

przegląd komunikacyjny

6-7
2021
rocznik LXXVI
cena 25,00 zł
w tym 8% VAT



UKAZUJE SIĘ OD 1945 ROKU

Modelowanie interakcji pojazd-most



eISSN
2544-6037

ISSN
0033-22-32

Modelowanie interakcji pojazd-most w warunkach deformacji niwelety drogi. Utworzenie Kolei Aglomeracyjnej we Wrocławiu z wykorzystaniem nowych odcinków średnicowych. Sprężysto-tłumiąca więź kontaktowa w numerycznych symulacjach drgań układu pociąg – tor

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 dziedzinę transportu i infrastruktury transportu” oraz „pozostałe”. Prosimy Autorów o deklarację (w zgłoszeniu), do której grupy zaliczyć ich prace.

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

artykuly@przeglad.komunikacyjny.pwr.wroc.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 najprostszy (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 dyscyplinę inżynieria lądowa i transport podle-

gają procedurom recenzji merytorycznych zgodnie z wytycznymi MNiSW, co pozwala zaliczyć je, po opublikowaniu, do dorobku naukowego oraz uwzględnić w ewaluacji jakości działalności naukowej (Dz.U. 2019 poz. 392). Liczba uwzględnianych punktów w ewaluacji osiągnięć naukowych wynosi 5.

Do oceny każdej publikacji powołuje się co najmniej dwóch niezależnych recenzentów spoza jednostki. Zasady kwalifikowania lub odrzucenia publikacji i ewentualny formularz recenzentki 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 oraz streszczenia 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 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.

www.transportation.overview.pwr.edu.pl

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 Krajowy SITK w Warszawie.

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:

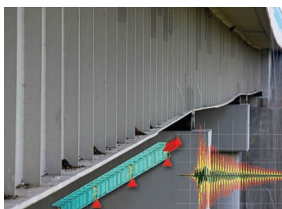
Hanna Szary

hanna.szary@sitkrp.org.pl

ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa, tel.: (22) 827 02 58, 506 116 966

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: Modelowanie interakcji pojazd-most w warunkach deformacji niwelety drogi
Źródło: Mieszko Kużawa, Aleksander Mróz, Maksymilian Kliński, Jan Bień, Józef Rabiega

Mili Czytelnicy!

W numerze

Niniejszy podwójny numer Przeglądu Komunikacyjnego zawiera trzy obszernie publikacje. Po pierwsze przedstawiamy interesujące modelowanie numeryczne wzajemnych oddziaływań dynamicznych pomiędzy pojazdami a konstrukcją mostu. Analizy zrealizowano na przykładzie rzeczywistego obiektu mostowego w ciągu autostrady, na którym stwierdzono występowanie trwałych deformacji niwelety jezdni. Szczególną uwagę zwrócono na wartości pionowych przemieszczeń i przyspieszeń drgań przęsła mostu generowanych przez pojazdy ciężarowe w zależności od intensywności trwałych ugięć konstrukcji przęsła oraz prędkości przejazdu.

Utworzenie Kolei Aglomeracyjnej we Wrocławiu z wykorzystaniem nowych odcinków średnicowych jest tematem drugiego artykułu. Jest to kontynuacja tematu poruszonego w numerze 2/21 Przeglądu Komunikacyjnego: „Koncepcja kolejowej trasy średnicowej we Wrocławiu w celu uruchomienia sieci SKM”. Teraz skupiono się na utworzeniu sprawnie funkcjonującej sieci, której kluczowym elementem jest odcinek średnicowy. Zwrócono uwagę, że przebieg odcinka średnicowego będzie głównym czynnikiem, od którego zależy będzie poziom wykorzystania kolei w podróżach w granicach miasta. Wskazano miejsca, w których należałoby utworzyć nowe przystanki dla zwiększenia atrakcyjności przewozów aglomeracyjnych. Zaproponowano trzy warianty sieci oraz wskazano najkorzystniejszy z nich.

W trzecim artykule Autorzy opisują sprężysto- tłumiącą więź kontaktową w numerycznych symulacjach drgań układu pociąg - tor. Najpopularniejszym obecnie modelem kontaktu stosowanym w symulacjach numerycznych drgań jest idealnie sprężysta, zlinearyzowana więź Hertz'a. W bogatszych wariantach modelu kontaktowego uwzględnia się dodatkowo dyssypację energii na styku koła z szyną. Tutaj rozważono standardową zlinearyzowaną więź sprężystą typu Hertz'a i więź sprężysto- tłumiącą zdefiniowaną przez Autorów. Na podstawie wykonanych analiz numerycznych postawiono tezę, że zastosowanie modelu kontaktowego koło - szyna wzbogaconego o tłumienie histerezy jest sensowne wtedy, gdy badania są ukierunkowane na stan wytężenia toru i efekty zmęczeniowe w torze i pojeździe kolejowym.

Z pozdrowieniami:

Maciej Kruszyna

Aktualności

3

Modelowanie interakcji pojazd-most w warunkach deformacji niwelety drogi

Mieszko Kużawa, Aleksander Mróz,
Maksymilian Kliński, Jan Bień, Józef Rabiega 2

Utworzenie Kolei Aglomeracyjnej we Wrocławiu z wykorzystaniem nowych odcinków średnicowych

Mariusz Korzeń, Igor Gisterek 8

Sprężysto-tłumiąca więź kontaktowa w numerycznych symulacjach drgań układu pociąg - tor

Piotr Lalewicz, Danuta Bryja 14

Informacje SITK-RP

22-23

Wspomnienie o Stefanie Sarnie

24

Wydawca:

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników
Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej
00-043 Warszawa, ul. Czackiego 3/5
www.sitkrp.org.pl

Redaktor Naczelny:

Antoni Szydło

Redakcja:

Krzysztof Gasz, Igor Gisterek, Bartłomiej Krawczyk,
Maciej Kruszyna (Z-ca Redaktora Naczelnego),
Agnieszka Kuniczuk - Trzciniowicz (Redaktor językowy),
Piotr Mackiewicz (Sekretarz), Wojciech Puła (Redaktor
statystyczny), Wiesław Spuziak, Robert Wardęga,
Czesław Wolek

Adres redakcji do korespondencji:

Pocztą elektroniczną:
redakcja@przegląd.komunikacyjny.pwr.wroc.pl

Pocztą „tradycyjną”:

Piotr Mackiewicz, Maciej Kruszyna
Politechnika Wrocławska,
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
Faks: 71 320 45 39

Rada naukowa:

Marek Ciesielski (Poznań), Antanas Klibavičius (Wilno), Jozef Komačka (Žilina), Elżbieta Marciszewska (Warszawa), Andrzej S. Nowak (Auburn University), Tomasz Nowakowski (Wrocław), Victor V. Rybkin (Dniepropietrowsk), Marek Sitarz (Katowice), Wiesław Starowicz (Kraków), Hans-Christoph Thiel (Cottbus), Tomasz Siwowski (Rzeszów), Jiri Straský (Brno), Andrea Zuzulova (Bratysława)

Rada programowa:

Mirosław Antonowicz, Dominik Borowski, Leszek Krawczyk, Marek Krużyński, Leszek W. Mindur, Andrzej Żurkowski

Deklaracja o wersji pierwotnej czasopisma

Główną wersją czasopisma jest wersja elektroniczna. Na stronie internetowej czasopisma dostępne są pełne wersje artykułów oraz streszczenia 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 począwszy 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:

HARDY Design, 52-131 Wrocław, ul. Buforowa 34a
Przemysław Wolczuk, przemo@dodo.pl

Reklama:

Dział Marketingu: sitk.baza@gmail.com

Nakład: 800 egz.

Modelowanie interakcji pojazd-most w warunkach deformacji niwelety drogi

Modeling the vehicle-bridge interaction in the conditions of road level deformation



Mieszko Kuźawa

Dr inż.

Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego Politechniki
Wrocławskiej, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk

mieszko.kuzawa@pwr.edu.pl

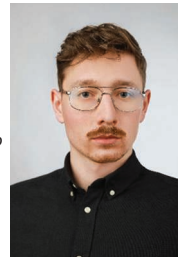


Aleksander Mróz

Mgr inż.

Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego Politechniki
Wrocławskiej, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk

aleksander.mroz@pwr.edu.pl



Maksymilian Kliński

Mgr inż.

Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego Politechniki
Wrocławskiej, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk

maksymilian.klinski@pwr.edu.pl



Jan Bien

Prof. dr hab. inż.

Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego Politechniki
Wrocławskiej, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk

jan.bien@pwr.edu.pl



Józef Rabiega

Dr inż.

Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego Politechniki
Wrocławskiej, Katedra Dróg,
Mostów, Kolei i Lotnisk

jozef.rabiega@pwr.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodę i wyniki symulacji numerycznych wzajemnych oddziaływań dynamicznych pomiędzy pojazdami a konstrukcją mostu, która ma uszkodzenia w postaci nadmiernych trwałych ugięć przęseł. Analizy symulacyjne przeprowadzono na przykładzie rzeczywistego autostradowego obiektu mostowego, na którym stwierdzono występowanie trwałych deformacji niwelety jezdni. Jako obciążenie ruchome zamodelowano typowy 5-osiowy samochód ciężarowy o całkowitej masie 40 t. W trakcie analiz główną uwagę zwrócono na wartości pionowych przemieszczeń i przyspieszeń drgań przęseł mostu generowanych przez pojazdy ciężarowe w funkcji intensywności trwałych ugięć konstrukcji przęseł oraz prędkości pojazdu.

Słowa kluczowe: Analiza dynamiczna mostów; Drgania mostów; Metoda Elementów Skończonych; Deformacje konstrukcji

Abstract: The paper presents a method and results of numerical simulations of dynamic interactions between vehicles and the bridge structure, which has defects in the form of excessive permanent deflections of their spans. The simulation analyzes were carried out on the example of a real motorway bridge, on which the presence of such defects was found. A typical 5-axle truck with a total weight of 40 tons was modeled as a moving load. During the analyzes, the main attention was paid to the values of vertical displacements and accelerations of vibrations of the bridge spans generated by heavy vehicles as a function of the intensity of permanent deflections of the structure and the vehicles speed.

Keywords: Dynamic analysis of bridges; Bridge vibrations; Finite Element Method; Structure deformations

Wstęp

Trwałe deformacje niwelety drogi na obiektach mostowych są zjawiskiem stosunkowo często występującym w trakcie użytkowania drogowej sieci transportowej. Deformacje takie mogą powstawać z różnych powodów, jak na przykład: niekontrolowane osiadanie rusztowań w trakcie budowy obiektu, niezgodne z projektem ugięcia konstrukcji związane ze zjawiskami reologicznymi lub nieprawidłowym sprzężeniem, trwałe ugięcia spo-

wodowane przeciążeniami obiektu w wyniku przewozów ponadnormatywnych lub kolizji.

Trwałe zmiany kształtu konstrukcji mostowej, najczęściej w postaci ugięć konstrukcji przęseł, powodują zmiany kształtu niwelety drogi, a w efekcie zmiany warunków ruchu pojazdów. Zaburzenia trasy ruchu pojazdów powodują z reguły wzrost efektów dynamicznych związanych z interakcją pojazdów oraz konstrukcji mostowej. Może to prowadzić do zwiększenia wartości obciążeń eksploatacyjnych,

obniżenia trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcji, a także pogorszenia warunków użytkowania obiektów z powodu zwiększenia amplitud przemieszczeń oraz wartości przyspieszeń drgań konstrukcji przęseł. Kwestia ta jest szczególnie istotna w odniesieniu do obiektów mostowych usytuowanych w ciągach autostrad i dróg szybkiego ruchu, gdzie mamy do czynienia ze znaczną liczbą ciężkich pojazdów oraz z dużymi prędkościami ruchu.

Zjawisko wpływu trwałych ugięć

przęseł skutkujących bezpośrednio deformacją niwelety jedni na warunki eksploatacji infrastruktury mostowej nie jest ujęte w obecnie stosowanych zaleceniach dotyczących analizy istniejących konstrukcji mostowych (patrz np. [1]-[4]).

W związku z tym przeprowadzono numeryczną analizę symulacyjną wzajemnych oddziaływań dynamicznych pojazdów oraz konstrukcji mostowej z uszkodzeniami w postaci nadmiernej deformacji. Wyniki wykonanych analiz oraz płynące z nich wnioski przedstawiono w niniejszym artykule.

Metodyka numerycznych analiz symulacyjnych

Kompleksowy obraz teoretycznej, dynamicznej odpowiedzi konstrukcji mostowych na obciążenia ruchome można otrzymać za pomocą analizy czasowej drgań wymuszonych [5]-[9]. Wymaga to sformułowania modelu matematycznego, który stanowią macierzowe równania różniczkowe, tzw. równania ruchu, sformułowane w przemieszczeniach i jego pochodnych po czasie dla punktów węzłowych modelu. Sformułowanie równań ruchu, nawet dla układów o kilku stopniach swobody dynamicznej, jest wymagającym zadaniem. Analitycznie można z reguły otrzymać rozwiązania tylko dla bardzo podstawowych zagadnień. W praktyce, niezbędnym krokiem przy analizie dynamicznej złożonych układów jest opracowanie i analiza modelu numerycznego MES.

W analizie odpowiedzi dynamicznej konstrukcji mostowych na obciążenia i oddziaływania z reguły stosuje się metody całkowania niejawnego (ang. *dynamic implicit analysis*), w których wyznaczane wartości w kroku $i+1$ zależą zarówno od wartości wielkości w kroku i , jak również w kroku $i-1$. Metody te są w ogólnym przypadku (zagadnienia nieliniowe) metodami iteracyjnymi. Do grupy metod całkowania niejawnego należy metoda Newmarka [10], którą zastosowano w niniejszej pracy. Jej podstawowe założenia teoretyczne krótko omówiono poniżej.

W metodach całkowania niejawnego czas dzielony jest na dyskretne chwile czasowe $t_i \in \{t_1, \dots, t_n\}$, a następnie dokonywana jest dyskretyzacja równania ruchu węzłów modelu, tj. równanie ruchu układu dynamicznego przekształca się do następującej postaci:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t_{i+1}) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t_{i+1}) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t_{i+1}) = \mathbf{p}(t_{i+1}) \quad (3)$$

gdzie:

$\ddot{\mathbf{u}}(t_{i+1})$ – wektor uogólnionych przyspieszeń drgań węzłów (w kierunku stopni swobody) w kroku czasowym $i+1$,

$\dot{\mathbf{u}}(t_{i+1})$ – wektor uogólnionych prędkości drgań węzłów (w kierunku stopni swobody) w kroku czasowym $i+1$,

$\mathbf{u}(t_{i+1})$ – wektor uogólnionych przemieszczeń węzłów (w kierunku stopni swobody) w kroku czasowym $i+1$,

$\mathbf{p}(t_{i+1})$ – wektor węzłowych zastępczych obciążeń zewnętrznych, tj. obciążeń równoważnych układu przyłożonych w węzłach (w kierunku stopni swobody) w kroku czasowym i -tym.

W kolejnych krokach czasowych $i+1$ analizy poszukuje się przybliżonego rozwiązania układu równań (1) w funkcji dyskretnej zmiennej czasu na podstawie wielkości obliczonych dla poprzedniej chwili t_i , z uwzględnieniem warunków początkowych. Aproksymuje się zmienność przemieszczeń prędkości i przyspieszeń drgań w poszczególnych podprzedziałach $[t_i, t_{i+1}]$, gdzie $t_{i+1} = t_i + \Delta t$.

Długość kroku całkowania Δt jest kluczowym parametrem wpływającym

na dokładność otrzymanego rozwiązania. Wartość tego parametru powinna być ułamkiem okresu drgań własnych o wyższych numerach (częstotliwościach). W prezentowanych analizach założono krok czasowy: $\Delta t = 0.001$ s, aby spełnić warunek $\Delta t < 0.1/f_{\max}$.

Wartości prędkości oraz przemieszczeń drgań na końcu kroku czasowego oblicza się na podstawie znanych na początku kroku czasowego wartości $\dot{\mathbf{u}}(t_i)$ i $\mathbf{u}(t_i)$ ze wzorów:

$$\dot{\mathbf{u}}(t_{i+1}) = \dot{\mathbf{u}}(t_i) + \int_0^{\Delta t} \ddot{\mathbf{u}}(\tau) d\tau \quad (4)$$

$$\mathbf{u}(t_{i+1}) = \mathbf{u}(t_i) + \int_0^{\Delta t} \dot{\mathbf{u}}(\tau) d\tau \quad (5)$$

w których τ jest lokalną zmienną czasową w poszczególnych podprzedziałach czasu $[t_i, t_{i+1}]$.

