pozwolił wrócić po latach do rozjazdów z 1947 roku, podobnie jak wrócono po latach do Wielkiego Twierdzenia Fermata. Pokazano wybrane szczegóły rozjazdów o skośach 1:9, 1:10, bazując na wydany w 1947 r. i będącym w posiadaniu autorów *Albumie rozjazdów z szyn typu "S" z iglicami sprężystymi* [1]. Szczegóły poszczególnych elementów konstrukcyjnych, co istotne, przedstawione zostały tam w skali 1:1.

Słowa kluczowe: Rozjazd kolejowy; Dokumentacja techniczna; Eksploatacja rozjazdów kolejowych; Diagnozowanie rozjazdów

Abstract: Railway turnouts and track crossings - important components of the railway track structure - determine the capacity of a railway line. Those elements have significant impact on traffic safety and must be properly diagnosed. The key issue is to define the basic cycles for diagnosing turnouts and track crossings. The quantity helpful in determining the basic diagnostic cycles for turnouts and track crossings may be the c_0 surface, defined as a function of the following variables: transport intensity q [Tg/year] and the speed V [km/h]. Due to increasing maximum rail vehicle speeds, automation, heating systems, machining technology, and safety issues, turnout designs have undergone significant changes over the years. Research and innovations concerning the turnouts have led to the standardization and unification of their design. The album of turnouts used in this article allowed us to revisit the 1947 turnouts years later, much like Fermat's Last Theorem. In this work, we showed selected details of turnouts with 1:9 and 1:10 slopes, based on the 'Album of turnouts for S-type rails with spring blades' [1], published in 1947 and owned by the authors. Importantly, the details of individual structural elements are presented in 1:1 scale.

Keywords: Railway turnout; Technical documentation; Operation of railway turnouts; Diagnosis of turnouts

Wstęp

Rozjazdy kolejowe przez wiele lat ich stosowania systematycznie nabierały coraz większego znaczenia. Początkowo były to elementy infrastruktury, które umożliwiały wyłączenie rozgałęzienie torów stacyjnych lub łączenie torów różnych linii kolejowych. Z czasem rozjazdy zostały wykorzystane do połączeń międzytorowych, głównie w obrębie stacji kolejowych. Konstrukcję rozjazdów i ich parametry geometryczne determinowała wzrastająca prędkość

kość pociągów. Znaczenie rozjazdów zdecydowanie wzrosło w momencie, kiedy włączone zostały w system sterowania ruchem kolejowym, a problemem stała się przepustowość torowych układów stacyjnych.

Jednocześnie rozjazdy są elementem nawierzchni bardzo podatnym na różnego rodzaju uszkodzenia oraz wady parametrów geometrycznych, co wymusza odpowiednie podejście do ich diagnostyki

O diagnozowaniu rozjazdów i skrzyżowań torów

Jak podano w [2] cykl podstawowy c_0 diagnozowania rozjazdów określony jest wzorem empirycznym

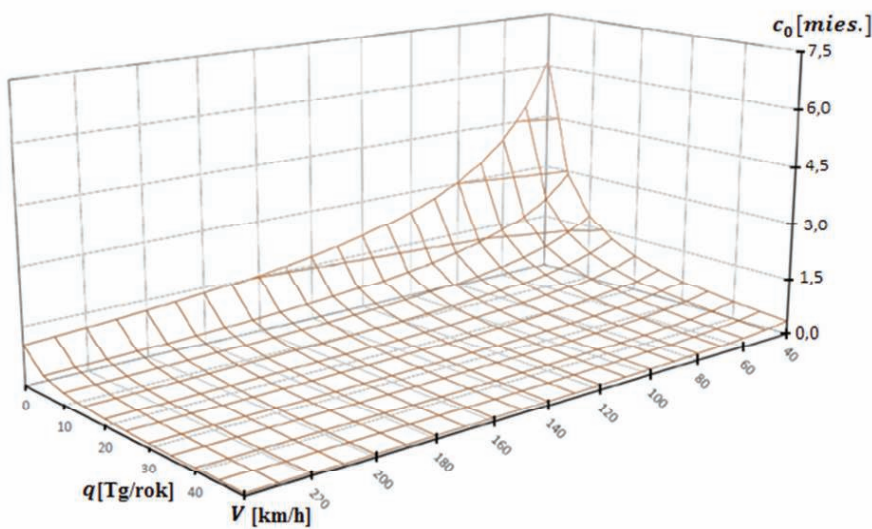
$$c_0(q, V) = \frac{\gamma}{\mu \cdot \xi}, \quad (1)$$

gdzie

c_0 - podstawowy cykl diagnozowania rozjazdów;

q - natężenie przewozów [Tg/rok];

V - prędkość przejazdu przez rozjazd



1. Powierzchnia określona wzorem (1)

[km/h]

γ - wartość stała dodatnia;

ξ - wartość zależna od natężenia przewozów q [Tg/rok], obliczana ze wzoru (2)

$$\xi = 9 \cdot 10^{-4} q^2 + 8 \cdot 10^{-2} q + 0,38, \quad (2)$$

μ - wartość zależna od prędkości V [km/h], obliczana ze wzoru (3)

$$\mu = -4 \cdot 10^{-5} V^2 + 17 \cdot 10^{-2} V - 0,3. \quad (3)$$

Dodatkowo przyjmuje się, że jeżeli natężenie przewozów jest mniejsze niż 5 Tg/rok, należy przyjmować do obliczeń $q = 5$ Tg/rok, gdy zaś większe od 40 Tg/rok, należy do obliczeń przyjmować 40 Tg/rok. Ponadto, gdy wynik obliczeń cyklu podstawowego przekracza 6 miesięcy, przyjmuje się cykl równy sześć miesięcy. Podobnie wyznacza się cykl diagnozowania skrzyżowań torów.

Na podstawie wzoru (1) została utworzona powierzchnia, którą przedstawiono na rys. 1. Powierzchnia ta odzwierciedla cykl podstawowy diagnozowania rozjazdów uzależniony od prędkości jazdy pociągów i obciążenia przewozami.

Powierzchnia przedstawiona na rys. 1 charakteryzuje się tym, że w każdym punkcie analizowanego obszaru ma płaszczyznę styczną. Powierzchnia ta określona jest przez wektor normalny $\vec{N}$, który określony jest wzorem (4):

$$\vec{N} = \left[\frac{-\gamma \frac{\partial \xi}{\partial q}}{\mu^2 \xi^2}, \frac{-\gamma \frac{\partial \mu}{\partial V}}{\mu^2 \xi}, -1 \right] = \left[\frac{-\gamma \xi'}{\mu^2 \xi^2}, \frac{-\gamma \mu'}{\mu^2 \xi}, -1 \right]. \quad (4)$$

Wektor $\vec{N}$ można również zapisać dla uproszczenia interpretacji w postaci

macierzy jednokolumnowej

$$\vec{N} = \begin{bmatrix} -\gamma(18 \cdot 10^{-4} q + 8 \cdot 10^{-2}) \\ (-4 \cdot 10^{-5} V^2 + 17 \cdot 10^{-2} V - 0,3)(9 \cdot 10^{-4} q^2 + 8 \cdot 10^{-2} q + 0,38)^2 \\ -\gamma(-8 \cdot 10^{-5} V + 17 \cdot 10^{-2}) \\ (-4 \cdot 10^{-5} V^2 + 17 \cdot 10^{-2} V - 0,3)^2(9 \cdot 10^{-4} q^2 + 8 \cdot 10^{-2} q + 0,38) \\ -1 \end{bmatrix}$$

Określona przez wektor $\vec{N}$ płaszczyzna styczna do powierzchni przedstawionej na rys. 1 zmienia się w sposób ciągły. Ma to istotne znaczenie przy określaniu cykli diagnozowania rozjazdów.

Różne koncepcje modernizacji i wykorzystania rozjazdów

W literaturze przedmiotu (np. [4, 8, 9, 10, 14, 17, 21, 22, 23]) tematyce rozjazdów poświęcono wiele miejsca. Projektowanie, wykonawstwo lub modernizowanie linii kolejowej pod kątem dużych prędkości [23] lub możliwości kursowania po niej długich pociągów towarowych [10] musi uwzględniać w budowywane rozjazdy różnych typów i ich lokalizację.

Zawsze punktem wyjścia w przypadku rozwoju konstrukcji rozjazdów były doświadczenia i opracowania wcześniejsze, np. [1]. Następnie pojawiały się rozwiązania w postaci konstrukcji rozjazdów (o coraz większych promieniach łuków torów zwrotnych, z krzyżownicami z ruchomym dziobem i z zwielokrotnionymi zamknięciami nastawczymi). Analizowane są też zagadnienia związane z łukowaniem rozjazdów i ich zastosowania [17] lub usytuowanie ich na krzywych przejściowych [21]. Obowiązujące przepisy kolejowe [22] oraz technika i zasady projektowania [8] wprowadzają dla rozjazdów łukowych istotne ograniczenia aplikacyjne.

Dopuszcza się ich stosowanie jedynie w przypadkach mających uzasadnienie ekonomiczne, tj. wtedy gdy zastosowanie rozjazdów podstawowych spowodowałoby m. in. wprowadzenie lokalnego ograniczenia prędkości, nadmiernego wydłużenie lub przesunięcia głowicy rozjazdowej lub posterunku ruchu, wykonanie dodatkowych robót ziemnych lub konieczność pozyskania nowego terenu (wynikająca z potrzeby przesunięcia lub zmiany przebiegu układu torowego) oraz kolizję z istniejącymi elementami infrastruktury (np. obiektami inżynierskimi).

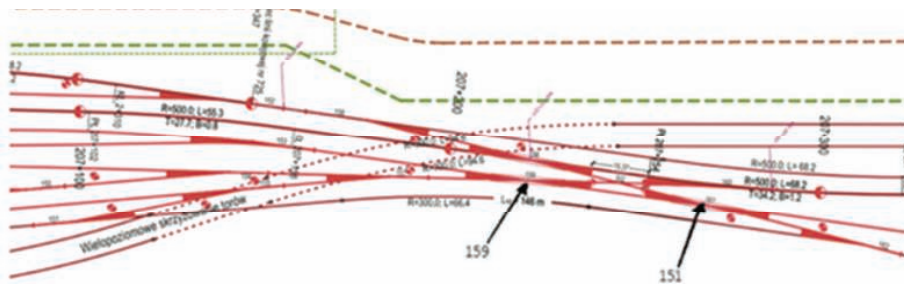
Należy tu też odnotować, że sterowanie (uruchamianie) rozjazdów na początku było ręczne - mechaniczne z miejsca, potem mechaniczne scentralizowane zdalne, dalej elektronicznie - mechaniczne (w tym zdalne i też automatyczne, a w przyszłości prawdopodobnie z wykorzystaniem AI).

Podobny rozwój technologiczny dotyczy ogrzewania rozjazdów. Początkowo śnieg usuwano ręcznie, a następnie wykorzystywano korytka, w których umieszczano materiały palne (np. rozpalony koks) służące do podgrzewania newralgicznych elementów rozjazdu.

Obecnie wykorzystuje się urządzenia do ogrzewania rozjazdów kolejowych (EOR - elektryczne ogrzewanie rozjazdów), które zapobiegają zamarzaniu rozjazdów. Są to grzałki elektryczne i zautomatyzowane systemy sterowania, które dostosowują ich moc grzewczą do panujących warunków pogodowych w celu oszczędności energii i zwiększenia ich efektywności.

W rozjazdach z albumu z 1947 roku [1] nie uwzględniano EOR, ponieważ takich rozwiązań nie było. Ten fakt pokazuje też rozwój stosowanych rozwiązań przy projektowaniu i realizacji rozjazdów na linii kolejowej.

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na ewolucję celów stosowania rozjazdów na przestrzeni wszystkich lat funkcjonowania kolei. Początkowo były to elementy infrastruktury, które umożliwiały wyłącznie rozgałęzienie torów stacyjnych lub łączenie torów różnych linii kolejowych. Z czasem rozjazdy zostały wykorzystane do połączeń międzytorowych, głównie w obrębie stacji kolejowych. Znaczenie rozjazdów rosło wraz ze wzrostem natężenia ruchu kolejowego. Dla zoptymalizowania prze-



2. Przykład głowicy rozjazdowej z elementami krytycznymi – rozjazdami nr 151 i 159 na stacji Gdynia Port Centralny [12, 13, 14]

ustawienia układów torowych istotne stało się odpowiednie rozmieszczenie rozjazdów i całych ich połączeń. W związku z tym, na podstawie badań i obliczeń powstały odpowiednie zasady i kryteria lokalizacji rozjazdów na posterunkach ruchu [19].

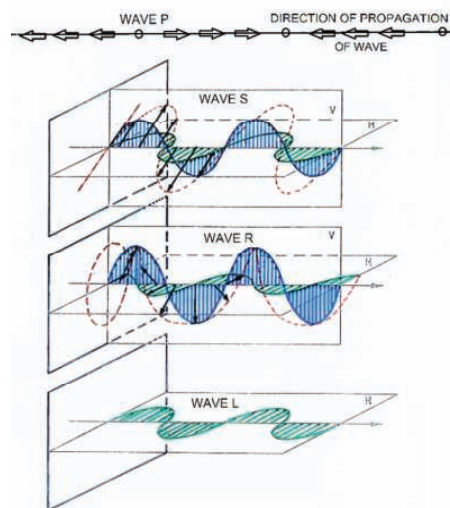
Należy pamiętać, że oprócz tradycyjnych zadań, lokalizacja i parametry rozjazdów decydują o przepustowości linii kolejowej. W przypadku stacji obciążonych dużym ruchem, w tym ruchem towarowym mamy do czynienia z rozbudowanym układem dróg rozjazdowych [12, 13, 14]. W obrębie stacji występuje ruch liniowy planowy i manewrowy. Należy tak zaprojektować układ torowy stacji i prowadzić ruch przez stację, aby zapewnić jej wymaganą przepustowość i płynność ruchu. Decyduje o tym najbardziej obciążony rozjazd lub zespół rozjazdów w głowicy stacyjnej. Jest to tzw. element krytyczny lub wąskie gardło stacji (rys. 2). Podobna sytuacja występuje przy modernizacji stacji, czy całej linii kolejowej.

Przykładowo, dodanie międzytorowego przejścia rozjazdowego trapezowego poprawiło przepustowość stacji Warszawa Centralna, zapewniając większą elastyczność w prowadzeniu ruchu. Dzięki wbudowaniu tego rozwiązania oraz dodatkowych elementów systemu sterowania ruchem częstość jazdy pociągów przez stację wynosi obecnie co (niespełna) 4 minuty zamiast poprzednio 5 minut. To oznacza, że zdolność przepustowa obiektu wzrosła z 24 do nawet 32 pociągów na godzinę w obu kierunkach [20].

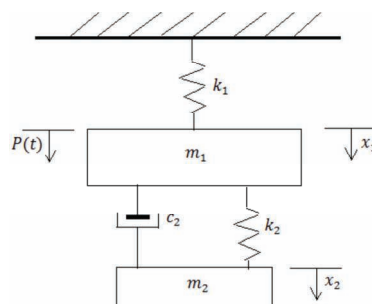
Generowanie drgań i powstający hałas przy przejeździe pojazdu kolejowego przez rozjazd

Występujące w rozjazdach kolejowych nieciągłości toków szynowych są przy-

czyną generowania dodatkowych cyklicznych obciążeń dynamicznych i mają wpływ na komfort jazdy pasażerów. Drgania te odbierane są różnie przez człowieka w zależności od zajmowanej pozycji ciała. Pasażer odbiera drgania powierzchnią ciała stykającą się z podłożem: w pozycji stojącej – powierzchnią stóp, w pozycji siedzącej – powierzchnią siedzenia i/lub stóp, w pozycji leżącej (wagon sypialny) – całą powierzchnią ciała. Z badań wynika, że reakcja ludzi na drgania zależy głównie od częstotliwości i amplitudy drgań, ich kierunku, prędkości (przyspieszenia) oraz warunków i powierzchni odbioru. Wielkością charakteryzującą drgania jest wartość skuteczna przyspieszenia lub prędkości drgań. Wielkość ta określona jest wzorem (5):



3. Fale w podtorzu i podłożu gruntowym [15]



4. Model wibroizolacji w rejonie rozjazdu

$$a_{RMS} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [a(t)]^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

gdzie

a_{RMS} - wartość skuteczna przyspieszenia,
 $a(t)$ - oznacza przyspieszenie drgań,
 $t_2 - t_1$ - oznacza czas uśredniania.

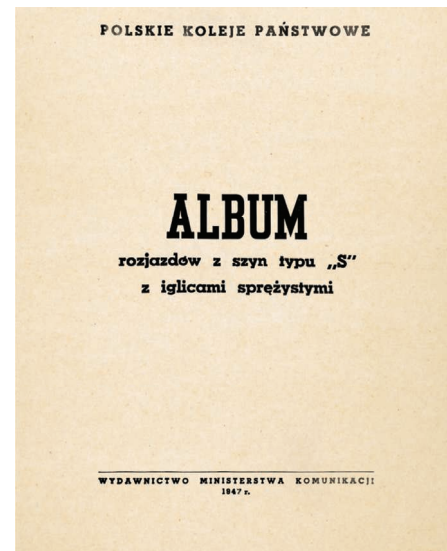
Innym parametrem, uwzględniającym powtarzalność drgań, ciągłość, sporadyczność, impulsowość itp. jest tzw. wartość dawki wibracji. [3, 5, 6, 7, 18].

Obciążenia dynamiczne powodują dodatkowe naprężenia w podtorzu, sprężyste i trwałe odkształcenia podtorza, zmiany właściwości gruntów podtorza i podłoża gruntowego.

W cyklicznie obciążanym podtorzu rozchodzą się fale (rys. 3). Fale objętościowe podłużne (P) i poprzeczne (S) oraz powierzchniowe podłużne i poprzeczne na jego powierzchni. Podłużne powierzchniowe fale Rayleigha (R) oraz powierzchniowe fale poprzeczne Love'a (L) powodujące drgania cząstek gruntu. Fale te z podtorza dalej przekazywane są do podłoża gruntowego.

Jak podano w [11], przy przejściu przez granice dwóch ośrodków, co istotne o różnych właściwościach sprężystych, fale objętościowe ulegają odbiciu i załamaniu. Załamaniu i odbiciu tych fal towarzyszy powstawanie obu rodzajów fal.

Przejeżdżający przez rozjazd pojazd szynowy o masie m_1 i współczynniku sztywności k_1 generuje drgania. W celu zmniejszenia negatywnego wpływu tych drgań na konstrukcję rozjazdu, podtorze itp. warto w obrębie rozjazdu (pod jego podrozdajnicami) zamonto-



5. Strona tytułowa Albumu

wać tłumik dynamiczny (wibroizolację) o masie m_2 , sztywności k_2 i tłumieniu c_2 . Opisanej sytuacji odpowiada model przedstawiony na rys. 4.

Przedstawionemu na rys. 4 modeliowi odpowiada następujący model matematyczny (2).

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + P(t) \\ m_2 \ddot{x}_2 = -k_2 (x_2 - x_1) - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \end{cases} \quad (6)$$

Jego rozwiązanie dla $P(t) = P_1 \sin \omega t$ pozwala tak dobrać parametry wibroizolatora, aby były przekazywane małe drgania.

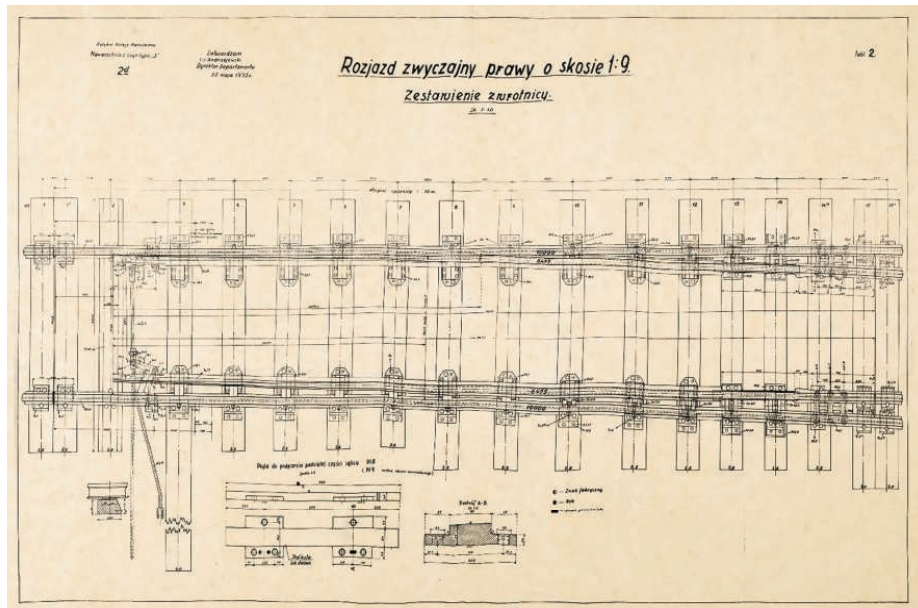
Oczywiście przejeżdżający przez rozjazd pojazd szynowy generuje też hałas uciążliwy dla pasażerów i zewnętrznego otoczenia i związany jest z drganiami ośrodka sprężystego (w tym, niebezpieczny hałas pulsacyjny). O jego uciążliwości dla pasażerów i środowiska (ludzi na zewnątrz pojazdu), oprócz ciśnienia akustycznego wyrażonego w decybelach (dB) decyduje też jego częstotliwość wyrażona w hercach (Hz) [16]. Jak napisano w [16], o tym ostatnim często się zapomina. Prowadzi to do pomijania niebezpiecznych dla zdrowia infradźwięków.

Źródła pozyskiwania wiedzy o dawnych rozjazdach [12, 13]

Ewolucyjny rozwój techniki rozjazdowej można zaobserwować dzięki dostępnym jeszcze archiwalnym katalogom i dokumentom. Jednym z nich jest niewątpliwie *Album rozjazdów z szyn typu "S" z iglicami sprężystymi*, odnoszący się do czasów, w których po naszych torach kursowały tylko pociągi prowadzone przez parowozy. To wydawnictwo w postaci wielkoformatowego albumu (675 mm x 510 mm plus wybrane strony rozkładowe) składającego się wyłącznie z rysunków technicznych rozjazdów zwyczajnych i krzyżowych o skosach 1:9 i 1:10. Mimo, że ten dokument pochodzi z 1947 roku to faktycznie obrazuje stan techniki z lat 1934-1937, gdyż każdy rysunek zawiera asygnatę z określoną datą i podpisem. Album zawiera 50 rysunków technicznych rozjazdów różnego typu, ich szczegółów i skrzyżowanie torów (rys. 5).

Ponieważ część elementów rozjazdów wykonywano lub dopasowywano metodami gospodarczymi konieczne było udostępnienie bardzo szczegółowych rozwiązań każdego elementu konstrukcyjnego. Stąd skale przedstawionych rysunków są bardzo duże: od 1:50 dla całego rozjazdu do 1:1 dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych.

Ten katalog jest dowodem na dą-



6. Przykład rysunku ze szczegółami geometrii rozjazdu zwyczajnego 1:9

WYKAZ RYSUNKÓW	
TREŚĆ RYSUNKU	Nr. rysunku
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:9 Schematy i plany ogólne	1
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:9 Zwrotnica	2
Obróbka końca iglicy lewej dla rozjazdów o skosie 1:9 (1:10 i 6°)	3
Obróbka iglicy łukowej dla rozjazdów typu „S” o skosie 1:9	4
Obróbka iglicy prostej dla rozjazdów typu „S” o skosie 1:9	5
Drogi do połączenia szynowego w skosie 1:9 Siodełka podgiglowe	6
Wkładki łączące iglice z szyną oporową dla rozjazdów o skosie 1:9 i 1:10	7
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:9 Opórki	8
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:9 (1:10, 6°) Zamek nastawczy hakowaty	9
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:9 Krzyżownica	10
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:9 Przekroje krzyżownicy	11
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:9 Części krzyżownicy	12
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:9 Kierownica i jej części	13
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:9 Szyny krzyżownicy pojedynczej	14
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:9 Części zamka nastawczego hakowatego	15
Płyty specjalne dla rozjazdów o skosie 1:9	16
Rozjazd angielski pojedynczy o skosie 1:9 Schematy i plany ogólne	17
Rozjazd angielski pojedynczy o skosie 1:9 Zwrotnica	18
Rozjazd angielski pojedynczy o skosie 1:9 Krzyżownice podwójne	19
Rozjazd angielski pojedynczy o skosie 1:9, 1:10 i 6° Części zamka nastawczego hakowatego	20
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:9	21
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:9 Zwrotnica	22
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:9 Krzyżownica podwójna	23
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:9 i 1:10. Błoki specjalne w garnitkach iglicy	24
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:9 Siodełka podgiglowe	25
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:9 Zamek nastawczy hakowaty	26
Rozjazd angielski o skosie 1:9 Opórki	27
Skrzyżowanie torów o skosie 1:9 Schematy i plany ogólne	28
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:10 Schematy i plany ogólne	29
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:10 Zwrotnica	30
Obróbka iglicy łukowej dla rozjazdu typu „S” o skosie 1:10	31
Obróbka iglicy prostej dla rozjazdu typu „S” o skosie 1:10	32
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:10 Opórki	33
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:10 Krzyżownica	34
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:10 Szyny krzyżownicy pojedynczej	35
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:10 Przekroje krzyżownicy	36
Rozjazd zwyczajny prawy o skosie 1:10 Części krzyżownicy	37
Płyty specjalne dla rozjazdów o skosie 1:10	38
Rozjazd angielski pojedynczy o skosie 1:10 Schematy i plany ogólne	39
Rozjazd angielski pojedynczy o skosie 1:10 Zwrotnica	40
Rozjazd angielski pojedynczy o skosie 1:10 Krzyżownice podwójne	41
Rozjazd angielski pojedynczy i podwójny o skosie 1:10 Szyny krzyżownicy podwójnych	42
Rozjazd angielski podwójny (podwójny) o skosie 1:10 Przekroje podwójnej krzyżownicy	43
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:10 Schematy i plany ogólne	44
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:10 Zwrotnice	45
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:10 Zamek nastawczy hakowaty do iglic wewnętrznych	46
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:10 Części zamka nastawczego hakowatego do iglic wewnętrznych	47
Rozjazd angielski podwójny o skosie 1:10 Krzyżownice podwójne	48
Rozjazd angielski o skosie 1:10 Opórki	49
Skrzyżowanie torów o skosie 1:10 Schematy i plany ogólne	50

7. Strona ze spisem treści Albumu rozjazdów z szyn typu "S" z iglicami sprężystymi z 1947 roku

żenie do ujednolicenia sieci kolejowej, poprzez zachowanie standardowych i tożsamyh rozwiązań, Warto w tym miejscu przypomnieć, że na polskiej sieci kolejowej znajdowały się urządzenia i rozwiązania techniczne pochodzące z sieci kolejowych trzech państw zaborczych. Przy tym stosowanie zamknięcia hakowego było uznawane jako rozwiązanie docelowe.

W dokumencie pojawiają się rozjazdy o skosie 1:9 i promieniu 205 m (rys. 6) oraz o skosie 1:10 i promieniu 265 m. O ile rozjazd 1:9 - 205 był i niekiedy jest stosowany do dziś to w przypadku rozjazdu 1:10 jego żywot był krótkotrwały i stosowany był w bardzo ograniczonym zakresie. Można wysnuć wniosek, że oba rozjazdy wkrótce zostały zastąpione powszechnie stosowanym rozjazdem 1:9 - 300.

Wspomniane wydawnictwo [1] dowodzi, że wraz z rozwojem techniki oraz badań naukowo - technicznych rozwijały się techniki prezentacji, które pozwalały na wymianę wiedzy i informacji, a także dystrybuowanie jej szerzej - do odpowiednich jednostek i ludzi, którzy wcześniej niekoniecznie mieli do czynienia z koleją.

O bogatej zawartości Albumu [1] świadczy wykaz rysunków w nim zawartych. Wykaz tych rysunków został przedstawiony na rys. 7.

Na kolejnych rysunkach (rys. 8 - 10) przedstawiono:

- szczegóły rozwiązań konstrukcyjnych rozjazdu zwyczajnego 1:9,
- szczegóły układu geometrycznego rozjazdu krzyżowego podwójnego (angielskiego) o skosie 1:10,
- szczegóły konstrukcyjne rozjazdu krzyżowego 1:10.

Podsumowanie i wnioski

Głównym elementem utrzymania rozjazdów jest ich diagnostyka. Określanie cykli diagnozowania rozjazdów i skrzyżowań torów może być wspierane przedstawioną na rys. 1 powierzchnią o ważnych z tego punktu widzenia własnościach.

Przejeżdżający przez rozjazd pojazd kolejowy generuje drgania i hałas - inny niż na szlaku. W związku z tym warto w rejonie rozjazdów stosować wibroizolatory i ekrany akustyczne o odpowiednich parametrach, dostosowanych do

częstotliwości drgań i hałasu.

Rzeczywistość i technologii wymaga badań, testów i eksperymentów.

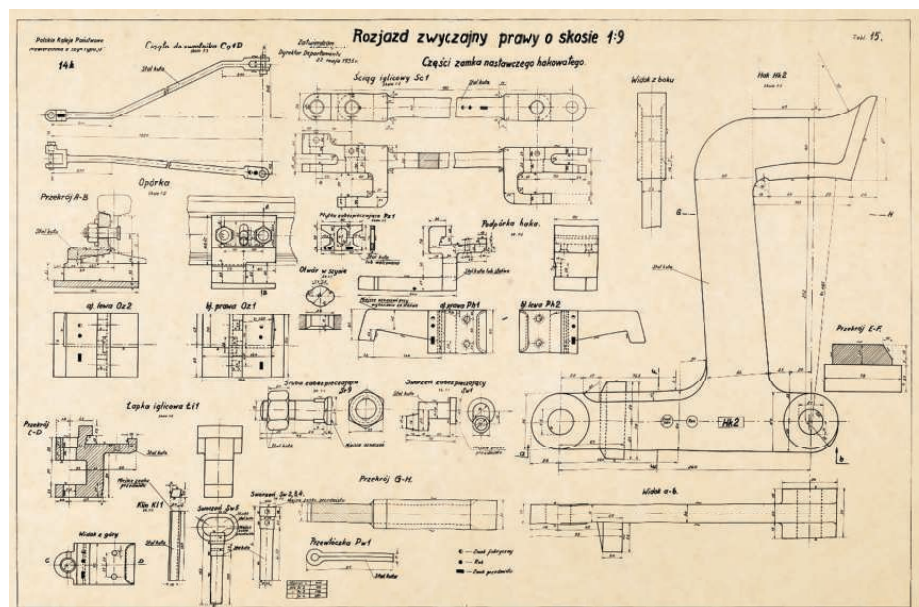
Złe zaprojektowana głowica rozjazdowa z niewłaściwymi lokalizacjami rozjazdów może nie przynieść oczekiwanych efektów modernizacji, a nawet pogorszyć zdolność przepustową układu.

O ile można odtworzyć te procesy z okresu po II wojnie światowej, gdzie procesy i techniki rejestracji zdecydowanie zostały rozpowszechnione (fotografie, zapisy dźwiękowe, zapisy obrazu, zapisy tekstowe i numeryczne) to wcześniejsze osiągnięcia są dość trudne do identyfikacji z uwagi na czas, a także straty wojenne. Dlatego jednym ze sposobów na odtworzenie procesu rozwojowego jest śledzenie publikacji, przepisów lub dokumentacji

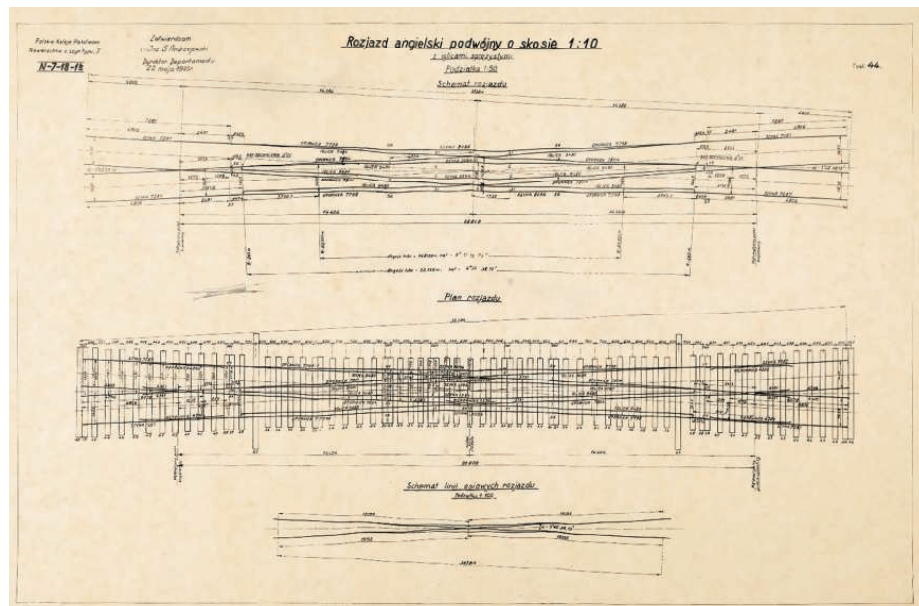
technicznej. Dokumenty te pozwalają na wyobrażenie sobie procesu postępu technicznego także w kolejnictwie. Odniesienie się do takich materiałów jak omawiany tu pokrótce. Atlas [1] pokazuje wysoką kulturę techniczną i profesjonalizm pracowników kolei w tamtych latach. Przedstawione materiały oczywiście były punktem wyjścia do dalszego rozwoju konstrukcji technicznych różnego typu rozjazdów kolejowych i skrzyżowań torów. ◀

Materiały źródłowe

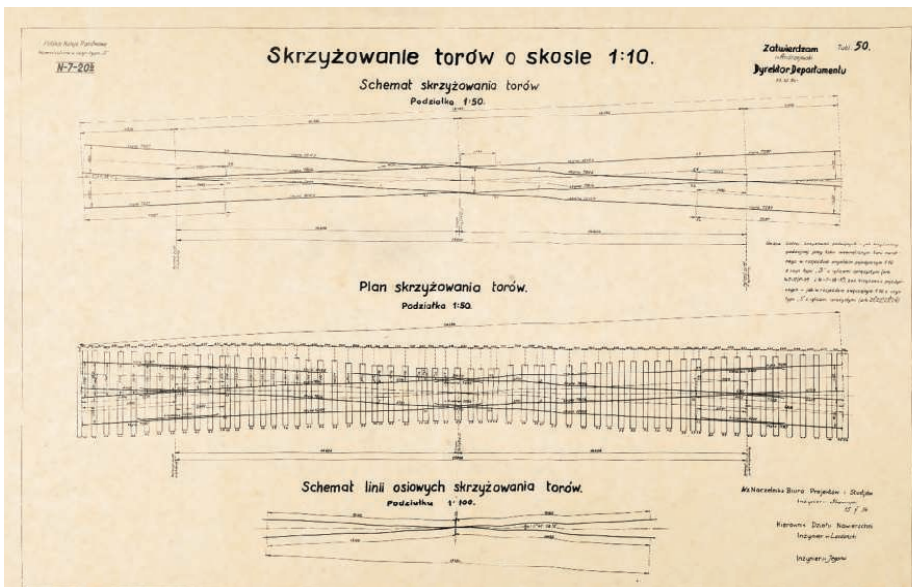
- [1] Album rozjazdów z szyn typu "S" z iglicami sprężystymi, Wydawnictwo Ministerstwa Komunikacji, 1947.
- [2] Bałuch M., Interpretacja pomiarów i obserwacji nawierzchni kolejowej,



8. Szczegóły zamknięcia hakowego rozjazdu zwyczajnego 1:9



9. Przykład rysunku ze szczegółami geometrii rozjazdu krzyżowego podwójnego o skosie 1:10



10. Przykład rysunku ze szczegółami geometrii skrzyżowania torów 1:10

Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, 2005.

- [3] BS 6472 – 1:2008 Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Part 1: Vibration sources other than blasting. British Standard 2008.
- [4] Bugarin M., Orro A., Novales M.: Geometry of high-speed turnouts. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2011, No. 2261, pp. 64–72.
- [5] DIN 4150 – 1 Erschütterungen im Bauwesen. Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden.
- [6] ISO 10131:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against Vibration 2007.
- [7] Kawecki J., Stypuła K., Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływanie komunikacyjne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2013.
- [8] Koc W., Szwaczekiewicz K., Rozdział 8. Ocena wspomagania komputerowego przy wyznaczaniu lokalizacji rozjazdów łukowych na połączeniach torów równoległych, w: Wybrane zagadnienia budowy, projektowania i eksploatacji dróg szynowych. Monografia wieloautorska pod redakcją S. Grulkowskiego, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2025.
- [9] Łączyński J., Rozjazdy kolejowe, WKiŁ, Warszawa, 1978.
- [10] Mieloszyk E., Długie pociągi, 64.

Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB: Inżynieria kolejowa - szanse i wyzwania, ed. dr hab. Piotr Kozioł; dr hab. inż. Andrzej Szarata; dr inż. Wojciech Drozd, Kraków: Politechnika Krakowska, 2018, s.173-186.

- [11] Mieloszyk E., Milewska A., Grulkowski S., Elastic waves in the railroad track substructures and its surroundings analyzed with non-classical operational methods// 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure: Road and rail infrastructure V/ ed. Stjepan Lakusić, Zagreb, 2018, s.1195-1201
- [12] Mieloszyk E., Milewska A., Grulkowski S., Ewolucja techniki i konstrukcji rozjazdów wg "Albumu rozjazdów z szyn typu "S" z iglicami sprężystymi" z 1947 roku, Problemy Kolejnictwa, nr 203 (2025), 47 – 53.
- [13] Mieloszyk E., Milewska A., Grulkowski S., Evolution of turnout technology and construction based on the "Album of turnouts for S-type rails with spring blades" from 1947. Railway Reports – Issue 203 (2025), 133 – 139.
- [14] Mieloszyk E., Milewska A., Grulkowski S., Rozdział 18. O przepustowości linii kolejowej, w: Wybrane zagadnienia budowy, projektowania i eksploatacji dróg szynowych. Monografia wieloautorska pod redakcją S. Grulkowskiego, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2025.
- [15] Mieloszyk E., Milewska A., Wyroślak

M., Rozdział 6. Ulepszanie podłoża gruntowego i podtorza z użyciem środków strzałowych, w: Wybrane zagadnienia budowy, projektowania i eksploatacji dróg szynowych. Monografia wieloautorska pod redakcją S. Grulkowskiego, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2025.

- [16] Milewska A., Metody probabilistyczne i statystyka matematyczna w inżynierii lądowej i transportowej. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2025.
- [17] Nowakowski M. J., Łukowanie rozjazdów o nietypowej konstrukcji w metrze w Sao Paulo, Logistyka, 6, 2011.
- [18] PN – EN ISO 3095 - Kolejnictwo. Akustyka. Pomiar hałasu emitowanego przez pojazdy szynowe.
- [19] Standardy techniczne: Szczegółowe warunki techniczne dla budowy infrastruktury kolejowej Centralnego Portu Komunikacyjnego - wytyczne projektowania. Tom I.1. Droga szynowa - Układy geometryczne, Instytut Kolejnictwa, Centralny Port Komunikacyjny
- [20] Strona internetowa <https://www.facebook.com/PolskieLinieKolejowe/posts/warszawa-centralna-obs%C5%82u%C5%BCy-wi%C4%99cej-podr%C3%B3%C5%BCnych-od-14-grudnia-2025-poci%C4%85-gib%C4%99d%C4%85-mog/1283741980464438/>. Dostęp 21.11.2025
- [21] Szablowska P., Rochel M., Aspekty projektowania rozjazdów na łukach i krzywych przejściowych w świetle przepisów krajowych, Autobusy, 6, 2019.
- [22] Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem) – TOM I – DROGA SZYNOWA – Załącznik ST-T1-A6 „Układy geometryczne torów”, Załącznik do uchwały Nr 305/2025 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 15 kwietnia 2025 r.
- [23] Towpiak K., Koleje Dużych Prędkości. Infrastruktura drogi kolejowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2012.

New hybrid model of dynamic rail track response in the vertical direction

Nowy model hybrydowy odpowiedzi dynamicznej toru w kierunku pionowym



Piotr Fielek

Mgr inż.

GSBK Dynamika Sp. z o.o.

piotr.fielek@gsbk.pl

ORCID: 0009-0004-8021-5155



Piotr Koziol

Dr hab.

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Katedra Dróg, Kolei i Inżynierii Ruchu

piotr.kozioł@pk.edu.pl

ORCID: 0000-0001-9685-1923

Abstract: This article presents a new hybrid model for analysing the dynamics of a railway track subjected to excitations generated by a rail vehicle, taking into account the dynamic forces at the wheel-rail interface. It is demonstrated that combining a multi-body force generator with a continuous multi-layer analytical model of the railway track is feasible and enables the analysis of both time-varying forces generated by the vehicle and the response of the track surface depending on the values of the mechanical parameters of the structure. The model of mechanical vibrations of the track in the vertical direction is solved using a semi-analytical approximation method using wavelet filters. Combined with a force description obtained by modelling the mass system corresponding to the vehicle, this represents a novel approach to the parametric analysis of track response.

Keywords: Rail track; Rail vehicle; Wheel-rail contact forces; Hybrid model

Streszczenie: W artykule, przedstawiono nowy model hybrydowy analizy dynamiki toru kolejowego poddanego wymuszeniom generowanym przez pojazd szynowy, uwzględniający siły dynamiczne na styku koło-szyna. Pokazano, że połączenie generatora sił opartego na modelu multi-body z ciągłym modelem analitycznym wielowarstwowym toru kolejowego jest możliwe i daje możliwość analizy zarówno sił zmiennych w czasie generowanych przez pojazd, jak i odpowiedzi nawierzchni w zależności od wartości parametrów mechanicznych konstrukcji. Model drgań mechanicznych toru w kierunku pionowym został rozwiązany za pomocą semianalitycznej metody aproksymacyjnej wykorzystującej filtry falkowe. W połączeniu z opisem sił uzyskanym w drodze modelowania układu mas odpowiadającego pojazdowi, stanowi on nowość w podejściu do analizy parametrycznej odpowiedzi toru.

Słowa kluczowe: Tor kolejowy; Pojazd szynowy; Siły na styku koło-szyna; Model hybrydowy

Introduction

The paper presents a new model of dynamic track response in the vertical direction. The model consists of two independent parts describing vehicle and rail track. The vehicle model is used to analyse the dynamic behaviour of a train when running on a track with irregularities and to determine the dynamic forces generated at the wheel-rail contact. The dynamic response of the track system under load from the rolling stock is analysed then by using analytical multilayer continuous model of rail track.

Usually two factors of dynamic interaction between vehicle and rail track

are considered, the weight of vehicle producing static or quasi-static response and periodical irregularities in rail track, leading to fast changing in time characteristics of the response. The additional sources of dynamic interactions from the rolling stock are rail and wheels imperfections, which cause the mechanical system of the train to be forced out of equilibrium. In a hypothetical case of a train travelling with perfectly round wheels on a perfectly rigid and flat surface, one deals with quasi-static interaction (a moving force of constant value) – there would be no changing in time impacts. Movement on an irregular track, which additionally behaves

elastically under the influence of a moving force, or bending rails, are effects that cause particular masses of the train's mechanical system to be thrown off balance. Thus, the passage of a train generates fast changing in time dynamic influence. Factors that are important for the magnitude of the common interactions and its dynamic characteristics include among others: train weight, first and second degree stiffness with accompanying damping, train speed, imperfections in the train wheels, rail irregularities, damping properties or vehicle axles configuration. This article presents an efficient method for determining the dynamic forces generated at wheel-

-rail contact. The forces determined are then used in the analysis of the dynamic response of the track in the vertical direction. The calculations of multi-body dynamics for train vehicles presented in this study are well recognized in the scientific literature [e.g. 1, 2].

The lower part of the model is an analytical description of the railway track, represented as a continuous multi-layer system, in which the rails are described as beams of infinite length. The sleepers constitute a rigid body within the second track layer, connected to the rails by a viscoelastic layer, representing the rail fastening system. The entire structure rests on a viscoelastic foundation, whose parameters can be described according to Zimmermann's theory, taking into account the various subgrade layers. This model can be solved using a semi-analytical method based on wavelet approximations, opening the way to nonlinear analysis, crucial for

the actual mechanical parameters of the rail fastening system or for highly degraded subgrades.

Vehicle model

The vehicle model is considered as a half of a railcar, in which the force is calculated per rail. The model consists of a car body, two bogies, and four wheels. The train wheels are modelled as masses with one degree of freedom (vertical displacement). The bogies and car body are modelled as masses with a moment of inertia and two degrees of freedom (vertical displacement and rotation). The connection between the wheels and the bogies is the primary suspension, modelled by Kelvin-Voight elements with stiffness and damping characteristics. The bogies are connected to the car body by a secondary suspension, also modelled as Kelvin-Voight elements. The model diagram is shown in Fig. 1.

The general equation of motion for

the system is expressed as:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (1)$$

where: $\mathbf{M}$ – mass matrix, $\mathbf{C}$ – damping matrix, $\mathbf{K}$ – stiffness matrix, $\mathbf{u}$ – displacement, $\dot{\mathbf{u}}$ – velocity, $\ddot{\mathbf{u}}$ – acceleration, $\mathbf{F}$ – external load (desired dynamic load generated by the system).

The following notation is used:

$r_{FF}, r_{FR}, r_{RF}, r_{RR}$ [m] – track irregularities under the wheels;

$z_{WFF}, z_{WFR}, z_{WRF}, z_{WRR}$ [m] – vertical displacement of the wheels;

z_{bF}, z_{bR} [m] – vertical displacement of the bogies;

z_c [m] – vertical displacement of the car body;

m_w [kg] – single wheel mass;

m_b [kg] – single bogie mass;

m_c [kg] – car body mass;

I_b [kg m²] – moment of inertia of single bogie;

I_c [kg m²] – moment of inertia of car body;

k_{p-v} [N/m] – primary suspension stiffness;

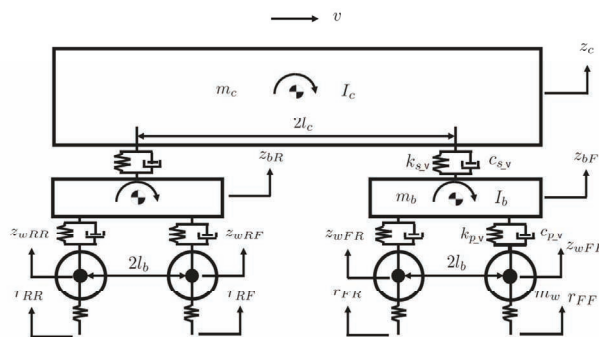
c_{p-v} [N s/m] – primary suspension damping;

k_{s-v} [N/m] – secondary suspension stiffness;

c_{s-v} [N s/m] – secondary suspension damping;

$l_{b'}/l_c$ [m] – spacing of wheels and bogies;

V [m/s] – speed of the train;



1. Vehicle multi-body model [2]

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2k_{s_v} & 0 & -k_{s_v} & 0 & -k_{s_v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2k_{s_v}l_c^2 & k_{s_v}l_c & 0 & -k_{s_v}l_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_{s_v} & k_{s_v}l_c & 2k_{p_v} + k_{s_v} & 0 & 0 & 0 & -k_{p_v} & -k_{p_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_{p_v}l_b^2 & 0 & 0 & l_b k_{p_v} & -l_b k_{p_v} & 0 & 0 \\ -k_{s_v} & -k_{s_v}l_c & 0 & 0 & 2k_{p_v} + k_{s_v} & 0 & 0 & 0 & -k_{p_v} & -k_{p_v} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_{p_v}l_b^2 & 0 & 0 & l_b k_{p_v} & -l_b k_{p_v} \\ 0 & 0 & -k_{p_v} & l_b k_{p_v} & 0 & 0 & k_{p_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{p_v} & -l_b k_{p_v} & 0 & 0 & 0 & k_{p_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{p_v} & l_b k_{p_v} & 0 & 0 & k_{p_v} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{p_v} & -l_b k_{p_v} & 0 & 0 & 0 & k_{p_v} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 2c_{s_v} & 0 & -c_{s_v} & 0 & -c_{s_v} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2c_{s_v}l_c^2 & c_{s_v}l_c & 0 & -c_{s_v}l_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_{s_v} & c_{s_v}l_c & 2c_{p_v} + c_{s_v} & 0 & 0 & 0 & -c_{p_v} & -c_{p_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2c_{p_v}l_b^2 & 0 & 0 & l_b c_{p_v} & -l_b c_{p_v} & 0 & 0 \\ -c_{s_v} & -c_{s_v}l_c & 0 & 0 & 2c_{p_v} + c_{s_v} & 0 & 0 & 0 & -c_{p_v} & -c_{p_v} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2c_{p_v}l_b^2 & 0 & 0 & l_b c_{p_v} & -l_b c_{p_v} \\ 0 & 0 & -c_{p_v} & l_b c_{p_v} & 0 & 0 & c_{p_v} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_{p_v} & -l_b c_{p_v} & 0 & 0 & 0 & c_{p_v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{p_v} & l_b c_{p_v} & 0 & 0 & c_{p_v} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{p_v} & -l_b c_{p_v} & 0 & 0 & 0 & c_{p_v} \end{bmatrix} \quad (4)$$

The matrices and vectors used in Eq. (1) are expressed as follows: the mass matrix (2), the stiffness matrix (3), the damping matrix (4), and the generalized displacement vector describing the vertical displacements and rotational angles of the individual vehicle components (5).

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_w \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} z_c \\ \varphi_c \\ z_{bt'} \\ \varphi_{bF} \\ z_{bR} \\ \varphi_{bR} \\ z_{wFF} \\ z_{wFR} \\ z_{wRF} \\ z_{wRR} \end{bmatrix} \quad (5)$$

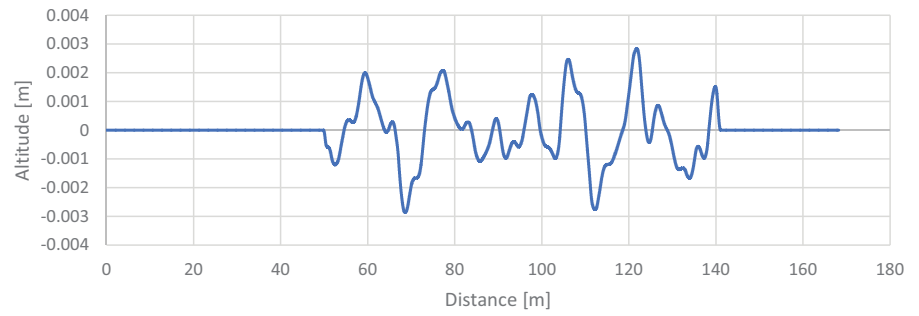
The system at a stationary state generates quasi-static pressure on the track with values resulting from its weight. When the system moves along geometrically irregular track, individual masses are displaced from their equilibrium positions, hence generating dynamic forces. The track containing irregularities along which the vehicle moves forms the excitation for the whole system. The calculations are performed using the exemplary track irregularity profile shown in Fig. 2. The track irregularity profile was taken from publication [3].

The data used in the analysis were approximated from the plot provided in the referenced work.

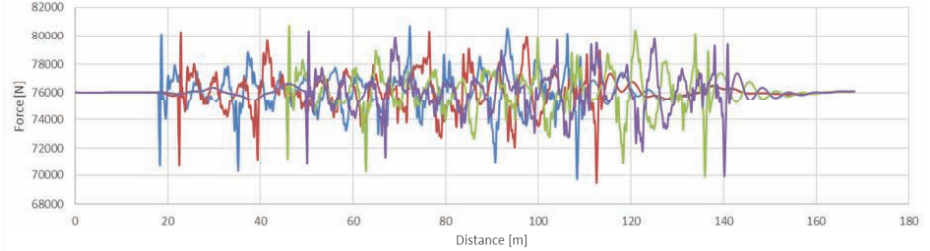
As noted in the paper, the profile was generated from the power spectral density and maximum amplitudes used are the limiting amplitudes of rail irregularities with wavelengths of 3–25 m.

Subsequently, the profile showed in Fig. 2 was extended by adding additional “flat” segments on both sides, ensuring that all wheels of the vehicle start on an undeformed track and that every wheel passes through the entire irregularity profile.

The calculations are performed for a train running on a given track at speeds of 115 km/h and 250 km/h. The system is solved numerically using the Newmark method. The interac-



2. Exemplary geometry of track irregularities



3. Simulated dynamic forces

tion between the train wheels and the rail is implemented using a nonlinear Hertz contact model [4]. Results of the dynamic response of the train wheels calculated for a speed of 115 km/h are shown in Fig. 3. This figure presents the dynamic forces generated by each of the four wheels of the railway vehicle (labeled as $F_{w,FF}$, $F_{w,FR}$, $F_{w,RF}$, $F_{w,RR}$ following the order shown in Fig. 1). The forces are plotted with respect to the longitudinal position of each wheel along the analysed track. The relative horizontal shifts between the individual force curves result from the actual wheelbase geometry of the vehicle.

The results are obtained by numerically solving the multi-body dynamics system, which is a well-established method in the scientific community [e.g., 1, 2]. Based on the calculations, a high sensitivity of the numerical system is observed, among other things, to the time step of the analysis (it must be appropriately selected for the speed of the moving train and the

profile of the irregularities). The way in which the irregularity is applied is also very important (even small changes in the vertical amplitude of the track irregularity, but applied in a jumping way, without a smooth transition, can lead to large force peaks).

Rail track model

The rail track model used for the calculations is based on an analytical approach. It describes a continuous multi-layer system, in which the leading component is the so-called double beam concept (Eq. 2), which accounts for the nonlinear stiffness of the layer between the beams and the foundation of the system [5, 6]: (6):

The following notation is used:
 $u(x,t)$ [m] – vertical vibrations of rails;
 EI_r [Nm²] – bending stiffness of rail steel;
 m_r [kg/m] – unit mass of rail;
 k_r [N/m²] – linear stiffness of the layer between rails and sleepers (including fastening system);
 c_r [Ns/m²] – viscous damping of the layer between rails and sleepers (including fastening system);
 k_{Nr} [N/m⁴] – nonlinear part of stiffness of the layer between rails and sleepers (including fastening system);
 $w(x,t)$ [m] – vertical vibrations of sleepers;

$$EI_r \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + m_r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_r \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) + k_r (u - w) + k_{Nr} u^3 - k_{Ns} w^3 = P(x, t)$$

$$EI_s \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m_s \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_s \frac{\partial w}{\partial t} + k_s w - c_r \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial t} \right) - k_r (u - w) + k_{Ns} w^3 - k_{Nr} u^3 = 0 \quad (6)$$

$$Q_k(x, t) = P_S(x, t) + P_D(x, t) + P_R(x, t), P(\tilde{x}, t) = \sum_{k=0}^{L-1} Q_k(x, t) \quad (7)$$

$$Q_k(x, t) = (P_0 + \Delta P \cdot \exp(i(\Omega_k t + \varphi_t))) \frac{1}{2a} \cos^2 \left(\frac{\pi(x - Vt - s_k)}{2a} \right) H(a^2 - (x - Vt - s_k)^2) \quad (8)$$

Tab. 1. Vehicle model parameters summary

parameter	value	unit
m_c	47800	kg
m_b	3500	kg
m_w	1800	kg
$k(p_v)$	1200	kN/m
$k(s_v)$	350	kN/m
$c(p_v)$	10	kN·s
$c(s_v)$	20	kN·s
I_c	694121	kg/m ²
I_b	8035	kg/m ²
I_r	13.8	m
I_b	2.1	m

El_s [Nm²] – bending stiffness of sleepers layer;

m_s [kg/m] – unit mass of sleepers;

k_s [N/m²] – linear stiffness of the rail track foundation;

c_s [Ns/m²] – viscous damping of the rail track foundation;

k_{Ns} [N/m⁴] – nonlinear part of stiffness of the rail track foundation;

$P(x,t)$ [N/m] – a set of loads generated by axles of train moving uniformly along rails with constant speed V [m/s].

Equation 6 can describe the track dynamics for a ballastless rail track, and after removing the first term from the second line (El_s), responsible for the bending stiffness, it provides an excellent and validated description of the dynamic response of a classical ballasted track [7]. In this case, dynamic changes in track response related to periodic track irregularities (such as additional rail deflections between sleepers) can be included in the load description. Generally, a load generated by a single wheel consists of 3 components: constant in time static part P_s generated by the weight of train, changing in time part P_D associated with periodic properties of stiffness and the part P_R responsible for other random factors influencing the load:

Taking into account the force distribution in the wheel-rail contact area and the axles configuration, the single axle load can be described as [7, 8]: (8).

where

Ω_k – frequency of axle force;

s_k – distances between forces (vehicle axles);

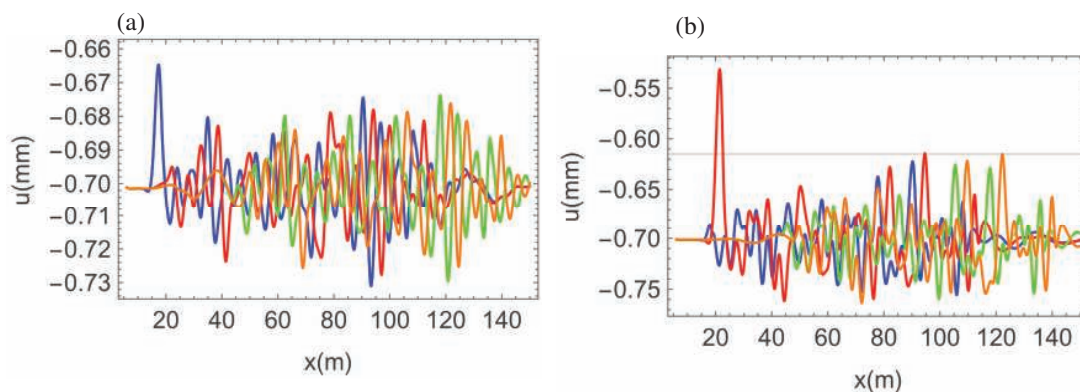
φ_l – angular frequency associated with wheel position on sleepers;

V – train speed;

$H(*)$ – Heaviside function used to describe the wheel-rail contact area;

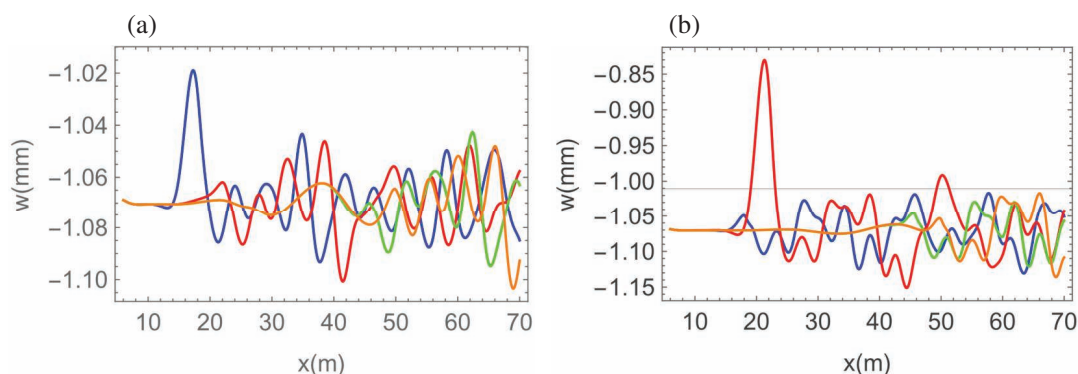
ΔP – additional force generated by regular imperfections (e.g. deflection between sleepers).

Regardless of the form and complexity of the load (Eqs. 7 and 8), the system (6) can be solved using the Adomian's decomposition with respect to nonlinear factors (stiffness of the foundation and stiffness of the fastening system [8, 9]) and wavelet filter-based Fourier transform approximations [5-7, 10].



4. Vertical displacement of rails for the random rail track section with good condition of rail track foundation ($k_s = 8.5 \cdot 10^7$ N/m²) and two bogies (front-front – blue, front-rear – red, rear-front – green, rear-rear – orange) running with the speed of:

(a) $V = 115$ km/h; (b) $V = 250$ km/h



5. Vertical displacement of sleepers layer for the random rail track section with degraded rail track foundation ($k_s = 2.8 \cdot 10^7$ N/m²) and two bogies (front-front – blue, front-rear – red, rear-front – green, rear-rear – orange) running with the speed of:

(a) $V = 115$ km/h; (b) $V = 250$ km/h

Computational examples

The following ballasted rail track parameters are used in computational examples [7]:

1. Rail type 60E1: Young's modulus $E=2.1 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$; moment of inertia in the vertical plane $I_r = 3055 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$; unit mass $m_r = 60 \text{ kg/m}$;
2. Rail foundation (fastening system): $k_r = 8.8 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$, $c_r = 3950 \text{ Ns/m}^2$;
3. Rail track foundation: $k_s = 8.5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ ($k_s = 2.8 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$), $c_s = 81 \cdot 10^3 \text{ Ns/m}^2$, $k_{Ns} = 0$; $k_{Nr} = 0$;
4. Unit mass of sleeper: $m_s = 267 \text{ kg/m}$;
5. Train speed: $V = 115 \text{ km/h}$, $V = 250 \text{ km/h}$.

The component P_D is neglected and only contact dynamic forces generated by the system described in Chapter 1 are considered.

Vehicle parameters used in computational examples are presented in Tab. 1. Description of the symbols used is provided in Chapter 1.

The forces generated at the wheel-rail interface are implemented in a continuous two-layer analytical model of the rail track, described by equations (6), where the bending stiffness in the second equation is assumed to be zero, corresponding to the ballasted track parameters. However, the removal of the P_D component eliminates the periodicity of the considered structure. The influence of nonlinearities in the subgrade and the fastening system is also neglected.

The examples are intended to demonstrate the possibility of combining hybrid multi-body techniques with a validated analytical model of the rail track, whose solution is based on semi-analytical wavelet approximations. This combination allows for a detailed analysis of the rail track response with respect to a number of parameters describing the vehicle in

detail, but also taking into account the mechanical properties of the rail track and its foundation. Figures 4 and 5 show vertical vibrations considered for a number of varying physical and mechanical parameters, demonstrating the significant impact of both rail track foundation quality and vehicle speed on the track response. A detailed analysis requires further simulation work and is therefore a future project. Of particular importance may be the consideration of nonlinear system characteristics (see Eq. 6), the analysis of which in the considered configuration requires significant computational power and remains an open problem. The next step in the planned work is to develop a numerical model of the rail track and verify it using the hybrid system presented in this paper. This will allow for the consideration of a wider range of possible cases occurring in operating systems.

Conclusions

It is shown that it is possible to effectively combine a multi-body modelling approach for train-generated dynamic forces with analytical railway track models solved by using semi-analytical techniques. Such a model can be used to analyse both the wheel-rail contact forces generated by the vehicle and their impact on rail track dynamics, depending on the rail track foundation conditions and physical parameters of the system. ◀

Source materials

- [1] Di Mino G., Di Liberto C.M.: A model of dynamic interaction between a train vehicle and a rail track; 4th International SIIV Congress – Palermo (Italy), 12-14 September 2007.
- [2] Tsunashima H., Hirose R.: Condition monitoring of railway track from car-body vibration using time-frequency analysis; Vehicle System Dynamics.

- [3] Nguyen K., Goicolea J.M., Gabaldon F.: Dynamic effects of high speed railway traffic loads on the ballast track settlement; Congreso de Metodos Numericos em Engenharia 2011.
- [4] Navarro H.A., de Souza Braun M.P.: Linear and nonlinear Hertzian contact models for materials in multibody dynamics; 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013).
- [5] Koziol P.: Wavelet approximation of Adomian's decomposition applied to the nonlinear problem of a double-beam response subject to a series of moving loads. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 52(3), 687–697.
- [6] Koziol P., Pilecki R.: Nonlinear double-beam system dynamics. Archives of Civil Engineering, 2021, 67(2), 337–353.
- [7] Czyczula W., Koziol P., Kudla D., Lisowski S.: Analytical evaluation of track response in the vertical direction due to a moving load. Journal of Vibration and Control, 2017, 23(18), 2989–3006.
- [8] Koziol P.: Experimental validation of wavelet based solution for dynamic response of railway track subjected to a moving train. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 79, 174–181.
- [9] Czyczula W., Chudyba, L., Kapurkiewicz, D., Lisowicz, T. (2023). Nieliniowa aproksymacja oporów systemów przytwierdzeń. Konferencja Naukowo-Techniczna: Drogi Kolejowe 2023, 18–19 października 2023, Kraków.
- [10] Koziol, P. (2010). Wavelet approach for the vibratory analysis of beam-soil structures: Vibrations of dynamically loaded systems. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken.

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

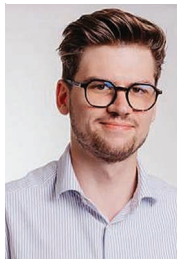


Tomasz Howiacki

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

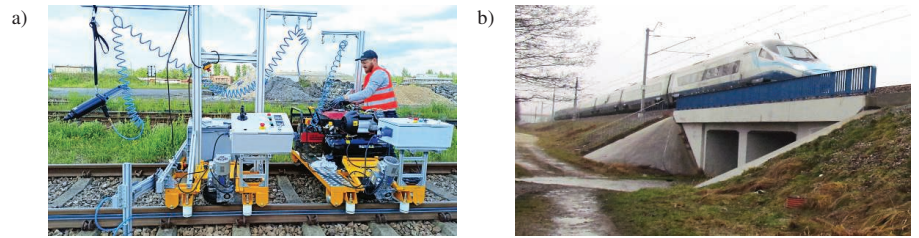
Czujniki światłowodowe DFOS zostały dostarczone na miejsce instalacji w odcinkach zwiniętych w kręgi i docelowo połączone ze sobą w jedną długą pętlę (istnieje możliwość szeregowego łączenia ze sobą czujników w celu m.in. ograniczenia liczby kanałów pomiarowych). Wykorzystano czujniki EpsilonFlat [11] 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.

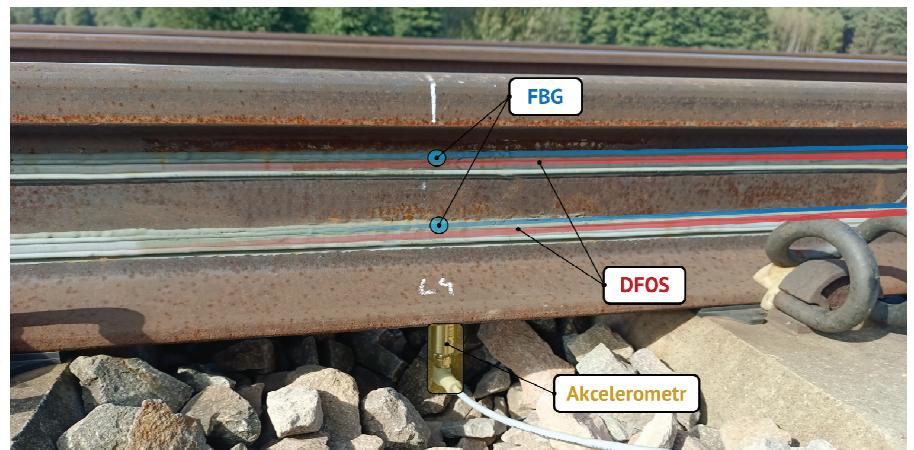
Jednym z zagadnień podejmowanych w ramach projektu była analiza strefy przejściowej (potencjalnie uskokowej) pomiędzy nasypem oraz betonowym obiektem mostowym w ciągu monitorowanego odcinka (Rys. 3a). Dlatego w tym obszarze zainstalowane zostały dodatkowo (w sposób ręczny) 24 światłowodowe siatki Bragga 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.

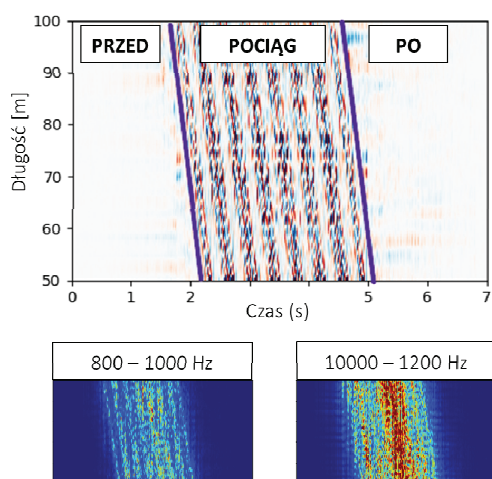
Przykładowe wyniki pomiarów

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.

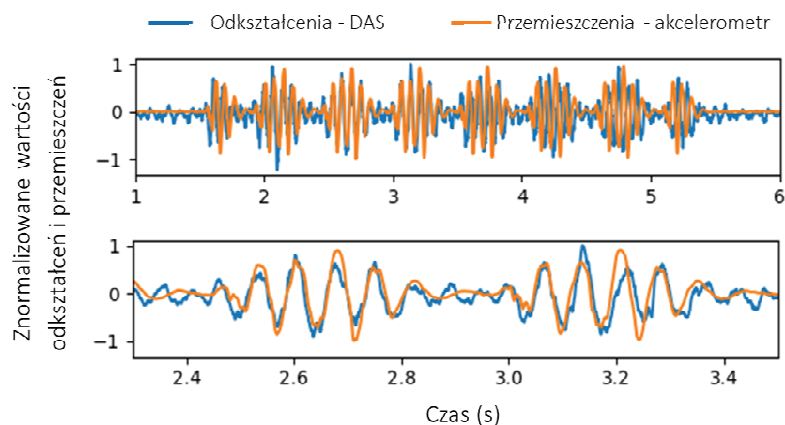
Zarejestrowany sygnał dostarcza wy-

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 dykretnego 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 – zakładając, 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.

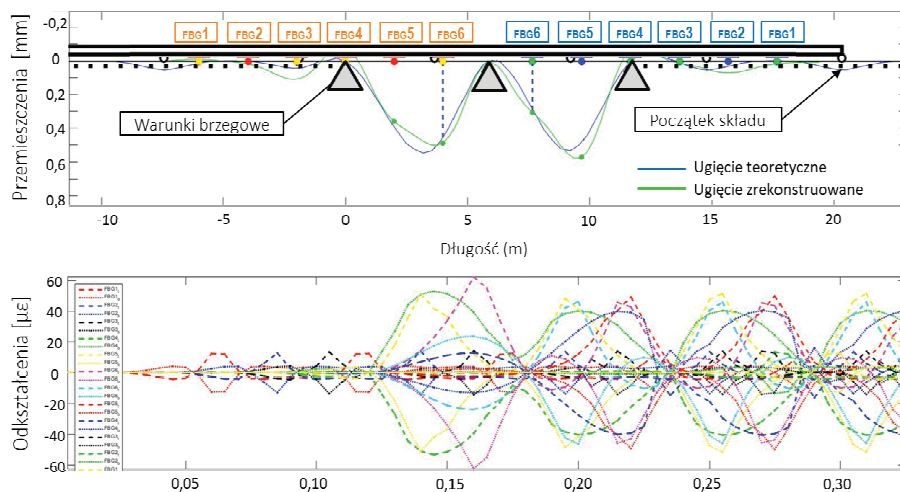
Przedstawione w niniejszym artykule informacje skupiały się na pomiarach

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.).

Metody regulacji szerokości toru na podkładach betonowych

Methods of adjusting track gauge on concrete sleepers



Grzegorz Stencel

Mgr inż.

PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.
Centrala – Biuro Dróg Kolejowych

grzegorz.stencel@plk-sa.pl
ORCID: 0000-0001-6350-7907

Streszczenie: W artykule przedstawiono problematykę regulacji szerokości toru na podkładach betonowych. Zaprezentowano obecnie obowiązujące przepisy w zakresie dopuszczalnych wartości szerokości toru, a także wskazano przykłady prac remontowych z ostatnich lat, gdzie regulacja szerokości toru była wykonywana na dłuższych odcinkach linii kolejowych. Opisano także metody regulacji szerokości toru na podkładach betonowych wraz z rekomendacjami dotyczącymi możliwości ich zastosowania w zależności od warunków organizacyjnych i finansowych.

Słowa kluczowe: Nawierzchnia kolejowa; Szerokość toru; Naprawy toru

Abstract: The article presents the issue of track gauge adjustment on concrete sleepers. It presents the current regulations on permissible track gauge values and provides examples of repair work carried out in recent years, where track gauge adjustment was performed on longer sections of railway lines. It also describes methods of track gauge adjustment on concrete sleepers, together with recommendations on their possible application depending on organizational and financial conditions.

Keywords: Railway track; Track gauge; Track repairs

Wstęp

Szerokość toru, czasami potocznie nazywana prześwitem toru lub rozstawem szyn, jest podstawowym parametrem geometrycznym w utrzymaniu nawierzchni kolejowej. Sposoby regulacji szerokości toru na podkładach drewnianych są dobrze znane i opisane w polskiej literaturze [4], natomiast regulacja w torze na podkładach betonowych jest zagadnieniem rzadko opisywanym w literaturze fachowej.

Wydawać by się mogło, że masowe stosowanie podkładów betonowych i odpowiednio wytrzymałych systemów przytwierdzeń szyn wyklucza problem regulacji szerokości toru, ale wyzwania związane ze zwiększaniem prędkości pociągów na istniejących liniach świadczą, że

jest to błędne założenie. Podstawowym czynnikiem warunkującym uzyskanie w trakcie budowy toru, a następnie utrzymanie szerokości są odchyłki produkcyjne podkładów i elementów przytwierdzeń szyn, w tym rozmieszczenie elementów zakotwionych w trakcie produkcji podkładów. Dlatego ocena zgodności systemów przytwierdzeń z normą EN 13481-2 wiąże się z koniecznością sprawdzenia wpływu odchyłek wykonania elementów przytwierdzeń na szerokość toru.

W wyniku doświadczeń z eksploatacji podkładów strunobetonowych w Polsce można stwierdzić, że od momentu stosowania podkładów PS-93, PS-94 oraz PS-83 ze sprężystym systemem przytwierdzeń (czyli od ponad 30 lat) jakość początkowa toru w zakresie szerokości (oraz gra-

dientu) spełnia wymagania odbiorowe.

Trzeba jednak pamiętać, że w trakcie eksploatacji występują oddziaływania i zjawiska, które mają wpływ na zmianę szerokości toru, a wśród nich można wyróżnić:

- siły pionowe od pojazdów (doświadczenia z eksploatacji wskazują, że na prostych odcinkach toru w trakcie przejazdu, pod wpływem obciążenia, szerokość toru się zmniejsza – takie zjawisko stwierdza się porównując wyniki pomiarów wykonanych drezyną pomiarową i toromierzem ręcznym),
- siły poprzeczne od pojazdów (na łukach widoczne jest poszerzenie toru w stosunku do przylegających odcinków prostych),
- długotrwały skurcz betonu (do

produkcji podkładów struno-betonowych stosuje się betony wysokiej wytrzymałości, których skurcz w pierwszych tygodniach może wynosić ponad 1 mm/m [3],

- rozszerzalność termiczna betonu (potwierdzeniem na widoczny wpływ tego zjawiska są wyniki pomiarów szerokości toru wykonane na tych samych odcinkach w okresie letnim i zimowym).

Oddziaływania od pojazdów w naturalny sposób wpływają na zużycie szyny, ale również na przemieszczanie się elementów przytwierdzeń i samej szyny. Możliwość przemieszczania się wynika ze wspomnianych wcześniej odchyłek produkcyjnych elementów przytwierdzeń. Zagadnienie to było już rozpatrywane pół wieku temu przez Pana Profesora Bałucha, który przyczynił się w istot-

ny sposób w rozwój podstaw teoretycznych dróg kolejowych, a także w opracowanie praktycznych metod i narzędzi usprawniających procesy ich projektowania, budowy i utrzymania [5].

W pracach [1, 2] opisano szczegółowo odchyłki geometryczne poszczególnych elementów przytwierdzenia, uwzględniając prawdopodobieństwo ich wystąpienia. W ostatnich latach badano wpływ elementów przytwierdzeń na szerokość toru w rozjazdach oraz w łukach o małych promieniach [7, 8].

Dopuszczalne odchyłki szerokości toru

Zgodnie z obecnymi Warunkami Technicznymi Id-1 (moduł D4) obowiązuje ocena progowa jakości geometrycznej toru:

- 1) U1 Próg czujności – po przekro-

czeniu progu U1 zaleca się wykonać analizę stanu toru oraz zaplanować środki na przeprowadzenie prac utrzymaniowych.

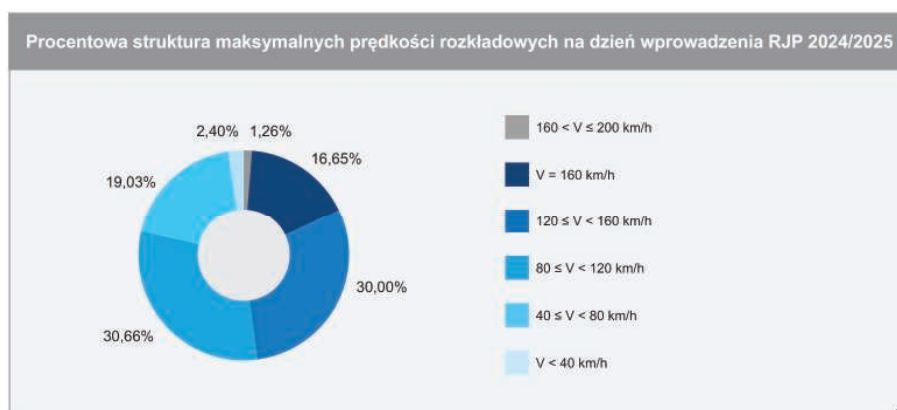
- 2) U2 Próg działań prewencyjnych – odchyłki przekraczające próg U2 zaleca się usunąć w najbliższym cyklu utrzymaniowym oraz przed osiągnięciem progu U3. Jeżeli jest to wymagane, szczegółowe zalecenia dotyczące usunięcia wadliwości określa inspektor diagnosta, biorąc pod uwagę wielkości przekroczenia odchyłek dopuszczalnych oraz stopień rozwoju wadliwości.
- 3) U3 Próg działań interwencyjnych – po przekroczeniu progu U3, należy usunąć wadliwości w najkrótszym możliwym terminie.
- 4) U4 Wartości graniczne – przekroczenie progu U4 powinno skutkować wstrzymaniem ruchu do czasu usunięcia wadliwości.