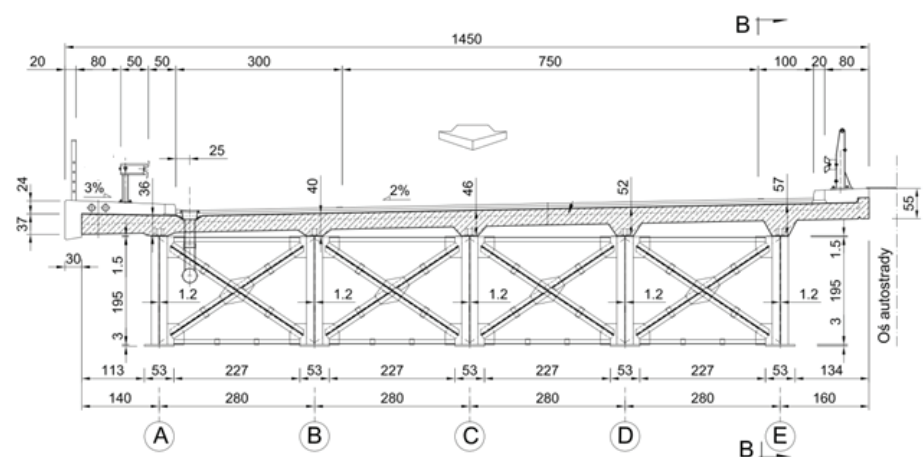
Rozwiązanie równań (4) i (5) wymaga określenia arbitralnego charakteru zmian przyspieszenia $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ w trakcie pojedynczego kroku czasowego. W analizach przyjęto stałą wartość przyspieszeń w podprzedziałach $[t_i, t_{i+1}]$. Jest to tzw. metoda średniej wartości przyspieszenia (ang. *average acceleration method*), w której zmiany przyspieszeń drgań w trakcie kroku czasowego można sformułować następująco:

$$\ddot{\mathbf{u}}(\tau) = \ddot{\mathbf{u}}(t_i) + \tau/\Delta t [\ddot{\mathbf{u}}(t_{i+1}) - \ddot{\mathbf{u}}(t_i)] \quad (6)$$

W metodzie Newmarka dla prędkości i przemieszczenia na końcu przedziału czasu Δt muszą zostać spełnione następujące warunki:

$$\dot{\mathbf{u}}(t_{i+1}) = \dot{\mathbf{u}}(t_i) + \Delta t [(1-\delta)\ddot{\mathbf{u}}(t_i) + \delta\ddot{\mathbf{u}}(t_{i+1})] \quad (7a)$$

$$\mathbf{u}(t_{i+1}) = \mathbf{u}(t_i) + \Delta t \dot{\mathbf{u}}(t_i) + \Delta t^2 [(1/2 - \beta)\ddot{\mathbf{u}}(t_i) + \beta\ddot{\mathbf{u}}(t_{i+1})] \quad (7b)$$



1. Podstawowe wymiary konstrukcji pojedynczego przęsła mostu – przekrój poprzeczny

$$\ddot{u}(t) + \beta \ddot{u}(t_{i+1})] \quad (7b)$$

W prezentowanej analizie przyjęto wartości parametrów stosowane w standardowej metodzie Newmarka, tj. $\delta=0.5$, $\beta=0.25(0.5+\delta)^2$.

Model obliczeniowy konstrukcji mostowej

Analizy symulacyjne przeprowadzono na przykładzie rzeczywistego autostradowego obiektu mostowego, na którym stwierdzono występowanie trwałych deformacji niwelety jedni. Rozpatrywany obiekt posiada dwie rozdzielone wieloprzęsłowe konstrukcje przęseł, każda pod jedną jezdnią autostrady. Schemat statyczny dźwigarów głównych mostu jest belkowy, 7-przęsłowy, z pozornym uciążleniem konstrukcji w przekrojach podporowych, przy użyciu cienkiej płyty żelbetowej. Przęsła zaprojektowano jako zespolone ze stalowych dźwigarów blachownicowych ze stali gatunku 18G2A oraz żelbetowej płyty pomostowej (rys. 1) z betonu klasy B30. Konstrukcja zespolona wykazuje niezgodne z projektem nadmierne, trwałe ugięcia, wynoszące około 10 cm w środku rozpiętości każdego przęsła (rys. 2).

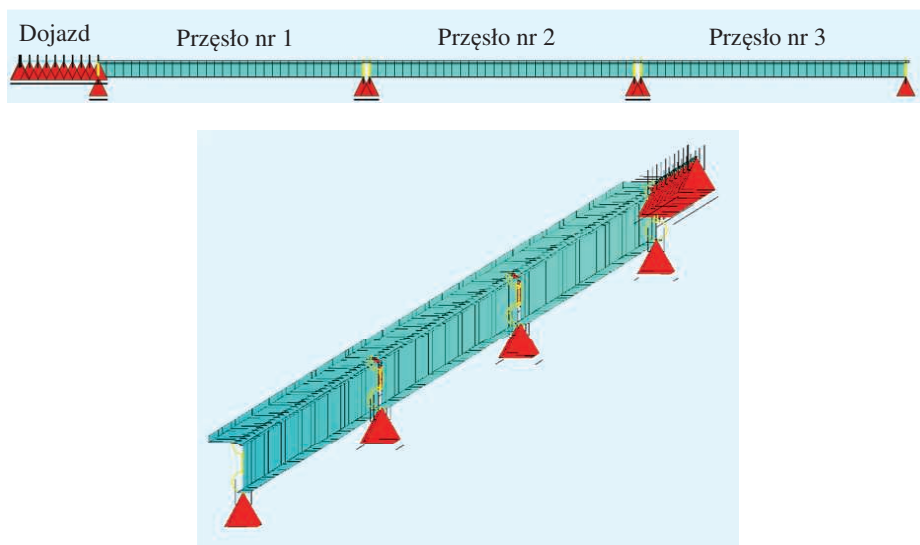
Na potrzeby analiz prowadzonych Metodą Elementów Skończonych (MES) konstrukcję przęseł mostu odwzorowano w postaci modelu klasy (e1,p2) złożonego z elementów jednowymiarowych usytuowanych w przestrzeni dwuwymiarowej (rys. 3). Model ten reprezentuje pojedynczy dźwigar wydzielony z trzech kolejnych skrajnych przęseł analizowanej konstrukcji.

Na potrzeby dynamicznych analiz symulacyjnych interakcji pojazd-konstrukcja mostowa przeprowadzono analizy porównawcze przy wykorzystaniu dwóch typów modeli:

- model bez uszkodzeń o idealnej geometrii przęseł – zgodnej z zaprojektowaną niweletą,
- model z uszkodzeniami w postaci trwałych ugięć przęseł mostu o maksymalnych wartościach do



2. Trwałe ugięcia dźwigarów głównych przęseł



3. Model numeryczny konstrukcji opracowany w programie SOFiSTiK – widok z boku z podziałem na przęsła oraz widok aksonometryczny

150 mm, które modelowano jako zastępcze imperfekcje geometryczne w odniesieniu do pierwotnej, idealnej geometrii modelu MES.

Model obciążeń ruchomych

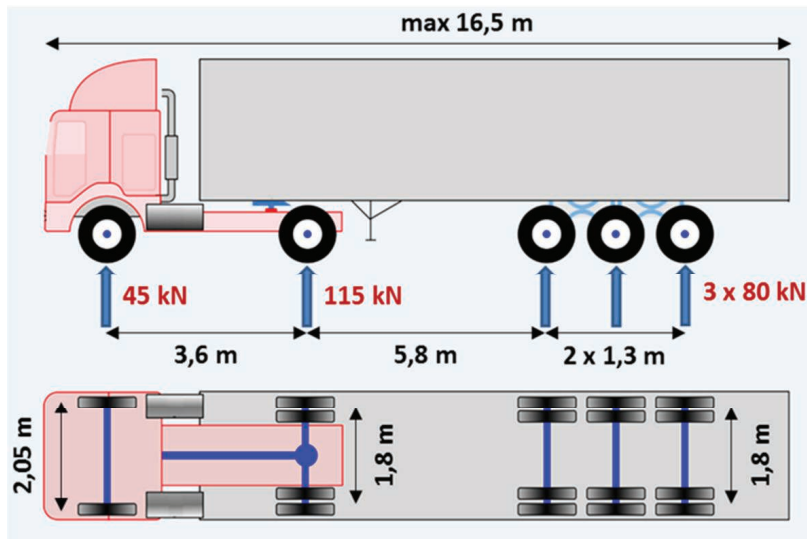
Analiza pracy konstrukcji pod obciążeniem modelami pojazdów rzeczywistych wymaga przyjęcia nie tylko efektywnego modelu numerycznego konstrukcji, ale również skutecznego odwzorowania poruszającego się pojazdu [11]-[12]. W prezentowanych analizach symulacyjnych jako obciążenie ruchome zamodelowano typowy 5-osiowy samochód ciężarowy o całkowitej masie 40 t (rys. 4).

W prezentowanych analizach zastosowano uproszczony model pojazdu, w którym obciążenie pojazdem spro-

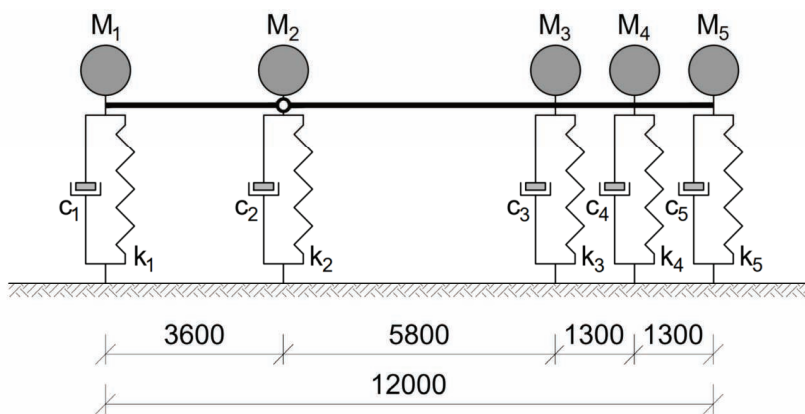
wadzono do pięciu mas oraz pięciu oscylatorów lepko-sprężystych odpowiadających poszczególnym osiom zawieszenia, połączonych ze sobą prętem o znacznej sztywności, z przegubem w miejscu masy M2 – patrz rys. 5.

W widmie częstotliwościowym oddziaływań pojazdu uwzględniono podstawowe częstotliwości drgań własnych nadwozia o wartości 2,3 Hz, które są rezultatem drgań tzw. masy resorowanej. Przyjęta wartość jest często spotykana w wielu popularnych typach ciężkich pojazdów drogowych. Podstawowe parametry modelu pojazdu zestawiono w Tab. 1.

Analizy symulacyjne przeprowadzono dla prędkości ruchu pojazdów od 10 m/s (36 km/h) do 30 m/s (108 km/h).



4. Typowy pojazd 5-osiowy o masie 40 ton - rozstaw i obciążenia osi pojazdu



5. Schemat zawieszenia zamodelowany jako oscylatory lepko sprężyste połączone prętem o sztywności dążącej do nieskończoności

Wyniki analiz parametrycznych

Przeprowadzono kompleksową analizę parametryczną wzajemnego oddziaływania dynamicznego przyjętego modelu pojazdu ciężarowego o masie 40 ton oraz rozpatrywanego typu konstrukcji mostowej z uszkodzeniami w postaci nadmiernych deformacji. W kolejnych symulacjach przejazdu pojazdu po obiekcie badano wpływ zmiany jednego identyfikatora modelu (przy ustalonych wartościach pozostałych parametrów) na zachowanie się konstrukcji.

W trakcie analiz główną uwagę zwrócono na wartości pionowych przemieszczeń, przyspieszeń drgań konstrukcji przęseł generowanych przez pojazdy ciężarowe w dźwigarach głównych w funkcji intensywności trwałych ugięć konstrukcji prze-

seł. Wybrane wyniki obliczeń zmian wielkości fizycznych w funkcji czasu wywołane przejazdem 5-osiowego pojazdu o masie 40 ton z prędkością 30 m/s (108 km/h) pokazano na rys. 6 oraz rys. 7:

- na rys. 6 przedstawiono zmiany przemieszczeń przekroju zlokalizowanego w środku rozpiętości przęsła nr 3 modelu konstrukcji (patrz rys. 3) przy różnych wartościach trwałych ugięć przęseł,
- na rys. 7 zaprezentowano wpływ różnych wartości trwałych ugięć przęseł na zmiany przyspieszeń drgań w środku rozpiętości przęsła nr 3 modelu konstrukcji.

Wpływ prędkości ruchu pojazdu przy trwałych deformacjach niwelety o maksymalnej wartości 100 mm na maksymalne wartości pionowych

Tab. 1. Zestawienie parametrów numerycznego modelu pojazdu

Parametr modelu	Wartość parametru
Podstawowa częstotliwość drgań własnych	2,3 Hz
Liczba węzłowych przemieszczeń uogólnionych	5
Masy skupione w miejscu osi	$M_1=1.265 \text{ t}$
	$M_2=2.415 \text{ t}$
	$M_{3-5}=1.840 \text{ t}$
Sztywność zawieszenia	$k_1=263.9 \text{ kN/m}$
	$k_2=503.8 \text{ kN/m}$
	$k_{3-5}=383.9 \text{ kN/m}$
Tłumienie zawieszenia	$c_1=3.654 \text{ kN/(m-sek)}$
	$c_2=6.976 \text{ kN/(m-sek)}$
	$c_{3-5}=5.315 \text{ kN/(m-sek)}$

przemieszczeń dynamicznych przedstawiono na rys. 8, natomiast wpływ na maksymalne przyspieszenia drgań – na rys. 9.

Wpływ poziomu trwałych ugięć przęseł na zwiększenie wartości współczynnika przeciążeń dynamicznych, wyznaczonego jako stosunek przemieszczeń dynamicznych do statycznych, przy prędkości przejazdu wynoszącej 25 m/s zaprezentowano na rys. 10.

Analiza wyników

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych można sformułować następujące wnioski:

- Na odpowiedź dynamiczną konstrukcji, zarówno w kontekście przemieszczeń, jak i przyspieszeń drgań znaczący wpływ mają takie czynniki, jak prędkość przejazdu pojazdu po obiekcie oraz wartości trwałych ugięć konstrukcji przęseł. Wzrost wartości wymienionych parametrów skutkuje istotnym zwiększeniem efektów dynamicznych generowanych przez układ pojazd-konstrukcja obiektu.
- Z reguły ekstremalne efekty dynamiczne w konstrukcji (w aspekcie ugięć i przyspieszeń drgań dźwigarów głównych przęseł) otrzymywano w przekroju zlokalizowanym w środku rozpiętości przęsła nr 3 podczas przejazdu modeli po-

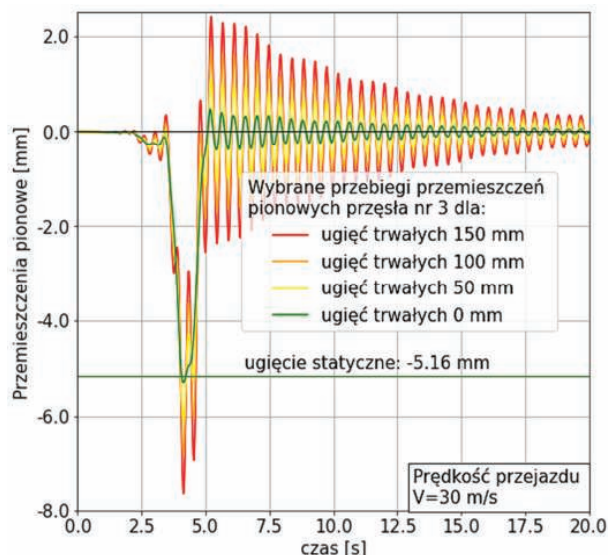
jazdów z prędkością około 23 m/s. Przykładowo dla trwałego ugięcia przęsła wynoszącego 100 mm:

- obliczona wartość maksymalnego ugięcia dynamicznego w przęśle nr 3 jest o 30 % większa od maksymalnego ugięcia statycznego (patrz rys. 8),
- wartość maksymalnego przyspieszenia drgań w przęśle nr 3 jest prawie 3 razy większa od maksymalnego przyspieszenia drgań przy przejeździe tego samego pojazdu z tą samą prędkością, ale po konstrukcji o idealnej geometrii (patrz rys. 9).
- Na podstawie wyników przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że prędkość przejazdu rozpatrywanego typu pojazdu ciężarowego równa około 23 m/s (82,8 km/h) jest tzw. prędkością krytyczną. Amplitudy wielkości fizycznych, powstające w konstrukcji przęsła mostu przyjmują wówczas maksymalne wartości.
- Wzrost globalnych efektów dynamicznych w konstrukcji generowanych ruchem pojazdów jest w przybliżeniu wprost proporcjonalny do wartości trwałego ugięcia (rys. 10).

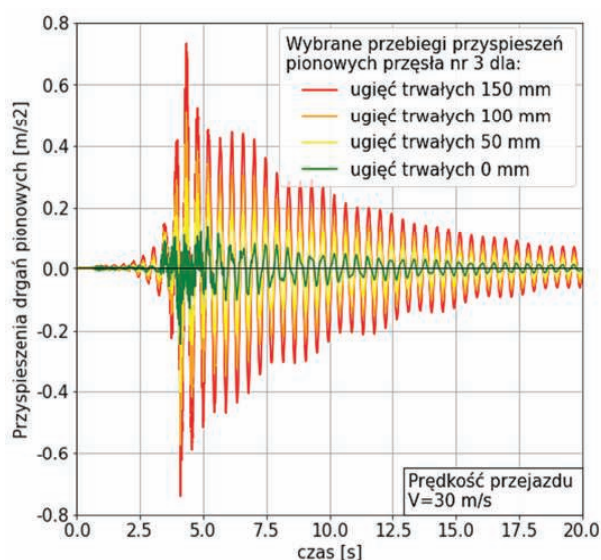
Podsumowanie

W niniejszym artykule wykazano, że trwałe ugięcia przęsła obiektów mostowych skutkujące podłużnymi nierównościami powierzchni jezdni mogą mieć zasadniczy wpływ na zwiększenie szeroko rozumianych efektów dynamicznych generowanych przez ruch pojazdów ciężarowych. Efekty te (nadmierne ugięcia dynamiczne konstrukcji, przyspieszenia drgań, a także naprężenia) są generalnie wprost proporcjonalne do wartości trwałego ugięcia i wpływają bardzo niekorzystnie na trwałość konstrukcji (np. związaną ze zmęczeniem materiału, znacząco zwiększając się wówczas zakresy zmienności naprężeń w dźwigarach głównych) oraz komfort użytkowników.

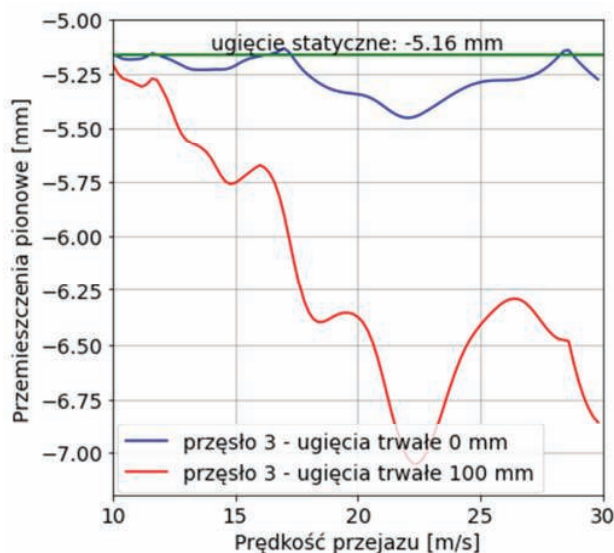
W sytuacji trwałych ugięć konstruk-



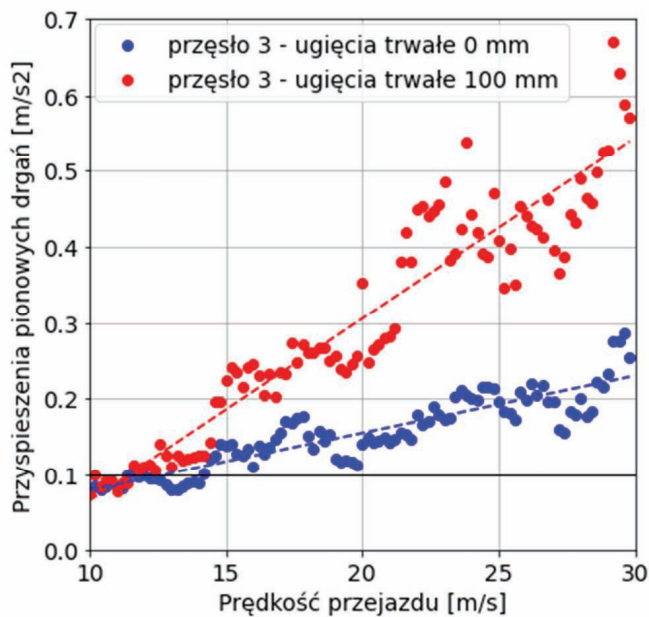
6. Zmiany przemieszczeń przekroju zlokalizowanego w środku rozpiętości przęsła nr 3 wywołane przejazdem 5-osowego pojazdu o masie 40 ton (prędkość pojazdu 30,0 m/s = 108 km/h), przy różnych wartościach trwałych ugięć: 0-150 mm



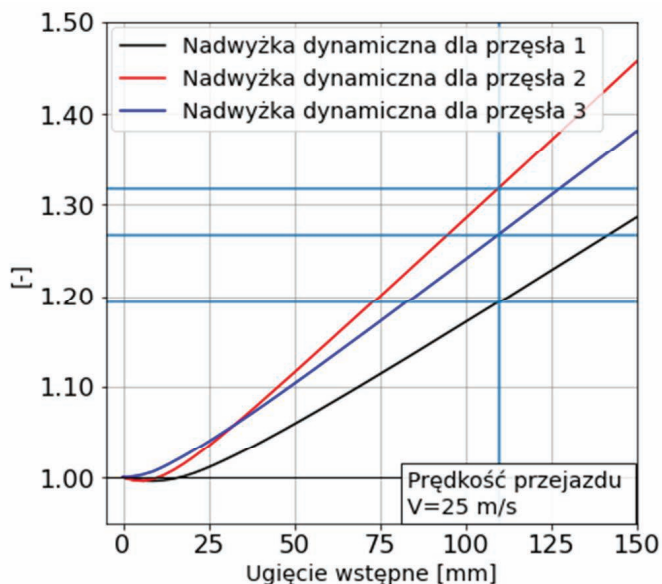
7. Zmiany przyspieszeń drgań przekroju zlokalizowanego w środku rozpiętości przęsła nr 3 wywołane przejazdem 5-osowego pojazdu o masie 40 ton (prędkość pojazdu 30,0 m/s = 108 km/h), przy różnych wartościach trwałych ugięć: 0-150 mm



8. Maksymalne ugięcia przekroju zlokalizowanego w połowie rozpiętości przęsła nr 3 w funkcji prędkości pojazdu i wartości trwałych ugięć (odpowiednio 0 mm i 100 mm)



9. Maksymalne przyspieszenia drgań przekroju zlokalizowanego w połowie rozpiętości przęseł nr 1-3 w funkcji prędkości pojazdu i wartości trwałych ugięć (odpowiednio 0 mm i 100 mm)



10. Zmiany wartości współczynnika przeciążeń dynamicznych wymuszonych przejazdem pojazdu w przekrojach zlokalizowanych w połowie rozpiętości przęseł nr 1-3 w funkcji wartości trwałych ugięć przęseł przy prędkości pojazdu równiej 25 m/s

cji mostowych, istotnym warunkiem bezpiecznej eksploatacji staje się kontrola i minimalizacja podłużnych nierówności nawierzchni jezdni, np. poprzez okresową wymianę warstwy ścieralnej nawierzchni jezdni.

W dalszych etapach prac badawczych planowana jest walidacja uzyskanych wyników analiz na podstawie wyników monitorujących, dynamicznych badań doświadczanych przeprowadzonych w warunkach normalnego użytkowania rozpatrywanego mostu, a także przeprowadzenie ana-

logicznych analiz symulacyjnych przy użyciu kompleksowego, przestrzennego modelu MES uwzględniającego wszystkie elementy przęseł mostu. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Guideline for modelling of deterioration in bridges, Deliverable D11, Final Report. Bridge Management in Europe – BRIME. Research Project, 4th Framework Programme, 1999 r.
- [2] Guideline for Load and Resistan-

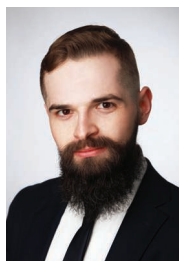
ce Assessment of Railway Bridges. Final Report, Integrated Research Project "Sustainable Bridges", European Commission, 6th Framework Programme, 2007 r.

- [3] Guideline for the Assessment of Existing Structures. Final Report, Research Project "Structural Assessment Monitoring and Control – SAMCO", 2006.
- [4] Quality specifications for roadway bridges, standardization at a European level. COST Action TU1406, 2015-2019 r., Project Reports: <https://www.tu1406.eu/>
- [5] Fryba, L. (1999). Vibrations of Solids and Structure Under Moving Loads, 3-rd.ed., London: Thomas Telford.
- [6] Craig R.R. Jr., Kudrila A.J., Fundamentals of structural dynamics, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
- [7] Paultre P., Dynamics of Structures, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2020.
- [8] Lewandowski R., Dynamics of structures, Publishing house of the Poznań University of Technology, (in Polish).
- [9] Kłasztorny, Dynamics of Beam Bridges Loaded by High-Speed Trains, WNT Press, Warsaw, 2005, (in Polish).

- [10] Newmark N.M., A method of computation for structural dynamics, Journal of Engineering Mechanics, ASCE 1959, 85 (EM3), 67-94.
- [11] Wanming Zhai, Zhaoling Han, Zhaowei Chen, Liang Ling & Shengyang Zhu (2019) Train-track-bridge dynamic interaction: a state-of-the-art review, Vehicle System Dynamics, 57:7, 984-1027.
- [12] Szafranski M., Impact of rolling stock on railway bridges at variable traffic parameters, doctoral dissertation, Gdansk University of Technology, Gdansk 2014.

Utworzenie Kolei Aglomeracyjnej we Wrocławiu z wykorzystaniem nowych odcinków średnicowych

Create of the Agglomeration Railway in Wrocław with the use of new cross-city sections



Mariusz Korzeń

Mgr inż.

absolwent Politechniki Wrocławskiej, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,

mariuszkorzen9@gmail.com



Igor Gisterek

Dr inż.

Katedra Mostów i Kolei, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

Igor.gisterek@pwr.edu.pl

Streszczenie: Publikacja jest ściśle powiązana z artykułem „Koncepcja kolejowej trasy średnicowej we Wrocławiu w celu uruchomienia sieci SKM” (PK 2/2021, s. 6-10) [2] i stanowi kontynuację tematu związanego z uruchomieniem sieci Kolej Aglomeracyjnej we Wrocławiu ze szczególnym naciskiem na obsługę ruchu miejskiego. W opracowaniu skupiono się na utworzeniu sprawnie funkcjonującej sieci, której kluczowym elementem jest odcinek średnicowy. Zwrócono uwagę, że przebieg odcinka średnicowego będzie głównym czynnikiem, od którego zależeć będzie poziom wykorzystania kolei w podróży w granicach miasta. W związku z tym przeanalizowano obecny stan Wrocławskiego Węzła Kolejowego pod kątem dostosowania go do potrzeb SKM, skupiając się przede wszystkim na jak najlepszej dostępności podróży do sieci. Wskazano miejsca, w których należałoby utworzyć nowe przystanki dla zwiększenia atrakcyjności przewozów aglomeracyjnych. W kolejnych punktach zaproponowano trzy warianty sieci w zależności od przebiegu trasy średnicowej. W podsumowaniu wskazano wariant najkorzystniejszy oraz zaproponowano wykorzystanie odcinków hybrydowych (drogowo – szynowych) jako jedno z rozwiązań mogących w niedalekiej przyszłości usprawnić sieć transportową w mieście.

Słowa kluczowe: Kolej aglomeracyjna; Wrocław; Trasa średnicowa

Abstract: The paper is closely related to the article "Concept of the cross-city railway route in Wrocław to create the LRT system" (PK 2/2021, p. 6-10) [2] and is a continuation of the topic related to create of the Agglomeration Railway system in Wrocław with particular emphasis on city traffic service. The study focused on the creation of an efficiently functioning system, the key element of which is the cross-city section. It has been pointed out that the route of the cross-city section will be the main factor that will determine the level of use of railways in journeys within the city limits. Therefore, the current condition of the Wrocław Railway Junction was analyzed in terms of adapting it to the needs of LRT, focusing primarily on the best accessibility of travelers to system. Places where new stops should be created to increase the attractiveness of agglomeration transport have been indicated. In the following points, three variants of system are proposed depending on the route of the cross-city route. In the summary, the most advantageous variant was indicated and the use of hybrid sections (road-rail) was proposed as one of the solutions that could improve the transport network in the city in the near future.

Keywords: Agglomeraton railway; Wrocław; Cross – city route

Wprowadzenie

Szybka Kolej Miejska (SKM) stanowi bardzo atrakcyjny środek transportu na obszarach zurbanizowanych (głównie w aglomeracjach), której podstawowym zadaniem jest przewóz dużej liczby pasażerów na nie-dużych w porównaniu z koleją dalekobieżną dystansach w stosunkowo krótkim czasie. Jest często szybszą i wygodniejszą alternatywą dotarcia do centrum miasta, głównie z kierunków peryferyjnych. Rdzeniem każdej sieci SKM jest miejsce, w którym zbiegają się poszczególne linie i jest nim

odcinek średnicowy lub stacja centralna. Ważne, aby ruch po średnicy odbywał się w sposób bezkolizyjny z innymi środkami transportu, dlatego jej przebieg powinien odbywać się po estakadzie, w poziomie terenu (nasyp/przekop) lub w tunelu. Sam przebieg trasy średnicowej będzie w dużym stopniu determinował atrakcyjność przewozów kolejowych, szczególnie w granicach miasta. Często centrum miasta stanowi główny cel podróży, ze względu na znajdujące się na tym obszarze generatory ruchu, o których mowa w artykule [2]. Dlatego tak ważnym jest, aby prze-

bieg trasy średnicowej był możliwie jak najlepiej dopasowany do potrzeb transportowych mieszkańców.

Obecnie w Polsce istnieje kilka sieci szybkiej kolei miejskiej m.in. w Warszawie, Trójmieście oraz Łodzi, które skutecznie realizują swoje zadanie przewożąc dużą liczbę osób z i do centrum w relatywnie krótkim czasie. Niestety we Wrocławiu jak dotychczas nie powstała sieć SKM, pomimo dobrze rozbudowanego węzła kolejowego. Jednakże nawet przy utworzeniu sieci, problemem może okazać się odcinek średnicowy. Obecnie za ten można uznać esta-

kadę prowadzącą do stacji Wrocław Główny od strony posterunku odgałęźnego Wrocław Grabiszyn. Ograniczona przepustowość na estakadzie może spowodować wiele ograniczeń w prowadzeniu ruchu pociągów. Już teraz można zaobserwować duże natężenie przewozów w tym rejonie, a dodanie dodatkowych linii SKM może całkowicie sparaliżować ruch na średnicy. Dlatego, wzorem licznych miast zachodnich, warto rozważyć utworzenie na terenie Wrocławia nowego odcinka o charakterze trasy średnicowej, dając tym samym możliwość prowadzenia pociągów SKM z dużym natężeniem przewozów nie ograniczając jednocześnie przepustowości istniejącej średnicy. Poza kwestią nowej średnicy należy także przeanalizować, jakie zmiany należy wprowadzić w obrębie Wrocławskiego Węzła Kolejowego (WWK), aby zwiększyć bezpośrednią dostępność do sieci kolejowej.

Odległości między przystankami

Od dostępności do sieci zależeć będzie liczba potencjalnych pasażerów. Sam dostęp podróżnych do sieci odbywa się za pomocą peronów. W związku z tym wraz ze wzrostem liczby przystanków na sieci, wzrasta atrakcyjność tego środka transportu. Jednocześnie należy mieć na uwadze, że każdy kolejny postój pociągu wydłuża całkowity czas podróży. Należy w związku z tym lokalizować przystanki w takich miejscach, w których są one najbardziej potrzebne. Można zaobserwować tendencję, że odległości między przystankami różnią się w zależności od ich oddalenia od centrum. Im przystanki są dalej od centrum, tym odległości między nimi rosną i odwrotnie. Ta zależność jest ściśle powiązana z gęstością zaludnienia w mieście. Duża gęstość zaludnienia w centrum powoduje, że przystanki powinny być gęściej rozmieszczone, aby móc obsłużyć znacznie większe niż na peryferiach

potoki pasażerów. Analizując średnie odległości między przystankami na sieci szybkiej kolei miejskiej w ramach opracowania [3] wywnioskowano, że:

- odległość między przystankami w centrum mieszczą się w przedziale 500 - 1000 m, choć najczęściej wartość ta wynosiła ok. 800 m,
- odległość między przystankami na przedmieściach miasta mieszczą się w przedziale 800 – 1500 m, choć najczęściej wartość wynosiła ok. 1000 m,
- odległości między przystankami na obszarze aglomeracji są uzależnione od położenia miejscowości wzdłuż danej linii, przeważnie między 1500 a 2000 m.

Można wstępnie założyć, że odległości między kolejnymi przystankami w centrum nie powinny przekraczać 1000 m. Jest to oczywiście zależne od wielu czynników, np. przebiegiem linii przez naturalną przeszkodę lub lokalizacją dużych węzłów przesiadkowych. Nie należy natomiast lokalizować przystanków zbyt blisko siebie, aby sieć była efektywna i spełniała swoje podstawowe zadanie szybkiego przewozu osób.

Dostosowanie WWK do potrzeb SKM pod kątem dostępności do infrastruktury

W skład WWK wchodzi kilkanaście linii (w tym wszystkie łącznice oraz obwodnica towarowa, co pokazuje, że aglomeracja wrocławska posiada duży potencjał do utworzenia sieci SKM. Należy natomiast wprowadzić modyfikacje w infrastrukturze, aby węzeł spełniał wymagania dotyczące kolei aglomeracyjnej. Jedną z kwestii jest np. możliwość zwiększenia przepustowości trasy w rejonie istniejącej trasy średnicowej, co poruszono w pracy [5]. W niniejszym opracowaniu skupiono się na bezpośredniej dostępności podróżnych do sieci kole-

jowej, którą można wyrazić poprzez odległość dojścia pieszego do przystanku. Według wytycznych niemieckich [8] można przyjąć rekomendowane długości dojścia do przystanku S – Bahn. Wartości te wynoszą odpowiednio:

- w centrum: 350–500 m,
- obszar poza centrum: 400–700 m,
- peryferia miasta 500–800 m.

Na podstawie powyższych danych można określić obszar miasta z bezpośrednią dostępnością do sieci kolejowej. Ze względu na wielkość Wrocławia, przyjęto wyłącznie dwie pierwsze strefy dojścia do przystanku. W związku z tym przyjęto, że w centrum (Śródmieście, Stare Miasto) przyjęto wartość 500 m, a w pozostałej części miasta przyjęto 700 m.

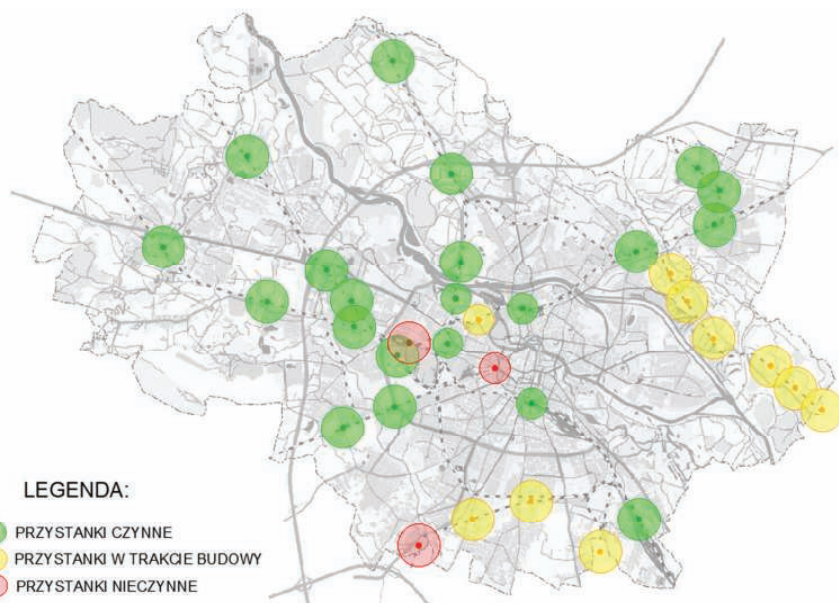
Na rysunku 1 pokazano obecny stan WWK pod kątem rozmieszczenia przystanków kolejowych na planie miasta. Aktualnie w eksploatacji jest 21 przystanków rozmieszczonych głównie w zachodniej i północnej części miasta. Oznaczone zostały na mapie kolorem zielonym. Aktualnie trwa remont linii kolejowej nr 292 w kierunku Jelcza Laskowic oraz remont linii nr 285 w kierunku Świdnicy przez Sobótkę. Dodatkowo trwa budowa nowych przystanków tj.: Wrocław Szczepin oraz Wrocław Iwiny. Przystanki w trakcie budowy, włączone w niedalekiej przyszłości do eksploatacji oznaczono na mapie kolorem żółtym. 3 przystanki kolejowe (tj.: Wrocław Świebodzki, Wrocław Klecina i Wrocław Gądów) oznaczone na mapie kolorem czerwonym, nie są planowane w najbliższym czasie do eksploatacji. Okręgiem zaznaczono obszar bezpośredniego dojścia pieszego do przystanku. Licząc wszystkie przystanki, które mają być wykorzystywane na sieci (żółte i zielone) będzie ich łącznie 31. Jest to dość spora liczba, biorąc pod uwagę wielkość miasta. Jednakże problemem jest niewielka liczba przystanków

w obrębie centrum. Ze względu na fakt, że obecnie WWK okrąży centrum miasta, w centrum znajduje się jedynie 5 przystanków kolejowych i jest to bardzo niewiele. Dla zwiększenia atrakcyjności przewozów kolejowych, szczególnie tych planowanych w ramach SKM, koniecznym jest zwiększenie ich liczby oraz rozmieszczenie ich w pobliżu obecnych generatorów ruchu. Ponadto odległości między przystankami są często większe niż te rekomendowane dla połączeń aglomeracyjnych. W związku z tym należałoby zwiększyć liczbę przystanków z zachowaniem odpowiedniej odległości między nimi. Liczba nowych przystanków oraz układ całej sieci SKM uzależniony będzie od liczby zaproponowanych nowych odcinków średnicowych. Dodatkowo podczas projektowania układu sieci SKM wzięto także pod uwagę plany miasta związane z budową linii kolejowej do lotniska.