			U1							U2						
			V ≤ 40	40 < V ≤ 60	60 < V ≤ 80	80 < V ≤ 120	120 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250	V ≤ 40	40 < V ≤ 60	60 < V ≤ 80	80 < V ≤ 120	120 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250
Szerokość toru poszerzenie		[mm]	15	15	15	15	10	10	8	30	30	25	20	15	15	15
Szerokość toru zwężenie	analizować łącznie	[mm]	---	---	---	---	---	---	---	-7	-7	-5	-5	-5	-3	-3
Minimalna średnia szerokość toru		[mm]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]	[0]
			U3							U4						
			V ≤ 40	40 < V ≤ 60	60 < V ≤ 80	80 < V ≤ 120	120 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250	V ≤ 40	40 < V ≤ 60	60 < V ≤ 80	80 < V ≤ 120	120 < V ≤ 160	160 < V ≤ 200	200 < V ≤ 250
Szerokość toru poszerzenie		[mm]	32	32	32	25	20	20	18	35	35	35	35	28	28	28
Szerokość toru zwężenie	analizować łącznie	[mm]	---	---	---	---	---	---	---	-11	-11	-10	-10	-10	-7	-5
Minimalna średnia szerokość toru		[mm]	---	-7	-7	-5	-5	-5	-3	---	---	---	---	---	---	---

1. Dopuszczalne odchyłki szerokości torów. Legenda:

--- nie podlega ocenie przy danym progu

[x] – w nawiasach kwadratowych podano wartości pomocnicze służące do konfiguracji oprogramowania



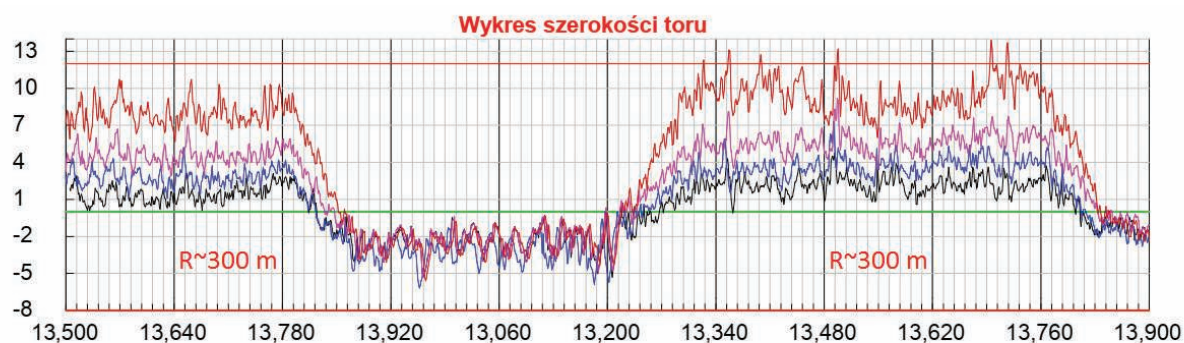
2. Procentowa struktura prędkości rozkładowych na sieci PLK SA (źródło: Raport Roczny PKP PLK S.A. 2024)

Na rysunku 1 przedstawiono dopuszczalne odchyłki szerokości torów (zmierzonej pod obciążeniem) w zależności od prędkości maksymalnej obowiązującej na danym torze (źródło: Id-1, moduł D4, załącznik 1).

Na sieci PLK SA obecnie na prawie 50 % torów obowiązuje prędkość maksymalna o wartości co najmniej 120 km/h (rys. 2). Zgodnie z tablicą 1 dopuszczalna szerokość toru, przy której teoretycznie nie trzeba podejmować żadnych działań naprawczych w odniesieniu do tych torów zawiera się w przedziale 1430÷1455 mm. Jednakże są przykłady, gdzie występuje koincydencja czynników, a poprawa szerokości toru jest jednym z wymaganych działań w celu poprawy warunków utrzymania nawierzchni.

Przykłady konieczności regulacji

W jednej z prac Instytutu Kolejnictwa [8] wskazano przykłady wyników pomiarów szerokości torów położonych w łukach o małych promieniach. Na



Nr	Oznaczenie	Data pomiaru	Wadliwość	Wartość średnia	σ	Wartość		Stopnie		
						max	min	Sp	Spm	Si
1	—	03.12.2015r.	0	.37	2.07	4.8	-5.3		0	.19
2	—	21.11.2016r.	0	1.03	2.98	7.3	-6.2		0	.28
3	—	06.11.2017r.	0	2.55	3.43	9.2	-5.3		0	.35
4	—	08.03.2022r.	1.07	4.87	5.14	13.9	-5.6	1.08	1.16	.54
5	—									

3. Wykres szerokości toru [8]

rysunku 3 przedstawiono przykład z odcinka toru z łukami o promieniu rzędu 300 m. Widać wyraźnie znaczne poszerzenie toru, które na przestrzeni kilku lat eksploatacji wzrosło od wartości kilku do nawet kilkunastu milimetrów. Jednocześnie widać zwężenie toru na odcinku prostym, które osiąga wartość kilku milimetrów.

Biorąc pod uwagę obecnie obowiązujące odchyłki dopuszczalne szerokości można od razu stwierdzić, że wbrew pozorom działania naprawcze związane z poprawą szerokości toru powinny zostać wykonane na odcinku prostym, gdzie dla prędkości 80 km/h występują przekroczenia progu U2 (zwężenie przekraczające -5 mm).

Tymczasem na łukach wartości szerokości wciąż mieszczą się w zakresie odchyłek dopuszczalnych (poszerzenie nie przekracza 15 mm). Oczywiście w takich przypadkach należy również przeanalizować stan techniczny elementów przytwierdzeń na odcinkach w łuku. Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że przy tym poszerzeniu wkładki przyszynowe mogą być uszkodzone i powinny być wymienione.

Doświadczenia z eksploatacji torów wskazują, że obecnie większym problemem jest nadmierne zwężenie toru niż poszerzenie. Dlatego w TSI Infrastruktura od 2014. roku są

ujęte wymagania dla podkładów wskazujące, że nominalna projektowa szerokość toru powinna wynosić 1437 mm. Przy zastosowaniu tego typu podkładów w przypadku odcinka prostego przedstawionego na rysunku 2, wartość średniej odchyłki szerokości byłaby bliższa 0 mm. Z uwagi na przypadek szczególny dla sieci polskiej (wymaganie 1437 mm dotyczy linii o prędkości powyżej 250 km/h), do dziś na naszych liniach stosuje się podkłady o szerokości projektowej 1435 mm.

Nadmierne zwężenie toru w to-

rach o prędkości powyżej 100 km/h może być czynnikiem sprzyjającym tzw. wężkowaniu pojazdu, co wynika ze zbyt wysokiej wartości stożkowatości ekwiwalentnej. Wartość stożkowatości ekwiwalentnej zależy również od rozstawu i profilu kół oraz profilu szyny, jednak regulacja szerokości toru najczęściej wydaje się być najprostszym sposobem na złagodzenie problemu wężkowania. W literaturze [6] wskazuje się, że występowanie szerokość toru poniżej 1434 mm znacznie sprzyja wzrostowi wartości stożkowatości ekwiwalentnej.



4. Nawierzchnia kolejowa z podkładami typu INBK-7 (materiały własne Autora)



5. Ściąg szynowy [9]

W celu oceny szerokości toru pod względem możliwości występowania problemów ze zwiększoną stożkowatością ekwiwalentną przepisy Id-1 na progu U3 określają dopuszczalne wartości średniej szerokości toru, liczonej na odcinkach o długości 100 m (rys. 3).

W ostatnich dwóch latach na polskiej sieci kolejowej przeprowadzono szereg prac naprawczych, w wyniku których na stosunkowo długich odcinkach linii przywrócono pierwotną prędkość rozkładową. Przykładem może być linia nr 27 na odcinku Nasielsk – Sierpc oraz linia nr 276 Wrocław Główny – Międzyzlesie na całej długości. W obu przypadkach na zdecydowanej większości linii pozostawiono zabudowane tam podkłady strunobetonowe typu INBK-7 (rys. 4).

Sposoby regulacji szerokości toru na podkładach betonowych

Bez względu na typ podkładu betonowego oraz zastosowany system przytwierdzeń można wyróżnić cztery podstawowe metody regulacji szerokości toru:

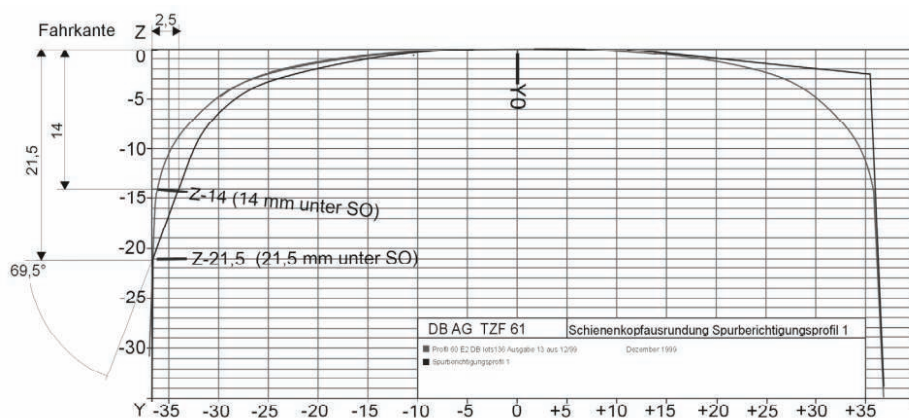
- 1) Regulacja z wykorzystaniem ściągów szynowych (rys. 5) – z wymianą lub ze zdjęciem i założeniem elementów przytwierdzeń (np. odkręcenie i dokręcenie śrub stopowych lub wkrętów albo odpięcie i napięcie łapki). W tej metodzie możliwa jest jednoczesna wymiana pojedynczych elementów systemu przytwierdzenia, np. śrub stopowych lub wkładek przyszynowych. Ze względu na pracochłonność metoda zalecana raczej w przypadku lokalnych przekroczeń odchyłek szerokości toru;
- 2) Regulacja poprzez pojedynczą wymianę podkładów – przed

naprawą konieczne jest zlokalizowanie i oznaczenie podkładów do wymiany, na których szerokość toru przekracza dopuszczalne odchyłki. W tej metodzie po wymianie podkładów konieczne jest uzupełnienie podsypki oraz podbicie toru podbijarką, żeby uzyskać odpowiednią jakość geometryczną toru po wykonanych robotach;

- 3) Regulacja poprzez wymianę szyn w łukach – można stosować w przypadkach zbyt dużej szerokości w torze z szynami o dużym zużyciu bocznym. Ze względów ekonomicznych metoda do zastosowania w przypadkach, gdy wartości zużycia bocznego (lub kąta) są bliskie wartościom dopuszczalnym;
- 4) Regulacja poprzez szlifowanie/frezowanie szyn (rys. 6) – metoda do zastosowania w przypadku, gdy konieczne jest uzyskanie większej wartości szerokości toru. Szlifowanie/frezowanie wykonuje się w celu uzyskania specjalnego profilu, a w efekcie ścięcie pierwotnego profilu do 2,5 mm na wysokości 14 mm poniżej powierzchni tocznej główki szyny (rys. 7). Dzięki takiemu zabiegowi można więc zwiększyć szerokość toru o nawet 5 mm. Profil taki został opisany w standardzie kolei niemieckich i ma zastosowanie zarówno do szyn 60E1 (UIC60), jak i 49E1 (S49). Zaznaczyć należy, że zgodnie z modułem D5 Instrukcji Id-1 dopuszczalne zużycie pionowe i boczne wynosi 10 mm (próg U1 dla prędkości do 250 km/h), a kąt zużycia: powinien być nie mniejszy niż 55°, więc taki zabieg utrzymaniowy nie powoduje znacznego skrócenia okresu eksploatacji szyn. Metoda poprzez szlifowanie/frezowanie jest najefektywniejszą metodą regulacji szerokości toru, szczególnie, gdy konieczne jest zwiększenie szerokości na dłuższych odcinkach,



6. Maszyna do szlifowania szyn (materiały własne Autora)



7. Profil szyny wg standardu Richtlinie 824.4005A02 [10]

Tab. 1. Zasadność stosowania metod regulacji szerokości toru przy różnych problemach utrzymaniowych

	Wymiana elementów przytwierdzeń	Wymiana pojedynczych podkładów	Ciągła wymiana podkładów	Wymiana szyn	Reprofilacja
Lokalne zwężenia toru	x	x			
Lokalne poszerzenia toru	x	x			
Zwężenie na dłuższych odcinkach			x		x
Poszerzenie na dłuższych odcinkach			x	x	

np. kilka lub kilkanaście kilometrów. Jednocześnie prace można wykonać w stosunkowo krótkim czasie (w tempie do kilku godzin na 1 km) i stosunkowo niedrogo (kilkadziesiąt tysięcy złotych za 1 km toru), szczególnie w porównaniu z ciągłą wymianą podkładów, która na kilkukilometrowym odcinku trwa kilka tygodni i może kosztować kilka mln zł za 1 km toru.

Podsumowanie

Regulacja szerokości toru jest zabiegiem utrzymaniowym, który nierzadko trzeba stosować również w przypadku nawierzchni na podkładach betonowych. Doświadczenia z ostatnich lat wskazują, że częściej zdarzają się przypadki, w których wymagane jest zwiększenie szerokości toru, czasem na długości nawet kilkunastu kilometrów. Dotyczy to szczególnie podkładów ponad 30-letnich, na których od momentu zabudowy szerokość toru ma wartość o kilka mm mniejszą niż 1435 mm.

Istnieje wiele metod regulacji szerokości toru, a ich wybór powinna poprzedzać analiza ekonomiczna uwzględniająca prognozowane koszty i korzyści dla różnych wariantów robót.

Metoda regulacji z wykorzystaniem ściągów szynowych jest dosyć pracochłonna jeśli do wykonania są prace na dłuższym odcinku toru, gdyż wymaga ona założenia ściągu co kilka metrów, a następnie demontaż elementów przytwierdzeń, ustawienie szyn za pomocą ściągu i ponowny montaż elementów przy-

twierdzeń.

Metoda regulacji poprzez pojedynczą wymianę podkładów ma zastosowanie w przypadkach, gdy na danym odcinku znajdują się nieznaczne (do kilku procent) przypadki przekroczeń dopuszczalnych odchyłek szerokości. Przed wymianą należy się upewnić, że metoda z wykorzystaniem ściągów jest w danym przypadku nieskuteczna.

Metoda regulacji poprzez wymianę szyn w przypadku dużego zużycia bocznego jest bezwzględnie konieczna. W przypadku gdy zużycie nie osiąga dopuszczalnych granic, należy sprawdzić czy wkładki przyszynowe nie są uszkodzone. Czasami wymiana uszkodzonych wkładek może również wpłynąć pozytywnie na poprawę szerokości toru w łuku.

Metoda regulacji poprzez reprofilację jest metodą do zastosowania praktycznie w każdym przypadku, pod warunkiem odpowiedniego stanu technicznego nawierzchni, tzn. braku uszkodzeń poszczególnych elementów toru oraz odpowiedniej jakości geometrycznej (w innym razie reprofilacja może się okazać nieemożliwa do wykonania).

Tabela 1 zawiera zasadność stosowania poszczególnych metod w przypadku występowania różnych problemów utrzymaniowych.

W przypadku konieczności zmiany szerokości w torach wybudowanych stosunkowo niedawno, w pierwszej kolejności powinno się rozważyć metody polegające na regulacji związanej z wymianą elementów przytwierdzeń lub poprzez szlifowanie szyn. W przypadku torów bardziej wyeksploatowanych można prze-

analizować zasadność ciągłej wymiany podkładów, a odzyskany materiał przeznaczyć na naprawy w torach o niższej prędkości rozkładowej. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Bałuch H.: Diagnostyka nawierzchni kolejowej. Warszawa, WKŁ, 1978.
- [2] Basiewicz T., Bałuch H.: Statystyczna analiza wymiarowa odchyłek szerokości toru. Przegląd Kolejowo-Drogowy 1964 r., nr 2.
- [3] Gruszczyński M., Kijania M., Kłos M.: Skurcz betonów wysokowartościowych – analiza przypadku. Dni Betonu 2025.
- [4] Kędra Z.: Technologia Robót Torowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2017.
- [5] Massel A.: Kluczowe zagadnienia dróg kolejowych w pracach prof. Henryka Bałucha. Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 200. Warszawa 2023. DOI: 10.36137/2004P.
- [6] Sobaś M.: Ekwiwalentna stożkowatość styku koło-szyna i jej znaczenie we współczesnej analizie własności dynamicznych pojazdu szynowego. Pojazdy Szynowe, nr 1 /2025.
- [7] Stencel G.: Ocena jakości geometrycznej torów i rozjazdów na zmodernizowanych liniach kolejowych. Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne, Nr 3(99)/2012. Kraków 2012.
- [8] https://spawalnictwoszyn.pl/download/pobieranie/o-konferencji/warsztaty_warszawa_2023/4.-Stencel_Poszerzenie.pdf (dostęp 07.12.2025), str. 6.
- [9] https://robel.com/wp-content/uploads/2025/02/LP_pl_01-25.pdf (dostęp 07.12.2025), str. 61.
- [10] Richtlinie 824.4005A02 Schienenkopfausrundung Spurberechtigungsprofil 1. DB-Regelwerk, 01.07.2003.

Przepustowość kolei dużych prędkości przy różnych prędkościach pociągów na przykładzie projektowanej linii Warszawa – Poznań

Capacity of high speed railway lines with mixed speed traffic analysed on an example of designed Warsaw – Poznan line



Jeremi Rychlewski

Dr inż.

Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Budowy Mostów i Dróg Kolejowych, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP

jeremi.rychlewski@put.poznan.pl
ORCID: 0000-0002-1712-0039



Konrad Rychlewski

Mgr

Tak dla Rozwoju

konradrychlewski@gmail.com

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania przepustowości linii dużej prędkości, na przykładzie planowanej, częściowo już realizowanej, linii Warszawa – Poznań. Przedstawiono uzasadnienie dla wykorzystania tej linii przez różne pociągi: dużej prędkości, pociągi ekspresowe, a nawet aglomeracyjne. Na podstawie znanych parametrów pociągów dużej prędkości oraz przepisów dotyczących taboru i sterowania ruchem zbudowano program do obliczania optymalnej intensywności ruchu na linii. Porównując uzyskane wyniki z horyzontalnym rozkładem jazdy uznano, że jedynie dla zakresu prędkości 160-350 km/h istnieje ryzyko ograniczenia płynności ruchu. Analizy mają charakter wstępny, program w nich użyty powinien być rozwijany w celu uwzględnienia dodatkowych parametrów i uzyskania większej precyzji obliczeń.

Słowa kluczowe: Kolej dużych Prędkości; Przepustowość toru kolejowego; Płynność ruchu pociągów; Optymalna intensywność ruchu

Abstract: The article presents an analysis concerning a possibility to utilize capacity of a high speed line, on an example of planned, partially being constructed, railway line from Warsaw to Poznań. In the article a justification of putting mixed speed traffic, from high speed trains through regional expresses to agglomeration trains, on the line is presented. Based on train's parameters and rules governing rolling stock and train control, a program was written to calculate optimal traffic intensity for a high speed line. A comparison of the capacity analysis with planned horizontal timetable shows, that only for pairing speeds of 160 and 350 km/h a deficit of capacity can occur. The analysis are preliminary, the program used should be improved by including additional parameters and for increasing the calculation's precision.

Keywords: High speed railways; Railway track capacity; Free flow; Optimal traffic intensity

Wstęp

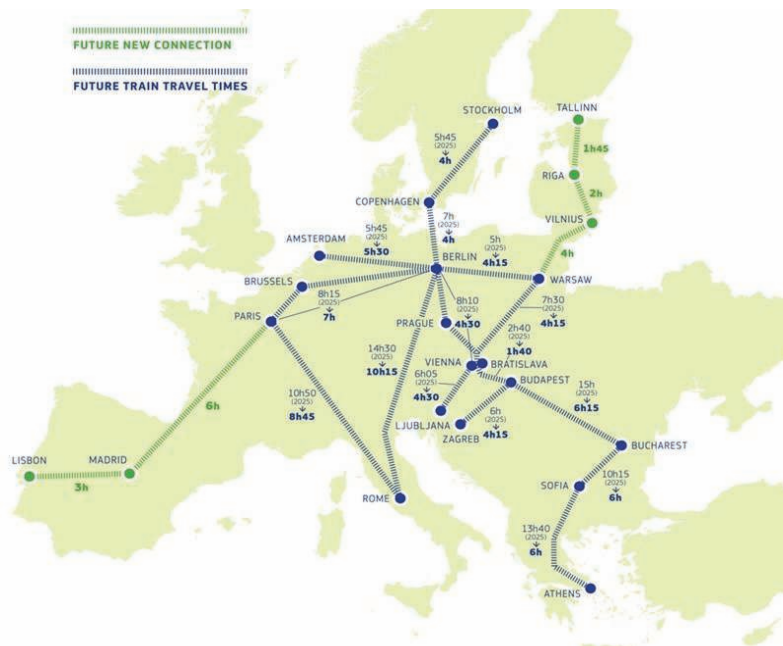
Polska jest krajem odpowiednim dla rozwoju kolei dużych prędkości. Największa w linii prostej odległość z miasta na prawach powiatu do Warszawy wynosi ok. 500 km, czyli mniej niż odległość 600 km, poniżej której pociągi dużej prędkości są uznawane za eliminujące konkurencję ruchu lotniczego [1,2,3,4]. Odległość między miastami na prawach powiatu dla niektórych par miast przekracza 600 km, w skrajnym przypadku między Świnoujściem i Przemyślem wynosząc 750 km, co wymusza na kolei konkurencję jakością z ruchem lotniczym.

Potencjalni użytkownicy kolei dużej prędkości

Polska jest krajem policentrycznym, czyli o równomiernym rozmieszczeniu miast różnej wielkości [5]. Przy takim układzie osadniczym linia kolejowa powinna łączyć również miejscowości leżące w jej pobliżu, co wydłuża jej przebieg. Obecnie odległość Szczecin – Warszawa, liczona po magistralnych liniach kolejowych, wynosi 630 km, co stanowi wydłużenie o 26% w stosunku do linii prostej, a odległość Świnoujście – Przemyśl: 990 km, z wydłużeniem o 32%. Dla relacji Świnoujście – Warszawa trudno jednak wyobrazić sobie pominięcie linią dużej prędkości Szczecina czy Poznania, choć dla poszczególnych pociągów takie sytuacje występowały:

Szczecin bywał obsługiwany tylko stacją Szczecin Dąbie, a ekspres „Chrobry” omijał Poznań obwodnicą towarową. Przykładem z zagranicy może być francuska sieć TGV, której linii dużej prędkości nie wchodzi do centrum miast [6], np. linia Paryż – Marsylia omija Lyon (drugie największe miasto Francji) w odległości 11 km od centrum, ale posiada wjazdy do miasta z obu stron, w standardzie odpowiadającym pociągom dużej prędkości.

Budowa i utrzymanie linii kolejowej dużej prędkości pochłaniają duże środki finansowe [7], a ponadto większość linii jest dedykowana ruchowi pasażerskiemu, co eliminuje zyski z transportu towarów. Linie te wymagają więc dużych potoków pasażerskich, których zapewnienie w zrównoważonym roz-



1. Broszura Unii Europejskiej pokazująca spodziewane czasy przejazdu z wykorzystaniem kolei dużej prędkości [12]

Trasa i jej parametry	Poznań – Łódź – Warszawa – Suwałki	Poznań – Toruń – Olsztyn – Suwałki
Odległość	ok. 700 km	ok. 500 km
Prędkość maksymalna	350 km/h	200 km/h
Liczba postojów (2 min.)	5	2
Przyspieszenie	0,5 m/s ²	0,5 m/s ²
Teoretyczny czas jazdy	2 h 23 min	2 h 37 min
Różnica czasu jazdy	14 minut	

2. Pobieźne (między innymi pomijające odcinkowe ograniczenia prędkości) porównanie połączenia Litwa – Niemcy linią dużej prędkości $V=350$ km/h przez Warszawę i zmodernizowaną linią $V=200$ km/h przez Toruń. Źródło mapy: Openstreetmap

kładzie sieci osadniczej wymaga obsługi również mniejszych ośrodków miejskich. Pociągi obsługujące te ośrodki kursują z mniejszą prędkością, gdyż przy częstych postojach koszt energetyczny rozpędzania się jest duży, a zysk czasowy mały [6,8]. Oznacza to, że w Polsce linie dużej prędkości będą wykorzystywane przez pociągi z różnymi prędkościami maksymalnymi. Analogię takiego stanu można znaleźć na klasycznych liniach kolejowych, gdzie prędkość handlowa (rozkładowa) pociągów ekspresowych (InterCity) jest większa od pociągów lokalnych i towarowych, co wymusza lokalizację stacji ukierunkowanych na umożliwienie wyprzedzania się pociągów [8,9].

Polska położona jest na szlakach międzynarodowych, w związku z tym rozważania dotyczące kolei dużych prędkości powinny uwzględnić również relacje międzynarodowe [10,11]. Obecnie skryształizowały się 4 kierunki,

z których trzy zawarto w najnowszym opracowaniu o perspektywie kolei dużych prędkości w Unii Europejskiej (rys. 1) [12]:

- przez Białystok do Wilna, Rygi i Tallinna, z wizją budowy tunelu do Helsinek;
- przez Łódź i Poznań do Berlina i dalej na zachód Europy;
- przez Katowice i Bramę Morawską do Wiednia i Bratysławy;
- przez Lublin do Kijowa, przy założeniu zakończenia wojny i integracji gospodarczej Ukrainy z Unią Europejską.

Znaczenie dla ruchu międzynarodowego mogą mieć nie tylko linie o prędkości maksymalnej 250-350 km/h, lecz także linie pozwalające na jazdę z prędkościami 160-200 km/h, ale skracające długość przejazdu. Przykładem może być połączenie Poznań – Toruń – Olsztyn – Suwałki jako alternatywa dla po-

łączenia Poznań – Kalisz – Łódź – CPK – Warszawa – Białystok – Suwałki (rys. 2). Przykładem budowanej obecnie trasy jest połączenie z Krakowa na Słowację przez Podłężę, Piekiełko i Muszynę.

Podsumowując, budowa bądź modernizowana (CMK) sieć polskich kolei dużej prędkości musi uwzględniać zróżnicowane potrzeby przewozowe, wpływające na miejsca zatrzymań i maksymalną prędkość taboru. Wśród typów ruchu można wyróżnić:

- Połączenia międzynarodowe, które docelowo będą potrzebowały prędkości 300-350 km/h i ograniczenia zatrzymań do kilku części Polski. Pociągi takie zatrzymywałyby się w Warszawie, Katowicach, Wrocławiu i Poznaniu, a także na CPK.
- Bardzo szybkie połączenia krajowe, które docelowo powinny osiągać prędkości 300-350 km/h i zatrzymywać się przynajmniej we wszystkich miastach wojewódzkich, a także na CPK.
- Szybkie połączenia krajowe i międzynarodowe, które w zależności od linii powinny osiągać prędkości 160-250 km/h i zatrzymywać się przynajmniej we wszystkich miastach na prawach powiatu, a także na ważniejszych lotniskach.
- Na niektórych odcinkach – połączenia regionalne, korzystające na krótkich odcinkach z torów dużej prędkości, osiągając prędkość 160-200 km/h (analogicznie do rozwiązań niemieckich [6]).

Szybkie połączenie Poznań - Warszawa

Połączenie Poznań – Warszawa jest przykładem dyskursu między dążeniem do skrócenia czasu jazdy i obsługą pośrednich miejscowości. W 1919 r. przejazd w tej relacji był możliwy przez Kalisz lub przez Toruń, ta druga trasa była krótsza i miała długość 378 km. Budowa nowej linii między Kutnem i Strzałkowem skróciła tę odległość do 308 km. Wyprostowanie przebiegu linii kolejowej w rejonie Warszawy pozwoliłoby zredukować odległość jeszcze o około 10 km – taki był pierwotny przebieg planowanego połączenia kolejaj

dużych prędkości.

Pominięcie przez kolej dużych prędkości drugiego wówczas największego miasta Polski było ewidentnie nieefektywnym rozwiązaniem, stąd w 1993 r. pojawiła się koncepcja linii Warszawa – Łódź – Poznań – Berlin w modelu zbliżonym do francuskiego, a więc omijającej główne stacje Łodzi i Poznania, z możliwością zatrzymania na peryferiach tych miast bądź wjazdu do centrum [13,14,15]. Tak planowana linia nie zapewniała dobrego połączenia do Wrocławia, stąd w kolejnym podejściu linia dużej prędkości została skierowana przez Kalisz, przy czym rozważano wariant przebiegu na północ od Kalisza i zalewu Jeziorsko, bądź na południe [8,16,17] – w tym drugim wariancie zdecydowano aby stację dla aglomeracji kalisko-ostrowskiej zlokalizować pomiędzy tymi miastami w Nowych Skalmierzycach [8,13,14,16]. Obecnie realizowany wariant zakłada rozdzielanie linii na Poznań i Wrocław w Sieradzu oraz ominięcie Kalisza z możliwością wjazdu do miasta klasyczną linią kolejową.

W tabeli 1 zestawiono długość tras w omawianych wariantach i prędkość handlową potrzebną do pokonania tych długości w ciągu 90 minut. Podany w niej procent wskazuje jaki może być koszt prowadzenia linii w celu obsługi miast – np. konieczność budowy linii na 250 km/h zamiast budowy linii na 200 km/h w celu osiągnięcia tego samego czasu przejazdu.

Podsumowując, obecnie realizowany projekt linii dużej prędkości Warszawa – Poznań zakłada:

- wjazd linii do centrum Warszawy, Łodzi, Poznania i CPK;
- możliwość zjazdu z linii, a następnie powrotu, dla obsługi takich miast jak Sieradz, Kalisz, Jarocin, Środa Wlkp.;
- możliwość zatrzymania się na linii w Brzezinach i Nowym Mieście nad Wartą;
- wydłużenie trasy o prawie ¼ w stosunku do najprostszego przebiegu i o 6% względem obsługi Kalisza i Łodzi od strony północnej.

Z tab. 1 wynika, że jeżeli nowa linia dużej prędkości ma być nie tylko al-

Tab. 1. Zrealizowane i analizowane trasy kolejowe między Poznaniem i Warszawą

Trasa linii Poznań-Warszawa (przyjęto rzeczywiste długości tras zrealizowanych i orientacyjne pozostałych)	Długość [km]	Prędkość handlowa potrzebna dla przejeżdżania trasy w ciągu 1,5 h [km/h]	
Zrealizowana – przez Toruń	378	252	126,0%
Zrealizowana – przez Konin (obecna linia nr 3)	308	205	102,7%
Analizowana – „wyprostowanie” koło Warszawy	300	200	100,0%
Analizowana – na północ od Łodzi, na południe od Poznania	320	214	106,7%
Analizowana – na północ od Kalisza	345	230	115,0%
Analizowana – przez Nowe Skalmierzyce	370	247	123,3%
Realizowana – przez Sieradz	370	247	123,3%

ternatywą wobec obecnej linii przez Konin, ale być wobec niej konkurencyjną, prędkość na tej linii powinna być o 25% większa od progu konkurencyjności dla porównywalnych długości linii.

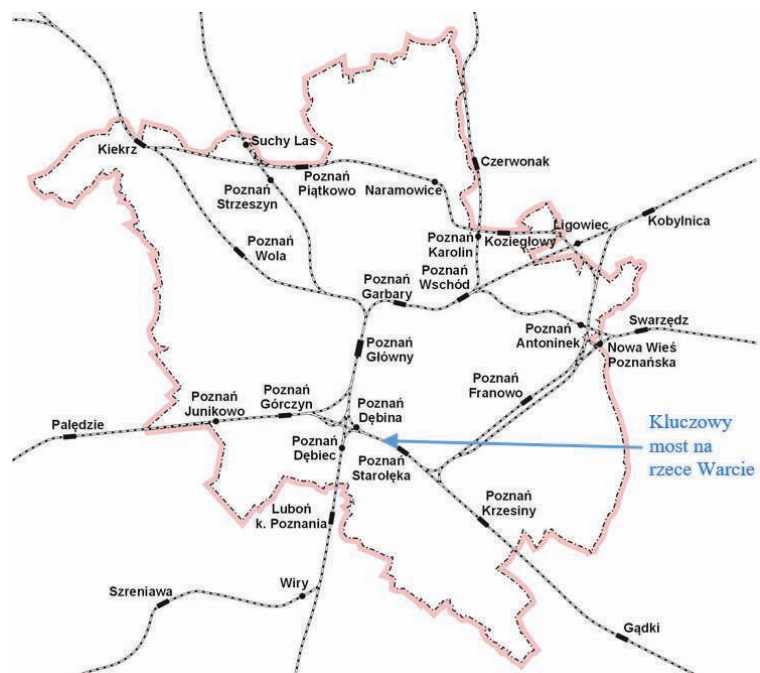
Wjazd do Poznania od strony stacji Poznań Starołęka

Przykład odcinka Poznań Starołęka – Poznań Główny pokazuje, że potrzebne może być nawet wspólne prowadzenie ruchu pociągów dużej prędkości i pociągów aglomeracyjnych. Problem dotyczy mostu na Warcie po zachodniej stronie stacji Poznań Starołęka (rys. 3), gdzie obecnie ruch pociągów metropolitalnych (w tym segmencie zawarto łącznie pociągi aglomeracyjne i regionalne) i pociągów (TLK, IC) krzyżuje się z ruchem pociągów towarowych ze Zbąszynia i Wrocławia na stację towarową Poznań Franowo. Spodziewane docelowe natężenie pociągów w go-

dzinie szczytu wyniesie [18,19]:

- 3 pary pociągów dużej prędkości oraz 1 para pociągów pospiesznych wjeżdżających z linii dużej prędkości;
- 2 pary pociągów pospiesznych jadących od strony stacji Poznań Franowo;
- 7-14 par pociągów metropolitalnych (w zależności od przyjętego wariantu obciążenia ruchem Poznańskiego Węzła Kolejowego), w tym 3-4 par pociągów jadących od strony stacji Poznań Franowo;
- nieznaną liczbę pociągów towarowych.

Widać wyraźnie, że dobudowa torów dedykowanych pociągom dużej prędkości i pospiesznym spowoduje dużą nierównomierność obciążenia istniejącej i nowej pary torów, szczególnie, że we wstępnych planach układu torowego pociągi pospieszne jadące od



3. Schemat Poznańskiego Węzła Kolejowego. Źródło: autor: Poznaniak, licencja: CC-BY strona: https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Pozna%C5%84ski_W%C4%99ze%C5%82_Kolejowy.png

Tab. 2. Wykorzystanie poszczególnych torów mostu na Warcie w godzinie szczytu w zależności od liczby torów

Wariant	Tor A	Tor B	Tor C	Tor D	Tor E	Tor F	Tor G
Stan obecny: 2-torowy	2P+2M+T	2P+2M+T					
Linia KDP omija stację Poznań Główny	T	T	3P+10M	3P+10M	2D+2D	1D	1D
Wariant proponowany przez CPK (4-torowy)	2P+10M+T	2P+10M+T	3D+1P	3D+1P			
Wariant 4-torowy alternatywny [22]	T	2P+4M+T	3D+1P+6M	3D+3P+10M			
Wariant 5-torowy	T	2P+4M+T	3D+1P+6M	3D+1P	2P+10M+B		
Wariant 6-torowy	T	T	2P+10M	3D+1P	3D+1P	2P+10M+B	
xD – liczba pociągów dużej prędkości xP – liczba pociągów pospiesznych xM – liczba pociągów metropolitalnych (przyjęto wartość pośrednią) T – tor dla pociągów towarowych B – tor wykorzystywany w porze nocnej dla ruchu manewrowego zakładów HCP i FPS							

strony stacji Poznań Franowo nie miały na nową linię wjeżdżać [20]. Problem będzie zwiększony kolizyjnością pociągów kursujących po bardziej obciążonej parze torów na posterunku odgałęźnym Poznań Dębina (formalnie PSk2). Ociążenie istniejących torów z ruchu pasażerskiego jest istotne, gdyż budowa sieci linii dużej prędkości ma „zwołnić przepustowość” dla ruchu towarowego [21], stacja Poznań Starołęka nie powinna więc być „wąskim gardłem”. Dodatkowo należy wspomnieć, że odcinek między stacją Poznań Starołęka i stacją Poznań Główny nie będzie odcinkiem dużej prędkości, zarówno ze względu na bliskość stacji Poznań Główny i długą drogę hamowania pociągów z dużych prędkości, jak też z racji ograniczenia układu geometrycznego – w pierwotnej, już nieaktualnej, koncepcji linia dużej prędkości nr 85 kończyła się na stacji Poznań Starołęka.

W tabeli 2 zestawiono obciążenie poszczególnych torów na kluczowym dla przepustowości moście na Warcie – obecnie i w różnych koncepcjach rozbudowy. Obecnie most ma 2 tory, jest też zgoda związana z oddziaływaniem na środowisko do rozbudowy do 4 torów, ale w najbardziej rozbudowanym wariantcie potrzeba nawet 7 torów. Budowa większej niż 3 liczby torów na dojeździe do stacji Poznań Główny spotyka się z dużymi protestami społecznymi. Analizy układu geometrycznego wykazały duże trudności w kształtowaniu dwupoziomowych rozwiązań torów kolejowych na zachód od mostu na Warcie [22]. Te wszystkie ogranicze-

nia wskazują na potrzebę pozostawienia istniejących torów wyłącznie lub prawie wyłącznie dla ruchu towarowego, co przy mniejszej niż 6 liczbie torów przez Wartę oznacza konieczność wspólnego kursowania pociągów dużej prędkości i przynajmniej niektórych pociągów aglomeracyjnych. Alternatywą jest powstanie „wąskiego gardła” dla ruchu metropolitalnego i towarowego.

Zasady sterowanie ruchem

Zasady sterowania ruchem przyjęto według Instrukcji Ir-1 [23], do której w praktyce odwołują się instrukcje Ir-1a i Ir-1b opisujące prowadzenie pociągów w systemie ETCS. Kluczowym elementem jest zasada, że o ile na szlaku odstępy między semaforami czterostawnej samoczynnej blokady liniowej mogą wynosić połowę drogi hamowania najgorszego pod tym względem pociągu, o tyle ostatni odstęp przed semaforem stacyjnym musi mieć długość drogi hamowania. Stąd odstęp między pociągami, który nie wymaga regulacji ruchu, nie powinien być mniejszy niż suma:

- długości pociągu poprzedzającego L_p ,
- długości obszaru detekcji przy semaforze L_{dr} ,
- długości drogi hamowania do zera pociągu następującego L_{hr} ,
- długości widoczności semafora lub, przy II poziomie ETCS, reakcji na wskazania urządzeń pokładowych L_{wid} .

Przy zastosowaniu III poziomu ETCS, nieobjętego instrukcjami, minimalny odstęp między pociągami byłby determinowany przez drogę hamowania awaryjnego. Drogę hamowania L_h obliczano ze wzoru:

$$L_h = \sum_i \frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{2 \cdot a_i}$$

gdzie:

i – przedział prędkości od v_i do v_{i+1} ,
 v_i – prędkość graniczna przedziału [m/s],
 a_i – opóźnienie hamowania w przedziale i [m/s²] według [30].

Po linii KDP pociągi będą jeździć z różnymi prędkościami – wtedy miejscem krytycznym będzie przy doganianiu pociągu odcinek przed semaforem posterunku zapowiadawczego, a gdy pociąg szybszy poprzedza pociąg wolniejszy – miejsce wjazdu pociągu wolniejszego na tor po którym jedzie pociąg szybszy. Różnica prędkości rozkładowej między tymi miejscami ograniczy przepustowość teoretyczną.

W analizie przepustowości przyjęto zasadę, że pociągi nie powinny hamować ze względu na zajętość toru przed nimi. Uwzględniono też losowe rozproszenie trajektorii pociągów – przy tych założeniach dla ruchu mieszanego spodziewana optymalna intensywność ruchu wynosi 60% teoretycznej przepustowości [24,25,26], co stanowi iloczyn:

- współczynnika losowości ruchu pociągów 70%,
- współczynnika związanego ze strukturą rodzajową 85% (dla ruchu wyłącznie pasażerskiego, ale zróżnicowanej funkcją).

Aby więc uzyskać ten efekt obliczeniowo założono zwiększenie czasów zajętości o współczynnik $n = 1 / 0,6 = 0,67 = 67\%$.

Na podstawie tych danych można oszacować optymalną intensywność ruchu OI [poc./h] ze wzoru:

$$OI = \frac{3600}{t_{sr}} \cdot n$$

gdzie:

t – średni czas zajętości odcinka przez pociąg.

Czas zajętości odcinka przez poszczególne pociągi obliczano na podstawie wzoru:

$$T = \frac{L_p + L_d + L_h + L_{wid}}{V_{sr}}$$

gdzie:

długości L [m] opisano wyżej, V_{sr} – prędkość średnia na analizowanej długości, przy czym program dla znaczących różnic prędkości przeprowadza obliczenia dla poszczególnych przedziałów prędkości.

Parametry pociągów

W Tabeli 3 zestawiono przyjęte parametry pociągów, konieczne do analizy przepustowości. Parametry te przyjęto wykorzystując dane z artykułów [27,28,29,30]. Wartości przyspieszeń są uproszczone, w obliczeniach stosowano wartości określone dla konkretnych przedziałów prędkości. Dla hamowania awaryjnego w razie stosowania ECTS poziomu III przyjęto opóźnienie $1,0 \text{ m/s}^2$ jako największe bezpieczne dla pasażerów będących poza miejscami siedzącymi.

Wyniki analiz przepustowości

Obecne plany CPK zakładają kursowanie po nowo budowanych liniach do Poznania i Wrocławia, tworzących tzw. „Y”, 3 różnych kategorii pociągów:

- ekspresów o prędkości maksymalnej ponad 300 km/h ,
- ekspresów lotniskowych o przewidywanej prędkości maksymalnej na poziomie 200 km/h ,
- ekspresów regionalnych o przewidywanej prędkości maksymalnej na poziomie 200 km/h .

Taka koncepcja budzi uzasadnione obawy co do wpływu współdzielenia linii przez pojazdy o tak różnej charakterystyce. Przykładem problemów mogą być:

- Wprowadzenie na CMK pociągów Pendolino z prędkością 200 km/h , co skróciło czas przejazdu tymi pociągami, ale wydłużyło czas przejazdu pozostałymi, gdyż konieczne stały się postoje techniczne w celu

Tab. 3. Parametry pociągów wykorzystane w analizie przepustowości

Typ pociągu	Prędkość maksymalna [km/h]	Przyspieszenie rozruchu [m/s^2]	Opóźnienie hamowania [m/s^2]	Czas reakcji [s]	Długość pociągu [m]
Szybszy dużej prędkości	350, 300, 250	0,3	0,4	5	300
Wolniejszy dużej prędk.	250, 220, 200	0,4	0,5	5	300
Pospieszny	160, 200	0,5	0,6	7	300
Metropolitalny	160	1,0	1,0	7	200

wyprzedzenia. Jest to problem zróżnicowanej prędkości.

- Obecne obawy przewoźników regionalnych związane z dostępem do sieci kolejowej konkurencyjnych przewoźników czeskich. Przewoźnicy regionalni obawiają się, że dodatkowe pociągi zajmą sloty czasowe przewidziane dla nich, bądź wymuszą niekorzystne zmiany w rozkładach jazdy, zwiększające koszty operacyjne i zmniejszające atrakcyjność dla pasażerów [31]. Jest to problem priorytetowy przy organizowaniu ruchu na linii.

Celem zglebienia tego zagadnienia stworzyliśmy autorski program komputerowy służący symulacji ruchu kolejowego w zależności od parametrów linii kolejowej, osiągowi pojazdu i planowanych postojów handlowych. W szczególności program oblicza czas przejazdu po podaniu:

- parametrów pojazdu takich jak długość, maksymalne przyspieszenie dla różnych przedziałów prędkości, maksymalne opóźnienie hamowania i prędkość maksymalna;
- charakterystyki sieci kolejowej: długość odcinków i przypisane im prędkości maksymalne, umiejscowienie rozjazdów;
- dodatkowych zmiennych niewynikających bezpośrednio z warunków technicznych: długość postojów handlowych i technicznych (ten aspekt nie stanowił jednak elementu przedstawionych tutaj analiz).

W dowolnym momencie symulacji brano również pod uwagę zbliżające się ograniczenia prędkości wynikające np. ze zbliżania się do punktu zatrzymania i tak kształtowano prędkość pociągu, żeby zawsze pozostawał poniżej teoretycznie możliwej, dopuszczalnej

prędkości maksymalnej. Uzyskiwany w ten sposób czas przejazdu był najkrótszym, teoretycznie osiągalnym czasem przejazdu, który stanowił podstawę dalszych obliczeń.

Przy wykorzystaniu ECTS poziomu III i dla jednolitej obsługi przez tabor KDP jednego producenta poruszający się z jednolitą prędkością maksymalną 350 km/h , minimalne odstępy między pociągami byłyby determinowane przez drogę hamowania awaryjnego. Przy założeniu maksymalnego opóźnienia hamowania $1,0 \text{ m/s}^2$ minimalny odstęp wyniósłby 4800 m plus 400 m długość pociągów, czyli 5.200 m . Zastosowanie minimalnych odstępów nie mniejszych niż 5.500 m przekładałoby się na minimalny odstęp czasowy 57 s , czyli przepustowość teoretyczną 1 pociągu KDP co minutę. Uwzględniając przeliczenie na optymalną intensywność ruchu zwiększając czas przy ruchu równomiernym o 50% [9] uzyskuje się odstęp 86 s , czyli optymalną intensywność ruchu 42 poc./h .

W polskich warunkach znacznie większe znaczenie praktyczne będzie miała maksymalna przepustowość przy zastosowaniu ETCS poziomu II ze stałymi odstępami blokowymi. Przy założeniu parametrów z tabeli 3 uzyskuje się długość krytycznego odstępu blokowego 11.500 m – co po dodaniu długości pociągu daje odstęp między pociągami 11.900 m . Przy tych parametrach minimalny odstęp między pociągami wynosi 123 s , a po uwzględnieniu przeliczenia na optymalną intensywność ruchu – 185 s i 19 poc./h . Widać więc wyraźne zyski z uruchomienia ETCS poziomu III, o ile taka przepustowość byłaby potrzebna.

W ruchu mieszanym przepustowość znacząco zmniejsza się, gdyż pociągi szybsze doganiają wolniejsze. Sposobem na zwiększenie przepustowości jest wówczas zatrzymanie wolniejszego pociągu na torze dodatkowym

stacji lub opuszczanie linii przez wolniejsze pociągi. W tabeli 4 zestawiono czasy przejazdu poszczególnych odcinków linii KDP Warszawa – Poznań według obecnego projektu [20,32] oraz wynikające z nich optymalne intensywności ruchu. Odcinki te wynikają z miejsc zatrzymywania pociągów mniejszej prędkości w postaci stacji na linii dużej prędkości (CPK, Brzeziny), bądź stacji na które przewidziano zjazd z linii dużej prędkości (Sieradz, Kalisz, Jarocin). Pominęto ostatni odcinek do Poznania ze względu na brak docelowych rozwiązań w obrębie samego Poznania. Tabela 4 podaje czas zajętości odcinka przez pociągi poruszające się z prędkością maksymalną 160, 200, 250 i 350 km/h, uwzględniając ich 400-metrową długość, a następnie w oparciu o różnice czasu podaje obliczone przepustowości dla par pociągów różnych prędkości. Założono stosowanie II poziomu ETCS. Dla celów obliczeniowych założono, że pociąg szybszy i wolniejszy następują po sobie, obciążając linię w proporcji 1:1. z czasem przejazdu pociągu poruszającego się z prędkością 350 km/h. Przykładowo dla odcinka CPK – Brzeziny różnica czasu następstwa między pociągami tej samej prędkości wyniesie 2 minuty, a między pociągiem jadącym 200 km/h i pociągiem jadącym 350 km/h – 9:37 minut. Dla tych wartości optymalna intensywność ruchu będzie osiągnięta dla 6 par pociągów w godzinie. Biorąc pod uwagę że w horyzontalnym rozkładzie jazdy [18] obciążenie badanej linii wynosi 4-5 par pociągów na godzinę, za ryzykowne należy uznać jedynie zestawienie pociągów o maksymalnej prędkości 350 i 160 km/h.

Celem wyznaczenia optymalnej intensywności ruchu założono, że wol-

niejszy pociąg poprzedzający pociąg szybszy zdąży zjechać na przeznaczony dla niego tor w miejscu zatrzymania, np. CPK, na tyle wcześniej, żeby w momencie osiągnięcia przez następujący po nim szybszy pociąg „punktu decyzji” – położonego w odstępie 11900 m przed zjazdem na stację (dla ETCS poziomu 2) – tor zasadniczy lub szlakowy nie był już zajęty. Dla przystanków nie należących bezpośrednio do linii „Y” do celów obliczeń wzięto pod uwagę odcinek do zjazdu wydłużony o 400 m.

Podsumowanie

Koszty budowy kolei dużej prędkości wymagają aby linia ta była wykorzystywana – co w warunkach polskich oznacza prowadzenie ruchu pociągów o różnej prędkości maksymalnej. Analizy z wykorzystaniem autorskiego programu badającego następstwa ruchu pociągów wskazały, że przy zastosowaniu intensywności ruchu przewidzianej horyzontalnym rozkładem jazdy przepustowość dla obsługi tak mieszanego ruchu jest zapewniona: jednie dla łączenia ruchu pociągów o maksymalnej prędkości od 160 do 350 km/h przepustowość może być niewystarczająca dla prowadzenia płynnego ruchu, szanse na taką kombinację prędkości na liniach dużej prędkości są jednak małe. Kombinacja taka może wystąpić na obszarach aglomeracji, gdzie jednak pociągi dużej prędkości będą jechać wolniej ze względu na bliskość stacji na której będą się zatrzymywać.

Linia z Warszawy do Poznania będzie pod względem wyprzedzania wolniejszych pociągów niejednorodna: między Warszawą a Sieradzem pociągi wolniejsze będą zatrzymywane

na torach dodatkowych, a w Sieradzu i na dalszych odcinkach będą zjeżdżać z linii dużej prędkości, przy czym dla Kalisza, Jarocina i Środy Wielkopolskiej długość tego zjazdu będzie zauważalnie wydłużała przejazd. Przedmiotem kolejnej analizy powinny być czasy oczekiwania na wyprzedzenie na stacjach w ramach linii dużej prędkości i koordynacja trajektorii pociągów zjeżdżających na stacje z pociągami pozostającymi na linii dużej prędkości.

Obecna koncepcja zakłada przy największych miastach zmniejszenie maksymalnej prędkości do klasycznego poziomu. W takich warunkach optymalne wykorzystanie linii może wiązać się z wprowadzeniem nawet pociągów aglomeracyjnych.

Wydłużenie linii dużej prędkości Warszawa – Poznań w stosunku do długości w linii prostej, a także długości przy wykorzystaniu istniejących klasycznych linii kolejowych, będzie wymagało dobrej prędkości pociągów. Jednocześnie nawet dla prędkości 350 km/h inne połączenia, w tym z Niemiec na Litwę przez Toruń, będą stanowić czasowo gorszą, ale jednak realną alternatywę.

Już na tym wstępnym etapie naszych analiz można wskazać na zauważalną poprawę przepustowości przy zastosowaniu ETCS poziomu III w stosunku do bardziej rozpowszechnionego poziomu II. Zasadne jest oczywiście pytanie czy większa przepustowość będzie potrzebna: o ile na odcinkach pomiędzy miastami prawdopodobnie nie, o tyle może się przydać w obrębie aglomeracji. Będąc krajem budującym swoją sieć KDP niemal od podstaw, mamy niepowtarzalną szansę sięgnięcia do najnowszych rozwiązań technologicznych, unikając konieczności modernizowania rozwiązań w przyszłości. Budowa sieci KDP może być dźwignią dla szybszego rozwoju rodzimego sektora wysokich technologii.

Przedstawione w tym artykule wstępne badania należałoby rozszerzyć na różne konfiguracje ETCS, wszystkie stacje kolejowe planowane na liniach dużej prędkości i różne rodziny pojazdów kolejowych. Posiadanie własnego modelu symulacyjnego niewątpliwie przyspieszy analizy opty-

Tab. 4. Czasy następstwa i wynikająca z nich optymalna intensywność ruchu dla par typów pociągów różnej prędkości v [km/h] na linii dużej prędkości Warszawa – Poznań

Odcinek	Czas następstwa [min]				Optymalna intensywność ruchu [par poc./h]					
	T v160	T v200	T v250	T v350	OI v160 v250	OI v160 v350	OI v200 v250	OI v200 v350	OI v250 v350	
Warszawa	CPK	15:35	12:57	11:21	8:08	11	7	19	10	14
CPK	Brzeziny	24:50	20:07	16:28	10:36	6	4	12	6	9
Brzeziny	Łódź	7:42	6:36	5:56	2:37	19	10	27	12	13
Łódź	Sieradz	36:18	32:11	29:04	24:03	7	4	14	7	10
Sieradz	Kalisz	15:00	12:16	10:10	6:03	10	6	17	8	11
Kalisz	Jarocin	19:12	15:37	12:52	7:57	8	5	15	7	10

malnego kształtowania i wykorzystania potencjału sieci kolei dużych prędkości w Polsce. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Clewlow R. R., Sussman J. R., Balakrishnan H.: The impact of high-speed rail and low-cost carriers on European air passenger traffic; *Transport Policy* 2014/33, str.136-143
- [2] Dyr T.: Koleje dużych prędkości jako czynnik poprawy konkurencyjności kolei na rynku transportowym; *Technika Transportu Szynowego* 2010/11-12, str.33-43
- [3] Pomykała A.: Kolej dużych prędkości we Francji – korzyści i plany dalszego rozwoju; *Technika Transportu Szynowego* 2011/12, str.41-50
- [4] Rydzkowski W., Wojewódzka-Król K.: Współczesne problemy polityki transportowej, PWE, Warszawa 1997
- [5] Śleszyński P.: Dlaczego i do czego potrzebny jest w Polsce szczebel subregionalny?; Kongres Obywatelski, <https://www.kongresobywatelski.pl/wp-content/uploads/2024/07/ptl17-przemysl-sleszynski-dlaczego-i-do-czego-potrzebny-jest-w-polsce-szczebel-subregionalny.pdf> (dostęp: 26.11.2025)
- [6] Massel A., Malepszak P.: Koleje dużych prędkości a obsługa regionów; *Technika Transportu Szynowego* 2009/10, str.23-28
- [7] Sanches-Borras M., Lopez-Pita A.: Rail infrastructure charging systems for high-speed lines in Europe; *Transport Reviews* 2011/31, str. 49-68
- [8] Rychlewski J.: Obsługa transportowa rejonu Kalisza linią kolejową dużych prędkości; *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* 2006/62-1721, str.417-424
- [9] Rychlewski J., Plucińska E., Bednarek W., Pawłowski M.: Organizacyjne metody zwiększenia przepustowości sieci kolejowych w aglomeracjach; *Drogi kolejowe 2023: Jubileuszowa XX Konferencja Naukowo-Techniczna* : materiały konferencyjne - Kraków, Polska : Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej. Oddział w Krakowie 2023, str.297-313
- [10] Majewski J., Malepszak P.: Polska droga do kolei dużych prędkości – analiza wyzwań i perspektyw rozwoju; *Przegląd Komunikacyjny* 2025/3-4, str.16-19
- [11] Massel A., Omówienie koncepcji linii KDP w kontekście międzynarodowym; Prezentacja na konferencji „Rozwój polskiej kolei z wykorzystaniem środków UE – analiza możliwości budowy Kolei Dużych Prędkości w Polsce”; Warszawa 2017
- [12] broszura Unii Europejskiej https://transport.ec.europa.eu/document/download/bce4578a-0fb6-48f7-a879-56134d4ea56d_en?filename=Factsheet-High-speed%20rail%0plan.pdf (dostęp 27.11.2025)
- [13] Raczyński J.: Rządowy program budowy linii dużych prędkości w Polsce; *Technika Transportu Szynowego* 2008/9, str.17-26
- [14] Bresch B.: Modernizacje linii kolejowych w Polsce a budowa linii dużych prędkości; *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej* 2017/25, str.51-60
- [15] Studium Trasy dla prędkości 300 km/h na odcinku Warszawa – Łódź – Poznań – granica Państwa, Centralne Biuro Studiów i Projektów „Kolprojekt”, Warszawa 1993
- [16] Wstępne studium wykonalności budowy linii dużych prędkości Wrocław/Poznań – Łódź – Warszawa, CNTK, Warszawa 2005 r. na zlecenie PKP PLK S.A.
- [17] Szafrński Z.: Projekt CPK szansą rozwoju regionu łódzkiego; *Przegląd Komunikacyjny* 2025/3-4, str.34-39
- [18] Horyzontalny rozkład jazdy <https://hrj.gov.pl/rozpoczynamy-konsultacje-horyzontalnego-rozkladu-jazdy/> (dostęp 28.11.2025)
- [19] Bul R., Gadziński J., Rychlewski J.: Sieć kolejowa i kolej metropolitalna; *Koncepcja kierunków rozwoju przestrzennego Metropolii Poznań: Centrum Badań Metropolitalnych UAM Poznań*, 2016, str.124-131
- [20] Materiały ze strony Centralnego Portu Komunikacyjnego www.cpk.pl (dostęp 1.06.2023)
- [21] Zapisy posiedzeń Sejmowych z 8 czerwca 2021 r. i 25 kwietnia 2024 r. opublikowane na stronie www.sejm.gov.pl
- [22] Rychlewski J.: Przebieg linii kolejowej dużej prędkości nr 85 przez Poznań w: *Nowe środki transportu i nowe formy mobilności*, SITK, Poznań 2023, str.293-304
- [23] Instrukcja o prowadzeniu ruchu pociągów Ir-1 – tekst ujednolicony. Załącznik do uchwały nr 752/2025 Zarządu PKP PLK S.A.
- [24] Woch J.: Narzędzia analizy efektywności i optymalizacji sieci kolejowej, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001
- [25] Cieślakowski J.: Stacje kolejowe, WKiŁ, Warszawa 1992
- [26] Gajda, B.: *Technika transportu szynowego*, WKiŁ, Warszawa 1990
- [27] Standardy techniczne: Szczegółowe warunki techniczne dla budowy infrastruktury kolejowej Centralnego Portu Komunikacyjnego – wytyczne projektowania. Tom XVI Tabor kolejowy wersja 2.0.0, Instytut Kolejnictwa i Centralny Port Komunikacyjny
- [28] Rozporządzenie Komisji UE nr 1302/2014 Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej
- [29] Raczyński J.: Pociągi dużych prędkości – kierunki rozwoju; *Technika Transportu Szynowego* 2005/5-6, str.61-72
- [30] <https://www.ice-treff.de/index.php?id=104110> (dostęp 27.11.2025)
- [31] <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/przewoznicy-regionalnie-niezadowoleni-z-regiojet-125596.html> (dostęp 27.11.2025)
- [32] <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/cpk-tak-dojedziesz-pociagiem-na-lotnisko-zarzadzajnia-szczegoly-122387.html> (dostęp 27.11.2025)

Monitorowanie przebiegu drgań toru kolejowego w warunkach eksploatacyjnych

Monitoring of railway track vibration signals under in-service conditions



Piotr Chrostowski

Dr hab. inż.

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Transportowej

piotr.chrostowski@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5454-026X



Sławomir Judek

Dr inż.

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu

slawomir.judek@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0003-4620-8416



Michał Michna

Dr hab. inż.

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych

michal.michna@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-9683-7459



Krzysztof Karwowski

Dr hab. inż.

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu

krzysztof.karwowski@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0003-1662-6051

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane wyniki prac badawczych, których głównym celem było opracowanie systemu pomiarowego przeznaczonego do monitorowania i oceny oddziaływań wibroakustycznych na liniach kolejowych. Zastosowanie wielu sensorów – zarówno różnych typów, jak i licznych czujników tego samego rodzaju – pozwala na uzyskanie pełnego i wiarygodnego obrazu tych oddziaływań, co jednocześnie wymagało opracowania centralnego, zautomatyzowanego systemu zarządzania pomiarami, odpowiedzialnego m.in. za inicjację, synchronizację i zakończenie rejestracji. Opracowane rozwiązania obejmują zarówno część sprzętową, jak i algorytmy analizy danych, a ich skuteczność zweryfikowano w warunkach laboratoryjnych oraz podczas pomiarów terenowych prowadzonych na torach kolejowych. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom związanym z pomiarem i interpretacją drgań toków szynowych wynikających z dynamicznych oddziaływań na styku koła i szyny. Prezentowane rezultaty odnoszą się do prac badawczych prowadzonych w ramach projektu InfraNoise – Wspólne Przedsięwzięcia NCBR i PKP PLK S.A. pn. „Badania i Rozwój w Infrastrukturze Kolejowej – BRIK2”.

Słowa kluczowe: Infrastruktura transportu kolejowego; Tabor kolejowy; Hałas kolejowy; Badania środowiskowe; Drgania i hałas; Obszarowa sieć sensorowa

Abstract: This article presents selected results of research aimed at developing a measurement system designed for monitoring and assessing vibroacoustic interactions on railway lines. The application of multiple sensors - both of different types and numerous sensors of the same type enables the acquisition of a comprehensive and reliable picture of these interactions, which in turn required the development of a central, automated measurement management system responsible for, among other tasks, the initiation, synchronization, and termination of data acquisition. The proposed solutions include both hardware components and data analysis algorithms, whose effectiveness was verified under laboratory conditions as well as during field measurements conducted on railway tracks. Particular attention is devoted to issues related to the measurement and interpretation of rail vibration induced by dynamic wheel-rail interaction. The presented results refer to research carried out within the InfraNoise project, implemented under the joint initiative of the National Centre for Research and Development (NCBR) and PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., entitled “Research and Development in Railway Infrastructure – BRIK2”.

Keywords: Railway transport infrastructure; Rolling stock; Railway noise; Environmental studies; Vibrations and noise; Spatial sensor network

Wstęp

Monitorowanie oddziaływań transportu kolejowego na środowisko stanowi istotne zagadnienie związane z zarządzaniem infrastrukturą i taboru kolejowym [8,9,22,25,29].

Zjawiska wibroakustyczne związane z ruchem kolejowym zależą od wielu czynników, a w związku z tym określenie wpływu różnorodnej struktury ruchu na generowane drgania i hałas jest zadaniem złożonym, badanym przez wielu autorów [19,21,24].

Problem ten zyskuje na znaczeniu zwłaszcza w kontekście dynamicznie rozwijającego się rynku pojazdów, ale również w związku ze zmianami wynikającymi z modernizacji infrastruktury torowej, w tym sukcesywnym wdrażaniu systemu Kolei Dużych

Prędkości [24]. Ponadto dynamiczne oddziaływanie kół pojazdów na infrastrukturę niesie ryzyko przyspieszonej degradacji elementów nawierzchni [1,3,18,20,31], włącznie z pęknięciami toków szynowych, a w skrajnych przypadkach nawet złamaniami szyny.

Jako że oddziaływania na styku pojazd-tor oraz propagacja wibracji w bezpośrednim sąsiedztwie dróg kolejowych mają wpływ nie tylko na sam tabor i infrastrukturę, ale również na ludzi przebywających w pobliżu linii kolejowych [26], to monitorowanie powyższych zjawisk powinno odbywać się regularnie. Pomiar hałasu i drgań stanowi standardową czynność w zarządzaniu infrastrukturą kolejową. Trudniejsze jest jednak oszacowanie czynników mających bezpośredni wpływ na wielkość i charakter zjawisk wibroakustycznych, zwłaszcza w przypadku zróżnicowanej struktury eksploatacyjnej [1,2,26,27]. Wymaga to podejścia metodycznego, które umożliwi monitorowanie i wykrywanie stanów wysokiego ryzyka w ścisłym powiązaniu ze strukturą pojazdu, z dokładnością identyfikacji źródła do pojedynczych osi jezdnych lub co najmniej wózków, niezależnie od prędkości przejazdu.

W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane zagadnienia – spośród szerokiego zakresu przeprowadzonych (w projekcie InfraNoise) prac badawczych [4-6] – dotyczące monitoringu drgań toków szynowych podczas przejazdów pojazdów szynowych przez strefę pomiarową. Zagadnienie to ma istotne znaczenie, ponieważ umożliwia obserwację bezpośredniego wpływu toczenia kół osi jezdnych oraz analizę wartości i zmienności amplitudy sygnałów, wynikających z dynamicznego charakteru oddziaływań na styku koła i szyny.

W ramach prac badawczych przyjęto, że pomiar drgań powinien obejmować odcinek o długości zbliżonej do obwodu koła pojazdu. Założenie

to wynika z faktu, że wszelkie imperfekcje elementów styku – zarówno na powierzchni tocznej kół, jak i na głowce szyny – mogą powodować niejednorodność kontaktu, która objawia się zróżnicowaniem amplitudy i charakteru rejestrowanych drgań na obwodzie pełnego obrotu koła.

Prowadzony w konsorcjum Politechniki Gdańskiej i Politechniki Wrocławskiej projekt badawczy pt. „System precyzyjnego monitorowania oddziaływania ruchu kolejowego na środowisko z uwzględnieniem informacji o danych ruchowych, technicznych i środowiskowych” o akronimie InfraNoise, ma na celu opracowanie i testowanie prototypu systemu pomiarowo-informatycznego. System ten realizuje funkcje monitorowania w szerokim zakresie obejmując archiwizację, przetwarzanie oraz raportowanie wyników w ramach interaktywnej aplikacji bazodanowej [6]. Prowadzone badania koncepcyjne, laboratoryjne oraz testy w warunkach eksploatacyjnych doprowadziły do powstania pierwszej wersji prototypu systemu. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z powyższym systemem, jego strukturą i funkcjonalnością, a następnie zaprezentowano wyniki dotyczące pomiaru drgań toków szynowych na przykładzie wybranych studiów przypadku.

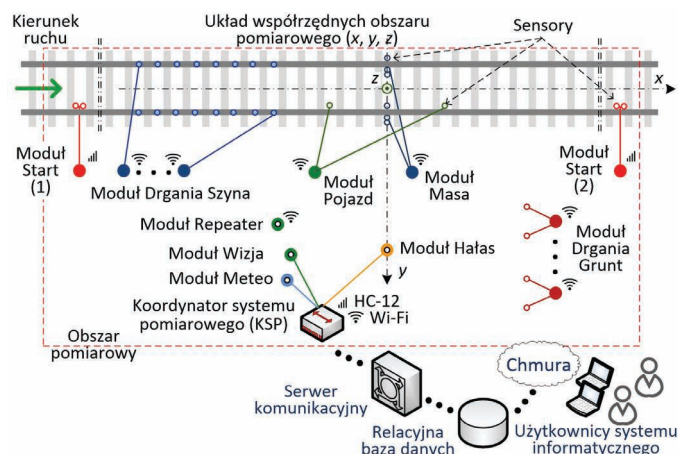
Modułowa struktura systemu pomiarowego

Projekt InfraNoise swoim zakresem objął szereg parametrów identyfikujących zróżnicowane warunki eksploatacyjne na liniach kolejowych. Ogólne założenia dotyczące komponentu pomiarowego oraz informatycznego systemu zostały przedstawione w pracy [6]. Na podstawie wskazanych założeń zaprojektowano i zrealizowano prototyp systemu pomiarowego w strukturze modułowej. Takie podejście umożliwiło integrację niezależnych pomiarów, które w sposób istotny, wynikający ze specyfiki bada-

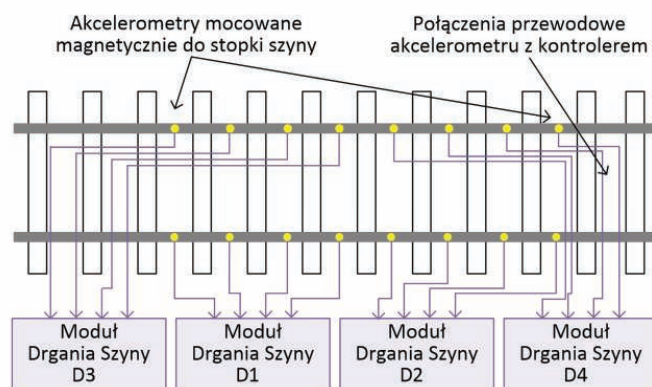
nych zjawisk, różnią się zarówno zastosowaną aparaturą, jak i przyjętym formatem archiwizowanych danych. W systemie zintegrowano następujące moduły pomiarowe (w nawiasach podano użyte symbole poszczególnych modułów):

- Moduł Hałas (H) – przeznaczony do pomiaru hałasu w bliskiej odległości od opomiarowanego toru,
- Moduł Meteo (W) – realizujący pomiar parametrów meteorologicznych w strefie centralnej obszaru pomiarowego,
- Moduł Wizja (K) – służący wykonaniu zdjęć pojazdów poruszających się po opomiarowanych torach,
- Moduł Repeater (R) – przeznaczony do uruchomienia w obszarze pomiaru sieci komunikacji bezprzewodowej,
- Moduł Start (S) – przeznaczony do zdefiniowania strefy pomiarowej oraz do realizacji funkcji sterowania procesem pomiarowym,
- Moduł Pojazd (P) – przeznaczony do identyfikacji parametrów kinematycznych w dowiązaniu do poszczególnych członów składu pociągu.
- Moduł Drgania Szyna (D) – przeznaczony do pomiarów przyspieszeń drgań stopki szyny,
- Moduł Drgania Grunt (G) – przeznaczony do pomiarów przyspieszeń drgań (w trzech kierunkach x, y, z) w gruncie oraz na obiektach budowlanych w bezpośrednim sąsiedztwie strefy pomiarowej (linii kolejowej),
- Moduł Masa (M) – przeznaczony do pomiarów odkształceń i przemieszczeń toków szynowych,
- Moduł Akustyka (A) – przeznaczony do pomiarów akustycznych w bliskim polu oddziaływania koło-szyna.

W ramach każdego modułu wykonano lub skonfigurowano odpowiednią liczbę zestawów pomiarowych (np. S1,...,S4, D1,...,D8), obejmujących w



1. Schemat modułowej struktury systemu pomiarowego InfraNoise dla jednego toru linii kolejowej z wybranymi modułami pomiarowymi, źródło: opracowanie własne



2. Schemat rozmieszczenia sensorów na tokach szynowych i ich połączenia do modułów Drgania Szyny (D1-D4); punktami oznaczono miejsca montażu sensorów, poszczególne bloki reprezentują moduły pomiarowe sieci sensorowej, źródło: opracowanie własne

najprostszym ujęciu – kontroler pomiarowy oraz zestaw odpowiednich sensorów (np.: D1s1, D1s2,...,D8s4). Moduły Hałas, Meteo, Wizja i Repeater skonfigurowano z wykorzystaniem odpowiednio wysokiej klasy urządzeń pomiarowych. Przykładowo, moduł Hałas realizuje pomiar za pomocą stacji monitoringu hałasu, spełniając przy tym wymogi przedstawione w dokumentach [16,23].

Koordynacją pracy modułów pomiarowych steruje nadrzędna jednostka – Koordynator Systemu Pomiarowego (KSP) – będąca komputerem wyposażonym w specjalistyczne, autorskie oprogramowanie odpowiedzialne za inicjację i zakończenie pomiarów oraz obsługę procesów systemowych.

Przyjętą strukturę modułową przedstawiono na rysunku 1.

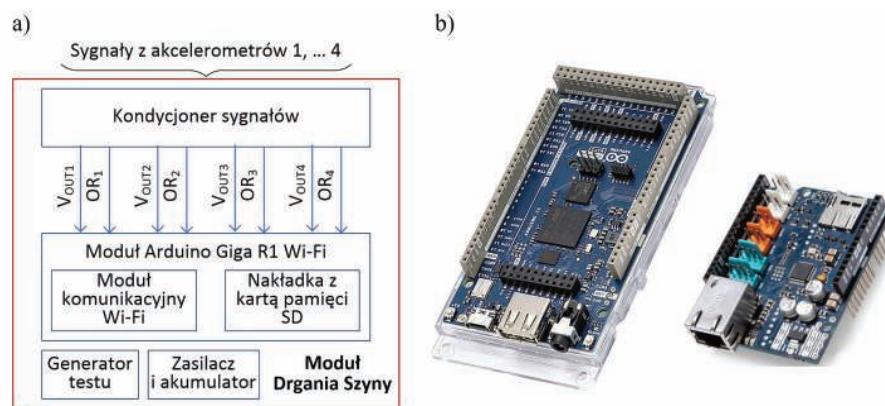
Aparatura pomiarowa i sterowanie procesem pomiarowym

Badania drgań infrastruktury kolejowej najczęściej prowadzone są na drodze pomiaru amplitudy przyspieszeń prowadzonego z wykorzystaniem akcelerometrów, choć wykonywane są również pomiary prędkości drgań za pomocą geofonów, a także pomiary z użyciem wibrometrów (również z poziomu pojazdu) [35]. Pomiary drgań na elementach infrastruktury kolejowej (również bezpo-

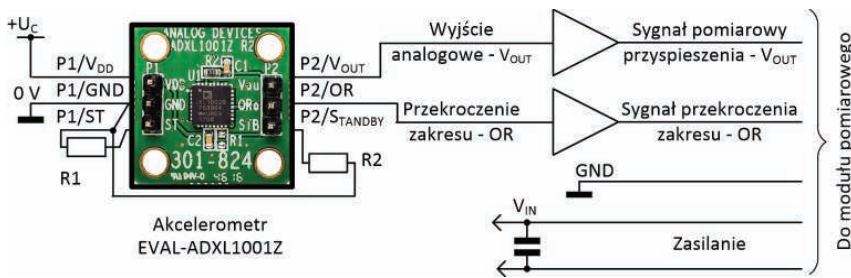
średnio na szynie) były przedmiotem licznych badań, a łączenie pomiaru drgań i hałasu często prowadzi do rozwoju technik diagnostyki zarówno toru, jak również elementów układu biegowego pojazdów szynowych [7,10-13,17,20,28,31-34]. Miały one na celu rozpoznanie poziomów amplitud oraz zakresu częstotliwościowego generowanej fali mechanicznej. Z uwagi na warunki eksploatacyjne, często pomiary te wykonywane są w warunkach kontrolowanych przejazdów pociągów lub drezyn z niewielką prędkością, jednak literatura podaje również zakresy amplitud generowanych przejazdami pociągów dużej prędkości [24,30]. Należy uwzględnić fakt, że wynik pomiaru zależy od takich czynników jak: montaż sensora (klej, uchwyt magnetyczny), lokalizacji sensora na szynie (stopka, szyjka, główka), lokalizacji

względem węzłów przytwierdzenia szyny do podkładu (przęsło, nad podkładem) oraz stanu naprężenia szyn. Typ, parametry, warunki ruchu pojazdu i stan techniczny układu jezdni są istotnymi czynnikami generującymi drgania szyn. Zagadnienie to jest, zatem stosunkowo złożone i badania powyższych zjawisk wymagają przyjęcia pewnych założeń, które ustalą możliwie jak największą liczbę warunków. Punktem wyjścia było założenie, że odcinek pomiarowy powinien być dłuższy niż obwód standardowego koła stosowanego w pojazdach kolejowych. W celu zapewnienia możliwości rejestracji oddziaływań odpowiadających pełnemu obrotowi koła zaprojektowano układ ośmiu akcelerometrów rozłożonych między kolejnymi podkładami na długości około 4,2 m.

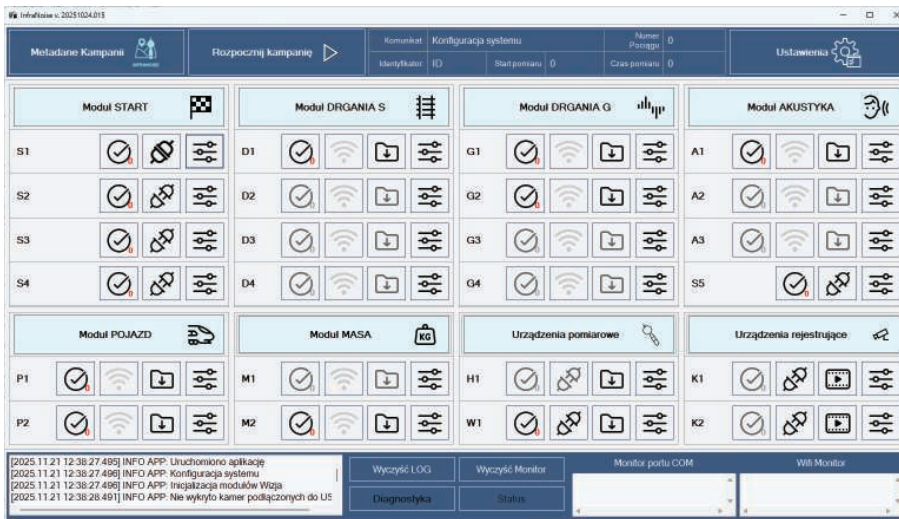
Schemat bazy pomiarowej przed-



3. Moduł Drgania Szyny: a) schemat blokowy modułu pomiarowego; b) widok zestawu uruchomieniowego Arduino Giga R1 z nakładką z interfejsem i czytnikiem kart micro SD, źródło: opracowanie własne na podstawie [14]



4. Poglądowy schemat ideowy jednego toru pomiarowego z jednoosiowym (z) akcelerometrem ADXL1001Z, źródło: opracowanie własne na podstawie [15]



5. Okno aplikacji Koordynatora Systemu Pomiarowego, źródło: opracowanie własne

stawiono na rysunku 2.

Układ pomiarowy modułu Drgania Szyna opracowano z wykorzystaniem nowoczesnej i uniwersalnej płytki deweloperskiej Arduino Giga R1 WiFi [14]. Platforma ta oparta jest na dwurdzeniowym, 32-bitowym mikrokontrolerze STM32H747XI, integrującym rdzenie ARM Cortex-M7 (480 MHz) oraz ARM Cortex-M4 (240 MHz). Do płytki dołączono również moduł Arduino Ethernet Shield 2, wyposażony w interfejs Ethernet oraz czytnik kart micro SD.