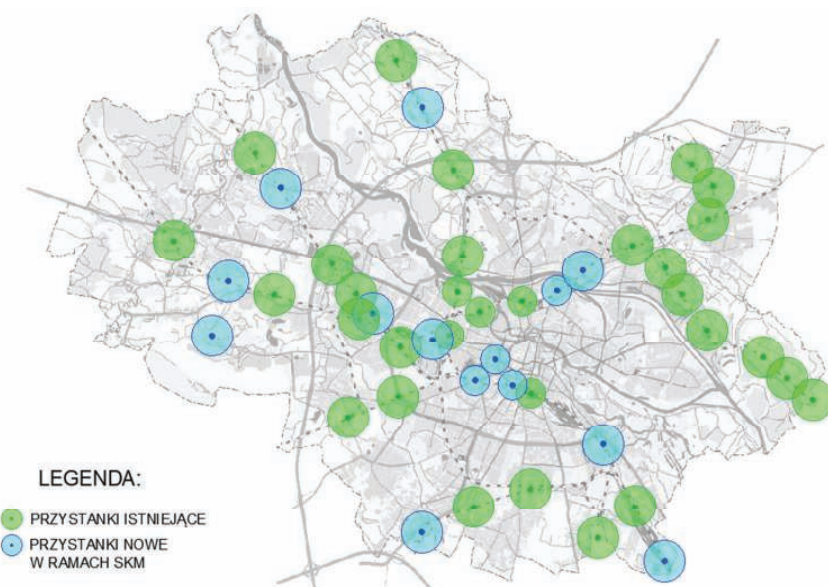
Wariant I sieci SKM bez nowego odcinka średnicowego

Jest to wariant najbardziej ekonomiczny, ze względu na brak konieczności budowy nowych tras. Odcinkiem średnicowych na sieci stanie się istniejąca estakada kolejowa. Problemem może okazać się mocno ograniczona przepustowość estakady. W związku z tym warunkiem koniecznym dla uruchomienia sieci w tym wariantie jest rozbudowa estakady o dodatkowy tor, co opisano w pracach [1, 5] oraz przywrócenie kolejowej funkcji Dworca Świebodzkiego. Zaproponowano utworzenie 14 nowych przystanków, w tym 4 w centrum. Rozmieszczenie nowych przystanków pokazano na rysunku 2.

Mając tę informację można przystąpić do tworzenia sieci. Układ sieci opracowano w oparciu o analizę przykładów istniejących opisanych w pracy [3] oraz na podstawie wcześniejszych koncepcji tras Kolei Aglomeracyjnej zawartych m.in. w książce



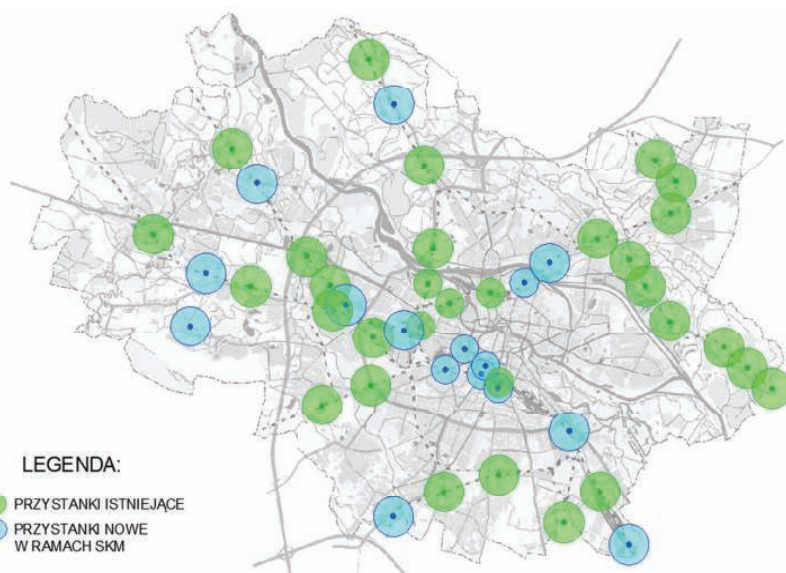
1. Stan obecny WWK pod kątem rozmieszczenia przystanków kolejowych na planie miasta. Opracowanie własne, w tle [10]



2. Rozmieszczenie przystanków na planie miasta w wariantie I. Opracowanie własne, w tle [10]



3. Schemat sieci SKM w wariantie I. Opracowanie własne



4. Rozmieszczenie przystanków na planie miasta w wariancie II.
Opracowanie własne, w tle [10]



5. Schemat sieci SKM w wariancie II. Opracowanie własne

[4], raporcie [6] oraz w artykule [9]. Głównym kryterium przy projektowaniu poszczególnych linii było zaspokojenie potrzeb transportowych mieszkańców Wrocławia oraz aglomeracji z naciskiem na obsługę centrum oraz dostosowanie linii pod kątem parametrów eksploatacyjnych (prędkość maksymalna, liczba torów, rodzaj trakcji, itp.). Warto także uwzględnić kierunki rozwoju miasta pod kątem powstawania nowych osiedli oraz przyszłych centrów biznesowo - usługowych. Dodatkowo każda z linii powinna przebiegać przez centrum miasta, a na przystan-

kach w śródmieściu powinna być możliwość dojazdu do możliwie jak największej części miasta. Zaproponowany schemat sieci w wariancie I pokazano na rysunku 3.

Zaproponowano łącznie 8 linii, w tym jedną linię obwodową. Część linii kończy się na stacji Wrocław Świebodzki, więc stanie się to dość ważnym węzłem przesiadkowym, głównie do obsługi zachodniej części miasta i aglomeracji. Dużą wadą tego wariantu jest nadal brak bezpośredniego dostępu do sieci kolejowej centrum miasta. Konieczność przesiadki powoduje spadek atrakcyjno-

ści przewozów w granicach miasta oraz wydłużenie czasu podróży.

Wariant II sieci SKM z tunelem łączącym Dworzec Świebodzki i Dworzec Główny

Wariant zakłada budowę tunelu łączącego Dworzec Świebodzki i Dworzec Główny, dzięki czemu Dworzec Świebodzki stanie się stacją przelotową. Idea utworzenia trasy łączącej oba dworce o zbliżonym przebiegu została opisana w artykule [7]. W tym wariancie również koniecznym byłoby wykorzystanie istniejącej estakady kolejowej oraz należałoby rozważyć potrzebę rozbudowy estakady o dodatkowy tor dla zachowania wymaganej przepustowości średnicy. Nowa trasa stanowić będzie zabezpieczenie przepustowości w rejonie centrum na wypadek problemów z zachowaniem płynności ruchu na estakadzie. Zaproponowano 16 nowych przystanków, w tym 6 w centrum. Rozmieszczenie nowych przystanków pokazano na rysunku 4.

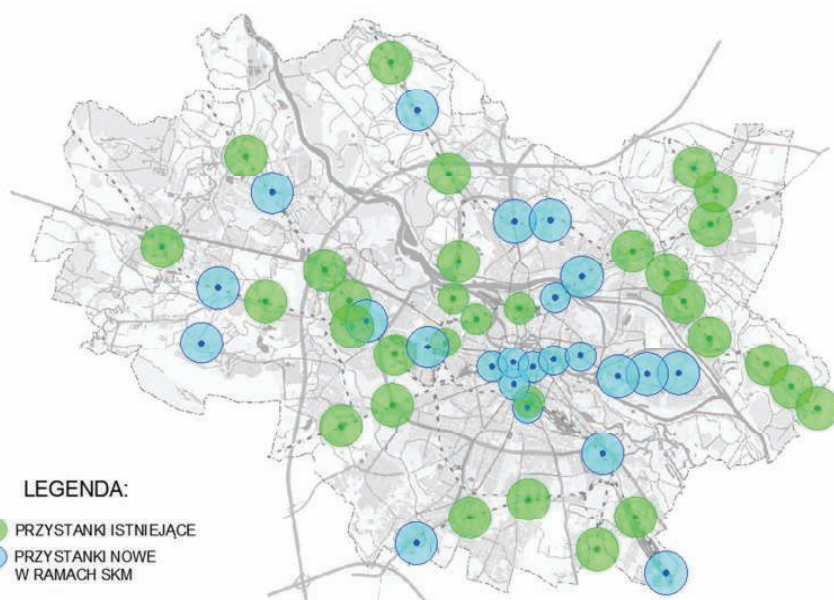
Na podobnych zasadach jak w wariancie I opracowano schemat sieci SKM w wariancie II. Zaproponowany schemat sieci pokazano na rysunku 5, na którą składa się podobnie jak w wariancie I 8 linii. Dzięki budowie nowej trasy była możliwość przedłużenia tras kończących się w wariancie I na Dworcu Świebodzkim. Dzięki temu jest więcej możliwości poprowadzenia linii, zwiększając tym samym ofertę przewozową oraz atrakcyjność przewozów kolejowych. Linią przerywaną zaznaczono nowoprojektowany odcinek w tunelu. Wszystkie linie przebiegają przez stację Wrocław Główny, choć przesiadanie się pomiędzy liniami może być utrudnione ze względu na przejazd pociągów na dwóch poziomach. Niestety budowa nowej trasy nie zwiększy w znaczący sposób bezpośredniego dostępu do sieci kolejowej centrum miasta. Koniecznym zatem byłoby dopasowanie układu komu-

nikacyjnego transportu miejskiego (autobus, tramwaj) pod kątem jak najkrótszego czasu dojazdu do przystanków SKM, ze szczególnym naciskiem na dojazd do Dworca Głównego.

Wariant III sieci SKM z dwoma nowymi trasami średnicowymi

Jest to wariant najbardziej rozbudowany. Zakłada budowę dwóch nowych odcinków średnicowych w tunelu. Ich szczegółowy przebieg został opisany w artykule [2] oraz pracy [3]. Podobnie jak w wariantcie II, zaproponowano utworzenie łącznika między Dworcem Świebodzkim a Dworcem Głównym. Dodatkowo zaproponowano tunel przebiegający pod centrum miasta, co znacząco zwiększy przepustowość w tym rejonie. Nie ma także konieczności prowadzenia linii po estakadzie kolejowej zakładając, że będzie ona wykorzystywana wyłącznie dla połączeń regionalnych i dalekobieżnych. Zaproponowano łącznie 23 nowe przystanki, w tym 8 w centrum. Ich rozmieszczenie na planie miasta pokazano na rysunku 6.

Na tej podstawie opracowano schemat sieci pokazany na rysunku 7. Podobnie jak w wariantach I i II, łącznie jest 8 linii, w tym jedna linia obwodowa. Linią przerywaną zaznaczono nowoprojektowane odcinki w tunelu. Wszystkie linie przebiegają przez stację Wrocław Świebodzki. W związku z tym rejon placu Orłąt Lwowskich stanie się najważniejszym i najlepiej skomunikowanym miejscem w mieście, z którego będzie możliwość dojechać bez przesiadek praktycznie do każdej części Wrocławia. Zaletą tego wariantu jest brak konieczności przesiadki w celu dojazdu do centrum i jest to szczególnie ważne dla osób podróżujących w granicach miasta. Niestety jest to także najdroższy z zaproponowanych wariantów. Budowa tunelu, szczególnie tego dłuższego na chwilę obecną przekracza możli-



6. Rozmieszczenie przystanków na planie miasta w wariantcie III. Opracowanie własne, w tle [10]



7. Schemat sieci SKM w wariantcie III. Opracowanie własne

wości miasta. W związku z czym realizacja tak kosztownej inwestycji byłaby możliwa jedynie przy współpracy z PKP PLK oraz dofinansowaniem ze środków z Unii Europejskiej, podobnie jak ma to miejsce w przypadku budowy tunelu średnicowego w Łodzi. Dodatkowym problemem mogą okazać się trudne warunki gruntowe – wodne w obrębie miasta, co może uniemożliwić budowę lub zwiększyć już i tak duże koszty budowy.

Podsumowanie i wnioski

W październiku 2019 r. PLK podpisało z wykonawcami umowy na studia wykonalności dla Wrocławskiego Węzła Kolejowego, a także linii kolejowej na odcinku Św. Katarzyna – Wr. Muchobór i Wr. Świebodzki [12]. Szczegółowy zakres studium zawarto w Opisie Przedmiotu Zamówienia [11]. Na podstawie studium określone będą plany rozwoju kolei po roku 2020. Jednym z elementów zawartych w OPZ jest m.in. przywrócenie

kolejowej funkcji Dworca Świebodzkiego oraz jego przebudowy do stacji przelotowej, a także budowa linii kolejowej prowadzącej do lotniska. Przytoczony dokument pokazuje zainteresowanie poprawą sieci transportowej w regionie jak i w samej aglomeracji. Jest to dobry prognostyk na powstanie w najbliższych latach sprawnie działającej sieci kolei aglomeracyjnej na terenie Wrocławia.

W związku z powyższym warto rozważyć możliwości utworzenia sieci SKM. we Wrocławiu. W opracowaniu zaproponowano trzy warianty sieci, w zależności od przebiegu trasy średnicowej. Dodatkowo w celu zwiększenia dostępności do sieci w obrębie miasta, zaproponowano lokalizację nowych przystanków z zachowaniem odpowiedniej odległości pomiędzy nimi. Wariant I ze względu na ograniczenia jakie niesie ze sobą wykorzystanie estakady kolejowej może spowodować duże ograniczenia w kursowaniu pociągów, a tym samym SKM może być nieefektywna. Najbardziej realny do realizacji jest wariant II z budową tunelu łączącego Dworzec Świebodzki i Dworzec Główny. Niestety takie rozwiązanie nadal wymusza przesiadkę osób podróżujących do centrum oraz koniecznym będzie także wykorzystanie estakady kolejowej. W związku z tym utworzenie sieci SKM w wariantie II sprawi, że nowy środek transportu będzie nastawiony głównie na obsługę aglomeracji niż samego miasta. Dlatego o wiele lepszym rozwiązaniem byłoby utworzenie sieci w wariantie III, lecz wysokie koszty realizacji na chwilę obecną uniemożliwiają ten cel.

Warto w takim razie zastanowić się, czy jest możliwe rozwiązanie, które pozwoli na utworzenie nowej trasy średnicowej, z wysoką bezkolizyjnością trasy bez konieczności budowy drogich odcinków w tunelu. Jednym z takich rozwiązań może być wprowadzenie pojazdów hybrydowych, które mogłyby poruszać się zarówno

po sieci kolejowej jak i sieci drogowej z odpowiednim ich dostosowaniem. Dodatkowo dzięki takiemu rozwiązaniu będzie możliwość większej swobody prowadzenia tras, a co za tym idzie możliwe będzie dostosowywanie sieci do potrzeb transportowych mieszkańców. Mocną stroną takiego rozwiązania jest eliminowanie przesiadek, co znacznie zwiększa atrakcyjność tego środka transportu. W rejonie centrum miasta, możliwe będzie utworzenie bezkolizyjnych tras w poziomie terenu np. w przekopie wykorzystując fosę miejską lub częściowo w tunelu dla zwiększenia bezkolizyjności przejazdu. Jest to rozwiązanie dość nowatorskie i wymaga szeregu badań związanych z dostosowaniem infrastruktury oraz samych pojazdów. Nie zmienia to jednak faktu, że ideę wykorzystania pojazdów hybrydowych w transporcie zbiorowym warto dokładniej przeanalizować jako jedno z rozwiązań mogących przyczynić się do poprawy jakości podróży na terenach aglomeracji miejskich. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Gisterek I.: Projekt dobudowy czwartego toru na estakadzie kolejowej we Wrocławiu wraz z identyfikacją zagadnień podtorzowych. Przegląd Komunikacyjny 11/2012, s. 19-22.
- [2] Korzeń M.: Koncepcja kolejowej trasy średnicowej we Wrocławiu w celu uruchomienia sieci SKM. Przegląd Komunikacyjny 2/2021, s. 6-10.
- [3] Korzeń M. „Koncepcja tunelu dla SKM we Wrocławiu”. Praca dyplomowa magisterska, opiekun I. Gisterek, Politechnika Wrocławska, 2021 r.
- [4] Kruszyna M.: Koleje miejskie i regionalne w Polsce, Monografia, Łódź Księży Młyn Dom Wydawniczy 2018.
- [5] Kruszyna M., Makuch J.: Koncepcja rozbudowy estakady kolejowej

w centralnej części WWK. XIII Konferencja Naukowo – Techniczna „INFRASZYN”, Zakopane 9 – 10.06.2021 r.

- [6] Kruszyna M., Makuch J., Popiołek A., Gasz K.: Koncepcja rozwoju pasażerskiego transportu kolejowego w Aglomeracji Wrocławskiej poprzez uruchomienie Wrocławskiej Kolei Aglomeracyjnej. Raporty Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Raport SPR nr 32/2017.
- [7] Kruszyna M.: Propozycja wprowadzenia odcinków podziemnych w transporcie zbiorowym Wrocławia. Transport Miejski i Regionalny, 12/2015, s. 3 - 6.
- [8] Light Rail in Germany, VDV 2000, red. G. Girnau, A. Müller – Hellmann, F. Blennemann
- [9] Makuch J.: Działania niezbędne dla uruchomienia atrakcyjnego systemu kolei aglomeracyjnej na przykładzie Wrocławia. XI Konferencja Naukowo – Techniczna „INFRASZYN”, Zakopane 18 – 20.04.2018r.
- [10] Podkład mapowy - System Informacji przestrzennej Wrocławia, <https://geoportal.wroclaw.pl/>
- [11] Opis Przedmiotu Zamówienia dla przetargu nieograniczonego na wykonanie dokumentacji przedprojektowej w ramach projektu: „Wstępne Studium Wykonalności dla Wrocławskiego Węzła Kolejowego wraz z opracowaniem Studium Wykonalności C-E 59 – odcinek Święta Katarzyna – Wrocław Brochów – Wrocław Muchobór/Wrocław Kuźniki”. Zadanie I: „Wstępne Studium Wykonalności Wrocławskiego Węzła Kolejowego” (WSW WrWK). PLK 2019.
- [12] Strona internetowa: <https://www.rynek-kolejowy.pl/mobile/plk-podpisala-umowy-na-studio-rozbudowy-wroclawskiego-wezla-kolejowego-93840.html>

Sprężysto-tłumiąca więź kontaktowa w numerycznych symulacjach drgań układu pociąg – tor

Visco-elastic contact spring in numerical simulations of train – track system vibrations

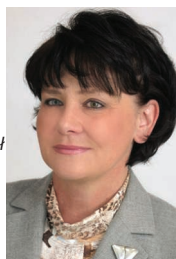


Piotr Lalewicz

Mgr inż.

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk

piotr.lalewicz@pwr.edu.pl



Danuta Bryja

Dr hab. inż., prof. uczelni

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk

danuta.bryja@pwr.edu.pl

Streszczenie: W sprzężonym układzie pociąg – tor, kontakt pomiędzy podukładami występuje na styku każdego koła z szyną. Najpopularniejszym obecnie modelem kontaktu stosowanym w symulacjach numerycznych drgań jest idealnie sprężysta, zlinearyzowana więź Hertz'a bazująca na teorii kontaktowej Hertz'a. W bogatszych wariantach modelu kontaktowego uwzględnia się dodatkowo dyssypację energii na styku koła z szyną. W literaturze brakuje porównań tych modeli wskazujących na skutki zastosowania konkretnego rozwiązania. Zasadniczym celem niniejszej pracy jest analiza porównawcza skutków zastosowania dwóch wybranych więzi kontaktowych w symulacjach numerycznych drgań układu pociąg – tor. Rozważono standardową zlinearyzowaną więź sprężystą typu Hertz'a i więź sprężysto-tłumiącą zdefiniowaną przez autorów, bazującą na tłumieniu histerezy. Skutki zastosowania tych więzi kontaktowych zbadano na podstawie porównania wyników symulacji pionowych drgań toru z nierównością progową, przez którą przejeżdża pociąg stanowiący zespół pojazdów kolejowych. Na podstawie wykonanych analiz numerycznych postawiono tezę, że zastosowanie modelu kontaktowego koło – szyna wzbogaconego o tłumienie histerezy jest sensowne wtedy, gdy badania są ukierunkowane na stan wyłączenia toru i efekty zmęczenia w torze i pojeździe kolejowym. Stwierdzono ponadto, że pominięcie tłumienia w strefie kontaktu nieco zaniża prawdopodobieństwo wystąpienia utraty kontaktu, a więc nie prowadzi do prawidłowej identyfikacji tego zjawiska.

Słowa kluczowe: Kontakt koło/szyna; Kontakt Hertza, Zlinearyzowane więzi kontaktowe; Dynamika układów pociąg/tor

Abstract: In train – track coupled systems, interaction between subsystems occurs in wheel-rail contact. The most common contact model is perfectly elastic, linearized Hert'z spring. It has wide range of application in numerical simulations. In more detailed interaction models, the energy dissipation in wheel-rail contact is taken into account. There are no known comparisons of these models in the literature, that would indicate the effects of a specific solution application.

In this paper, the main purpose is to analyze and compare the effects of two contact models in terms of numerical simulations of train – track vibrations. The reference contact model taken into account is linearized, perfectly elastic Hert'z spring. The second spring, proposed by the authors is enriched with viscous element based on hysteresis damping. Application of both models, and its effects were examined in plane, train – track vibrations simulations with threshold inequality excitation in the middle of the track length. Concluding from the analyses performed, it was found that viscoelastic contact model application is important, when track stresses and fatigue are being investigated. In addition, it was found that neglecting the damping element in contact model reduces the probability of the wheel – rail contact loss phenomenon, and thus leads to incorrect identification of its occurrence.

Keywords: Wheel/rail contact; Hertz contact, Linearized contact spring; Train/track dynamics

Wstęp

W modelowaniu numerycznym układów sprzężonych, gdzie mamy do czynienia z wzajemnym oddziaływaniem ciał, kluczowym elementem jest model styku tych ciał poprzez który zachodzi interakcja. Dobór odpowiedniego modelu numerycznego strefy kontaktu pozwala na prawidłowy opis zjawisk zachodzących pomiędzy ciałami.

W sprzężonym układzie pociąg – tor, kontakt pomiędzy podukładami występuje na styku każdego koła z szyną i ma charakter toczny. Sposób modelowania tego kontaktu zależy istotnie od założonego celu symulacji numerycznych, a ten zależy od rodzaju analizowanych zagadnień. Można je podzielić ogólnie na dwie grupy – zagadnienia ukierunkowane na analizę problemów mechaniki pojazdu kolejowego, oraz zagadnienia ukierun-

kowane na analizę toru kolejowego. W przypadku pierwszej grupy zagadnień stosowane są współcześnie przestrzenne modele kontaktowe, często bardzo złożone, budowane z wykorzystaniem MES (Bosso i in. [1]). Tego typu modele strefy kontaktowej nie są obecnie stosowane w przypadku drugiej grupy zagadnień, szczególnie wtedy, gdy symulacje są przeprowadzane na potrzeby analiz dynamicznych. Powodem wykluczenia

tych modeli jest czas symulacji, który przekraczałby dostępne współcześnie możliwości obliczeniowe.

W symulacjach drgań toru spowodowanych przejazdami pociągów stosowane są zwykle uproszczone modele kontaktu. Najprostszym z nich jest kontakt sztywny, w którym zakłada się, że przemieszczenia koła i szyny są jednakowe, co jest dużym uproszczeniem, ponieważ pomija się wtedy całkowicie odkształcalność stykających się powierzchni. Sztywny model kontaktu jest do tej pory stosowany w symulacjach drgań układów most – tor – pociąg (np. Xu i Zhai [2]). Jednak najpopularniejszym obecnie modelem kontaktu, stosowanym między innymi przez Zhai [3, 4, 5], Klasztornego i Podwórną [6], Yongle Li [7] i opisanym np. w monografii Esvelde [8], jest tzw. więź Hertz'a, czyli model w postaci więzi sprężystej o charakterystyce wyznaczanej na podstawie teorii kontaktowej Hertz'a. W bogatszych wariantach modelu kontaktowego Hertz'a uwzględnia się dodatkowo dyssipację energii na styku koła z szyną. Przykładem jest np. model zaproponowany przez Pombo i in. [9], w którym rozpraszanie energii jest opisane poprzez wprowadzenie tłumika reprezentującego tłumienie histerezy wg modelu Lankarani i Nikravesh'a [10]. Wymienione podstawowe warianty modeli kontaktowych są stosowane alternatywnie w metodach symulacji drgań toru, jednak w literaturze brakuje porównań tych modeli wskazujących na skutki zastosowania konkretnego rozwiązania.

Zasadniczym celem tej pracy jest analiza porównawcza dwóch wybranych więzi kontaktowych, przy czym analizę tę poprzedzono własnym sformułowaniem więzi kontaktowej sprężysto-tłumiącej, w której element sprężysty jest zlinearyzowaną więzią sprężystą Hertz'a a element tłumiący odpowiada tłumieniu histerezy. W symulacjach numerycznych rozważono zatem zlinearyzowaną więź sprężystą typu Hertz'a w dwóch wariantach – bez tłumienia i z tłumieniem histerezy. Skutki zastosowania tych więzi zbadano na podstawie porównania

wyników symulacji pionowych drgań toru z nierównością progową, przez którą przejeżdża pociąg stanowiący zespół pojazdów kolejowych. Każdy pojazd jest modelowany dyskretnym układem dynamicznym o dziesięciu stopniach swobody, złożonym z mas reprezentujących nadwozie, dwa dwuosiove wózki jezdne i zestawy kołowe. Masy są połączone układami więzi lepko-sprężystych, które modelują dwustopniowe zawieszenie pojazdu. Na podstawie wykonanych analiz numerycznych postawiono tezę, że zastosowanie modelu kontaktowego koło – szyna wzbogaconego o tłumienie histerezy jest sensowne wtedy, gdy badania są ukierunkowane na stan wyężenia toru i efekty zmęczenia w torze i pojeździe kolejowym. Stwierdzono ponadto, że pominięcie tłumienia w strefie kontaktu nieco zaniża prawdopodobieństwo wystąpienia utraty kontaktu, a więc nie prowadzi do prawidłowej identyfikacji tego zjawiska.

Więzi kontaktowe

Więź sprężysta Hertz'a, stanowiąca klasyczny model kontaktu pomiędzy kołem i szyną została opisana pokrótce np. w monografii Esvelde [8]. Zarówno szynę jak i koło traktuje się w tym modelu jako ciała nieodkształcalne a pomiędzy te ciała wprowadza się więź sprężystą, która opisuje w uproszczony sposób odkształcenie się ciał w miejscu styku (zgniot). Sztywność więzi k_H wyznacza się korzystając z teorii Hertz'a.

Według teorii Hertz'a opisującej kontakt dwóch odkształcalnych ciał dwukrzywiznowych, zgniot ciał δ w punkcie ich kontaktu, spowodowany siłą kontaktową F_H działającą pomiędzy tymi ciałami, jest zapisany wzorem (por. Johnson [11])

$$\delta = \left(\frac{9F_H^2}{16E^*R_e} \right)^{1/3} F_2(e) \quad (1)$$

gdzie E^* i R_e są stałymi zależnymi odpowiednio od parametrów materiałowych i krzywizny ciał. Stałe te są zdefiniowane wzorami

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2},$$

$$R_e = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_{1,y}R_{1,x}} + \frac{1}{R_{2,y}R_{2,x}} \right)}} \quad (2)$$

$F_2(e)$ jest współczynnikiem korekcyjnym zależnym od krzywizny stykających się ciał, który w zagadnieniach inżynierskich z krzywiznami kołowymi można przyjmować równy jedności ([11]). Przekształcając (1) z uwzględnieniem, że $F_2(e) = 1$, oraz zakładając, że stykające się ciała są wykonane ze stali o zbliżonych parametrach materiałowych otrzymuje się nieliniową zależność pomiędzy siłą kontaktową a zgniotem materiału w punkcie kontaktu

$$F_H = C_H \delta^3 \quad (3)$$

gdzie

$$C_H = \frac{4G\sqrt{R_e}}{3(1-\nu)} = \frac{2E\sqrt{R_e}}{3(1-\nu^2)} \quad (4)$$

Stała C_H , nazywana stałą Hertz'a, jest wyrażona poprzez parametr R_e oraz stałe materiałowe: moduł sprężystości podłużnej E lub poprzecznej G i współczynnik Poissona ν .

Nieliniowa zależność (3) jest cytowana w różnych współczesnych publikacjach dotyczących zagadnień kontaktu koło – szyna, np. w pracach [12, 13], gdzie stanowi podstawę wyprowadzenia wzoru na tzw. zastępczą sztywność Hertz'a określającą zlinearyzowaną zależność między dynamiczną siłą kontaktową i zgniotem materiału

$$F_H = k_H \delta \quad (5)$$

Sztywność zastępcza k_H jest charakterystyką liniowo-sprężystej więzi kontaktowej Hertz'a, która jest powszechnie stosowana w zagadnieniach symulacji drgań układów pociąg – tor. W ujęciu ścisłym, sztywność Hertz'a jest pochodną siły kontaktowej (3), która wynosi

$$\frac{dF_H}{d\delta} = \frac{3}{2} C_H \delta^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Po uwzględnieniu, że

$$\delta^{\frac{1}{2}} = C_H^{-\frac{1}{3}} F_H^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

co wynika bezpośrednio z zależności (3), otrzymuje się

$$\frac{dF_H}{d\delta} = \frac{3}{2} C_H^{\frac{2}{3}} F_H^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Podstawą linearyzacji zależności (3) do postaci (5) jest przyjęcie uproszczenia, że pochodna (8) jest stała, tj. nie zależy od zmian w czasie siły kontaktowej F_H , a jej wartość może być obliczona na podstawie statycznej siły nacisku koła na szynę Q_H , wokół której oscyluje dynamiczna siła kontaktowa F_H . Wynikiem tego uproszczenia jest wzór na sztywność zastępczą Hertz'a

$$k_H = \frac{3}{2} C_H^{\frac{2}{3}} Q_H^{\frac{1}{3}} = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{4Q_H E^2 \sqrt{R_{\text{rail}} R_{\text{wheel}}}}{9(1-\nu^2)^2}} = \sqrt[3]{\frac{3Q_H E^2 \sqrt{R_{\text{rail}} R_{\text{wheel}}}}{2(1-\nu^2)^2}} \quad (9)$$

podany m. in. przez Esvela [8]. Stałą Hertz'a C_H we wzorze (9) obliczono na podstawie (4) przyjmując, że promień krzywizny szyny w kierunku podłużnym jest nieskończenie duży oraz że zużycie koła prowadzi do wypłaszczenia jego profilu poprzecznego, co prowadzi do styku dwóch powierzchni walcowych o promieniach krzywizn R_{szyny} i R_{kola} , zatem $R_e = \sqrt{R_{\text{szyny}} R_{\text{kola}}}$.

Aby ustalić zakres stosowalności relacji przybliżonej (5), na rysunku 1 pokazano przykładowe wykresy zależności siły kontaktowej F_H od zgniotu materiału δ , wyznaczone według zależności nieliniowej (3) – linia ciągła i zależności zlinearyzowanej (5) – linie przerywane, przy czym w tym przypadku obliczono sztywność zastępczą Hertz'a (9) przyjmując dwie wartości nacisku statycznego: $Q_H = 138,5$ kN jak dla pociągu pasażerskiego Shin-kansen (linia ciemnoszara) i $Q_H = 250$ kN jak dla pociągu towarowego (linia jasnoszara). Można zaobserwować, że za umowną granicę $\delta = 0,3$ mm wartość siły kontaktowej F_H wyznaczonej z nieliniowej zależności (3) znacząco odbiega od rozwiązań zastępczych (5),

zatem rozwiązania zlinearyzowane są obciążone zbyt dużym błędem. Można przyjąć, że są akceptowalne poniżej granicy $\delta = 0,3$ mm, której odpowiada siła kontaktowa o wartości ok. 400 kN lub większa. Należy zauważyć, że zakres od 0 do 400 kN w zupełności pokrywa wartości sił występujących na styku koło-szyna w zagadnieniach kolejowych.

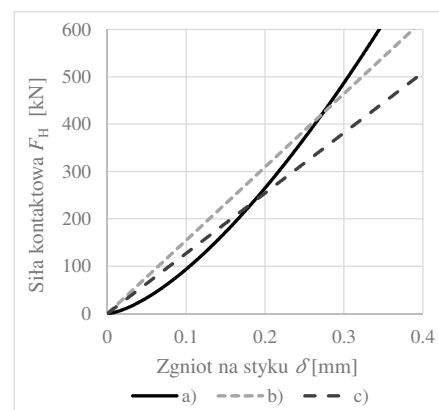
Modele kontaktu idealnie sprężystego wprowadzają pewien dodatkowy rodzaj uproszczenia. Zakładają, że proces odkształcania się ciała jest w pełni odwracalny, podczas gdy w rzeczywistości dochodzi do utraty energii, między innymi wskutek mikrotarć pomiędzy cząsteczkami w strukturze krystalicznej materiału, powstawania ciepła i hałasu. Do opisu historii wielokrotnego obciążania i odciążania materiału wykorzystuje się zjawisko histerezy. Należy tu zauważyć, że czysto-sprężyste modele więzi kontaktowej stanowią tylko niewielką grupę wśród modeli stosowanych np. w zagadnieniach MBS (eng. *Multi-Body Systems*). Skrinjar i in. [14] stwierdzili, że można wyróżnić ponad 20 modeli więzi kontaktowej, z czego większość stanowią więzi sprężysto-tłumiące, w których tłumienie jest opisane za pomocą współczynnika tłumienia histerezy χ . Mimo to, model kontaktu uwzględniający tłumienie jest rzadko stosowany w symulacjach drgań układu pociąg – tor. Jeden z nielicznych przykładów opisano w pracy Shabana i in. [15], gdzie autorzy zaproponowali wprowadzenie na styku koło – szyna więzi sprężysto-tłumiącej bazującej na modelu Lee i Wang'a [16], w którym siła kontaktowa jest przedstawiona wzorem

$$F_H = C_H \delta^{\frac{3}{2}} + D_H \dot{\delta} \quad (11)$$

gdzie

$$D_H = \chi \delta^{\frac{3}{2}} = \frac{3(1-e)}{4} \frac{C_H}{\delta_0} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

przy czym δ_0 jest początkową prędkością wgniatania koła w szynę natomiast e jest współczynnikiem restytucji, który dla małych prędkości poniżej 1 m/s nie podlega istotnej zmienności



1. Zależność siła kontaktowa - zgniot:

- a) nieliniowa – wzór (3),
b) zlinearyzowana – wzór (5), pojazd towarowy,
c) zlinearyzowana – wzór (5), pojazd pasażerski

– dla stali można przyjąć stałą wartość $e = 0,93$.