Wybór tej platformy wynikał zarówno z jej stosunkowo wysokiej mocy obliczeniowej, bogatej biblioteki oprogramowania, jak i z relatywnie niskiego kosztu, co czyni ją rozwiązaniem szczególnie korzystnym na etapie szybkiego prototypowania systemów pomiarowych.

Do pomiarów przyspieszeń drgań toków szynowych wykorzystano czujniki wykonane na bazie układów MEMS, fabrycznie zamontowa-

nych na płycie drukowanej – typu EVAL-ADXL1001Z/1002Z [15]. Na rysunku 3 przedstawiono przyjęty do wykonania układ. Akcelerometry wybranego typu oprócz analogowego wyjścia sygnałowego generują sygnał przekroczenia zakresu pomiarowego, co ułatwia identyfikację wystąpienia oddziaływań wykraczających poza przyjęty zakres amplitud. W badaniach zastosowano akcelerometry o nominalnym zakresie do 50 g (ADXL1002Z) oraz do 100 g (ADXL1001Z). Przekroczenie granicznego progu przyspieszeń – o podwojonej wartości nominalnej – prowadzi do generowania impulsowego sygnału OR (rysunek 4), który rejestrowany jest, jako sygnał logiczny wskazujący na czas wystąpienia przekroczenia progu w sygnale analogowym. Zarejestrowane rekordy pomiarowe przyspieszeń powinny być w postprocessingu analizowane w powiązaniu z sygnałem OR.

Sensory zamieszczono w obu-

dowie z aluminium zapewniając szczelność i ochronę przed wilgocią i pyłem na poziomie IP68. Uchwyt magnetyczny zapewnia szybki montaż sensorów na szynie kolejowej.

Nadrzędną rolę w systemie pełni Koordynator Systemu Pomiarowego (KSP), obsługiwany z wykorzystaniem funkcji zdalnego pulpitu. Jednostka ta odpowiada za pełną automatyzację procesu pomiarowego, w tym komunikację z modułami pomiarowymi (za pośrednictwem łączy HC-12 oraz Wi-Fi), zapis konfiguracji modułów, inicjację i zakończenie pomiarów oraz tworzenie odpowiedniej struktury katalogów. Proces pomiarowy zorganizowano w postaci kampanii pomiarowych, definiowanych przez czas i miejsce prowadzenia badań oraz konfigurację systemu pomiarowego, obejmującą dobór modułów, ich typów i liczby, a także lokalizację ich montażu. W ramach każdej kampanii rejestrowane są zdarzenia odpowiadające przejazdowi pociągów przez strefę pomiarową.

Sterowanie procesem pomiarowym zostało zaprojektowane w sposób umożliwiający rejestrację wyłącznie przejazdów pociągów przez strefę pomiarową. Wyjątek stanowią pomiary ciągłe obejmujące hałas i warunki meteorologiczne, których analiza prowadzona jest w postprocesie na podstawie okien czasowych synchronizowanych ze zdarzeniami zarejestrowanymi przez KSP. Struktura danych przyporządkowanych poszczególnym zdarzeniom tworzona jest automatycznie. Interfejs aplikacji KSP przedstawiono na rysunku 5.

Pomiar drgań toków szynowych – poligon doświadczalny

W ramach projektu InfraNoise przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych, które stopniowo prowadziły do konfiguracji systemu pomiarowego zwłaszcza w kontekście automatyzacji procesu. Pomiary w warunkach eksploatacyjnych prowadzono równolegle z licznymi

pracami laboratoryjnymi oraz badaniami w warunkach kontrolowanych (tory stacyjne), wykonywanymi z wykorzystaniem pojazdów drezynowych. Całość zrealizowanych prac doprowadziła do opracowania funkcjonalnego, modułowego prototypu systemu, który finalnie został zainstalowany na relatywnie mocno obciążonej linii magistralnej. Umożliwiło to weryfikację wielu założeń konstrukcyjnych i konfiguracyjnych, a także potwierdzenie poprawnego działania algorytmów sterowania podczas wielogodzinnych pomiarów ciągłych.

Jak zaznaczono, system charakteryzuje się rozproszoną strukturą pomiarową, obejmującą przestrzenną sieć sensorów połączonych bezprzewodowo z jednostką zarządzającą, tj. Koordynatorem Systemu Pomiarowego (KSP). Na rysunku 6 przedstawiono widok układu elementów sieci sensorów i kontrolerów na tle zdjęć terenu. Obszar pomiarowy uwzględnia warunki terenowe, a jego wybór poprzedzony jest ich analizą, włącznie z przeprowadzeniem wizji lokalnej. Opracowany system jest skalowalny, w pełnej skali składa się ze 106 elementów w ramach jednej strefy pomiarowej dwutorowej linii kolejowej, a jego konfiguracja oraz liczba sensorów może być dostosowana do potrzeb. Montaż i układ sensorów/kontrolerów charakteryzuje się wysokim poziomem uniwersalności uwzględniającym dostępność terenu. Prezentowane wyniki badań pochodzą z pomiarów zrealizowanych w październiku 2025 r. Na rysunku 7 przedstawiono rozmieszczenie i zamocowanie sensorów przyspieszeń na tokach szynowych oraz kontrolerów ustawionych w ławie torowiska.

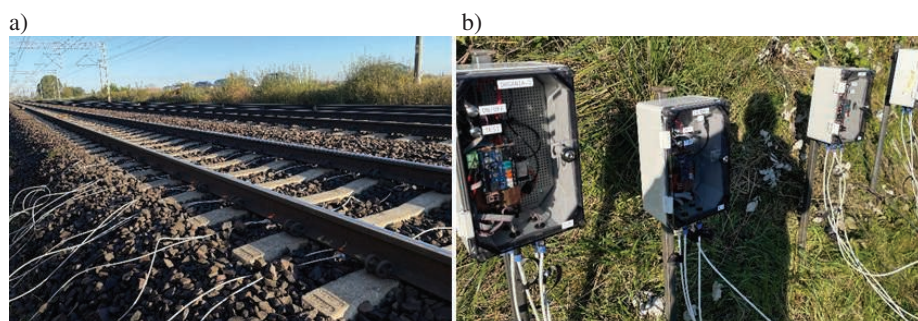
Wybrane wyniki kampanii pomiarowych

System pomiarowy zarządzany z poziomu KSP tworzy hierarchiczną strukturę danych, którą uporządko-

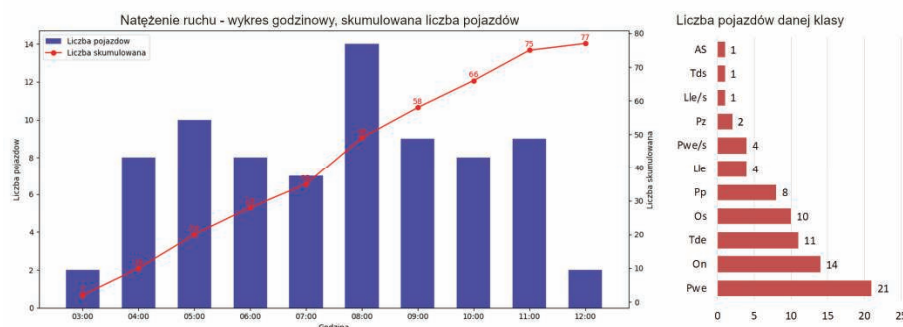


PL-2000				
Lp.	Kod	X (North)	Y (East)	H Amsterdam
1	H1			
2	S4			
3	S1			
4	M2s1			
5	M2s4			
6	D5s4			
7	D5s3			
8	D5s2			
9	D5s2			
10	D6s4			
11	D6s3			
12	D6s2			
...	...			
30	M2s5			
31	M2s6			
32	M2s1			
33	M2s2			
34	M2s3			
35	P1k			
36	M2k			
37	P2k			
38	H2			
39	S3			
40	S2			
41	S2k			
42	S3k			
43	P1s2			
44	P1s1			
45	K2			
46	W1			
47	K1			
48	A3k			
49	A4k			
50	G1			
51	G2			
52	G3			
53	A3s1			
54	A3s2			
55	A4s1			
56	A4s2			

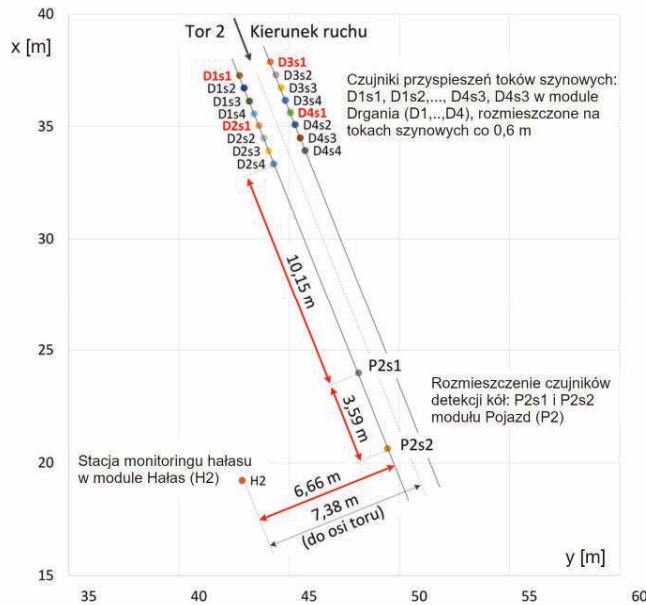
6. Rozmieszczenie elementów sieci sensorowej w pomiarach połowych na linii kolejowej; punkty oznaczają umiejscowienie elementów sieci sensorowej (kontrolery i sensory); w tabeli przedstawiono listę 56 współpracujących elementów (pomiar październik 2025), opracowanie własne z wykorzystaniem narzędzia Google Earth Pro



7. Baza pomiarowa sensorów przyspieszeń drgań toków szynowych a) sensory przymocowane do stopki szyny na obydwu tokach; b) kontrolery modułu Drgania Szyny ustawione w ławie torowiska (pomiar październik 2025), źródło: opracowanie własne



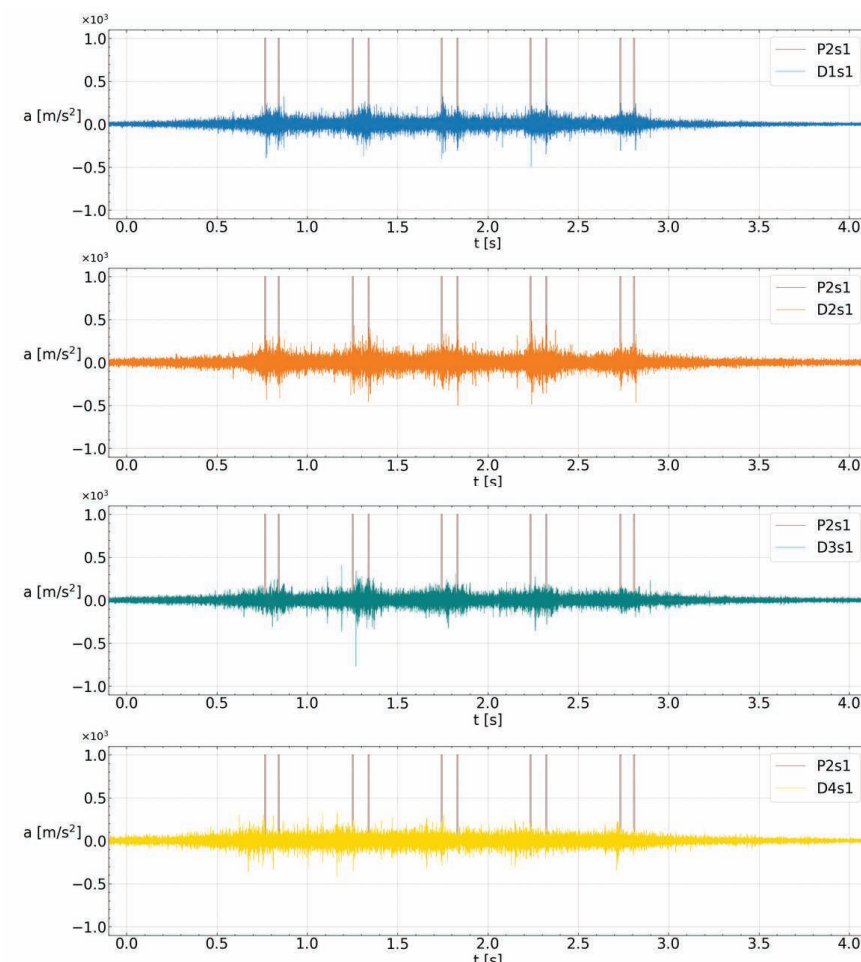
8. Statystyki przeprowadzonych kampanii pomiarowych – pomiar październik 2025, Pws/e – pociągi pociągów spalinowych niezintegrowane z lokomotywą spalinową/elektryczną, AS – autobusy szynowe, Tds/e – pociągi towarowe długie z lokomotywą spalinową/elektryczną, Lle/s – lokomotywy elektryczne/spalinowe luzem, Pp – pociągi dużych prędkości, Os – pociągi osobowe starego typu, On – pociągi osobowe nowego typu, źródło: opracowanie własne



9. Rozmieszczenie wybranych czujników systemu pomiarowego we współrzędnych układu lokalnego y (East), x (North), źródło: opracowanie własne



10. Widok na czoło pociągu – fotografie dostarczane przez moduł Wizja, źródło: opracowanie własne



11. Przebiegi przyspieszeń zarejestrowane przy pomocy wybranych czujników Modułu Drgania Szyny na tle impulsów reprezentujących osie pojazdu – przypadek 1, źródło: opracowanie własne

wano według określonego porządku. Nadrzędnym jej elementem jest kampania pomiarowa, rozumiana jako zestaw informacji dotyczących lokalizacji prowadzonego monitoringu oraz konfiguracji sieci sensorowej, obejmującej liczbę i typ zastosowanych modułów, przyporządkowanie sensorów do poszczególnych modułów oraz jednoznaczny identyfikację ich położenia na linii i torach kolejowych. Kampania może być przygotowana przed rozpoczęciem pomiarów i w razie potrzeby aktualizowana zgodnie z bieżącymi warunkami technicznymi, stanowiąc kluczowy etap organizacji procesu pomiarowego.

Z drugiej strony kampania definiuje również strukturę danych, w której KSP zapisuje wyniki rejestracji. W ramach uruchomionej kampanii KSP inicjuje, kontroluje i zamyka procesy pomiarowe, tworząc odpowiednią strukturę katalogów i plików. Dane dzielone są na zdarzenia, odpowiadające poszczególnym przejazdom pociągów przez strefę pomiarową.

W zaimplementowanych rozwiązaniach technicznych sieci sensorowej uzyskano relatywnie niewielkie rozbieżności czasowe rzędu ~100 ms (pomiędzy modułami pomiarowymi), co należy uznać za stosunkowo dobry wynik i wystarczający do identyfikacji oddziaływań na poziomie poszczególnych wózków, a nawet pojedynczych osi pojazdu.

Dokładność synchronizacji jest dodatkowo poprawiona na etapie post-processingu. W tym celu uwzględnia się znane długości zarejestrowanych przebiegów w modułach oraz odległości przestrzenne pomiędzy sensorami, określone na podstawie precyzyjnych współrzędnych geodezyjnych lokalizacji czujników. Dodatkowym parametrem wykorzystywanym w procesie synchronizacji jest prędkość pociągów mierzona w module Pojazd.

Procedura ta umożliwia skuteczne porównywanie wyników z różnych modułów i analizę zależności pomiędzy

dzy wybranymi parametrami rejestrowanego ruchu i oddziaływań.

Dodatkową funkcjonalnością systemu pomiarowego jest identyfikacja typu pojazdu. W tym celu zaimplementowany algorytm analizuje wyniki modułu Pojazd, przetwarzając je na informacje o odległościach pomiędzy osiami jezdny, liczbie wózków, liczbie członów/wagonów. Na tej podstawie pojazdy klasyfikowane są do określonych kategorii, zdefiniowanych przez zestaw charakterystycznych cech technicznych i eksploatacyjnych. Na rysunku 8 zaprezentowano statystyki pomiarów przeprowadzonych w październiku br. Pomiary składały się z 3 kampanii pomiarowych, w których zarejestrowano komplet 77 zdarzeń (przejazdy pojazdów).

Wyniki pomiaru przyspieszeń drgań toków szynowych zaprezentowano w kontekście wyników uzyskiwanych w innych modułach sieci sensorowej. W niniejszym artykule ograniczono się do synchronizacji wyników modułu Drgania Szyny z informacją o przejeżdżających osiach pojazdów z modułu Pojazd oraz z przebiegiem ciśnienia akustycznego rejestrowanego modułem Hałas. Synchronizacja ta ma na celu prezentację funkcjonalności systemu pomiarowego integrującego dane z różnych modułów pomiarowych.

Na rysunku 9 przedstawiono rozmieszczenie czujników, z których sygnały poddano analizie, w lokalnym układzie współrzędnych geodezyjnych, spośród szesnastu sygnałów przyspieszeń do wizualizacji wybrano po dwa z każdego toku szynowego – na rysunku 9 wybrane sensory oznaczono kolorem czerwonym, wybrano pierwszy oraz środkowy czujnik z danego toku szynowego, patrząc od kierunku, z którego nadjeżdża badany pojazd.

W artykule zaprezentowano wyniki pomiaru trzech charakterystycznych zdarzeń:

- przypadek 1: lekki pociąg pasażerski jadący z prędkością (w

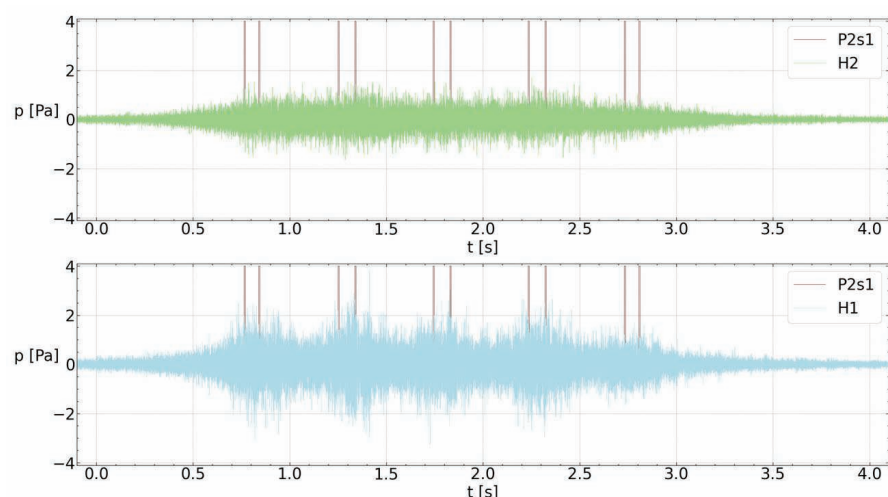
przybliżeniu) $v_1=120$ km/h,

- przypadek 2: pociąg towarowy jadący z prędkością $v_2=95$ km/h,
- przypadek 3: szybki pociąg pasażerski jadący z prędkością $v_3=175$ km/h.

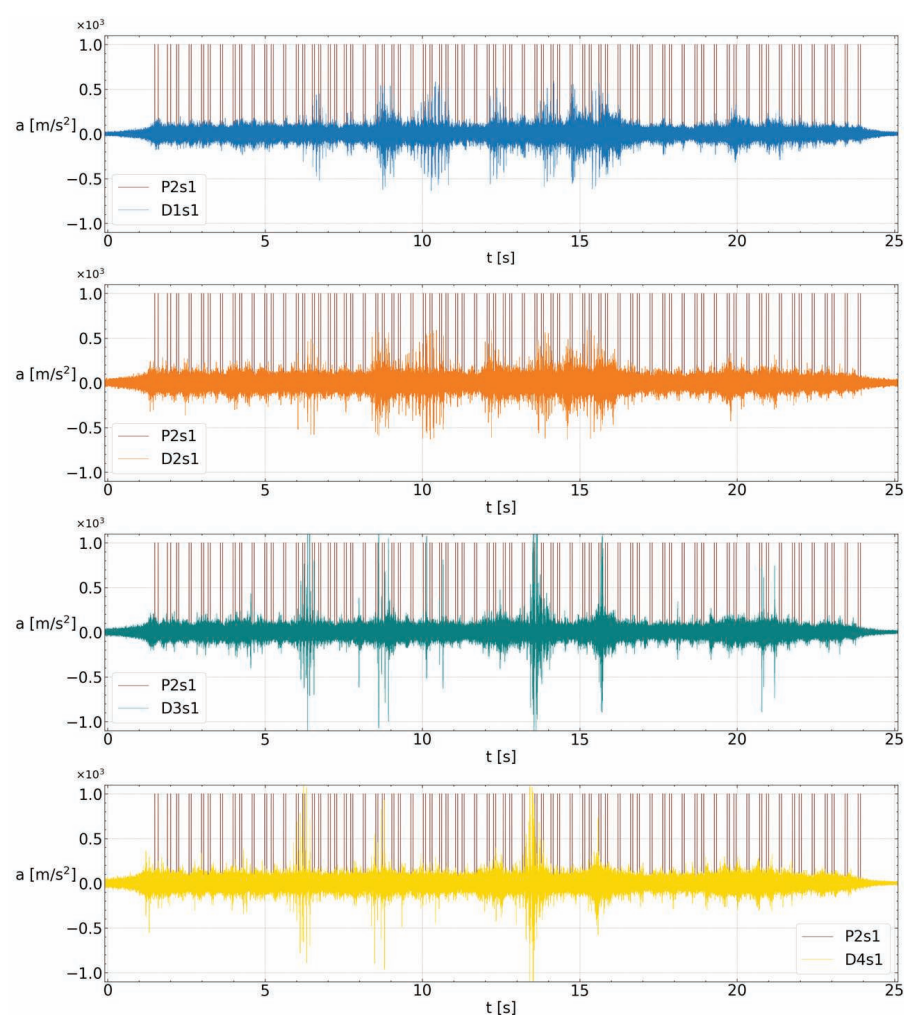
Fotografie czoł pociągów zarejestrowanych przez kamery modułu Wizja przedstawia rysunek 10.

Przypadek 1: Lekki pojazd pasażerski (EZT)

Podczas przejazdu lekkiego pojazdu



12. Ciśnienie akustyczne zarejestrowane przez moduł Hałas (H2 i H1) – przypadek 1, źródło: opracowanie własne



13. Przebiegi przyspieszeń zarejestrowane przy pomocy wybranych czujników Modułu Drgania Szyny na tle impulsów reprezentujących osie pojazdu – przypadek 2, źródło: opracowanie własne

pasażerskiego (EZT) zarejestrowano dane z modułu Pojazd, modułów Drgania Szyny oraz modułów Hałas. Na podstawie analizy sygnałów pochodzących z modułu Pojazd otrzymano liczbę osi $N = 10$, prędkość średnia wyniosła $v_{sr} = 119,25$ km/h, a odchylenie standardowe $\sigma_v = 0,02$

km/h. Długość pojazdu jako odległość pomiędzy skrajnymi osiami wyniosła $L = 67,64$ m.

Na rysunku 11 przedstawiono przebiegi przyspieszeń drgań toków szynowych zarejestrowane przez akcelerometry modułu Drgania Szyny. Sygnał reprezentujący osie pojazdów

został przesunięty w czasie o interwał odpowiadający odległości pomiędzy czujnikiem P2s1 a danym akcelerometrem (rys. 9), z wykorzystaniem informacji o prędkości pojazdu.

Na rysunku 12 przedstawiono przebiegi ciśnienia akustycznego zarejestrowanego przez moduł Hałas. Do oceny wskaźników hałasu zastosowanie ma przebieg z modułu H2, z uwagi, że zdarzenie dotyczy przejazdu pociągu po torze nr 2. Natomiast przebieg zarejestrowany przez stację monitoringu hałasu H1 stanowi informację dodatkową – jest to stacja wykorzystywana w ocenie przejazdów po torze nr 1. Większe wartości amplitudy ciśnienia akustycznego z stacji H1 wynikają z mniejszej odległości tego modułu od toru nr 2.

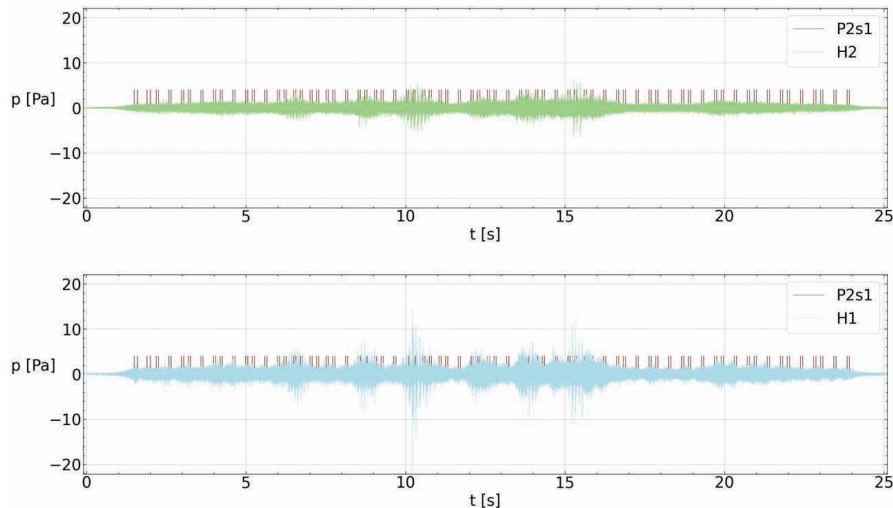
Z przedstawionych przebiegów można wnioskować, że metoda pomiaru i integracji sygnałów (synchronizacji) daje dobrą korelację drgań i hałasu względem osi pojazdu. Poziom przyspieszeń jest relatywnie jednorodny w odniesieniu do wszystkich członów pociągu. W sposób wyraźny w przebiegach amplitud zarysowują się wózki wagonów.

Przypadek 2: Elektryczna lokomotywa czteroosiowa z wagonami towarowymi

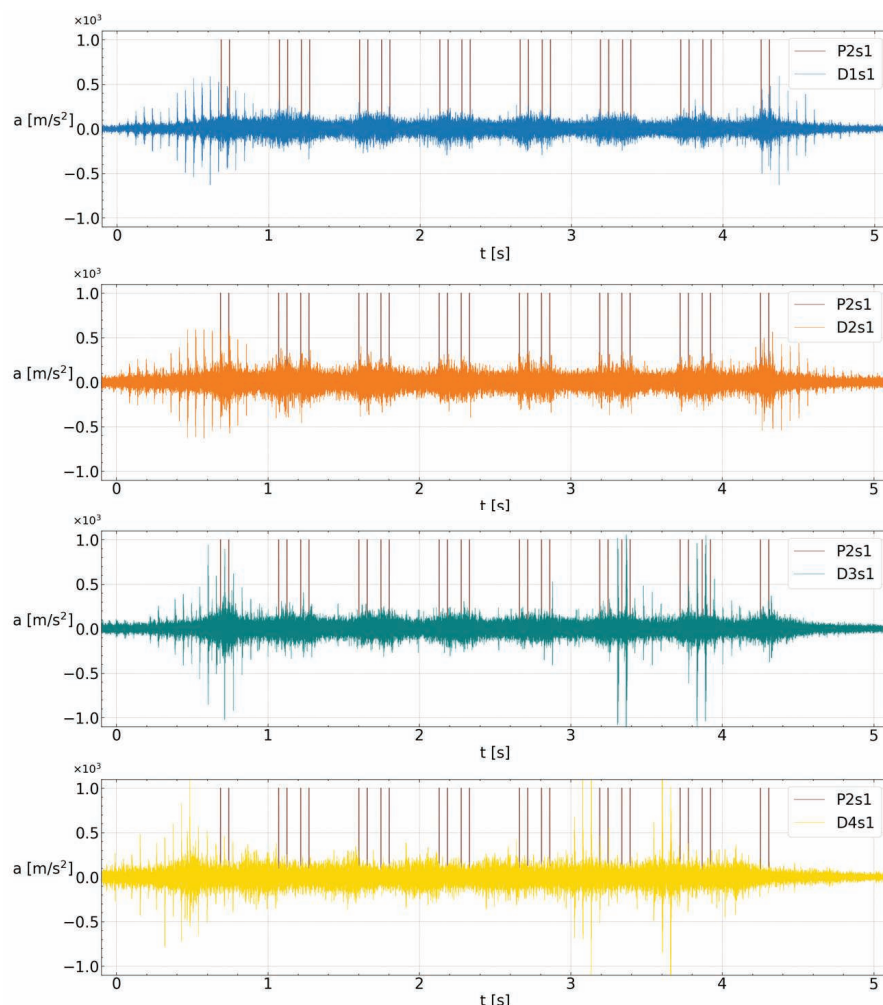
Analogicznie jak w przypadku 1 na podstawie analizy sygnałów pochodzących z modułu Pojazd uzyskano następujące dane: liczba osi $N = 142$, prędkość średnia wyniosła $v_{sr} = 94,79$ km/h, odchylenie standardowe $s_v = 1,31$ km/h, długość pojazdu jako odległość pomiędzy skrajnymi osiami wyniosła $L = 590,16$ m.

Na rysunku 13 i 14 przedstawiono odpowiednio przebiegi przyspieszeń drgań toków szynowych oraz przebiegi ciśnienia akustycznego – analogicznie jak w przypadku 1.

Przedstawione przebiegi przyspieszeń oraz ciśnienia akustycznego wskazują na wyższy stopień zróżnicowania amplitud względem przypadku 1. Tym razem można zaobser-



14. Ciśnienie akustyczne zarejestrowane przez moduł Hałas (H2 i H1) – przypadek 2, źródło: opracowanie własne



15. Przebiegi przyspieszeń zarejestrowane przy pomocy wybranych czujników Modułu Drgania Szyny na tle impulsów reprezentujących osie pojazdów – przypadek 3, źródło: opracowanie własne

wować, że niektóre wózki oddziałują znacznie bardziej na tle całego składu. Również obserwowalne są różnice pomiędzy stronami osi jezdnych (tok szynowy lewy/prawy).

Przypadek 3: Szybki pociąg pasażerski

Dane uzyskane na podstawie analizy sygnałów pochodzących z modułu Pojazd: liczba osi $N = 28$, prędkość średnia $v_{sr} = 177,90$ km/h, odchylenie standardowe $s_v = 0,11$ km/h.

Długość pojazdu jako odległość pomiędzy skrajnymi osiami wyniosła $L = 178,84$ m.

Na rysunku **15** i **16** przedstawiono odpowiednio przebiegi przyspieszeń drgań toków szynowych oraz przebiegi ciśnienia akustycznego – analogicznie jak w przypadku 1 i 2.

Przypadek 3 charakteryzuje się nietypowym (względem przypadków 1 i 2) cyklicznym pojawianiem się pików amplitudy przyspieszeń, skoncentrowanych zwłaszcza wokół skrajnych wagonów składu pociągu. Charakterystyka ta uwidacznia się zarówno na przebiegach przyspieszeń toków szynowych jak i na przebiegach ciśnienia akustycznego. Również w tym przypadku sensory na obydwu tokach szynowych wskazują zróżnicowany poziom amplitud.

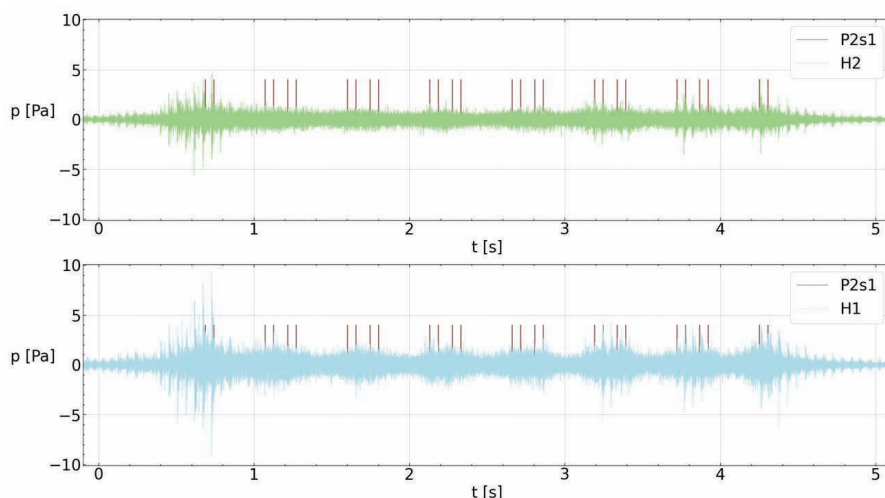
Na podstawie powyżej przedstawionych przypadków można wyciągnąć wnioski ogólne, które wynikają z różnic w charakterystyce analizowanych zdarzeń. Zróżnicowanie to jest konsekwencją m.in. parametrów eksploatacyjnych i technicznych poszczególnych pociągów, takich jak masa i naciski osi, długość składu, rozstaw osi, stan techniczny taboru oraz prędkość przejazdu. Z tego względu porównywanie przebiegów pomiarowych wymaga ich grupowania w odpowiednie klasy, w których parametry te są uwzględnione i rozróżniane. Pomiar prędkości chwilowych osi pojazdu pozwala na wyznaczenie z dużą dokładnością odległości między osiami, co pozwala na identyfika-

cję typu pojazdu.

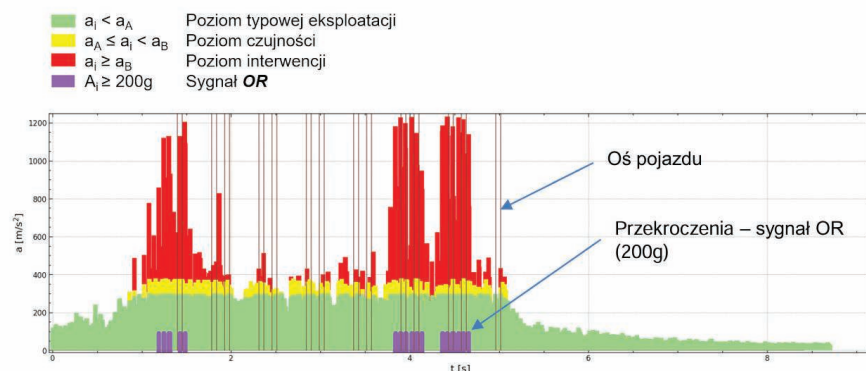
Dodatkowym aspektem w ocenie przebiegów przyspieszeń drgań – jest analiza zróżnicowania amplitud w ramach poszczególnych zdarzeń. W niniejszym artykule zaproponowano analizę progową przebiegów drgań osobno w każdym zdarzeniu (przedstawione przypadki 1-3). Proces ten ma na celu zróżnicowanie wyników pod względem generowanej przez poszczególne osie jezdne amplitudy przyspieszeń. Integracja przebiegów przyspieszeń z układem osi jezdnych (dane z modułu Pojazd) umożliwia ocenę oddziaływania w odniesieniu do poszczególnych wózków jezdnych pociągu. Przypisanie takie może być istotną informacją w ocenie oddziaływań różnych typów pojazdów na tory szynowe. W dłuższym okresie obserwacji (monitoringu) wyłonić się mogą pewne typowe poziomy, które przy uwzględnieniu prędkości przejazdu (istotnie wpływającej na

poziom amplitudy) mogą być oceniane w celu wychwycenia anomalii, przekroczeń stanów granicznych lub mogą być wykorzystywane do planowania redukcji oddziaływań na drodze procesów technologicznych utrzymania linii kolejowych i taboru. Analiza taka wymaga jednak obszernej bazy danych wyników. Projektowany w ramach projektu InfraNoise prototyp umożliwi realizację tego typu analiz.

Zaprezentowane podejście progowe, które poprzez zliczanie rekordów w określonych poziomach amplitudy, umożliwia identyfikację syntetyczną, jak również pozwala opisać zmienność oddziaływań w odniesieniu do składu (oddziaływań w otoczeniu czasowym poszczególnych wózków). Na rysunku **17** pokazano ideę progowania wartości z zastosowaniem 4 poziomowej skali zdefiniowanej poprzez progi: typowej eksploatacji a_A , czujności a_B , interwencji oraz próg



16. Ciśnienie akustyczne zarejestrowane przez moduł Hałas (H2 i H1) – przypadek 3, źródło: opracowanie własne



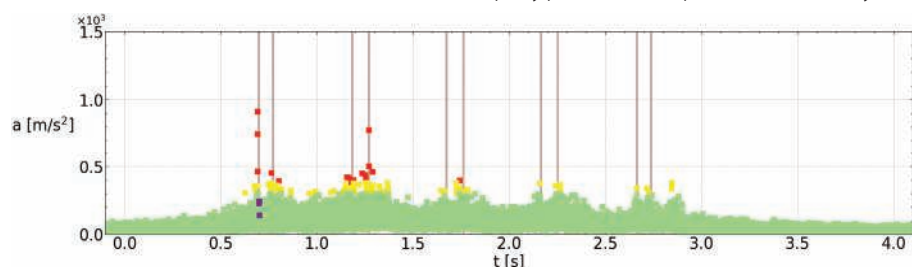
17. Analiza progowa sygnału przyspieszeń drgań toku szynowego – oznaczenie zakresów próbek w określonych poziomami granicznymi progach, źródło: opracowanie własne

przekroczenia zakresu pomiarowego. Ostatni z wymienionych progów nie-
sie o tyle istotną informację, że wska-
zuje na występowanie istotnych, tj.
znaczących względem założonego
zakresu przekroczeń. Zastosowany w
przeprowadzonych badaniach układ
pomiarowy ogranicza miarodajność
wyników do poziomu 100 g, powy-
żej tej wartości rejestrowana ampli-
tuda przetwarzana jest w nieliniowy
sposób, a w związku z tym nie jest
możliwe poprawne odczytanie war-
tości, natomiast powyżej 200 g, układ
zwraca wartości przekroczeń (OR),
które prezentowane są jako wartości
logiczne (wystąpiło przekroczenie).

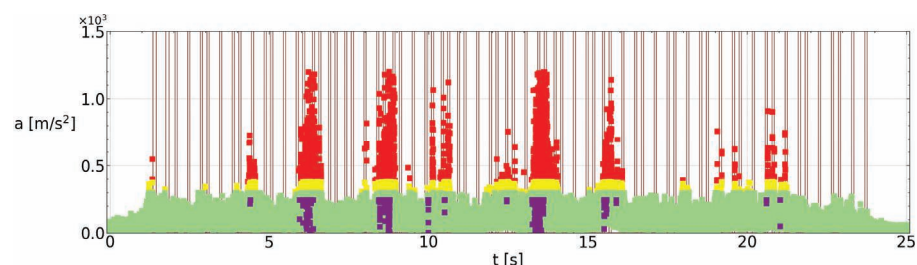
Ustawione w analizie wartości zde-

finiowanych progów, na tym etapie
badań nie nawiązują do poziomów
obiektywnych, ich określenie wy-
maga bowiem – jak wspomniano
– statystycznej oceny przeprowa-
dzonej na istotnej próbie przejazd-
dów. Analiza literatury nie dostarcza
wystarczającej informacji, ponieważ
wyniki silnie warunkowane są takimi
parametrami jak sposób i lokaliza-
cja montażu (szyjka, stopka, przęsło,
podpora itp.), niepewność pomiaru
(klasa urządzeń pomiarowych), typ
nawierzchni, stan naprężeń, tempe-
ratura itp.

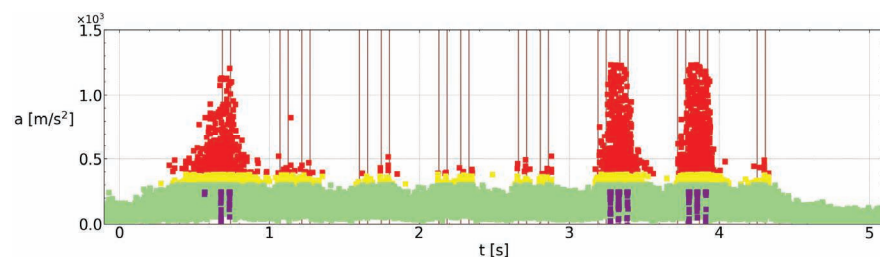
Wyniki progowania sygnałów
trzech prezentowanych zdarzeń
(przypadki 1-3) pokazano na rysun-



18. Analiza progowa kompletu sygnałów (z modułów D1-D4) przyspieszeń drgań toków szynowych – przypadek 1, źródło: opracowanie własne



19. Analiza progowa kompletu sygnałów (z modułów D1-D4) przyspieszeń drgań toków szynowych – przypadek 2, źródło: opracowanie własne



20. Analiza progowa kompletu sygnałów (z modułów D1-D4) przyspieszeń drgań toków szynowych – przypadek 3, źródło: opracowanie własne

Tab. 1. Wyniki analizy progowej przebiegów drgań toków szynowych prezentowanych przypadków

Przypadek	Poziom typowej eksploatacji [%]	Poziom czułości [%]	Poziom interwencji [%]	Wskaźnik przekroczeń [-]	Wartość maksymalna [m/s²]	Otoczenie osi nr
Zdarzenie 1	99,91	0,08	0,01	0,003	914,2	1
Zdarzenie 2	98,88	0,49	0,63	0,05	1199,7	81
Zdarzenie 3	97,49	0,99	1,52	0,24	1232,9	25

kach **18-20**. Założono progi $a_A=30$ g i $a_B=38$ g.

Analizując przedstawione wyniki można wskazać na istotne różnice poziomów w poszczególnych progach. Najwyższymi poziomami charakteryzuje się przebieg pokazany na rysunku 20. Wynika to przede wszystkim z wysokiej (relatywnie do pozostałych) prędkości pociągu (przypadek 3). Skrajnie względem długości składu człony – to człony z osiami napędnymi. Generują one relatywnie do innych osi wyższe poziomy amplitudy drgań. W przebiegu przedstawionym na rysunku 19 można zaobserwować pewne anomalie poziomu w środku składu. Poziomy te wynikają z nadmiernego oddziaływania konkretnych osi składu pociągu, identyfikowanych impulsami modułu Pojazd.

Najmniejszym poziomem amplitudy charakteryzuje się przebieg z rysunku 18, obrazujący oddziaływania lekkiego pociągu pasażerskiego.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki analizy przykładowych przebiegów drgań. Analiza wartości maksimów amplitudy potwierdza opisane powyżej różnice jakościowe poziomów, dające się w prosty sposób odczytać z wykresów generowanych przez system pomiarowo-informatyczny InfraNoise. Wskaźnik przekroczeń definiowany jest jako stosunek liczby przekroczeń do sumy analizowanych próbek.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono ogólną charakterystykę systemu pomiarowego zaprojektowanego oraz zbudowanego na potrzeby monitorowania szeregu parametrów technicznych, ruchowych oraz środowiskowych, związanych z przejazdami pociągów (oraz innych pojazdów szynowych) oraz ich oddziaływaniem na infrastrukturę torową. W celu zaprezentowania wybranego zakresu funkcjonalności opracowywanego systemu, przedstawione i omówione

zostały (na tle impulsów osi jezdnych oraz ciśnienia akustycznego) przebiegi przyspieszeń drgań toków szynowych. Jak wykazano, przebiegi te stanowią charakterystyczną informację o interakcji pomiędzy pojazdem a torem. Zróżnicowane wartości syntetyczne oraz podstawowe statystyki mają zastosowanie w ocenie przejazdów w określonej kategorii, uwzględniającej takie parametry jak długość pojazdu, jego masę oraz prędkość. Oprócz tego każdy pojedynczy przebieg charakteryzuje dany pojazd i umożliwia identyfikację przekroczeń pewnych poziomów przyspieszeń z możliwością przypisania tych wartości do poszczególnych członów pojazdu. Zastosowana metodyka pomiarowa zapewnia analizę poziomów przyspieszeń z dokładnością do pojedynczej osi oraz strony toru (z uwzględnieniem kierunku ruchu). Integracja wybranych parametrów stanowi podstawę do opracowania skutecznej metody monitorowania wpływu ruchu pociągów na oddziaływanie środowiskowe. ◀

Materiały źródłowe

[1] Alemi A., Corman F., Lodewijks G.: Condition monitoring approaches for the detection of railway wheel defects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit.* 2016;231(8):961-981. doi:10.1177/0954409716656218

[2] 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>

[3] Bałuch, M. (2009). Graniczne wartości nadwyżek dynamicznych przy wykrywaniu przez urządzenia detekcji taboru płaskich miejsc na

kołach. *TTS*, (7 8), s. 71 76.

[4] Chrostowski P., Karwowski K., Licow R., Michna M., Szafrąński M., Wilk A., Jarzębowicz L., Skibicki J., Judek S., Grulkowski S., et al: System for Monitoring Motion, Technical, and Environmental Parameters in Railway Traffic Using a Sensor Network. *Appl. Sci.* 2025, 15, 11276. <https://doi.org/10.3390/app152011276>

[5] Chrostowski P., Wilk A., Grulkowski S., Licow R., Michna M., Jarzębowicz L., Skibicki J., Judek S., Karwowski K., Szafrąński M., et al: Zintegrowany system monitoringu oddziaływania kolei na środowisko. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 101 NR 3/2025, doi:10.15199/48.2025.03.37

[6] Chrostowski, P., Wilk, A., Karwowski, K., Grulkowski, S., Licow, R., Rafajłowicz, W., Ratajczak, A., Idzikowski, R., Szafrąński, M., Widerski, T., Dąliga, K., Skibicki, J., Jarzębowicz, L., Michna, M., Judek, S., Karkosińska-Brzozowska, N., & Omilianowicz, J. (2023). *Zintegrowany system monitoringu oddziaływań transportu kolejowego na środowisko*, ISBN 978-83-63492-20-5, Kraków, Polska

[7] Dingcheng Zhang, Min Xie, Moussa Hamadache, Mani Entezami, Edward Stewart: An Adaptive Graph Morlet Wavelet Transform for Railway Wayside Acoustic Detection, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 529, 2022, 116965, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.116965>

[8] Diyar Khan, Rafał Burdzik: Measurement and analysis of transport noise and vibration: A review of techniques, case studies, and future directions, *Measurement*, Volume 220, 2023, 113354, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113354>

[9] Diyar Khan, Rafał Burdzik: Noise and vibration as environmental impacts of transportation: comprehensive review, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Volume 34, 2025, 101578, ISSN 2590-1982, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101578>

[10] Fernández-Bobadilla H. A., Martín U.: Modern Tendencies in Vehicle-Based Condition Monitoring of the Railway Track, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-44, 2023, Art no. 3507344, doi: 10.1109/TIM.2023.3243673

[11] Fu W., He Q., Feng Q., Li J., Zheng, F., Zhang B.: Recent Advances in Wayside Railway Wheel Flat Detection Techniques: A Review. *Sensors* 2023, 23, 3916. <https://doi.org/10.3390/s23083916>

[12] George Lederman, Siheng Chen, James Garrett, Jelena Kovačević, Hae Young Noh, Jacobo Bielak: Track-monitoring from the dynamic response of an operational train, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 87, Part A, 2017, Pages 1-16, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.06.041>

[13] Guiming Mei, Guangxiong Chen: Slip of wheels on rails: The root cause for rail undulant wear, *Wear*, Volume 523, 2023, 204727, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204727>

[14] <https://docs.arduino.cc/hardware>, dostęp 12.12.2025

[15] <https://www.analog.com/en/products/adxl1001.html>, dostęp 12.12.2025

[16] International Organization for Standardization. (2013). *EN ISO 3095:2013 Acoustics - Railway applications - Measurement of noise emitted by railbound vehicles (ISO 3095:2013)*. International Organi-

- zation for Standardization
- [17] Lian, Yanxin, Zhang, Yan, A1 Gao, Tianci, Liu, Xiaozhou: A feature extraction framework for metro rail corrugation detection using onboard vibration and noise monitoring data, *Intelligent Transportation Infrastructure*, 2025, <https://doi.org/10.1093/iti/liaf010>
- [18] Licow R.: Ocena uszkodzeń powierzchni tocznej szyn kolejowych za pomocą zjawisk wibroakustycznych. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2018
- [19] Mańka A., Ćwiek J.: Ilościowa i jakościowa ocena informacji o pojeździe kolejowym na podstawie pomiaru drgań szyny kolejowej. Monografia pod redakcją S. Grulkowskiego: Wybrane zagadnienia budowy, projektowania i eksploatacji dróg szynowych. Wyd. Politechniki Gdańskiej 2025, ISBN: 978-83-7348-940-0
- [20] Mihăilescu I., Popa G., Tudor E., Vasile I., Ghet M.A.: Experimental Study of Wheel-to-Rail Interaction Using Acceleration Sensors for Continuous Rail Transport Comfort Evaluation. *Sensors* 2023, 23, 8064. <https://doi.org/10.3390/s23198064>
- [21] Nowakowski T.: Opracowanie metody oceny aktywności wibroakustycznej tramwaju w oparciu o pomiary przytorowe. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, Poznań 2020
- [22] Orinaite U., Burdzik R., Ranjan V., Ragulskis M.: Prediction of approaching trains based on H-ranks of track vibration signals, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, (2025), 40, 614–631, <https://doi.org/10.1111/mice.13349>
- [23] PKN. (2024). PN-EN IEC 61672-1:2024 Elektroakustyka — Mierniki poziomu dźwięku — Część 1: Wy-maganie. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny
- [24] Polak K.: Ocena wpływu hałasu generowanego przez pojazdy kolejowe zwiększonych prędkości na otoczenie. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska 2022
- [25] Rafał Burdzik, Diyar Khan: An overview of the current state of knowledge and technology on techniques and procedures for signal processing, analysis, and accurate inference for transportation noise and vibration, *Measurement*, Volume 252, 2025, 117314, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117314>
- [26] 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>
- [27] Słowiński P.: Identyfikacja poruszającego się pojazdu na podstawie sygnałów wibroakustycznych. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Katowice 2023
- [28] Tao Xin, Sen Wang, Liang Gao, Hailong Huo, Yu Ding, Pengsong Wang, Peng Chen, Penghui Liu: Field measurement of rail corrugation influence on environmental noise and vibration: A case study in China, *Measurement*, Volume 164, 2020, 108084, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108084>
- [29] Thompson D.: Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modeling and Means of Control, Elsevier 2024. ISBN: 9780128219799
- [30] Wang K, Zheng K, Cai Y. Study of the spatial distribution of vertical and longitudinal acceleration and sensor installation position of ballast track based on wheel-rail coupling model. *PLoS One*. 2025 Mar 24;20(3):e0319803. doi: 10.1371/journal.pone.0319803. PMID: 40127079; PMCID: PMC11932475
- [31] Wróbel J., Bury P., Zając M., Kierkowski 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>
- [32] Xinwen Yang, Zhiang Sun, Yingjie Zhang: A machine learning approach to identify rail corrugation and wheel polygon with the vehicle's vibration and noise signals, *Tribology International*, Volume 211, 2025, 110876, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110876>
- [33] Yang Wang, Hong Xiao, Shaolei Wei, Xiubo Liu, Jiafu Cai, Weize Zhao, Characterization and warning criteria of metro rail corrugation based on vibration and noise data fusion, *Applied Acoustics*, Volume 235, 2025, 110686, ISSN 0003-682X, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110686>
- [34] Zelin Chen, Xiaopei Cai, Xueyang Tang, Meng Wang, Weibin Liu: A sensitive wavelength-enhanced reconstruction algorithm for track quality assessment based on measured data and vehicle dynamics, *Measurement*, Volume 240, 2025, 115627, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115627>
- [35] Zeng, Y., Núñez, A., & Li, Z. (2024). Railway sleeper vibration measurement by train-borne laser Doppler vibrometer and its speed-dependent characteristics. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/mice.13150>

Funkcjonowanie podsystemów strukturalnych systemu kolei na przykładzie prac realizowanych w podsystemie sterowanie

The functioning of the structural subsystems of the railway system on the example of work carried out in the control command and signaling subsystem



Paweł Gradowski

Mgr inż.

Institut Kolejnictwa
Zakład Sterowania Ruchem i
Teleinformatyki

pgradowski@ikolej.pl
ORCID: 0000-0002-3199-4779

Streszczenie: W transporcie kolejowym jak w każdej dziedzinie życia zauważalny jest dynamiczny rozwój technologiczny. Takie zmiany dostrzegane są również w obszarach podsystemów strukturalnych, w tym podsystemie sterowanie. Z biegiem lat rozwijane są nowe rozwiązania techniczne urządzeń sterowania ruchem kolejowym w odniesieniu do części urządzeń przytorowych jak również w części urządzeń pokładowych. Aby rozwój był spójny i zachodziła synergia rozwoju, konieczna jest ich ciągła i dobra współpraca. Takie prawidłowe współdziałanie przez kolejne lata próbuje się zdefiniować w między innymi w technicznych specyfikacjach interoperacyjności sterowanie. Bazując na doświadczeniach funkcjonowania systemu ERTMS na rynku, niniejszy artykuł wskazuje na konieczność uwzględniania, poprzez wzajemne oddziaływanie podsystemów, współpracy systemów sterowania ruchem kolejowym w innych obszarach systemu kolei.

Słowa kluczowe: Urządzenia przytorowe; Urządzenia pokładowe; Podsystem; Sterowanie; ERTMS

Abstract: Rail transport, as in every area of life, is experiencing dynamic technological development. Such changes are also observed in structural subsystems, including the control-command and signaling subsystem. Over the years, new technical solutions for control-command and signaling devices have been developed, both for trackside and on-board equipment. To ensure coherent development and achieve synergy, their continuous and effective cooperation is essential. Such proper cooperation is being defined over the coming years, among other things, in the technical specifications for control interoperability. Based on the experience of ERTMS operation in the market, this article demonstrates the need to consider the cooperation of control-command and signaling systems in other areas of the railway system through the interaction of subsystems.

Keywords: Trackside CCS; On-board CCS; CCS; ERTMS

Wstęp

System kolei swoim zakresem obejmuje wyróżnione cechy funkcjonalne i techniczne sieci kolejowej oraz pojazdów kolejowych przeznaczonych do ruchu po tej sieci. Zgodnie z obowiązującymi regulacjami prawnymi system kolei dzieli się na dwa podsystemy [12]. Pierwszy z podsystemów strukturalny definiuje obszary obejmujące:

- infrastrukturę, uwzględniającą: tory, rozjazdy, obiekty inżynierskie, w tym mosty, tunele, przepusty, infrastrukturę towarzyszącą na stacjach, w tym perony i strefy dostępu z uwzględnieniem potrzeb osób o ograniczonej zdol-

ności poruszania się oraz urządzenia bezpieczeństwa i urządzenia ochronne,

- energię, uwzględniającą: system zasilania w energię elektryczną, w tym linie napowietrzne i znajdujące się na pokładzie pojazdu kolejowego część urządzeń służących do mierzenia zużycia energii elektrycznej,
- sterowanie, uwzględniające: urządzenia niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa oraz sterowania ruchem pociągów na sieci kolejowej, wraz z urządzeniami do zapewnienia komunikacji i oprogramowaniem urządzeń sterowania w części urządzenia przytorowe oraz urządzenia pokładowe,

- tabor, uwzględniający: strukturę pojazdu kolejowego, systemy sterowania wyposażeniem pociągów wraz z oprogramowaniem, odbieraki prądu, elementy trakcyjne i przetwarzania energii, elementy hamowania, sprzęgi i urządzenia biegowe, w tym wózki, osie oraz zawieszenia, a także drzwi, interfejsy między pojazdem kolejowym a człowiekiem, w tym drużyną trakcyjną, personelem pokładowym i pasażerami, z uwzględnieniem potrzeb osób o ograniczonej zdolności poruszania się, oraz również pasywne i aktywne urządzenia bezpieczeństwa a także wyposażenie medyczne pierwszej pomocy.

Drugim z podsystemów opisującym system kolei jest podsystem funkcjonalny definiujący obszary:

- ruchu kolejowy, uwzględniający: procedury i związane z nimi urządzenia umożliwiające spójne funkcjonowanie różnych podsystemów strukturalnych, w tym przygotowanie składu i prowadzenie pociągu, planowanie a także zarządzanie ruchem oraz wymagane kwalifikacje zawodowe,
- utrzymanie, uwzględniający: procedury, urządzenia towarzyszące, terminale, centra logistyczne dla prac związanych z utrzymaniem oraz rezerwy umożliwiające obowiązkowe utrzymanie korygujące i prewencyjne celem zapewnienia interoperacyjności systemu kolei oraz wymaganej wydajności;
- aplikacje telematyczne, obejmujące i uwzględniające dwa obszary techniczne, tj.:
 - przewozy pasażerskie, w tym: systemy informowania pasażerów przed i w czasie podróży, systemy rezerwacji i płatności, zarządzanie bagażem oraz zarządzanie połączeniami między pociągami oraz z innymi środkami transportu, wraz z oprogramowaniem systemów informatycznych i komunikacyjnych,
 - przewozy towarowe, w tym: systemy informowania (monitorowanie ładunków pociągów w czasie rzeczywistym), systemy zestawiania i przydziału, systemy rezerwacji, płatności i fakturowania, zarządzanie połączeniami z innymi środkami transportu oraz sporządzanie elektronicznych dokumentów towarzyszących, wraz z oprogramowaniem systemów informatycznych i komunikacyjnych.

Szczegółowy opis zakresu wyżej wymienionych podsystemów jak i wpływ na inne podsystemy określony jest w dedykowanej osobnej dla każdego z obszaru technicznej specyfikacji interoperacyjności (TSI). Uwzględniając wzajemne oddziaływanie podsystemu sterowanie w obszarach podsyst-

temów stałych (energia, infrastruktura, sterowanie – urządzenia przytorowe), jako odbiorca największej ilości danych z innych podsystemów, w niniejszym materiale stanowi on obszar analizy. Odnosząc się do sterowania, podobna korelacja powiązań zauważalna jest na styku podsystemu sterowanie urządzenia przytorowe a urządzenia pokładowe oraz w połączeniu ze współzależnościami z taborem, których wpływ wskazywany jest pośrednio.

Podsystem sterowanie interfejsem innych podsystemów

Koleje europejskie zauważając narastające kłopoty z zapewnieniem kompatybilności krajowych systemów sygnalizacji zgodziły się na opracowanie ujednoliconego systemu klasy automatycznej kontroli pociągu (ATP), tj. systemu ERTMS [10], [14]. Dzięki zastosowaniu nowego systemu, koleje miały osiągnąć większą interoperacyjność oraz miały uzyskać poprawę bezpieczeństwa oraz efektywności przewozów pasażerów i towarów. Zgodnie z ostatnią aktualizacją TSI „Sterowanie” [5], na dzień dzisiejszy system ERTMS obejmuje części składowe, którymi są: europejski system sterowania pociągami (ETCS), kolejowe radio mobilne (RMR) realizowane przy wykorzystaniu GSM-R albo FRMCS, automatyczne prowadzenie pociągu (ATO) poziomu 2 (GoA2).

Od chwili zdefiniowania w 1998r. podstawowych parametrów częstotliwości [15] dla systemu ETCS oraz pasma cyfrowego radia kolejowego GSM-R, publikowane w kolejnych latach techniczne specyfikacje interoperacyjności dla podsystemów sterowanie (TSI CCS) precyzowały modyfikowane wytyczne dla systemów. 18 nowych decyzji i rozporządzeń (w tym 1 jako sprostowanie) oraz 2 sprostowania dotyczące zapisów TSI CCS, definiowało parametry systemów oraz dodatkowo zmiany wprowadzające nowe wzorce systemu a także nowe funkcjonalności urządzeń. Wprowadzane zmiany określiły swoimi zapisami wprowadzone do obrotu praw-

nego nowe dokumenty obowiązkowe [3]. Począwszy od 2001r. kiedy zostały zdefiniowane bazowe specyfikacje oparte na podstawowych parametrach ETCS [13], zmieniające się akty prawne sklasyfikowały nazewnictwo w kolejnych TSI CCS wykorzystywanych na przestrzeni lat. W wyniku tych zmian od 2012r. specyfikacje identyfikowano jako baseline 2 (wzorzec 2) [12]. Wprowadzone w 2015r. i 2016r. łącznie nazywano jako baseline 3, choć są to odrębne nowe zestawy specyfikacji wzorca 3 w wydaniu 1 [8] i w wydaniu 2 [9]. Obecnie obowiązujący zestaw specyfikacji wzorca 4 wydanie 1 [5] wydany został w 2023r. W języku branżowym do powyżej wskazanych regulacji używane są jednocześnie odpowiednio sformułowania jako zestaw specyfikacji nr 1, 2, 3 lub 4 oraz nazwy B2, B3MR1, B3R2 lub B4R1. Od 2023r. specyfikacje uporządkowały rozróżnienie dla poszczególnych wydań określonych wersji systemu, tj. dla B2 wersję systemu 1.0, B3MR1 – 1.1 i 2.0, B3R2 – 2.1, B4R1 – 2.2, 2.3, 3.0.

Z biegiem lat, we wprowadzanych zmianach zapisów TSI CCS, w obiegu prawnym funkcjonują określone wyróżnikiem cyfrowym wzorzec specyfikacji (baseline) uzupełniany wydaniem wzorca (release). Oba powyższe zapisy, wyrażane są także jako zestaw specyfikacji wzorca (set#), który w sposób szczegółowy opisuje specyfikacja systemu ETCS (SRS) określająca dostępne poziomy ETCS (ETCS level). Eliminacja tzn. chorób wieku dziecięcego nowymi zapisami TSI CCS, w realizacji udostępniała nowe wersje ETCS (system version). Tak rozbudowana wewnętrzna struktura jest bardzo istotnym elementem, ponieważ z wzorcem i wydaniem mocno związana jest wersja systemu, która jednoznacznie definiuje obowiązkowe funkcje systemu ETCS zapewniające techniczną interoperacyjność w ramach ERTMS. Ale wersja systemu nie jest wersją, która jest przyrównywana do zestawu specyfikacji czy wzorca systemu.

Zmiany poszczególnych aktów prawnych dotyczących TSI CCS odzworowywane we wprowadzanych

na rynek rozwiązaniach, zgodnie ze zdefiniowanym podziałem systemu kolejowego na podsystemy, muszą uwzględniać ich spójność powiązań z innymi podsystemami. Oprócz mocnego ich powiązania z taborem (TSI Lok&Pas) kluczowe korelacje dotyczą wewnętrznych powiązań podsystemu sterowanie – urządzenia przytorowe a urządzenia pokładowe. W związku z powyższym, w obszarze sterowanie, poprzez opracowanie narodowych planów wdrożenia systemu ETCS [2], z obszaru planowania przenoszone są na fizyczne instalacje (jako wymagania kontraktowe) na określonych liniach kolejowych, jak również obowiązkową implementację na pojazdach kolejowych.

Krajowy Plan Wdrożenia Technicznej Specyfikacji Interoperacyjności „Sterowanie”

Zgodnie z zapisami rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) 2023/1695 [5], kraje członkowskie Unii Europejskiej zobowiązane są do przedłożenia informacji o planach wdrożenia interoperacyjności na krajowych częściach kolei wspólnotowych.

Przygotowane plany, nakreślają podmiotom funkcjonującym na rynku kolejowym, podstawowe informacje w zakresie rozbudowy systemu ERTMS na krajowej sieci kolejowej. Poszcze-

gólne zapisy planów umożliwiają firmom funkcjonującym na rynku kolejowym planowanie swojej działalności w ramach systemu kolei.

Implementacja podsystemu sterowanie

Zakres realizacji prac wdrożeniowych wynikających z realizacji zapisów narodowego wdrożenia systemu ETCS zaprezentowano na rysunku 1. Pełne zestawienie implementacji przytorowych urządzeń systemu ETCS realizowanych na sieci kolejowej Rzeczypospolitej Polskiej zaprezentowano w tabeli 1.

W tym miejscu należy zaznaczyć, iż zgodnie z zapisami Krajowego Planu Wdrożenia Technicznej Specyfikacji Interoperacyjności „Sterowanie” wdrożenie systemu ETCS poziom 1 w trybie LS z powodu swej skali powinno być poprzedzone opracowaniem studium wykonalności zawierającym rzetelne analizy kosztów i korzyści [2].

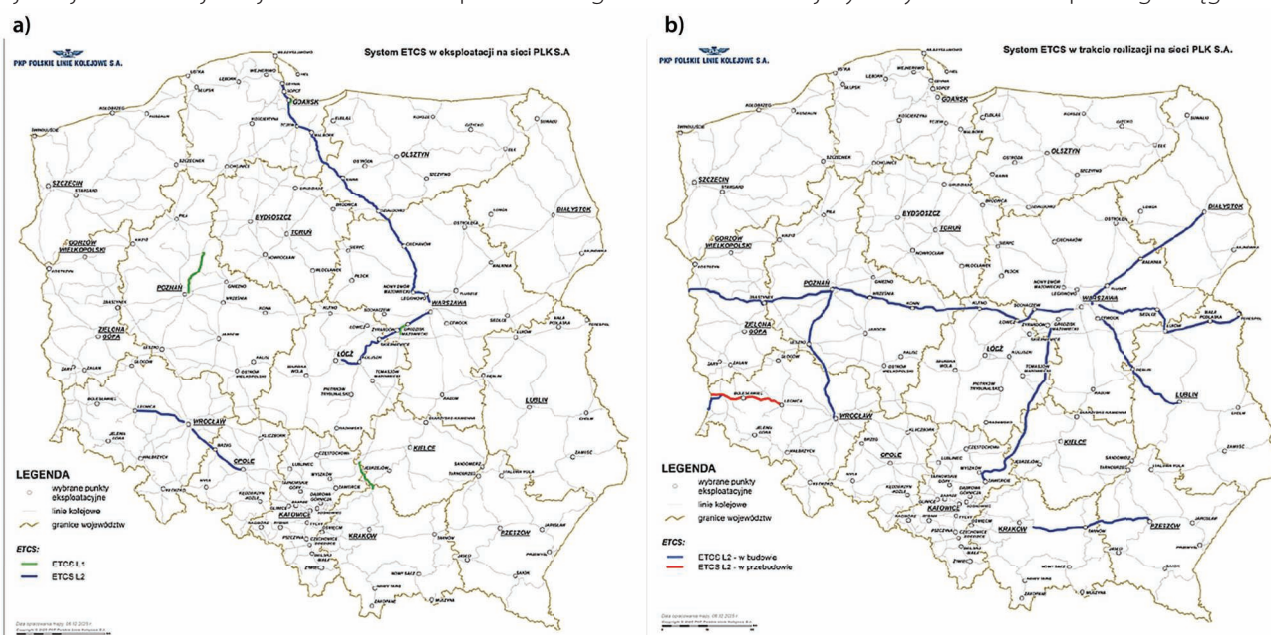
Wyposażenie przytorowe nie stanowi całego systemu ERTMS. do prawidłowego współdziałania wymagana jest implementacja po stronie urządzeń zabudowywanych na pokładzie pojazdów kolejowych [1]. Wraz z wprowadzanymi zmianami w TSI CCS po stronie przytorowej, zmieniane było również podejście do wyposażenia pokładowego. Na dzień dzisiejszy

wszystkie pojazdy kolejowe odbierane od producenta taboru muszą posiadać wyposażenie pokładowe ETCS. Ilość pojazdów kolejowych na dzień 31.12.2024r., na których zainstalowane są urządzenia pokładowe systemu ETCS zestawiono w tabeli 2.

Rozważając implementację podsystemu sterowanie należy podkreślić, iż w przypadku zabudowy urządzeń przytorowych przez zamawiającego, wymaganiem opisu przedmiotu zamówienia jest określony preferowany wzorzec oraz wersja systemu. Zaś w przypadku zabudowy urządzeń pokładowych na pojeździe kolejowym zabudowywany jest wskazany w zapisach TSI „Sterowanie” określony wzorzec. Implementacja tego wzorca umożliwia operowanie pojazdu kolejowego po liniach kolejowych z wykorzystaniem jednej z dostępnych wersji systemu od najwyższej do najniższej. Jednakże w określonych sytuacjach, po weryfikacji zgodności wersji systemu strony przytorowej, po stronie pokładowej realizowane funkcje, zgodnie z zapisami specyfikacji SRS, będą wykonywane w ograniczonym zakresie lub pojazd nie uzyska zgody wjazdu na linię kolejową.

Nowe funkcjonalności oddziaływujące na system kolei

System ERTMS podlega ciągłemu roz-



1. Mapa sieci kolejowej narodowego zarządcy kolejowego PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., gdzie: a) oddany do eksploatacji system ETCS poziom 1 (niebieski) i poziom 2 (zielony); b) system ETCS w budowie (niebieski) lub w przebudowie (czerwony), (źródło [2])

Tab. 1. Linie kolejowe wyposażone w ETCS (źródło opracowanie własne na podstawie danych PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. i Pomorska Kolej Metropolitalna S.A.)

Numer linii	Nazwa linii / odcinka linii	Długość w km	Poziom ETCS	Wzorzec i wersja systemu
W eksploatacji				
1	Warszawa Zachodnia – Koluszki	104,47	2	wzorzec 2 wersja 1.0
3	Poznań Wchód	0,76	1*	wzór 3 wersja 2.0
4	Grodzisk Mazowiecki – Korytów	14,50	1	wzorzec 2 wersja 1.0
9	Warszawa Praga – Gdańsk Główny	311,00	2	wzorzec 2 wersja 1.0
17	Łódź Fabryczna – Koluszki	19,66	2	wzorzec 2 wersja 1.0
64	Kozłów – Starzyny	32,62	1	wzorzec 2 wersja 1.0
132	Opole Zachodnie – Wrocław Brochów	72,44	2	wzorzec 2 wersja 1.0
202	Gdańsk Główny – Gdynia Chylonia	21,37	2	wzorzec 2 wersja 1.0
226	Pruszcz Gdański – Gdańsk Port Północny	12,76	1	wzorzec 2 wersja 1.0
248**	Gdańsk Wrzeszcz – Gdańsk Osowa	16,55	2	wzorzec 2 wersja 1.0
253**	Gdańsk Rębiechowo – Gdańsk Ossowa	1,36	2	wzorzec 2 wersja 1.0
260	Zajączkowo Tczewskie – Pruszcz Gdański	11,40	2	wzorzec 2 wersja 1.0
275	Wrocław Muchobór – Legnica	54,98	2	wzorzec 2 wersja 1.0
356	Poznań Wschód – Wągrowiec	50,72	1*	wzór 3 wersja 2.0
456	Warszawa Praga – Chotomów	13,49	2	wzorzec 2 wersja 1.0
570	Kozłów – Starzyny	2,75	1	wzorzec 2 wersja 1.0
W przebudowie				
275	Legnica – Miłkowice	9,30	2	wzorzec 2 wersja 1.0
282	Miłkowice – Węglińc	63,35	2	wzorzec 2 wersja 1.0
295	Węglińc – Bielawa Dolna	12,90	2	wzorzec 2 wersja 1.0
W zabudowie				
2	Sulejówek Miłosna – Terespol	190,09	2	wzorzec 2 wersja 1.0
3	Warszawa Gołębki – Kunowice	467,38	2	wzorzec 2 wersja 1.0
4	Korytów – Zawiercie	198,51	2	wzorzec 2 wersja 1.0
6	Zielonka – Czyżew	97,09	2	wzorzec 2 wersja 1.0
7	Warszawa Wschodnia Osobowa – Otwock	26,47	2	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 1.1
7	Ottock – Lublin	170,72	2	wzorzec 2 wersja 1.0
8	Warszawa Zachodnia – Radom	99,03	2	wzorzec 3 wydanie 2 wersja 1.0
91	Podłęż – Rzeszów	139,18	2	wzorzec 2 wersja 1.0
271	Wrocław Główny – Poznań Główny	164,45		wzorzec 2 wersja 1.0
274	Jerzmani – Zgorzelec	3,50	2	wzorzec 2 wersja 1.0
278	Węglińc – Zgorzelec	26,15	2	wzorzec 2 wersja 1.0
440	Warszawa Służewiec – Warszawa Lotnisko Chopina	1,90	2	wzorzec 3 wydanie 2 wersja 1.0
449	Warszawa Rembertów – Zielonka	8,65	2	wzorzec 2 wersja 1.0
506	Warszawa Antoninów – Warszawa Gocławek	18,8	2	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 1.1
W postępowaniu przetargowym				
1	Zawiercie – Dąbrowa Górnicza	25,90	1*	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 2.1
8	Kozłów – Kraków Główny	57,66	1*	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 2.1
11	Skierniewice – Łowicz Główny	21,71	1*	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 2.1
14	Łódź Kaliska – Zduniska Wola	41,86	1*	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 2.1
95	Kraków Mydlniki – Kraków Podłęż	34,60	1*	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 2.1
118	Kraków Główny – Kraków Lotnisko	11,96	1*	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 2.1
131	Inowrocław – Tczew	173,98	1*	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 2.1
132	Pyskowice – Opole Główne	59,21	1*	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 2.1
133	Dąbrowa Górnicza Żabkowice – Kraków Główny	51,82	2	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 1.1
134	Jaworzno Szczakowa – Mysłowice	6,4	2	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 1.1
135	Gliwice Łabędy – Pyskowice	5,31	1*	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 2.1
353	Poznań Wschód – Inowrocław	101,87	1*	wzorzec 4 wydanie 1 wersja 2.1

gdzie: *tryb pracy urządzeń pokładowych – Limited Supervision (LS); ** linia kolejowa zarządzana przez Pomorska Kolej Metropolitalna S.A.

wojowi, względem opracowanego w ramach podstawowego standardu zdefiniowanego specyfikacjami B2, który wykorzystuje wersję systemu 1.0. Standard ten zapisami specyfikacji TSI „Sterowanie” określa możliwe do realizacji funkcje jak i tryby pracy systemu ETCS.

Aktualizacja specyfikacji wprowadzająca do obrotu prawnego rozwiązania B3MR1 umożliwiła realizację inwestycji dodatkowo w wersji systemu 1.1, dzięki której możliwe stało się wykorzystanie w systemie osłony linii przy użyciu wirtualnych balis jak również zdefiniowano wartości narodowe dla krzywych hamowania. Możliwość wykorzystania wersji systemu 2.0 przez specyfikację B3MR1 rozszerzyło dostępne tryby pracy pojazdu kolejowego wyposażonego w system ETCS o tryb pracy określany jako Ograniczony Nadzór (Limited Supervision LS), a po stronie przytorowej umożliwiło definiowanie nowych warunków torowych, zarządzania przejazdem kolejowym czy definiowania dróg hamowania.

Dostępność specyfikacji B3R2 wprowadziła możliwość zabudowy urządzeń podsystemu sterowanie w wersji systemu 2.1, której implementacja rozszerzyła funkcjonalność systemu o wykorzystanie transmisji pakietowej w cyfrowym paśmie łączności kolejowej jako GSM-R PS. Drugą wprowadzoną funkcjonalnością tej specyfikacji było zarządzanie kluczami online.

Ostatnia zmiana specyfikacji wprowadzających rozwiązania B4R1 umożliwia realizację zabudowy przy wykorzystaniu trzech nowych wersji systemu. Wersja systemu 2.2 dedykowana rozwiązaniom ATO, uzupełnia tryby pracy pojazdu kolejowego o nowy tryb pracy Jazda Automatyczna (AD). Wersja systemu 2.3 umożliwia wykorzystanie do prowadzenia ruchu podwójnego systemu radia FRMCS – GSM-R, a tryby jazdy pojazdu kolejowego uzyskują nowy tryb Manewrowanie Nadzorowane (SM) dla jazd manewrowych z zabudowanymi tarczami manewrowymi. Wersja systemu 3.0 specyfikacjami definiuje wykorzystanie do prowadzenia ruchu systemu

radia FRMCS, a tryby jazdy pojazdu kolejowego uzyskują nowy tryb Manewrowanie Nadzorowane (SM) dla jazd manewrowych bez zabudowanych tarcz manewrowych.

Kompatybilność urządzeń ETCS interferencją w systemie kolei

Analizując linie kolejowe dedykowane do implementacji systemu ETCS, zgodnie z tabelą 1, infrastruktura urządzeń przytorowych systemu ETCS wykonywana jest zgodnie z wymaganiami wzorca 2 oraz wzorca 3 wydanie 2. Dla obu wzorców urządzenia przytorowe instalowane są w wersji systemu 1.0. Dla wzorca 4 wydanie 1 przewidywana jest implementacja w wykonaniu wersji systemu 1.1. Natomiast linie kolejowe z trybem pracy ograniczony nadzór ukończone zostały zgodnie z wersją systemu 2.0 dla wzoru 3 lub zostaną zrealizowane w wersji systemu 2.1 dla wzorca 4 wydanie 1.

Zgodnie z publikowanymi informacjami [1] przez Urząd Transportu Kolejowego, na dzień 31.12.2024r. w systemie kolei Rzeczypospolitej Polskiej jest zarejestrowanych 92472 ważnych statusów EVR, z czego 9721 rejestracji dotyczy pojazdów kolejowych, w tym 3755 sztuk lokomotyw oraz 1482 to zespoły trakcyjne. Uwzględniając otrzymane dane od przewoźników, zaprezentowane w tabeli 2 zestawienie wskazuje, iż na koniec 2024r. wyposażenie pokładowe systemu ETCS zainstalowane było na 912 pojazdach kolejowych, w tym 20 posiadających pokładową zabudowę urządzeń tylko ETCS poziom 1. Pozostałe pojazdy kolejowe w ilości 399 sztuk posiadają zabudowę pokładową zgodną z baseline 2 (z tzw. specyfikacją systemu 2.3.0d). Natomiast 467 sztuk pojazdów zabudowanych jest zgodnie z baseline 3, dla których nie wskazano właściwej zastosowanej specyfikacji systemu, tj. wydania.