Podobną sprężysto-tłumiącą więź kontaktową zastosowali Pombo i in. [9]. Do opisu więzi wykorzystali model zaproponowany przez Lankarani i Nikravesh'a [10], który różni się od modelu Lee i Wang'a nieco innym sformułowaniem współczynnika tłumienia histerezy – współczynnik restytucji jest w nim podniesiony do kwadratu, zatem

$$D_H = \chi \delta^{\frac{3}{2}} = \frac{3(1-e^2)}{4} \frac{C_H}{\delta_0} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

a siła kontaktowa jest nadal wyrażona wzorem (11). Oznacza to, że zarówno w modelu Lee i Wang'a [13] jak i modelu Lankarani i Nikravesh'a [10] więź tłumiąca jest skojarzona z więzią sprężystą o charakterystyce nieliniowej (3).

W niniejszej pracy zaproponowano uproszczoną więź kontaktową sprężysto-tłumiącą, w której element sprężysty odpowiada zlinearyzowanej więzi sprężystej Hertz'a (5). Przyjęto, że siłę kontaktową można w tym przypadku zapisać następującą relacją

$$F_H = k_H \delta + \chi \delta \dot{\delta} = k_H \delta + \frac{3(1-e^2)}{4} \frac{k_H}{\delta_0} \delta \dot{\delta} \quad (14)$$

przez analogię do (11) i (13). Drugi składnik relacji (14) wprowadza efekt nieliniowy ze względu na obecność czynnika $\delta \dot{\delta}$. W celu uproszczenia zagadnienia zastosowano konsekwentnie założenie użyte wcześniej do linearyzacji zależności (3) i zlineary-

zowano podobnie składnik formuły (14) związany z elementem tłumiącym więzi kontaktowej, odnosząc go do maksymalnej wartości statycznej δ_0 jako wartości początkowej wokół której oscyluje dynamiczna deformacja więzi δ . To uproszczenie prowadzi do relacji liniowej

$$F_H = k_H \delta + d_H \dot{\delta} \quad \text{gdzie}$$

$$d_H = \frac{3(1-e^2)}{4} \frac{k_H}{\dot{\delta}_0} \delta_0 \quad (15)$$

która opisuje uproszczoną, sprężysto-tłumiącą więź kontaktową zaproponowaną w tej pracy.

Aby zastosować relację (15) w symulacjach sprzężonych drgań pojazdu i toru, konieczne jest określenie prędkości początkowej $\dot{\delta}_0$ wgniatania koła w szynę. Problem ten nie jest jednoznacznie rozwiązany w literaturze (Pombo i in. [9]), trudność stanowi bowiem fakt, że w każdej chwili t_i numerycznej symulacji procesu drgań zmienia się lokalizacja styku wskutek toczenia się koła po szynie. Założono w przybliżeniu, że w każdej chwili t_i powstaje nowy jednopunktowy styk między kołem i szyną oraz nowy zgniot materiału, który narasta w lokalnym czasie τ od zera do maksymalnej wartości statycznej δ_0 , na którą nakłada się zgniot dynamiczny $\delta(t)$ z prędkością $\dot{\delta}(t)$. Przyjęto, że prędkość początkowa $\dot{\delta}_0$ wgniatania koła w szynę jest prędkością w chwili τ osiągnięcia maksymalnego zgniotu statycznego δ_0 . Do wyznaczenia tej prędkości wykorzystano rozwiązanie podane w [10]

$$\dot{\delta}_0^2 = \frac{2(m_i + m_j)C_H}{m_i m_j (n+1)} \delta_0^{n+1} \quad (16)$$

wyprowadzone na podstawie równania opisującego zderzenie dwóch ciał sferycznych o masach m_i i m_j które sformułowano wychodząc z bilansu energetycznego. Energię sprężystą odkształcenia obliczono jako pracę siły kontaktowej wynikającej z teorii Hertz'a, która w przypadku ciał wykonanych ze stali jest określona wzorem (3), a wówczas $n = 3/2$. Wprowadzając za-

miast (3) zależność zlinearyzowaną (5) należy podstawić do (16) sztywność zastępczą k_H zamiast stałej Hertz'a C_H oraz $n = 1$. Uwzględniając dodatkowo, że masa szyny wraz z podłożem jest dużo większa od masy koła ($m_i \gg m_j$) otrzymuje się w przybliżeniu

$$\dot{\delta}_0^2 = \frac{2(m_i + m_j)k_H}{m_i m_j (1+1)} \delta_0^{1+1} \approx \frac{k_H \delta_0^2}{m_{\text{wheel}}} \quad (17)$$

Uwzględniając na podstawie (15), że w chwili τ osiągnięcia maksymalnego zgniotu statycznego zachodzi relacja

$$Q_H = k_H \delta_0 + d_H \dot{\delta}_0 \quad (18)$$

oraz

$$\frac{d_H}{k_H} = \frac{3(1-e^2)}{4} \frac{\delta_0}{\dot{\delta}_0} \quad (19)$$

otrzymuje się

$$\dot{\delta}_0 = \frac{Q_H}{k_H} - \frac{d_H}{k_H} \dot{\delta}_0 = \frac{Q_H}{k_H} - \frac{3(1-e^2)}{4} \delta_0 \quad (20)$$

a stąd

$$\dot{\delta}_0 = \frac{4}{7-3e^2} \frac{Q_H}{k_H} \quad (21)$$

Przyjmując dla stali współczynnik restytucji równy $e = 0,93$, można założyć w przybliżeniu, że zgniot początkowy (maksymalny statyczny) wynosi $\delta_0 = 0,908 Q_H / k_H$.

Algorytm symulacji drgań

Założenia wstępne

Do symulacji pionowych drgań toru zastosowano algorytm obliczeniowy opisany w pracy [17], bazujący na metodzie elementów skończonych sformułowanej w ujęciu Galerkina i odnoszący się do płaskiego modelu obliczeniowego układu pociąg – tor

(rysunek 2). Wprowadzono stosowne modyfikacje algorytmu, umożliwiające alternatywne uwzględnienie więzi kontaktowych typu Hertz'a – z tłumieniem i bez tłumienia.

Ze względu na wymogi metody przyjęto, że odkształcalny odcinek toru ma skończoną długość a poza tym odcinkiem tor jest nieodkształcalny. Odkształcalny odcinek toru L podzielono na dwa odcinki L_1 i L_2 różniące się istotnie parametrami podłoża, wskutek czego na styku tych odcinków pojawia się nierówność progowa.

Tor jest w tym modelu belką Eulera – Bernoulliego spoczywającą na podłożu sprężystym Winklera z tłumieniem, a pojazdy kolejowe są układami dynamicznymi o dziesięciu stopniach swobody. Tor jest obciążony zmiennymi w czasie naciskami zestawów kołowych $R_j(t)$, które są równocześnie reakcjami więzi kontaktowych. Położenie zestawu kołowego o numerze j w chwili t opisuje współrzędna $s_j(t) = vt - d_j$, gdzie v jest stałą prędkością jazdy pociągu.

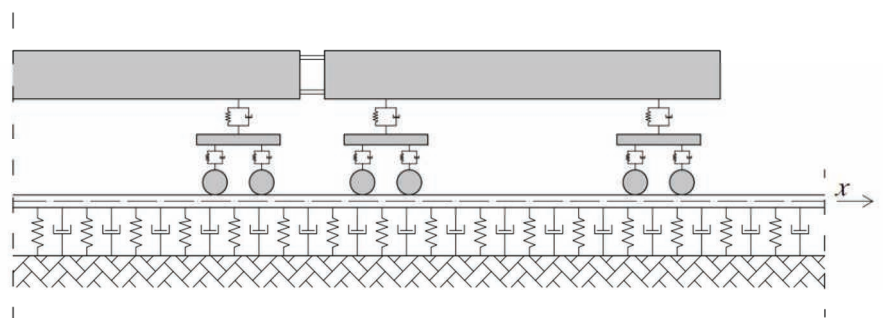
Interakcję pomiędzy dwoma sprzężonymi podukładami dynamicznymi: torem i pociągiem zapewniają więzi kontaktowe przyjęte alternatywnie jako:

- dwustronne, zlinearyzowane więzi typu Hertz'a, idealnie sprężyste (jak w pracy [17]), wówczas

$$R_j(t) = Q_j + k_{Hj}[V_j(t) - W_j(t)] \quad (22)$$

- dwustronne, zlinearyzowane więzi typu Hertz'a, sprężysto-tłumiące, gdzie

$$R_j(t) = Q_j + k_{Hj}[V_j(t) - W_j(t)] +$$



2. Schemat układu pociąg – tor

$$+d_{Hj}[\dot{V}_j(t)-\dot{W}_j(t)] \quad (23)$$

przy czym Q_j jest tu statycznym naciśnięciem j -tego zestawu kołowego, $V_j(t)$ jest pionowym przemieszczeniem tego zestawu a $W_j(t)$ przemieszczeniem toru w punkcie kontaktu. Sztywność i parametr tłumienia więzi kontaktowej wynikają z równoległego połączenia dwóch więzi wprowadzonych na styku każdego koła zestawu z szyną, stąd $k_{Hj}=2k_H$, $d_{Hj}=2d_H$, przy czym we wzorach (9) i (15) należy podstawić: $Q_H=Q/2$.

Ogólna postać równań ruchu układu pociąg – tor

Pionowe drgania toru $w(x, t)$ są opisane równaniem różniczkowym o znanej postaci

$$EJ \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + kw(x, t) + c \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = \sum_{j=1}^N R_j(t) \delta(x - s_j) \quad (24)$$

Równanie to przekształcono na układ równań różniczkowych zwyczajnych stosując metodę elementów skończonych (w ujęciu Galerkin), która pozwala łatwo uwzględnić różne wartości parametrów podłoża toru (k i c) na odcinkach L_1 i L_2 . Układ równań zapisany w notacji macierzowej ma następującą postać ogólną

$$\mathbf{B}_{tt} \ddot{\mathbf{q}}_t(t) + \mathbf{C}_{tt} \dot{\mathbf{q}}_t(t) + \mathbf{K}_{tt} \mathbf{q}_t(t) = \tilde{\mathbf{F}}_t(t) \quad (25)$$

Układ równań, które opisują drgania zespołu pojazdów tworzących pociąg

$$\mathbf{B}_{vv} \ddot{\mathbf{q}}_v(t) + \mathbf{C}_{vv} \dot{\mathbf{q}}_v(t) + \mathbf{K}_{vv} \mathbf{q}_v(t) = \tilde{\mathbf{F}}_v(t) \quad (26)$$

wyprowadzono metodologią typową dla układów dyskretnych, tj. na podstawie bilansu energetycznego i równań Lagrange'a. Aby ułatwić zapis matematyczny sprzężenia równań (25) i (26), równania tworzące układ (25) tak uszeregowano, że wektor przemieszczeń odpowiadających stopniom swobody pojazdów dzieli

się na dwa bloki: $\mathbf{q}_v = \text{col}(\mathbf{r}, \mathbf{V}_c)$. Symbol „col” oznacza w tym zapisie macierz kolumnową, wektor $\mathbf{r}$ odpowiada wewnętrznym stopniom swobody pojazdów a wektor $\mathbf{V}_c = [V_1, V_2, \dots, V_N]^T$ zawiera pionowe przemieszczenia kolejnych zestawów kołowych. Adekwatnie do podziału blokowego wektora $\mathbf{q}_v$ dzielą się na bloki wszystkie macierze występujące w równaniu (26) oraz wektor obciążeń $\tilde{\mathbf{F}}_v(t)$.

Przemieszczenia względne więzi kontaktowych wynoszą $V_j(t) - W_j(t)$, co można zapisać łącznie wzorem $\mathbf{V}_c - \mathbf{W}_c$, gdzie $\mathbf{W}_c = [W_1, W_2, \dots, W_N]^T$, przy czym łątwo jest zauważyć, że $W_j(t) = w(s_j, t)$. W przypadku idealnie sprężystych więzi Hertz'a (por. (22)), wektory prawych stron równań (25) i (26) mają po wykonaniu obliczeń następującą postać ogólną

$$\tilde{\mathbf{F}}_t = \tilde{\mathbf{F}}_Q + \tilde{\mathbf{K}}_{tc} \mathbf{V}_c - \tilde{\mathbf{K}}_{tt} \mathbf{q}_t \quad (27)$$

$$\tilde{\mathbf{F}}_v = \begin{bmatrix} \emptyset \\ \tilde{\mathbf{K}}_{ct} \mathbf{q}_t - \{k_H\} \mathbf{V}_c \end{bmatrix} \quad (28)$$

która ujawnia sprzężenie drgań pociągu i toru.

Po podstawieniu (27) i (28) odpowiednio do równań (25) i (26), i po uwzględnieniu zmiany kolejności tych równań oraz wewnętrznej struktury wektora $\mathbf{q}_v$, otrzymuje się ostatecznie równanie macierzowe o strukturze blokowej, które opisuje drgania układu pociąg – tor

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{tt} & \mathbf{B}_{tc} & \emptyset \\ \mathbf{B}_{ct} & \mathbf{B}_{cc} & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \mathbf{B}_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\mathbf{V}}_c \\ \ddot{\mathbf{q}}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{tt} & \mathbf{C}_{tc} & \emptyset \\ \mathbf{C}_{ct} & \mathbf{C}_{cc} & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \mathbf{C}_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}} \\ \dot{\mathbf{V}}_c \\ \dot{\mathbf{q}}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{tt} & \mathbf{K}_{tc} & \emptyset \\ \mathbf{K}_{ct} & \mathbf{K}_{cc} + \{k_H\} & -\tilde{\mathbf{K}}_{ct} \\ \emptyset & -\tilde{\mathbf{K}}_{tc} & \mathbf{K}_{tt} + \tilde{\mathbf{K}}_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{V}_c \\ \mathbf{q}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \emptyset \\ \emptyset \\ \tilde{\mathbf{F}}_Q \end{bmatrix} \quad (29)$$

W przypadku, gdy modelem kontaktu jest zlinearyzowana więź typu Hertz'a z tłumieniem histerezy, opisana wzorami (15) i (23), do wyznaczenia wektorów obciążeń uogólnionych $\tilde{\mathbf{F}}_t$ i $\tilde{\mathbf{F}}_v$ konieczne jest obliczenie prędkości przemieszczenia toru, które śledzi położenie j -tego zestawu kołowego,

zmieniające się w czasie. Zgodnie z ideą metody elementów skończonych, przemieszczenie śledzące jest zapisane wzorem

$$W_j(t) = w(s_j, t) = \sum_{e=1}^n \mathbf{N}_e^T(\xi_j) \mathbf{W}_e(t) \quad (30)$$

gdzie $\mathbf{W}_e$ jest wektorem przemieszczeń brzegowych elementu skończonego e o długości l , $\mathbf{N}_e$ jest wektorem funkcji kształtu, $\xi_j = (s_j - l(e-1))/l$. Funkcje kształtu $\mathbf{N}_e$ są niezerowe tylko w obrębie elementu e , ponadto $\xi_j = \xi_j(t)$ ponieważ $s_j = vt - d_j$. Wynika stąd, że

$$\dot{W}_j(t) = \dot{w}(s_j, t) = \sum_{e=1}^n \frac{v}{l} \mathbf{N}_e^T(\xi_j) \mathbf{W}_e(t) + \sum_{e=1}^n \mathbf{N}_e^T(\xi_j) \dot{\mathbf{W}}_e(t) \quad (31)$$

gdzie $(\cdot)' = d/d\xi$. Po wykonaniu szczególnych obliczeń otrzymuje się

$$\tilde{\mathbf{F}}_t = \tilde{\mathbf{F}}_Q + \tilde{\mathbf{K}}_{tc} \mathbf{V}_c - (\tilde{\mathbf{K}}_{tt} + \tilde{\mathbf{K}}_{tt}^{\text{ch}}) \mathbf{q}_t + \tilde{\mathbf{C}}_{tc} \dot{\mathbf{V}}_c - \tilde{\mathbf{C}}_{tt} \dot{\mathbf{q}}_t \quad (32)$$

$$\tilde{\mathbf{F}}_v = \begin{bmatrix} \emptyset \\ \tilde{\mathbf{K}}_{ct} \mathbf{q}_t - \{k_H\} \mathbf{V}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset \\ -\{d_H\} \dot{\mathbf{V}}_c + \tilde{\mathbf{K}}_{ct}^{\text{ch}} \mathbf{q}_t + \tilde{\mathbf{C}}_{ct} \dot{\mathbf{q}}_t \end{bmatrix} \quad (33)$$

co prowadzi do układu równań ruchu

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{tt} & \mathbf{B}_{tc} & \emptyset \\ \mathbf{B}_{ct} & \mathbf{B}_{cc} & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \mathbf{B}_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\mathbf{V}}_c \\ \ddot{\mathbf{q}}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{tt} & \mathbf{C}_{tc} & \emptyset \\ \mathbf{C}_{ct} & \mathbf{C}_{cc} + \{D_H\} & -\tilde{\mathbf{C}}_{ct} \\ \emptyset & -\tilde{\mathbf{C}}_{tc} & \mathbf{C}_{tt} + \tilde{\mathbf{C}}_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}} \\ \dot{\mathbf{V}}_c \\ \dot{\mathbf{q}}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{tt} & \mathbf{K}_{tc} & \emptyset \\ \mathbf{K}_{ct} & \mathbf{K}_{cc} + \{k_H\} & -\tilde{\mathbf{K}}_{ct} - \tilde{\mathbf{K}}_{ct}^{\text{ch}} \\ \emptyset & -\tilde{\mathbf{K}}_{tc} & \mathbf{K}_{tt} + \tilde{\mathbf{K}}_{tt} + \tilde{\mathbf{K}}_{tt}^{\text{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{V}_c \\ \mathbf{q}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \emptyset \\ \emptyset \\ \tilde{\mathbf{F}}_Q \end{bmatrix} \quad (34)$$

W obu rozważanych przypadkach więzi kontaktowych, rozwiązanie równań ruchu otrzymuje się za pomocą klasycznego rekurencyjnego schematu całkowania numerycznego, np. jedną z metod β -Nemarka.

Symulacje drgań układu pociąg-tor

Na podstawie otrzymanych równań ruchu (29) i (34) opracowano autorski program symulacji drgań w środowisku

Tab. 1. Parametry wejściowe

Parametr	Wartość
Prędkość przejazdu	60 m/s
Czas retardacji (dot. materiału szyny)	$2,1 \cdot 10^{-5}$ s
Szyna	60E1
Współczynnik sprężystości podłoża 1	$1,3 \cdot 10^8$ N/m ²
Współczynnik sprężystości podłoża 2	$7,5 \cdot 10^8$ N/m ²
Tłumienie podłoża	$2,8667 \cdot 10^5$ Ns/m
Masa nadwozia	36000 kg
Masa wózka	4950 kg
Masa zestawu kołowego	2400 kg
Moment bezwładności obrotowej masy nadwozia	1894000 kgm ²
Moment bezwładności obrotowej masy wózka jeźdnego	6150 kgm ²
Połowa odległości pomiędzy osiami wózków	8,75 m
Połowa odległości pomiędzy zestawami kołowymi w wózku jeźdnym	1,25 m
Tłumienie dolnego zawieszenia pojazdu	$2 \cdot 9815$ Ns/m
Tłumienie górnego zawieszenia pojazdu	$2 \cdot 21675$ Ns/m
Sztywność dolnego zawieszenia pojazdu	$2 \cdot 1270000$ N/m
Sztywność górnego zawieszenia pojazdu	$2 \cdot 443500$ N/m
Promień koła pojazdu	0,46 m
Promień szyny w punkcie kontaktu	0,3 m

sku obliczeniowym Python 3. Całkowanie równań po czasie wykonano metodą Newmarka – Wilsona z parametrem $\beta=1/4$, krok czasowy przyjęto $\Delta t=0,0001$ s. Do dyskretyzacji toru zastosowano elementy skończone o długości 0,5 m. Przejazd pociągu złożonego z trzech wagonów odbywa się po 100-tu metrowym odcinku toru, w którego środku przewidziano nierówność progową wynikającą ze skokowej zmiany sztywności powierzchniowej podłoża toru: z $5 \cdot 10^7$ kN/m³ do $25 \cdot 10^7$ kN/m³. Współczynniki sprężystości podłoża belki modelującej tor obliczono przyjmując szerokość oparcia równą długości podkładu kolejowego 2,6 m. Pozostałe parametry przyjęte do obliczeń są zestawione w tabeli 1, przy czym dane dotyczące pojazdu zaczerpnięto z monografii Klasztornego [18].

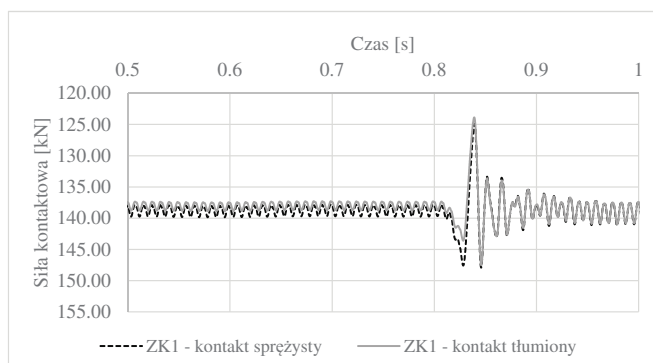
Celem przeprowadzonej analizy numerycznej było porównanie wyni-

ków symulacji drgań układu pociąg – tor, uzyskanych przy zastosowaniu dwóch różnych modeli więzi kontaktowej na styku koła z szyną. Wzbudzeniem drgań pojazdu a stąd i toru kolejowego jest wjazd pojazdu z odcinka toru nieodkształcalnego na odcinek odkształcalny, a następnie przejazd przez nierówność progową toru z prędkością 60 m/s (216 km/h). Pokazane na rysunkach 3-7 wyniki symulacji są fragmentami przebiegów czasowych wybranych odpowiedzi układu pociąg – tor, które ilustrują efekt dynamiczny spowodowany nierównością progową toru.

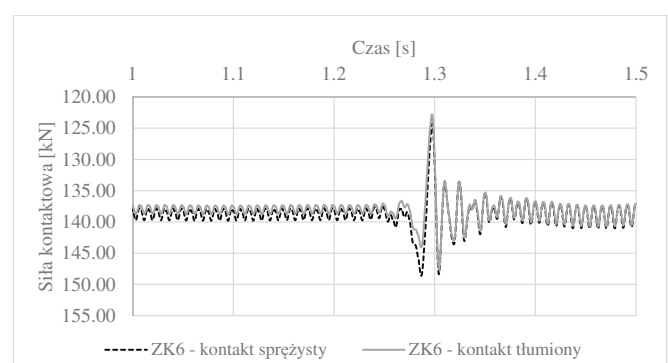
Na rysunku 3 przedstawiono dwa wykresy zmian w czasie siły kontaktowej między pierwszym zestawem kołowym i torem. Analogiczne wyniki odnoszące się do szóstego zestawu kołowego pokazano na rysunku 4. W obu przypadkach siła kontaktowa oscyluje wokół siły nacisku statycz-

nego, która wynosi 138,5 kN. Dynamiczny efekt progowy manifestuje się tu trzema dużymi pikami, następnie oscylacje siły kontaktowej maleją. Za miarę efektu progowego można przyjąć wartość piku siły kontaktowej odniesioną do nacisku statycznego i wyrażoną w procentach. Wówczas, w przypadku sprężystej więzi kontaktowej i pierwszego zestawu kołowego kolejne piki wynoszą: 106%, 90% i 107%, a w przypadku więzi sprężysto-tłumiącej: 104%, 89% i 106,5%. Podobne wyniki otrzymuje się dla szóstego zestawu kołowego. Wynika stąd, że zastosowanie sprężysto-tłumiącej więzi kontaktowej zamiast klasycznej więzi idealnie sprężystej, równoznaczne z uwzględnieniem tłumienia w strefie kontaktu koło – szyna, powoduje zmniejszenie pików przyrostowych (pierwszego i trzeciego) siły kontaktowej, występujących po przejeździe zestawu kołowego przez nierówność progową. Efekt ten jest wyraźnie widoczny w przypadku pierwszego piku siły, natomiast słabo manifestuje się w pikach następnych.

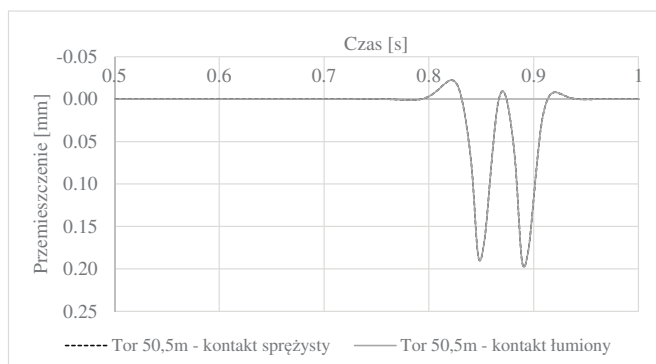
Warto zauważyć, że zarówno pierwszy jak i trzeci pik jest zwiększeniem siły kontaktowej, niekorzystnym z uwagi na stan wyężenia toru (piki przyrostowe). Z tego punktu widzenia, uproszczenie modelu kontaktowego do więzi idealnie sprężystej jest rozwiązaniem konserwatywnym, ponieważ daje zawyżone wyniki. Odwrotnie jest w przypadku drugiego piku, któremu odpowiada zmniejszenie siły kontaktowej, a zatem i siły nacisku na tor. Można sądzić, że ze wzrostem prędkości jazdy wartość piku będzie rosła, co w skrajnej sytuacji może doprowadzić do utraty kontaktu koło –



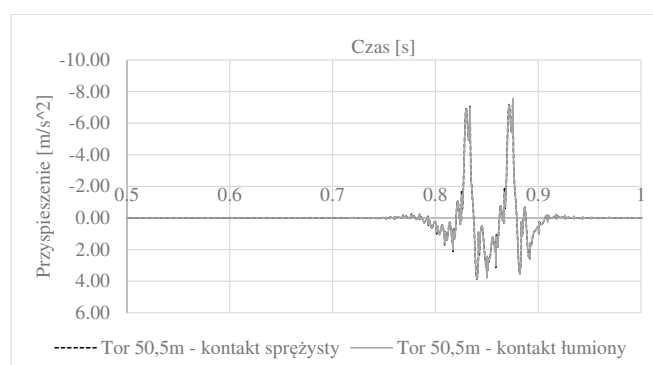
3. Siła w więzi kontaktowej zestawu kołowego nr 1



4. Siła w więzi kontaktowej zestawu kołowego nr 6



5. Przesunięcie toru w przekroju położonym bezpośrednio za nierównością progową



6. Przyspieszenie drgań toru w przekroju położonym bezpośrednio za nierównością progową

szyna. W tym aspekcie, zastosowanie uproszczonego modelu kontaktu nie jest korzystne, ponieważ zaniża efekt progowy.

Na kolejnych trzech rysunkach pokazano fragmenty wygenerowanych przebiegów drgań i przyspieszenia drgań toru zaraz za nierównością progową (rysunki 5 i 6) oraz przyspieszenia drgań pierwszego zestawu kołowego (rysunek 7). Jak wynika z przedstawionych wykresów, wpływ tłumienia w strefie kontaktu jest praktycznie niewidoczny przy założonej prędkości jazdy pociągu (60 m/s). Należy podkreślić, że wyniki drgań toru pokazywane z punktu widzenia obserwatora nieruchomego, tj. w konkretnym przekroju toru, nie pozwalają na analizę efektu progowego (rysunki 5 i 6). Należałoby je porównać z symulacjami przejazdu pociągu przez tor pozbawiony nierówności progowej i wykonać obliczenia co najmniej dla kilku następujących po sobie przekrojów. Jest to podejście nieefektywne. Lepszą alternatywą byłaby obserwacja drgań z pozycji obserwatora ruchomego, czyli analiza drgań w przekroju

kontaktowym toru. Taką „śledzącą” odpowiedź jest z natury rzeczy przebieg drgań zestawu kołowego (rysunek 7). Warto zauważyć, że także w tym przypadku zastosowanie więzi sprężysto-tłumiącej nie ma zauważalnego wpływu na wyniki symulacji.

Na rysunku 7 jest wyraźnie widoczny efekt progowy w przyspieszeniach drgań zestawu kołowego. Największy pik przyspieszenia jest skojarzony z największym (drugim) pikiem siły kontaktowej (rysunek 3). Pionowy ruch zestawu kołowego z dodatnim przyspieszeniem skutkuje przeciwnie skierowaną siłą bezwładności, która redukuje statyczną siłę nacisku na tor w rozważanym przypadku do ok. 90%. Podkreślić należy, że ta obserwacja potwierdza prawidłowe funkcjonowanie opracowanego algorytmu i oprogramowania – zgodne z intuicją i doświadczeniem.

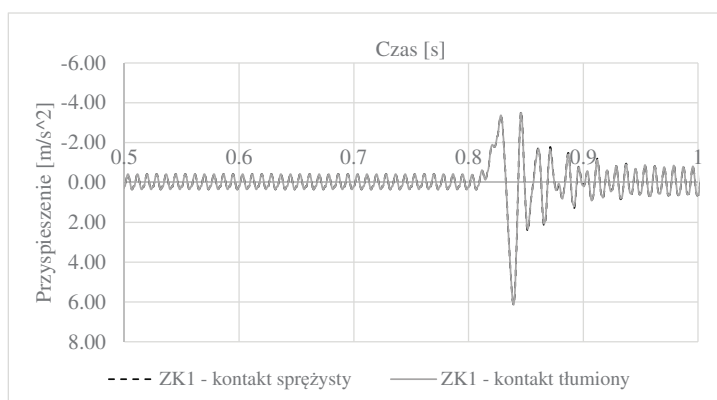
Wnioski generalne

Na podstawie wykonanych analiz numerycznych można postawić tezę, że zastosowanie modelu kontaktowego

koło – szyna wzbogaconego o tłumienie histerezy jest sensowne wtedy, gdy badania są ukierunkowane na stan wyężenia toru, a idąc dalej – na efekty zmęczeniowe w torze i pojeździe kolejowym. Wynika to z faktu, że tłumienie na kontakcie koło-szyna wpływa istotnie na siłę kontaktową, która jest równocześnie siłą obciążającą tor i pojazd. W analizach stanu wyężenia i analizach zmęczeniowych, jeśli mają odnosić się do kolei dużych prędkości, wskazane jest równocześnie uwzględnienie jednostronnej pracy więzi kontaktowych, aby opisać sytuację utraty kontaktu obserwowane w praktyce eksploatacyjnej. Pokazano, że pominięcie tłumienia w strefie kontaktu zaburza prawidłową identyfikację zjawiska utraty kontaktu. Zaniża prawdopodobieństwo wystąpienia utraty kontaktu, ponieważ niedoszacowane jest wtedy odciążenie toru (maleje pik siły kontaktowej zmniejszający nacisk statyczny). Powyższe wnioski należy traktować jako wstępne. Do ich potwierdzenia potrzebna jest znacznie obszerniejsza analiza numeryczna zawierająca badania wpływu prędkości eksploatacyjnych, w tym analiza stanu wyężenia toru bazująca na zmodyfikowanym algorytmie uwzględniającym jednostronne więzi kontaktowe.

Materiały źródłowe

- [1] Bosso N., Spiriyagin M., Gugliotta A., Somá A., Mechatronic modeling of real-time wheel-rail contact, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
- [2] Xu L., Zhai W., A three-dimensional



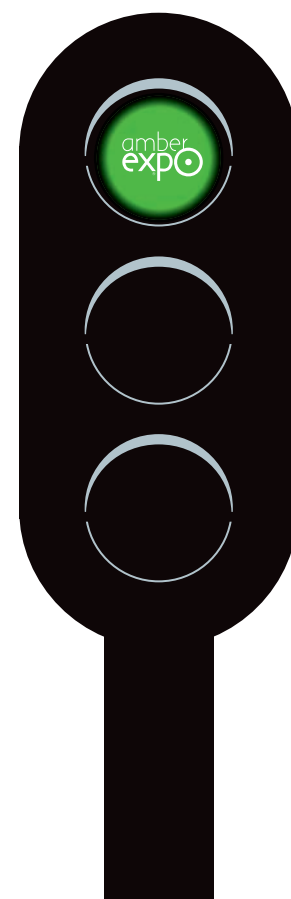
7. Przyspieszenie drgań zestawu kołowego nr 1

- model for train-track-bridge dynamic interactions with hypothesis of wheel-rail rigid contact, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 132, 471-489.
- [3] Zhai W., *Vehicle – Track coupled dynamics theory and applications*, Springer, Science Press Beijing, 2020
- [4] Zhai W., Sun X., A detailed model for investigating vertical interaction between railway vehicle and track, *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 1994, vol. 23, 603-615
- [5] Zhai W., Two simple fast integration methods for large – scale dynamic problems in engineering, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1996, vol. 39, 4199-4214
- [6] Podwórna M., Kłasztorny M., Wpływ cech pojazdów szynowych na odpowiedź dynamiczną mostu belkowego, *Drogi i Mosty*, 2011, nr. 3, 63-87.
- [7] Xu X. Y., Li Y. L., Dynamic analysis of wind-vehicle-bridge system based on rigid-flexible coupling method, *Advances in Civil, Environmental, and Materials Research* ACEM16, 28.08.2016.
- [8] Esveld C., *Modern railway track*, MRT-Productions, The Netherlands, 2014.
- [9] Pombo J., Ambrosio J., Silva M., A new wheel – rail contact model for railway dynamics, *Vehicle System Dynamics*, 2007, vol 45, 165-189.
- [10] Lankarani H., Nikravesh P., A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems, *Journal of Mechanical Design*, 1990, vol 112, 369-376.
- [11] Johnson K. L., *Contact mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- [12] Knothe K., Stichel S., *Rail vehicle dynamics*, Springer, Cham, 2017.
- [13] Sun Y.Q., Dhanasekar M., A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system, *International Journal of Solids and Structures*, 2002, vol 39, s. 1337-1359.
- [14] Skrinjar L., Slavic J., Boltezar M., A review of continuous contact – force models in multibody dynamics, *International Journal of Mechanical Science*, 2018, vol 145, 171-187.
- [15] Shabana A., Zaazaa K. Escalona J. Sany J. Development of elastic force model for wheel/rail contact problems, *Journal of Sound and Vibration*, 2004, vol 269, 295-325.
- [16] Lee T., Wang A., On the dynamics of intermittent – motion mechanisms, Part I. Dynamic model and response, *Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design – Transactions of the ASME*, 1983, vol 105, 534-540.
- [17] Bryja D., Chojnacki W., Dwustronna więź kontaktowa Hertz'a w numerycznej analizie drgań sprzężonego układu pociąg-tor, *Przegląd Komunikacyjny*, 2019, r. 74, nr 11, 2-7.
- [18] Kłasztorny M., *Dynamika mostów belkowych obciążonych pociągami szybkobieżnymi*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2005.

 14. MIĘDZYNARODOWE TARGI KOLEJOWE

TRAKO
[21–24.09.2021]
 GDAŃSK – TRAKOTARGI.PL

warto **TU** być





**WROCŁAWSKA RADA FEDERACJI STOWARZYSZEŃ
NAUKOWO - TECHNICZNYCH NOT**



INSTYTUT TECHNICZNY WOJSK LOTNICZYCH
ULEPSZAMY KAŻDĄ TECHNOLOGIĘ



Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP

Oddział we Wrocławiu



**DOLNY
ŚLĄSK**

**PATRONAT HONOROWY MARSZAŁKA WOJEWÓDZTWA
DOLNOŚLĄSKIEGO CENZAREGO PRZYBYLSKIEGO**

mają zaszczyt zaprosić
na
Konferencję Naukowo – Techniczną

**BEZZAŁOGOWE STATKI POWIETRZNE
W GOSPODARCE
WYMIAR EKONOMICZNY - STRATEGICZNY - SPOŁECZNY**

Jelenia Góra 18 – 19 listopada 2021 r.