Odnosząc się do wzorca i wydania, szczególną uwagę należy również zwrócić na inny parametr jakim jest wersja systemu. Jak już wspomniani, definiuje ona obowiązkowe funkcje systemu ETCS zapewniające tech-

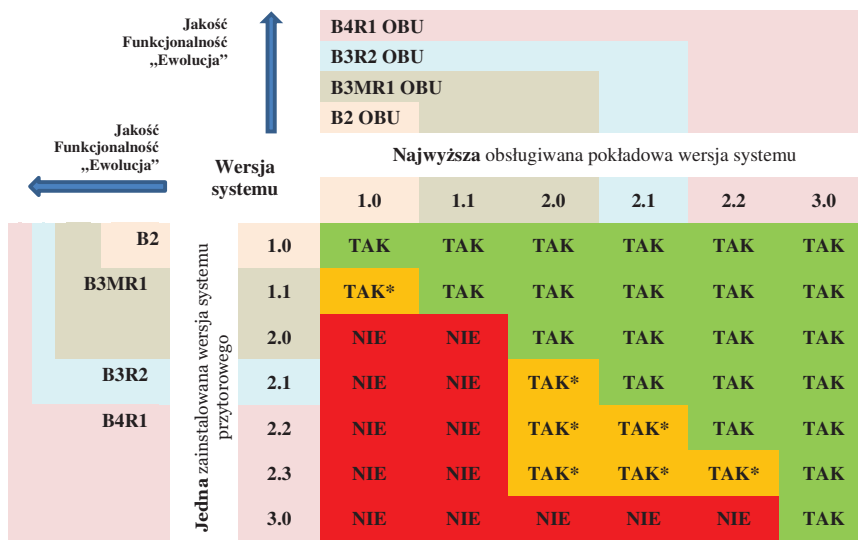
Tab. 2. Pojazdy wyposażone w ETCS 2024 r. (źródło [1])

Rodzaj taboru kolejowego	Pojazdy wyposażone w ETCS	Pojazdy ETCS tylko poziom 1	Pojazdy ETCS poziom 1 i 2 baseline 2	Pojazdy ETCS poziom 1 i 2 baseline 3
ogółem	912	20	399	467
lokomotywy elektryczne	402	16	136	250
lokomotywy spalinowe	5	0	2	3
elektryczne zespoły trakcyjne	400	0	229	171
spalinowe zespoły trakcyjne	12	0	10	2
dwunapedowe zespoły trakcyjne	33	0	0	33
elektryczne wagony silnikowe	0	0	0	0
spalinowe wagony silnikowe	0	0	0	0
pozostałe pojazdy trakcyjne	34	4	22	8

niczną interoperacyjność w ramach ERTMS. Uwzględniając fakt, że wersja systemu nie jest wersją, która jest przyrównywana do zestawu specyfikacji czy wzorca systemu, dla implementacji systemu koniecznym staje się zwrócenie szczególnej uwagi na ten aspekt. Ponieważ zapoczątkowane określanie we wprowadzanych do obrotu prawnego, nowych wzorcach systemu ETCS, minimalnych wymagań dotyczących rozwiązań dedykowanych urządzeniom pokładowym, przy jednoczesnym braku takich wymagań stawianych po stronie przytorowej wymusza wprowadzenie uwzględniania korelacji pomiędzy wyposażeniem pokładowym a wersją systemu przytorowego. Brak takiej weryfikacji w określonych sytuacjach, po weryfikacji zgodności wersji systemu strony pokładowej z przytorową, zgodnie z zapisami specyfikacji SRS, skutkować będzie wykonywaniem funkcji pokładowych w ograniczonym zakresie lub pojazd nie uzyska zgody wjazdu na linię kolejową. Pełna zgodność wersji systemu nie ograniczy funkcjonalności pracy urządzeń pokładowych systemu ETCS.

Uwzględniając oddziaływanie między sobą podsystemów strukturalnych w systemie kolei, we wzajemnym powiązaniu elementów systemu kolejowego, należy uwzględnić fakt, iż wyposażenie pokładowe podsystemu sterowanie pojazdów kolejowych może być kompatybilne zarówno wstecz i w przód. Uwzględniając fakt zabudowy po stronie pojazdu kolejowego najwyższej dostępnej wersji systemu dla danego wzorca, pojazd zawsze uzyskuje możliwość wjazdu

na linię kolejową wyposażoną dla tej wersji systemu i wersji niższych. Ale już stosowanie w praktyce kompatybilności w przód wymaga przestrzegania środków mitygacji określanych w sprawdzaniach związanych z kompatybilnością systemu związaną z oceną zgodności wzorca specyfikacji ETCS. Dokumenty takich weryfikacji, są regularnie publikowane zgodnie z artykułem 9 rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) 2023/1695 [5] w oficjalnych opiniach [7] Agencji Kolejowej Unii Europejskiej (ERA) [11]. Jednakże kompatybilność w przód ma swoje ograniczenia. Pojazdy trakcyjne wyposażone w urządzenia pokładowe wykonane w technologii B2 będą mogły poruszać się po liniach kolejowych wykonanych w wersji systemu 1.1 dla B3MR1, B3R2 i B4R1 z uwzględnieniem ograniczeń funkcjonalnych pracy systemu. Dla wyższych wersji systemu począwszy od 2.0 i wzorców od B3MR1 poruszanie się pojazdów kolejowych z wyposażaniem pokładowym zgodnym z B2 będzie niemożliwe. W przypadku pojazdów kolejowych wyposażonych zgodnie z baseline 3 (patrz tabela 2) bez dookreślenia zastosowanego w realizacji zabudowy wydania, nie jest możliwe określenie czy pojazdy takie wykorzystają pełną funkcjonalność pracy urządzeń pokładowych na liniach kolejowych wykonanych po stronie przytorowej zgodnie z wzorcem 4 wydanie 1 w wersji systemu 2.1. Najbardziej restrykcyjnym rozwiązaniem technicznym będzie implementacja rozwiązań wykonanych po stronie przytorowej w wersji systemu 3.0, ponieważ wjazd na taką linię uzyskają tylko i wyłącznie



2. Kompatybilność wsteczna urządzeń ETCS (źródło: opracowanie własne)

pojazdy kolejowe posiadające zabudowane urządzenia pokładowe zgodne z wersją systemu 3.0.

Sumaryczne podsumowanie korelacji zestawu specyfikacji lub wzorca systemu w odniesieniu do wersji systemu przedstawiono na schematycznym rysunku 2.

Podsumowanie

Wyspecyfikowane przed laty specyfikacje zunifikowanego systemu zarządzania ruchem kolejowym, w fazie ich ewolucji, wspomagane były kolejnymi zapisami rozszerzającymi implementację systemu ERTMS na europejskiej sieci kolejowej. Prowadzone procesy inwestycyjne w infrastrukturze przytorowej, skutkują koniecznością doposażenia starszych pojazdów kolejowych w urządzenia pokładowe systemu ETCS. Taki obowiązek wynikał z zapisów TSI CCS wskazujący na obligatoryjny nakaz zabudowy najnowszej wersji systemu dla pojazdów trakcyjnych dopuszczonych do ruchu przed dniem 1 stycznia 2018 r. oraz pojazdów trakcyjnych dopuszczonych do ruchu po ww. dacie na podstawie uzyskanego odstępstwa dotyczącego konieczności zabudowy wyposażenia ERTMS. Taki sformułowane zapisy starszych TSI nie były jedynymi zapisami wskazującymi na koniecznością wykonania określonych prac na taborze.

Nowelizacje TSI „Sterowanie”, po stronie taborowej rekomendują określone rozwiązania, które powinny być

implementowane w odniesieniu do urządzeń pokładowych. Po stronie zabudowy urządzeń przytorowych pozostawiają jednak dowolność stosowanej wersji systemu. Realizowane instalacje systemu ETCS po stronie przytorowej, po za jednym przypadkiem instalacji na linii kolejowej trybu pracy ograniczony nadzór (LS) zrealizowanej w wersji systemu 2.0 (wzór 3), są realizowane w wersji systemu 1.0 (wzorec 2). Planowane kolejne do zabudowy w urządzenia przytorowe ETCS linie kolejowe przewidywane są jako wersja 1.0 (wzorec 3 wydanie 2) lub 1.1 (wzorec 4 wydanie 1), a dla trybu pracy LS jako wersja systemu 2.1. Taka korelacja wersji systemu dla powiększającej się sieci dostępnych linii kolejowych wyposażonych w urządzenia przytorowe, stanie się niezmiernie ważna w przypadku poruszania się pojazdów kolejowych zgodnych z baseline 2. Zabudowa urządzeń pokładowych wykonana zgodnie z wzorcem 2, który na koniec 2024r. zainstalowany został na prawie połowie taboru z pokładowymi urządzeniami ETCS nie będzie obsługiwany na liniach kolejowych, na których urządzenia przytorowe będą zabudowane w wersji systemu 2.0 i wyższej oraz nie będą realizowały wszystkich funkcjonalności dla zabudowy wersji systemu 1.1. Taka niedogodność skutkować, w celu sprawnego poruszania się po takich liniach będzie wymuszała konieczność wyłączenia systemu po stronie pokładowej. Przywrócenie peł-

nej funkcjonalności po stronie urządzeń pokładowych, wymagać będzie od przewoźników wyasygnowania odpowiednich funduszy na dokonanie modernizacji urządzeń do aktualnie obowiązujących specyfikacji.

W perspektywie kolejnych postępowań przetargowych, nie wykazanych w niniejszych rozważaniach, należy się spodziewać implementacji nowszych wersji systemu po stronie urządzeń przytorowych. Takie podejście jest kolejnym wyzwaniem wzajemnego oddziaływania podsystemów, ponieważ aby zapewnić wykorzystanie po stronie urządzeń pokładowych pełnej funkcjonalności systemu, w tym dostępnych trybów pracy [6]. Przewoźnicy dla wcześniej zabudowanych wzorców systemu będą musieli podjąć strategiczną decyzję o modernizacji urządzeń pokładowych. Brak takiej decyzji oznaczać będzie nadzorowanie obiegów pojazdów po sieci kolejowej ETCS, tak aby nie dopuścić do uniemożliwienia wjazdu na linię kolejową. Brak dostępu do linii kolejowej generowane przez urządzenia przytorowe, będzie wymuszało podjęcie przez przewoźników działań mitygujących w celu uniknięcia generowania nieplanowanych opóźnień będących skutkiem zatrzymania pociągu przez urządzenia przytorowe systemu ETCS wynikającą z niezgodności wersji systemu.

Dodatkowo gromadzenie i publikacja danych o sumarycznej ilości pojazdów trakcyjnych z zabudowanymi urządzeniami pokładowymi powinno unikać zestawiania informacji jako jednej grupy baseline 3 czy przyszłościowo baseline 4. Tak zaprezentowane sumaryczne dane uniemożliwiają w sposób prawidłowy przypisanie do określonej wersji systemu wykorzystanej wersji specyfikacji bazowych. Pod ogólnym stwierdzeniem baseline 3 skrywają się bowiem dwie różne wersje systemu, tj. zgodnie z zapisami specyfikacji 3.4.0 czy specyfikacji 3.6.0, natomiast dla baseline 4 są to już trzy różne wersje systemu.

Powyższe uwarunkowania nie tylko należy rozpatrywać w odniesieniu do zapisów narodowych planów wdra-

żania [2], których realizacja stopniowo rozszerzana będzie w systemie kolejowym na całą sieć. Zdefiniowane narodowe plany wdrażania ERTMS, będące realizacją zapisów rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) 2023/1695 [5], są rozszerzane w zakresie zabudowy systemu ERTMS poprzez inne dokumenty prawne jak np. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1679 [4]. Rozporządzenie to, dotyczy priorytetowego wdrożenia radiowego ERTMS na transeuropejskiej sieci transportowej (TEN-T), wskazując obligatoryjną instalację po stronie przytorowej urządzeń przytorowych ETCS poziomu 2 wykorzystujących system łączności radiowej klasy A do wymiany danych między torami i pociągami związanych i niezwiązanych z bezpieczeństwem, których zakres wynika z rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) 2023/1695 [5]. Realizacja implementacji na sieci TEN-T wymagana jest dla sieci kompleksowej do 2050 r., na rozszerzonej sieci bazowej – do 2040 r., a na sieci bazowej – do 2030 r. Przy wdrażaniu ERTMS na sieci kompleksowej, w harmonogramach jako priorytowe są linie, które mogą przyczynić się do bezpiecznego i wydajnego transgranicznego międzynarodowego transportu kolejowego. W tym przypadku, również należy rozpatrywać poważne zagrożenie, w przypadku wyboru do zabudowy systemu w wersji 3.0. W takim przypadku na dzień dzisiejszy żaden pojazd kolejowy wyposażony w urządzenia pokładowe nie uzyskał by zgody na wjazd na wyposażoną w taką wersję systemu linię kolejową. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Urząd Transportu Kolejowego (2025). Sprawozdanie z funkcjonowania rynku transportu kolejowego 2024
- [2] Ministerstwo Infrastruktury, Krajowy Plan Wdrożenia Technicznej Specyfikacji Interoperacyjności „Sterowanie” Polska (2024) czerwiec 2024r., 1–44
- [3] Pawlik, M., Gradowski, P. i inni (2024) Ekspertyza „Wdrożenie systemu ETCS poziomu 1 LS (Limited Supervision) na liniach kolejowych w Polsce nieujętych w sieci TEN-T, Instytut Kolejnictwa, 23 grudnia 2024r., 1–137
- [4] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1679 z dnia 13 czerwca 2024 r. w sprawie unijnych wytycznych dotyczących rozwoju transeuropejskiej sieci transportowej, zmieniające rozporządzenie (UE) 2021/1153 i (UE) nr 913/2010 oraz uchylające rozporządzenie (UE) nr 1315/2013 (Tekst mający znaczenie dla EOG), PE/56/2024/ADD/1 (2024), Dz.U. L, 2024/1679, 28.6.2024,
- [5] Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2023/1695 z dnia 10 sierpnia 2023 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie podsystemów „Sterowanie” systemu kolei w Unii Europejskiej i uchylające rozporządzenie (UE) 2016/919 (Tekst mający znaczenie dla EOG) (2023), Dz.U. L 222 z 8.9.2023, 380–560
- [6] Gradowski, P. (2023), Scenariusz operacyjny - nowa forma dokumentacji technicznej dla systemów zapewniających interoperacyjność, Problemy Kolejnictwa 57 (zeszyt nr 161), 21–41
- [7] European Union Agency For Railways, ERA/OPI/2020-2 Opinion of the European Union Agency for Railways to the European Commission regarding error corrections of current ERTMS baselines (2020) – <https://www.era.europa.eu/content/eraopi2020-2-opinion-european-union-agency-railways-european-commission-regarding-error>
- [8] Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/919 z dnia 27 maja 2016 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie podsystemów „Sterowanie” systemu kolei w Unii Europejskiej (Tekst mający znaczenie dla EOG), (2016), Dz.U. L 158 z 15.6.2016, 1–79, uchylony 27.09.2023
- [9] Decyzja Komisji (UE) 2015/14 z dnia 5 stycznia 2015 r. zmieniająca decyzję 2012/88/UE w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie podsystemów „Sterowanie” transeuropejskiego systemu kolei (notyfikowana jako dokument nr C(2014) 9909) (Tekst mający znaczenie dla EOG), (2015), Dz.U. L 3 z 7.1.2015, 44–58, uchylony 04.07.2016
- [10] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej (przekształcenie) (Tekst mający znaczenie dla EOG) (2016), Dz.U. L 138 z 26.5.2016, 44–101
- [11] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/796 z dnia 11 maja 2016r. w sprawie Agencji Kolejowej Unii Europejskiej i uchylenia rozporządzenia (WE) nr 881/2004 (Tekst mający znaczenie dla EOG), (2016), Dz.U. L 138 z 26.5.2016, 1–43
- [12] Decyzja Komisji z dnia 6 listopada 2012 r. zmieniająca decyzję 2012/88/UE w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie podsystemów „Sterowanie” transeuropejskiego systemu kolei (notyfikowana jako dokument nr C(2012) 7325) (Tekst mający znaczenie dla EOG) (2012/696/UE), (2012), Dz.U. L 311 z 10.11.2012, 3–13, uchylony 04.07.2016
- [13] KOW sp. z o.o., Leksykon Terminów Kolejowych, (2011), Warszawa 2011, 251–254
- [14] Białoń, A., Gradowski, P., Toruń, A. (2009), Nowoczesny system zarządzania ruchem kolejowym (ERTMS), Problemy Kolejnictwa 53 (Zeszyt 148), 137–171
- [15] Commission Decision of 21 March 2001 on the basic parameters of the command-control and signalling subsystem of the trans-European high-speed rail system referred to as "ERTMS characteristics" in Annex II(3) to Directive 96/48/EC (notified under document number C(2001) 746) (Text with EEA relevance) (2001/260/EC), (2001), Dz.U. L 93 z 3.4.2001, 53–56, uchylony 11.09.2002

Metodyka pomiarów TDR i możliwości jej zastosowania w ocenie właściwości akustycznych nawierzchni kolejowej

Methodology of TDR Measurements and Their Potential Application in the Evaluation of the Acoustic Properties of Railway Track



Michał Urbaniak

Dr inż.

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Transportowej

michal.urbaniak@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5296-5184



Roksana Licow

Dr inż.

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Transportowej

roksana.licow@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-4368-0064

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwość stosowania narzędzi analizy modalnej do oceny właściwości akustycznych nawierzchni kolejowej, ze szczególnym uwzględnieniem parametru Track Decay Rate (TDR). Omówiono znaczenie analizy modalnej w badaniach konstrukcji torów oraz podstawy generowania drgań i hałasu toczenia. Przedstawiono również przykłady praktyczne związane z wykorzystaniem tłumików szynowych oraz ich wpływem na modalną odpowiedź toru. Zaprezentowano zasady wyznaczania TDR zgodnie z normą PN-EN 15461:2011, obejmujące rozmieszczenie punktów pomiarowych, dobór młotków modalnych i akcelerometrów oraz wymagania dotyczące rejestracji sygnału, wraz z omówieniem praktycznych aspektów prowadzenia pomiarów. Zwrócono uwagę na ograniczenia metody, w tym szczególną podatność wyników pomiarów i analiz modalnych na doświadczenie osób wykonujących badania oraz analizujących rejestrowane sygnały drganiowe. Analiza literatury potwierdza, że analiza modalna i parametry TDR stanowią efektywne narzędzia diagnostyczne w ocenie stanu toru oraz skuteczności stosowanych środków redukcji hałasu w transporcie szynowym.

Słowa kluczowe: Track Decay Rate; TDR; Hałas środowiskowy; Nawierzchnia szynowa, Transport szynowy

Abstract: This paper presents the potential application of modal analysis tools for evaluating the acoustic properties of railway track surfaces, with a particular focus on the Track Decay Rate (TDR) parameter. The role of modal analysis in the investigation of track structures, as well as the fundamental mechanisms of vibration and rolling noise generation, is discussed. Practical examples illustrating the use of rail dampers and their impact on the track's modal response are also provided. The paper outlines the procedures for determining TDR in accordance with the PN-EN 15461:2011 standard, including the layout of measurement points, the selection of modal hammers and accelerometers, and the requirements for signal acquisition, along with practical considerations for conducting measurements. Attention is drawn to the method's limitations, particularly the sensitivity of measurement and modal analysis results to the experience of the personnel performing the tests and analyzing the recorded vibration signals. A review of the literature confirms that modal analysis and TDR parameters are effective diagnostic tools for assessing track condition and evaluating the effectiveness of noise reduction measures in rail transport.

Keywords: Track Decay Rate; TDR; Environmental noise; Railway track; Rail transport

Wstęp

Pomiary modalne stanowią jedną z podstawowych metod badania charakterystyk dynamicznych obiektów mechanicznych i konstrukcyjnych. Umożliwiają wyznaczenie częstotliwości własnych, postaci drgań oraz poziomów tłumienia, czyli parametrów opisujących odpowiedź konstrukcji na pobudzenia zewnętrzne. Dzięki temu stanowią narzędzie służące do identyfikacji zachowania dynamicznego obiektu oraz oceny

wpływu obciążeń eksploatacyjnych i zmian strukturalnych [1–5]. W literaturze podkreśla się, że analiza modalna jest istotna w projektowaniu, diagnostyce oraz prognozowaniu trwałości układów inżynierskich.

W inżynierii lądowej analiza modalna wykorzystywana jest do oceny stanu technicznego obiektów infrastrukturalnych. Zmiany parametrów modalnych stanowią w tym obszarze wrażliwe wskaźniki degradacji konstrukcji. Techniki modalne stosuje się zarówno w obiektach mostowych w

warunkach eksploatacyjnych z wykorzystaniem metod operacyjnych [6–8], jak i w konstrukcjach o złożonej geometrii, w tym w obiektach zabytkowych wykonanych z drewna i murów. Pozwala to określić współpracę elementów oraz sztywność globalną konstrukcji [9].

Modalna identyfikacja znajduje zastosowanie również w diagnostyce urządzeń energetycznych i systemów poddanych zmiennym obciążeniom. W turbinach wiatrowych metody operacyjne umożliwiają

ocenę zmian tłumienia oraz częstotliwości własnych podczas pracy, co pozwala na wczesne wykrywanie degradacji elementów nośnych. W literaturze szeroko omawia się analizy konstrukcji turbin wiatrowych w środowisku morskim i lądowym, w których modalna identyfikacja odgrywa kluczową rolę w monitoringu stanu konstrukcji [10, 11]. Podobne metody stosuje się w diagnostyce struktur maszynowych, między innymi w wykrywaniu niewyważenia i pęknięć wałów, gdzie zmiany parametrów drganiowych pozwalają na precyzyjne zlokalizowanie uszkodzeń [12].

W inżynierii kolejowej analiza modalna wykorzystywana jest do badania konstrukcji toru oraz propagacji drgań w układzie szyna–podtorze. Modalny opis toru umożliwia określenie podatności elementów oraz zdolności układu do tłumienia fal zginających rozprzestrzeniających się w szynie. W badaniach dotyczących modelowania dynamicznego podtorza stosuje się tzw. modele wielołałowe z zastosowaniem analizy modalnej, które pozwalają na ocenę odpowiedzi systemu torowego na obciążenia eksploatacyjne [13].

W innym obszarze badań analiza modalna służy do oceny skuteczności urządzeń ograniczających drgania i hałas, takich jak tłumiki szynowe. W literaturze przedstawiono analizy parametryczne oceniające ich wpływ na charakterystykę dynamiczną toru [14] oraz badania eksperymentalne dotyczące procedur testowania tych urządzeń [15]. Coraz większą uwagę poświęca się również parametrom Track Decay Rate (TDR), czyli współczynnikowi tłumienia wzdłużnego toru, który jest opisywany jako spadek poziomu drgań wzdłuż szyny w funkcji odległości wyrażony w dB / m. Są one modalnym miernikiem właściwości dynamicznych toru i odgrywają istotną rolę w modelowaniu hałasu toczenia oraz ocenie skuteczności środków ograniczających drgania [16].

Charakterystyka zjawisk wibroakustycznych w transporcie kolejowym

Zjawiska wibroakustyczne generowane przez transport kolejowy wymuszają prowadzenie badań w tym zakresie a na podstawie uzyskiwanych wyników proponowanie rozwiązań mających na celu ich minimalizację oraz ograniczenie niekorzystnego wpływu na środowisko. Badania wibroakustyczne prowadzone są w kontekście analizy komfortu pasażerów, trwałości infrastruktury kolejowej, predykcji uszkodzeń taboru kolejowego czy oddziaływania kolei na otoczenie. Źródłem powstawania sygnałów wibroakustycznych podczas ruchu pojazdów szynowych jest przede wszystkim dynamiczna interakcja zachodząca na styku koło–szyna. Poziom rejestrowanych sygnałów wibroakustycznych zależy w istotnym stopniu od prędkości przejazdu badanego składu oraz od stanu technicznego infrastruktury kolejowej i taboru.

Nawierzchnia kolejowa, rozumiana jako układ toru wraz z przytwierdzeniami, podkładami i podsypką, pełni kluczową rolę w przenoszeniu oddziaływań dynamicznych generowanych przez ruch pojazdów kolejowych, które następnie poprzez warstwę ochronną przekazywane są do podtorza. Jej sztywność, jednorodność oraz stan techniczny determinują częstotliwości i amplitudy rejestrowanych sygnałów wibroakustycznych. Drgania propagują zarówno w konstrukcji toru, jak i w gruncie, obejmując szerokie spektrum częstotliwości – od kilku Hz, związanych z interakcją koło–szyna, po kilkanaście kHz, charakterystycznych dla hałasu toczenia. W przypadku nawierzchni z uszkodzoną powierzchnią toczną obserwuje się wyraźny wzrost poziomu drgań i hałasu.

Charakterystyka akustyczna transportu kolejowego zależy również od rodzaju nawierzchni. Tory podsyp-

kowe dzięki elastyczności podtorza częściowo tłumią drgania i zmniejszają hałas przenoszony do gruntu, natomiast tory bezpodsypkowe, o większej sztywności, generują wyższe poziomy dźwięku emitowanego do środowiska. Stan techniczny nawierzchni, w tym chropowatość szyn i stopień zużycia elementów toru, bezpośrednio wpływa na intensywność hałasu toczenia i drgań konstrukcji.

Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że zjawiska akustyczno-drganiowe w transporcie kolejowym są ściśle powiązane z charakterystyką nawierzchni kolejowej. Jej konstrukcja, sztywność i stan techniczny decydują o sposobie propagacji drgań oraz poziomie hałasu, a odpowiednio zaprojektowane i utrzymane elementy toru mogą istotnie ograniczać ich negatywne skutki zarówno dla pasażerów, jak i otoczenia. Współczesne systemy kolei dużych prędkości oraz transportu miejskiego kładą coraz większy nacisk na projektowanie nawierzchni w sposób minimalizujący emisję hałasu i drgań, co stanowi ważny element zrównoważonego rozwoju transportu szynowego.

Hałas środowiskowy w transporcie szynowym

Hałas w transporcie kolejowym pozostaje jednym z kluczowych wyzwań środowiskowych zarówno w Polsce, jak i na świecie. Najbardziej narażeni są mieszkańcy dużych aglomeracji, gdzie zagęszczenie infrastruktury kolejowej i intensywność ruchu pociągów są największe. Źródła hałasu obejmują m.in. hałas toczenia, hałas trakcyjny oraz aerodynamiczny, który staje się dominujący przy prędkościach powyżej 160 km/h, szczególnie w kolejach dużych prędkości [17]. Na poziom emitowanego hałasu wpływają również czynniki zewnętrzne, takie jak geometria terenu, elementy infrastruktury czy warunki pogodowe. Polska ma jedną z naj-

gęstszych sieci kolejowych w Europie a problem hałasu dotyka zwłaszcza obszarów metropolitalnych, gdzie długotrwała ekspozycja na nadmierne natężenie dźwięku może prowadzić do zaburzeń snu, wzrostu poziomu stresu czy problemów kardiologicznych [18]. Odpowiedzią na potrzebę monitoringu i obniżania poziomów dźwięku generowanych do środowiska jest przeprowadzanie badań środowiskowych w zakresie hałasu [19–22].

Prowadzone badania są realizowane zgodnie z obowiązującymi normatywnymi i polegają na dobowym pomiarze hałasu dla pory nocnej i dziennej. Dodatkowo, oprócz wymaganych pomiarów w dziedzinie czasu, rekomenduje się rozszerzenie analiz w zakresie dominujących częstotliwości w sygnale akustycznym poprzez analizę czasowo-częstotliwościową lub analizę tercji. Zaawansowana analiza pozwala na precyzyjne sformułowanie problemu a następnie prowadzi do zastosowania określonych rozwiązań ograniczających hałas a dokładnie ograniczających zbadane studium przypadku. Metodyka badań jest prowadzona zgodnie z europejskimi metodykami oceny i normami, takimi jak CNOSSOS-EU czy normami dotyczącymi chropowatości szyn i kół [23–26]. W zależności czy studium przypadku dotyczy stanu infrastruktury, położenia linii kolejowej albo typów pojazdów i ich stanu technicznego eksploatujących badaną linię kolejową zarządcy infrastruktury decydują o stosowaniu określonych rozwiązań. Należą do nich ekrany akustyczne (wysokie i niskie), absorbery szynowe, czynności utrzymaniowe takie np. szlifowanie szyn czy wymianę elementów infrastruktury. Te działania wpisują się w realizację zaleceń prawa krajowego i unijnego, w tym dyrektywy 2002/49/WE dotyczącej zarządzania hałasem w środowisku. Coraz większe znaczenie zyskują także systemy monitorowania hałasu w czasie rzeczywistym, po-



1. Przykład stosowanych tłumików szynowych montowanych na szycie szyny. Materiał własny

zwalające na szybkie reagowanie na przekroczenia norm. Dzięki rozwojowi technologii oraz konsekwentnym działaniom modernizacyjnym możliwe staje się stopniowe ograniczanie negatywnego oddziaływania hałasu kolejowego na mieszkańców i środowisko naturalne.

Współczynnik tłumienia wzdłużnego toru (TDR)

Wykorzystanie pomiarów i analizy modalnej do oceny charakterystyki akustycznej nawierzchni kolejowej

Modalna analiza nawierzchni kolejowej stanowi podstawowe narzędzie oceny jej właściwości dynamicznych (modalnych) oraz akustycznych. Parametry modalne, takie jak częstotliwości własne, postacie drgań i współczynniki tłumienia, opisują zdolność toru do propagacji i rozpraszania energii drganiowej generowanej przez koło pojazdu. W kontekście hałasu toczenia szczególne znaczenie ma modalna charakterystyka szyny, determinująca poziom emisji w zakresie od 100 Hz do 5 kHz, czyli w paśmie odpowiedzialnym za główne komponenty hałasu generowanego na styku koło–szyna [8, 27–29].

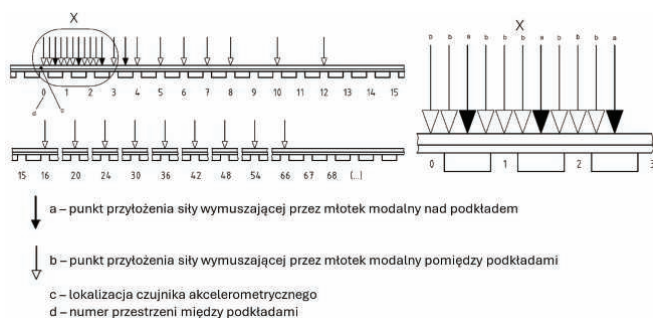
Z modalnego punktu widzenia istotne jest określenie sztywności zginania szyny (bending stiffness of the rail), jej tłumienia oraz sprzężenia z elementami podtorza (podkładami, przytwierdzeniami i podsypką tłuczniovą). Parametry te wpływają na warunki propagacji fal zginających w szynie (bending waves) oraz szybkość ich zanikania. W wielu badaniach wykazano, że właściwości modalne szyny mają bezpośredni

związek z poziomem hałasu toczenia i mogą być skutecznie wykorzystywane do oceny efektywności środków redukcji drgań [27, 28, 30, 31]. Modalne pomiary nawierzchni stosuje się również jako dane wejściowe do modeli MES (Metoda Elementów Skończonych) służących do predykcji odpowiedzi dynamicznej toru w warunkach eksploatacyjnych [20].

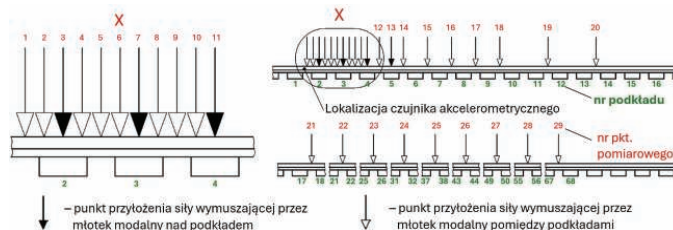
Istotnym obszarem zastosowań analizy modalnej są rozwiązania ograniczające drgania i hałas, takie jak tłumiki szynowe. Urządzenia te, mocowane do szynki szyny (rysunek 1), zwiększają lokalne tłumienie poprzez dodatkową masę i układ sprężysto-tłumiący. W Polsce absorbery szynowe zostały zastosowane m.in. na zmodernizowanej linii kolejowej nr 9 Warszawa–Gdynia na odcinku Pszczółki–Pruszcz Gdański [32, 33].

parametrycznych wykazano, że tłumiki szynowe mogą znacząco wpływać na modalny kształt odpowiedzi szyny oraz na wartości parametrów TDR, czyli szybkości zanikania fal zginających w szynie [14]. Eksperymentalnie potwierdzono również, że odpowiednio dobrane tłumiki zmniejszają poziom energii drgań w paśmie istotnym dla hałasu toczenia, co znajduje odzwierciedlenie w obniżonych wartościach TDR w zakresie średnich i wysokich częstotliwości [15].

Z modalnych pomiarów nawierzchni kolejowej korzystają również zaawansowane modele akustyczne, których celem jest przewidywanie poziomu hałasu toczenia w zależności od stanu toru, rodzaju przytwierdzeń oraz zastosowanych środków tłumienia [28, 31]. W tych modelach



2. Siatka punktów wymuszenia względem ustalonego punktu pomiarowego dla pomiarów TDR w torze kolejowym zgodnie z normą PN-EN 15461:201. Opracowanie własne na podstawie [29]



3. Rekomendowana modyfikacja opisu siatki punktów wymuszenia względem ustalonego punktu pomiarowego dla pomiarów TDR w torze kolejowym. Opracowanie własne na podstawie [29, 34]



a)

4. Młotki modalne wykorzystywane przy pomiarach TDR w torze kolejowym:
a) mały młotek modalny PCB Piezotronics model 086C03,
b) duży młotek modalny PCB Piezotronics model TLD086D20. Materiał własny



b)

Tab. 1. Zestawienie porównawcze specyfikacji technicznej młotków modalnych PCB Piezotronics dla wybranych modeli 086C03 i TLD086D20. Opracowanie własne na podstawie [35, 36]

Parametr	PCB Piezotronics model 086C03	PCB Piezotronics model TLD086D20
Czułość	2,25 mV/N ($\pm 15\%$)	0,23 mV/N ($\pm 15\%$)
Zakres pomiarowy siły	$\pm 2\,224\text{ N pk}$	$\pm 22\,240\text{ N pk}$
Częstotliwość rezonansowa	$\geq 22\text{ kHz}$	$\geq 12\text{ kHz}$
Nieliniowość	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$
Masa młotka	0,16 kg	1,1 kg
Średnica głowki	1,57 cm	5,1 cm
Średnica końcówki	0,63 cm	5,1 cm
Długość młotka	21,6 cm	37 cm

Metoda pomiarów TDR w transporcie szynowym

Pomiary Track Decay Rate przeprowadza się zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 15461:2011 [29], która definiuje jednolitą procedurę wyznaczania szybkości zanikania drgań zginających szyny w pasmach tercjowych. Badania wykonuje się na typowym, jednorodnym odcinku toru o klasycznym rozstawie podkładów wynoszącym zazwyczaj około 0,6 m. Długość sekcji pomiarowej powinna umożliwiać rozmieszczenie punktów pomiarowych na odcinku o długości około 41 metrów, przy zachowaniu ciągłości i jednorodności toru co najmniej 20 metrów przed i za wyznaczonym odcinkiem. Zgodnie z normą punkty są tradycyjnie numerowane według okien między podkładami, a nie samych podkładów, co jest nietypowe w badaniach kolejowych i utrudnia analizę porównawczą (rys-



a)



b)

5. Końcówki młotków modalnych stosowane w pomiarach TDR:
a) stalowa końcówka z zaokrągloną główką zalecana do pomiarów w wysokich częstotliwościach,
b) standardowe końcówki w zestawie do młotka modalnego PCB Piezotronics model 086C03. Materiał własny

wykorzystywane są zarówno pomiary laboratoryjne, jak i terenowe, obejmujące pełną charakterystykę modalną szyn wraz z oceną rozkładu częstotliwości własnych i tłumienia w

warunkach zabudowy torowej.

Tab. 2. Specyfikacja techniczna akcelometru Brüel & Kjær model 4534-B. Opracowanie własne na podstawie [37]

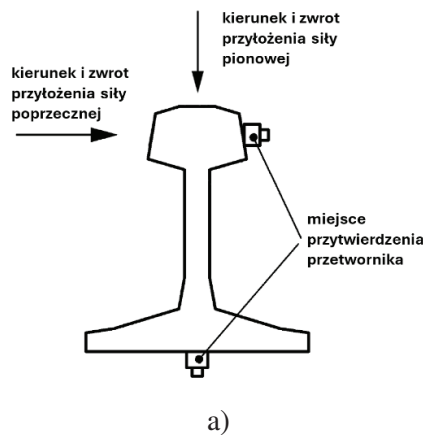
Parametr	Wartość
Zakres częstotliwości	0,2 Hz – 12 800 Hz
Wrażliwość	10 mV · (ms ⁻²) ⁻¹
Masa	8,6 g
Maksymalny poziom operacyjny (szczytowy)	71 g
Rezonansowa częstotliwość	≥ 38 kHz
Poziom własnego szumu (rms)	±130 µg
Zakres temperatur pracy	-55 °C do +125 °C
Montaż (gwint)	10-32 UNF
Złącze	10-32 UNF
Wersja wyjścia	CCLD
TEDS (samozapisujące dane czujnika)	Tak

nek 2).

W oparciu o doświadczenia innych badaczy [34] i własne rekomenduje się wprowadzenie ciągłej numeracji podkładów, a nie okienek między nimi, od nr 1 wzwyż, oraz – jeśli potrzebne – numerację samych punktów pomiarowych umieszczonych na stopce szyny, co zwiększa jednoznaczność i czytelność wyników (rysunek 3).

Wymuszenie drgań wprowadzane jest w punktach pomiarowych rozmieszczonych w sposób zgodny z PN-EN 15461:2011 [29], obejmujący zarówno przestrzeń między podkładami, jak i bezpośrednio nad nimi, przy czym wraz ze wzrostem odległości od czujnika rosną odstęp między punktami pomiarowymi. Przykładowa sekwencja pomiarów obejmuje kilka punktów równomiernie rozmieszczonych między pierwszymi podkładami (np. nr 1 i 2), punkty nad kolejnymi podkładami (nr 2–5), a także wybrane miejsca pomiarowe między dalszymi podkładami wzdłuż odcinka toru, tworząc reprezentatywną siatkę pomiarową dla całego badanego fragmentu toru. Takie rozmieszczenie pozwala uchwycić zarówno charakterystyki modalne lokalnych fragmentów szyny, jak i globalną odpowiedź dynamiczną odcinka toru.

Do wzbudzania drgań stosuje się młotki modalne o znanej charakterystyce

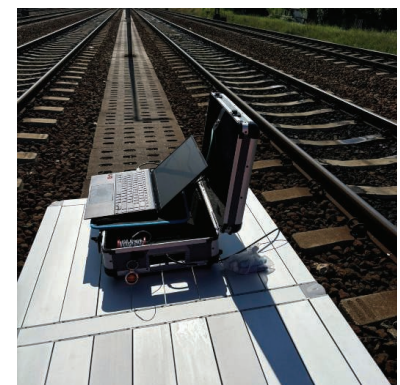


6. a) Schemat lokalizacji montażu czujników podczas pomiarów TDR dla dwóch podstawowych punktów mocowania akcelometru pod stopką oraz na powierzchni bocznej główki szyny. Opracowanie własne na podstawie [29]

b) przykład jednoosiowego akcelometru piezoelektrycznego Hottinger Brüel & Kjær model 4534-B wraz z magnetycznym adapterem mocującym wykorzystywane w pomiarach TDR. Materiał własny



a)



b)



c)



d)

7. Dokumentacja zdjęciowa z przeprowadzonych pomiarów TDR:
a) numeracja punktów pomiarowych, b) stanowisko rejestracji pomiarów,
c) pomiar z użyciem małego młotka modalnego, d) pomiar z użyciem dużego młotka modalnego.
Materiał własny

stycie siłowej. W zależności od wymaganego pasma częstotliwości rezonansowej używa się młotka małego (400–5000 Hz) lub dużego (50–400 Hz) [34]. Przykładowe modele to PCB 086C03 (mały młotek) i PCB 086D20 (duży młotek) z zestawem wymiennych końcówek o różnej twardości

(rysunek 4).

Specyfikację z charakterystyką techniczną wskazanych młotków modalnych przedstawiono w tabeli 1.

W celu zapewnienia odpowiedniej amplitudy siły w wymaganym paśmie częstotliwości, stosuje się koń-

cówki o najwyższej twardości, co jest szczególnie istotne podczas pomiarów w górnym zakresie częstotliwości. Istotny jest także kształt końcówki młotka — powinien on zapewniać możliwie powtarzalną powierzchnię kontaktu z szyną przy każdym uderzeniu. Z tego względu zaleca się stosowanie stalowej końcówki z zaokrągloną główką, zamiast standardowej końcówki płaskiej (rysunek 5).

Odbiór sygnałów drganiowych realizowany jest przy użyciu akcelorometrów piezoelektrycznych o minimalnej masie własnej, tak aby ich wpływ na lokalną dynamikę szyny był pomijalny. Czujniki mocuje się sztywno — poprzez przykręcenie, przyklejenie lub przytwierdzenie magnetyczne — w dwóch podstawowych lokalizacjach: pod stopką szyny oraz na bocznej powierzchni główki szyny (rys. 6.).

Specyfikację z charakterystyką techniczną przetwornika akcelometrycznego akcelrometru Brüel & Kjær model 4534-B przedstawiono w

tabeli 2.

Pomiary wykonuje się w czterech etapach, obejmujących wszystkie kombinacje położenia czujnika i rodzaju młotka: najpierw czujnik pod stopką, pomiar małym młotkiem, następnie dużym; następnie czujnik na główce szyny, również z pomiarem małym i dużym młotkiem. Każdy punkt pomiarowy testuje się co najmniej trzy razy, w praktyce stosuje się pięć uderzeń, aby zwiększyć powtarzalność i stabilność późniejszych analiz i wniosków. Fragment dokumentacji zdjęciowej został przedstawiony na rysunku 7.

Rejestracja sygnału przebiega synchronicznie z częstotliwością próbkowania co najmniej 10 kHz, co zapewnia prawidłową rekonstrukcję odpowiedzi impulsowej i umożliwia wyznaczenie TDR w pasmach tercjowych w zakresie 100–5000 Hz [29]. Przykłady zarejestrowanych odpowiedzi w pierwszym punkcie pomiarowym przedstawiono na rysunku 8.

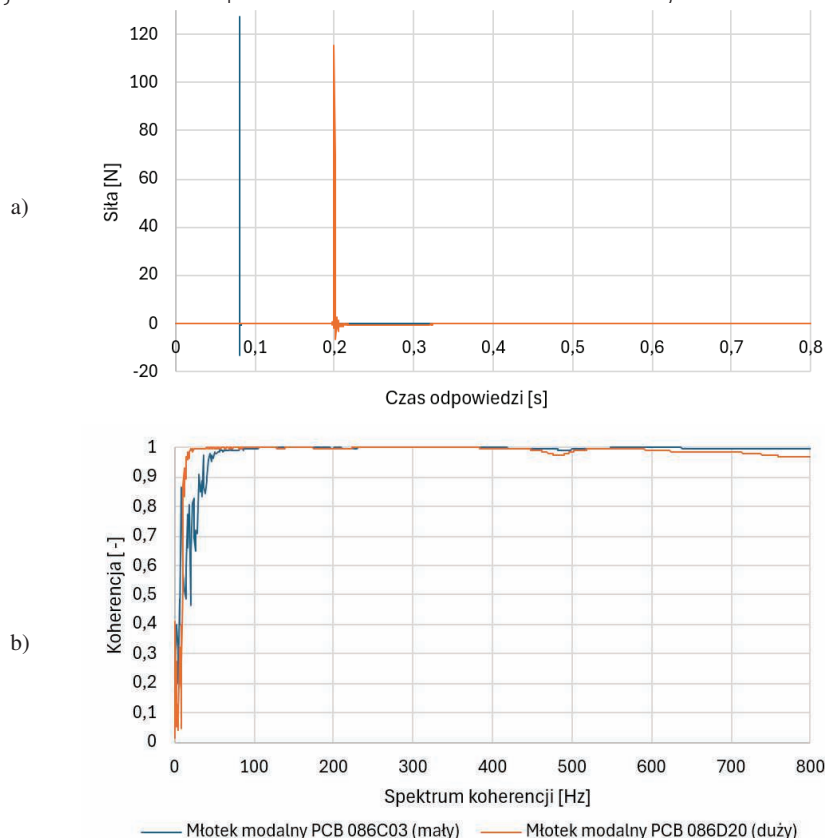
Metoda TDR jest bezinwazyjna i

pozwała na określenie charakterystyki propagacji drgań w szynie rzeczywistego toru kolejowego, a co za tym idzie charakterystyki hałasowej nawierzchni, bez konieczności wprowadzania ruchu pociągów. Jednocześnie umożliwia badanie jedynie reprezentatywnego odcinka toru w krótkim czasie, a nie całego toru, co stanowi ograniczenie. Dodatkowo, metoda napotyka trudności w przypadku konstrukcji torów bezpodsynekowych, gdzie charakterystyki dynamiczne szyny i podtorza różnią się znacząco od standardowych układów podsynekowych i ograniczona jest swoboda w lokalizacji czujników.

Podsumowanie

Przeprowadzone studium literatury potwierdza, że narzędzia analizy modalnej stanowią istotne i efektywne metody oceny właściwości akustycznych nawierzchni kolejowej. Modalna charakterystyka szyny oraz parametry TDR pozwalają dokładnie opisać dynamikę toru w zakresie częstotliwości istotnych dla hałasu toczenia. Dzięki temu możliwa jest precyzyjna ocena wpływu konstrukcji toru, stanu technicznego nawierzchni oraz zastosowanych środków tłumiących na propagację drgań. Chociaż metodyka pomiarowa opiera się na PN-EN 15461:2011, wprowadzono pewne modyfikacje dotyczące opisu toru pomiarowego, które mogą poprawić powtarzalność badań i umożliwić porównania między różnymi odcinkami linii kolejowych.

Literatura wskazuje również, że odpowiednio dobrane tłumiki szynowe mogą skutecznie obniżyć poziom energii drgań i redukować emisję hałasu toczenia. Należy jednak podkreślić, że pomiary modalne i analiza TDR są wrażliwe na doświadczenie osób prowadzących badania oraz interpretujących sygnały, co może wpływać na jakość i wiarygodność wyników. Dlatego kluczowe jest stosowanie ujednoliconych procedur



8. a) Przebieg czasowy typowego sygnału impulsu generowanego przez uderzenie młotkiem do pomiarów modalnych

b) Charakterystyka spektrum koherencji dla typowego sygnału impulsu generowanego przez uderzenie młotkiem do pomiarów modalnych
Opracowanie własne

oraz odpowiednie przygotowanie zespołów badawczych.

Metoda TDR jest bezinwazyjna i pozwala określić charakterystykę propagacji drgań w szynie rzeczywistego toru kolejowego, a tym samym hałasową charakterystykę nawierzchni, bez konieczności wprowadzania ruchu pociągów. Jednocześnie umożliwia badanie jedynie reprezentatywnego odcinka toru w krótkim czasie, a nie całej linii. W przypadku torów bezpodsypekowych nadal występują ograniczenia związane z warunkami montażu czujników i specyfiką konstrukcji, co stanowi istotne ograniczenie metody.

Podsumowując, analiza modalna stanowi cenne narzędzie wspierające projektowanie, modernizację oraz utrzymanie nawierzchni kolejowej w kontekście ograniczania hałasu środowiskowego. Dalszym etapem prac autorów będzie analiza zebranych wyników oraz przeprowadzenie porównań między odcinkami pomiarowymi o różnej konstrukcji i stanie nawierzchni, co pozwoli na pogłębioną ocenę wpływu parametrów konstrukcyjnych i technicznych na propagację drgań i emisję hałasu. Dodatkowym aspektem, który zostanie podjęty w dalszych analizach będzie również ocena porównawcza różnych metod analizy właściwości akustycznych nawierzchni kolejowych. ◀

Materiały źródłowe

- [1] He, J., Fu, Z.-F. (2001). Modal Analysis. Butterworth-Heinemann. Dostęp online (19.11.2025):
https://www.academia.edu/42009039/Modal_Analysis_Jimin_He_and_Zhi_Fang_Fu_
- [2] Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2001). Modal identification from ambient responses using Frequency Domain Decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(1), 81–97. Dostęp online (19.11.2025):
https://vbn.aau.dk/ws/files/12765845/Modal_Identification_from_Ambient_Responses_using_Frequency_Domain_Decomposition
- [3] Peeters, B., De Roeck, G. (2001). Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 123(4), 659–667. DOI: 10.1115/1.1410370
- [4] Sun, X., Ilanko, S., Yusuke, M., Tighe, R.C. (2023). A Review on Vibration-Based Damage Detection Methods for Civil Structures. *Vibration*, 6(4), 843–875. DOI: 10.3390/vibration6040051
- [5] Zhao, J., Zhang, L. (2012). Structural Damage Identification Based on the Modal Data Change. *International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM)*, 2(4), 59–66. DOI: 10.5815/ijem.2012.04.08
- [6] Hasani, H., Freddi, F. (2023). Operational Modal Analysis on Bridges: A Comprehensive Review. *Infrastructures*, 8(12): 172. DOI: 10.3390/infrastructures8120172
- [7] Kohm, M. (2023). Influence of vehicle traffic on modal-based bridge monitoring. *Structural Monitoring & Maintenance*, 10(3). DOI: 10.1007/s13349-022-00630-z
- [8] Thompson, D. J. (2008). *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-08-045147-3.X0023-0
- [9] Marciniak, P., Pawlak, Z. M., Wyczalek, I. (2024). The Use of Experimental Modal Analysis in Modeling the Complex Timber Structure of a Historical Building. *Applied Sciences*, 14, 8517. DOI: 10.3390/app14188517
- [10] van Vondelen, A. A. W., Navalkar, S. T., Iliopoulos, A., van der Hoek, D. C., van Wingerden, J.-W. (2022). Damping identification of offshore wind turbines using operational modal analysis: a review. *Wind Energy Science*, 7, 161–184. DOI: 10.5194/wes-7-161-2022
- [11] Zhang, P., He, Z., Cui, C., Ren, L., Yao, R. (2022). Operational Modal Analysis of Offshore Wind Turbine Tower under Ambient Excitation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1963. DOI: 10.3390/jmse10121963
- [12] Bednarz, J. (2017). Operational Modal Analysis for Crack Detection in Rotating Blades. *Archives of Acoustics*, 42(1), 105–112. DOI: 10.1515/aoa-2017-0011
- [13] Morais, J., Fortunato, E., Ribeiro, D., Mendes, J. (2024). Railway Substructure Modeling Approach for Modal Analysis Using Multibody Simulation. *Applied Sciences*, 14, 6510. DOI: 10.3390/app14156510
- [14] Fologea, D., Mazilu, T., Gheț, M.-A., Apostol, I.-I. (2024). Parametric Study on the Effect of Rail Dampers on Track Decay Rate. *Applied Sciences*, 14, 9541. DOI: 10.3390/app14209541
- [15] Squicciarini, G., Toward, M. G. R., Thompson, D. J. (2015). Experimental procedures for testing the performance of rail dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 359, 21–39. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.07.007
- [16] Jones, C. J. C., Thompson, D. J., Diehl, R. J. (2006). The use of decay rates to analyse the performance of railway track in rolling noise generation. *Journal of Sound and Vibration*, 293, 485–495. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.08.060
- [17] TSI NOISE – Rozporządzenie wykonawcze (UE) 2023/1694 z dnia 10 sierpnia 2023 r. zmieniające rozporządzenia Komisji: (UE) nr 321/2013, nr 1299/2014, nr 1300/2014, nr 1301/2014, nr

- 1302/2014, nr 1304/2014 oraz rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/777 10. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2024 poz. 54).
- [18] Leśnikowska-Matusiak, I., & Wnuk, A. (2014). Wpływ hałasu komunikacyjnego na stan środowiska akustycznego człowieka. *Transport Samochodowy*, 3, 37–62. Dostęp online (23.11.2025): <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-596b0df2-b1c9-4173-a7a3-f18126abe02a>
- [19] Obwieszczenie Ministra Środowiska z dnia 15 października 2013 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz. U. Nr 120, poz. 826).
- [20] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 20 kwietnia 2023 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać mierniki poziomu dźwięku, oraz szczegółowego zakresu badań wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych (Dz.U.2023.942).
- [21] 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).
- [22] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 17 stycznia 2003 r. w sprawie rodzajów wyników pomiarów prowadzonych w związku z eksploatacją dróg, linii kolejowych, linii tramwajowych, lotnisk oraz portów, które powinny być przekazywane właściwym organom ochrony środowiska, oraz terminów i sposobów ich prezentacji (Dz.U. z 2003 r. Nr 18, poz. 164).
- [23] Dyrektywa Komisji (UE) 2015/996 z dnia 19 maja 2015 r. ustanawiająca wspólne metody oceny hałasu zgodnie z dyrektywą 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady poczynawszy od 01.01.2019 r.
- [24] Norma EN 15461:2008+A1:2010 Railway applications - Noise emission - Characterisation of the dynamic properties of track sections for pass by noise measurements.
- [25] Norma EN 15610:2019 Railway applications – Acoustics - Rail and wheel roughness measurement related to noise generation.
- [26] Norma PN-EN ISO 3095 Pomiar hałasu emitowanego przez pojazdy szynowe.
- [27] Kitagawa, T. (2009). The Influence of Wheel and Track Parameters on Rolling Noise. *Quarterly Report of RTRI*, 50(1), 32–38. DOI: 10.2219/rtrir.50.32
- [28] Thompson, D.J. & Jones, C.J.C. (2000). A review of the modelling of wheel/rail noise generation. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 519–536. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2542
- [29] Norma PN-EN 15461:2011 / EN 15461:2008+A1:2012 — Railway applications – Noise emission – Characterisation of the dynamic properties of track sections for passing rolling stock by measuring vibration decay rates.
- [30] Punetha, P., Maharjan, K., Nimbalkar, S. (2021). Finite Element Modeling of the Dynamic Response of Critical Zones in a Ballasted Railway Track. *Frontiers in Built Environment*. DOI: 10.3389/fbuil.2021.660292
- [31] Remington, P.J. (1976). Wheel/rail noise — Part IV: Rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 46(3), 419–436. DOI: 10.1016/0022-460X(76)90864-6
- [32] Kurier Kolejowy. (2025). Absorbery szynowe – cicha rewolucja na polskich torach. Dostęp online (20.11.2025): <https://kurier-kolejowy.pl/aktualnosci/48239/absorbery-szynowe---cicha-rewolucja-na-polskich-torach.html>
- [33] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2025). Mniej hałasu przy torach. PLK wprowadza skuteczne rozwiązania – montaż absorberów na linii kolejowej nr 9. Dostęp online (20.11.2025): <https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/informacje-prasowe/szczegoly/mniej-halasu-przy-torach-plk-wprowadza-skuteczne-rozwiazania-11094>
- [34] Müller, C. (2021). Track decay rates and dynamic properties of railway track – measurement, modelling and interpretation. Technische Universität Berlin. Dostęp online (20.11.2025): <https://depositonce.tu-berlin.de/items/4112efe6-8b89-4388-bee7-78ca3de98596>
- [35] Specyfikacja techniczna młotka modalnego PCB Piezotronics model 086C03. Dostęp online (21.11.2025): <https://www.pcb.com/products?m=086c03>
- [36] Specyfikacja techniczna młotka modalnego PCB Piezotronics TLD086D20. Dostęp online (21.11.2025): <https://www.pcb.com/products?m=tld086d20>
- [37] Specyfikacja techniczna przetwornika Hottinger Brüel & Kjær model 4534-B. Dostęp online (21.11.2025): <https://www.bksv.com/ko/transducers/vibration/accelerometers/ccld-iepe/4534-b-001>

Zwiększenie liczby terminali oraz lepsze ich dostosowanie do przeładunku różnych rodzajów jednostek ładunkowych szansą na wzrost udziału transportu intermodalnego w Polsce

Increasing the number of terminals and improving their suitability for handling different types of cargo units presents an opportunity to increase the share of intermodal transport in Poland



Robert Kruk

Mgr inż.

Institut Kolejnictwa w Warszawie
Zakład Dróg Kolejowych
i Przewozów

rkruk@ikolej.pl

ORCID: 0000-0003-1399-1125



Beata Piwowar

Mgr inż.

Institut Kolejnictwa w Warszawie
Zakład Dróg Kolejowych
i Przewozów

bpiwowar@ikolej.pl

ORCID: 0000-0001-6596-1185



Krzysztof Ochociński

Mgr inż.

Institut Kolejnictwa w Warszawie
Zakład Dróg Kolejowych
i Przewozów

kochocinski@ikolej.pl

ORCID: 0000-0002-8328-2511

Streszczenie: W artykule przedstawiono udział transportu intermodalnego w ostatnich 11 latach w Polsce oraz udział przewozu naczep siodłowych w transporcie intermodalnym w wybranych krajach europejskich w roku 2023. Z przedstawionych danych wynika, że przewozy naczep siodłowych mają w Polsce marginalne znaczenie na tle innych państwa europejskich. Zwiększenia znaczenia przewozu naczep siodłowych możliwe jest przez zwiększenie liczby terminali mogących przeładowywać ten rodzaj jednostki ładunkowej. Pozwoliłoby to zwiększenie udziału transportu intermodalnego i całego transportu kolejowego w obsłudze transportowej wymiany handlowej Polski z krajami europejskimi.

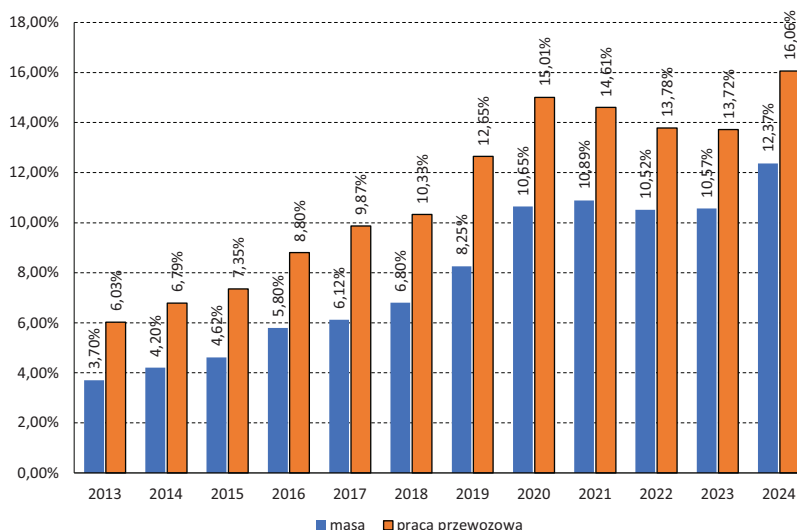
Słowa kluczowe: Infrastruktura kolejowa; Transport intermodalny; Terminale intermodalne

Abstract: The article presents the share of intermodal transport in Poland over the last 11 years and the share of semi-trailer transport in intermodal transport in selected European countries in 2023. The data presented shows that semi-trailer transport in Poland is of marginal importance compared to other European countries. It is possible to increase the importance of semi-trailer transport by increasing the number of terminals capable of handling this type of loading unit. This would allow for an increase in the share of intermodal transport and rail transport as a whole in the transport of Poland's trade with European countries.

Keywords: Railway infrastructure; Intermodal transport; Intermodal terminals

Wstęp

Zmiany jakie zachodzą w światowym handlu mają wpływ na dynamikę wzrostu przewozów intermodalnych w Polsce (Rysunek 1). Od kilku lat obserwuje się tendencję do lokowania produkcji różnego rodzaju produktów gotowych i półproduktów bliżej miejsc konsumpcji i przetwarzania. Ponadto wojna w Ukrainie i co za tym idzie sankcje gospodarcze nałożone na Rosję i Białoruś oraz wzrost stawek ubezpieczeniowych mogą negatywnie wpłynąć na postrzeganie korytarza północnego „Nowego Jedwabnego Szlaku - NJS” (przez Ro-

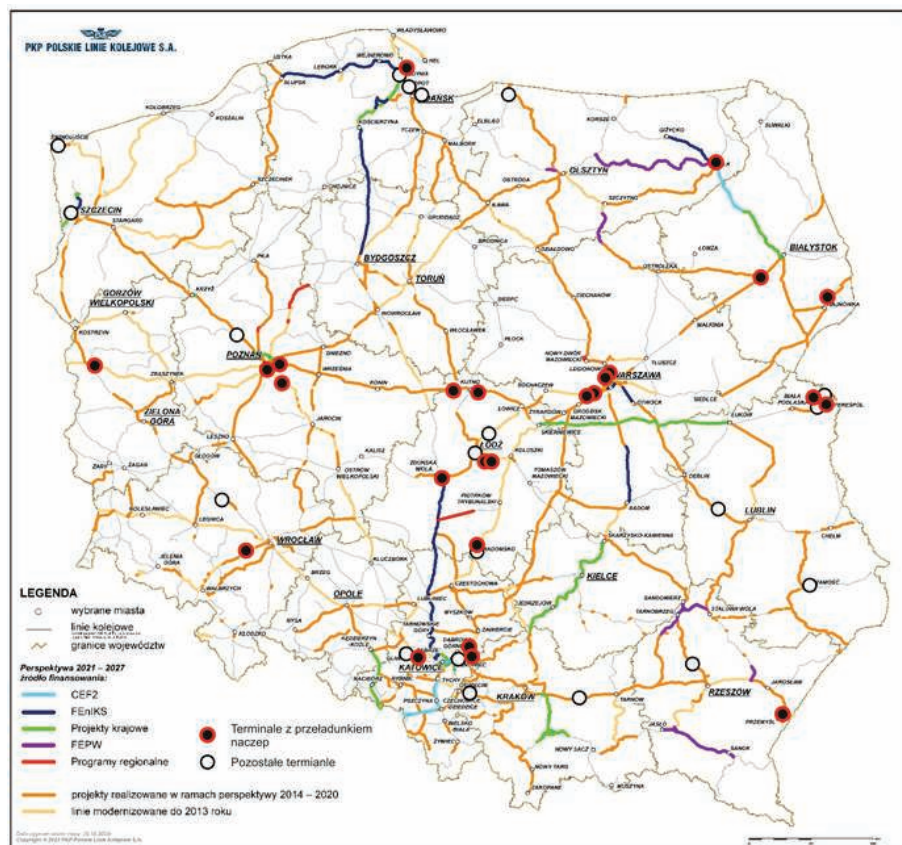


1. Udział przewozów intermodalnych w transporcie kolejowym według przewiezionej masy i wykonanej pracy przewozowej w latach 2013-2024 [6]

sję, Białoruś, Polskę) jako bezpiecznej alternatywy dla przewozów morskich kontenerów. Tym samym część ładunków może być przekierowywanych na korytarz południowy (przez Morze Kaspijskie i Morze Czarne). Ponadto gestorzy ładunków mogą omijać ten szlak transportowy w przypadku ładunków podwójnego przeznaczenia. Wszystkie te okoliczności powodują, że wzrost wolumenu przewozów transportem intermodalnym w Polsce obarczony jest dużą niepewnością. Widoczne to jest w statystykach dla lat 2022 i 2023, gdzie nastąpił spadek przewiezionej masy ładunków oraz wykonanej pracy przewozowej. W roku 2024 nastąpiło odbicie trendu, jednak sytuacja geopolityczna na świecie może ten trend odwrócić. Należy zatem szukać innych kierunków rozwoju i dywersyfikacji przewozów intermodalnych. Jednym z takich kierunków są przewozy intermodalne do i z krajów europejskich. Do rozwoju tego rodzaju przewozów potrzebna jest większa liczba terminali oraz zastosowanie innej jednostki intermodalnej, na przykład naczepy siodłowej.

Rozmieszczenie terminali intermodalnych w Polsce i ich wyposażenie przeładunkowe

Według danych UTK [6] w Polsce funkcjonuje obecnie 45 terminali (Rysunek 2). Większość z tych terminali jest położonych w zachodniej części kraju, na zachód od linii Wisły. Terminale różnią się między sobą wielkością frontów ładunkowych, długością oraz liczbą torów przeładunkowych, powierzchnią składowania jednostek ładunkowych oraz wyposażeniem w urządzenia przeładunkowe. W większości terminali przeważają wozy wysięgnikowe typu reachstacker. Większe terminale, na przykład terminal PCC w Kutnie czy CLIP z Swarzędzu, posiadają również suwnice bramowe.



2. Rozmieszczenie terminali intermodalnych w Polsce – stan obecny [2]

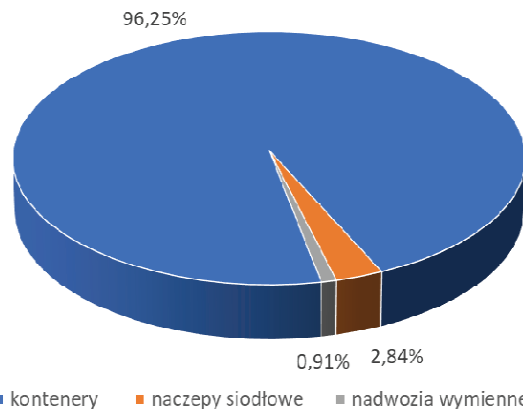
Wszystkie przedstawione na rysunku 2 terminale są przystosowane do przeładunku kontenerów. Jednak istotnym parametrem charakteryzującym terminale powinna być możliwość przeładunku również naczep siodłowych i nadwozi wymiennych. Taką możliwość ma 25 terminali, czyli około 55% wszystkich terminali intermodalnych zlokalizowanych w Polsce. Wynika to z faktu marginalnego znaczenia przewozu naczep siodłowych i nadwozi wymiennych transportem kolejowym w Polsce.

Na rysunku 3 przedstawiono udziały poszczególnych rodzajów jednostek ładunkowych intermodalnych w przewozach intermodalnych transportem kolejowym w Polsce w roku 2024 [5]. W przypadku naczep siodłowych udział ten wynosi 2,84%, w przypadku nadwozi wymiennych jest jeszcze mniejszy.

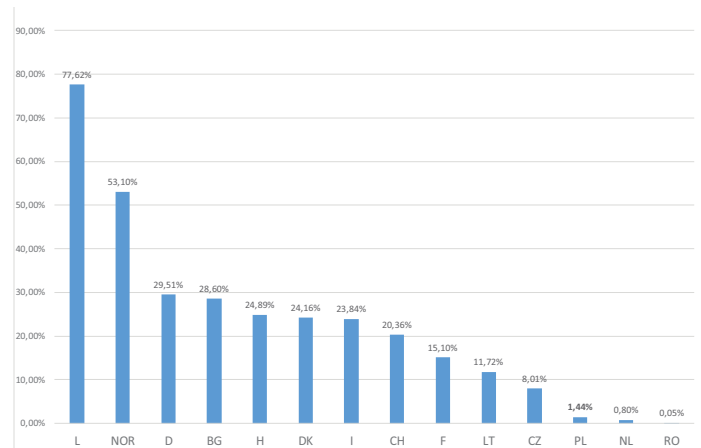
W transporcie intermodalnym w Polsce dominują kontenery. Wynika to faktu, że transport intermodalny w Polsce opiera się na obsłudze transportowej portów morskich oraz na

przewozach do i z Chin. W tego rodzaju przewozach kontener dominuje jako podstawowa jednostka ładunkowa. Znacząco mniejszy udział naczep siodłowych i nadwozi wymiennych w przewozach intermodalnych w Polsce wynika z mniejszego znaczenia transportu intermodalnego w przewozach pomiędzy Polską a innymi państwami europejskimi (nie licząc przewozów kontenerów do i z portów morskich zlokalizowanych w innych państwach, na przykład z portu Hamburg czy Rotterdam).

Dla porównania (Rysunek 4) przedstawiono udział naczep siodłowych w przewozach transportem kolejowym w Polsce oraz innych państwach europejskich w roku 2023 według danych Eurostat [1]. Z danych wynika, że Polska ma znacznie mniejszy udział niż większość państw europejskich. Na szczególnie podkreślenie zasługuje udział przewozu naczep siodłowych transportem kolejowym w Czechach (8,01%) oraz Holandii (0,80%). W przypadku Holandii tak mały udział wynika z



3. Udział poszczególnych rodzajów jednostek intermodalnych w przewozach intermodalnych transportem kolejowym w Polsce w roku 2024 [5]



4. Udział naczep siodłowych w przewozach transportem kolejowym w Polsce oraz innych państwach europejskich w roku 2023 [1]

przeładunków kontenerów w porcie Rotterdam, który jest największym portem kontenerowym w Europie.

Możliwości zwiększenie roli przewozu naczep siodłowych transportem kolejowym

Przewozy kontenerów z i do Chin (lub szerzej z Dalekiego Wschodu) są obarczone dużą niepewnością. Dlatego istotne jest poszukiwanie innych czynników wzrostu transportu intermodalnego w Polsce. Jednym z nich może być zwiększenie udziału transportu kolejowego, w tym intermodalnego, z i do państw europejskich. Według danych GUS [5], kolejowe przewozy międzynarodowe w Polsce w roku 2024 wyniosły 78 406 tys. ton, co stanowi 16,8 % wszystkich przewozów międzynarodowych. Dla porównania transportem drogowym przewieziono 341 201 tys. ton ładunków, co stanowi 73,3 % wszystkich przewozów międzynarodowych w Polsce. Większość przewozów międzynarodowych transportem drogowym odbywa się z wykorzystaniem naczep siodłowych. Dlatego też przejście części ładunków z transportu drogowego na transport kolejowy powinno odbyć się poprzez zwiększenie udziału przewozów naczep siodłowych transportem kolejowym. Obecnie naczepy siodłowe przewozi się transportem kolejowym przy wykorzystaniu wagonów kieszenio-

wych. Ten podsystem transportu intermodalnego wymaga jednak specjalnej wzmocnionej konstrukcji naczep siodłowych umożliwiającej podniesienie (przeładunek pionowy). Wzmocnienie konstrukcji naczepy zwiększa jej masę własną, a tym samym zmniejsza jej ładowność. Przeładunek na terminalu odbywa z wykorzystaniem specjalistycznego osprzętu przeładunkowego (spreadera przeładunkowego), który może być zamontowany zarówno na wozie wysięgnikowym, jak również suwnicy bramowej.

Jak wspomniano, 25 terminali intermodalnych w Polsce deklaruje możliwość przeładunku naczep siodłowych na nadwoziach wymiennych. Są to przeważnie terminale zlokalizowane w zachodniej części Polski, które dysponują większą liczbą urządzeń przeładunkowych (zarówno wozów wysięgnikowych, jak również suwnic bramowych). Terminale bazujące na pojedynczych wozach wysięgnikowych nie posiadają specjalistycznego osprzętu przeładunkowego do naczep siodłowych i nadwozi wymiennych.

Zwiększenie roli przewozu naczep siodłowych transportem kolejowym powinno być związane z rozbudową bazy przeładunkowej, w tym budowy nowych terminali intermodalnych, zwłaszcza w regionach, gdzie ich liczba jest niewystarczająca w stosunku do obecnego potencjału gospodar-

czego regionu. Ponadto, terminale te powinny być wyposażone w osprzęt umożliwiający przeładunek wszystkich dostępnych jednostek ładunkowych (kontenerów, naczep siodłowych oraz nadwozi wymiennych).

Barierą w rozwoju przewozu naczep siodłowych jest podaż naczep siodłowych przystosowanych do przeładunku pionowego. Chociaż GUS nie publikuje danych dotyczących liczby takich naczep będących w dyspozycji polskich przewoźników drogowych, to na podstawie danych dotyczących udziału naczep siodłowych w przewozach intermodalnych ogółem można stwierdzić, że dysponują oni bardzo małą liczbą takich naczep. Należy nadmienić, że naczepa siodłowa przystosowana do przeładunku pionowego charakteryzuje się umieszczonymi po obu stronach naczepy dwoma krawędziami malowanymi na charakterystyczny kolor żółty, za które podnosi się naczepę.

Istotne jest również to, że bez większej liczby dostępnych naczep siodłowych przystosowanych do przeładunku pionowego, nie można zwiększyć przewozu naczep siodłowych transportem kolejowym, nawet przy odpowiedniej liczbie terminali intermodalnych wyposażonych w odpowiedni osprzęt i zwiększenia liczby wagonów kieszeniowych.

Przewozy naczep siodłowych na wagonach kieszeniowych mają podstawową wadę – wymagają

przeładunku pionowego nacze-
pionowych przystosowanych tego
rodzaju przeładunku. Od wielu lat
pojawiają się rozwiązania technicz-
ne, nowe podsystemy transportu
intermodalnego rozwiązujące ten
problem. Nowe rozwiązania tech-
nicznie umożliwiają przeładunek
poziomy nacze-
pionowych o stan-
dardowej budowie. Przeładunek po-
ziomy stwarza też możliwości wyko-
rzystania ciągnika siodłowego jako
urządzenia do przeładunku, a tym
samym ogranicza liczbę urządzeń
przeładunkowych będących na wy-
posażeniu terminalu. Przegląd tak-
kich rozwiązań zamieszczono w [4].
Na terminalu CLIP w Swarzędzu są
zabudowane 2 stacje do rozładunku
poziomego podsystem Lohr, które
umożliwiają przeładunek 4 nacze-
jednocześnie [7].

Wiele nowych podsystemów
transportu intermodalnego jest w
fazie eksploatacji nadzorowanej,
umożliwiając przewóz nacze-
pionowych w wybranych relacjach. Jed-
nak ich udział w przewozach nacze-
pionowych transportem kolejowym
w Europie jest znikomy. Nadal domi-
nują przewozy oparte na wagonach
kieszeniowych.

Należy zastanowić się nad wprowa-
dzeniem do eksploatacji komercyjnej
nowego lub nowych podsystemów
transportu intermodalnego. Wiąże
się to z wyborem konkretnego lub
konkretnych rozwiązań technicz-
nych, które w przyszłości zastąpiły-
by podsystem oparty na wagonach
kieszeniowych i byłyby powszechnie
eksploatowane. Aby uzyskać efekt
skali należy wybrać jeden lub najwy-
żej dwa nowe podsystemy. Optyma-
lizacja wyboru powinna być oparta
na ocenie dostępnych rozwiązań
technicznych. Narzędziem do takiej
oceny może być analiza wielokryte-
rialna. W [3] przedstawiono metody-
kę oceny nowych podsystemów w
oparciu o zdefiniowane kryteria. Za-
proponowane kryteria oceniają dane

rozwiązanie techniczne w różnych
aspektach, w tym pod względem
technicznym i finansowym. Ocenio-
ne i zarekomendowane rozwiązanie
lub rozwiązania techniczne następ-
nie powinny być zweryfikowane
przez rynek usług transportowych w
przewozie ładunków. Będzie to zwią-
zane z akceptacją rozwiązań tech-
nicznych przez wszystkich uczest-
ników rynku (gestorów ładunków,
właścicieli nacze-
pionowych, prze-
woźników drogowych, spedytorów,
przewoźników kolejowych i innych).

Podsumowanie

Zwiększenie liczby terminali inter-
modalnych oraz wyposażenie ich
w osprzęt do przeładunku nacze-
pionowych jest istotne dla rozwo-
ju przewozów nacze-
pionowych transportem kolejowym oraz dla dal-
szego zwiększenia udziału transpor-
tu intermodalnego w przewozach
ładunków koleją ogółem. Będzie to
dotyczyło zwłaszcza przewozu ła-
dunków w relacji Polska – kraje eu-
ropejskie, co może być szczególnie
istotne w przypadku niepewności
wzrostu wolumenu przewozów ła-
dunków z Chin. W perspektywie dłu-
goterminowej należałoby rozważyć
dyskusję nad innymi podsystemami
przewozu nacze-
pionowych, które
w przeszłości zastąpiłyby podsystem
opartym na wagonie kieszeniowych.



Materiały źródłowe

- [1] Kruk R., Piwowar B., Ochociński K.:
Rozwój transportu intermodal-
nego w przewozach ładunków z
Polski do krajów UE z wykorzysta-
niem nacze-
pionowych, Prze-
gląd Komunikacyjny, 2025, 9-10,
str. 18-20
- [2] Brona P., Kruk R., Ochociński K.:
Przewozy nacze-
pionowych transportem kolejowym szansą
na wzrost udziału transportu in-
termodalnego w Polsce. Konfe-
rencja Rozwój przewozów inter-
modalnych istotnym czynnikiem
wzrostu gospodarczego regio-
nów InterModal 2025, Warszawa,
15-17 października 2025 r.
- [3] Kruk R., Klemba S.: Kryteria oceny
nowych podsystemów transpor-
tu intermodalnego, Monografia
pokonferencyjna XII Międzyna-
rodowa Konferencja Naukowo
– Techniczna Systemy Logistycz-
ne Teoria i Praktyka, Politechnika
Warszawa, Wydział Transportu,
2024
- [4] Poliński J.: Rola kolei w transpor-
cie intermodalnym Oficyna Wy-
dawnicza Politechniki Warszaw-
skiej, 2015 r.
- [5] Transport Wyniki Działalności
2024, Główny Urząd Statystyczny,
Warszawa, wrzesień 2025 r.
- [6] Opracowanie własne na podsta-
wie danych UTK [https://dane.utk.
gov.pl/sts/transport-intermodal-
ny](https://dane.utk.gov.pl/sts/transport-intermodalny),dostęp 20.11.2025 r.
- [7] [https://clip-group.com/intermo-
dal-container-terminal/](https://clip-group.com/intermo-
dal-container-terminal/),
dostęp 20.11.2025 r.

Dwu- i jednostronne poszerzanie nasypów kolejowych

Double- and single-sided widening of railway embankments



Michał Pawłowski

Dr inż.

Wydział Inżynierii Lądowej i
Transportu, Instytut Inżynierii
Lądowej, Politechnika Poznańska,

michal.pawlowski@put.poznan.pl
ORCID: 0000-0002-0747-1177



Adam Duda

Dr inż.

Wydział Inżynierii Lądowej i
Transportu, Instytut Inżynierii
Lądowej, Politechnika Poznańska,

adam.duda@put.poznan.pl
ORCID: 0000-0003-2782-2189

Streszczenie: Modernizacja dostosowująca linie kolejowe do możliwości poruszania się pociągów pasażerskich z prędkością 200 km/h najczęściej wymaga przebudowy podtorza. W niektórych przypadkach konieczne jest zwiększenie szerokości torowiska, co wiąże się z koniecznością poszerzenia przekopów i nasypów. Poszerzenie nasypów może być realizowane jako dwu- lub jednostronne. O trybie realizacji prac decyduje wiele czynników. W artykule dokonano oceny najważniejszych z nich. Przedstawiono uwarunkowania mające wpływ na wybór trybu poszerzenia nasypów.

Słowa kluczowe: Podtorze kolejowe; Przebudowa podtorza; Poszerzanie nasypów

Abstract: The modernization to adapt railway lines for trains traveling at a speed of 200 km/h requires the reconstruction of the subgrade. In some cases, it is necessary to increase the substructure crown width, which entails the need to excavations and embankments. The widening of embankments can be carried out as either two-sided or one-sided. Many factors determine how the work is executed. The article assesses the most important of these. The conditions influencing the choice of the embankment widening mode are presented.

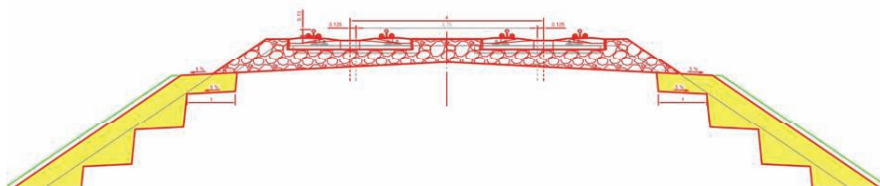
Keywords: Subgrade; Reconstruction of the subgrade; Widening of embankments

Wstęp

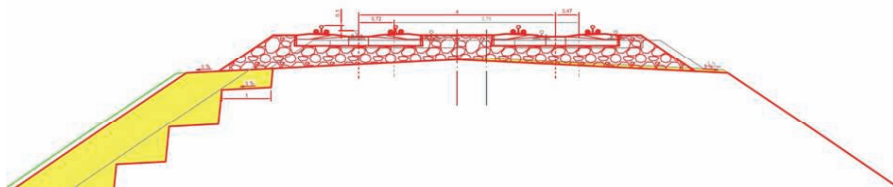
Prace modernizacyjne dwutorowych magistralnych linii kolejowych, dostosowujące je do możliwości poruszania się pociągów towarowych z prędkością 120 km/h i pasażerskich z prędkością 200 km/h, wykonywane są najczęściej w dwóch etapach. W pierwszym etapie do docelowych wartości nacisków osiowych oraz prędkości 200 km/h dostosowywane są: nawierzchnia, układ geometryczny torów i podtorze, obiekty inżynierskie oraz konstrukcje wsporcze sieci trakcyjnej. Po zakończeniu tych prac ruch pociągów towarowych może odbywać się z docelową prędkością 120 km/h, a pasażerskich z prędkością nieprzekraczającą 160 km/h. Zwiększenie prędkości jazdy pociągów pasażerskich do 200 km/h jest możliwe

po wykonaniu prac, przewidzianych w drugim etapie przebudowy, polegających na likwidacji przejazdów w poziomie szyn i wyposażeniu linii w adekwatne urządzenia sterowania ruchem kolejowym. Takie podejście, już w czasie realizacji prac etapu pierwszego, wymaga zastosowania rozstawu torów nie mniejszego niż 4,00 [6] oraz dostosowania istniejącego podtorza do nowych warunków pracy. Przystosowanie podtorza, do możliwości poruszania się ciężkich pociągów towarowych oraz pociągów pasażerskich z prędkością 200 km/h, zazwyczaj wymaga jego przebudowy. Przebudowa ta powinna obejmować, nie tylko wzmocnienie górnej strefy podtorza bezpośrednio współpracującej z nawierzchnią w przenoszeniu obciążeń od przejeżdżających pociągów, ale również

zwiększenie wytrzymałości i nośności, poprawę warunków stateczności i odwodnienia podtorza. Działania te mogą prowadzić do konieczności zmiany kształtu i wymiarów podtorza. Zmiany te mogą wynikać również z niezbędnych korekt położenia osi torów w planie i w profilu, konieczności zapewnienia niezbędnych szerokości torowiska i jego ław [5, 6]. Na zakres robót podtorzowych mogą mieć również wpływ zmiany liczby i rozstawu torów, czy też zmiana standardu konstrukcyjnego nawierzchni [4]. W zależności od warunków miejscowych i zakresu niezbędnych zmian w układzie geometrycznym torów przebudowa podtorza może obejmować poszerzanie przekopów i nasypów oraz poprawę warunków odwodnienia [7].



1. Dwustronne, nieznaczne poszerzenie nasypu. Żółtą powierzchnią oznaczono zakres dodatkowych robót ziemnych w obrębie podtorza. Opracowanie własne na podstawie [3-5]



2. Jednostronne, nieznaczne poszerzenie nasypu. Żółtą powierzchnią oznaczono zakres dodatkowych robót ziemnych w obrębie podtorza. Opracowanie własne na podstawie [3-5]

Poszerzanie nasypów w procesie modernizacji linii kolejowych

Z rozważań dotyczących poszerzania nasypów wykluczono przypadki przebudowy podtorza związane ze znacznymi przesunięciami osi torów w planie powodującymi konieczność budowy nasypów w nowym śladzie.

Projektowa wartość poszerzenia nasypów, w procesie modernizacji linii kolejowych, mieści się w granicach od kilkunastu centymetrów do kilku metrów i zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to:

- parametry drogi kolejowej w stanie istniejącym: szerokość torowiska i jego ław, wartość pochylenia skarp, rodzaj i standard konstrukcyjny nawierzchni, rozstaw i liczba torów itp.,
- projektowane zmiany poziomego i pionowego położenia osi torów wynikające z dostosowywania układu geometrycznego torów do możliwości poruszania się pociągów z większymi prędkościami obejmujące korekty wartości promieni łuków poziomych i przechyłki, wydłużanie krzywych przejściowych, zmiany wartości i długości pochyłeń podłużnych, zwiększanie wartości promieni łuków pionowych itp.
- zmiana liczby torów,
- zwiększenie rozstawu torów

związane z koniecznością zachowania wymogów skrajni przy większych prędkościach [6],

- modernizacja nawierzchni obejmującą zmianę jej standardu konstrukcyjnego [4],
- konieczność zwiększenia szerokości ław torowiska ze względu na minimalne wymagania [5] lub potrzebę lokalizacji na nich dodatkowego wyposażenia,
- korekta kształtu nasypów ze względu na warunki ich stateczności.

Prawidłowo wykonane poszerzenie nasypów powinno gwarantować właściwe połączenie ich części istniejących i dobudowywanych. Można to osiągnąć poprzez:

- stosowne przygotowanie istniejących skarp, które polega na wykonaniu na nich stopni o szerokości około 1,0 m i pochyleniu 5 %. Wysokość stopni zależy od grubości wbudowywanych warstw i możliwości wykorzystywanego sprzętu zagęszczającego [1, 5, 7],
- użycie do budowy nowych części nasypów gruntów niespoistych. Przy zastosowaniu gruntów spoistych, trzeba przeciwdziałać możliwości tworzenia się zastoisk wód opadowych w korpusie nasypów [5, 7],
- każdorazowe zagęszczanie wbu-

dowywanych warstw gruntów do uzyskania wymaganych wartości wskaźnika zagęszczenia [5, 7].

Dwu- i jednostronne nieznaczne poszerzanie nasypów

Poszerzanie nasypów może być realizowane jako dwu- (rys. 1) lub jednostronne (rys. 2). W przypadku potrzeby znacznego zwiększenia szerokości torowiska (dobudowa kolejnego toru, istotna zmiana położenia osi torów w planie) lub występowania ograniczeń terenowych bądź infrastrukturalnych po jednej ze stron tryb realizacji poszerzania nasypów jest zdefiniowany do jednostronnego. Przy nieznacznym poszerzaniu nasypów zdefiniowanym jako obejmujące do 15 % pierwotnej szerokości torowiska (korony nasypu) [3] tryb realizacji poszerzenia, przy braku występowania jednostronnych ograniczeń, może być dowolny i leży w gestii projektanta. Z analizy dokumentacji projektowych dotyczących modernizacji różnych linii kolejowych wynika, że najczęściej nieznaczne poszerzanie nasypów projektowane jest jako dwustronne (rys. 1). Słuszność takiego podejścia została zweryfikowana poprzez analizę kilku czynników mających wpływ na wybór trybu nieznacznego poszerzania nasypów, do których zaliczono: właściwości istniejących nasypów (wymiary i kształt nasypów oraz ich skarp, rodzaje i właściwości gruntów nasypów), ukształtowanie i dostępność terenu, uwarunkowania projektowe oraz uwarunkowania realizacyjne.

Właściwości istniejących nasypów

Nasypy podlegające przebudowie, wznoszone według historycznych zasad i metod budowy linii kolejowych, mogą zawierać w swym korpusie grunty niespełniające współcześnie obowiązujących wymagań

[5]. Grunty te mogą mieć zróżnicowane właściwości (różny skład granulometryczny, stan zagęszczenia, wrażliwość na zmiany wilgotności). Z uwagi na niejednorodną budowę nasypów, obciążenia eksploatacyjne, od wieloletniego ruchu pociągów, mogły prowadzić do nierównomiernych deformacji ich korpusu. Równocześnie, w zależności od warunków gruntowo-wodnych, osiadaniom mogły podlegać całe nasypy, zwłaszcza na skutek konsolidacji gruntów słabonośnych występujących w ich podłożu. Wartości osiadań wynikających z konsolidacji słabego podłoża uzależnione były od jego miąższości i wysokości nasypów. Deformacje i osiadania nasypów miały wpływ na występowanie nierówności pionowych i poziomych torów, a te najczęściej niwelowane były poprzez regulację położenia torów w procesie podbijania połączonym z uzupełnianiem podsypki. Takie działanie powodowało zwiększenie grubości podsypki i obciążenia podtorza; intensyfikowało deformacje nasypów i ich osiadanie w wyniku dalszej konsolidacji słabego podłoża; intensyfikowało osiadania torów i wymuszało kolejne ich podbicia; przyczyniało się do rozwoju innych wad podtorza [5, 7].

Opisane procesy powodowały zmiany kształtu korpusu i skarp nasypów, mogły także oddziaływać na poziom przyległego do nasypów terenu, który deformował się wraz z konsolidującym podłożem. W efekcie, ze względu na konieczność zachowania wymaganej niwelety torów, procesy ich podbijania i konsolidacji podłoża mogły prowadzić do zwiększenia wysokości nasypów. Na wartości pochylenia skarp nasypów mogło mieć wpływ odkładanie na nie wysiewek z procesu oczyszczania podsypki.

Istniejący i wymagany kształt nasypów ma wpływ na wartość wymaganego ich poszerzenia, a istniejące i docelowo wymagane właściwości

gruntów budujących ich korpus, mogą wpłynąć na wybór technologii przebudowy. Jeżeli wymagania dla zmodernizowanego podtorza [5] nie są spełnione konieczne jest wzmocnienie nasypów np. poprzez częściową lub nawet całkowitą ich przebudowę. Przebudowa nasypów, ze względu na warunki ich stateczności, może obejmować również konieczność wzmocnienia ich podłoża. Tym procesom może i często towarzyszy dwu- lub jednostronne poszerzanie nasypów.

Dwustronne poszerzanie nasypów daje możliwość usunięcia efektów wieloletniej eksploatacji w obrębie obu skarp poprzez stosowaną korektę ich pochylenia. Takie działanie narusza jednak pierwotną stateczność skarp i występujące na nich umocnienia np. dobrze rozwiniętą i uкорzenioną roślinność. Jednostronne poszerzanie nasypów ogranicza ingerencję budowlaną tylko do jednej ich strony i jednej ze skarp.

Morfologia i dostępność terenu

Ukształtowanie terenu, występujące ograniczenia terenowe i infrastrukturalne, w tym szerokość pasa wywłaszczenia mogą mieć decydujący wpływ o wyborze trybu realizacji poszerzania nasypów. W przypadku ograniczeń terenowych (np. jezioro, bagno) lub infrastrukturalnych występujących z jednej strony przebudowywanych nasypów, proces ich poszerzania musi być realizowany w trybie jednostronnym, nawet jeśli jest to mniej korzystne z uwagi na inne uwarunkowania. Decydujący wpływ na tryb realizacji poszerzania mogą mieć ograniczenia w możliwości zajęcia przyległego terenu, co ma bezpośredni związek z szerokością pasa wywłaszczenia i położeniem osi nasypów względem niego. W tym przypadku sposób realizacji może być z góry narzucony lub poszerzanie nasypów, ze względu na ograniczoną przestrzeń może wymagać za-

stosowania dodatkowych rozwiązań lub konstrukcji np. oporowych.

Uwarunkowania projektowe

Poszerzanie nasypów, w procesie modernizacji linii kolejowych należy odpowiednio zaprojektować. Podczas projektowania należy wziąć pod uwagę: czynniki mające wpływ na konieczność poszerzania nasypów i ich wpływ na zmianę poziomego i pionowego położenia osi torów; ograniczenia infrastrukturalne i terenowe; dostępność terenu, również wynikającą z szerokości pasa wywłaszczenia; sposób i tryb realizacji prac oraz występujące w ich czasie uwarunkowania i ograniczenia. Działania projektowe powinny być poprzedzone badaniami geotechnicznymi mającymi na celu rozpoznanie budowy geotechnicznej nasypów i ich podłoża. Analiza budowy geotechnicznej nasypów i ich podłoża, nowych warunków ich pracy wynikających z planowanego ruchu szybszych i cięższych pociągów oraz założeń projektowych związanych z planowaną korektą kształtu budowli ziemnych powinna prowadzić do przyjęcia prawidłowego rozwiązania projektowego zapewniającego stateczność nasypów oraz ich skarp w czasie i po zakończeniu realizacji robót.

W przypadkach przebudowy podtorza na prostych i łukach nie wymagających korekty położenia osi torów (ze względu na dostosowanie układu geometrycznego torów do możliwości poruszania się szybszych pociągów) dwustronny tryb poszerzania nasypów wiąże się z mniejszymi wartościami niezbędnych przesunięć osi torów, w stosunku do ich pierwotnego położenia (rys. 1 i 2). Przekłada się to na większą prostotę projektowania układu geometrycznego torów, w tym trybie, a sprowadza się najczęściej jedynie do korekty pionowego położenia torów. Dwustronne poszerzanie nasypów zwią-

Tab. 1. Uwarunkowania trybów poszerzania nasypów [opracowanie własne]

Czynnik	Uwarunkowanie	Poszerzanie nasypów	
		dwustronne	jednostronne
Właściwości istniejących nasypów	Przebudowa skarp	2 skarpy	1 skarpa
	Naruszenie istniejącego umocnienia skarp	2 skarpy	1 skarpa
Morfologia i dostępność terenu	Ograniczenia terenowe	wymaga dostępności terenu po obu stronach nasypów	możliwość wykonania przy jednostronnych ograniczeniach terenowych
Uwarunkowania projektowe	Wpływ na położenie osi torów	oś nasypu najczęściej pozostaje bez zmian, brak konieczności korekty poziomego położenia osi torów	prowadzi do przesunięcia osi nasypów, wymagana jednostronna korekta poziomego położenia osi torów
	Obciążenie podłoża	równomierne, symetryczne	nierównomierne, asymetryczne
	Konieczność stosowania niestandardowych rozwiązań dla zapewnienia stateczności	ograniczona	potencjalna
	Wpływ na istniejące ciągi odwodnieniowe	potrzeba obustronnej korekty	konieczność jednostronnej przebudowy
Uwarunkowania realizacyjne	Dostarczanie materiałów transportem kolejowym	po torze istniejącym lub nowym	po torze istniejącym
	Łatwość koordynacji robót	tak	nie
	Drogi tymczasowe	obustronne	jednostronne
	Roboty tracone	znaczne nakłady	minimalne nakłady

zane jest z mniejszą i symetryczną korektą położenia każdej z ich skarp. To zapewnia symetryczne obciążenie podłoża, mniejsze wartości dodatkowego jego obciążenia, w większości przypadków nie ma negatywnego wpływu na stateczność podtorza i nie powoduje konieczności stosowania niestandardowych rozwiązań dla jego zachowania. Dwustronne poszerzanie nasypów nie zmienia położenia ich osi, co ma szczególnie znaczenie w przypadku występowania wąskiego pasa wyłączenia. W tym trybie poszerzania nasypów konieczna jest obustronna przebudowa i zmiana położenia ciągów odwodnieniowych (jeżeli występują).

Uwarunkowania realizacyjne

Do najważniejszych uwarunkowań realizacyjnych mających wpływ na wybór trybu poszerzania nasypów należą: organizacja ruchu pociągów, koordynacja robót, dostępność placów ładunkowych i dróg dojazdowych, zakres i objętości robót ziemnych, w tym również robót traconych. Utrzymanie jednotorowego ruchu pociągów w czasie przebudowy podtorza dwutorowej linii daje możliwość do-

starczenia potrzebnych materiałów transportem kolejowym i dogodną realizację dwustronnego poszerzania nasypów. Jednak ze względu na uwarunkowania jednotorowego ruchu pociągów dostępność czynnego toru może być znacznie ograniczona najczęściej do krótkich przerw między pociągami np. w porze nocnej [2]. W trybie jednostronnego poszerzania nasypów dostarczanie materiałów transportem kolejowym musi być realizowane po torze istniejącym, przed jego przebudową. Poszerzanie dwustronne łatwiej niż jednostronne jest skoordynować z realizacją innych prac, co wynika m.in. z nieznacznych, w tym trybie, przesunięć osi torów w stosunku do ich pierwotnego położenia. Zasadniczo poszerzanie nasypów powinno być wykonane przed przebudową torów. Realizacja robót wymaga dostępności do placów ładunkowych i organizacji tymczasowych dróg dojazdowych. Jednostronnie występujące ograniczenia w dostępności przyległego terenu mogą wymuszać tryb realizacji robót związanych z poszerzaniem nasypów. W celu spełnienia tolerancji pomiarowych dotyczących szerokości torowiska oraz pochylenia skarp

[5] roboty związane z poszerzaniem nasypów wykonuje się z pewnym nadładkiem umożliwiającym po ostatecznym oprofilowaniu skarp i zebraniu części nadładku uzyskanie projektowych wymiarów i kształtu nasypów. W związku z tym jednostronne poszerzanie charakteryzuje się mniejszym nakładem robót traconych, które są niezbędne również ze względu na schodkowanie istniejących skarp.

Dwu- i jednostronne nieznaczne poszerzanie nasypów

Czynniki mające wpływ na wybór trybu poszerzenia nasypów są mocno zróżnicowane i o różnym znaczeniu. Z tego powodu nie można jednoznacznie wskazać, który z trybów poszerzania nasypów jest korzystniejszy. Każdy z nich ma specyficzne uwarunkowania stosowania i ograniczenia. Zbiór podstawowych uwarunkowań sposobów poszerzania nasypów znajduje się w tabeli 1. W tabeli oznaczono czynniki preferujące dany tryb poszerzenia.

Analizowane uwarunkowania projektowe wskazują na przewagę dwustronnego trybu poszerzania nasypów, co potwierdza powszechność stosowania tego rozwiązania przez projektantów. Pozostałe analizowane uwarunkowania (właściwości istniejących nasypów, ukształtowanie i dostępność terenu, uwarunkowania realizacyjne) wskazują na przewagę jednostronnego trybu poszerzania nasypów, który powinien być podstawowym w specyficznych warunkach. Ostateczny wybór trybu realizacji poszerzania nasypów powinien być poparty analizą, co najmniej omawianych w tekście, czynników oraz kosztów realizacji zadania i nie powinien sprowadzać się do wyboru rozwiązania łatwiejszego do zaprojektowania. Wraz z powszechnym wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania komputerowego umożliwiającego automatyzację pro-

cesu projektowania (np. CAD, GIS, BIM itp.) weryfikacja generowanej dokumentacji nabiera znacznie większego znaczenia.

Dwustronne, nieznaczne poszerzanie nasypów:

- ze względu na równomierne i symetryczne obciążenie podłoża i istniejących nasypów zapewnia warunki stateczności przebudowanego podtorza, które w większości przypadków nie wymagają stosowania niestandardowych rozwiązań,
- jest korzystne, gdy nie następuje zmiana położenia osi torów w planie oraz nie występują jednostronne ograniczenia terenowe lub infrastrukturalne,
- jest preferowane przy wąskim i symetrycznym, względem osi nasypu, pasie wywłaszczenia,
- łatwo skoordynować z realizacją innych prac modernizacyjnych,
- umożliwia korektę kształtu i pochylenia obu skarp nasypu,
- wymaga wykonania robót ziemnych w obrębie obu skarp, co przy braku konieczności korekty pochylenia skarp narusza ich pierwotną stateczność zapewnianą np. dobrze rozwiniętą i ukorzenioną roślinność,
- wiąże się z potrzebą wykonania robót ziemnych o większej objętości (roboty tracone),
- powoduje konieczność dwustronnej przebudowy ciągów odwodnieniowych (jeżeli występują).

Jednostronne, nieznaczne poszerzanie nasypów:

- ma wyraźny wpływ na zmianę położenia osi nasypów i torów,
- wymaga odpowiedniego skoordynowania robót modernizacyjnych,
- jest możliwe do wykonania, gdy występują ograniczenia terenowe lub infrastrukturalne po jednej ze stron przebudowywanego nasypu,

- jest preferowane przy niesymetrycznym położeniu osi nasypu względem pasa wywłaszczenia,
- charakteryzuje się mniejszą objętością robót (roboty tracone),
- obejmuje przebudowę tylko jednej ze skarp i jednego z ciągów odwodnieniowych.

Wnioski

Na podstawie przedstawionej analizy dwu- i jednostronnego poszerzenia nasypów można sformułować następujące wnioski:

- Ze względu na zróżnicowane uwarunkowania techniczne i terenowe nie można jednoznacznie wskazać, który z trybów poszerzania nasypów jest korzystniejszy.
- Poszerzanie dwustronne, ze względu na równomierne i symetryczne obciążenie podłoża i istniejących nasypów zapewnia warunki stateczności przebudowanego podtorza, które w większości przypadków nie wymagają stosowania niestandardowych rozwiązań. Jest preferowane ze względu na uwarunkowania projektowe.
- Poszerzenie jednostronne jest preferowane gdy występują ograniczenia terenowe i infrastrukturalne uniemożliwiające dwustronną realizację prac. Charakteryzuje się mniejszym nakładem robót traconych.
- Ostateczny wybór trybu realizacji poszerzania nasypów powinien być poparty analizą wielu czynników oraz kosztów realizacji zadania i nie powinien sprowadzać się do wyboru rozwiązania łatwiejszego do zaprojektowania. Automatyzacja procesu projektowania poprzez wykorzystanie specjalistycznego oprogramowania komputerowego sprawia, że weryfikacja generowanej dokumentacji nabiera znacznie większego znaczenia. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Cyunel B., Kulczycki B.: Kolejowe budowlę ziemne. Tom II. Technologia, organizacja budowy i modernizacji. WKiŁ, Warszawa 1987.
- [2] Pawłowski M., Protosawicki K., Straszewski W.: Wpływ sposobu ograniczenia ruchu pociągów na czas realizacji robót podtorzowych. Przegląd Komunikacyjny 10/2018, s. 25-29.
- [3] Pawłowski M.: Nieznaczne poszerzanie torowiska. W: Nowoczesne Technologie i Systemy Zarządzania w Transporcie Szynowym NOVOKOL 2025, materiały konferencyjne - Kraków, Polska, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej. Oddział w Krakowie, Kraków 2025, s. 75-82.
- [4] Pawłowski M.: Wybrane podtorzowe aspekty wymiany nawierzchni kolejowej. W: Nowoczesne Technologie i Systemy Zarządzania w Transporcie Szynowym NOVOKOL 2024, materiały konferencyjne - Kraków, Polska, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej. Oddział w Krakowie, Kraków 2024, s. 151-162.
- [5] PKP PLK S.A.: Id-3. Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. Warszawa 2009.
- [6] PKP PLK S.A.: Standardy techniczne. Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 250$ km/h. Tom II. Skrajnia budowlana linii kolejowych. Warszawa 2025.
- [7] Skrzyński E.: Podtorze kolejowe. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 2010.

Statyczna analiza braku kontaktu bezстыkowego toru kolejowego z podłożem podsypkowym

Static analysis of the contact loss between the continuously welded rail track and its ballasted foundation



Włodzimierz Bednarek

Dr hab. inż

Politechnika Poznańska, Wydział
Inżynierii Lądowej i Transportu, Instytut
Inżynierii Lądowej

wlodzimierz.bednarek@put.poznan.pl
ORCID: 0000-0002-3693-9621

Streszczenie: W pracy analizie poddano zjawisko braku kontaktu toru kolejowego z podsypką tłuczniową. Na podstawie przeprowadzonych badań w rzeczywistym torze kolejowym (brak podparcia na krótkiej długości równej dwukrotnemu rozstawowi podkładów), wykonano identyfikację parametrów toru i podłoża do obliczeń ugięć i naprężeń w szynie. Opisano metodę identyfikacji parametrów jednoparametrowego i dwuparametrowego podłoża szynowego. W tym celu wykorzystano przeprowadzone zarówno własne badania jak i badania z cytowanych publikacji. Zamieszczono wykresy umożliwiające wykonanie obliczeń teoretycznych dla innych przyjmowanych parametrów (np. siła działająca z koła pojazdu na szynę czy model podłoża stanowiący podparcie toru kolejowego). Wykonane w pracy analizy (w postaci tabel i wykresów), wskazują, że brak kontaktu (nawet na bardzo krótkiej długości), istotnie i niekorzystnie wpływa na zmiany ugięć czy naprężeń w torze kolejowym. Zawarty w pracy tok postępowania można traktować jako algorytm teoretycznych obliczeń i analiz dla krótkiej długości braku kontaktu toru ze współpracującym podłożem.

Słowa kluczowe: Nierówność toru kolejowego; Podkład wiszący; Podkład niepodparty; Ugięcie toru

Abstract: In the paper, a phenomenon of contact loss between a railway track and the ballast is analyzed. Based on tests carried out on a real railway track (no support over a short length equal to twice the sleeper spacing), track and foundation parameters were identified for the calculation of deflections and stresses in the rail. A method for identifying parameters for one-parameter and two-parameter foundation was described. This was achieved using our own research and relevant studies from cited publications. Figures were provided to enable theoretical calculations for other assumed parameters (e.g., the force acting from the vehicle wheel on the rail or the model of the substructure supporting the railway track). The analyses presented in the paper (in the form of tables and figures) indicate that contact loss (even over a very short length) significantly and unfavorably affects changes in deflections and stresses in the railway track. The procedure presented in the paper can be considered as an algorithm for theoretical calculations and analyses for short lengths of contact loss between the track and the interacting foundation.

Keywords: Unevenness of the railway track; Hanging sleeper; Unsupported sleeper; Track deflection

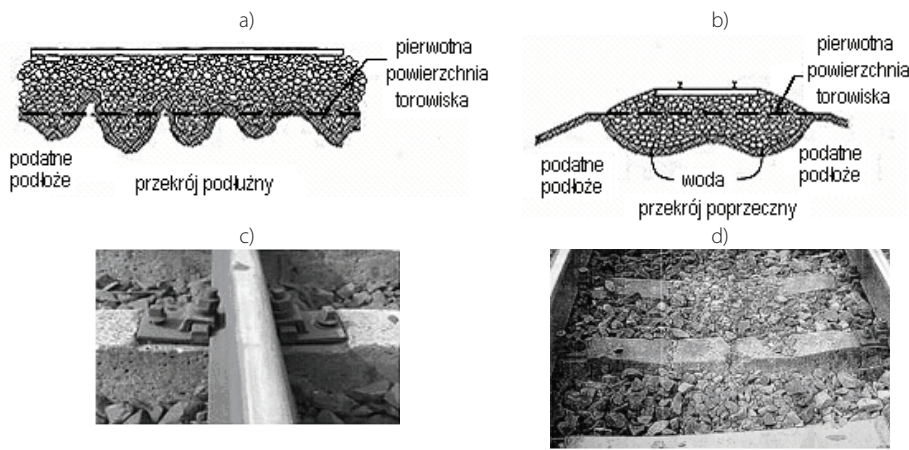
1. Wprowadzenie

Głównym zadaniem toru kolejowego jest bezpieczne przenoszenie sił z szyn na podkład, podsypkę i podtorze kolejowe. Przemieszczeniom szyn i podkładów kolejowych pod działaniem sił podłużnych i poziomych przeciwdziałają opór podsypki oraz tarcie powstające między podsypką a spodem podkładów. Jednocześnie obciążenia pionowe przenoszone z szyny na podkład wywołują reakcję podłoża podsypkowego. Powstające kolejne nierówności w eksploatac-

nym bezстыkowym torze znacząco zmieniają warunki pracy współpracujących elementów toru [1,2,3]. Głównym źródłem deformacji toru jest zmienne podparcie toru na jego długości (np. nierównomierne osiadanie podsypki [4,5,6] lub słabe podtorze). Czynniki te mogą generować całkowitą utratę kontaktu między podkładem a podsypką kolejową (rysunek 1). Stąd w celu utrzymania szyny na podkładach w jednej płaszczyźnie, należy zapewnić regularny i prawidłowy proces podbicia podkładów. Ponadto powstające różnego rodzaju

ju niedoskonałości, zmiany stanu i zużycia poszczególnych elementów (rysunek 1c) oraz naturalne starzenie się elementów znacząco zaburzają warunki pracy całej nawierzchni torowej, prowadząc do obniżenia trwałości eksploatacyjnej. Powstające niedoskonałości (np. wiszące podkłady) oraz wpływ taboru kolejowego (np. imperfekcje na kole pojazdu) są typowym źródłem dodatkowych oddziaływań pojazdów na tor kolejowy (rysunek 1).

Na rysunku 1c i 1d wyraźnie widać typowy ciąg przyczynowo-skutko-



1. Przykłady powstających imperfekcji w nawierzchni torów kolejowych [6,7]

a) koryta podsypkowe (przekrój podłużny) [6]; b) niecki podsypkowe (przekrój poprzeczny) [6]
c) uszkodzenie na powierzchni szyny [7]; d) nieprawidłowe podparcie podkładu w torze [7]

wy przyspieszonej degradacji nawierzchni kolejowej [8] (uszkodzenie szyny powoduje degradację przytwierdzenia i powstające rysy w części podszynowej i środkowej podkładu).

Niejednorodne osiadanie tłucznia powoduje utratę kontaktu między spodem podkładu a tłucznem (powodując „niepodparty podkład” zawieszony pod współpracującą szyną) [7,9]. Stosowane warstwy ziarniste (np. tłuczeń kolejowy i warstwy ochronne) są wrażliwe na dalsze postępujące odkształcenia spowodowane siłami działającymi od pociągów (powodując sukcesywne pogorszenie geometrii toru kolejowego). Podczas dalszej eksploatacji toru kolejowego podkłady stają się coraz bardziej niepodparte lub wiszące [10] (według [11] liczba wiszących podkładów w torze może sięgać nawet 50% wszystkich podkładów). Dodatkowo strefy strat stykowych powodują nierównomierny rozkład nacisku podsypki kolejowej pomiędzy obszarem pustym a w pełni podpartymi obszarami przyległymi [12]. W artykule [12] (na podstawie analiz mechanizmu dynamicznego oddziaływania podkładu na podsypkę w strefie strat stykowych i pomiarze ugięć szyn) stwierdzono, że występują znaczne przyspieszenia uderzenia w tym obszarze nawet dla lekkich, powolnych pojazdów. Zastosowany model (prosty model numeryczny trójbelkowy) pokazuje, że przyspie-

szenia podkładów są ponad 3-krotnie większe niż odpowiadające im przyspieszenia kół. Przeprowadzona analiza obciążenia quasi-statycznego podsypki [12] wykazała ponad dwukrotny wzrost obciążenia podsypki w obszarach sąsiednich (w przypadku utraty kontaktu na długim odcinku) oraz niemal całkowite odciążenie quasi-statyczne w przypadku utraty kontaktu na krótkim odcinku. Do analizy wpływu niepodpartych podkładów na zachowanie dynamiczne toru stosowany jest ulepszony trójwymiarowy model numeryczny toru kolejowego [13]. W takich badaniach pod uwagę brane są następujące parametry: szczelina między podkładem a tłucznem, prędkość pojazdu i liczba podkładów niepodpartych. Stwierdzono, że uwzględnienie sił ściskających podkłady, geometrii podkładów i rzeczywistego założenia dotyczącego kontaktu podkład-tłuczeń znacząco poprawia precyzję wyników z modeli teoretycznych. W artykule [10] przeprowadzono eksperymenty na modelach torów na podsypce w skali 1/5 w celu analizy połączonych efektów podkładów podpartych i niepodpartych. Przeprowadzone testy wyciągania wykazały, że podkłady niepodparte zmniejszają boczny opór tłucznia. Takie analizy, biorąc pod uwagę łączne efekty podparcia podkładów na opór tłucznia, są szczególnie ważne w przypadku rozważań dotyczących wybożenia toru.

W artykule [14] rozpatrywano wpływ podkładów niepodpartych na obciążenie normalne koła/szyny za pomocą symulacji numerycznej. Badania numeryczne wykazały, że szczeliny między podkładami niepodpartymi a tłucznem mają istotny wpływ na obciążenie normalne koła i szyny [7]. Ponadto wyższa prędkość i większy rozmiar szczeliny generują wyższe częstotliwości rezonansowe toru. Wpływ podkładu niepodpartego na charakterystyki nośności pionowej tłucznia kolejowego [15] analizowano za pomocą trójwymiarowego modelu DEM (Discrete Element Method – metoda elementów dyskretnych) [15]. Podczas badań obserwowano zjawisko usuwania cząstek tłucznia stykających się ze spodem podkładu. Uzyskane wyniki wykazały, że zjawisko podkładu niepodpartego znacznie zmniejsza strefę nośności tłucznia poniżej współpracującego podkładu, a także zmniejsza liczbę cząstek tłucznia stykających się. W pracy [16] przedstawiono autorską metodę szacowania sztywności pionowej toru na podstawie zmierzonych pionowych ugięć toru (wynikających z różnych ugięć podkładów o różnym podparciu) pod wpływem statycznego ruchu pojazdu kolejowego wzdłuż rozpatrywanego toru. Pomiary ugięć przeprowadzono na eksploatowanym odcinku toru kolejowego przy przyłożonych statycznych naciskach osi wagonu (100 [kN/oś], 150 [kN/oś] i 200 [kN/oś]). Na podstawie uzyskanych ugięć oszacowano zmiany sztywności pionowej toru (ze średnią wartością: 34,98 [kN/mm] dla 100 [kN/oś], 43,03 [kN/mm] dla 150 [kN/oś] i 49,96 [kN/mm] dla 200 [kN/oś]). Głównym wnioskiem z pracy [16] jest to, że reakcja toru zmienia się pod wpływem różnych nacisków osi. Niepodparte podkłady i tory kolejowe powodują nierównomierne osiadanie nawierzchni kolejowej (postępująca degradacja układu geometrycznego toru), co dodatkowo obniża komfort pasażerów, bezpieczeństwo i zwiększa koszty utrzymania.

W kolejnych punktach artykułu autor przedstawia wyniki uzyskane podczas badań terenowych oraz analizę z wykorzystaniem przeprowadzonych badań terenowych (symulujących zjawisko utraty kontaktu między torem a podkładem z tłuczniem).

2. Identyfikacja parametrów podłoża

2.1. Identyfikacja parametrów podłoża jednoparametrowego

Reakcja toru kolejowego na zróżnicowane ugięcie podkładów wywołane działającymi pionowymi obciążeniami osi jest określana jednym parametrem – sztywnością pionową toru k [kN/mm] lub parametrem U [MPa]. W pracy [16] przedstawiono metodę szacowania sztywności pionowej toru na podstawie zmierzonych pionowych ugięć eksploatowanego toru podczas statycznego ruchu pojazdu kolejowego po rozpatrywanym torze (przy różnych naciskach na oś pojazdu).

Pomiary ugięć [16] wykonano na eksploatowanym odcinku toru kolejowego przy zadanych statycznych naciskach osi wagonu (100 [kN/oś], 150 [kN/oś] i 200 [kN/oś]). Na podstawie uzyskanych ugięć określono zmiany sztywności pionowej toru (średnio: 34,98 [kN/mm] dla 100 [kN/oś], 43,03 [kN/mm] dla 150 [kN/oś] i 49,96 [kN/mm] dla 200 [kN/oś]). Wykorzystując te wartości sformułowano zależność $k(Q)$. Zależność przyłożonej siły i uzyskiwanych ugięć toru wykorzystano do sformułowania wzoru $U(Q)$ (na podstawie ugięć belki (toru) spoczywającej na podłożu jednoparametrowym [7]). Otrzymane zależności parametrów k [kN/mm] i U [MPa] opisano następującymi wzorami:

$$k(Q) = 1,6312 \cdot Q^{0,6174} + 6,9785 \text{ [kN/mm]} \quad (2.1)$$

$$U(Q) = 0,3126 \cdot Q^{0,8216} + 6,5805 \text{ [MPa]} \quad (2.2)$$

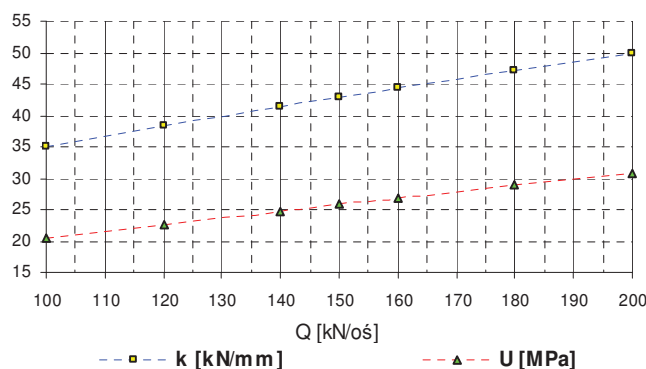
gdzie:

Tab. 1. Zmierzone ugięcia szyny podczas badań terenowych

siły działające od kolejnych osi lokomotywy SM-42 (ugięcie szyny w przekroju nr 2 (rysunek 4a))				
nierówność w torze	$z_1^s(f_0) = 0,8003 \cdot (f_0)^{0,2407} + 2,1288$ - 1 oś	$z_2^s(f_0) = 0,8888 \cdot (f_0)^{0,2669} + 2,1549$ - 2 oś	$z_3^s(f_0) = 0,8822 \cdot (f_0)^{0,3546} + 1,9148$ - 3 oś	$z_4^s(f_0) = 0,9821 \cdot (f_0)^{0,3381} + 1,9594$ - 4 oś
f_0 [mm]	ugięcie szyny w przekroju nr 2 oś nr 1 $z_1^s(f_0)$ [mm]	ugięcie szyny w przekroju nr 2 oś nr 2 $z_2^s(f_0)$ [mm]	ugięcie szyny w przekroju nr 2 oś nr 3 $z_3^s(f_0)$ [mm]	ugięcie szyny w przekroju nr 2 oś nr 4 $z_4^s(f_0)$ [mm]
1	2	3	4	5
0	2,129	2,155	1,915	1,959
1	2,929	3,044	2,797	2,941
2	3,074	3,224	3,043	3,201
3	3,171	3,347	3,217	3,383

Tab. 2. Zmierzone naprężenia w stopce szyny podczas badań terenowych

siły działające od kolejnych osi lokomotywy SM-42 (ugięcie szyny w przekroju nr 2 (rysunek 4a))				
nierówność w torze	$\sigma_1^s(f_0) = 55,836 \cdot e^{0,0076+0,2946 \cdot f_0 - 0,07083 \cdot f_0^2}$ - 1 oś	$\sigma_2^s(f_0) = 58,2589 \cdot e^{0,0037+0,2683 \cdot f_0 - 0,06096 \cdot f_0^2}$ - 2 oś	$\sigma_3^s(f_0) = 60,771 \cdot e^{0,0143+0,1962 \cdot f_0 - 0,0444 \cdot f_0^2}$ - 3 oś	$\sigma_4^s(f_0) = 60,424 \cdot e^{0,01108+0,2326 \cdot f_0 - 0,0537 \cdot f_0^2}$ - 4 oś
f_0 [mm]	naprężenie w stopce szyny [MPa] oś nr 1	naprężenie w stopce szyny [MPa] oś nr 2	naprężenie w stopce szyny [MPa] oś nr 3	naprężenie w stopce szyny [MPa] oś nr 4
1	2	3	4	5
0	56,259	58,474	60,857	61,094
1	70,369	71,948	70,835	73,066
2	76,394	78,366	75,445	78,483
3	71,981	75,558	73,531	75,714



2. Podłoże jednoparametrowe – otrzymane parametry k i U (na podstawie [16])

Q – siła działająca na oś [kN/oś].
Parametry k [kN/mm] i U [MPa] przedstawiono na rysunku 2.

Otrzymane zależności zostaną z wykorzystaniem podczas obliczeń teoretycznych (punkt 4 pracy).

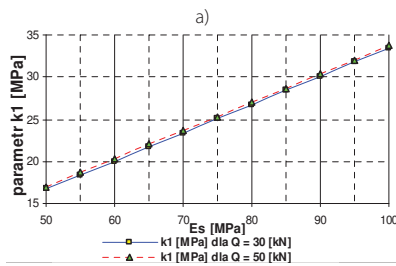
2.2. Identyfikacja parametrów podłoża dwuparametrowego

Do identyfikacji parametrów podłoża dwuparametrowego wykorzystano algorytm obliczeń iteracyjnych zaproponowany w pracach [17,18,19,20];

- wstępne przyjęcie wartości parametru pomocniczego
- obliczenie wartości parametrów: k_1 [MPa] i k_2 [MN]

- określając ugięcia belki na podstawie otrzymanych wartości k_1 i k_2 oblicza się kolejną wartość parametru pomocniczego
- kolejna (nowa) wartość parametru pomocniczego, wykorzystana jest do obliczeń kolejnych (nowych) wartości parametrów k_1 i k_2
- proces obliczeń iteracyjnych kończy się w przypadku, gdy kolejna wartość parametru pomocniczego jest taka sama jak poprzednia jego wartość.

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy uwzględniające wpływy modułu odkształcenia gruntu (E_s) i współczynnika Poissona gruntu (ν_s) na parametry podłoża: k_1 [MPa] i k_2 [MN].

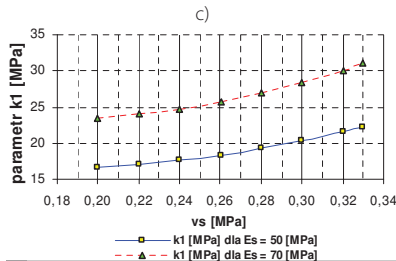


dla $Q=30$ [kN] oraz $\nu_s=0,2$ [-]

$$k_1(E_s)_{\nu_s=0,2} = 0,334 \cdot E_s - 1,905 \cdot 10^{-4}$$

dla $Q=50$ [kN] oraz $\nu_s=0,2$ [-]

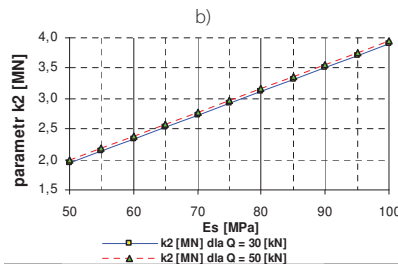
$$k_1(E_s)_{\nu_s=0,2} = 0,334 \cdot E_s + 0,2991$$



dla $Q=30$ [kN]

$$k_1(\nu_s)_{E_s=50} = 454,0244 \cdot \nu_s^{3,836} + 15,793$$

$$k_1(\nu_s)_{E_s=70} = 635,4804 \cdot \nu_s^{3,836} + 22,110$$

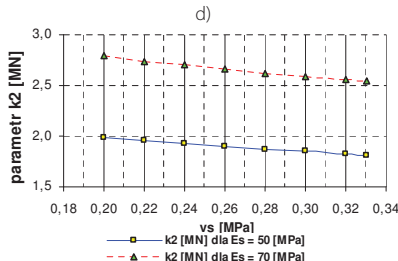


dla $Q=30$ [kN] oraz $\nu_s=0,2$ [-]

$$k_2(E_s)_{\nu_s=0,2} = 0,039 \cdot E_s + 1,047 \cdot 10^{-3}$$

dla $Q=50$ [kN] oraz $\nu_s=0,2$ [-]

$$k_2(E_s)_{\nu_s=0,2} = 0,039 \cdot E_s + 0,051$$



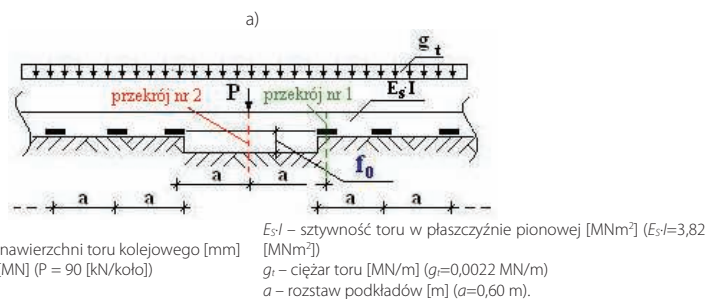
dla $Q=30$ [kN]

$$k_2(\nu_s)_{E_s=50} = 3,388 \cdot \nu_s^{-0,091} - 1,933$$

$$k_2(\nu_s)_{E_s=70} = 4,751 \cdot \nu_s^{-0,091} - 2,711$$

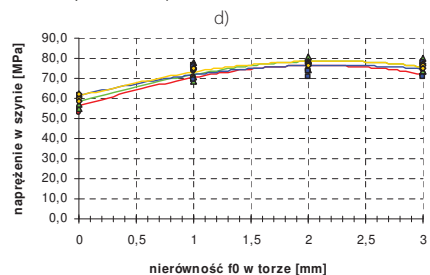
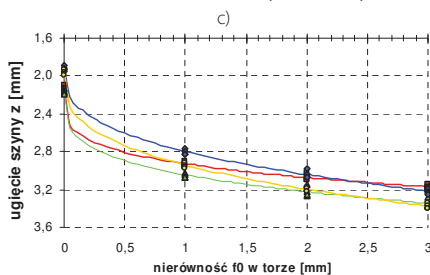
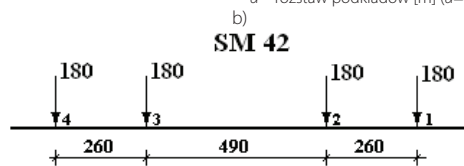
3. Wpływ modułu sprężystości podłoża (E_s) i współczynnika Poissona podłoża (ν_s) na wartości parametrów k_1 i k_2 [obliczenia autora]:

(a) parametr k_1 dla siły przenoszonej z szyny na podkład (belkę): $Q = 30$ [kN] i $Q = 50$ [kN] dla różnych wartości modułu sprężystości podłoża (E_s); (b) parametr k_2 dla siły przenoszonej z szyny na podkład (belkę): $Q = 30$ [kN] i $Q = 50$ [kN] dla różnych wartości modułu sprężystości podłoża (E_s); (c) parametr k_1 dla różnych wartości współczynnika Poissona podłoża (ν_s); (d) parametr k_2 dla różnych wartości współczynnika Poissona podłoża (ν_s)



gdzie:
 f_0 – nierówność wywołana w nawierzchni toru kolejowego [mm]
 P – przyłożona siła statyczna [MN] ($P = 90$ [kN/koło])

$E_s I$ – sztywność toru w płaszczyźnie pionowej [MNm²] ($E_s I = 3,82$ [MNm²])
 g – ciężar toru [MN/m] ($g = 0,0022$ MN/m)
 a – rozstaw podkładów [m] ($a = 0,60$ m).



— oś nr 1 — oś nr 2 — oś nr 3 — oś nr 4

4. Zmierzone ugięcie podkładu od kolejnych nacisków osi lokomotywy SM-42-448 (badania własne)
(a) schemat nierówności wywołanej w torze kolejowym (schemat autora); (b) schemat obciążenia lokomotywy SM-42-448 (siła [kN/oś]; odległości w [cm]); (c) ugięcie szyny w przekroju nr 2 – siły działające w przekroju nr 2 (kolejne osie lokomotywy); (d) naprężenie w szynie w przekroju nr 2 – siły działające w przekroju nr 2 (kolejne osie lokomotywy)

3. Wyniki przeprowadzonych badań terenowych

3.1. Wyniki uzyskane podczas badań terenowych

W torze kolejowym autor wykonał badania (według schematu z rysunek 4) wywołując brak podparcia toru z podsypką (na długości równej dwukrotnemu rozstawowi podkładów). Rysunek 4 i tab. 1 i 2 przedstawiają zmierzone ugięcia szyny i naprężenia w stopce szyny wywołane obciążeniem lokomotywy.

3.2. Identyfikacja parametrów podłoża do obliczeń teoretycznych

3.2.1. Podłoże jednoparametrowe

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów (tab. 1), otrzymanych zależności w p. 2.1 pracy (rysunek 2) oraz wyników przeprowadzonych badań [16], można podać następujące wzory dla podłoża jednoparametrowego:

$$k(Q) = 1,632 \cdot Q^{0,6173} + 4,8318 \text{ [kN/mm]} \quad (3.1)$$

$$U(Q) = 0,3129 \cdot Q^{0,8214} + 4,8601 \text{ [MPa]} \quad (3.2)$$

gdzie:

Q – siła działająca na oś [kN/oś].

Na rysunku 5 przedstawiono wykresy zależności parametrów k i U od siły działającej Q .

Na podstawie przeprowadzonych badań (dla 180 [kN/oś]) oraz wykorzystując otrzymane wykresy (rysunek 2 i rysunek 5) uzyskano następujące parametry (podane w tab. 3).

3.2.2. Podłoże dwuparametrowe

Na podstawie wykonanych pomiarów i procedury identyfikacji parametrów podłoża i nawierzchni [7,21,22] oraz zależności otrzymanych w p. 2.2 pracy dla podłoża dwuparametrowego można podać następujące wzory (rysunek 6 i tab. 4).

4. Uzyskane wyniki

Wyniki otrzymanych wartości podczas badań terenowych (rysunek 4c i 4d) pokazano w tab. 5.

Wykorzystując otrzymane parametry dla podłoża, otrzymano następujące wyniki obliczeń teoretycznych metodą elementów skończonych dla belki B-E spoczywającej na sprężystym podłożu jedno- i dwuparametrowym [5,7,22,23,24] zawarte w tab. 6 i 7.

Dla podłoża jednoparametrowego dla $P_{k=0}^{teor} = 90 \text{ [kN]}$ otrzymano maksymalne ugięcie: $z_s^{teor} = 4,513 \text{ [mm]}$ a naprężenie $\sigma_s^{teor} = 90,807 \text{ [MPa]}$, natomiast dla podłoża dwuparametrowego maksymalne ugięcie to: $z_s^{teor} = 4,253 \text{ [mm]}$ oraz naprężenie w stopce szyny $\sigma_s^{teor} = 85,636 \text{ [MPa]}$.

Dla podłoża jednoparametrowego dla $P_{k=0}^{teor} = 100 \text{ [kN]}$ otrzymano maksymalne ugięcie: $z_s^{teor} = 4,898 \text{ [mm]}$ a naprężenie $\sigma_s^{teor} = 101,881 \text{ [MPa]}$, natomiast dla podłoża dwuparametrowego maksymalne ugięcie to: $z_s^{teor} = 4,512 \text{ [mm]}$ oraz naprężenie w stopce szyny $\sigma_s^{teor} = 97,594 \text{ [MPa]}$.

Oznaczenia do tab. 6-10:

z_s^{pom} i z_s^{teor} – zmierzone i teoretyczne ugięcie szyny; $z_s^{k \neq 0}$ – ugięcie szyny od momentu kontaktu toru z podsyPKą

$P_{k=0}$ oraz $P_{k \neq 0}$ – siła koła przenoszona na tor, odpowiednio dla przypadku bez kontaktu toru z podsyPKą (zgodnie z f) i po kontakcie toru z podsyPKą; $P_{k=0}^{teor}$ oraz $P_{k \neq 0}^{teor}$ – teoretyczna siła koła przenoszona na tor, odpowiednio dla przypadku bez kontaktu toru z podsyPKą (zgodnie z nierównością f_0) i po kontakcie toru z podsyPKą

Q_{pom} – zmierzona siła przenoszona na podkład; σ_s^{pom} oraz σ_s^{teor} – naprężenie w obrzeżu szyny (odpowiednio: zmierzone i teoretyczne).

Podobne analizy można wykonać np.

Tab. 3. Uzyskane parametry podłoża jednoparametrowego

180 [kN/oś]	200 [kN/oś]	220 [kN/oś]
$k = 45,095 \text{ [kN/mm]}$ $U = 27,144 \text{ [MPa]}$	$k = 47,809 \text{ [kN/mm]}$ $U = 29,158 \text{ [MPa]}$	$k = 50,416 \text{ [kN/mm]}$ $U = 31,137 \text{ [MPa]}$

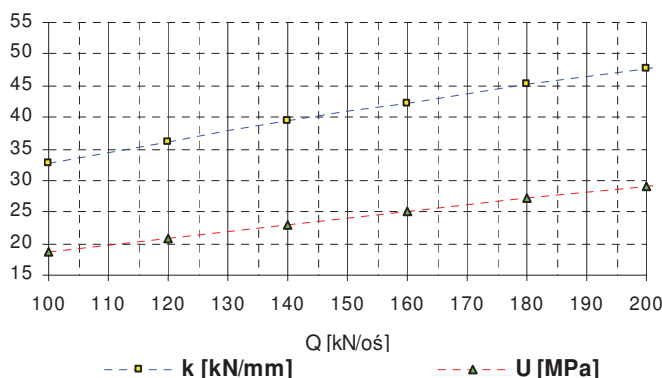
Tab. 4. Uzyskane parametry podłoża dwuparametrowego

180 [kN/oś]	
$k_1 = 25,368 \text{ [MPa]}$ $k_2 = 2,234 \text{ [MN]}$ $k_{spr} = 45,084 \text{ [kN/mm]}$	$E_s = 60,767 \text{ [MPa]}; \nu_s = 0,31 \text{ [-]}$ $k_1(\nu_s) = 635,874 \cdot \nu_s^{3,837} + 18,256 = 25,368 \text{ [MPa]}$ $k_2(\nu_s) = 2,520 \cdot \nu_s^{-0,157} - 0,795 = 2,234 \text{ [MN]}$
200 [kN/oś]	
$k_1 = 27,188 \text{ [MPa]}$ $k_2 = 2,394 \text{ [MN]}$ $k_{spr} = 47,812 \text{ [kN/mm]}$	$E_s = 65,127 \text{ [MPa]}; \nu_s = 0,31 \text{ [-]}$ $k_1(\nu_s) = 635,875 \cdot \nu_s^{3,837} + 20,076 = 27,188 \text{ [MPa]}$ $k_2(\nu_s) = 4,113 \cdot \nu_s^{-0,103} - 2,248 = 2,394 \text{ [MN]}$
220 [kN/oś]	
$k_1 = 28,948 \text{ [MPa]}$ $k_2 = 2,549 \text{ [MN]}$ $k_{spr} = 50,402 \text{ [kN/mm]}$	$E_s = 69,343127 \text{ [MPa]}; \nu_s = 0,31 \text{ [-]}$ $k_1(\nu_s) = 635,874 \cdot \nu_s^{3,837} + 21,836 = 28,948 \text{ [MPa]}$ $k_2(\nu_s) = 4,265 \cdot \nu_s^{-0,100} - 2,246 = 2,549 \text{ [MN]}$

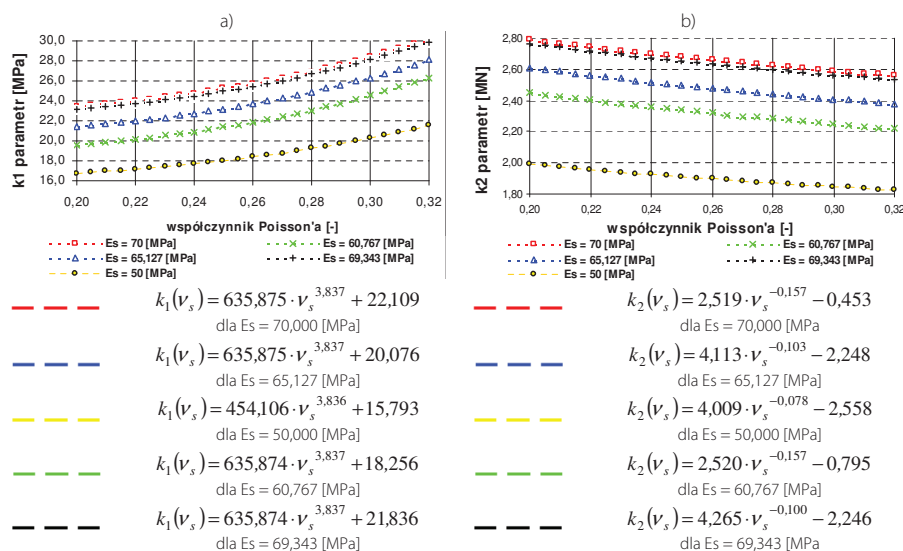
Tab. 5. Wyniki wykonanych badań terenowych dla $P=180 \text{ [kN/oś]}$

nierówność $f_0 \text{ [mm]}$	z_s^{pom} [mm]	$z_s^{k \neq 0}$ $(z_s^{pom} - f_0)$ [mm]	$P_{k=0}$ [kN]	$P_{k \neq 0}$ [kN]	Q_{pom} [kN]	σ_s^{pom} [MPa]
1	2	3	4	5	6	7
0	1,996	-	-	90	45,094	58,474
1	2,887	1,887	16,68	73,32	18,229	71,949
2	3,054	1,054	34,51	55,49	6,810	78,367
3	3,537	0,537	54,19	35,81	2,351	75,561

*) wartość uzyskana podczas jazdy próbnej lokomotywy dla $f_0=0 \text{ [mm]}$ (bez nierówności)



5. Parametry k i U dla podłoża jednoparametrowego (na podstawie przeprowadzonych badań autora)



6. Zależności określonych parametrów $k_1 \text{ [MPa]}$ (a) i $k_2 \text{ [MN]}$ (b)

dla podłoża dwuparametrowego do obliczeń teoretycznych (analiza autora)

Tab. 6. Wyniki obliczeń teoretycznych dla $P=180$ [kN/oś]

podłoże jednoparametrowe $U = 27,144$ [MPa]; $k_{spr} = 45,095$ [kN/mm]						podłoże dwuparametrowe ($E_s = 60,767$ [MPa]) $k_1(v_s) = 635,874 \cdot v_s^{3,837} + 18,256 = 25,368$ [MPa] $k_2(v_s) = 2,520 \cdot v_s^{-0,157} - 0,795 = 2,234$ [MN] $k_{spr} = 45,084$ [kN/mm]			
nierówność w torze f_0 [mm]	z_s^{pom} [mm]	z_s^{teor} [mm]	$P_{k=0}^{teor}$ [kN]	$P_{k \neq 0}^{teor}$ [kN]	σ_s^{teor} [MPa]	z_s^{teor} [mm]	$P_{k=0}^{teor}$ [kN]	$P_{k \neq 0}^{teor}$ [kN]	σ_s^{teor} [MPa]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,996	1,981	-	90	58,656	1,981	-	90	58,523
1	2,887	2,998	19,542	70,458	71,554	3,022	19,28	70,72	70,091
2	3,054	3,086	39,779	50,221	77,935	3,421	41,05	48,95	78,494
3	3,537	3,653	59,819	30,181	77,038	3,633	62,76	27,24	75,973

Tab. 7. Wyniki obliczeń teoretycznych dla $P=200$ [kN/oś]

podłoże jednoparametrowe $U = 29,158$ [MPa]; $k_{spr} = 47,809$ [kN/mm]						podłoże dwuparametrowe ($E_s = 65,127$ [MPa]) $k_1(v_s) = 635,875 \cdot v_s^{3,837} + 20,076 = 27,188$ [MPa] $k_2(v_s) = 4,113 \cdot v_s^{-0,103} - 2,248 = 2,394$ [MN] $k_{spr} = 47,812$ [kN/mm]				
nierówność w torze f_0 [mm]	z_s^{pom} [mm]	z_s^{teor} [mm]	$P_{k=0}^{teor}$ [kN]	$P_{k \neq 0}^{teor}$ [kN]	σ_s^{teor} [MPa]	z_s^{teor} [mm]	$P_{k=0}^{teor}$ [kN]	$P_{k \neq 0}^{teor}$ [kN]	σ_s^{teor} [MPa]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	1,996	2,081	-	100	64,051	2,087	-	100	63,829	
1	2,887	3,222	18,94	81,06	81,017	3,148	20,41	79,59	79,953	
2	3,054	3,267	39,77	60,23	87,292	3,202	43,07	56,93	85,716	
3	3,537	3,844	60,48	39,52	85,543	3,741	65,76	34,24	85,613	

dla siły $P=220$ [kN/oś], przyjmując następujące parametry podłoża:

- podłoże jednoparametrowe: $U = 31,137$ [MPa] oraz $k_{spr} = 50,416$ [kN/mm]
- podłoże dwuparametrowe: $E_s = 69,343127$ [MPa];

$k_1(v_s) = 635,874 \cdot v_s^{3,837} + 21,836 = 28,948$ [MPa]; $k_2(v_s) = 4,264 \cdot v_s^{-0,100} - 2,246 = 2,549$ [MN], czyli $k_1 = 28,948$ [MPa] i $k_2 = 2,549$ [MN] oraz $k_{spr} = 50,402$ [kN/mm].

5. Dyskusja uzyskanych wyników

Jak wyraźnie widać na rysunku 4 i tab. 5 - 7, powstające w torze kolejowym nierówności f_0 , znacząco zmieniają pracę obciążonych elementów nawierzchni kolejowej. Wpływ braku kontaktu w przekroju poprzecznym szyny jest zauważalny (w uzyskanych wartościach ugięcia przedstawionych na rysunku 4c i tab. 6 i 7). Szczególnie w rozpatrywanym przekroju nr 2 można zaobserwować duży wpływ tych odkształceń na pracę toru. Dla schematu z rysunku 4, przy wywołanej nierówności $f_0 = 3$ [mm], ugięcie szyny wzrasta w porównaniu do pełnego kontaktu toru z podłożem ($f_0=0$ [mm]), dla 1 osi o 48,94%, dla 2 osi o 55,31%, dla 3 osi o 67,98%, a dla 4 osi aż o 72,28%. Konsekwencją utraty kontaktu podkładu z tłuczniem, oprócz zmiany ugięć, jest zmiana

na wartości momentów zginających na długości podkładu (zwłaszcza w odcinku podszynowym i w środku podkładu) [7,13].

Zaproponowaną metodę identyfikacji parametrów podłoża (pkt. 2.1 i 2.2) zastosowano w pracy (pkt. 3.2.1 i 3.2.2). Otrzymane parametry wykorzystano do teoretycznych obliczeń ugięć i naprężeń w szynie MES (pkt. 4 pracy). Można wskazać następujący tok postępowania jako algorytm obliczeń i analiz (dla krótkiej długości braku kontaktu toru ze współpracującym podłożem):

- identyfikacja parametrów podłoża jednoparametrowego (U [MPa] – rysunek 5) i dwuparametrowego podłoża szynowego (k_1 [MPa] i k_2 [MN – rysunek 6) w zakresie działania siły Q (od 100 do 200 [kN/oś])
- modelowanie toru metodą elementów skończonych jako belki spoczywającej na podłożu gruntowym [5,7,22,23,24]
- przyjęcie siły przekazywanej z koła na szynę
- przyjęcie długości braku kontaktu toru z podłożem (dla krótkiej długości braku kontaktu toru ze współpracującym podłożem)
- wykonanie obliczeń teoretycznych (ugięcia, naprężenie w szynie) dla przyjmowanych parametrów (np. siła działająca z koła pojazdu na szynę, współczynnik

Poissona czy moduł odkształcenia gruntu).

Wnioski końcowe

Na podstawie badań ugięć i naprężeń przeprowadzonych przy obciążeniu statycznym na torze niepodpartym można wyciągnąć następujące wnioski:

- brak kontaktu toru z podłożem (na krótkiej długości), istotnie i niekorzystnie wpływa na zmiany ugięć czy naprężeń w torze kolejowym
- możliwa jest identyfikacja istotnych parametrów toru i podłoża do obliczeń ugięć i naprężeń w szynie
- wskazano metodę identyfikacji parametrów jednoparametrowego (U [MPa]) i dwuparametrowego podłoża szynowego (k_1 [MPa] i k_2 [MN])
- zamieszczono wykresy umożliwiające wykonanie obliczeń teoretycznych dla innych przyjmowanych parametrów (np. siła działająca z koła pojazdu na szynę, współczynnik Poissona czy moduł odkształcenia gruntu)
- zaproponowany tok postępowania można wykorzystać jako algorytm obliczeń i analiz (dla krótkiej długości braku kontaktu toru ze współpracującym podłożem).

Materiały źródłowe

- [1] Bowe C.J., Mullarkey T.P.: Wheel-rail contact elements incorporating irregularities. Advances in Engineering Software, 2005, Vol. 36, Issues 11-12: 827-837, DOI: 10.1016/j.advengsoft.2005.03.026
- [2] Iwnicki S.D., Bevan A. J: Damage to Railway Wheels and Rails: A Review of the Causes, Prediction Methods, Reduction and Allocation of Costs. The International Journal of Railway Technology, 2012, Vol.

- 1, Issue 1: 121–146, DOI:10.4203/ijrt.1.1.6
- [3] Zaker J.A, Xia H, Fan J.J.: Dynamic response of train-track system to single rail irregularity. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2009, Vol. 6, No. 2: 89-104
- [4] Guerrieri M., Parla G.: A new high-efficiency procedure for aggregate gradation determination of the railway ballast by means image recognition method. *Archives of Civil Engineering*, LIX, 4: 469–482, 2013, DOI:10.2478/ace-2013-0025
- [5] Bednarek Wł.: An influence of a generated track intentional irregularity on a static work of a railway track. *Archives of Civil Engineering*, vol. LXVII, issue 1, pp. 81-97, 2021, DOI: 10.24425/ace.2021.136462
- [6] Li D., E.T. Selig E.T.: Evaluation of Railway Subgrade Problems. *Transportation Research Record* 1489, ISSN 0361-1981, ISBN 0-309-06155-513
- [7] Bednarek W. A.: Full-Scale Field Experimental Investigation on the Intended Irregularity of CWR Track in Vertical Plane.. *Energies*, 2021, Vol. 14, 7477, pp. 1-29, <https://doi.org/10.3390/en14227477>
- [8] Nimbalkar S., Dash S.K., Indraratna B.: Performance of Ballasted Track under Impact Loading and Applications of Recycled Rubber Inclusion. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA* Vol. 49, No. 4, December 2018 ISSN 0046-5828, pp. 79-91
- [9] Xu Ch., Ito K., Hayano K., Momoya Y.: Combined effect of supported and unsupported sleepers on lateral ballast resistance in ballasted railway track. *Transportation Geotechnics*, Vol. 38, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100913>
- [10] Lundqvist, A.; Dahlberg, T.: Load impact on railway track due to unsupported sleepers. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transp.* 2005, 219, 67–77, DOI:10.1243/095440905X8790
- [11] Augustin, S.; Gudehus, G.; Huber, G.; Schünemann: A. Numerical model and laboratory tests on settlement of ballast track. In *System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade*; Popp, K., Schiehlen, W., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2003; pp. 317–336, DOI:10.1007/978-3-540-45476-2_19
- [12] Sysyn M., Przybylowicz M., Nabochenko O., Liu J.: Mechanism of Sleeper–Ballast Dynamic Impact and Residual Settlements Accumulation in Zones with Unsupported Sleepers. *Sustainability*, 2021, 13, 7740. <https://doi.org/10.3390/su13147740>
- [13] Sadeghi J., Zakeri J.-A., Kian A.R.T.: Effect of unsupported sleepers on rail track dynamic behaviour. *Sustainability* 2021, 13(14), 7740; <https://doi.org/10.3390/su13147740> (Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport (2018) 171 (5): 286–298, <https://doi.org/10.1680/jtran.16.00161>)
- [14] Zhang S., Xiao X., Wen Z., Jin X.: Effect of unsupported sleepers on wheel/rail normal load. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28 (2008) 662–673; DOI:10.1016/j.soildyn.2007.08.006
- [15] Liu D., Su Ch., Zhang D., Lan C.: The Influence of an Unsupported Sleeper on the Vertical Bearing Characteristics of Heavy-Haul Railway Ballast. *Materials* 2024, 17, 1434. <https://doi.org/10.3390/ma17061434>
- [16] Drożdżel J., Sowiński B.: Method of track vertical stiffness estimation based on experiment. *The Archives of Transport*, Vol. XXII, No. 2, 2010, 153-162, DOI: 10.2478/v10174-010-0009-y
- [17] Teodoru, I.-B.; Muşat, V. The modified Vlasov foundation model: An attractive approach for beams resting on elastic supports. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2010, Vol. 15, Bund. C, 1-13
- [18] Vallabhan, C.V.G.; Das, Y.C.: Parametric study of beams on elastic foundations. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1988, Vol. 114, No. 12, 2072-2082, [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1988\)114:12\(2072\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1988)114:12(2072))
- [19] Vallabhan, C.V.G.; Das, Y.C.: Modified Vlasov model for beams on elastic foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1991, Vol. 117, Issue 6, pp. 956-966, [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:6\(956\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:6(956))
- [20] Mullapudi, R.; Ayoub, A.: Nonlinear finite element modeling of beams on two-parameter foundations. *Computers&Geotechnics*. 2010, Vol. 37, Issue 3, 334-342, doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.11.006
- [21] Khakiev Z., Kruglikov A., Lazorenko G.: Mechanical behavior of ballasted railway track stabilized with polyurethane: A finite element analysis. *Matec Web of Conference* 251, 04056 (2018), IPICSE-2018, <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201825104056>
- [22] Kukulski J.: Badania doświadczalne i symulacyjne w ocenie jakości i trwałości elementów nawierzchni kolejowej. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport*, z. 188, Warszawa, 2017
- [23] Eisenberger, M.; Yankelevsky, D.Z.: Exact stiffness matrix for beams on elastic foundation. *Computers&Structures*. 1985, Vol. 21, Issue 6, 1355-1359, [doi.org/10.1016/0045-7949\(85\)90189-0](https://doi.org/10.1016/0045-7949(85)90189-0)
- [24] Teodoru, I.-B.; Muşat, V.: Beam Elements On Linear Variable Two-Parameter Elastic Foundation. *Buletinul Institutului Politehnic Din Iaşi, Tomul LIV(LVIII), Fasc. 2*, pp. 69-78, 2008

The concept of utilizing iTwin Capture Modeler in the design of railway infrastructure

Koncepcja wykorzystania iTwin Capture Modeler w projektowaniu infrastruktury kolejowej



Kamila Szwaczkiewicz

Dr inż.

Politechnika Gdańska
Katedra Inżynierii Transportowej

kamszwac@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0003-3147-6397



Aleks Gołąbek

Inż.

Politechnika Gdańska
Katedra Inżynierii Transportowej

s189870@student.pg.edu.pl

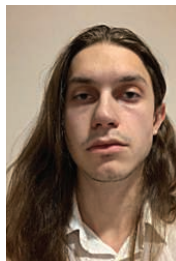


Łukasz Sobkiewicz

Inż.

Politechnika Gdańska
Katedra Inżynierii Transportowej

s191788@student.pg.edu.pl



Marcin Stolz

Inż.

Politechnika Gdańska
Katedra Inżynierii Transportowej

s190086@student.pg.edu.pl

Abstract: The paper investigates the feasibility of utilizing iTwin Capture Modeler software, which is designed for generating 3D models from photogrammetric data, in the design of railway infrastructure. Basing on general requirements of photogrammetric data acquisition and previous micro scale analysis, the methodology was developed. The study presents the results of an analysis of an existing double slip on straight tracks located in Koscierzyna Railway Museum. The generated 3D model allowed to determine the geometric layout of the analysed crossing.

Keywords: Project; Railway track; Photogrammetry; Digital twins

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania oprogramowania iTwinCapture Modeler, przeznaczonego do generowania modeli 3D z danych fotogrametrycznych, w projektowaniu infrastruktury kolejowej. Bazując na generalnych wytycznych pozyskiwania danych fotogrametrycznych oraz poprzednich analizach w skali mikro, opracowano metodykę. Artykuł przedstawia wyniki analizy badań fotogrametrycznych wykonanych na istniejącym rozjeździe krzyżowym podwójnym z iglicami wewnątrz czworoboku rozjazdu, znajdującym się w Muzeum Kolejnictwa w Kościerzynie. Wygenerowany model 3D pozwolił na odtworzenie parametrów geometrycznych istniejącego rozjazdu.

Słowa kluczowe: Projekt; tor kolejowy; fotogrametria; cyfrowe bliźniaki

Introduction

Photogrammetry technology is applied in many areas related both to civil engineering and surveying. The development of railway transportation systems necessitates the implementation of new technologies and tools for railway infrastructure design, such as the use of modern software capable of simultaneously incorporating multiple design aspects, including the track layout of existing and

planned lines, layout plans, railway profiles and terrain models. Owing to their accuracy and the solutions used for generating 3D models, photogrammetric techniques may improve the entire design process. Additionally, the tools in question may also be even essential, when dealing with specific conditions of the existing state of a particular structure undergoing upgrading. In this article, the authors present the results of their research on the utilization of

photogrammetric techniques in railway infrastructure design, employing Bentley Systems' iTwin Capture Modeler software for creating digital twins. The study included the development of the methodology for creating photographic documentation, the processing of the acquired data into digital twins in the form of a 3D model, the integration of the obtained railway infrastructure data into a unified information set. Basing on this dataset, the existing layout of a

selected railway infrastructure element was reconstructed in Bentley Systems' OpenRail Designer software.

Literature overview

In order to collect the data referring to the considered topic, a literature analysis was performed. The analysis was based mainly on publications in the form of scientific articles, describing topics such as: 3D models, methods of data acquisition for later usage in 3D modelling and the usage of digital twins data of infrastructure objects in practice. The potential benefits of using 3D models to archive the existing condition, especially in the case of historic buildings, were described in the article [7]. Namely, the Authors used Bentley iTwin Capture Modeler software and presented their thoughts on the data acquisition process. In the article [10] potential ways of using digital twins were shown. In particular, investment areas related to infrastructure facilities were discussed. The Authors of the article [14] made an analysis of current and past investments in the railway infrastructure branch in Germany. Described methods were realized in the form of public procurements and performed using BIM. Based on the analyzed examples, the authors drawn out current practices and proposals of recommendations of BIM usage in investments. The article [8] focused on the requirements that digital twins should fulfil in the case of the railway industry. In the authors' opinion an important question is the possibility of strengthening of dependencies and relations between collected data. Additionally, conclusions and recommendations from the research were transferred to organizations, that use digital twins in their daily operation.

The Author of article [9] focused on literature describing aspects of digital twins in the railway sector. It is worth mentioning that the publi-

cation discusses the development of digital twins over the years, the approaches to data integration and the possibility of capturing data using various tools. Consequently, the development of digital twin models in the railway industry was considered. Potential usage in railway infrastructure was also shown. In article [5], the most important challenges in the aspect of digital recreation of railway infrastructure were presented. Digital twins, with the help of the connection between digital models and data, allow the simulation of the object's behavior in its lifetime. An important aspect is that more accurate data is collected during the whole lifespan of the infrastructure object. This allows for more precise system operation, that helps to predict possible problems, which positively impact safety and effectiveness of object exploitation. The Author of articles [2] and [3] focused on the usage of virtual bridge constructions recreation. In both cases, benefits of the recreation of bridge construction were confirmed. Benefits are visible during the object's entire lifespan beginning from construction, the possibility of construction creation control and the early detection of places of potential collisions between branches. Application is also possible during object maintenance, which allows to adjust methods of conservation to the current state of construction.

Aspects of railway infrastructure maintenance were the subject of many articles. In article [1], the authors describe the usage of digital twins to predict rail wear. To model the process, the data about: train, used materials in railway and real results of measurements was used. This way makes it possible to precisely assess the infrastructure behavior in the foreseeable future, which makes it easier to plan maintenance works. In article [13], the authors team created a concept of a system

and virtual model, which recreates the railroad fragment with cubature objects. They used tools such as: BIM with 3D visualization, IoT networks, edge computing and deep learning. In the article, the authors focused on data transmission and overflow of specific components of the information network. Authors discovered potential benefits of the usage of this specific solution in the aspect of: current planning and maintenance of objects, and construction design. The usage of advanced methods of data processing was also considered by the research team [15]. In the described solution, visualization of infrastructure elements was previously digitalized. Basing on data from laser scanning i.e. point cloud 3D and with the help of dedicated programs, data extraction and interpretation was achieved. Subsequently, the data was enriched with photographic documentation, which enabled realistic visualisation in a 3D model. Methods of creating 3D models that can be implemented in digital twins and ongoing monitoring of the condition of railway infrastructure and space design were also demonstrated.

The usage of advanced methods of data acquisition is also used in railway engineering object inspections. Article [11] describes the use of UAVs (drones) for photogrammetry in the case of infrastructure objects. The use of this method makes it easier to reach hard-to-access places, which can have a positive impact on employee safety and minimise disruptions to rail traffic. However, potential problems with the use of drones and examples of UAVs in use were also highlighted.

Research apparatus

Digital cameras and devices with a photo function were used to collect data, which was then processed using special software. The parameters of these devices are presented

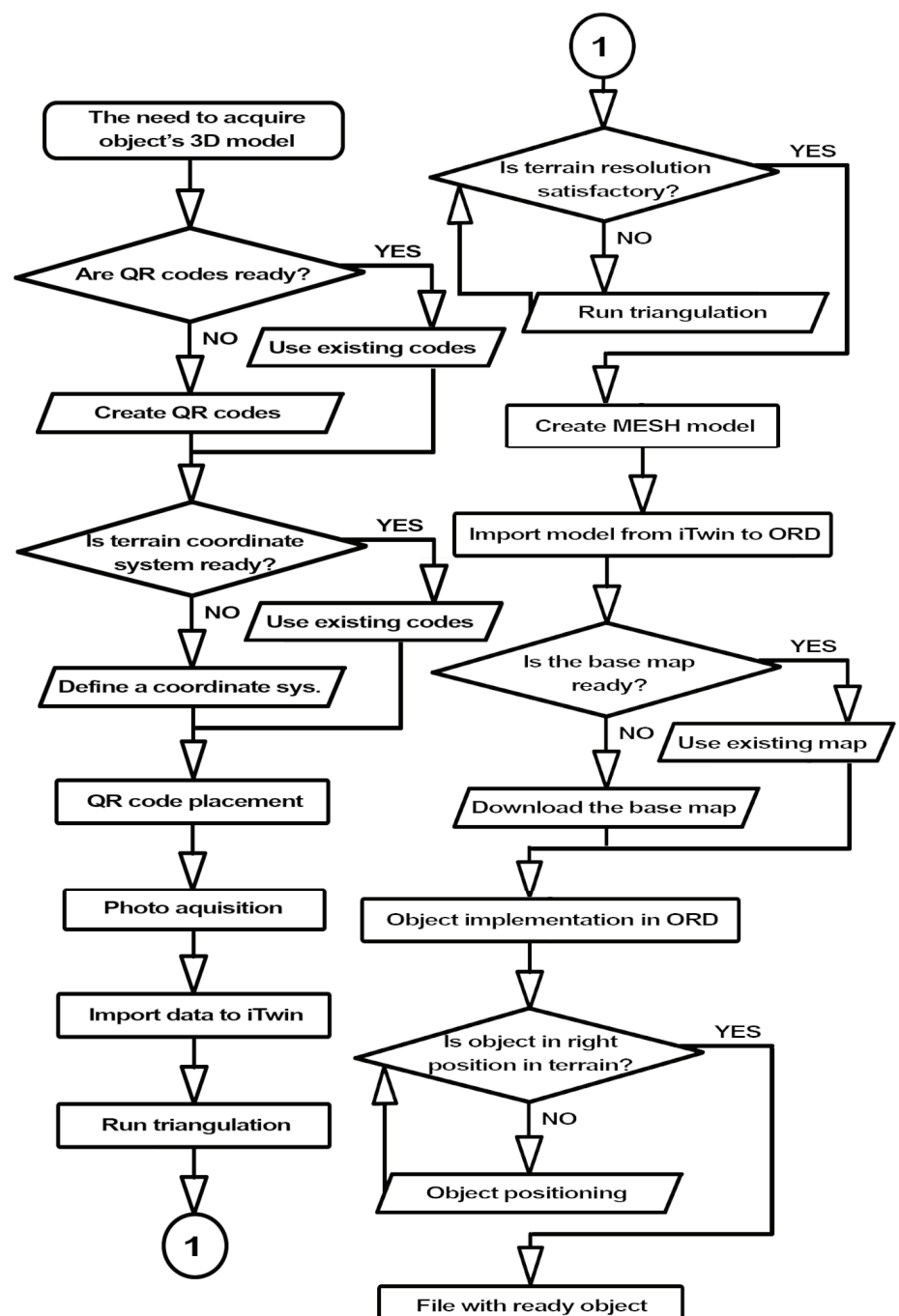


1. Location and image of turnout measured in the article [6]

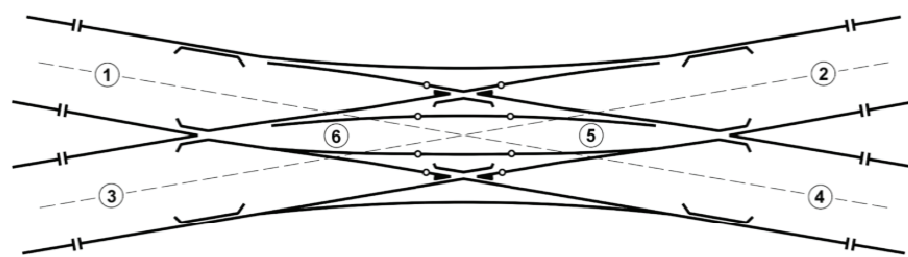


2. Generated 3D model of a railway miniature model

later in this chapter. To edit the data and create 3D models, the research team used Bentley iTwin Capture Modeler 2024 (version 24.1.6.2220) software, installed on PCs with various components capabilities. Photographic documentation was created using a DSLR camera with a zoom lens and mobile devices (smartphones) equipped with digital cameras. Digital files were saved in .jpeg format. DSLR camera that was used was Canon EOS 80d, used lens was CANON EF-S 18-55 mm f/3.5-5.6 IS STM [4]. The camera was equipped with a small-scale matrix APS-C (22.3x14.9 mm) with 25.8 Mpix resolution. The photos were taken at the shortest focal length of the lens, which was 18 mm. Second DSLR was Nikon D5000, used lens was Nikon 35 mm f/1.8 G AF-S DX. The camera was equipped with a small-scale matrix APS-C (23.6x15.8 mm) with 12 Mpix resolution. Digital files were saved in .jpeg format. In addition, the authors used Samsung Galaxy Note 8 (f/1.8 lens, 1/2.55-inch sensor, 12 Mpix) and Apple iPhone XS (f/1.8 lens, 12137 Mpix) devices to take photos of the test object. During photography session, native screen zoom was used (without digital zoom). Photos made, used for work with 3D model, were not edited in photo editing software. Natural geometrical distortions from optical systems of used devices were left intact.



3. Macro-scale object 3D preparing methodology



4. Location of photographic survey points

Tab. 1. Aerotriangulation data for point No. 6

TrailNo.	Photogroup number	Number of photos	Total resolution	Number of automatic tie points	Terrain resolution min.	Terrain resolution max.
1	7	130	1.7 Gpix	6764	0.00210	0.0100
2				6336	0.00054	0.0025
3				6397	0.00054	0.0025
4				6402	0.00054	0.0025
5				6422	0.00054	0.0025
6				6396	0.00054	0.0025
7				6436	0.00054	0.0025

Analysis results

The research group carried out photographic documentation on the premises of the Railway Museum in Kościerzyna, which contains its own track infrastructure. For analysis, a double slip on straight tracks was selected (Fig. 1). The slip is not in regular use, which made it possible to safely obtain the required documentation. However, the slip also showed signs of significant wear, likely due to the lack of maintenance.

Development of the methodology required for acquiring photographic documentation involved creating photographs and a digital twin at a micro scale in order to determine the requirements for the macro scale. For the micro scale example, two previously

printed QR codes were placed 1 meter apart, measured between their centers, to establish the scale for the generated model. Each member of the research team then took a set of photographs of a railway miniature model placed in the Department of Transport Engineering in Gdańsk University of Technology. The photos were taken with varying quantities, angles and distances from the model, with each image differing in these parameters. The acquired photographs were imported into iTwin Capture Modeler to create a 3D model (Fig. 2).

The created model exhibited low accuracy for small scale objects, such as the buffer stop. However, at the general scale, the outcome was satisfactory. The micro scale tests made it possible to define more precise and

improved methods for use in the later stages of the research (Fig. 3).

The required photographic documentation was prepared by a four-person research team. The slip was divided into six areas (Fig. 4) in order to organise the process of taking photographs and further design work. The weather conditions during data collecting process were as follows: air temperature 18°C, relative humidity 60%, cloud cover 80%, no precipitation [12]. The existing weather conditions allowed for good visibility and proper photographic documentation. Accounting for weather conditions is crucial, as atmospheric precipitation can result in water droplets settling on the rail surface or water accumulating in some areas of a slip, especially in the crossing. Such factors may cause the reconstructed 3D model to contain errors.

Work in each point began with placing previously printed QR codes in two configurations:

- two points positioned 1 meter apart, measured between their centers in a straight line;
- three points positioned 1 meter apart, measured between their centers, but arranged perpendicular to the central point.

Additionally, AprilTags were placed at a distance from the reference points defined by the QR codes (Fig. 5). The QR codes were arranged to determine the distance between individual elements and to establish an X-Y coordinate system for further work



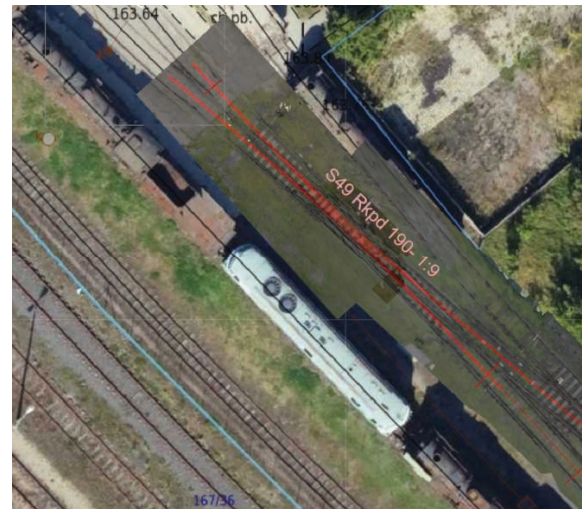
5. Example of QR codes and april tags location based on photo from point No. 1



6. 3D model (from one measuring point) made in iTwin Capture Modeler



7. Section of the slip 3D model made in iTwin Capture Modeler



8. Double slip on straight tracks in situation plan

in the 3D model. The AprilTags were used to define fixed points in space. After placing the QR codes and AprilTags, photographs were taken by walking twice around the QR-code layout – first at a closer distance of approximately 2 meters, then at a further distance of approximately 5 meters. Additionally, in several locations, photographs were taken using a smartphone camera, pointing it towards the left rail, the right rail and the sleepers between the rails. The device was oriented along the track centerline at a height of approximately 1 meter above ground level. The photos were taken from two different shooting positions, by one of the authors. Meanwhile, the remaining members of the research team performed photographic documentation from two additional positions and arranged the necessary QR codes and AprilTags in the previously described configurations. The markers were placed on the ground and secured with stones in order to provide protection against movement. On the Nikon device and the smartphone camera, the option to record the devices' GPS position in the photo metadata was enabled. However, due to the unknown accuracy parameters of the devices' GPS modules and the significant variation – exceeding several meters – in the recorded positions, the use of this positioning data was abandoned in

the subsequent data-processing process.

The main software used to process the collected data was iTwin Capture Modeler. A standard data-acquisition process was performed: the photos were sorted in the correct sequence, their completeness was verified and information about the photographic equipment parameters was inserted into the program. Next, the aerotriangulation process was carried out multiple times, enabling the determination of photo positions. The control-point reading function was used to establish the scale of the object and the local coordinate system.

Although, the software was able to recognize and read the points from the QR codes on some photographs, most of them had to be entered manually. With each subsequent aerotriangulation, the terrain resolution improved. The terrain resolution was

specified with reference to the block's unit of measurement, which in this case was meters. The block parameters for point No. 6 are presented in the table No. 1. Finally, the slip surface was exported (Fig. 6, Fig. 7) as a .3sm (RealityMesh) file.

The procedure carried out and the result achieved allowed the obtained results to be transferred to a designing software. Thus, for further work on the data the tools available in Bentley OpenRail Designer 2024 were selected. Raster map background and surface-terrain files generated in iTwin were implemented. The surface of the entire slip was saved in six separate blocks. This approach was adopted due to the inability for merging blocks that do not contain external georeferencing data. Each block had its own local coordinate system, which prevented the software from combining the generated



9. 3D model made in iTwin Capture Modeler with zoom on turnout elements

surfaces. The map background from the Geoportal online service [6] was used to position the slip surface in its real-world location and to verify that the objects' scale was preserved. This approach has been chosen because no coordinate-system data were available in the terrain-surface files. During data collection, the research team did not have access to GPS positioning devices with the required accuracy. To place the created slip area correctly, its position was adjusted using rotation and scaling tools. Once the generated terrain blocks were inserted in their correct positions and the map background visibility was reduced to near transparent, the slip was positioned with the track centerline used as the reference point.

Despite the lack of information regarding the actual parameters of the analyzed slip, the functions available in the program allowed the slip located at the museum site to be identified as double slip on straight tracks with parameters S49-190-1:9 (Fig. 8). Additionally, basing on the digital terrain model data obtained from the Geoportal online service [6], the profile of the slip was created. If the slip surface in the iTwin software had contained complete georeferencing data, it would have been possible to rely solely on the information collected in the photographic documentation.

The methodology proposed by the authors enables the identification of both the type and the technical condition of individual railway infrastructure components, such as sleepers, rail fastening systems, fishplate rail joints, rail type as well as the condition of specific slip elements including, among others, switch blades and check rails (Fig. 9). Basing on the generated 3D models, the sleepers were identified as wooden, exhibiting visible wear in the form of surface cracking. The K-type fastening system was assessed to be in satis-

factory condition. The rail joints within the slip were determined to be conventional fishplate joints showing noticeable corrosion and a rail gap several millimeters. The check rails and switch blades were captured with sufficient quality to allow clear identification of their condition. Widespread corrosion was observed on all steel components of the slip, including the rails and check rails. Additionally, significant vegetation overgrowth of the slip was observed on the track, particularly in the areas between the sleepers.

The methodology may also support the identification of technologies used for joining rails (jointed rail track or continuous welded railtrack), the assessment and degree of ballast fouling and the identification of track components in ballastless track or in level crossings.

Conclusions

Upon completing the research task, the following conclusions can be drawn. When applied to real-world conditions, several difficulties were identified that may hinder the effective use of the collected data. The most significant of these is the need to establish a link to a geographic reference system. To achieve this, the geographic coordinates of known reference points, tie points or the positions of the devices used to capture the photographs must be measured.

The preferred approach is to use equipment capable of providing high precision, such as an RTK system. Consumer-grade photographic devices or mobile phone cameras do not provide GPS accuracy sufficient for tasks of this type. UAV devices (drones) offer more accurate positioning systems, however their use may be restricted or difficult withing railway areas [11].

Having precise geographic position data makes it possible to merge multiple blocks into a single, larger

area. This feature is specific for Bentley iTwin. It also enables the imported data to be used, for example, in GIS systems for further terrain visualization. Due to the nature of the software, which fundamentally operates on the principles of photogrammetry, the most critical elements are the photographic documentation and the placement of reference points in accordance with photogrammetric guidelines.

During data collection, QR codes were used as control points, however, to be successfully decoded, they require to be photographed with high resolution. Many of the points placed in the field were blurry or obstructed by track components or vegetation, making their identification in the model difficult or, in most cases, impossible. To avoid this, it would be advisable to change the surface on which the codes are placed or to use control points in another form, such as posts or survey poles.

When creating multiple blocks of a single object, the transitional zones between these areas are particularly important, as errors in terrain representation may occur there due to insufficient photographic data.

A major advantage of photogrammetry based data collection is the speed of acquisition. A consumer-grade photographic device and proper operating technique are generally sufficient. Another critical factor is the IT infrastructure, which must provide adequate processing power to handle large data sets. However, in some cases, even non-specialized hardware may be sufficient for smaller tasks. The iTwin software allows the computational engine to be installed on a server or operated through a cloud-based service, which can help to offload processing from individual devices.

Based on the presented method, it is possible to reconstruct the geometrical layout of a specific slip. During the research, it was observed that the

solution also enables the recreation of a track axis layout. The presented methodology has the potential to be utilized in the concept design process. Current cartographic elaborations available to obtain from public institutions are not yet in the form of the 3D elements that would assist the BIM modeling process. Thus, it is understandable that infrastructure designers are currently seeking more effective solutions for 3D design.

The concept of using photogrammetry based software appears to be a promising direction for terrain measurement and design, particularly in the context of railway infrastructure. Although more accurate and reliable geodetic measurement methods are currently available, there are specific applications, such as inventory surveys, where the capabilities offered by Bentley iTwin may be sufficient for performing such tasks. Currently, it is not a universal or error-free solution, but over the time there is a possibility that the methodology will gain wider popularity across various fields.

Summary

The aim of the presented research was to assess the possibilities and scope of using iTwin Capture Modeler software in railway infrastructure design. The research carried out by the team of authors included the development of a methodology for acquiring, processing and using photogrammetric data. It was found that the software could be used to support an alternative method of determining the geometry of a railway object and as an alternative to traditional map bases. In order to improve the method, it would be necessary to determine the exact geographical positions of photographs and control points, and to use the possibilities of taking photographs with advanced photographic equipment and other techniques, including drone flights or laser scanning. ◀

Source materials

- [1] Ahmad S., et al. Development of a Digital Twin for prediction of rail surface damage in heavy haul railway operations. *Vehicle System Dynamics* 62 (1), 2024, 41-66, doi no: 10.1080/00423114.2023.2237620
- [2] Armijo A., Zamora-Sánchez D. Integration of Railway Bridge Structural Health Monitoring into the Internet of Things with a Digital Twin: A Case Study. *Sensors* 24 (7), 2024, 2115, doi no: 10.3390/s24072115
- [3] Barreto L. M., Salvador Filho, J. A. Applications of Digital Twins in Reinforced and Prestressed Concrete Bridge Infrastructure. *Procedia Structural Integrity* 64, 2024, 1168-1175, doi no: 10.1016/j.prostr.2024.09.163
- [4] Canon EOS 80D - test of the camera (in Polish). https://www.optyczne.pl/335.1-Test_aparatu-Canon_EOS_80D-Wst%C4%99p.html (access date 18.03.2025)
- [5] Gao, Yan, et al. Digital twin and its application in transportation infrastructure. 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPPI). IEEE, 2021, doi no: 10.1109/DTPPI52967.2021.9540108
- [6] Geoportal.gov.pl. <https://mapy.geoportal.gov.pl> (access date 18.11.2025)
- [7] Hurst S., Franklin L., Johnson E. Assessment of Apple's object capture photogrammetry API for rapidly creating research quality cultural heritage 3D models. *PloS one* 19 (12), 2024, doi no: 10.1371/journal.pone.0314560
- [8] Johnson A., et al. Informing the information requirements of a digital twin: a rail industry case study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Smart Infrastructure and Construction* 174 (2), 2021, 33-45, doi no: 10.1680/jsmic.20.00017
- [9] Kushwaha D., Kumar A., Harsha S. P. Advancements and applications of digital twin in the railway industry: a literature review. *International Journal of Rail Transportation*, 2024, 1-26, no doi: 10.1080/23248378.2024.2434834
- [10] Królikowski J., Martinez P. "By 3D nie było tylko obrazkiem. Geodeta: magazyn geoinformacyjny, 2023.
- [11] Lesiak P. Drones in the inspection of railway engineering facilities. *Transportation Overview* 76 (4), 2021, doi no: 10.35117/a_eng_21_04_01
- [12] Meteoblue. <https://www.meteoblue.com/pl/pogoda/> (access date 20.11.2025)
- [13] Moussa I.S.S.A., et al. Updating a railway infrastructure digital twin by the integration of a variety of data sources. *Transportation Research Procedia* 72, 2023, 666-673, doi no: 10.1016/j.trpro.2023.11.453
- [14] Nast A., Koch C. BIM adoption in small-scale infrastructure projects—investigation on the German railway sector. *ECPPM 2022-eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction 2022*. CRC Press, 2023, 695-702, doi no: 10.1201/9781003354222
- [15] Yarroudh A., et al. Railway reconstruction from 3D point cloud using Deep Learning and Parametric Modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 48, 2024, 477-482, doi no: 10.5194/isprs-archives-48-2-w8-2024-477-2024

Możliwość modernizacji kolei wąskotorowych w świetle obowiązujących warunków technicznych

The possibility of modernizing narrow-gauge railways in accordance with applicable technical conditions



Filip Janowiec

Dr inż.

Politechnika Krakowska, Wydział
Inżynierii Lądowej i Środowiska,
Katedra Dróg, Kole i Inżynierii Ruchu

filip.janowiec@pk.edu.pl
ORCID: 0000-0002-1627-7181



Przemysław Maraszek

Mgr inż.

Envirail sp. z o.o.

p.maraszek@envirail.com

Streszczenie: Powszechnie uważa się, że linie kolei wąskotorowych mają już najlepsze lata za sobą. Liczba przewozów, rozwój połączeń oraz liczba czynnych linii kolei wąskotorowych w Polsce systematycznie się zmniejsza. Niedawne zmiany w przepisach dotyczących prowadzenia ruchu kolejowego otwierają jednak możliwość odwrócenia tego trendu, umożliwiając formalną dyskusję nad zasadnością modernizacji linii wąskotorowych i ich włączenia do krajowego systemu kolejowego. Niniejszy artykuł stanowi próbę wskazania możliwości modernizacji kolei wąskotorowych z uwzględnieniem obowiązujących warunków technicznych dla dróg kolejowych o rozstawie szyn mniejszym niż 1435 mm.

Słowa kluczowe: Kolej wąskotorowa; Modernizacja; Infrastruktura kolejowa

Abstract: It is commonly acknowledged that narrow-gauge railway lines have already surpassed their operational zenith. The volume of freight and passenger traffic, network development, and the number of active narrow-gauge railway lines in Poland have been experiencing systematic decline. Recent amendments to regulatory framework governing railway operations, however, create opportunities for reversing this trend by enabling formal discourse on the viability of narrow-gauge line modernization and their integration into the national railway system. This paper constitutes an attempt to identify modernization pathways for narrow-gauge railways, taking into account the applicable technical specifications for railway tracks with gauge width below 1435 mm.

Keywords: Narrow gauge railway; Modernization; Railway infrastructure

Wprowadzenie

Za początek nowoczesnego transportu kolejowego uznaje się otwarcie linii Stockton–Darlington w 1825 roku. Jednak wykorzystanie dróg szynowych do przewozu towarów sięga znacznie wcześniej – już XV wieku [5]. Jednym z pierwszych obszarów zastosowania był przemysł wydobywczy i ciężki. Wiele kopalń, ze względu na ograniczoną przestrzeń wyrobisk oraz trudności w transporcie przy użyciu wozów konnych, korzystało z wózków toczonych po drewnianych szynach. Rozstaw tych szyn zazwyczaj odpowiadał temu, który dziś klasyfikujemy jako wąskotorowy.

Wczesne systemy kolejowe charakteryzowały się dużą różnorodno-

ścią parametrów techniczno-eksploatacyjnych, będąc ściśle związanymi z autorskimi rozwiązaniami swoich twórców. Z czasem okazało się, że standaryzacja systemów, w tym rozstawu szyn, niesie istotne korzyści. Kluczowe stało się określenie optymalnego rozstawu oraz dostosowanie go do potrzeb transportowych. Dominującym rozwiązaniem stał się rozstaw normalny wynoszący 1435 mm (1500 mm w osiach szyn). Dla tej konfiguracji rozwinięto kompleksowe rozwiązania obejmujące nawierzchnię, budowlę podtorza, systemy sterowania ruchem oraz tabor kolejowy [10].

Pierwsza publiczna kolej wąskotorowa o rozstawie 1106 mm łączyła czeskie miasta Budziejowice i Troja-

ny, wykorzystując trakcję konną. Rok później przedłużono ją do Linzu. W kolejnych dekadach powstawały następne odcinki linii wąskotorowych. Za przełomowy uznaje się rok 1861, kiedy francuski inżynier Eugène Flachet stwierdził, że ze względów ekonomicznych kolej dla wszelkich zastosowań powinna być wyłącznie wąskotorowa [5]. Od tego momentu rozwój kolei wąskotorowych znacząco przyspieszył. Niewątpliwie przyczynił się do tego wzrost zainteresowania wojsk wielu państw. Decydujące o zastosowaniu tego typu konstrukcji były: szybkość budowy linii, elastyczność w projektowaniu tras nawet w trudnym terenie oraz możliwość wznoszenia bez specjalistycznego sprzętu, z wykorzystaniem

pracy ludzkiej. Stąd liczne istniejące dziś linie wąskotorowe stanowią pozostałość po infrastrukturze wojskowej, przebudowanej lub dostosowanej do potrzeb obecnego taboru [11]. W niektórych regionach świata koleje wąskotorowe przyjęły się jako podstawowy system transportu szynowego i w takim charakterze funkcjonują do dziś [14].

Niezależnie od historycznego pochodzenia, linie kolei wąskotorowych stanowią potencjał, który powinien być wykorzystany w krajowym systemie kolejowym. W tym celu przepisy prawa muszą umożliwiać ich modernizację oraz rozwój z uwzględnieniem nowoczesnych technik, technologii budowy i prowadzenia ruchu kolejowego. Zważywszy, że kolej przeżywa obecnie swój renesans zwiększając z roku na rok ilość przewiezionych pasażerów [12].

Koleje wąskotorowe w Polsce

Linie kolei wąskotorowych, podobnie jak pozostałych systemów kolejowych (linie normalno- i szerokotorowe) w większości zostały przejęte przez Polskę wraz z odzyskaniem niepodległości w roku 1918 od krajów zaborczych (Prus, Austro-Węgier oraz Rosji). Przed I Wojną Światową na obszarze późniejszej II Rzeczypospolitej całkowita długość linii wąskotorowych wynosiła 2 877km (1427km

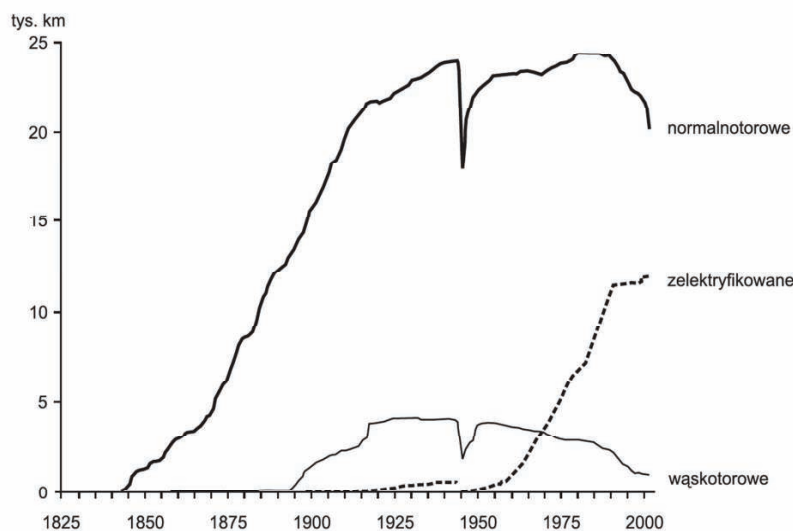
użytku publicznego, a 1450km użytku niepublicznego) [10]. Jednak wojenna zawierucha, związana także z przetrznięciem wojsk i logistyką wojenną spowodowała, że liczba linii kolei wąskotorowych przez lata 1914-1918 ulegała dynamicznym zmianom. Ostatecznie w latach 1918-1922 Ministerstwo Kolei Żelaznych przejęło 29 odrębnych sieci, w tym 2587km kolei użytku publicznego i 4735 km kolei przemysłowych [5].

W początkowych latach państwowości starano się ujednolicić sieć kolejową dostosowując ją do użytku publicznego w jednym, uniwersalnym rozstawie szyn. Znaczna liczba linii szerokotorowych została przekuta na rozstaw normalny i weszła do systemu ogólnopaństwowej kolei publicznej, będącej pod nadzorem przedsiębiorstwa PKP [10]. Linie kolei wąskotorowych w większości przypadków były tzw. liniami dowozowymi (lokalnymi) lub liniami dla potrzeb wewnętrznych przedsiębiorstw. Równie często były one budowane na potrzeby wojskowe zmieniającego się frontu I Wojny Światowej [10]. Wraz z uspokojeniem sytuacji polityczno-gospodarczej zdecydowano, że linie wąskotorowe co do zasady nie będą unifikowane do systemu kolei normalnotorowej, a w większości wypadków pozostawią swój pierwotny charakter. Co więcej, zdecydowano, że spora ich część może zostać

rozbudowana, a nowe linie kolei wąskotorowej mogą zostać wykorzystane do obsługi odradzającego się przemysłu oraz nowopowstających przedsiębiorstw. Na obecnym obszarze Polski linie kolei wąskotorowych osiągnęły swoją maksymalną długość w drugiej połowie lat dwudziestych licząc ponad 4100 km (około 50 różnych sieci). Uwzględniając ówczesne granice Polski łączna długość linii kolejowych wąskotorowych sięgała 7322km [2].

Rozwój kolei w Polsce (w tym wąskotorowej) został przerwany przez działania wojenne prowadzone w latach 1939-1945. Podobnie jak w poprzednim konflikcie, linie kolejowe odgrywały dominującą rolę w przewożeniu wojsk, logistyce zapasów, a także w sposób bezpośredni poprzez wykorzystanie jako broń do rażenia celów wojskowych. Zakończenie walk, a także zmiana sytuacji polityczno-gospodarczej miała przełożenie również na sieć kolejową w Polsce. W pierwszych powojennych latach skupiono się na odbudowie zniszczonych linii. Co istotne, liczba zniszczonych kolei wąskotorowych była stosunkowo mała i liczyła nieco ponad 400 km [5]. Odbudowa infrastruktury pozwalała na stopniowe przywracanie regularnego ruchu pociągów. Już w roku 1946 eksploatowanych było około 3384 km linii kolei wąskotorowej [10].

Lata 50 XX wieku przyniosły przebudowę niektórych kolei wąskotorowych ze zmianą szerokości toru z 600mm na 750mm (m.in. ełcka, jędrzejowska, bieszczadzka), a także modernizacji linii. W ramach przebudowy zmieniano elementy nawierzchniowe na bardziej wytrzymałe, przebudowano mosty, a także korygowano układ geometryczny istniejących tras [5]. Równocześnie, na lata 50 XX wieku przypada okres, w którym oddano do użytku ostatnie odcinki linii wąskotorowych w Polsce. Ówczesny system kolei wąskotorowej był największym w jej historii



1. Długość linii kolejowych na obecnym terytorium Polski 1842-2002

Źródło: [10]

i liczył 36 różnych systemów [3]. Od tego czasu liczba użytkowanych linii kolei wąskotorowej malała. W latach 1952-2001 długość linii kolei wąskotorowych zmniejszyła się prawie o 75%, licząc w roku 2001 jedynie 985km eksploatowanych linii kolejowych. Rozwój kolei w Polsce, w tym wąskotorowych odzwierciedlony sumaryczną długością linii kolejowych przedstawiono na rysunku 1.

Przekształcenie oraz podział spółki PKP w roku 2001 zapoczątkowały przeobrażenia w zakresie zarządu nad liniami wąskotorowymi, które do tego czasu pozostawały w strukturze państwowego przedsiębiorstwa kolejowego. Wobec braku spójnego pomysłu restrukturyzacji oraz zmiany sposobu zarządu nad tym segmentem infrastruktury kolejowej na przestrzeni lat linie wąskotorowe ulegały systematycznej degradacji [5]. Przeciwdziałając takiemu stanowi rzeczy powstawały liczne stowarzyszenia, organizacje, a także inne inicjatywy lokalne, które przejmowały nadzór nad liniami wąskotorowymi. Obecnie, zarząd nad 25 systemami kolei wąskotorowymi pełnią m.in. jednostki samorządu terytorialnego, instytucje państwowe (np. parki krajobrazowe), a także dedykowane stowarzyszenia. Ruch na tego typu infrastrukturze ma charakter turystyczny, w większości wypadków bez regularnego rozkładu jazdy [12]. Zestawienie czynnych linii wąskotorowych wraz ze wskazaniem rozstawu szyn znajduje się w tabeli 1.

Projektowanie i budowa linii wąskotorowych

Historycznie, linie wąskotorowe były budowane w oparciu o ówczesnie obowiązujące przepisy techniczne. W wielu przypadkach wytyczne projektowe stanowiły autorskie rozwiązania proponowane przez projektantów (właścicieli) powstających linii wąskotorowych. Po odzyskaniu niepodległości w roku 1918 pojawiły się pierwsze ogólne przepisy tech-

niczne, które po zakończeniu II Wojny Światowej oraz nacjonalizacji kolei przez spółkę PKP zostały zunifikowane i ujęte w formie obowiązujących standardów. Wśród pierwszych dokumentów regulujących tę kwestię wymienia się m.in. Instrukcję W1-PET z roku 1947 [6] dotyczącą budowy i eksploatacji kolei wąskotorowych użytku publicznego. Wraz z ewolucją konstrukcji drogi szynowej, a także z uwzględnieniem zmiany w transporcie kolejowym przepisy te ulegały liczным zmianom. Po przekształceniach ustrojowych w 1989r., a także restrukturyzacji na PKP w roku 2001 zasady projektowania, budowy oraz eksploatacji linii kolejowych zostały przeformułowane, a stosownym dokumentem odniesienia stały się akty prawa krajowego.

Obecnie, linie wąskotorowe, podobnie jak pozostałe systemy kolei, stanowią w rozumieniu ustawy [13] obiekt budowlany - budowlę. Tego typu obiekty budowlane posiadają dedykowane rozporządzenie wykonawcze, w którym określone są warunki techniczne jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. Obecnie warunki techniczne mają formę rozporządzenia wykonawczego, a ich ostatnia nowelizacja przypada na rok 2024 [8].

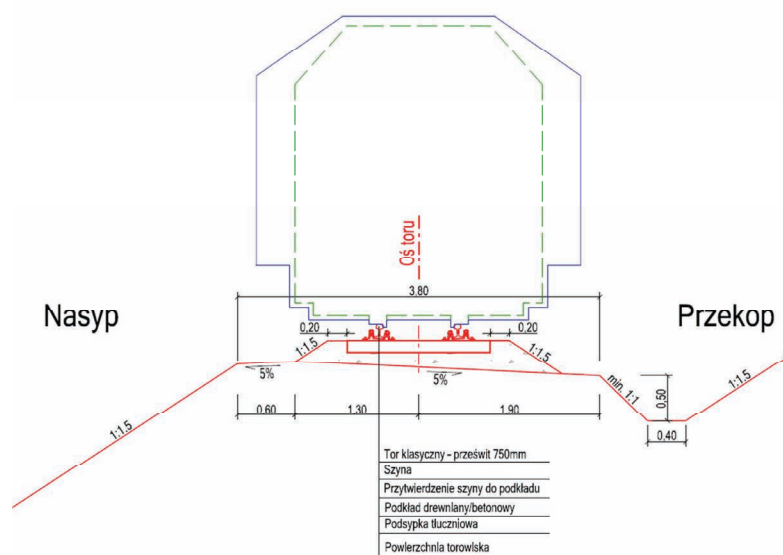
Rozporządzenie [8] składa się z 9 działów, w którym wyspecyfikowane są wytyczne w zakresie projektowania, budowy oraz eksploatacji kolejowych obiektów budowlanych. Najbardziej obszernym jest dział 3 dotyczący linii normalnotorowych, stanowiących podstawowy typ na polskiej sieci kolejowej. W ramach tego działu zdefiniowane są typowe rodzaje elementów drogi kolejowej, ich wymagania, a także parametry

Tab. 1. Zestawienie czynnych linii wąskotorowych w Polsce [12]

Lp	Nazwa	Długość [km]	Rozstaw szyn [mm]
1	Bieszczadzka Kolejka Leśna	15	750
2	Ekcka Kolej Wąskotorowa	15,2	750
3	Gnieźnieńska Kolej Wąskotorowa	3,8	750
4	Górnośląskie Koleje Wąskotorowe	21	785
5	Kaliska Kolej Dojazdowa	12	750
6	Kolejka Wąskotorowa w Rudach	7	785
7	Kolejka Parkowa Maltanka	3,6	600
8	Koszalińska Kolej Wąskotorowa	20	1000
9	Krośnicka Kolej Wąskotorowa	3,3	750
10	Nadmorska Kolej Wąskotorowa	39,9	1000
11	Nadwiślańska Kolej Wąskotorowa	18,8	750
12	Piaszczyńska Kolej Wąskotorowa	15	1000
13	Pleszewska Kolej Dojazdowa	4	750
14	Przeworska Kolej Wąskotorowa	46,2	750
15	Kolej Wąskotorowa Rogów-Rawa-Biała	49	750
16	Sochaczewska Kolej Muzealna	17,6	750
17	Starachowiecka Kolej Wąskotorowa	20	750
18	Śmigiełska Kolej Wąskotorowa	7	750
19	Średzka Kolej Wąskotorowa	14	750
20	Świętokrzyska Kolej Wąskotorowa	18	750
21	Wąskotorowe Kolejki Leśne	17,9	600
22	Helska Kolej Wąskotorowa	1	600
23	Wyrzyska Kolej Powiatowa	12	600
24	Żnińska Kolej Powiatowa	12	600
25	Żuławska Kolej Dojazdowa	32	750

Tab. 2. Parametry techniczno-eksploatacyjne wąskotorowych linii kolejowych [8]

Kategoria linii kolejowej wąskotorowej	Obciążenie przewozami T [Gg/rok]	Prędkość maksymalna V _{max} [km/h]	Dopuszczalne naciski osi P [kN]
I	T ≥ 100	V _{max} > 40	8,3
II	50 ≤ T < 100	30 ≤ V _{max} ≤ 40	8,3
III	T < 50	V _{max} ≤ 30	8,3



2. Przekrój linii wąskotorowej kat. II na odcinku prostym
Źródło: [opracowanie własne]

techniczno-eksploatacyjne.

Dla potrzeb linii wąskotorowych zastosowanie ma przede wszystkim dział 4, a w sprawach, które nie zostały unormowane odniesieniem są przepisy dla linii normalnotorowych (dział 3). Zgodnie z treścią Rozporządzenia wyróżnia się w Polsce 3 podstawowe szerokości toru wąskiego wynoszące odpowiednio: 750mm, 785mm oraz 1000mm. Drogi szynowe wąskotorowe dzieli się na trzy kategorie. Parametrami techniczno-eksploatacyjnymi przypisanymi do poszczególnych kategorii są: obciążenie przewozami [Gg/rok], prędkość maksymalna [km/h] oraz dopuszczalna naciska osi [kN]. Kategorie te i ich parametry techniczno-eksploatacyjne przedstawiono w tabeli 2.

Przepisy techniczne określają również wymogi konstrukcyjne dla podtorza (wraz z odwodnieniem), jego kształt, a także zalecane elementy konstrukcyjne nawierzchni kolejowej. Dla posterunku ruchów wyspecyfikowane są typy rozjazdów, które powinny być stosowane zgodnie z przyjętą kategorią linii i przeznaczenia torów kolejowych. Dodatkowo, przywołane są także odniesienia do wymogów skrajni, zarówno taboru jak i budowli. Typowy przekrój konstrukcyjny dla linii wąskotorowej kat. II przedstawiono na rysunku 2.

Oprócz wymogów konstrukcyj-

nych dla nawierzchni kolejowej, linia wąskotorowa powinna zostać odpowiednio zaprojektowana w planie oraz w profilu. W przypadku parametrów geometrycznych linii w profilu należy dobrać odpowiednią wartość pochylenia niwelety toru, a przy dużych wartościach różnicy sąsiednich pochyłeń (różnica sąsiednich załomów niwelety większa od 4‰) zaleca się, aby załomy wyłagodzić łukiem pionowym o określonym promieniu [8]. W tabeli 3 przedstawiono miarodajne pochylenia dla linii wąskotorowych.

Decydującym czynnikiem wpływającym na możliwość zwiększenia prędkości maksymalnej na linii kolejowej jest odpowiednie dobranie parametrów geometrycznych toru w płaszczyźnie poziomej. W tym celu projektowane są odcinki proste oraz łuki poziome, o promieniach w zakresie 100 do 2000m zgodnie z planowanym trasowaniem. Na łukach o $R < 2000m$ projektowana jest przechyłka, a na połączeniu z prostą łuków o promieniu mniejszym niż 300m należy stosować krzywe przejściowe. Przechyłkę oblicza się zgodnie z wzorem (1), przy czym maksymalna wartość przechyłki (h) wynosi 80mm:

$$h = (6,4 \cdot v^2) / R \quad (1)$$

gdzie:

h – wartość przechyłki [mm]

v – prędkość techniczna najszybszego pociągu na danej linii [km/h]

R – promień łuku [m]

Należy również podkreślić, że przepisy techniczne mogą zostać zmodyfikowane w ramach wewnętrznych regulacji zarządcy infrastruktury, o ile nie stoją w sprzeczności z warunkami nadrzędnymi. Wewnętrzne regulacje uwzględniają również lokalną specyfikę linii kolejowej, posiadany tabor, a także uwarunkowania zewnętrzne.

Przykład możliwości dostosowania linii kolejowej do podwyższenia prędkości maksymalnej

Ustalenie maksymalnej prędkości poruszających się pojazdów po linii wąskotorowej wynika zarówno z przepisów technicznych [8], związanych z konstrukcją drogi kolejowej, jak również z warunków prowadzenia ruchu kolejowego i sygnalizacji. Do czasu nowelizacji Rozporządzenia [7] w maju 2025r. maksymalna dopuszczalna prędkość ruchu kolejowego na liniach wąskotorowych wynosiła 40km/h. Nowelizacja warunków prowadzenia ruchu kolejowego i sygnalizacji [9] umożliwi formalnie zwiększenie prędkości maksymalnej kolei wąskotorowych do 80km/h. Wobec czego, zarządcy infrastruktury kolei wąskotorowej mogą przystąpić do modernizacji linii kolejowych polepszając ofertę przewozową. Dla zaprezentowania możliwości technicznych dostosowania istniejącej linii kolei wąskotorowych do możliwości prowadzenia ruchu pociągów z prędkością do 80 km/h co wynika z nowych przepisów [9] wykorzystano przykład linii „Świętokrzyskiej Kolejki

Tab. 3. Pochylenia miarodajne na kolejach wąskotorowych [8]

Kategoria linii	Największe pochylenie miarodajne przy trakcji [‰]	
	Pojedynczej	podwójnej
I, II	20	30
III	25	40

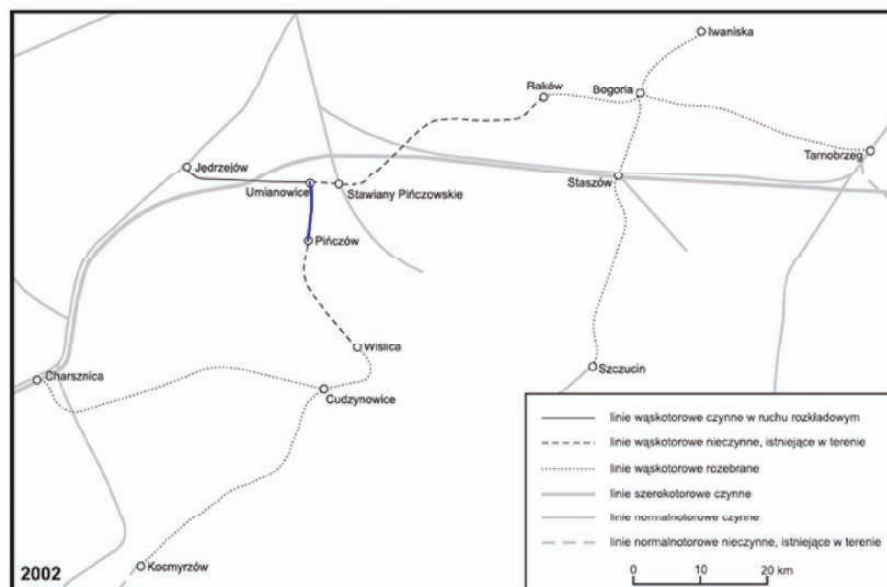
Wąskotorowej Ciuchcia Ponidzie” na odcinku Umianowice – Pińczów.

Przedmiotowa linia kolejowa wąskotorowa wchodzi w skład tzw. kolei jędrzejowskiej będącej pozostałością większego systemu kolei wąskotorowych łączących w przeszłości Jędrzejów z większymi ośrodkami miejskimi województwa małopolskiego (Kraków/Kocmyrzów, Tarnów/Szczucin) oraz podkarpackiego (Tarnobrzeg). Układ linii według stanu na rok 2002 przedstawiono na rysunku 3.

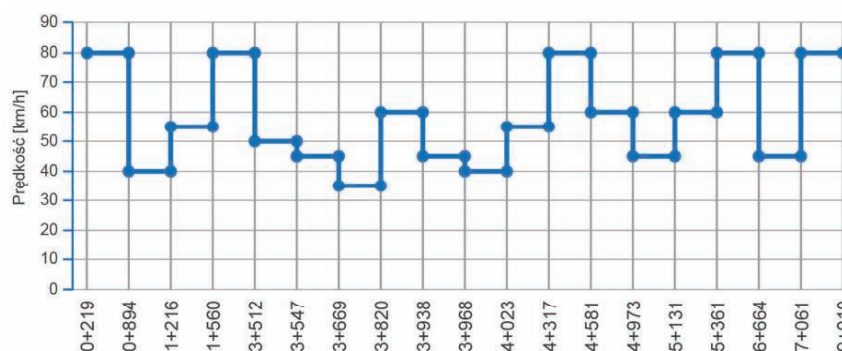
Infrastruktura kolejowa wchodząca w skład Kolejki Wąskotorowej „Ponidzie” stanowi linię kolejową wąskotorową o prześwicie 750mm. Linia jest linią jednotorową, niezelektryfikowaną, z przeznaczeniem turystycznym, do obsługi ruchu pasażerskiego. Analizowany odcinek rozpoczyna się na stacji Umianowice (km 0+000), a kończy na stacji Pińczów (km 9+177). Stacja Umianowice jest stacją węzłową, której układ torowy stanowi trójkąt umożliwiający realizację połączeń Jędrzejów – Stawiany Pińczowskie, Jędrzejów – Umianowice – Pińczów, Stawiany Pińczowskie – Pińczów bez zmiany czoła pociągów. Stacja Pińczów jest obecnie stacją końcową (likwidacja odcinka Pińczów - Wiślica w latach 2014-2015). Na obu stacjach zastosowano rozjazdy zwyczajne o skosie 1:7 i promieniu toru zwrotnego 100m.

W stanie istniejącym nawierzchnia kolejowa składa się z szyn, podkładów i podsypki oraz złączy i złączek:

- Podsypka tłuczniowa jest zanieczyszczona roślinnością, a także gruntami i kruszywem o drobnej frakcji
- Podkłady drewniane w rozstawie 65-70 cm
- Szyny S49 i S42 oraz lżejsze w rozstawie 750 mm
- Przytwierdzenia szyn do podkładów pośrednie typu K lub bezpośrednie z zastosowaniem wkretów
- Połączenia końców szyn za po-



3. Jędrzejowska kolej wąskotorowa – stan z 2002r. Odcinek Umianowice – Pińczów oznaczono kolorem niebieskim Źródło: [10]



4. Profil prędkości maksymalnych na odcinku Umianowice-Pińczów Źródło: [Opracowanie własne]

mocą łuków czterootworowych stanowiące złącza podparte

Obecnie, Zarządca infrastruktury kolejowej prowadzi inwestycję, która ma na celu osiągnięcie parametrów eksploatacyjnych kategorii II wąskotorowej linii kolejowej, tj.:

- Obciążenie przewozami T [Gg/rok] - $50 \leq T \leq 100$;
- Prędkość maksymalna V_{max} [km/h] - $V_{max} \leq 40$;
- Dopuszczalny naciski osi P [kN] – 8,3.

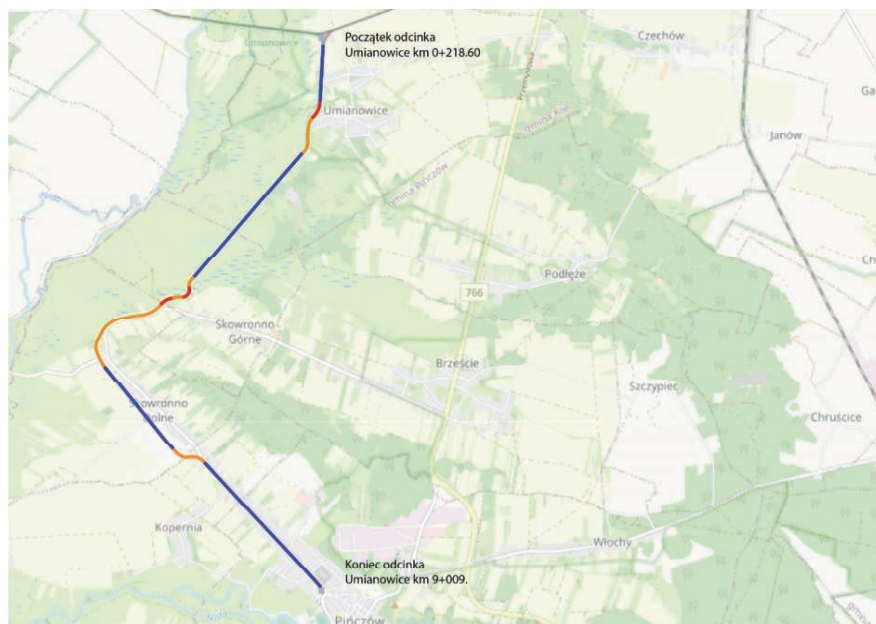
Jednym z kluczowych założeń prowadzonego przedsięwzięcia jest pozostawienie bez zmian układu geometrycznego linii kolejowej w planie. W tym celu Projektant zdecydował się pozostawić promienie łuków bez zmian, wprowadzając przechyłkę na

łukach poziomych, a w przypadku osiągnięcia maksymalnej przechyłki stosując lokalne ograniczenia prędkości maksymalnej. Do dalszej analizy przyjęto odcinek szalkowy, tj. od km. 0+218,60 do km 9+009,78 o łącznej długości 8791,18m.

Odcinek szalkowy składa się z prostych, połączonych 21 łukami poziomymi. Promienie łuków mają wartości od 98m do 30 000m. Na wszystkich łukach, z wyjątkiem łuku o promieniu 98m, udało się osiągnąć założoną prędkość maksymalną. Dla łuku o promieniu 98m zastosowano maksymalną wartość przechyłki, wynoszącą 80mm, a także założono lokalne ograniczenie prędkości do 35km/h. Długość odcinka z ograniczoną prędkością wynosi 150,39m (wraz z przyległymi krzywymi przejściowymi), co stanowi 1,71% analizo-

Tab. 4. Analiza prędkości na łukach poziomych odcinek Umianowice - Pińczów

L.P.	Kilometr początkowy	Kilometr końcowy	Długość łuku	Promień łuku	Prędkość maksymalna	Minimalna przechyłka
	[km]	[km]	[m]	[m]	[km/h]	[mm]
1	923,97	960,28	36,31	120	40	80
2	1 142,89	1 180,89	37,99	130	40	80
3	1 394,82	1 530,12	135,30	245	55	80
4	3 522,01	3 546,76	24,74	200	50	80
5	3 546,76	3 612,20	65,44	166	40	65
6	3 694,20	3 784,58	90,38	98	35	80
7	3 967,90	3 987,90	20,00	180	45	75
8	3 987,90	4 022,94	35,05	126	40	80
9	4 022,94	4 065,63	42,69	730	80	55
10	4 085,63	4 105,75	20,12	2250	80	20
11	4 184,65	4 261,94	77,30	237	55	80
12	4 261,94	4 286,94	25,00	290	60	80
13	4 601,11	4 669,40	68,30	305	60	80
14	4 729,40	4 807,58	78,18	283	60	80
15	4 807,58	4 872,58	65,00	290	60	80
16	5 003,10	5 100,92	97,83	159	45	80
17	5 257,18	5 341,56	84,39	285	60	80
18	5 511,84	5 554,86	43,02	20000	80	-
19	6 694,49	6 781,40	86,91	160	45	80
20	6 944,84	7 031,07	86,23	160	45	80
21	8 602,77	8 637,85	35,08	30 000	80	-



5. Wizualizacja prędkości maksymalnych na odcinku Umianowice-Pińczów

Źródło: [Opracowanie własne]

wanego odcinka. Pozostałe odcinki stanowią proste, które oprócz wymogów dot. materiałów nawierzchniowych nie posiadają dodatkowych założeń związanych z ograniczeniem prędkości, stąd zakładana jest prędkość maksymalna wynosząca 40km/h.

Próba modernizacji analizowanego odcinka linii wąskotorowej będzie miała na celu zwiększenie prędkości maksymalnej do i 80km/h. Przyjęto także, że w ramach modernizacji przebieg linii nie ulegnie zmianie, więc zasadniczo sprawdzenie możliwości polepszenia warunków tech-

niczno-eksploatacyjnych sprowadziło się do weryfikacji parametrów łuków zgodnie z wzorem (1). Wyniki obliczeń, dla wszystkich 21 łuków poziomych przedstawiono w tabeli 4.

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że jedynie promienie 4 spośród 21 łuków poziomych były na tyle duże, aby bez ich korekty możliwa była jazda z prędkością maksymalną 80km/h. Dla 13 łuków jest możliwe lokalne zwiększenie prędkości w zakresie od 45km/h do 60km/h. Na pozostałych 4 łukach o najmniejszych promieniach ze względu na ograniczenie przechyłki do 80 mm, nie było możliwości zmiany wartości prędkości maksymalnej. Uwzględniając zaproponowane korekty przechyłki na łukach poziomych, a także biorąc pod uwagę odcinki proste stwierdza się, że możliwym jest osiągnięcie prędkości maksymalnej 80km/h na długości 7016,84m, co stanowi 79,82% analizowanego odcinka.

Techniczne możliwości linii kolejowej powinny zostać skonfrontowane z możliwością prowadzenia ruchu kolejowego. Punktowe zmiany prędkości jazdy pociągów nie są zalecane ze względów ekonomicznych i mogą także powodować dyskomfort pasażerów. W tym celu zaproponowano racjonalizację prędkości maksymalnych na analizowanym odcinku. Osiągnięto w ten sposób redukcję długości odcinków z prędkością maksymalną do poziomu 6143,08m, co stanowi 69,88% analizowanego odcinka. Profil prędkości maksymalnych po wprowadzeniu proponowanych zmian wartości przechyłki na łukach przedstawiono na rysunku 4.

Na rysunku 5 przedstawiono zakres występowania różnych wartości prędkości maksymalnych na analizowanym odcinku Umianowice-Pińczów. Na rysunku kolorem czerwonym zaznaczono odcinki o prędkości 40km/h i mniejszej, kolorem pomarańczowym odcinki o prędkości od 45km/h do 60km/h (odcinki o prędk-

kości „pośredniej”), a kolorem fioletowym odcinki, w których możliwe jest osiągnięcie prędkości maksymalnej, tj. 80km/h.

Bariery modernizacji kolei wąskotorowych

Zmiana rozporządzenia [7] stawia formalne możliwości wprowadzenia większych prędkości maksymalnych na istniejących liniach wąskotorowych. Obowiązujące przepisy techniczne [8] umożliwiają także zastosowanie zmian projektowych, potwierdzające te parametry techniczno-eksploatacyjne na eksploatowanych liniach. Istnieją jednak inne uwarunkowania, które powinny zostać uwzględnione podczas projektowania modernizacji linii, gdyż swym zakresem oddziałują na planowane inwestycje budowlane.

Infrastruktura, w tym obiekty inżynieryjne

Infrastruktura kolejowa niezbędna do prowadzenia ruchu kolejowego obejmuje wiele obiektów budowlanych, w tym m.in.: przejazdy kolejowo-drogowe, budynki stacyjne, perony, a także obiekty inżynieryjne [8]. Każdy z tych obiektów, podobnie jak droga kolejowa, winien zostać dostosowany do obowiązujących przepisów, w tym warunków technicznych, adekwatnych do rodzaju obiektu budowlanego. Większość infrastruktury kolejowej na istniejących liniach wąskotorowych była projektowana w oparciu o nieaktualne normy i wytyczne. Wobec czego, zachodzi realna obawa, że obiekty te nie spełnią aktualnych wymogów. Choć część założonych parametrów technicznych może zostać spełniona przez istniejące obiekty [1], to występuje duże prawdopodobieństwo, iż dla obiektów o konstrukcji drewnianej, betonowej lub żelbetowej nie zostaną spełnione podstawowe właściwości użytkowe (nośność, maksymalne



6. Stan istniejącego mostu kolejowego w km 3+622: ustrój nośny (rys. lewy), nawierzchnia na obiekcie (rys. prawy). Źródło: [Opracowanie własne]



7. Stan nawierzchni kolejowej na odcinku Umianowice-Pińczów; podkłady w km 8+900 (rys. lewy), styki klasyczne w km 8+500 (rys. prawy). Źródło: [Opracowanie własne]

dopuszczalne odkształcenia). Modernizacja obiektów inżynieryjnych, jak i pozostałych elementów infrastruktury wydaje się niezbędna w ramach planowanych modernizacji linii wąskotorowych. Jako przykład degradacji przedstawiono stan obiektów na odcinku Umianowice – Pińczów przed rozpoczęciem inwestycji (rysunek 6).

Oprócz obiektów inżynieryjnych na analizowanym odcinku Umianowice-Pińczów, większość obiektów wyposażenia linii kolejowej wykonana jest z materiałów o dość dużym zużyciu, znacznym stanie degradacji lub niedostosowanych do bieżących reżimów technologicznych. Choćby ponowne wykorzystanie materiałów nawierzchniowych wydaje się utrudnione. Na analizowanym odcinku występują znaczne braki w asortymencie nawierzchniowym, a pozostałe elementy posiadają ubytki związane z eksploatacją lub oddziaływaniem czynników zewnętrznych. Przykłady stanu zdegradowanej nawierzchni przedstawiono na rysunku 7.

Tabor

Istotnym czynnikiem wpływającym na możliwość rozwijania zwiększonej prędkości maksymalnej jest dysponowanie odpowiednim taborem, który może obsługiwać zmodernizowaną linię kolejową. Obecnie wykorzystywane pojazdy trakcyjne na liniach wąskotorowych to głównie parowozy, lokomotywy spalinowe lub wagony motorowe [5]. Maksymalna prędkość tych pojazdów w wielu przypadkach jest zdecydowanie mniejsza niż 80km/h. Na Jędrzejowskiej Kolei Wąskotorowej wykorzystywany jest m.in. parowóz wąskotorowy Dh2 (Px48), którego maksymalna prędkość konstrukcyjna wynosi jedynie 35km/h. Stanowi to zaledwie 43% możliwej po modernizacji prędkości maksymalnej. Po przeprowadzeniu modernizacji związanej ze zwiększeniem prędkości maksymalnej Zarządca linii nie byłby w stanie wykorzystać nowych jej możliwości w związku z ograniczeniami posiadanego taboru. Istnieje zatem realna obawa, że oprócz

nakładów finansowych poniesionych na modernizację infrastruktury kolejowej zarządcy zmuszeni byłiby do zakupu nowego taboru w celu możliwości wykorzystania osiągniętych w modernizacji parametrów techniczno-eksploatacyjnych.

Uwarunkowania lokalne

Wśród wielu problemów, które mogą się pojawić podczas modernizacji linii wąskotorowych należy uwzględnić także okoliczności typowe dla wielu istniejących systemów kolejowych. Jak wskazuje [10] nakłady prac niezbędnych do poniesienia w ramach inwestycji są możliwe do oszacowania. Pojawia się jednak wiele czynników ryzyka, które mogą zaistnieć podczas realizacji przedsięwzięcia, w szczególności w fazie budowy. Dostępne technologie oraz wykwalifikowany sprzęt roboczy w większości przypadków nie jest dostosowany do prac na liniach wąskotorowych [5]. Podobnie, nie istnieje wiele rozwiązań, które są powszechne dla analogicznych zakresów prac na liniach kolejowych o normalnym rozstawie (m.in. mechanizacja robót, rozwiązania typowe, zunifikowana konstrukcja drogi kolejowej, etc.). Dodatkowo, znaczna część infrastruktury kolejowej jest objęta formą ochrony konserwatora zabytków. Stan ten mocno utrudnia ingerencję w istniejącą infrastrukturę oraz wymaga wielu dodatkowych procedur, które nie są powszechne w przypadku typowych prac w czynnej infrastrukturze normalnotorowej. Rozpoznanie wszelkich ryzyk związanych z modernizacją linii wąskotorowych jest trudne i wymaga każdorazowo pogłębionych analiz, w tym finansowo-ekonomicznych.

Podsumowanie

Nowelizacja [7] rozporządzenia [9] wprowadza możliwość zwiększenia prędkości maksymalnej do 80km/h

na liniach wąskotorowych. Istniejąca infrastruktura zgodnie z obowiązującymi warunkami technicznymi pozwala na wprowadzenie zmian tego parametru. Występuje jednak wiele czynników, które powinny zostać uwzględnione podczas planowania przyszłych modernizacji linii wąskotorowych. Wśród nich zalicza się m.in. analizę stanu formalno-prawnego, konstrukcji pozostałych obiektów budowlanych zaliczanych w skład infrastruktury kolejowej, czy też ekonomikę procesu budowlanego. Jak wykazują jednak obecne działania [4], istnieje spora szansa na włączenie istniejących linii wąskotorowych do systemu kolejowego w Polsce, po zmodernizowaniu infrastruktury oraz dostosowaniu jej do obowiązujących standardów technicznych. ◀

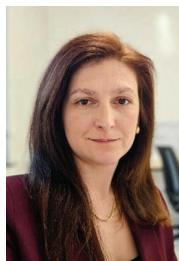
Materiały źródłowe

- [1] Bacinskas, D., Kamaitis, Z., Jatulis, D., & Kilikevicius, A. (2013). Field testing of old narrow-gauge railway steel truss bridge. *Procedia Engineering*, 57, 136-143.
- [2] Lijewski T., Koziarski S., *Rozwój sieci kolejowej w Polsce*. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 1995
- [3] Lijewski T., *Geografia transportu Polski*. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, wyd. 2, 1986
- [4] Pismo spółki CPK sp. z o.o. znak KPD.42.412.2025_110_AD z dnia 25.09.2025 – Informacja o wyborze wariantu inwestorskiego dla „Rozszerzone Studium Techniczno-Ekonomiczno-Środowiskowe dla projektu pn.: „Budowa linii kolejowej nr 88 na odc. Węzeł CPK – Grójec – Warka”
- [5] Pokropiński, B. . *Koleje wąskotorowe PKP*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1980.

- [6] Polskie Koleje Państwowe Instrukcja W1-PET kolei wąskotorowych – nr W1 Przepisy zasadnicze budowy i eksploatacji koeli wąskotorowych użytku publicznego (Dziennik Taryf i Zarządzeń Kolejowych z r. 1948 Nr 1, poz.3)
- [7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 15 kwietnia 2025r. zmieniające rozporządzenie w sprawie ogólnych warunków prowadzenia ruchu kolejowego i sygnalizacji (Dz. U. 2025 poz. 586)
- [8] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 kwietnia 2024r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie (Dz. U. 2024 poz. 640)
- [9] Rozporządzenie ministra infrastruktury z dnia 18 lipca 2005r. w sprawie ogólnych warunków prowadzenia ruchu kolejowego i sygnalizacji (Dz. U. 2005 nr 172 poz. 1444)
- [10] Taylor, Z.. *Rozwój i regres sieci kolejowej w Polsce*. Monografie-Polska Akademia Nauk. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego, 2007
- [11] Tucholski, Z. *Wojskowa kolej wąskotorowa na poligonie w Zielonce i Rembertowie*. Problemy Techniki Uzbrojenia, 2008, 37,7-27.
- [12] Urząd Transportu Kolejowego, *Poznaj polskie koleje wąskotorowe*, Warszawa, 2025
- [13] Ustawa z dnia 7 lipca 1994r. Prawo budowlane (Dz. U. 2025r. poz. 1080 z późn. zm.)
- [14] Wesołowski, J. *Historyczne uwarunkowania tworzenia systemów kolejowych na świecie (1). Powstanie kolejowych sieci ogólnego znaczenia i linii lokalnych*. TTS Technika Transportu Szynowego, 2019, 10, 19-26.

Charakterystyka infradźwięków generowanych przez pojazdy szynowe

Characteristics of Infrasound Generated by Rail Vehicles



Natalia Karkosińska-Brzozowska

Mgr inż.

Politechnika Gdańska
Katedra Inżynierii Transportowej

natalia.brzozowska@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5485-025X

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki pomiarów sygnałów akustycznych w paśmie infradźwiękowym generowanych przez różne typy pojazdów szynowych. Badania zostały wykonane na peronie kolejowym i obejmowały takie fazy ruchu pociągu jak hamowanie, postój oraz rozruch. W artykule przedstawiono wyniki analiz w dziedzinie czasu oraz wyniki analiz czasowo-częstotliwościowych. Wskazano największe wartości amplitud zarejestrowanych podczas postoju pojazdu z rozróżnieniem typu badanej jednostki. Wyniki przeprowadzonych badań podkreślają konieczność prowadzenia prac w zakresie pomiarów i analizy sygnałów akustycznych w transporcie kolejowym w paśmie infradźwiękowym. Dodatkowo, brak przepisów regulujących dopuszczalne poziomy infradźwięków generowanych przez pociągi wpływa na konieczność opracowania regulacji w tym zakresie.

Słowa kluczowe: Infradźwięki; Badania hałasu; Pojazdy szynowe

Abstract: The article presents the results of acoustic signal measurements in the infrasound range generated by various types of rail vehicles. The measurements were conducted on a railway platform and covered several phases of train operation, including braking, idling, and departure. The study includes both time-domain and time-frequency analyses. The highest amplitude values were observed during vehicle idling, with clear differences identified between the examined vehicle types. The results emphasize the need for continued research on the measurement and analysis of infrasound in railway transport. Furthermore, the lack of regulations specifying permissible infrasound levels generated by trains demonstrates the necessity of developing appropriate standards in this field.

Keywords: Infrasound; Noise measurements; Rail vehicles

Wstęp

Hałas infradźwiękowy to hałas, którego widmo jest zawarte w paśmie częstotliwości od 1 Hz do 20 Hz [17]. Ludzie mogą odbierać dźwięki o częstotliwości poniżej 20 Hz jako serię nieciągłych impulsów. Przy wyższych poziomach natężenia może pojawiać się uczucie ciśnienia w uchu oraz wibracje odczuwalne w różnych częściach ciała. Ekspozycja na infradźwięki może wywoływać dokuczliwość, senność lub problemy z koncentracją, a odczuwanie tych skutków pojawia się przy poziomach powyżej progu słyszalności [11, 13]. Pierwsze badania infradźwięków oraz ich wpływu na człowieka były prowadzone już od 1972 roku [1]. Dotyczyły one infradźwięków powodowanych przez środki transportu, takie jak samochody i autobusy, a także występujących na różnych stanowiskach pracy w przemyśle [1, 19]. Ostatnie badania nad infradźwiękami

skupiają się na ich poziomie w budynkach mieszkalnych oraz w pobliżu farm wiatrowych [3, 7], a także na ich wpływie na kierowców i pasażerów autobusów [8, 21].

Badania infradźwięków na kolei były prowadzone głównie w kontekście tuneli i wykazały, że przejazd pociągów przez tunele prowadzi do generowania infradźwięków poprzez mechanizmy turbulencyjne oraz fale ciśnienia [9, 20]. Prowadzono również pomiary infradźwięków wewnątrz pojazdów, mające na celu analizę wpływu hałasu i drgań na obsługę pociągów oraz pasażerów [5, 10, 21]. Analiza literatury wskazuje ponadto na nieliczne prace dotyczące infradźwięków pochodzących od przejeżdżających pociągów i ich wpływu na środowisko [2].

Wciąż brakuje jednak kompleksowych badań nad infradźwiękami generowanymi przez przejeżdżające pociągi, co skutkuje brakiem pełnej wiedzy na

temat ich intensywności, rozprzestrzeniania się oraz wpływu poszczególnych elementów infrastruktury i taboru na ich powstawanie. Istniejące kryteria oceny hałasu infradźwiękowego znacznie różnią się między krajami [14]. W Polsce obowiązują normy, takie jak [17] dotycząca pomiaru infradźwięku na stanowiskach pracy oraz [15] odnosząca się do emisji hałasu wewnątrz kabin maszynisty. Na uwagę zasługuje fakt, że w 2022 roku norma [15] została zastąpiona przez [16], w której usunięto zapis dotyczący hałasu infradźwiękowego. Brakuje również norm dotyczących badania infradźwięków od przejeżdżających pociągów w tzw. teście pass-by. Wielu badaczy podejmuje temat ustalenia dopuszczalnych poziomów infradźwięków w środowisku [14], chociaż jedynie kilka krajów (Dania, Australia, Japonia) wprowadziło limity dla infradźwięków, zwykle nieprzekraczające 85–90 dB(G) [12].



1. Lokalizacja pomiarów wraz z usytuowaniem sprzętu pomiarowego [opracowanie własne]

Szczegółowa analiza literatury wskazuje na istniejącą lukę badawczą oraz potrzebę przeprowadzenia badań infradźwięków generowanych przez pociągi o różnym typie zasilania – spalinowym i elektrycznym – na peronach wybranej linii kolejowej. Celem badań była identyfikacja sygnatur infradźwiękowych w odniesieniu do typu pojazdu szynowego oraz ocena poziomów równoważnych w paśmie infradźwiękowym z wykorzystaniem korekcji G.

Metodyka badań

W celu wykonania pomiarów natężenia poziomu dźwięku wykorzystano mikrofony infradźwiękowe typu 4193-L-004 klasy 1 o zakresie częstotliwości 0,07–20000 Hz oraz kasetę rejestrującą sygnał akustyczny typu 3050-A-060-R firmy HBK – Hottinger Brüel & Kjær. Badania przeprowadzono na czterech peronach linii kolejowej nr 248 (Pomorska Kolej Metropolitalna). Mikrofony ustawiono w odległości 2,5 m od krawędzi peronu, z czego jeden znajdował się na wysokości 0,6 m, a drugi na wysokości 2 m od poziomu peronu. Rozmieszczenie mikrofonów przedstawiono na rysunku nr 1. Wyszczególniono sześć punktów pomiarowych: po jednym na przystankach Gdańsk Strzyża i Gdańsk Kiełpinek oraz po dwa punkty na przystankach Gdańsk

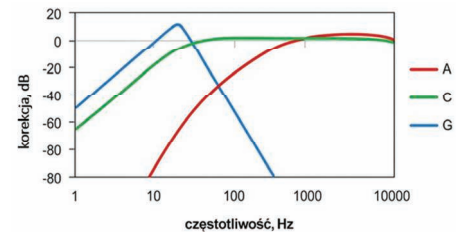
Niedźwiednik i Gdańsk Jasień. Rejestrowano cały cykl przejazdu pociągu, obejmujący wjazd, hamowanie, postój, rozruch oraz wyjazd. Podczas badań zarejestrowano ponad 100 przejazdów. Rozróżniono sześć typów pojazdów, z czego większą część stanowiły trzy typy: SA136, EN57AL oraz 36WEhb. Zestawienie liczby zarejestrowanych przejazdów poszczególnych typów pojazdów szynowych przedstawiono w tabeli nr 1.

Analiza wyników badań

W celu prowadzenia kompleksowych analiz hałasu zwykle wykorzystuje się krzywe korekcyjne, dobierane w zależności od celu badań (rys. 2). Krzywa korekcji A jest używana w ocenie hałasu słyszalnego dla człowieka i wykorzystywana m.in. w dobowych pomiarach środowiskowych, zgodnie z Rozporządzeniem [18]. Zastosowanie krzywej A powoduje silne tłumienie niskich częstotliwości. Krzywa korekcji C, stosowana między innymi w pomiarach hałasu lotniczego, tłumi pasmo poniżej 10 Hz i pozostaje niemal płaska w pozostałym zakresie częstotliwości. Natomiast stosowana w niniejszym artykule krzywa korekcji G znajduje zastosowanie w analizach pomiarów infradźwięków; charakteryzuje się maksymalną czułością w okolicach 10 Hz oraz tłumieniem

Tab. 1. Zestawienie zarejestrowanych przejazdów [opracowanie własne]

Typ pojazdu	Liczba zarejestrowanych przejazdów
SA136	46
EN57AL	15
36WEhb	30
SA138	4
SA133	2
31WEbb	3



2. Krzywe korekcji A, C i G na podstawie [4]

dźwięków powyżej 20 Hz i poniżej 1 Hz.

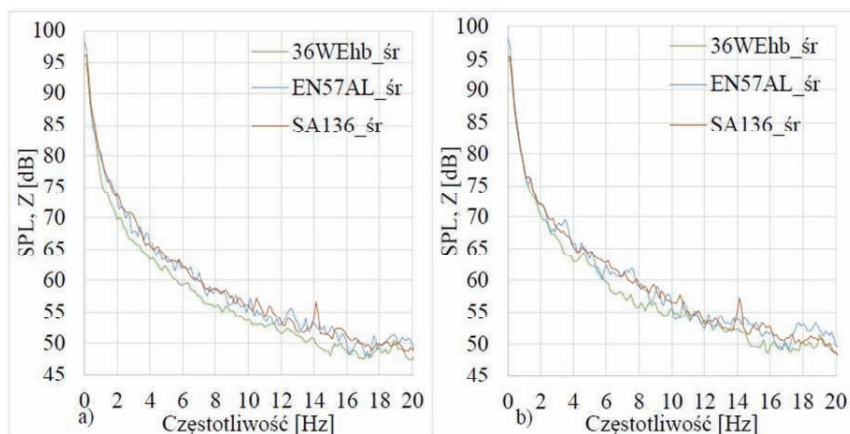
W analizie wyników obliczono uśredniony dla poszczególnych typów pojazdów równoważny poziom dźwięku L_{Eq} przejazdu z zastosowaniem korekcji G, C, A oraz Z. Zestawienie wyników dla jednego wybranego punktu pomiarowego na przystanku Gdańsk Jasień przedstawiono w tabeli nr 2. W tym punkcie pomiarowym uśredniony poziom ciśnienia akustycznego $L_{G,eq}$ dla każdego z typów pojazdów przekraczał 85 dB, natomiast we wszystkich pozostałych punktach pomiarowych wartość ta przekraczała 70 dB (G).

W kolejnym etapie analizy przeprowadzono porównanie uśrednionych widm dla różnych typów pojazdów. Na rys. 3 przedstawiono uśrednione widma dla wybranego punktu pomiarowego na peronie Gdańsk Jasień. Dla pojazdów SA136 obserwuje się wyraźny pik w zakresie 55–60 dB dla częstotliwości 14,2 Hz. Podobne wyniki uzyskano zarówno dla mikrofonu umieszczonego na wysokości 0,6 m, jak i dla mikrofonu na wysokości 2 m, a różnica w poziomie dźwięku SPL (Z) wynosi około 0,5 dB.

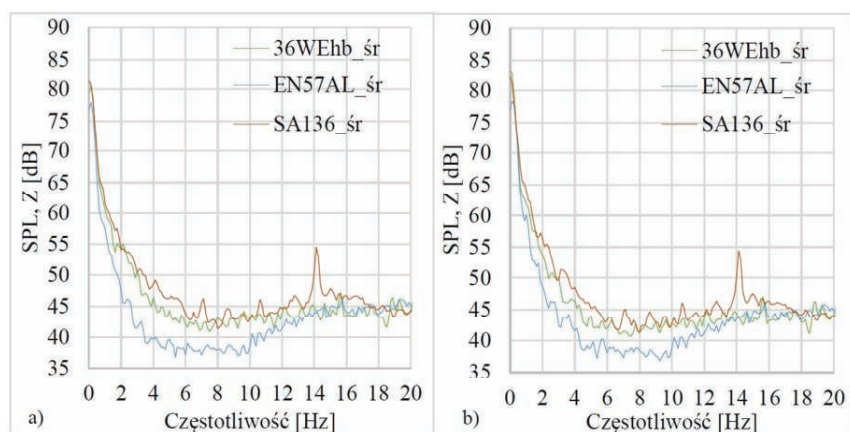
Uśrednione widma dla wybranych typów pojazdów w wybranym punkcie na peronie Gdańsk Niedźwiednik przedstawiono na rys. 4. Zakres poziomu dźwięku widma oraz jego przebieg w obu punktach pomiarowych znacznie się od siebie różni, jednak pik o częstotliwości 14,2 Hz dla pojazdów SA136 pojawia się wyraźnie w obu lokalizacjach. W pozostałych punktach pomiarowych pik ten również powtarzał się podczas przejazdu pojazdów SA136. Literatura

Tab. 3. Zestawienie wyników równoważnych poziomów dźwięku z korekcją G, C, A oraz Z

	Mikrofon 0,6 m				Mikrofon 2 m			
	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}	L_{Zeq}	L_{Geq}	L_{Ceq}	L_{Aeq}	L_{Zeq}
31WEbb	91	84	75	100	88	82	76	98
EN57AL	98	89	77	106	96	87	76	105
SA136	91	83	71	101	93	84	73	101
36WEhb	89	78	66	103	95	86	74	103



3. Uśrednione widmo dla różnych typów pojazdów w wybranym punkcie pomiarowym na peronie Gdańsk Jasień a) mikrofon na wysokości 0,6 m oraz b) mikrofon na wysokości 2 m [opracowanie własne]



4. Uśrednione widmo dla różnych typów pojazdów w wybranym punkcie pomiarowym na peronie Gdańsk Niedźwiednik a) mikrofon na wysokości 0,6 m oraz b) mikrofon na wysokości 2 m [opracowanie własne]

w tym zakresie zawiera wyniki badań opisujących hałas infradźwiękowy pochodzący od silników Diesla [6]. Pik o wartości 14,2 Hz pojawia się podczas postoju, co może wskazywać na hałas pochodzący od silnika pracującego na biegu jałowym.

Na rys. 5 przedstawiono wykresy widma w funkcji czasu dla trzech typów pojazdów: SA136, 36WEhb oraz EN57AL. Na wykresie widma w funkcji czasu dla pojazdu SA136 widoczny jest wyraźny grzbiet o częstotliwości 14,2 Hz w środkowej części pomiaru, a więc w trakcie postoju.

Wnioski

Analiza wyników przeprowadzonych badań prowadzi do następujących wniosków:

- Infradźwięki w określonym zakresie mogą być użytecznym narzędziem do rozróżniania typu pojazdu szynowego, jednak wymaga to rozszerzenia prac o kolejne próby badawcze.
- Pojazdy spalinowe typu SA136 generują wyraźny pik o częstotliwości około 14,2 Hz, który nie występuje w pomiarach pojazdów elektrycznych; pik ten jest powtarzalny nie-

zależnie od wysokości mikrofonu oraz lokalizacji punktu pomiarowego.

- Zarejestrowano również harmoniczne tonu 14,2 Hz — około 27,5 Hz oraz 42,5 Hz — związane z pracą silnika Diesla na biegu jałowym.
- Analiza widm w funkcji czasu potwierdziła, że pik infradźwiękowy występuje w fazie postoju, co wskazuje na źródła pracujące na biegu jałowym.
- Poziom równoważny dźwięku z korekcją G dla każdego z badanych typów pojazdów jest najwyższy (w porównaniu z korekcją A i C). W wielu przejazdach przekracza on 85 dB(G), czyli poziom przyjmowany jako dopuszczalny w omawianych w artykule krajach.
- Sygnały akustyczne zmierzone na peronach zawierają składowe infradźwiękowe, które nie są uwzględniane przy zastosowaniu korekcji A.
- Wyniki badań wskazują, że infradźwięki generowane przez pociągi na peronach wymagają dalszych analiz, zwłaszcza ze względu na brak norm w tym zakresie.

Podziękowania

Autorka składa podziękowania Pomorskiej Kolei Metropolitalnej (PKM S.A.) za udzielenie zgody na przeprowadzenie pomiarów akustycznych na terenie infrastruktury kolejowej.

Pomiary wykonano z wykorzystaniem aparatury pomiarowej będącej na wyposażeniu Laboratorium Badań Środowiskowych w Transporcie EcoTlab przy Katedrze Inżynierii Transportowej Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej.

Źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane ze środków Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej w ramach programu „Granty dla naukowców przed doktoratem”. ◀

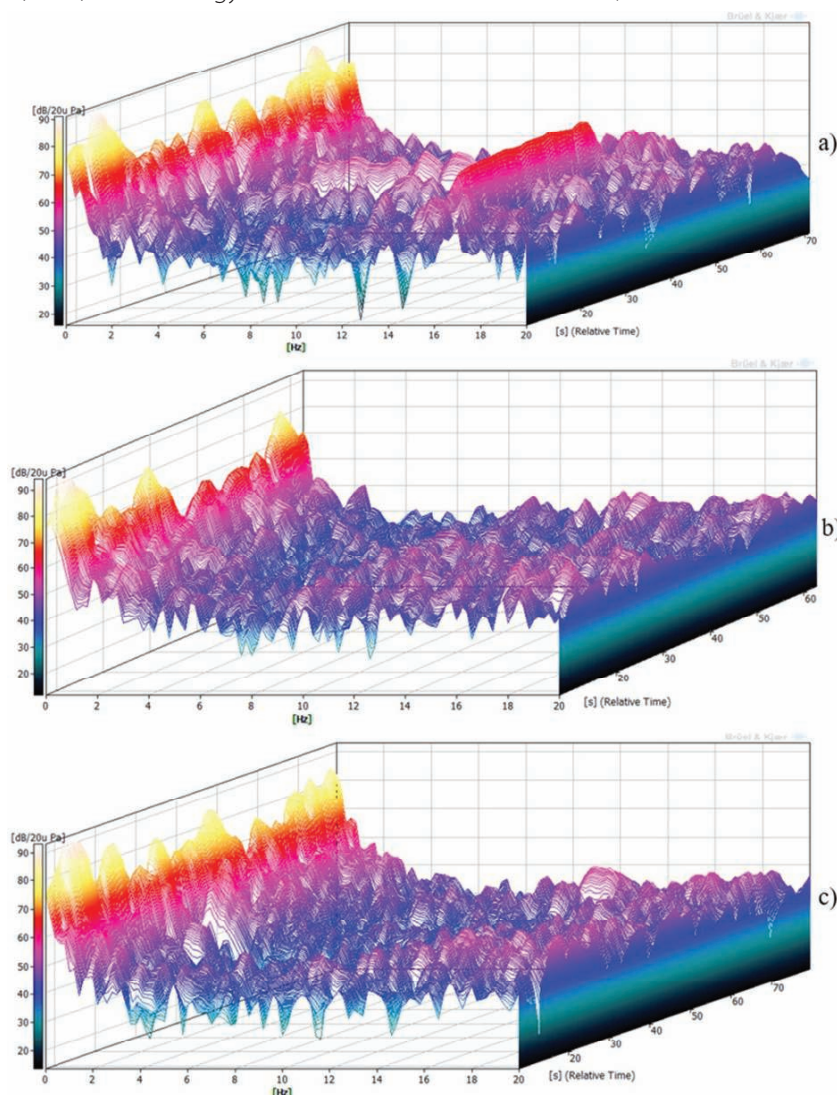
Materiały źródłowe

- [1] Evans, M. J., & Tempest, W. I. L. L. A. M. (1972). Some effects of infrasonic noise in transportation. *Journal of sound and vibration*, 22(1), 19-24.

- [2] Gužas, D., & Tricys, V. (2010). Noise in European Railway under Modernization and its Reduction. *Journal of Vibroengineering*, 12(4), 649-656.
- [3] Holeček, N. (2025). A CASE STUDY OF LOW-FREQUENCY NOISE. *Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection*, 243-254.
- [4] Explanation of technical terms concerning sound, <https://www.health.belgium.be/de/node/8453>, 24.11.2025
- [5] Igoikin, A. A., Kryuchkov, A. N., Lazutkin, G. V., & Afanasev, K. M. (2017). The Study on Vibroacoustic Characteristics of Shunting Locomotive Cabin. *Procedia Engineering*, 176, 724-731.
- [6] Ikegami Y., Nakano A. (1975). Infrasound from diesel engine. *Inter-noise 75*, p. 303-306.
- [7] Kacejko, P., Szulczyk, J., & Zagubień, A. (2024). Wind Energy: Societal and Human Impacts. CRC Press.
- [8] Kaczmarek-Kozłowska, A., Mikulski, W., Pleban, D., Kozłowski, E., & Radosz, J. (2010). Zagrożenie hałasem niskoczęstotliwościowym kierowców środków transportu drogowego. CIOP Warszawa.
- [9] Kikuchi, K., Takami, H., Iida, M. (2007). Infrasound Generated by a High-Speed Train Running through a Short Tunnel.
- [10] Kowalski, M., Ostrowski, J., Przepióra, K. (2015). Wpływ hałasu i drgań na środowisko pracy w odniesieniu do pojazdów szynowych, POJAZDY SZYNOWE NR 4/2015.
- [11] Møller, H., & Pedersen, C. S. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise & health*, 6(23), 37-57.
- [12] Pawlaczyk-Łuszczynska M, Dudarewicz A. Review of evaluation criteria for infrasound and low frequency noise in the general environment. In: Pleban D, editor. New techni-

ques and methods for noise and vibration measuring, assessing and reducing. Warsaw: CIOPIB; 2022.

- [13] Pawlaczyk-Łuszczynska, M., Dudarewicz, A., Myshchenko, I. & Bortkiewicz, A. (2023). Wpływ infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego na zdrowie i samopoczucie człowieka. Część I: przegląd badań eksperymentalnych. *Medycyna Pracy. Workers' Health and Safety*, 74(4), 317-332.
- [14] Pawlas, K., Pawlas, N., Boroń, M., Szłapa, P., & Zachara, J. (2013). Przegląd kryteriów oceny infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego w środowisku zawodowym i pozazawodowym. *Medycyna Środowiskowa-Environmental Medicine*, 16(1), 82-89.
- [15] PN-EN 15892:2011. Emisja hałasu. Pomiar hałasu wewnątrz kabin maszynisty.
- [16] PN-EN ISO 3381:2022-02 Kolejnictwo. Akustyka. Pomiar hałasu wewnątrz pojazdów szynowych
- [17] PN-Z 01338:2010. Akustyka. Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowisku pracy.
- [18] 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. poz. 824 i 1697)
- [19] Sandberg, U. (1988). Identification of infrasound generation mechanisms in a bus. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 7(3), 110-117.
- [20] Sisto, R., Pieroni, A., Lenzuni, P. (2000). High Amplitude Infrasound in Railway Tunnels.
- [21] Wolniewicz, K. B., Zagubień, A. T. (2017). Hałas infradźwiękowy w środkach komunikacji podmiejskiej. Buses. *Technics, Exploitation, Transport Systems*, Article 7-8.
- [22] Yan, L., Chen, Z., Zou, Y., He, X., Cai, C., Yu, K., & Zhu, X. (2020). Field Study of the Interior Noise and Vibration of a Metro Vehicle Running on a Viaduct: A Case Study in Guangzhou. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2807.



5. Porównanie widma w funkcji czasu dla różnych typów pojazdu: a) SA136, b) 36WEhb oraz c) EN57AL [opracowanie własne]

Ogólne równanie rampy przechyłkowej w postaci wielomianu nieparzystego stopnia

The general equation of the superelevation ramp in the form of an odd-degree polynomial



Robert Wojtczak

Mgr inż.

COWI Polska Sp. z o. o.

rowo@cowi.com

Streszczenie: W artykule przedstawiono rozwiązanie ogólnego równania rampy przechyłkowej w postaci wielomianu o dowolnym, nieparzystym stopniu, co stanowi podstawę do analizy i projektowania bardziej zaawansowanych profili ramp w infrastrukturze kolejowej. Zaprezentowano wygodną i uniwersalną metodę wyznaczania funkcji wielomianowych dowolnych stopni oraz zestawiono szczegółowe równania tych funkcji dla stopni od 1 do 15, umożliwiając ich praktyczne zastosowanie i porównanie. Wykazano, że zarówno popularna rampa liniowa, jak i rampa Blossa, rampa Wątoroka oraz rampy Hasslingera są szczególnymi przypadkami jednej rodziny ramp przechyłkowych opisanych wielomianami stopnia nieparzystego. Takie ujęcie pozwala na ich opisanie wspólnym, uniwersalnym wzorem, który może służyć jako narzędzie do dalszych badań i optymalizacji ramp przechyłkowych o zadanych własnościach.

Słowa kluczowe: Rampa przechyłkowa; Rampa wielomianowa; Geometria toru kolejowego

Abstract: This article presents a solution to the general equation of a railway cant ramp in the form of an arbitrary odd-degree polynomial, providing a foundation for the analysis and design of advanced ramp profiles within railway infrastructure. The paper introduces a convenient and universal method for determining polynomial functions of any odd degree and provides explicit equations for these functions ranging from degree 1 to 15, facilitating practical application and comparison. It is demonstrated that the commonly used linear ramp, as well as the Bloss, Wątorok, and Hasslinger ramps, are particular cases within a single family of cant ramps described by odd-degree polynomials. This unified approach enables all such ramps to be expressed using a common, general formula, which can serve as a powerful tool for further research and optimization of railway cant ramps with desired characteristics.

Keywords: Superelevation ramp; Polynomial ramp; Railway track geometry

Wstęp

Rampy przechyłkowe stanowią istotny element infrastruktury kolejowej. Pomimo iż – głównie z powodów historycznych – w praktyce stosuje się niemal wyłącznie najprostszą, a zarazem najmniej korzystną z punktu widzenia kinematyki rampę liniową, nadal prowadzone są badania teoretyczne nad opracowywaniem lepszych funkcji opisujących przebieg rampy [1, 2].

Rampa przechyłkowa powinna zapewniać bezpieczną zmianę przechyłki pomiędzy odcinkami o różnych jej wartościach. Ogólne równanie rampy przechyłkowej można przedstawić wzorem (1) jako sumę wartości przechyłki początkowej D_1 i iloczynu różnicy przechyłki końcowej D_2 i początkowej D_1 oraz odpowiednio dobranej funkcji bazowej $f(x)$, która zmienia się płynnie

w zakresie od zera (na początku rampy) do jedności (na końcu rampy). W najczęstszym przypadku, gdy przechyłka zmienia się od zera to pewnej wartości, wzór ten zredukuje się do iloczynu docelowej wartości przechyłki D oraz funkcji bazowej $f(x)$ – wzór (2).

$$D(x) = D_1 + (D_2 - D_1) \cdot f(x) \quad (1)$$

$$D(x) = D \cdot f(x) \quad (2)$$

W niniejszym artykule skupiono się na funkcjach wielomianowych o stopniach nieparzystych, które wybierane są ze względu na symetrię warunków brzegowych. Wielomiany te pozwalają na wyzerowanie kolejnych pochodnych na końcach analizowanego przedziału, co jest niemożliwe w przypadku wielomianów stopnia parzystego bez dodatkowych modyfikacji. Należy jed-

nak zaznaczyć, że również rampy wielomianowe stopnia parzystego są przedmiotem badań—przykładem może być rampa szóstego stopnia opracowana przez Mieloszyka i Koca [3].

Analiza funkcji wielomianowej nieparzystego stopnia k

Równanie rampy przechyłkowej opisanej wielomianem stopnia k , gdzie k jest liczbą nieparzystą, przy zadanej długości rampy L , można przedstawić w następującej postaci:

$$f_k(\xi) = A_0 + A_1 \cdot \xi + A_2 \cdot \xi^2 + \dots + A_k \cdot \xi^k \quad (3)$$

gdzie $A_0, A_1, \dots, A_k$ to współczynniki liczbowo określające wielomian, a ξ to znormalizowana współrzędna długości rampy, dana jako:

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad 0 \leq \xi \leq 1 \quad (4)$$

Wyrażenie (3) można również zapisać w postaci zwężonej sumy skończonej:

$$f_k(\xi) = \sum_{i=0}^k A_i \cdot \xi^i \quad (5)$$

W powyższych równaniach występują łącznie $(k + 1)$ niewiadomych współczynników A_i . Jednak połowę tych współczynników można wyznaczyć (lub wyeliminować), narzucając warunki zerowania się funkcji oraz jej kolejnych pochodnych w punkcie $\xi=0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_k(0) = 0 \Rightarrow A_0 = 0 \\ \frac{df_k}{d\xi}(0) = 0 \Rightarrow A_1 = 0 \\ \dots \\ \frac{d^p f_k}{d\xi^p}(0) = 0 \Rightarrow A_p = 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

Uzyskane w ten sposób warunki pozwalają wyeliminować współczynniki do rzędu p , gdzie p obliczamy ze wzoru (7). Liczba r według wzoru (8) oznacza numer kolejnego niezerowego wyrazu wielomianu, licząc od funkcji liniowej w górę.

$$p = \frac{k-1}{2} \quad (7)$$

$$r = p + 1 = \frac{k+1}{2} \quad (8)$$

Równanie (5) upraszcza się więc do postaci:

$$f_k(\xi) = \sum_{i=r}^k A_i \cdot \xi^i \quad (9)$$

Pozostałe współczynniki A_i wyznacza się, nakładając warunki zerowania kolejnych pochodnych w punkcie $\xi=1$ oraz wymuszając wartości funkcji równej 1 dla końcowej rzędnej rampy. Kolejne pochodne funkcji mają postać:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_k(\xi) = \sum_{i=r}^k A_i \cdot \xi^i \\ \frac{df_k}{d\xi}(\xi) = \sum_{i=r}^k A_i \cdot i \cdot \xi^{i-1} \\ \dots \\ \frac{d^p f_k}{d\xi^p}(\xi) = \sum_{i=r}^k i \cdot (i-1) \cdot \dots \cdot (i-(p-1)) \cdot A_i \cdot \xi^{i-p} \end{array} \right. \quad (10)$$

Iloczyn $i \cdot (i-1) \cdot \dots \cdot (i-p+1)$ można wygodnie zapisać jako:

$$i \cdot (i-1) \cdot \dots \cdot (i-p+1) = \frac{i!}{(i-p)!} \quad (11)$$

Zatem pochodna rzędu p funkcji wielomianowej stopnia k ma postać:

$$\frac{d^p f_k}{d\xi^p}(\xi) = \sum_{i=r}^k \frac{i!}{(i-p)!} \cdot A_i \cdot \xi^{i-p} \quad (12)$$

Podstawiając $\xi=1$ oraz uwzględniając warunki brzegowe, otrzymujemy ogólny wzór zerowych sum:

$$\sum_{i=r}^k \frac{i!}{(i-p)!} \cdot A_i = 0 \quad (13)$$

Aby wyliczyć pozostałe nieznanne współczynniki, należy rozwiązać układ $(p+1)$ równań (jedno równanie warunku brzegowego funkcji oraz p równań warunków brzegowych kolejnych pochodnych funkcji:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=r}^k A_i = 1 \\ \sum_{i=r}^k \frac{i!}{(i-1)!} \cdot A_i = 0 \\ \dots \\ \sum_{i=r}^k \frac{i!}{(i-p)!} \cdot A_i = 0 \end{array} \right. \quad (14)$$

Rozwiązanie tego układu równań sprowadza się do wyznaczenia niewiadomych na drodze przekształceń macierzowych. Macierz główna układu dla stopnia r , wraz z macierzą wyrazów wolnych, można zapisać w sposób ogólny jako:

$$\left[\begin{array}{cccccc} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ r & r+1 & r+2 & \dots & k \\ \frac{r!}{(r-2)!} & \frac{(r+1)!}{(r-1)!} & \dots & \dots & \frac{k!}{(k-2)!} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{r!}{1!} & \frac{(r+1)!}{2!} & \dots & \dots & \frac{k!}{r!} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{array} \right] \quad (15)$$

Powyższą macierz można zapisać w postaci pokazującej schemat występujący w wartościach jej elementów oraz wykorzystując tylko jedną zmienną, w tym przypadku zdecydowano się na zmienną r :

$$\left[\begin{array}{cccccc} \frac{r!}{r!} & \frac{(r+1)!}{(r+1)!} & \frac{(r+2)!}{(r+2)!} & \dots & \frac{(2r-1)!}{(2r-1)!} \\ \frac{r!}{(r-1)!} & \frac{(r+1)!}{(r-1)!} & \frac{(r+2)!}{(r+1)!} & \dots & \frac{(2r-1)!}{(2r-2)!} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{r!}{(r-2)!} & \frac{(r+1)!}{(r-1)!} & \dots & \dots & \frac{(2r-1)!}{(2r-3)!} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{r!}{1!} & \frac{(r+1)!}{2!} & \dots & \dots & \frac{(2r-1)!}{r!} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{array} \right] \quad (16)$$

Prawidłowość, która się pojawia można wykorzystać do określenia wartości dowolnego elementu leżącego w rzędzie m i kolumnie n :

$$a_{m,n} = \frac{(r+n-1)!}{(r-m+n)!} \quad (17)$$

Również macierz dołączoną reprezentującą wyniki warunków brzegowych można przedstawić w zwężonej formie, gdzie nawias kwadratowy oznacza część całkowitą (cechę) liczby:

$$\omega_m = \begin{cases} 1 & \text{dla } m = 1 \\ 0 & \text{dla } m > 1 \end{cases} = \left\lfloor \frac{1}{m} \right\rfloor \quad (18)$$

Zaczynając od macierzy jednoelementowej (odpowiadającej rampie liniowej) i rozszerzając ją zgodnie ze wzorem (17) poza jej zakres, otrzymuje się tablicę (tabela 1), w której można odszukać zestaw współczynników niezbędnych do rozwiązania krzywej wielomianowej o zadanym stopniu.

Wyliczone ze wzoru (17), bądź odśzukane w tabeli 1, wartości tworzą macierz R . Ponieważ macierz dołączona posiada jedynekę w pierwszym wierszu i zera w pozostałych, rozwiązanie układu równań (14) – reprezentowanego przez kwadratową macierz główną o wymiarze r i odpowiadającą jej macierz dołączoną (16) – stanowią elementy $b_{i,1}$ pierwszej kolumny macierzy odwrotnej do R . Elementy te tworzą macierz współczynników wielomianu stopnia k :

$$A^{(k)} = [b_{1,1} \ b_{2,1} \ \dots \ b_{r,1}] \quad (19)$$

Poszczególne współczynniki funkcji wielomianowej stopnia k można przedstawić za pomocą wzoru (20), natomiast równanie funkcji wielomianowej za pomocą wzoru (21). We wzorach tych $R_{a,b}^T$ oznacza odpowiednią transponowaną macierz dopełnień algebraicznych.

$$A_{j+r-1} = b_{j,1} = \frac{R_{j,1}^T}{\det(R)} \quad (20)$$

$$f_k(\xi) = \sum_{i=r}^k A_i \cdot \xi^i = \sum_{i=r}^k b_{i-r+1,1} \cdot \xi^i = \sum_{i=r}^k \frac{R_{i-r+1,1}^T}{\det(R)} \cdot \xi^i \quad (21)$$

Dalsze przekształcanie funkcji (21) i wyrażenie wartości współczynnika A_i jedynie za pomocą r lub k jest teoretycznie możliwe, lecz praktycznie bardzo uciążliwe. Znacznie wygodniejszym podejściem jest rozwiązanie układu (16)

jedną z wielu metod rozwiązywania macierzy ze wspomaganie komputeryjnym. Wyznaczenie ogólnego wzoru na szukane współczynniki może zostać ułatwione dzięki zastosowaniu sztucznej inteligencji, szczególnie po uprzednim ich numerycznym wyznaczeniu.

Rozwiązania dla kolejnych funkcji wielomianowych

Wyznaczenie współczynników szukanej funkcji wielomianowej zadanego stopnia polega na rozwiązaniu układu równań utworzonego z macierzy głównej oraz macierzy wyrazów wolnych. Obliczeń dokonano za pomocą algorytmu komputerowego on-line [6], wykorzystując metodę macierzy odwrotnej. Tabela 2 przedstawia zestawienie wyznaczonych funkcji wielomianowych ramp przechyłkowych o kolejnych nieparzystych stopniach k . Każdy wiersz odpowiada rozwiązaniu uzyskanemu zgodnie z opisanymi wcześniej warunkami brzegowymi i układem macierzowym. Z kolei tabela 3 grupuje wartości współczynników liczbowych stojących przy kolejnych potęgach ξ w poszczególnych funkcjach.

Znając już wartości współczynników liczbowych, możliwe jest wyznaczenie ogólnego wzoru opisującego ich rozmieszczenie, na przykład z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji. W niniejszej pracy posłużono się modelem GPT-4.1, który przeszukał zasoby internetowe dotyczące sklasyfikowanych ciągów liczbowych oraz wykorzystał źródła [7], [8], [9], [10]. Po wielu próbach doboru pojedynczej funkcji opisującej cały zbiór, trójkąt liczbowy — przedstawiony w tabeli 2 — został wyrażony ogólną formułą podaną w równaniu (22). Podany wzór został zweryfikowany dla funkcji wielomianowej stopnia 15, dając prawidłowe wyniki. Nie ma jednak pewności, że poniższa formuła jest poprawna dla wielomianów wyższych stopni. Stosowanie ramp przechyłkowych w postaci wielomianów o stopniach wyższych niż 11 wydaje się natomiast wątpliwe z praktycznego punktu widzenia.

$$T(n, s) = (-1)^s \cdot \frac{(2n+1)!}{(n+s+1) \cdot (n-s)! \cdot n! \cdot s!} \quad (22)$$

W rezultacie ogólny wzór na rampę przechyłkową w postaci wielomianu nieparzystego stopnia k można przedstawić w postaci algebraicznej zależnej wyłącznie od stopnia wielomianu:

$$f_k(\xi) = \sum_{i=\frac{k+1}{2}}^k T\left(\frac{k+1}{2}-1, i-\frac{k+1}{2}\right) \cdot \xi^i = \sum_{i=\frac{k+1}{2}}^k T\left(\frac{k-1}{2}, i-\frac{k+1}{2}\right) \cdot \xi^i \quad (23)$$

Należy jeszcze w równaniu (22) zastąpić wyrażenia związane z n oraz s (wzory (24)–(29)) odpowiednimi wyrażeniami w zależności od stopnia wielomianu k oraz kolejnej iteracji i .

$$n = \frac{k-1}{2} \quad (24)$$

$$s = i - \frac{k+1}{2} \quad (25)$$

$$2 \cdot n + 1 = 2 \cdot \frac{k-1}{2} + 1 = k \quad (26)$$

$$n + s = \frac{k-1}{2} + i - \frac{k+1}{2} = i - 1 \quad (27)$$

$$n - s = \frac{k-1}{2} - i + \frac{k+1}{2} = k - i \quad (28)$$

$$n + s + 1 = i - 1 + 1 = i \quad (29)$$

Wówczas ostatecznie wzór przyjmie następującą postać:

$$f_k(\xi) = \sum_{i=\frac{k+1}{2}}^k (-1)^{i-\frac{k+1}{2}} \cdot \frac{k!}{i \cdot (k-i)! \cdot \left(\frac{k-1}{2}\right)! \cdot \left(i-\frac{k+1}{2}\right)!} \cdot \xi^i \quad (30)$$

Sprawdzenie przypadku rampy piątego stopnia (tzw. rampy Wątoraka):

$$f_5(\xi) = (-1)^0 \cdot \frac{5!}{3 \cdot 2! \cdot 2! \cdot 0!} \cdot \xi^3 + (-1)^1 \cdot \frac{5!}{4 \cdot 1! \cdot 2! \cdot 1!} \cdot \xi^4 + (-1)^2 \cdot \frac{5!}{5 \cdot 0! \cdot 2! \cdot 2!} \cdot \xi^5 = \frac{120}{12} \cdot \xi^3 - \frac{120}{8} \cdot \xi^4 + \frac{120}{20} \cdot \xi^5 = 10\xi^3 - 15\xi^4 + 6\xi^5 \quad (31)$$

Wyniki przeprowadzonej weryfikacji potwierdzają, że wzór (30) stanowi po-

Tab. 1. Uogólniona tablica elementów macierzy głównej

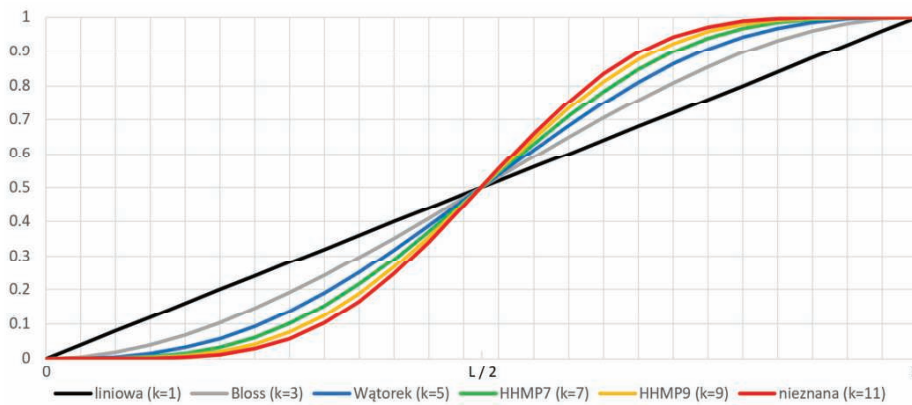
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1														
2	2	1													
3	6	3	1												
4	24	12	4	1											
5	120	60	20	6	1										
6	720	360	120	36	12	1									
7	5040	2520	840	252	84	24	1								
8	40320	20160	6720	2016	672	210	42	1							

Tab. 2. Funkcje wielomianowe kolejnych nieparzystych stopni

k	r	$f_k(\xi)$	uwaga
1	1	ξ	funkcja liniowa
3	2	$3\xi^2 - 2\xi^3$	f. paraboliczna (Blossa)
5	3	$10\xi^3 - 15\xi^4 + 6\xi^5$	rampa Wątoraka
7	4	$35\xi^4 - 84\xi^5 + 70\xi^6 - 20\xi^7$	HHMP7 Hasslingera
9	5	$126\xi^5 - 420\xi^6 + 540\xi^7 - 315\xi^8 + 70\xi^9$	HHMP9 Hasslingera
11	6	$462\xi^6 - 1980\xi^7 + 3465\xi^8 - 3080\xi^9 + 1386\xi^{10} - 252\xi^{11}$	szerzej nieopisana
13	7	$1716\xi^7 - 9009\xi^8 + 20020\xi^9 - 24024\xi^{10} + 16380\xi^{11} - 6006\xi^{12} + 924\xi^{13}$	szerzej nieopisana
15	8	$6435\xi^8 - 40040\xi^9 + 108108\xi^{10} - 163800\xi^{11} + 150150\xi^{12} - 83160\xi^{13} + 25740\xi^{14} - 3432\xi^{15}$	szerzej nieopisana

Tab. 3. Współczynniki liczbowe kolejnych funkcji wielomianowych

		s							
		0	1	2	3	4	5	6	7
n=r-1	0	1							
	1	3	-2						
	2	10	-15	6					
	3	35	-84	70	-20				
	4	126	-420	540	-315	70			
	5	462	-1980	3465	-3080	1386	-252		
	6	1716	-9009	20020	-24024	16380	-6006	924	
	7	6435	-40040	108108	-163800	150150	-83160	25740	-3432



1. Porównanie przebiegu ramp przechyłkowych o stopniach 1 do 11

prawne i wygodne narzędzie do opisu dowolnej rampy przechyłkowej o nieparzystym stopniu, gdzie jedynym parametrem definiującym jej kształt jest stopień wielomianu. Rysunek 1 ilustruje przebiegi funkcji wielomianowych opisujących rampy przechyłkowe o nieparzystych stopniach od 1 do 11.

Podsumowanie

Rampa przechyłkowa, jako kluczowy element infrastruktury kolejowej, niezmienne pozostaje przedmiotem zarówno badań teoretycznych [3, 5], jak i praktycznych wdrożeń [2]. Na przestrzeni ostatnich stu pięćdziesięciu lat powstało wiele interesujących rozwiązań (m.in. Vojacec – 1868, Schramm – 1872, Ruch – 1903, Wątołek – 1907, Bloss – 1936, Klein – 1937, Mieloszyk / Koc – 1991, Hasslinger – 2001), z których każde przewyższa liniową rampę przechyłkową pod względem właściwości kinematycznych. Pomimo ewidentnych zalet modeli nieliniowych, to właśnie rampa liniowa wciąż dominuje w praktyce, głównie ze względów historycznych, przyzwyczajęń oraz prostoty wykonania.

W ostatnich latach na szczególną uwagę zasługuje zestaw ramp nieliniowych (w tym rampy wielomianowe siódmego i dziewiątego stopnia) dedykowanych dla krzywej przejściowej wiedeńskiej [1, 4]. Rozwiązania te znacząco poprawiają parametry dynamiczne ruchu pojazdów szynowych poprzez zagwarantowanie zerowania pochodnych funkcji rampy nawet do czwartego rzędu. Wielomiany wyższych stopni (np. większych niż dziewiąty) umożliwiają uzyskanie jeszcze lepszego dopasowania rampy do odcinka pro-

stego i łuku kołowego, dzięki płynnemu wygładzaniu kolejnych pochodnych funkcji bazowej na krańcach przedziału. Wadą tego rozwiązania może być jednak zwiększone nachylenie rampy na odcinku środkowym oraz potencjalne trudności wykonawcze, choć można je częściowo ograniczyć stosując dłuższą rampę przechyłkową.

W niniejszej pracy przedstawiono zwarte, uniwersalne rozwiązanie na ogólną funkcję bazową rampy przechyłkowej w postaci wielomianu o nieparzystym stopniu. Proponowany wzór stanowi wygodne narzędzie do wyznaczania ramp o maksymalnej dla danego stopnia liczbie kolejnych pochodnych zerujących się na końcach przedziału $0 \leq \xi \leq 1$. Przy wyborze odpowiedniej rampy przechyłkowej należy mieć na uwadze ścisły związek z charakterystyką krzywej przejściowej, którego źródłem jest zasada zgodności (wprost proporcjonalności) zmiany krzywizny krzywej przejściowej z przebiegiem funkcji bazowej przechyłki.

W dobie podnoszących się prędkości kolejowych oraz dynamicznego rozwoju technologii projektowania, budowy i utrzymania infrastruktury, wykorzystywanie XIX-wiecznych krzywych przejściowych (takich jak klotoidy czy parabole trzeciego stopnia) w połączeniu z liniowymi rampami przechyłkowymi nie wydaje się już rozwiązaniem optymalnym. Stosowanie ramp o przebiegu sinusoidalnym lub wielomianów wyższych stopni (np. 7. lub 9. stopnia) oraz odpowiadających im krzywych przejściowych, umożliwia osiągnięcie lepszych parametrów technicznych i komfortu jazdy w nowoczesnych warunkach eksploatacji kolei.

Warto również podkreślić, że stosowa-

wanie liniowych ramp przechyłkowych i utrzymanie ich w praktyce jest ściśle rzecz biorąc niemożliwe. Wynika to z faktu, że szyny kolejowe jako elementy ciągłe o określonej sztywności materiałowej zawsze będą wykazywać pewien stopień wyokrąglenia na początku i końcu rampy wskutek wymuszonych sił i momentów zginających. Z tego względu rodzi się pytanie: dlaczego nie projektować ramp przechyłkowych w taki sposób, aby to wyokrąglenie było zamierzone i kontrolowane, na przykład poprzez stosowanie ramp w postaci wielomianów nieparzystych wyższego stopnia niż pierwszy? Autor niniejszego artykułu wyraża nadzieję, że przedstawione rozważania staną się punktem wyjścia do szerokiej dyskusji na temat wad, zalet oraz możliwości technicznych rozpoczęcia praktycznego stosowania ramp przechyłkowych o korzystniejszych właściwościach kinematycznych — podobnie jak ma to miejsce np. w Austrii. ◀

Materiały źródłowe

- [1] AT 412 975 B: Gleis mit Übergangsbogen und Kräfterminimaler Überhöhungsrampe.
- [2] Hasslinger H.: Measurement proof for the superiority of a new track alignment design element, the so-called "Viennese Curve."
- [3] Mieloszyk E. & Koc W.: General dynamic method for determination transition curve equations.
- [4] Wojtczak R.: Charakterystyka krzywej przejściowej Wiener Bogen®.
- [5] Zboiński K, Woźnica P.: Formation of polynomial railway transition curves of even degrees.
- [6] On-line Matrix Calculator: <https://matrixcalc.org>
- [7] The On-line Encyclopedia of Integer Sequences: <https://oeis.org/A040027>
- [8] The On-line Encyclopedia of Integer Sequences: <https://oeis.org/A034867>
- [9] The On-line Encyclopedia of Integer Sequences: <https://oeis.org/A007318>
- [10] The On-line Encyclopedia of Integer Sequences: <https://oeis.org/A097807>

Funkcjonalność stacji Poznań Główny jako kluczowy element kształtowania Poznańskiego Węzła Kolejowego

Functionality of main railway station of Poznań as a key element of Poznań's railway knot development



Jeremi Rychlewski

Dr inż.

Politechnika Poznańska / Instytut Inżynierii Lądowej, Zakład Budowy Mostów i Dróg Kolejowych, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP

jeremi.rychlewski@put.poznan.pl
ORCID: 0000-0002-1712-0039



Bruno Walerych

student Politechniki Poznańskiej, Koło Naukowe Studentów Inżynierii Lądowej, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP

bruno.walerych@student.put.poznan.pl



Kacper Włoch

student Uniwersytetu Adama Mickiewicza

kacwlo2@st.amu.edu.pl

Streszczenie: Prowadzone obecnie prace nad dostosowaniem układu torowego Poznańskiego Węzła Kolejowego do obecnych potrzeb wymagają decyzji dotyczących planowanego obciążenia ruchem i jego organizacji. Kluczowe w tym względzie są decyzje i ograniczenia związane z główną stacją pasażerską – stacją Poznań Główny. Celem artykułu jest przedstawienie spektrum zagadnień dotyczących kształtowania tej stacji, od uwarunkowań jej lokalizacji i planowanego obciążenia ruchem poprzez rozwój Poznańskiej Kolei Metropolitalnej po jej funkcjonalność, obejmującą powiązanie dworca kolejowego z dworcem autobusowym oraz z przystankami tramwajowymi.

Słowa kluczowe: Kształtowanie głównego dworca kolejowego; Kolej metropolitalna; Dostępność; Przepustowość

Abstract: Currently going on design works for new track layout of Poznań's railway knot aiming at adjusting the knot to contemporary needs require decisions on planned intensity and organisation of railway traffic. A key element of such design are decisions and limits concerning main passenger station of the knot – Poznań Główny station. The aim of this article is to present a spectrum of topics on designing the main station, starting from determinants of the station's location and planned rail traffic intensity, through incentives from development of Poznań Metropolitan Railway, finishing at the station's passenger functionality, including its connection to local public transport and regional busses.

Keywords: Design of main train station; Metropolitan railway; Accessibility; Capacity

Wstęp

Infrastruktura kolejowa jest jednym z kluczowych elementów sieci transportowej, a przez to również gospodarki. Trwałość tej infrastruktury i koszty jej budowy sprawiają, że raz zbudowana infrastruktura wpływa przez dziesięciolecia na przewagi lub problemy transportowe poszczególnych miast. Oddalenie zbudowanej w 1893 stacji Ostrołęka od centrum miasta dzisiaj znacząco ogranicza dostęp mieszkańców do kolei. Mieszkańcy Śmigła 170 lat temu nie chcieli kolei w swoim mieście i linię Wrocław – Poznań poprowadzono przez Bojanowo – brak stacji na magistralnej linii kolejowej decyduje dzisiaj o upośledzeniu transportowym tego miasta. Również działania organizacyjne potrafią być czasochłonne, o czym świadczy 10-letni okres tworzenia Poznańskiej Kolei Metropolitalnej (PKM)

[1], poprzedzony kilkuletnim przekonywaniem decydentów do koncepcji.

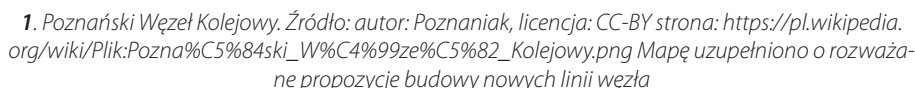
Obecna przebudowa sieci kolejowej w Polsce, zarówno w zakresie budowy linii dużych prędkości, linii uzupełniających sieć (np. planowane połączenie Konin – Turek) i łącznic (np. w Czerwieńsku, Suchej Beskidzkiej czy Chabówce), jak też w zakresie przebudowy węzłów kolejowych takich jak Łódź czy Kraków, daje szansę na poprawę jakości obsługi pasażerów i towarów. Przy tych przebudowach potrzebne są dobrze przemyślane rozwiązania, aby na kolejne dziesięciolecie uzyskać jak największą funkcjonalność.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie uwarunkowań dla kształtowania Poznańskiego Węzła Kolejowego (PWK), a konkretnie uwarunkowań związanych z najważniejszą dla ruchu pasażerskiego stacją węzła – stacją Poznań Główny.

Lokalizacja stacji Poznań Główny w ramach węzła kolejowego

Stacja Poznań Główny jest stacją węzłową dla linii kolejowych w następujących kierunkach:

1. W kierunku Wrześni i Warszawy – linia magistralna nr 3,
 2. W kierunku Szamotuł i Szczecina – linia magistralna nr 351,
 3. W kierunku Nowego Tomysła i Berlina – linia magistralna nr 3,
 4. W kierunku Kościana i Wrocławia – linia magistralna nr 271,
 5. W kierunku Środy Wielkopolskiej i Kluczborka – linia pierwszorzędowa nr 272.
- Dodatkowo za pośrednictwem tych linii do stacji dojeżdżają pociągi pasażerskie z linii:
6. W kierunku Obornik i Piły – linia pierwszorzędowa nr 354,
 7. W kierunku Wągrowca i Gołańczy –



8. W kierunku Gniezna i Gdańska / Olsztyna – linia pierwszorzędowa nr 353,
9. W kierunku Grodziska Wielkopolskiego i Wolsztyna – linia drugorzędowa nr 357.

Jak widać na rys. 1, stacja Poznań Główny jest jedyną stacją wspólną dla wszystkich pociągów pasażerskich przejeżdżających przez PWK, stanowi więc ważny punkt przesiadkowy, zarówno dla ruchu dalekobieżnego, regionalnego i aglomeracyjnego, jak też dla przesiadek między tymi sektorami przewozowymi. W rezultacie pod względem liczby obsługiwanych pasażerów stacja Poznań Główny od lat plasuje się na 1 lub 2 miejscu w Polsce [2]. W obecnym układzie jedynie stacja Poznań Wschód i przystanek Poznań Garbary mają możliwość przejęcia fragmentu ruchu przesiadkowego z pociągów regionalnych i aglomeracyjnych,

Pojawiały się różne propozycje modyfikacji PWK, włącznie z tak radykalnymi jak zmiana stacji Poznań Główny na czołową. Jednakże wśród wartyh rozważenia propozycji jedna tylko zakłada ominięcie dworca stacji Poznań Główny przez niektóre pociągi pasażerskie. Tymi propozycjami, pokazanymi na rys. 1, są: 0. Dobudowa linii dużej prędkości od strony Gądek do stacji Poznań Starołęka (oryginalnie linia miała mieć nr 85) lub do stacji Poznań Główny (jest to wariant obecnie procedowany). Linii tej nie zaznaczono na rys. 1 gdyż ma być budowana obok linii nr 272 Gądk – Poznań Starołęka – Poznań Główny [3].

1. Poprowadzenie linii kolejowej dużej prędkości od Gądek między stacjami Poznań Starołęka i Poznań Górczyn (i dalej na zachód) z pominięciem stacji Poznań Główny i budową dodatkowej stacji dla niektórych pociągów dużej prędkości o roboczej nazwie Poznań Południe [4]. Koncepcję tą, z częściowym przebiegiem tunelowym, zaznaczono na czerwono. Obecna koncepcja prowadzenia linii dużej

2. Poprowadzenie linii kolejowej dużej prędkości od Gądek prostopadle do obecnego układu stacji Poznań Główny, co ukształtowałoby układ dwóch stacji w różnym poziomie ze wspólnym dworcem (tak jak w Kostrzynie nad Odrą czy Berlinie). Wariant wymagałby budowy ok. 10 km tunelu kolejowego, ale obsługiwałby lotnisko na Ławicy. Linia mogłaby służyć pociągom dużej prędkości bądź, w wariantcie 4-torowym, również pociągom metropolitalnym. Koncepcję tą zaznaczono na niebiesko.

3. Prowadzenie pociągów dużej prędkości przez stację Poznań Główny, a następnie wyprowadzenie ich do lotniska Ławica. Wariant wymagałby budowy krótkiego (do 1 km) tunelu. Linia obsługiwałaby pociągi dużej prędkości i pociągi metropolitalne, bądź tylko pociągi metropolitalne (w tym wariantcie budowa tunelu nie jest konieczna). Koncepcję tą zaznaczono na niebiesko.

4. Obecnie realizowana budowa łącznicy Poznań Strzeszyn – Poznań Piątkowo dla obwodowej trasy pociągów metropolitalnych PKM-6. Należy zaznaczyć, że trasa ta pomimo swego obwodowego charakteru będzie przebiegać przez stację Poznań Główny. Koncepcję tą zaznaczono na zielono.

5. Budowa tunelu długości 5 km między stacjami Poznań Wschód i Poznań Główny jako alternatywy dla rozbudowy odcinka linii nr 3 między tymi stacjami do 4 torów (w tym budowy 3 mostów i 7 wiaduk-tów). Tunel pozwoliłby wprowadzić pociągi metropolitalne z 2 linii (nr 353 i 356) pod ściśle centrum mia-sta. Koncepcję tą, autorstwa M. Be-ima, zaznaczono na zielono.

6. Budowa linii ze stacji Poznań Górczyn do Szreniawy. Rezultatem byłoby przyspieszenie przejazdu ze stacji i przystanków linii nr 357 zlokalizowanych na zachód od Szreniawy oraz obsługa stolicy ważnej gminy Komorniki. Koncepcję tą za-

znaczono na zielono.

7. Budowa linii do gminy Kleszczewo. Koncepcję tą zaznaczono na zielono.

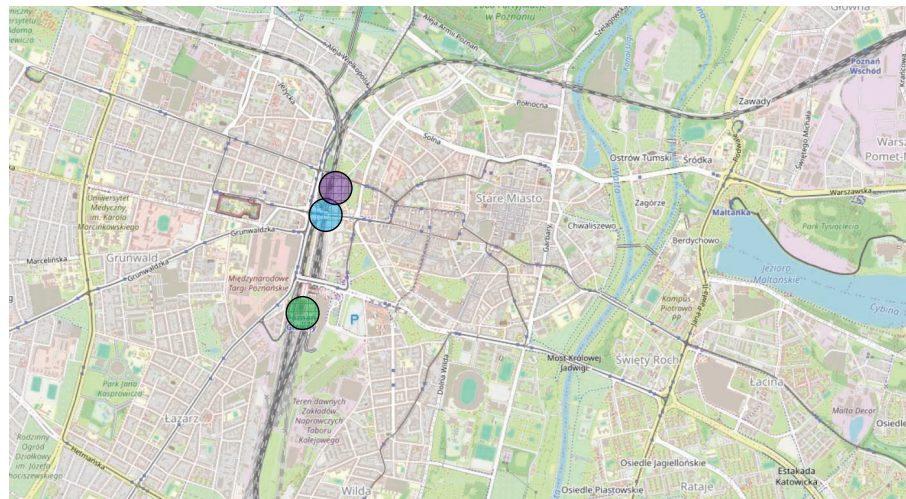
Opis różnych koncepcji prowadzenia pociągów dużej prędkości (proponuje 0, 1, 2 i 3) przedstawiono w [5,6], a koncepcję rozwoju Poznańskiej Kolei Metropolitalnej (PKM) – między innymi w [7,8].

Propozycje nr 3 i 7 stanowiłyby istotne uzupełnienie dla koncepcji PWK, włączając jedynie 2 gminy powiatu poznańskiego obecnie pozbawione linii kolejowych [9].

Podsumowując, rola stacji Poznań Główny w skali PWK jest niezagrażona, koncepcje rozbudowy infrastruktury przewidują utrzymanie jej centralnej roli. Podobne założenia są stosowane w innych miastach, np. we Wrocławiu [9,10], a także w Łodzi, gdzie drążone tunele wzmocnią rolę stacji Łódź Fabryczna, umniejszając rolę stacji Łódź Kaliska.

Ruch towarowy w Poznańskim Węźle Komunikacyjnym

Pociągi towarowe w PWK kierowane są na układ obwodowy linii nr 294 i 295 oraz do stacji rozrządowej Poznań Franowo. Stacja Poznań Główny jest w związku z tym prawie całkowicie pozbawiona ruchu towarowego – obsługuje jedynie pociągi zakładów przemysłowych Hipolit Cegielski Poznań (HCP) i Fabryki Pojazdów Szynowych w Poznaniu (FPS), bazy ZRK DOM oraz ewentualne potrzeby stacji (w tym grup obsługi pociągów różnych przewoźników). Biorąc pod uwagę kierowanie pociągów towarowych na stację Poznań Franowo i plany budowy osobnej stacji postojowej należałoby jeszcze bardziej ograniczyć ruch towarowy na stacji Poznań Główny – pociągi z bocznic przemysłowych skierować od razu na linię nr 272, wykorzystując przebudowę związaną z budową linii dużej prędkości. Taki układ torowy linii nr 272 byłby mniej inwazyjny urbanistycznie niż obecnie proponowany [3], ograniczyłby więc protesty społeczne przy budowie KDP. Do obsługi ruchem niepasażerskim pozostałaby baza Kolei



2. Lokalizacja stacji Poznań Główny na tle śródmieścia Poznania. Kolorem zielonym pokazano obecną lokalizację stacji, niebieskim możliwą lokalizację przy Rondzie Kaponiera, a fioletowym – możliwą lokalizację przystanku Poznań Śródmieście. Źródło mapy: Openstreetmap

Wielkopolskich oraz baza ZRK DOM, obie zlokalizowane w południowo-zachodniej części stacji.

Organizacja ruchu pasażerskiego i towarowego w PWK tworzy krytyczny dla przepustowości posterunek na stacji Poznań Starołęka [6,7,12], a także utrudnia ukształtowanie geometryczne stacji Poznań Wschód [13], są to jednak zagadnienia niewpływające na kształtowanie stacji Poznań Główny. Z drugiej jednak strony, natężenie przewozów generowane przez stację Poznań Główny będzie determinowało rozwiązania dla wymienionych obu stacji [14].

Lokalizacja stacji Poznań Główny w przestrzeni miejskiej

Stacja Poznań Główny jest zlokalizowana na skraju centrum miasta (rys. 2), w tym pod wiaduktem I ramy czyli obwodnicy tego centrum w klasie ulicy G. Lokalizacja wynika z procesów historycznych, związanych zarówno z układem fortyfikacji miejskich, jak też lokalizacją stacji towarowej obsługującej miasto [15,16]. Ewentualnej poprawy lokalizacji można upatrywać w przeniesieniu stacji w rejon Ronda Kaponiera bądź budowie dodatkowego przystanku, tylko dla kolei metropolitalnych, zwanego roboczo Poznań Śródmieście (tab. 1). Układ torowy stacji w tych wariantach pokazano w [17].

Zaletą obecnej lokalizacji jest obsługa Międzynarodowych Targów Poznańskich, a także możliwość zwiększenia liczby krawędzi peronowych. Lokalizacja przy Rondzie Kaponiera

ma najwięcej zalet. Przystanek Poznań Śródmieście byłby optymalny dla obsługi pasażerów przesiadających się z pociągów na tramwaje, ale wymagałby podwójnego zatrzymania tych pociągów – zarówno na przystanku, jak też na stacji. Kluczowym kryterium powinno się jednak okazać spodziewana intensywność ruchu kolejowego, szczególnie ruchu metropolitalnego.

Uwarunkowania kształtowania Poznańskiej Kolei Metropolitalnej

Koncepcja Poznańskiej Kolei Metropolitalnej (PKM) powstała w warunkach ograniczonej przepustowości odcinka linii nr 3 Poznań Główny – Poznań Wschód [18]. Przy tych ograniczeniach założono, że pociągi regionalne zostaną włączone w przewidywany półgodzinny takt pociągów metropolitalnych. W rezultacie system pociągów metropolitalnych składa się obecnie z segmentu pociągów regionalnych i segmentu pociągów aglomeracyjnych [19], wspólnie tworzących założoną częstotliwość kursowania. W pierwszym etapie, już zrealizowanym, założono wykorzystanie istniejących tras przy zwiększeniu częstotliwości kursów, szczególnie poza godzinami szczytu, oraz tworzeniu rozkładu jazdy w którym dla większości kursów stacja Poznań Główny nie byłaby stacją końcową dla tras pociągów. Obecnie rozpoczęto drugi etap kształtowania PKM, w którym założono kształtowanie nowych tras na obwodnicy towarowej miasta (rys. 3) oraz na nowych i odbudowywanych liniach ko-

lejewych. Konceptcje 2-go etapu nadal ulegają modyfikacjom.

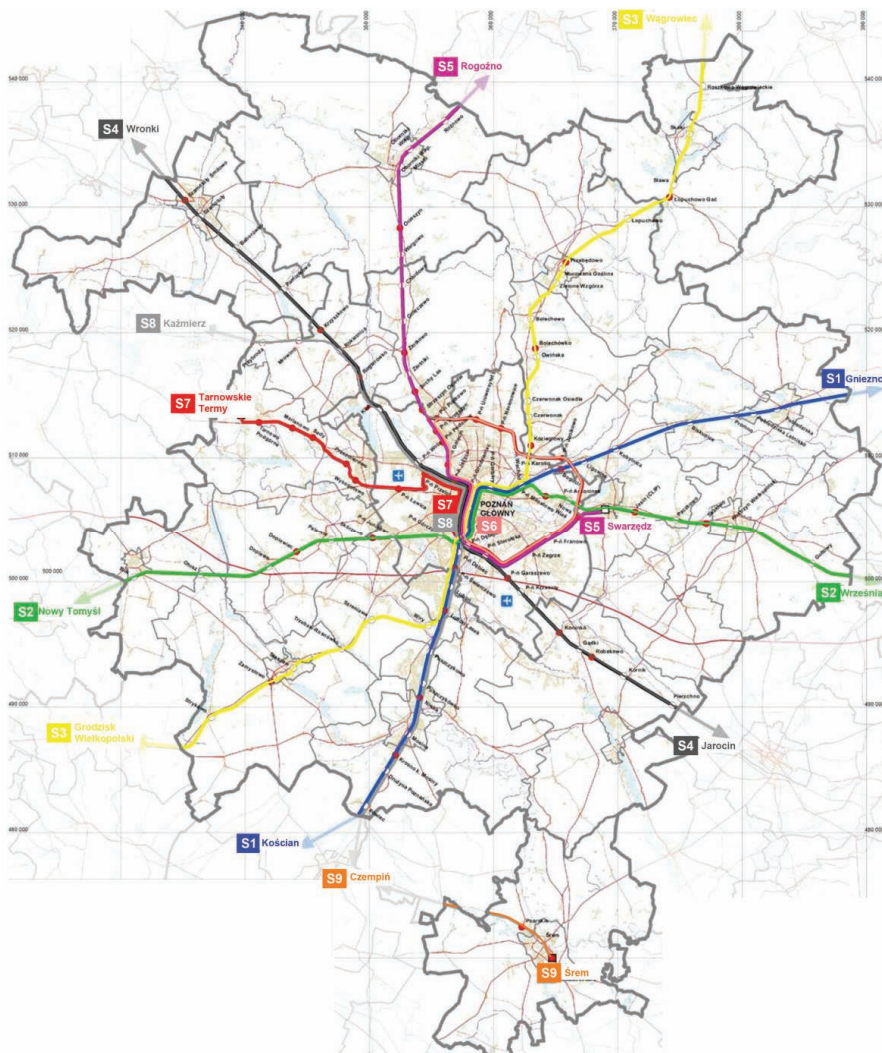
PKM okazała się sukcesem, generującym problemy związane z niedostateczną pojemnością pociągów. W związku z tym konieczne okazuje się zwiększenie częstotliwości na niektórych trasach do 20 lub 15 minut. To z

kolei wpłynęło na zmianę koncepcji przydziału peronów na stacji Poznań Główny [17]:

- Oryginalnie zakładano integrację czasową poprzez podział czasu na stacji Poznań Główny na okresy czasowe długości około 15 minut dedykowane pociągom pospiesz-

Tab. 1. Porównanie analizowanych lokalizacji stacji Poznań Główny na granicy centrum miasta

Kryterium	Obecna lokalizacja stacji Poznań Główny	Lokalizacja stacji Poznań Główny przy Rondzie Kaponiera	Obecna lokalizacja stacji plus przystanek Poznań Śródmieście
Liczba przelotowych krawędzi peronowych	16	12	(Poznań Główny) 16 (Poznań Śródmieście) +4
Dojście piesze do centrum	dobre	najlepsze	najlepsze
Dojście piesze do dzielnic	dobre na Łazarz	dobre na Jeżyce	dobre na Łazarz i Jeżyce
Liczba linii tramwajowych	8	16	16
Liczba linii autobusowych dziennych	4	6	6
Bliskość PST	tak	tak	tak
Łatwość dojazdu samochodem i parkowania	tak	tak	tak
Obsługa Międzynarodowych Targów Poznańskich	bardzo dobra	dobra	bardzo dobra
Dodatkowe zatrzymanie pociągów metropolitalnych	nie	nie	tak
Rozstaw skrajnych peronów – ruch dalekobieżny	150 m	90 m	150 m
ruch metropolitalny	150 m	90 m	50 m



3. Planowana sieć Poznańskiej Kolei Metropolitalnej. Źródło [20]

nym (InterCity) i metropolitalnym. Dla pociągów pospiesznych dedykowany byłby czas X+0 do X+16 oraz X+30 do X+46, gdzie X – dowolna minuta początkowa systemu, a dla pociągów metropolitalnych: X+17 do X+290 oraz X+47 do X+59. Czas postoju wynikał między innymi z czasu przejścia między skrajnymi peronami wynoszącego 8 minut. Każdy pociąg miałby swoją krawędź peronową.

- Sukces PKM wskazał na konieczność zwiększenia częstotliwości kursów na wybranych trasach, ponadto lokalizacja mijanek i miejsc wyprzedzania pociągów okazała się problematyczna dla integracji czasowej, stąd zdecydowano się na integrację przestrzenną w postaci dedykowania krawędzi peronowych dla ruchu pospiesznego i metropolitalnego. Przewidziano na stacji Poznań Główny, po zbudowaniu linii kolejowej dużej prędkości:
 - o 8 krawędzi peronowych dla pociągów pospiesznych;
 - o ewentualne 2 dodatkowe krawędzie czołowe dla pociągów dużej prędkości Warszawa – Berlin, o ile byłyby trasowane przez Zbąszyń i Rzepin;
 - o 4-8 krawędzi peronowych dla pociągów metropolitalnych – w zależności od wariantu;
 - o zabytkowy peron Dworca Letniego dla pociągów okazjonalnych, np. turystyki pod parą.

Lokalizacja stacji Poznań Główny a spodziewana intensywność ruchu pociągów

Jak wynika z tabeli **1**, ograniczenia terenowe, przy ewentualnym przesunięciu stacji Poznań Główny w rejon Ronda Kaponiera, limitują liczbę krawędzi peronowych do 12, co ograniczy przepustowość stacji. Obecnie stacja Poznań Główny ma 12 przelotowych krawędzi peronowych, ale jej przebudowa pozwoli zwiększyć tę liczbę do 17, z opcją lokalizacji kilku kolejnych krawędzi przy torach czołowych. Przystanek Poznań Śródmieście, przy założeniu ograniczonej ingerencji w wiadukty uliczne Teatralny i Uniwersytecki, miałby tylko 4

krawędzie peronowe, ale ponowne za-trzymanie pociągów metropolitalnych na stacji Poznań Główny skróciłoby czas obsługi pasażerów. Duża przebudowa wspomnianych wiaduktów umożliwiła-by budowę 8 krawędzi peronowych na przystanku Poznań Śródmieście.

Decyzja o lokalizacji stacji Poznań Główny może więc być krytyczna dla możliwości rozwoju PKM. Z drugiej strony, akceptacja niedogodności obecnej lokalizacji, uzasadniania tym rozwojem, powinna wiązać się z zadaniem, aby inne stacje PWK nie stały się elementami krytycznymi. Z tego powodu w tabeli 2 zestawiono:

- Maksymalną intensywność ruchu dla lokalizacji stacji przy Rondzie Kaponiera;
- Zalecaną intensywność ruchu dla obecnej lokalizacji stacji i 4-krawędziowego przystanku Poznań Śródmieście;
- Minimalną intensywność ruchu wymuszającą zachowanie obecnej lokalizacji stacji.
- Intensywność ruchu w wybranych miejscach PKM będącą autorską propozycją rozłożenia pociągów na poszczególne trasy PKM.

Zestawienie pociągów pospiesznych wykonano na podstawie Horyzontalnego rozkładu jazdy [21]. Rozbudowana stacja Poznań Główny, niezależnie od lokalizacji, miałaby również możliwość obsługi niektórych pociągów regionalnych, które ze względu na skrócenie czasu dojazdu mogłyby być na terenie aglomeracji wyłączone z segmentu metropolitalnego i przeniesione do segmentu pospiesznego.

Obecnie decyzje idą w kierunku zapewnienia możliwości znacznego rozwoju PKM, a więc pozostawienia stacji w obecnej lokalizacji.

Wartości graniczne w tabeli 2 dla pociągów metropolitalnych obliczono dla następujących założeń:

- Optymalna intensywność ruchu dla toru kolejowego w ruchu jednolitym z przystankami – 20 poc./h, przy czym czas postoju na zwykłym przystanku przyjmuje się długości 0,5 minuty [22];
- Czas wymiany pasażerów pociągów metropolitalnych na stacji Po-

Tab. 2. Graniczne intensywności ruchu kolejowego w zależności od lokalizacji stacji Poznań Główny

Trasa	Relacja	Intensywność ruchu pociągów w godzinie szczytu			
		Metropolitalnych			Pospiesznych
		Wariant 1 stacja przy Rondzie Kaponiera max	Wariant 2 4 perony przystanku Śródm. zal.	Wariant 3 stacja w obecnej lokalizacji min.	
PKM1	Gniezno – Pobiedziska	4	6	6	3 (2)
PKM2	Września – Kostrzyn Wlkp.	3	3	4	1 (2)
PKM3	Wągrowiec – Mur. Goślina	2	4	4	--
PKM4	Rogoźno Wlkp. – Oborniki	2	3	4	1
PKM5	Wronki – Szamotuły	2	3	4	3
PKM6	obwodowa	3	4	4	--
PKM7	Pniewy – Tarnowo Podgórne	2	2	2	--
Odcinek Pn Wschód – Pn Główny		9	13	14	4
Odcinek Pn Jeżyce – Pn Główny		9	12	14	4
PKM1	Kościan – Mosina	4	6	6	3
PKM2	Zbąszyń – Opalenica	3	3	4	3
PKM3	Grodzisk Wlkp. – Stęszew Śrem przez Czempin	2 --	2 2	2 2	--
PKM4	Jarocin – Środa Wlkp.	2	3	4	1+2kdp
PKM5	Śrem – Kórnik Swarzędz	2 --	3 --	2 2	-- 1
PKM6	obwodowa	3	4	4	--
PKM7	Kleszczewo Śrem przez Czempin	-- 2	2 --	2 --	--
Odcinek Pn Górczyn – Pn Główny		3	3	4	3
Odcinek Luboń – Pn Główny		8	10	10	3
Odcinek Pn Starołęka – Pn Główny		7	12	14	2+2kdp
PKM2	Pn Wschód – Pn Górczyn	3	3	4	2
PKM1,3	Pn Wschód – Luboń	6	10	10	2
(PKM7)	Pn Jeżyce – Luboń	2	--	--	1
PKM4,5,6,7	Pn Jeżyce – Pn Starołęka	7	12	14	2+1kdp

Wariant 3 uwzględnia możliwość lokalizacji przystanku Poznań Śródmieście, ale w wariantcie z 8 krawędziami peronowymi. Poznań Jeżyce (Pn Jeżyce) to obecnie posterunek odgałęźny PoD. W celu poprawienia czytelności tabeli nazwę Poznań zredukowano do skrótu Pn

znań Główny 3,0 minuty [18];

- Czas wymiany pasażerów pociągów metropolitalnych gdy oprócz stacji Poznań Główny zatrzymują się też na przystanku Poznań Śródmieście: 1,5 minuty dla stacji Poznań Główny i 2,0 minuty dla przystanku Poznań Śródmieście;
- Nowy układ torowy wyeliminuje przebiegi kolizyjne na stacji Poznań Główny, z wyjątkiem kolizji następstwa i splatania przebiegów [23], a system sterowania ruchem kolejowym będzie optymalizowany dla maksymalizacji przepustowości.

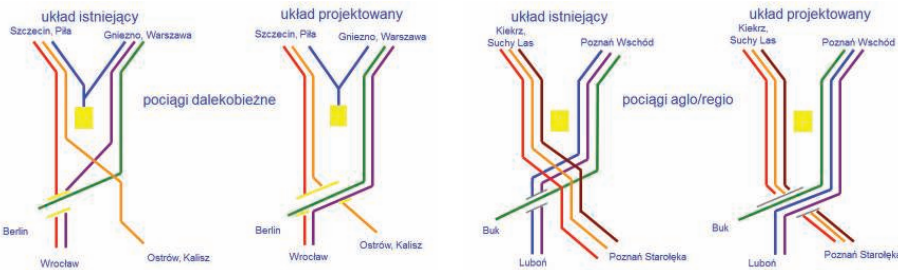
Znacznie mniejsza spodziewana intensywność ruchu pociągów pospiesznych pozwala przyjąć dla nich czas postoju nawet 10 minut, co dla samej

wymiany pasażerskiej jest czasem większym niż potrzebny.

Lokalizacja stacji Poznań Główny w PWK jako jedynej stacji gdzie zbiegają się wszystkie trasy pasażerskie wskazuje na problem kolizyjności przebiegów. Historycznie ukształtowany układ torowy jest silnie kolizyjny [5,7,14,18], wymaga więc zmian w postaci skierowania linii nr 272 na zachodnią stronę stacji. Szczegóły tej koncepcji opisano w [17,18], schematycznie ideę pokazuje natomiast rys. 4.

Kolizyjność tras pociągów na stacji Poznań Główny

Lokalizacja stacji Poznań Główny w PWK jako jedynej stacji gdzie zbiegają się wszystkie trasy pasażerskie wska-



4. Planowana kolizyjność istniejących tras pociągów pospiesznych oraz tras pociągów metropolitalnych w obecnym układzie torowym stacji Poznań Główny i po proponowanej przebudowie. Źródło [18]

zuje na problem kolizyjności przebiegów. Historycznie ukształtowany układ torowy jest silnie kolizyjny [5,7,14,18], wymaga więc zmian w postaci skierowania linii nr 272 na zachodnią stronę stacji. Szczegóły tej koncepcji opisano w [17,18], schematycznie ideę pokazuje natomiast rys. 4.

Proponowany układ torowy znacząco zmniejszy kolizyjność istniejących relacji, warto jednak zadać pytanie czy nie pojawi się potrzeba realizacji innych relacji. Na podstawie dotychczasowych analiz uznano że:

- nie należy spodziewać się kształtowania połączenia metropolitalnego Buk – Kiekrz / Suchy Las, a połączenie pospieszne z Berlina (Zbąszyń) w kierunku Piły jest możliwe, lecz mało prawdopodobne;
- połączenie metropolitalne Luboń – Kiekrz / Suchy Las jest rozważane (tab. 2), ale nie spowoduje zwiększenia kolizyjności układu;
- połączenie pospieszne Ostrów / Kalisz – Gniezno (a właściwie w obecnych koncepcjach – do Bydgoszczy przez Wągrowiec), jest możliwe, choć korzystniejsze byłyby inne relacje; podobnie połączenie metropolitalne Poznań Starołęka – Poznań Wschód jest możliwe, ale inne relacje byłyby korzystniejsze.

Należałoby więc ewentualnie rozważyć uzupełnienie proponowanego układu o małokolizyjne połączenie Poznań Starołęka – Poznań Główny – Poznań Wschód, co jest obecnie analizowane przez biuro projektowe BBF (jedna z propozycji uniemożliwiłaby realizację 8-krawędziowego przystanku Poznań Śródmieście), natomiast koszty realizacji tego połączenia przy małym prawdopodobieństwie jego wykorzystania

prawdopodobnie skłonią do rezygnacji z jego wykonania.

Czas obsługi pociągów

Dworzec Poznań Główny zdecydowanie może kandydować do miana najistotniejszego węzła przesiadkowego w mieście, ale pełne wykorzystanie jego potencjału, zarówno pod względem przepustowości, jak też atrakcyjności dla pasażerów, jest hamowane przez wiele czynników. Wśród problemów infrastrukturalnych związanych z torami przyperonowymi i peronami można wymienić:

- brak usystematyzowania kierunków odjazdów linii PKM z poszczególnych peronów (omawiana wcześniej modernizacja powinna rozwiązać ten problem),
- brak rozdziału pociągów metropolitalnych od pospiesznych,
- czynności technologiczne,
- czas wsiadania pasażerów.

Pierwsze dwa problemy mają być rozwiązane w wyniku omawianej wyżej modernizacji. W obrębie dworca korzystnie na funkcjonowanie węzła przesiadkowego wpłynęłoby usystematyzowanie kierunków odjazdów pociągów aglomeracyjnych i regionalnych z konkretnych krawędzi peronowych. Umożliwiłoby to utworzenie trwałego oznakowania w obrębie przestrzeni dworca dotyczącego możliwości podróży w danym kierunku. Ten zabieg wpłynąłby korzystnie na płynność przesiadek pasażerów jak i również usystematyzowałby czas postoju pociągów, który nie byłby już zależny od zmiennej drogi przejścia w obrębie stacji.

Jednym z pierwszych działań tworzenia PKM było ograniczenie liczby po-

ciągów kończących i rozpoczynających bieg na stacji – połączono relacje które później ukształtowały trasy PKM. Docelowo należałoby wyeliminować rozpoczynanie i kończenie biegu na stacji Poznań Główny, z wyjątkiem:

- rozpoczynania dziennych kursów i ich kończenia w godzinach wieczornych,
- pojedynczych pociągów pospiesznych,
- ewentualnie wybranej linii PKM w razie nierównowagi obciążenia ruchem od strony północnej i południowej, przy czym sieć PKM należy tak kształtować aby nie było takiej potrzeby.

Obsługa pociągów kończących bieg na stacji Poznań Główny powinna odbywać się jednak poza torami peronowymi, ewentualnie z wyjątkiem pierwszych i ostatnich kursów. Pozostałe pociągi powinny być kierowane do stacji na obrzeżach aglomeracji, bądź, szczególnie pociągi pospieszne, do planowanej stacji techniczno-postojowej w rejonie przystanku kolejowego Poznań Dębiec. Takie rozwiązanie pozwoli ograniczyć czas postoju do niezbędnej obsługi pasażerskiej, a przez to zwiększyć przepustowość stacji. Poprawiłoby również jakość obsługi pasażerskiej – obecnie na tory przyperonowe podstawianych jest wiele pociągów odjeżdżających w tym samym kierunku, czasem w znacznych odstępach czasowych, co dezorientuje pasażerów.

Obsługę pasażerską pociągów metropolitalnych przyspieszyć może odpowiednia konstrukcja pojazdów – szerokie drzwi i poziom podłogi pojazdu na tej samej wysokości co peron. Można też wskazać odpowiednim zmiennym oznakowaniem gdzie pociąg stanie w ramach długości peronu. Takie oznaczenia mają jednak większy potencjał dla pociągów pospiesznych – wskazanie gdzie staną poszczególne wagony zanim pociąg wjedzie na stację ograniczyłoby przemieszczanie się pasażerów na peronie, a tym samym konieczny czas postoju tych pociągów. Wskazane byłoby też wspomnienie systemu aplikacjami mobilnymi. W analizie czasu postoju istotny może być też kontekst kulturowy, zakładający że osoba odpro-

wadząca czasami pomaga nie tylko wejść do pociągu, ale też wstawić bagaż do przedziału – a następnie musi zdążyć wyjść.

Funkcjonalność dworca a miejski ruch samochodowy

Obecny dworzec kolejowy Poznań Główny jest krytykowany za małą funkcjonalność i daleko posuniętą nieczytelność układu. Problemy te szczegółowo opisano między innymi w [24,25]. Wśród głównych zastrzeżeń należy wymienić:

- zbyt wąskie przejścia i perony – węższe od obecnych i poprzednich wymogów, co częściowo wynika z procesów historycznych, ale jest też efektem złego zarządzania procesem inwestycyjnym;
- brak bezpośredniego dojścia na niektóre perony z głównego budynku dworcowego;
- brak dobrych wyjść w kierunku dzielnicy Wilda;
- brak informacji pasażerskiej na dojściach do peronów, w miejscach gdzie pasażer decyduje którądy iść;
- nieczytelną numerację peronów;
- wydłużone dojście do dworca autobusów dalekobieżnych;
- wydłużone drogi dojścia do przystanków lokalnego transportu zbiorowego [26,27].

Wśród infrastrukturalnych propozycji ograniczenia tych wad znalazły się:

- poprawa obecnych dojść na perony:
 - o wydłużenie budynku dworca tak, aby był nad wszystkimi peronami i dawał możliwość zejścia na nie, a także dojścia do ul. Głogowskiej,
 - o wydłużenia tunelu dworcowego z jednej strony do terenów Międzynarodowych Targów Poznańskich, z drugiej na teren dzielnicy Wilda,
 - o budowa trzeciego dojścia po stronie południowej, łączącego wszystkie perony (włącznie z peronami przystanku PST) oraz z wyjściami na teren dzielnic Wilda (Wolne Tory) i Łazarz;
- przejście do dworca autobusowego niewymagające wejścia do galerii handlowej;
- zbliżenie peronów transportu zbiorowego do budynku dworca.

Propozycja rozbudowy wiaduktu Dworcowego o jeszcze jeden ciąg – na który przełożono by torowisko tramwajowe i przez to uzyskano dostęp pasażerów pociągów do tramwajów bez konieczności przechodzenia przez jezdnię – wydawałby się oczywistym. Na przeszkodzie w procesie decyzyjnym stanęła obawa o przepustowość samochodową obwodnicy centrum miasta – I ramy. W celu ochrony dobrego dla pasażerów rozwiązania konieczna była więc analiza sterowania ruchem ulicznym, co pokazano na rys. 5 i w tabeli 3. Na rys. 5 pokazano obecny układ kluczowego skrzyżowania i jedną z możliwości jego przekształcenia, a w tabeli 3 – zestawienie przepustowości. Przepustowość C szacowano z wzoru:

$$C = S_0 \cdot T_z / T_c$$

gdzie:

S_0 – natężenie nasycenia równe 1800 poj./h dla strumieni na wprost i 1500 poj./h dla strumieni skręcających,

T_z – długość światła zielonego [s] w cyklu,

T_c – długość cyklu [s].

Wykazano, że w tym miejscu jest możliwa realizacja dobrej przestrzeni pasażerskiej przy zachowaniu jakości ruchu samochodowego, ale wymaga to rozwiązań nietypowych i wysiłku projektantów.

Obsługa autobusów dalekobieżnych

Dworzec autobusowy pełni istotną rolę w funkcjonowaniu węzła transportowego Poznań Główny. Zapewnia skomunikowanie z obszarami wykluczonymi komunikacyjnie w aglomeracji poznańskiej, a także dostęp do relacji międzymiastowych i międzynarodowych, które uzupełniają siatkę połączeń kolejowych.

Najkrótsze przejście z peronu kolejowego do dworca autobusowego ma długość 350 m, w tym 250 m tunelu – dojście to jest możliwe jedynie z peronu 1. Alternatywna trasa, dostępna z wszystkich peronów, prowadzi przez halę dworca i galerię handlową prze-

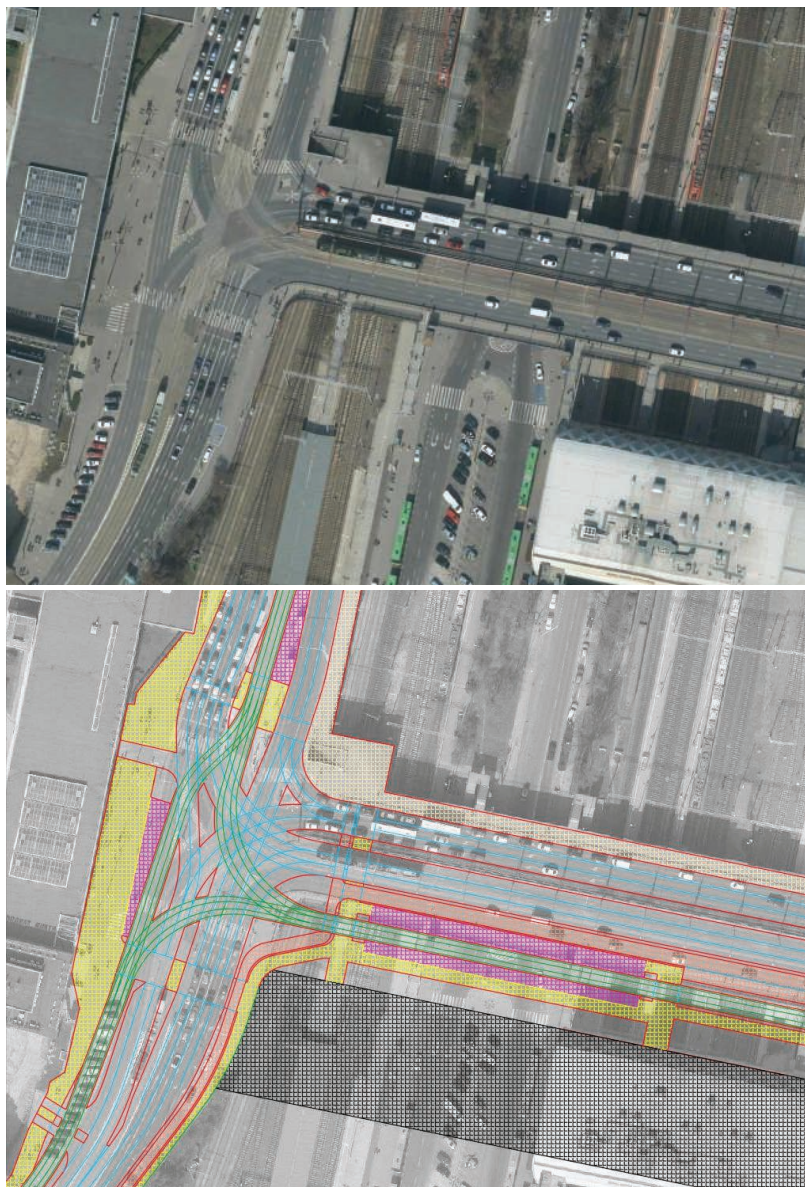
cinając tym samym inne ciągi piesze. Najdłuższe przejście w ramach dworca obejmuje odległość od peronów PST wynoszącą około 600 metrów. Wskazane byłoby więc skrócenie dojścia, co jest możliwe poprzez wyprowadzenie wyjścia z tunelu dworcowego bezpośrednio na teren dworca autobusowego.

Osobną kwestią jest czas dojazdu do dworca autobusowego. Szczególnie dotyczy to pasażerów autobusów dojeżdżających ul. Głogowską, którzy dworzec mają w zasięgu wzroku nawet 5 minut przed dojazdem do peronu dla wysiadających, co w razie krótkiego czasu na przesiadkę na pociąg jest szczególnie stresujące. Konieczne byłoby umiejscowienie peronu dla pasażerów wysiadających w rejonie ul. Głogowskiej lub Mostu Dworcowego (por. rys. 5), a także skrócenie drogi dojazdu.

Szkic na rys. 6 pokazuje, że takie skrócenie o ok. 350 m, oraz jedno skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną, jest możliwe. W koncepcji tej przewiduje się nowy wyjazd na aleję Króla Przemysła II na wysokości obecnego Ronda Szczęśliwej Podróży – wyłącznie dla autobusów. Przewiduje się też likwidację ronda w celu ograniczenia sił odśrodkowych działających na pasażerów i zapewnienie kierowcom samochodów innej możliwości nawrotu. Na południe od nowego wyjazdu można zaprojektować postój taksówek i parking *Całuj-i-Jeźdź*. Przewidziano też perony dla miejskich autobusów bliżej dworca niż obecnie. Otwartą kwestią pozostaje czy w rejonie dworca zachować ulicę o nazwie Wolne Tory, czy przekształcić ją na miejsca postojowe dla autobusów dalekobieżnych. Opisany układ jest jednak przykładem projektowania, w którym pominięto dbałość o jakość transportu zbiorowego.

Podsumowanie

Celem rozważań podjętych w niniejszym artykule było zwrócenie uwagi na złożony zespół analiz koniecznych do podjęcia na etapie planistycznym dla uzyskania efektów modernizacji węzłów kolejowych korzystnych dla eksploatacji kolei i pasażera. Planowanie przebudowy głównego dworca kolejowego



5. Obecny i proponowany układ krytycznego dla przepustowości samochodowej i jakości obsługi pasażerów skrzyżowania przy stacji Poznań Główny.

Kolorem żółtym zaznaczono chodniki, kolorem fioletowym perony tramwajowe, kolorem czerwonym jezdnie rowerowe, kolorem szarym jezdnie rowerowe z dopuszczonym ruchem pieszym. Kolorem czarnym zaznaczono planowane wydłużenie budynku dworca. W miejsce jezdni rowerowej przy budynku dworca można alternatywnie umieścić postój taksówek i peron dla pasażerów wysiadających z autobusów dalekobieżnych.

Tab. 3. Przepustowość skrzyżowania Most Dworcowy – Roosevelta – Głogowska przy Dworcu Głównym w Poznaniu obecnie i w proponowanym na rys. 5 układzie

Obecnie					W proponowanym układzie				
Faza	Kierunek	Długość fazy [s]	Pasy ruchu	Przepustowość [poj./h]	Faza	Kierunek	Długość fazy [s]	Pasy ruchu	Przepustowość [poj./h]
1	↗	34	2	850	1	↗	23	3	860
2	↘	34	2	1020	2(3)	↘	**34	2	1020
2	↖	34	2	1020	3	↖	23	3	1030
2,3	↙	74	2	*1950	4	↙	34	2	850
1	↘	34	1	600	1,2,4	↘	65	1	810
3	↖	34	2	850	4	↖	34	2	850
		18	Czasy międzyczekowe [s]				24		
		120	Suma [s]				120		

*dla zrównoważonej obsługi tej relacji wystarczy przepustowość 850 poj./h

**wartość średnia, w danym cyklu zależna od obsługi tramwajów

wego w Poznaniu powinno zacząć się od określenia docelowej intensywności ruchu kolejowego i układu tras pociągów. Ta decyzja zdeterminuje lokalizację dworca kolejowego. Następnie należy zaprojektować układ torowy, a dopiero potem można rozważać kształt dworca kolejowego.

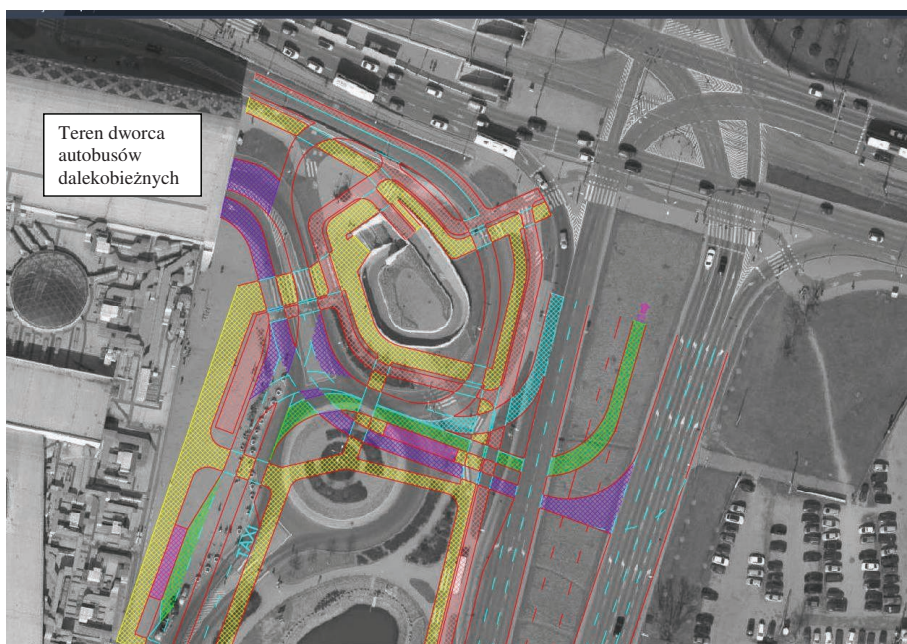
Stacja powinna mieć optymalną liczbę krawędzi peronowych. Ich deficyt może ograniczać rozwój połączeń kolejowych, a także utrudniać pasażerom korzystanie z dworca. Ich nadmiar spowoduje niepotrzebne wydłużanie dróg przejścia pasażerów.

W procesie projektowym nie można pominąć otoczenia dworca kolejowego – dla stacji Poznań Główny oznacza to wyznaczenie dobrych dojazdów z peronów do sąsiadujących części miasta, a także dobre skomunikowanie z peronami autobusów dalekobieżnych i transportu miejskiego. Optymalnym jest, aby dojeżdżać do z peronów kolejowych do tych miejsc nie krzyżowały się z ruchem samochodowym – pokazano że na dworcu Poznań Główny jest to możliwe.

Projektowanie otoczenia dworcowego wymaga poszukiwania dobrych, często nietypowych, rozwiązań. Przykład lokalizacji peronów tramwajowych na wiadukcie Dworcowym (rys. 5) oraz dojazdu do dworca autobusowego (rys. 6) wskazuje na konieczność stosowania w projekcie kryteriów jakościowych obejmujących czas i bezpieczeństwo pasażerów. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Pawlik A.: Geneza, stan istniejący oraz kierunku rozwoju Poznańskiej Kolei Metropolitalnej z uwzględnieniem aspektów przestrzennych, demograficznych i techniczno-ekonomicznych; Przegląd Komunikacyjny 2023/9-10, str.4-8
- [2] Wymiana pasażerska na stacjach w Polsce, cykl opracowań Urzędu Transportu Kolejowego, Warszawa 2018-2024
- [3] Materiały ze strony Centralnego Portu Komunikacyjnego www.cpk.pl (dostęp 1.06.2023)
- [4] Bresch B.: Modernizacja linii kolejowych w Polsce a budowa linii



6. Szkic możliwej przebudowy dojazdu do dworca autobusowego Poznań Główny dla autobusów miejskich i dalekobieżnych.

Kolorem granatowym pokazano jezdnie dedykowane autobusom dalekobieżnym, zielonym – autobusom miejskim, niebieskim – obu rodzajom autobusów. Kolorem żółtym zaznaczono chodniki, kolorem fioletowym perony dla autobusów miejskich, kolorem czerwonym jezdnie rowerowe.

dużych prędkości; Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej 2017/25, str.51-60

- [5] Rychlewski J, Pawłowski M.: Problemy przeprowadzenia trasy kolei dużej prędkości przez aglomerację poznańską; Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej 2017/25, sr.:323–334, doi:10.21008/j.1897-4007.2017.25.25
- [6] Rychlewski J.: Przebieg linii kolejowej dużej prędkości nr 85 przez Poznań w: Nowe środki transportu i nowe formy mobilności, SITK, Poznań 2023, str.293-304
- [7] Bul R., Gadziński J., Rychlewski J.: Sieć kolejowa i kolej metropolitalna; Koncepcja kierunków rozwoju przestrzennego Metropolii Poznań: Centrum Badań Metropolitalnych UAM Poznań, 2016, str.124-131
- [8] Bul R., Kaczmarek T.: Społeczne uwarunkowania rozwoju kolei metropolitalnej w aglomeracji poznańskiej, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań 2014
- [9] Kaczmarek T.: Strategia rozwoju aglomeracji poznańskiej – Metropolia Poznań 2020, CBM UAM, Poznań 2011
- [10] Gisterek I., Korzeń M.: Utworzenie Kolei Aglomeracyjnej we Wrocławiu z wykorzystaniem odcinków

średnicowych; Przegląd Komunikacyjny 2021/6-7, str.8-13

- [11] Kruszyna M., Makuch J.: Koncepcja rozbudowy estakady kolejowej w centralnej części WWK; Przegląd Komunikacyjny 2021/8, str.11-15
- [12] Plucińska E., Kosicki D.: Ocena możliwości odciążenia krytycznego dla linii nr 3 szlaku kolejowego Poznań Wschód - Poznań Główny poprzez skierowanie wybranych pociągów alternatywną trasą przejazdu; Przegląd Komunikacyjny 2014/3, str.20-25
- [13] Czerniak K.: Wstępny projekt dostosowania układu torowego stacji Poznań Wschód do rozbudowy ilości torów na odcinku do stacji Poznań Główny, praca inżynierska, Politechnika Poznańska, Poznań 2020
- [14] Olejarski S.: Dostosowanie układów torowych wybranych posterunków Poznańskiego Węzła Kolejowego dla rozbudowy systemu Poznańskiej Kolei Metropolitalnej, praca magisterska, Politechnika Poznańska, Poznań 2020
- [15] Kroma R.: Koleje żelazne w Poznaniu; Kronika Miasta Poznania 2013/4, str.7-63
- [16] Węgiński J.: Układy torowe stacji. Funkcja i teoria, WKŁ, Warszawa 1974

- [17] Rychlewski J., Pawłowski M., Choraży K, Dolata P., Jędrzejczak M., Paciorkowski P., Subocz J., Zienowicz P., Ławicki K., Murawski M.: Propozycje modernizacji układów torowych i peronów stacji Poznań Główny, Horyzont 2050 - lepszy transport & lepsze miasto, Poznań: Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP 2021, str.313-328
- [18] Kosicki D., Rychlewski J.: Przepustowość stacji kolejowej Poznań Główny; Technika Transportu Szynowego, 2014/1, str.27-32
- [19] Pawlik A.: Koncepcja i uwarunkowania utworzenia Poznańskiej Kolei Metropolitalnej z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych, przestrzennych i demograficznych; Przegląd Komunikacyjny 2023/6-7-8, str.55-59
- [20] Kaczmarek T.: Studium Uwarunkowań Rozwoju Przestrzennego Aglomeracji Poznańskiej, Poznań, CBM UAM 2012
- [21] Horyzontalny rozkład jazdy <https://hrj.gov.pl/rozpoczynamy-konsultacje-horyzontalnego-rozkładu-jazdy/> (dostęp 28.11.2025)
- [22] www.ermts.net (dostęp 28.11.2025)
- [23] Woch J.: Podstawy inżynierii ruchu kolejowego, WKŁ, Warszawa 1983
- [24] Plucińska E., Kosicki D.: Warunki obsługi pasażerów na dworcu Poznań Główny po budowie Zintegrowanego Centrum Komunikacyjnego; Technika Transportu Szynowego 2014/7-8, str.56-61
- [25] Plucińska E.: Analiza infrastruktury i organizacji obsługi pasażerów komunikacji zbiorowej przy stacji kolejowej Poznań Główny; Przegląd Komunikacyjny 2018/5, str.15-21
- [26] Gadziński J., Beim M.: Dostępność przestrzenna lokalnego transportu publicznego w Poznaniu; Transport Miejski i Regionalny 2009/5, str.10-16
- [27] Rychlewski J.: Accessibility of Public Transport Stops on the Example of the City of Poznan, w: Janecki R., Sierpiński G.: The Development of Transport Systems, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2012, str.341 – 350.

Nowoczesne metody redukcji hałasu kolejowego

Modern methods of railway noise reduction



Kamil Hajduk

Mgr inż.

Bahati Rail



Roksana Licow

Dr inż.

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Transportowej

roksana.licow@pg.edu.pl
ORCID: 0000-0002-4368-0064



Christoph Gramowski

Dr inż.

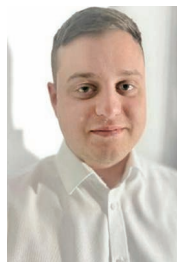
Schrey&Veit



Mikołaj Pachniewski

Mgr inż.

absolwent Politechniki Gdańskiej



David Słuchocki

Mgr inż.

absolwent Politechniki Gdańskiej

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki wieloletnich badań absorberów szynowych H, prowadzonych przez jednostki badawcze w Polsce i w Niemczech, które potwierdzają ich skuteczność, wysoką trwałość oraz stabilność mocowań. W ramach badań wskazano również znaczące różnice w skuteczności redukcji hałasu w zależności od typu nawierzchni oraz rodzaju taboru. Artykuł obejmuje ponadto przegląd aktualnych trendów w przeciwdziałaniu hałasowi kolejowemu w Europie: kompozytowe wkładki hamulcowe, zintegrowane systemy monitoringu taboru oraz możliwość stosowania niższych ekranów akustycznych w połączeniu z absorberami. W pracy zwrócono także uwagę na rolę decyzji środowiskowych i specyfikacji technicznych, których niedoskonałości często prowadzą do nieoptymalnych rozwiązań projektowych.

Słowa kluczowe: Absorbery przyszynowe; Dynamiczne tłumiki szynowe; Statyczne tłumiki szynowe; Kolejowe ekrany akustyczne; Absorbery do kół kolejowych

Abstract: The article presents the results of long-term studies on H rail dampers conducted by research units in Poland and Germany, confirming their effectiveness, high durability, and mounting stability. The studies also indicated significant differences in noise-reduction performance depending on the type of track structure and the type of rolling stock. The article further includes a review of current trends in railway noise mitigation in Europe: composite brake blocks, integrated rolling-stock monitoring systems, and the possibility of using lower noise barriers in combination with dampers. The paper also highlights the role of environmental decisions and technical specifications, whose shortcomings often lead to suboptimal design solutions.

Keywords: Rail dampers; dynamic rail dampers; Static rail dampers; Railway noise barriers; Railway wheel dampers

Wstęp

Hałas kolejowy, czyli hałas powstający w czasie przejazdu pociągów stanowi jedno z najpoważniejszych wyzwań środowiskowych związanych z eksploatacją infrastruktury kolejowej. Zwiększanie prędkości jazdy oraz dobowej liczby pociągów wpływa na konieczność stosowania rozwiązań, które skutecznie ograniczają emisję dźwięku u źródła oraz w otoczeniu linii kolejowych. Najczęściej stosowanym środkiem ochrony są ekrany akustyczne, jednak w wielu przypad-

kach ich zastosowanie jest kosztowne, nieefektywne lub społecznie kontrowersyjne. Dlatego coraz częściej analizowane są rozwiązania alternatywne takie jak: tłumiki dynamiczne (absorbery szynowe) oraz absorbery do kół. Jednym z najważniejszych kryteriów oceny tych rozwiązań jest ich trwałość oraz odporność na obciążenia eksploatacyjne. Dodatkowo, precyzyjne utrzymanie toru poprzez szlifowanie szyn, regulację jego położenia w planie i profilu, monitoring stanu nawierzchni oraz stawianie wymagań dla przewoźników w za-

kresie odpowiedniego utrzymania stanu taboru, również znacząco wpływa na skuteczne ograniczanie emisji hałasu.

Zintegrowany system monitoringu oddziaływania kolei na środowisko

Jednym ze sposobów monitoringu hałasu emitowanego przez tabor kolejowy do środowiska są zintegrowane systemy monitoringu oparte na kamerach wizyjnych oraz czujnikach akustycznych i drganiowych [8]. Ta-



1. Absorber H i jego mocowanie do szyny
[opracowanie własne]

kie systemy umożliwiają integrację pomiarów parametrów ruchu, technicznych i środowiskowych.

Przykłady takich rozwiązań, czasami w bardziej ograniczonym zakresie możliwości pomiarowych, funkcjonują w Niemczech, Szwajcarii czy Francji. W Polsce obecnie badania terenowe prowadzi zespół naukowców z Politechniki Gdańskiej i Politechniki Wrocławskiej [8].

Zastosowanie przez zarządców infrastruktury Zintegrowanego systemu monitoringu oddziaływania kolei na środowisko może pozwolić na monitorowanie parametrów technicznych taboru wpływających na hałas oraz identyfikację najgłośniejszych składów.

Przegląd badań i rozwiązań infrastrukturalnych w zakresie redukcji hałasu na liniach kolejowych

Tłumiki dynamiczne

Trwałość drogi szynowej szacowana jest z uwzględnieniem jej elementów składowych konstrukcji i przeznaczenia. W większości przypadków przyjmuje się 40 letnią trwałość w przypadku linii magistralnych silnie obciążonych i 50 letnią dla linii o mniejszym ruchu [5]. Czynniki

wpływającymi na wieloletnią bezawaryjną eksploatację są właściwe dobrane do warunków techniczno-eksploatacyjnych przytwierdzenia szyn oraz podkłady kolejowe. Istotą rolę pełnią również podłoże oraz odpowiednie odwodnienie linii kolejowej. W zakresie rozwiązań przeciwhałasowych należy wspomnieć o ich żywotności.

Żywotność absorberów przyszytowych H [14] szacowana jest na minimum 20 lat. Ich spodziewana trwałość to 25-30 lat, co wynika z ich wytrzymałości na co najmniej 3 mln cykli zmęczeniowych i brak wpływu tych cykli na ich trwałość. Pierwsze badania zmęczeniowe absorbera H (rys. 1), wykonano w 2013 po zaprojektowaniu nowego typu tłumika dynamicznego, którego zaprojektowanie wymuszone było wymaganiami głównego zarządcy niemieckich linii kolejowych. Badania przeprowadzono dla 8 typów absorberów. Każdy typ przeszedł pomyślnie próbę zmęczeniową obejmującą serie po 3 miliony cykli. Po testach mocowanie pozostało stabilne, momenty dokręcania śrub nie uległy zmianie a odkształcenia zacisków wyniosły poniżej 150 µm. Dzięki tym badaniom potwierdzono odporność konstrukcji na obciążenia dynamiczne występujące w eksploatacji.

Z uwagi na wymóg cykliczności badań zgodnie z niemieckimi normami jakościowymi przeprowadzono je ponownie w 2024 roku (rys. 2). Absorber H oraz jego system mocowania (metalowe sprężyny zaciskowe) przebadano w Jednostce Badawczej ds. Infrastruktury

Transportowej Uniwersytetu Technicznego w Monachium. Badania zmęczeniowe obejmowały 3 mln cykli dynamicznego obciążenia oraz dodatkowe drgania pochodzące od oscylatora niewyważenia. Próby prowadzono zgodnie z normą [12], odwytwarzając naprężenia występujące w miejscach przytwierdzeń szyn. Po zakończeniu testów nie stwierdzono uszkodzeń absorberów ani utraty sprężystości zacisków, które zachowały pełną funkcjonalność i nie wykazały trwałych odkształceń.

Odporność wytrzymałościowa jest najważniejszą właściwością użytkową tłumika szynowego i jego mocowania, dlatego tak ważne jest wykonywanie testów tłumika szynowego zgodnie z normą [12].

Cechą wpływającą na skuteczność tłumika przyszykowego jest jego funkcjonalność w zakresie właściwego sposobu montażu. Odpowiednie rozwiązanie montażowe istotnie wpływa na stabilność położenia tłumika w czasie jego eksploatacji w związku z przyjmowaniem oddziaływań dynamicznych pochodzących od przejeżdżającego taboru oraz wpływu wykonywanych prac utrzymaniowych (np. podbijanie toru, profilowanie podsypki).

Dla porównania, izolatory przyszykowe/wkładki wibroizolacyjne (tłumiki statyczne) mocowane są zazwyczaj za pomocą klipsów/stalowych sprężyn obejmujących szyjkę lub stopkę szyny. Takie rozwiązanie nie zapewnia pełnego dolegania materiału tłumiącego do szyjki szyny, jak również jest bardzo podatne na odkształcenia wynikające o oddziały-



2. Absorber H podczas badań wytrzymałościowych przeprowadzonych zgodnie z normą [12]
[opracowanie własne]





3. Przykład niewłaściwego przylegania izolatora przyszynowego [opracowanie własne]

wań dynamicznych tor – pojazd (rys. 3).

Wymóg badań zmęczeniowych zrealizowano w 2024 r. w TU Monachium, wykonując pełną próbę zmęczeniową systemu mocowania absorberów H. Badanie przeprowadzono zgodnie z [12] przy obciążeniu pulsacyjnym 3 mln cykli oraz dodatkowej wibracji z częstotliwością 50 Hz. Po zakończeniu testu nie stwierdzono żadnych uszkodzeń ani utraty sprężystości mocowania a cały system zachował pełną funkcjonalność [12].

Wyniki uzyskane z badań zmęczeniowych są istotne, ponieważ stabilność mocowania ma kluczowy wpływ na skuteczność akustyczną tłumików dynamicznych szyn. Wyniki TU Monachium potwierdziły, że absorber i jego system przytwierdzenia utrzymują parametry pracy w długim czasie, co odróżnia je od przekładek podszynowych (pkt. 3.2), które w badaniach wykazują znaczące zużycie po takim samym obciążeniu.

Badania w zakresie prób zmęczeniowych przekładek podszynowych

Kluczowym parametrem decydującym o bezpieczeństwie, komforcie jazdy oraz akustycznym zachowaniu toru jest trwałość przekładek podszynowych [12]. Elementy wykonane z tworzyw sztucznych w największym stopniu determinują długoterminową stabilność siły docisku, oporu

podłużnego oraz sztywności systemu SB. Publikacja [4] wskazuje, że przekładka może „ulegać szybkiej degradacji i jako pierwszy element kwalifikowana może być do wymiany”. Zastosowanie materiałów najwyższej jakości jest tutaj kluczem do trwałości nawierzchni kolejowej jako systemu, przy koszcie początkowym stanowiącym znikomą część kosztu modernizacji czy utrzymania nawierzchni kolejowej.

Ocena wytrzymałości przekładek wymaga przeprowadzenia pełnych badań zmęczeniowych do 3 mln cykli obciążenia, ponieważ dopiero ta próba pokazuje realne zmiany parametrów przekładki, które wystąpią w trakcie eksploatacji. Test 3 mln cykli odpowiada jedynie za ok. 5–10% rzeczywistego obciążenia eksploatacyjnego toru. Podczas realizacji takich badań można zaobserwować degradację przekładki stwierdzoną gorszymi wartościami parametrów [4] (tabela 1).

Po 3 mln cykli, siła docisku przekładki typu 1 zmniejszyła się o 23%, a opór podłużny aż o 32%. sztywność statyczna zwiększyła się o +125%, co wpływa na znaczne usztywnienie i pogorszenie właściwości akustycznych toru [4]. Oznacza to, że bez re-

alizacji badań zmęczeniowych, nie da się ocenić rzeczywistego wpływu przekładki na generowany hałas toczenia i trwałość elastyczną przytwierdzeń szyn.

Stwierdzenie to potwierdza, że kryterium trwałości zmęczeniowej jest istotnym parametrem, ważniejszym niż sztywność wyjściowa mierzona statycznie.

Badania podkładek podpodkładowych

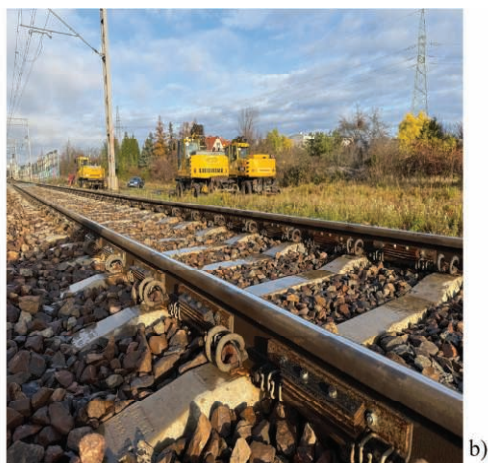
W ramach programu badawczego obejmującego testy innowacyjnych technologii redukcji hałasu kolejowego [21] przebadano czy zastosowanie podkładek podpodkładowych wykazuje redukcję hałasu oraz czy zwiększa skuteczność absorberów, w tym wypadku absorberów H. Porównano 140-metrowy odcinek testowy, na którym zastosowano zarówno elastyczno-plastyczną podkładkę podpodkładową, z odcinkiem referencyjnym. Wyniki badań wykazały, że samo użycie podkładki podpodkładowej nie powoduje redukcji hałasu. Zarejestrowano redukcję poziomu hałasu o ok. 3,5 dB(A) można uzyskać po zamontowaniu absorberów H. Podkładki podpodkładowe działają głównie w zakresie modyfikacji parametrów dynamicznych toru i nie przekłada się to na mierzalne zmniejszenie poziomu hałasu toczenia.

Badania skuteczności absorberów H w zależności od typu podkładów kolejowych i przytwierdzeń

Skuteczność tłumienia absorberów przyszynowych zależy od typu nawierzchni kolejowej na której są wbudowane. W celu zbadania wpływu konstrukcji nawierzchni kolejowej

Tab. 1. Zestawienie wyników badań obciążeń cyklicznych systemów przytwierdzeń z przekładkami typu 1 i typu 2 [4]

Rodzaj przekładki		typ 1	typ 2
Parametr			
Siła docisku	Parametr w stanie nowym	18,7 kN	22,4 kN
	3 mln cykli	14,4 kN (–23%)	18,8 kN (–16%)
Opór podłużny	Parametr w stanie nowym	16,6 kN	20,4 kN
	3 mln cykli	11,3 kN (–32%)	18,5 kN (–9,3%)
Sztywność statyczna	Parametr w stanie nowym	122,9 MN/m	89,0 MN/m
	3 mln cykli	276,2 MN/m (+125%)	111,3 MN/m (+25%)



4. Polygon badawczy z przytwierdzeniem typu K (a) oraz z przytwierdzeniem typu SB (b) na LK nr 250 [opracowanie własne]



5. Pomiary hałasu zgodnie z [11] na poligonie w Sopocie, tor 501 LK 250 [opracowanie własne]

wej na skuteczność tłumienia przeprowadzono pomiary skuteczności absorberów szynowych H w zależności od typu zastosowanych podkładów kolejowych, przytwierdzeń oraz związanych z nimi przekładek podszytowych. Badaniom poddano absorbery zainstalowane w dwóch lokalizacjach na LK nr 250 (Gdańsk Główny – Rumia) w torze 501 na szlaku Sopot – Gdynia Orłowo (rys. 4a), oraz w torze 501 na szlaku Gdańsk Wrzeszcz – Gdańsk Oliwa (rys. 4b). W konstrukcji toru w pierwszej lokalizacji występowały podkłady betonowe PBS-1 z przytwierdzeniem typu K z nowowbudowanymi przekładkami (rys. 5) podszytowymi a w drugiej lokalizacji podkłady strunobetonowe PS83 z przytwierdzeniem typu SB (tor po 3-miesięcznym okresie stabilizacji).

W przypadku pierwszej lokaliza-

cji, gdzie występowała nawierzchnia starego typu (podkłady PBS-1 i przytwierdzenie typu K) otrzymano średnią tłumienia ok. 2,0 dB(A) (dla składów EZT starego typu np. EN57 i pochodne), a dla nowych EZT (31WE /31WEbb) ok. 2,6 dB(A). Natomiast średniodobowa skuteczność absorbera H dla tej lokalizacji wyniosła 2,2 dB(A).

Tak mała wartość średniej tłumienia absorberów H spowodowana była stanem technicznym infrastruktury (35 lat), która właśnie z tego powodu w 2026 roku przechodzić będzie naprawę główną.

W przypadku drugiej lokalizacji, dla odcinka z podkładami PS83, przytwierdzeniem SB oraz nową podsypką spodziewane są wyniki średniej tłumienia o wartości ok. 3,5 dB(A). Większa skuteczność tłumienia wynikać będzie m.in. z odpowiednio

podbitego i oprofilowanego toru na tym odcinku pomiarowym.

Przeprowadzone badania w zakresie prób zmęczeniowych przekładek podszytowych jak również pomiary realizowane na liniach kolejowych jednoznacznie wskazują na konieczność badania przekładek podszytowych stosowanych na sieci linii kolejowych w Polsce. Obowiązkowe testy zmęczeniowe do 3 mln cykli, wpłyną między innymi na ocenę siły docisku, która jest kluczowa dla bezpieczeństwa toru oraz ocenę poziomu hałasu toczenia.

Zastosowanie ekranów akustycznych z użyciem absorberów przyszynowych

Przy wykorzystaniu modelu obliczeniowego opracowanego na podstawie programu badawczego [10] wyliczono jakie byłoby możliwe zmniejszenie wysokości ekranu akustycznego, gdyby zastosować w torze absorbery akustyczne. Analizę wykonano dla do terenu płaskiego. Badania przeprowadzono dla 4-metrowego ekranu akustycznego oddalonego o 6 m od osi toru. Punkt badawczy zlokalizowano w odległości 29,5 m od osi toru na wysokościach: 3 m, 6 m i 9 m. Obliczenia wykazały możliwość zmniejszenia wysokości ekranu akustycznego w zakresie 0,5-0,7 m w przypadku zastosowania absorberów.

Przeprowadzone badania [10], stanowią punkt odniesienia do realizacji badań rzeczywistych na sieci głównego zarządcy kolejowego w Polsce.

Kolejnym sposobem ograniczenia hałasu kolejowego jest zastosowanie niskich ekranów akustycznych. W 2017 roku przeprowadzono badania modelowe na podstawie [6, 20], które wykazały, że samo zastosowanie niskiego ekranu akustycznego jest porównywalne ze skutecznością ekranu wysokiego, ponieważ ekran niski montowany jest bliżej osi toru niż ekran wysoki (co najmniej 2,2 m od osi toru). Taka zmiana położenia umożliwia przy ekranach o wysoko-

Tab. 2. Wyniki badań modelowych dla zastosowania niskich ekranów akustycznych, gdy tor znajduje się na nasypie (lub obiekcie inżynierskim), przeprowadzonych zgodnie z [6, 20]

Piętro budynku oddalonego o 20 m od osi torowiska	Wariant	Poziom hałasu 1m przed fasadą L_{Aeq} , dB		Wariant	Poziom hałasu 1m przed fasadą L_{Aeq} , dB		Skuteczność ekranowania D_L , dB
		dzień	noc		dzień	noc	
1	Nasyp 4.5 m	65.56	65.69	Nasyp 4.5 m + niski ekran	59.81	59.94	5.75
2		68.55	68.68		61.40	61.53	7.15
3		72.10	72.24		63.23	63.36	8.87
4		72.00	72.13		65.32	65.45	6.68
5		71.78	71.91		67.55	67.68	4.23
6		71.47	71.60		69.39	69.52	2.08
7		71.09	71.22		71.09	71.22	0

Piętro budynku oddalonego o 20 m od osi torowiska	Wariant	Poziom hałasu 1m przed fasadą L_{Aeq} , dB		Wariant	Poziom hałasu 1m przed fasadą L_{Aeq} , dB		Skuteczność ekranowania D_L , dB
		dzień	noc		dzień	noc	
1	Nasyp 3 m	67.04	67.18	Nasyp 3 m + niski ekran	60.58	60.71	6.46
2		69.9	70.03		62.28	62.41	7.62
3		72.07	72.20		64.24	64.37	7.83
4		71.9	72.03		66.45	66.58	5.45

ści 0,76 m uzyskać skuteczności ekranowania odpowiednio do 3 dB(A) i 7 dB(A) przy pomiarze na wysokości 3,5 m i w odległości 25 m od osi toru. Ekran referencyjny umieszczony w większej odległości od toru, o wysokości 2 m, daje w tych warunkach skuteczność 10 dB(A) (Tabela 2).

Skuteczność niskich ekranów akustycznych jest tym większa, im wyżej położone są tory względem otoczenia. Ich zastosowanie powinno być brane pod uwagę gdy tory znajdują się na nasypie o wysokości min. 3 m lub na wiadukcie.

Prace utrzymaniowe - szlifowanie szyn

Decyzje środowiskowe dotyczące ochrony przeciwhałasowej często zawierają zapisy dotyczące szlifowania szyn oraz utrzymania parametrów geometrycznych toru i stanu powierzchni tocznej szyn jako czynników mających wpływ na możliwość ograniczania hałasu. Jest to uzasadnione, ponieważ stan toru, podobnie jak jakość podkładów i parametry zagęszczenia podsypki mają bezpośredni wpływ na generowany hałas toczenia. Według [19] stosowne utrzymanie nawierzchni poprzez regularne szlifowanie i smarowanie szyn są jednym z elementów poprawiających klimat akustyczny wokół

linii kolejowej.

Badania naukowe [15] również potwierdzają znaczący wpływ reprofilacji szyn na poziom hałasu. Badania te wykazały, że usunięcie zużycia falistego może spowodować redukcję hałasu nawet do około 9 dB(A). W typowych warunkach, między kolejnymi cyklami szlifowania, poziom poprawy wynosi zwykle około 3 dB(A).

Warto podkreślić, że dla reprofilacji prewencyjnej szyn należy usuwać z ich powierzchni tocznej co najmniej 0,3 mm, a dla naprawczej 0,6 mm, przy obowiązku zejścia 0,1 mm poniżej dna fal krótkich [25].

Kluczowe jest to, że falistość rozwija się w czasie, a więc częstotliwość koniecznego szlifowania decyduje o długoterminowych parametrach akustycznych toru. W tym obszarze istotną przewagę dają absorbery szynowe, np. omówione w pkt. 2.1. absorbery H. Na odcinkach, gdzie są stosowane, obserwuje się istotne wydłużenie czasu rozwoju falistości, nawet około trzykrotnie w porównaniu z odcinkami bez absorberów. W praktyce oznacza to: rzadszą potrzebę szlifowania, mniejsze koszty utrzymania nawierzchni oraz wyraźną przewagę absorberów H nad tłumikami statycznymi i innymi absorberami o niskiej skuteczności.

Z perspektywy eksploatacyjnej

jest to bardzo istotne, ponieważ tor bez rozwijającej się falistości szyn utrzymuje niski poziom drgań i charakteryzuje się mniejszą emisją hałasu przez dłuższy czas. W efekcie szlifowanie, regulacja toru w planie i profilu oraz absorbery nie są działaniami konkurencyjnymi, lecz uzupełniającymi się. Wysokiej jakości absorber nie tylko poprawia bieżącą akustykę toru, ale również spowalnia rozwój wad, które wymuszają późniejsze procesy utrzymaniowe (szlifowanie i regulację toru w planie i profilu).

W przeszłości technologia HSG mająca na celu szlifowanie pasywne podczas przejazdu z dużą prędkością zapowiadała się obiecująco, jednak w praktyce okazała się nieskuteczna. Zamiast deklarowanych 0,1 mm zdejmowała jedynie ok. 0,01 mm powierzchni tocznej szyny, czyli wielokrotnie mniej niż wymagane standardy utrzymaniowe. Nie usuwała falistości ani defektów zmęczeniowych, dlatego mimo dużych inwestycji została szybko zweryfikowana negatywnie [9].

Przegląd badań i rozwiązań taborowych w zakresie redukcji hałasu toczenia

Regulacje dotyczące utrzymania taboru w kontekście ochrony przed hałasem

Zastąpienie hamulców blokowych z żeliwa hamulcami tarczowymi może spowodować zmniejszenie poziomu hałasu na liniach kolejowych w dobrym stanie nawet o 10 dB(A) podczas hamowania. Jest to związane z chropowatością występującą na powierzchni tocznej kół hamowanych za pomocą żeliwnych klocków [16] (rys. 6). W przypadku wagonów z żeliwnymi hamulcami, konieczne jest regularne przetaczanie powierzchni tocznej kół w celu przywrócenia żądanego profilu obręczy.

Polskie badania przeprowadzone na torze doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie dla typu



6. Widok na a) i b) koło szorstkie hamowane żeliwnymi wkładkami hamulcowymi, c) i d) koło gładkie hamowane kompozytowymi wkładkami hamulcowymi [17]

to mniej niż 40% ogółu, w 2023 roku było to 33% [24]. Oprócz wymogów wymiany i dostosowania taboru przez przewoźników, w tym aspekcie skuteczny może być system bramek akustycznych [8], które wykrywać będą najgłośniejsze składy, za które zarządcy infrastruktury wystawiać będą dodatkowe opłaty przewoźnikom. Jest to jeden z tańszych sposobów walki z hałasem oraz najbardziej skuteczny i nie ingerujący w finanse zarządcy infrastruktury kolejowej.

Niezwykle istotny jest fakt, szybkiego reagowania i wyłączania ze składów wagonów z uszkodzeniami powierzchni tocznej kół w postaci płaskich miejsc, które powinny być usuwane poprzez reprofilację. Poprzez poślizg i tarcie w czasie hamowania koła na jego powierzchni tocznej może powstać powierzchnia płaska, która podczas dalszej jazdy objawia się nadmiernym hałasem i drganiami. Przez zestaw kołowy z płaskim miejscem na obręczy możliwe jest nawet uszkodzenie powierzchni tocznej głowki szyny.

Absorbery montowane na zestawach kołowych

Rozwiązaniem mającym wpływ na zredukowanie poziomu dźwięku emitowanego przez zestawy kołowe pojazdów kolejowych są absorbery kołowe (rys. 7), montowane bezpośrednio na zestawach kołowych taboru. Emisja hałasu z kół zachodzi głównie w zakresie częstotliwości rezonansowych. Absorbery (rys. 7c i 7d) wykonane są jako rezonatory wielowarstwowe. Składają się z metalowych płyt przekładanych warstwami elastomerów. Specjalna konstrukcja zapewnia trójwymiarowy efekt, który umożliwia redukcję dźwięku toczenia (do 7 dB(A)) oraz pisków (do 18 dB(A)). Badania taboru z zastosowaniem różnych elementów tłumienia i późniejsze ich stosowanie spowodowałyby ogromny postęp na drodze do ograniczania hałasu kolejowego [17].



7. Przykłady absorberów do kół a), b), c), d) [17]

wagonu Eaos potwierdziły, że zastosowanie wkładek hamulcowych kompozytowych zamiast żeliwnych daje możliwość redukcji hałasu o 6 dB(A) [7].

Od 8 grudnia 2024 r. po wyznaczonych „cichych sekcjach” linii kolejowych w Unii Europejskiej poruszać się mogą jedynie wagony towarowe

spełniające wymagania TSI Hałas [22]. Wagon musi być wyposażony w kompozytowe wstawki hamulcowe, które zapewniają cichszą eksploatację.

Liczba lokomotyw oraz wagonów towarowych z kompozytowymi wkładkami hamulcowymi z roku na rok rośnie. W Polsce wciąż jednak jest

Analiza aktów prawnych i wymagań w zakresie ochrony przed hałasem kolejowym

Charakterystyka zapisów wymogów projektowych dla tłumików i ekranów akustycznych

Poprawne zapisy w Specyfikacjach Technicznych (ST), Specyfikacjach Warunków Zamówienia (SWZ) i dokumentacjach projektowych są kluczowe dla doboru zasadnych elementów ochrony akustycznej. W praktyce jednak od lat powielane są nieprecyzyjne wymagania, które mogą być nieskuteczne w celu zredukowania poziomu dźwięku w określonym punkcie lub obszarze.

W dokumentacjach przetargowych dotyczących np. paneli aluminiowych stanowiących ekrany akustyczne, problemy wynikają z ogólnych zapisów dotyczących parametrów materiałowych, często bez wskazania obciążeń od ruchu kolejowego i metod ich weryfikacji odporności zmęczeniowej [18].

Głównym problemem często jest również brak wskazania jakie badania i według jakiej metody mają potwierdzić te wymagania. W ST brakuje przywołań norm PN-EN 1793-1/2/5, które są jedynymi obowiązującymi dla ekranów kolejowych w Europie.

Dokumentacje dot. stosowania tłumików akustycznych zawierają ogólne zapisy np. obniżenie poziomu dźwięku o 2 dB(A), które są trudne do interpretacji bez zadania pytania zamawiającemu. Ponieważ nie określa czy 2 dB(A) dotyczy poziomu z korekcją A oraz czy dotyczy pory dziennej i nocnej osobno [23].

Dodatkowo, w dokumentacjach często występuje brak wymagań co do odporności tłumików na wielokrotny demontaż / montaż co stawia wymóg określonej trwałości. Często w ST znajdują się ogólne informacje np.: „Konstrukcja absorbera ma zapewnić możliwość wielokrotnego demontażu” [18]. Nie ma określonej liczby cykli, sposobu testowania czy wymagań dotyczących efektywno-

ści akustycznej po ponownym montażu.

Decyzje środowiskowe w Polsce – wymagania i dobra praktyka

Decyzje o środowiskowych uwarunkowaniach (DŚU) stanowią formalny punkt wyjścia dla projektowania zabezpieczeń akustycznych na liniach kolejowych. Praktyka pokazuje jednak, że sposób ich przygotowania często uniemożliwia optymalny dobór środków ochrony przed hałasem. Ocena trzech analiz porealizacyjnych jednoznacznie wskazuje, że DŚU [1-3]: narzucają konkretne wysokości i lokalizacje ekranów, zamiast określić cel redukcji hałasu. Dodatkowo, są niespójne pomiędzy województwami nawet dla tej samej linii kolejowej i nie uwzględniają wariantów technologicznych i możliwości późniejszej rozbudowy tej linii kolejowej.

Takie postępowanie prowadzi do chaosu projektowego i konieczności sporządzenia trzech różnych analiz akustycznych dla jednego zadania zamiast podejścia skoordynowanego.

Praktyka wykazuje, że projektanci rozpatrują kilka wariantów ochrony akustycznej (ekrany, absorbery, ich kombinacje). Jednakże po zapoznaniu się z DŚU, należy zastosować konkretne, przedstawione w decyzji rozwiązanie. Gdyby jednak decyzja zamiast wskazywać konkretne rozwiązania, wymagała redukcji np. 3-5-7-8 dB(A), projektant mógłby wykorzystać optymalne rozwiązania redukcji hałasu. Dokumenty z lat 2020-2024 potwierdzają, że absorbery szynowe oferują realną redukcję hałasu średnio 1,5 - 3 dB(A) [1-3]. Badania własne z roku 2025 potwierdzają natomiast, że skuteczność akustyczna absorberów najwyższej klasy wynosi 3 dB(A), a w niektórych klasach pociągów blisko 5 dB(A).

Od wydania DŚU do realizacji inwestycji mija zwykle 3 - 5 lat, a zmiana decyzji trwa nawet 2 lata, przez co często DŚU nie obejmuje najnowszych rozwiązań technologicznych

w czasie realizacji.

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza aktów prawnych oraz rozwiązań technologicznych i sposobu ich wdrażania potwierdza, że skuteczne ograniczanie hałasu kolejowego wymaga podejścia systemowego, kompleksowego, obejmującego zarówno kontekst infrastrukturalny oraz taborowy. Badania zmęczeniowe absorberów szynowych H wykazały ich dużą trwałość oraz stabilność mocowania, co odróżnia je od elementów takich jak statyczne tłumiki szynowe. Wyniki badań terenowych i modelowych dowodzą, że absorbery przyszynowe mogą skutecznie wspierać lub zastępować ekrany akustyczne, pozwalając na zmniejszenie ich wysokości, a w niektórych przypadkach nawet całkowicie eliminować potrzebę ich budowy.

Właściwy dobór technologii powinien zależeć od dominującego rodzaju ruchu na danej linii kolejowej czy jej odcinku, co w praktyce rzadko jest stosowane. Kluczowe znaczenie ma również właściwe utrzymanie toru. Szlifowanie i usuwanie falistości szyn mogą redukować hałas nawet o 9 dB(A). Na podstawie analizy dokumentacji opracowanych decyzji środowiskowych i specyfikacji technicznych wskazano, że system projektowania rozwiązań redukujących poziom emisji akustycznej do środowiska, powinien zachęcać do stosowania rozwiązań hybrydowych. Dodatkowo, rekomenduje się przeprowadzanie badań akustycznych na etapie projektowania z uwzględnieniem aktualnej wiedzy technicznej i dostępnych rozwiązań. Określenie celu w zakresie wymaganego poziomu redukcji hałasu umożliwi projektantom racjonalny dobór rozwiązań ograniczających emisję hałasu. Dodatkowo, dobrą praktyką byłoby przygotowanie 2 albo 3 wariantów rozwiązań przeciwhałasowych celem przedstawienia ich inwestorowi do oceny. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Analiza porealizacyjna do decyzji Wojewody Mazowieckiego nr WŚR-I-AZ/6613/1/76/06 z dnia 17 stycznia 2007 r. dotyczącej modernizacji linii kolejowej E65 Warszawa - Gdynia od km 4+775 do km 132+640.
- [2] Analiza porealizacyjna do decyzji Wojewody Pomorskiego z dnia 14 marca 2007 r. (znak: ŚR/S. II.ZF/6670/23-9/06) dla przedsięwzięcia pn. "Przebudowa i rozbudowa (modernizacja) linii kolejowej E65 Warszawa - Gdynia w granicach województwa pomorskiego, tj. od km 236+900 do km 328+120 oraz od km 0+000 do km 26+000".
- [3] Analiza porealizacyjna w zakresie oddziaływania przedsięwzięcia na tereny wymagające ochrony przed hałasem dla zadania pn. "Przebudowa i rozbudowa (modernizacja) linii kolejowej E65 na odcinku Warszawa - Gdynia w granicach województwa warmińsko - mazurskiego od km 132+640 do km 236+900".
- [4] Anatolik Ł., Wpływ przekładki podszynowej na pracę systemu przytwierdzenia typu SB, 2018.
- [5] Bałuch H., Determinanty wymiany nawierzchni kolejowej, Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 175, Warszawa 2017.
- [6] Basic Noise Prediction Method (BNPM), DIN 18005 - Part 1, maj 1987.
- [7] Bułhak J., Buchalska E., Redukcja hałasu emitowanego przez tabor towarowy poprzez zastosowanie kompozytowych wstawek hamulcowych, TTS, 11-12/2006.
- [8] Chrostowski P., Wilk A., Grulkowski S., Licow R., Michna M., Jarzębowski L., Skibicki J., Judek S., Karwowski K., Szafranski M., Widerski T., Daliga K., Bawolski P., Karkosińska-Brzozowska N., Zintegrowany system monitoringu oddziaływania kolei na środowisko, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 101 NR 3/2025
- [9] DB NETZE, Innowacyjne środki przeciw hałasowi i ochrona przed wibracjami wzdłuż toru. Raport końcowy, – Frankfurt nad Menem, 15 czerwca 2012.
- [10] DB NETZE, Specjalny Program Ochrony przed Hałasem Kolejowym, mający na celu finansowanie indywidualnych działań w zakresie ochrony przed hałasem na federalnych liniach kolejowych w ramach Programu Przyspieszenia Infrastruktury II (IBP II) Raport końcowy – Frankfurt nad Menem, grudzień 2015.
- [11] EN ISO 3095:2013 Akustyka – Zastosowania kolejowe – Pomiar emisji hałasu pojazdów szynowych.
- [12] EN 13146- 4:2020 Zastosowania kolejowe – Tory – Metody badawcze systemów przytwierdzeń szyn – Część 4: Wpływ obciążeń powtarzalnych.
- [13] EN 15461:2008+A1:2010 – Kolejnictwo – Emisja hałasu – Charakterystyka własności dynamicznych odcinków toru dla ruchu poprzez pomiary hałasu.
- [14] Hajduk K., Gramowski Ch., Grulkowski S., Bułaka M., Znaczenie tłumienia drgań w procesie redukcji hałasu. Nowoczesne Technologie i Systemy Zarządzania w Transporcie Szynowym NOVOKOL 2025, materiały konferencyjne - Kraków, Polska, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej. Oddział w Krakowie, Kraków 2025 - s. 45-66
- [15] Hajduk K., Niskie ekrany - skuteczna obrona przed hałasem w transporcie kolejowym.
- [16] Hemsworth B., Najnowsze osiągnięcia w badaniach nad hałasem kół/szyny. Journal of Sound and Vibration, 66, 297–310, 1979.
- [17] Koter M., Groll W., Instytut Kolejnictwa, Badanie Taboru - dopuszczenie do stosowania, Spała, 2016.
- [18] Opracowanie dokumentacji projektowej dla realizacji robót na odcinku Maksymilianowo - Kościerzyna na linii kolejowej 201 wraz z pełnieniem nadzoru autorskiego realizowane w ramach projektu: "Prace na alternatywnym ciągu transportowym Bydgoszcz - Trójmiasto".
- [19] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Hałas pod lupą PLK.
- [20] Program do modelowania hałasu w środowisku IMMI 2016, literatura i instrukcja obsługi.
- [21] Raport końcowy DB NETZE: Inicjatywa dotycząca nowych i zorientowanych na zastosowania testów ochrony przed hałasem (I-LENA).
- [22] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1304/2014 z dnia 26 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Tabor kolejowy — hałas”, zmieniające decyzję 2008/232/WE i uchylające decyzję 2011/229/UE (Dz.U. L 356 z 12.12.2014, s. 421).
- [23] „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).
- [24] Sprawozdanie z funkcjonowania rynku transportu kolejowego. Urząd Transportu Kolejowego; 2023.
- [25] Warunki techniczne PKP PLK S.A. - reprofilacja szyn w torach i rozjazdach - Część 1: Warunki wykonywania i odbioru robót Id-104

Przykłady analiz ruchowo-eksploatacyjnych wąskich gardeł infrastruktury kolejowej i sposoby ich eliminacji

Examples of traffic and operational analyses of railway infrastructure bottlenecks and ways to eliminate them



Przemysław Brona

Mgr inż.

Instytut Kolejnictwa, Zakład Dróg Kolejowych i Przewozów

pbrona@ikolej.pl
ORCID: 0000-0002-5452-8033

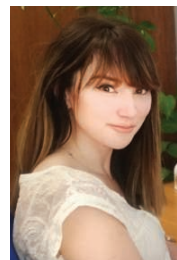


Michalina Chrzanowska

Mgr inż.

Instytut Kolejnictwa, Zakład Dróg Kolejowych i Przewozów

mchrzanowska@ikolej.pl
ORCID: 0009-0008-4891-5193



Marta Rogowska - Jędra

Mgr inż.

Instytut Kolejnictwa, Zakład Dróg Kolejowych i Przewozów

mrogowska@ikolej.pl
ORCID: 0000-0002-1925-4807

Streszczenie: W artykule przedstawiona została identyfikacja elementów infrastruktury kolejowej ograniczających zdolność przepustową odcinków linii kolejowych. Elementy te określane są jako „wąskie gardła” infrastruktury. Analizy „wąskich gardeł” zostały wykonane na podstawie badań symulacyjnych z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania do symulacji ruchu kolejowego. W artykule przedstawiono również propozycje działań usprawniających, mających na celu poprawę warunków prowadzenia ruchu kolejowego.

Słowa kluczowe: Transport kolejowy; Infrastruktura kolejowa; Modele mikrosymulacyjne

Abstract: The article presents the identification of railway infrastructure elements that limit the capacity of railway line sections. These elements are referred to as infrastructure “bottlenecks”. The analyses of the “bottlenecks” were carried out on the basis of simulation studies using specialized railway traffic simulation software. The article also presents proposed improvement measures aimed at enhancing the conditions for railway traffic operations.

Keywords: Railway transport; Railway infrastructure; Microsimulation models

Wprowadzenie

Podejmowane na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat kolejowe inwestycje infrastrukturalne, mają na celu poprawę warunków prowadzenia ruchu kolejowego poprzez podniesienie parametrów eksploatacyjnych linii kolejowych (np. podniesienie prędkości maksymalnej, likwidację występujących ograniczeń prędkości, itp.). Prowadzone są również prace zwiększające dostępność transportu kolejowego, takie jak budowa nowych lub rozbudowa istniejących punktów obsługi podróżnych (stacji i przystanków kolejowych).

Jednym z głównych parametrów określających możliwości prowadzenia ruchu na liniach kolejowych jest zdolność przepustowa i jej wykorzystanie w określonym przedziale czasu (np. w ciągu doby). Na liniach kolejowych występują różne ograniczenia eksploatacyjne, czyli tzw. „wąskie gardła”, które mają wpływ na zdolność przepustową poszczególnych odcinków linii kolejowej,

a tym samym ograniczają możliwości rozszerzenia oferty przewoźników kolejowych. W niniejszym artykule wskazane zostały najważniejsze problemy ograniczające przepustowość linii kolejowych oraz propozycje ich rozwiązań.

Wąskie gardła infrastruktury Definicja wąskich gardeł

„Wąskie gardło” jest elementem lub grupą elementów infrastruktury, ograniczających zdolność przepustową fragmentu sieci (odcinka linii kolejowej, korytarza przewozowego, posterunku ruchu lub węzła kolejowego). Może to być np. rozjazd, głowica stacyjna, tor przy krawędzi peronowej, odstęp lub szlak. „Wąskie gardło” determinuje maksymalną liczbę pociągów, które mogą przejechać przez dany fragment sieci. Na poziomie operacyjnym, „wąskie gardła” powodują m.in. narastanie opóźnień wtórnych w ruchu pociągów oraz mogą doprowadzić do przepełnienia

infrastruktury kolejowej.

Założenia do analiz ruchowo-eksploatacyjnych z wykorzystaniem modeli mikrosymulacyjnych

„Wąskie gardła” zostały zidentyfikowane z wykorzystaniem programu do symulacji ruchowych RailSys. Program ten składa się z trzech głównych modułów:

- 1) infrastruktura,
- 2) rozkład jazdy i symulacja,
- 3) oceny, analizy.

W module infrastruktura wprowadzane są dane dotyczące danej linii i/lub sieci kolejowej. Odzworowywany jest jej układ torowy obejmujący tory szlakowe, tory główne zasadnicze oraz tory główne dodatkowe na posterunkach ruchu. W programie wprowadzane są m.in. dane dotyczące profilu podłużnego i poprzecznego linii, elektryfikacji, prędkości maksymalnych i lokalnych ograniczeń prędkości, sygnalizacji, rozjazdów, peronów oraz wszystkich in-

Tab. 1. Kategorie „wąskich gardeł”

Nr kategorii	Opis „wąskiego gardła”
1	Niewystarczająca ilość torów szlakowych występująca na danym szlaku/odcinku linii
2	Niewystarczająca ilość torów głównych dodatkowych oraz torów przyperonowych występujących na stacjach
3	Ograniczenia oraz mała prędkość maksymalna występująca na szlaku
4	Mała prędkość pociągu przy jeździe na tor zwrrotny, wynikająca z typu zastosowanego rozjazdu
5	Układ rozjazdów na głowicach rozjazdowych uniemożliwiający jednoczesny wjazd i wyjazd pociągów we wszystkich kierunkach
6	Zastosowany rodzaj urządzeń sterowania ruchem kolejowym mający wpływ na czas nastawiania i zwalniania przebiegów, a tym samym czasu ich zajętości
7	Duże odległości pomiędzy dwoma sąsiadującymi posterunkami zapowiadawczymi utrudniające krzyżowanie, wyprzedzanie oraz wyprawianie pociągów
8	Przekroczone wartości graniczne wykorzystania przepustowości zgodnie z kartą UIC406 [1] w dobie, bądź godzinach szczytu

Źródło: opracowanie własne autorów

nych danych niezbędnych do prawidłowego odwzorowania stanu obecnego lub nowoprojektowanej infrastruktury. Generowane są również przebiegi na szlakach oraz posterunkach ruchu.

Po utworzeniu modelu infrastruktury można przejść do kolejnego modułu, który umożliwia konstrukcję rozkładu jazdy oraz późniejsze symulacje ruchu na jego podstawie. W celu stworzenia rozkładu jazdy niezbędne jest uprzednie wprowadzenie danych dotyczących taboru wraz z ich charakterystykami trakcyjnymi. Mając je wprowadzone, można przejść do wyznaczania tras poszczególnych pociągów. Następnie wprowadzany jest rozkład jazdy, czyli godziny przyjazdu oraz odjazdu z poszczególnych posterunków ruchu oraz czasy postoju na nich. Na podstawie wprowadzonych danych program automatycznie generuje wykres ruchu pociągów. Wykres ten może posiadać konflikty wynikające z przejazdu pociągów.

Zgodność wykresu ze stanem istniejącym jest uzależniona od dokładności wprowadzonych wcześniej do modelu danych. Im dokładniejsze będą dane, tym dokładniejszy i bardziej zbliżony do rzeczywistego będzie rozkład jazdy. Umożliwia to łatwiejsze zlokalizowanie tzw. wąskich gardeł i miejsc kolizyjnych, a co za tym idzie, zaproponowanie zmian mających na celu usprawnienie

ruchu na linii czy odcinku.

W drugiej części modułu możliwa jest analiza danych z przeprowadzonych symulacji. Program umożliwia obliczenie przepustowości dla danych linii, przeprowadzenie symulacji opóźnień, a także ich prezentację w formie diagramów, tabel oraz widoku sieci.

Identyfikacja „wąskich gardeł” infrastruktury

W ramach identyfikacji „wąskich gardeł” dla linii kolejowych, korytarza lub większego wycinka sieci kolejowej rozpatrywane były odcinki, na długości których natężenie ruchu pociągów było stałe. Przeprowadzona analiza linii kolejowych z wykorzystaniem modeli mikrosymulacyjnych pozwoliła na wyróżnienie kategorii problemów, które zostały przedstawione w tabeli 1.

Propozycje eliminacji „wąskich gardeł” infrastruktury

Przedstawione powyżej „wąskie gardła” mogą zostać zlikwidowane poprzez zastosowanie rozwiązań, które w opracowaniach przedstawiają W. Wyrzykowski w „Ruchu kolejowym” [2] oraz B. Gajda w „Technice ruchu kolejowego cz. 2” [3]. Wymieniają następujące metody na powiększenie zdolności przepustowej linii kolejowej: zwiększenie prędkości jazdy pociągów, skracanie długości szlaków, zmiana systemów sterowania ruchem kolejowym, prowadzenie ruchu pociągów według wykresu pakietowego, budowa drugiego toru na odcinku jednotorowym, budowa dodatkowych torów szlakowych na odcinkach dwutorowych.

Metody te zostały podzielone na dwie grupy pod kątem generowanych przez nie kosztów. Pierwszą z nich są rozwiązania niskonakładowe, które podczas wdrażania nie ingerują w sposób znaczący w istniejącą infrastrukturę kolejową. Do tego typu rozwiązań należą między innymi: drobne zmiany w głowicach stacyjnych (zmiana typów rozjazdów umożliwiających jazdę ze zwiększoną prędkością), budowa dodatkowych torów stacyjnych, modernizacja urządzeń sterowania ruchem kolejowym (zabudowa blokad wielodostępowych, optymalizacja rozmieszczenia semaforów

na szlakach) oraz budowa mijanek i długich mijanek. Druga grupa rozwiązań dotyczy ulepszeń wymagających większego nakładu finansowego oraz działań wpływających w wysokim stopniu na istniejącą infrastrukturę kolejową. Przykładami rozwiązań należących do tej grupy są między innymi: dobudowa toru szlakowego, przebudowa średniej i dużej stacji czy budowa bezkolizyjnych połączeń torów.

Dla zdefiniowanych powyżej „wąskich gardeł” zlokalizowanych na wybranych liniach kolejowych przeprowadzone zostały analizy z wykorzystaniem modeli mikrosymulacyjnych w programie RailSys. Ogólne zasady opracowania modeli mikrosymulacyjnych opisane zostały m.in. w artykułach [4] i [5].

W modelach tych analizy przeprowadzane są głównie w skali mikro tj. dla wybranych elementów infrastruktury. Do tych analiz można zaliczyć m.in. badanie zdolności przepustowej i jej wykorzystania dla poszczególnych szlaków lub odcinków funkcjonalnych według zakładanej struktury ruchu pociągów w przyjętym rozkładzie jazdy.

Istotą przeprowadzonych analiz było znalezienie rozwiązania należącego do pierwszej grupy rozwiązań (tj. rozwiązań niskonakładowych) w celu przedstawienia, jak w nieznacznym stopniu, zmieniając infrastrukturę, można poprawić warunki ruchowe na linii.

Każde z „wąskich gardeł” zostało opisane pod kątem występującego problemu oraz uzyskanego efektu po wprowadzeniu ulepszeń infrastrukturalnych. Na rysunkach w artykule przedstawiono schemat analizowanych elementów infrastruktury oraz fragmenty wykresów ruchu z blokami zajętości tych elementów przez poszczególne pociągi.

Niewystarczająca liczba torów głównych dodatkowych oraz przyperonowych na stacjach

Niewystarczająca liczba torów głównych dodatkowych oraz często idąca za tym niewystarczająca liczba krawędzi przyperonowych do obsługi pociągów pasażerskich negatywnie wpływa na płynność ruchu i powoduje powstawanie „wąskich gardeł”. Znacznie ogranicza to, a często wręcz uniemożliwia, wyprzedzanie się pociągów czy rozpo-

czynianie/kończenie biegu na danej stacji. Dla usprawnienia obsługi pociągów niezbędna jest rozbudowa stacji o tor główny dodatkowy, przy którym pociągi będą mogły kończyć i rozpoczynać bieg (patrz rysunek 1) zwalniając jednocześnie tor główny dodatkowy, który można w pełni wykorzystać do wyprzedzania pociągów.

Mała prędkość pociągu przy jeździe na tor zwrotny, wynikająca z typu zastosowanego rozjazdu

Na przepustowość linii kolejowych oraz węzłów torowych największy wpływ ma czas zajętości poszczególnych elementów infrastruktury (odcinków blokowych). W związku z tym typ zastosowanego rozjazdu na posterunkach ruchu (stacjach) w miejscu połączeń torów głównych zasadniczych z torami głównymi dodatkowymi również ma wpływ na zdolność przepustową.

Analizy [5] pokazały, że w przypadku, gdy prędkość jazdy na rozjazdach jest znacząco mniejsza niż na linii czas zajętości kolejnych elementów infrastruktury wzrasta, co z kolei przekłada się na zwiększenie wykorzystania zdolności przepustowej, natomiast zastosowanie rozjazdów o korzystniejszych parametrach technicznych (większa prędkość jazdy na tor zwrotny) umożliwiającą szybszy wjazd i wyjazd pociągu na tory główne dodatkowe powoduje krótszy czas zajętości, a tym samym wzrost zdolności przepustowej.

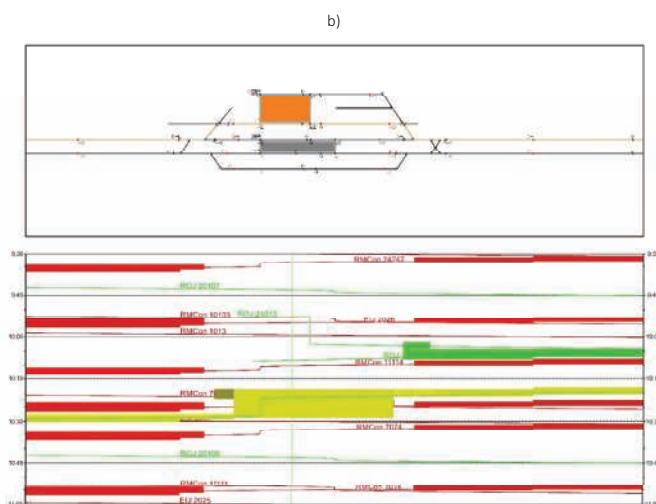
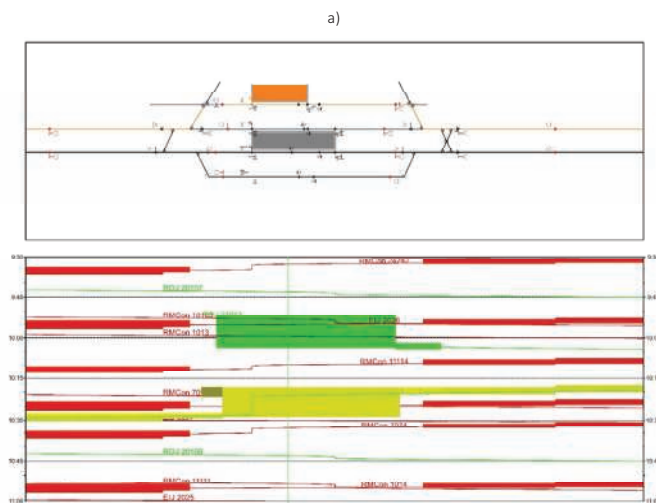
Zmiana rodzaju urządzeń sterowania ruchem kolejowym

Linie kolejowe wyposażone w przestarzałe urządzenia sterowania ruchem typu mechanicznego (lub czasami nawet kluczowe) charakteryzują się długimi czasami zajętości szlaków oraz wymuszają wydłużone postoje na sta-

cjach podczas krzyżowania pociągów. Utrudnia to konstrukcję rozkładu jazdy przy dużym obciążeniu ruchowym linii. W analizowanym przykładzie warunki infrastrukturalne uniemożliwiały wytrasowanie zadanej liczby pociągów. Wymiana urządzeń sterowania ruchem kolejowych na stacjach na urządzenia przekątnikowe pozwoliła zmniejszyć czasy zajętości poszczególnych szlaków. Dzięki temu możliwe było cykliczne wytrasowanie pociągów oraz zwiększenie ich liczby zgodnie z założoną ofertą przewozową. Zmniejszyły się również czasy postojów pociągów na stacjach.

Duże odległości pomiędzy dwoma sąsiadującymi posterunkami zapowiadawczymi utrudniające krzyżowanie, wyprzedzanie oraz wyprawianie pociągów

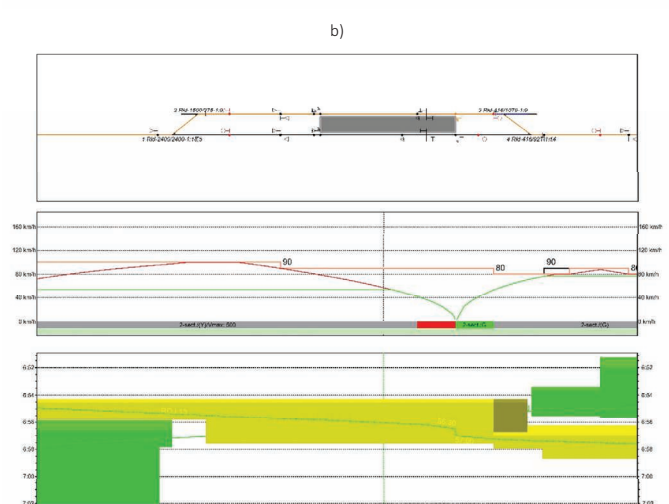
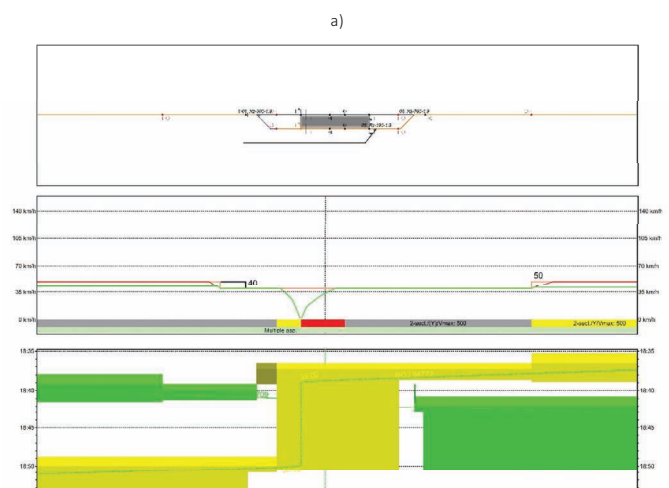
Mijanki



1. Bloki zajętości na linii kolejowej

a) przed wprowadzeniem ulepszenia infrastrukturalnego
b) po dobudowie torów głównych dodatkowych.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania RailSys



2. Bloki zajętości na linii kolejowej

a) przed wprowadzeniem ulepszenia infrastrukturalnego
b) po zmianie typów rozjazdów.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania RailSys

Dla linii kolejowych jednotorowych, posiadających duże odległości pomiędzy stacjami, najprostszym sposobem na zwiększenie przepustowości linii jest przekształcenie jednego bądź więcej przystanków osobowych na mijanki (Rysunek 4). Rozwiązanie to należy do kategorii niskonakładowych. Pozwala na dogęszczenie rozkładu jazdy poprzez krzyżowania pociągów na nowo utworzonej mijance, jednocześnie rozdzielając jeden długi czas zajętości szlaku dwa krótsze.

Dynamiczne mijanki

Rozwiązaniem pośrednim pomiędzy budową mijanek na linii jednotorowej a rozbudową linii kolejowej o nowy tor szlakowy na całej jej długości jest budowa tzw. dynamicznych mijanek (Rysunek 5). Mijanka dynamiczna jest odcinkiem dwutorowym na wybranym szlaku linii kolejowej, który umożliwia

krzyżowanie pociągów bez konieczności stosowania wydłużonych postojów pociągów na stacjach. Jest to rozwiązanie wymagające większych nakładów finansowych niż przebudowa przystanku osobowego, ale znacząco mniejsze od przekształcenia całej linii jednotorowej na linię dwutorową. Jest dobrym rozwiązaniem na liniach jednotorowych o dużym obciążeniu ruchowym.

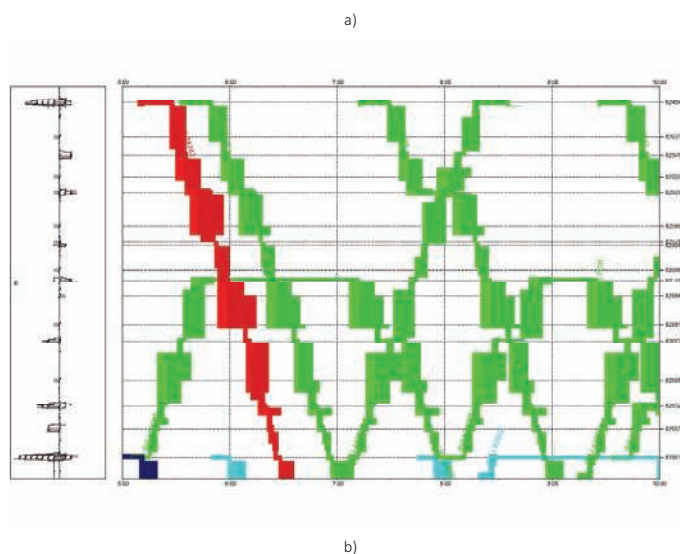
Niewystarczająca liczba torów szlakowych

Długie jednotorowe szlaki powodują przekroczenie dopuszczalnych wartości przepustowości. Badany przykładowy odcinek jest mocno obciążony ruchem pociągów dalekobieżnych oraz regionalnych. Analizy pokazały, że w celu upłynnienia ruchu konieczna jest budowa drugiego toru szlakowego, która co widoczne na Rysunek 6, pozwoliła na zwiększenie przepustowości i elimi-

nację kolizyjności przebiegów na analizowanym odcinku.

Wnioski i podsumowanie

Prowadzenie ruchu pociągów na liniach kolejowych jest ściśle związane z wykorzystaniem zdolności przepustowej poszczególnych elementów infrastruktury (stacje, szlaki i odcinki linii kolejowych). Istotny wpływ na wykorzystanie przepustowości mają m.in. parametry drogi kolejowej (głównie prędkość maksymalna oraz występujące ograniczenia prędkości), liczba torów szlakowych, rodzaj zastosowanych urządzeń sterowania ruchem pociągów a także charakterystyki techniczne pociągów zróżnicowane prędkości maksymalne dla poszczególnych kategorii pociągów. Elementy infrastruktury, w których wykorzystanie przepustowości osiąga wartości graniczne potocznie nazywane są „wąskimi gardłami”.

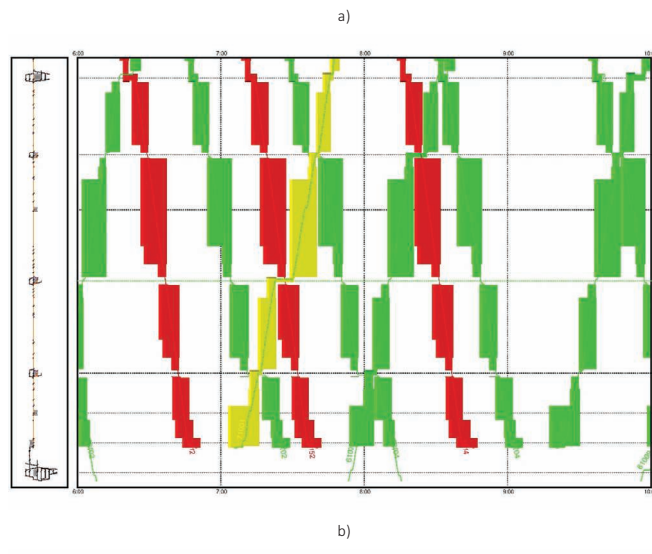


3. Bloki zajętości na linii kolejowej

a) przed wprowadzeniem ulepszenia infrastrukturalnego

b) po zmianie typu urządzeń srk.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania RailSys



4. Bloki zajętości na odcinku linii kolejowej

a) przed wprowadzeniem ulepszenia infrastrukturalnego

b) po wprowadzeniu mijanki.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania RailSys

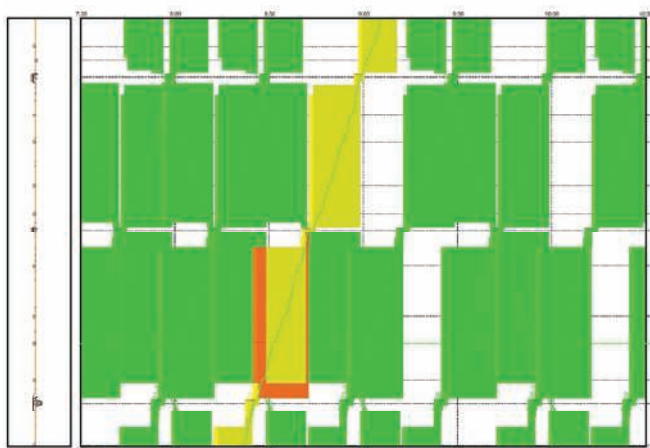
W niniejszym artykule przedstawione zostały propozycje usprawnień eliminujących „wąskie gardła” występujące na wybranych przykładowych odcinkach linii kolejowych. Podczas analiz skupiono się na usprawnieniach, które w ograniczonym stopniu ingerują w istniejącą infrastrukturę kolejową. Są to między innymi: drobne zmiany w głowicach stacyjnych, budowa dodatkowych torów stacyjnych, modernizacja urządzeń sterowania ruchem kolejowym (zabudowa blokad wielodostępowych, optymalizacja rozmieszczenia semaforów na szlakach) oraz budowa mijanek lub dynamicznych mijanek. Analiza „wąskich gardeł” infrastruktury została poprzedzona wykonaniem symulacji ruchowych z wykorzystaniem modeli mikrosymulacyjnych w specjalistycznym oprogramowaniu. Dzięki temu możliwe było sprawdzenie jak likwidacja elementów kolizyjnych i proponowane usprawnienia miały wpływ na poprawę warunków prowadzenia ruchu kolejowego i możliwości zaimplementowania zakładanej oferty przewozowej.

Przedstawione powyżej propozycje działań usprawniających nie wyczerpują w pełni katalogu możliwości eliminacji „wąskich gardeł”. Innymi propozycjami mogą być działania o szerszym zakresie, takie jak np. dobudowa dodatkowych torów szlakowych, budowa nowych linii kolejowych, w tym krótkich odcinków łączących linie kolejowe tzw. łącznic kolejowych, budowa lub przebudowa dużych stacji węzłowych wraz z budową bezkolizyjnych wjazdów i wyjazdów w miejscach głowic rozjazdowych. Działania te wymagają jednak znaczących nakładów inwestycyjnych i dłuższej perspektywy czasowej. ◀

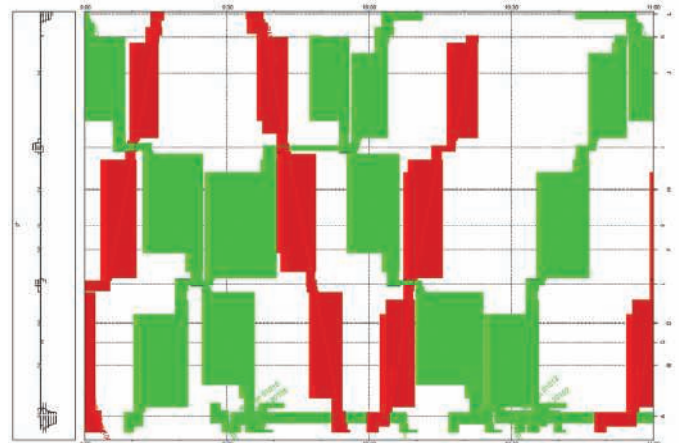
Materiały źródłowe

- [1] UIC Code 406 Capacity, 2nd Edition, International Union of Railways (UIC), Paris June 2013, ISBN 978-2-7461-2159-1

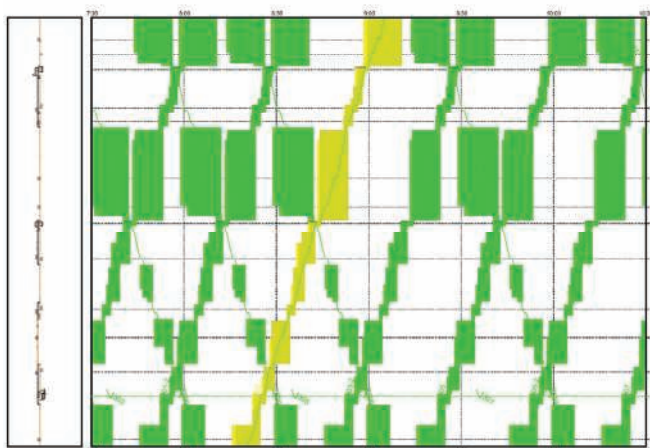
- [2] W. Wyrzykowski „Ruch kolejowy”, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1966
- [3] B. Gajda „Technika ruchu kolejowego cz.2”, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990
- [4] Rogowska M. Badanie przepustowości linii kolejowej przy wykorzystaniu nowoczesnych programów mikrosymulacyjnych. Przegląd Komunikacyjny, 7/2017
- [5] Brana P., Rogowska-Jędra M.: Analiza wpływu parametrów rozjazdów na przepustowość węzłów torowych i linii kolejowych dużych prędkości na podstawie badań symulacyjnych. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP Oddział w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne. Zeszyt 2 (123). Rok 2021



b)



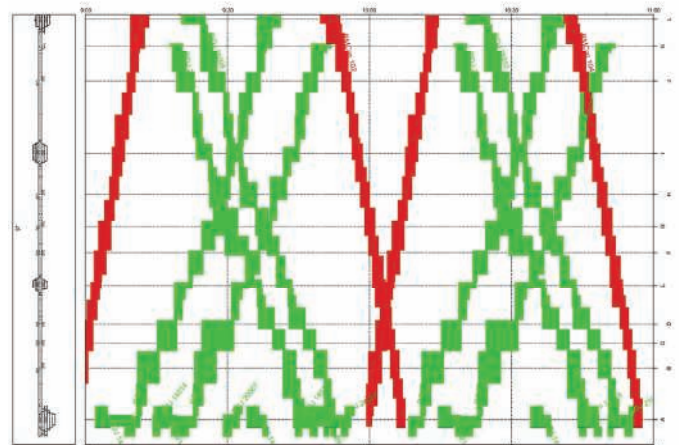
b)



5. Bloki zajętości na linii kolejowej

- a) przed wprowadzeniem ulepszenia infrastrukturalnego
b) po rozbudowie linii z dynamicznymi mijankami.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania RailSys



6. Bloki zajętości na linii kolejowej

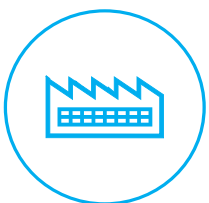
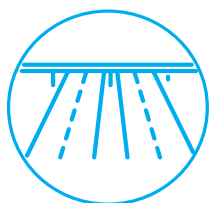
- a) przed wprowadzeniem ulepszenia infrastrukturalnego
b) po dobudowie drugiego toru szlakowego.

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem oprogramowania RailSys

KOLEJ
DROGI
OBIEKTY



T R A K C J A



BUDUJEMY
INFRASTRUKTURĘ
KTÓRA ŁĄCZY LUDZI