Szanowni Państwo!

**Organizatorzy Konferencji Naukowo-Technicznej pt.:
WSPÓŁLISTNIENIE DRÓG I LOTNISK
Z INFRASTRUKTURĄ TOWARZYSZĄCĄ I OTOCZENIEM
Jelenia Góra, 20-22 października 2021 r.**

składają propozycję sponsorowania w/w konferencji wg następującego schematu:

SPONSOR GENERALNY – jedno miejsce

- przyznanie firmie tytułu SPONSOR GENERALNY – na wyłączność
- logotyp sponsora na wszystkich materiałach dotyczących konferencji, w tym na zaproszeniach oraz zamieszczanych w internecie
- wyczytanie sponsora przez prowadzącego
- przedstawienie działalności firmy (2 min.) - przez prowadzącego
- powitanie gości - krótkie przemówienie przedstawiciela sponsora
- roll-up na sali konferencyjnej i w holu
- możliwość wystąpienia z prezentacją firmy podczas konferencji (20 min. sesja do wyboru)
- stoisko o pow. 4 m kw.
- bezpłatny udział w konferencji dla 3 przedstawicieli firmy (z wyjątkiem kosztów noclegu)
- reklama na okładce wydawnictwa z referatami konferencyjnymi (A4 – kolor)

Koszt pakietu: 20 000 zł + 23% VAT

SPONSOR GŁÓWNY – trzy miejsca

- logotyp sponsora na wszystkich materiałach dotyczących konferencji, w tym na zaproszeniach oraz zamieszczanych w internecie
- wyczytanie sponsora przez prowadzącego
- roll-up na sali konferencyjnej
- możliwość wystąpienia z prezentacją firmy podczas konferencji (10 min. sesja do wyboru)
- możliwość wyłożenia materiałów promocyjnych w holu konferencji
- reklama wewnątrz wydawnictwa z referatami konferencyjnymi (A4-kolor)
- bezpłatny udział w konferencji dla 2 przedstawicieli firmy (z wyjątkiem kosztów noclegu)

Koszt pakietu: 10 000 zł + 23% VAT

SPONSOR

- logotyp sponsora na wszystkich materiałach dotyczących konferencji, w tym na zaproszeniach oraz zamieszczanych w internecie
- wyczytanie sponsora przez prowadzącego
- roll-up w sali konferencyjnej
- możliwość wyłożenia materiałów promocyjnych w holu konferencji
- bezpłatny udział w konferencji dla 1 przedstawiciela firmy (z wyjątkiem kosztów noclegu)

Koszt pakietu: 5 000 zł + 23% VAT

Realizacja sponsorowania odbywać się będzie na podstawie umowy pomiędzy organizatorem, a firmą sponsorującą.

Zgłoszenia: wroclaw@sitkrp.org.pl

Informacje, negocjacje: Wiesław Murawski, tel. 71 343 18 74, kom. 535 799 133

Z poważaniem:

Prezes Zarządu Wrocławskiego Oddziału SITK RP
Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego Konferencji
/-/ dr hab. inż. Marek Krużyński
Wrocław, marzec 2020 r.



Stowarzyszenie Inżynierów
i Techników Komunikacji RP
Oddział we Wrocławiu



Generalna Dyrekcja
Dróg Krajowych i Autostrad



INSTYTUT TECHNICZNY WOJSK LOTNICZYCH
ULEPSZAMY KAŻDĄ TECHNOLOGIĘ



Politechnika
Wrocławska

Wspomnienie o Stefanie Sarnie



Stefan Sarna zmarł 16 kwietnia 2021 r. - mgr inż. budownictwa drogowego, wybitny ekspert w dziedzinie transportu, szczególnie rozbudowy i modernizacji transportu publicznego w Warszawie i na Mazowszu. Znaczący jest Jego wkład w pogłębianiu wiedzy fachowej kadr inżynierskich poprzez organizację licznych konferencji i seminariów branżowych. Pełniąc przez okres 12 lat funkcję Redaktora Naczelnego miesięcznika „Transport Miejski” przyczynił się do upowszechniania wiedzy inżynierskiej.

Od czasów studiów na Politechnice Warszawskiej był zaangażowany w działalność Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP (SITK RP). W uznaniu swoich dokonań otrzymał godność Członka Honorowego SITK RP. Dwukrotnie był wyróżniony nagrodą stowarzyszeniową „ERNEST” za działalność na rzecz Stowarzyszenia i transportu: w 2006 r. w kategorii „Najaktywniejszy w dziedzinie transportu” oraz w 2020 r. „Za całokształt działalności”.

Żegnając Go w imieniu Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP. podczas ceremonii pogrzebowej, Andrzej Gołaszewski – Prezes Honorowy Senior SITK RP powiedział:

Dopiero żałobne spotkanie po stracie bliskiej, drogiej i ważnej dla nas osoby stwarza możliwość obiektywnego jej oceny i scharakteryzowania – zdania sobie sprawy z tego, co dla nas znaczyła.

Dziś tu zgromadzeni żegnamy wielce zasłużonego dla naszego środowiska – inżynierów i techników komunikacji – wieloletniego działacza, Członka Honorowego Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Prezesa Oddziału Warszawskiego SITK RP

mgr inż. Stefana Sarnę

Swoje inżynierskie talenty wykazał już pisząc pracę dyplomową na Politechnice Warszawskiej, która w 1970 r. została nagrodzona na konkursie zorganizowanym przez Prezydium miasta stołecznego Warszawy. Potwierdził następnie te talenty pracując na Politechnice Warszawskiej, w Biurze Planowania Rozwoju Warszawy będąc kierownikiem pracowni, Agencji Budowy i Eksploatacji Autostad, firmach consultingowych i podczas samodzielnej działalności gospodarczej. Praca ta stała się podstawą powszechnego uznania Go wybitnym ekspertem w dziedzinie kształtowania nowoczesnych miejskich systemów transportowych.

Zebraną wiedzę opublikował w opracowaniach na temat:

- projektowania węzłów przesiadkowych,
- stworzenia elektronicznego banku danych z zakresu inżynierii ruchu w mieście,
- planowania systemów transportowych w miastach.

O wartości tych opracowań niech świadczy to, że w latach: 1976, 1982, 1989 i 1992 były nagradzane przez Ministrów: Nauki, Administracji, Gospodarki Przestrzennej i Ochrony Środowiska oraz Transportu.

Stefan Sarna gorliwie inicjował i popularyzował nowatorskie rozwiązania w transporcie miejskim organizując – w ramach działalności Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP – konferencje, seminaria i ciesząc się nieustannie znaczną frekwencją Warszawskie Forum Komunikacyjne.

Przez 12 lat był redaktorem naczelnym czasopisma „Transport Miejski”, wydawanego przez SITK. Swą działalnością oraz szlachetnymi cechami charakteru zdobył ogromny autorytet w środowisku inżynierskim.

Przez 4 lata był Wiceprezesem Oddziału Warszawskiego SITK, a od 2014 r. do dnia śmierci jego Prezesem, ale przede wszystkim był wspianym, niezapomnianym Kolegą.

Posiadał wiele odznaczeń państwowych, resortowych oraz stowarzyszeniowych.

Dziś, po Jego niespodziewanej, nagłej śmierci czujemy się przygnębieni i bezradni. Pocięchą dla nas i jego zrozpaczonej Rodziny może być świadomość, że odczuwany dziś ból i żal upływ czasu będzie zamieniał w długo pielęgowaną życzliwą pamięć o Nim.

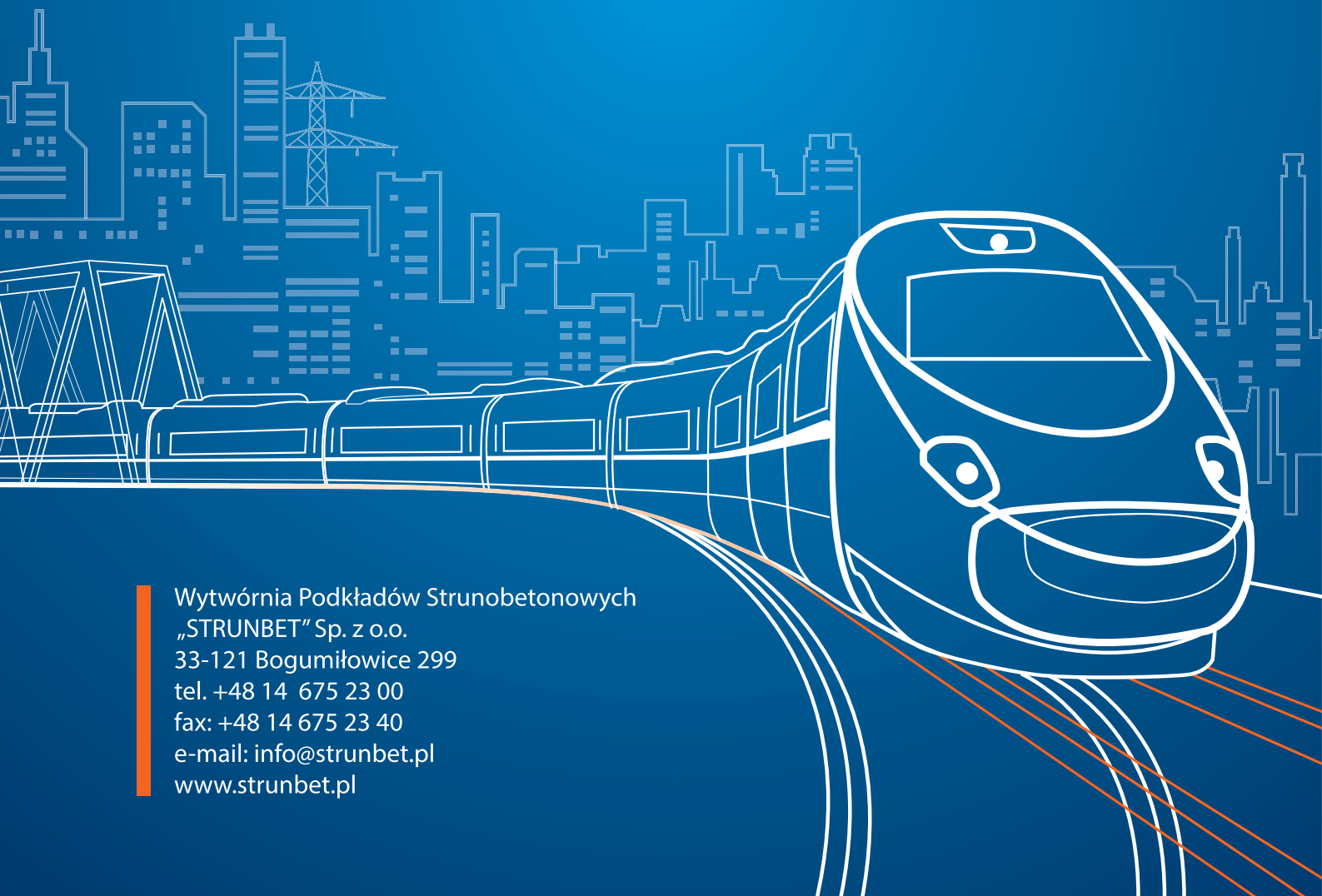
W imieniu Prezesa Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP – prof. Janusza Dyducha, Zarządu Krajowego, Rady Prezesów, Zarządu Oddziału Warszawskiego SITK RP, całego Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP żegnaj Cię Drogi Kolego. Zachowamy wdzięczną pamięć o Tobie i Twoich inżynierskich dokonaniach.

Cześć Jego Pamięci



Wytwórnia Podkładów Strunobetonowych STRUNBET Sp. z o.o.

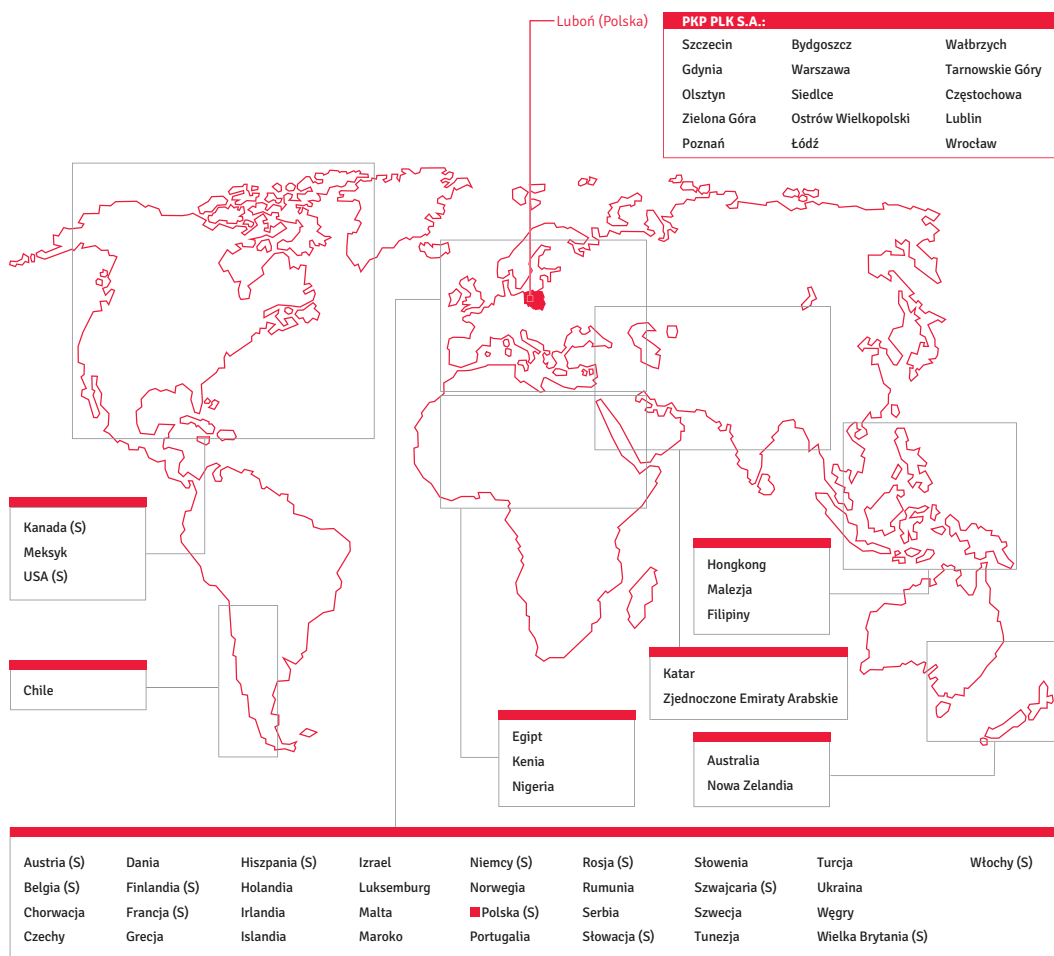
- Podroczajdnice strunobetonowe
- Podkłady kolejowe strunobetonowe
- Podkłady tramwajowe strunobetonowe
- Podkłady podsuwnicowe PS-D-N i PS-D-W
- Podkłady wzdłużne tramwajowe
- Płyty żelbetowe



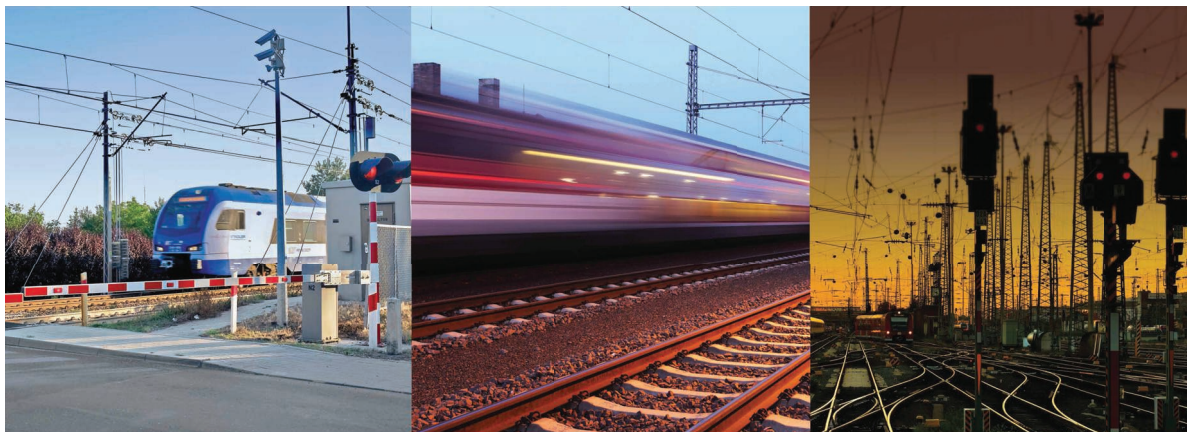
Wytwórnia Podkładów Strunobetonowych
„STRUNBET” Sp. z o.o.
33-121 Bogumiłowice 299
tel. +48 14 675 23 00
fax: +48 14 675 23 40
e-mail: info@strunbet.pl
www.strunbet.pl

PONAD 140 LAT

tradycji i doświadczenia w dostarczaniu
kompleksowych rozwiązań systemowych dla kolei



S = Spółka córka



www.scheidt-bachmann.pl
sbp@scheidt-bachmann.pl

TOROMIERZ INERCYJNY iTEC

Dokładny pomiar strzałek



www.graw.com

REKLAMA



CZAS NA INNOWACYJNE BUDOWNICTWO

Oferujemy profesjonalne usługi z zakresu:

- budowy infrastruktury komunikacyjnej, sieci instalacyjnych i obiektów hydrotechnicznych,
- wykonywania pomiarów geodezyjnych, tworzenia map do celów projektowych, wytyczenia budynku i sieci.



W BUDOWNICTWIE WYBIERZ FIRME,
KTÓREJ MOŻESZ ZAUFAĆ

Zobacz, co już wybudowaliśmy
i dla kogo pracowaliśmy:
www.gm-roads.pl

Biuro:

ul. Krzemieniecka 47,
54-613 Wrocław

Budownictwo inżynieryjne:

tel.: (71) 300 12 40
e-mail: info@gm-roads.pl

Geodezja:

tel.: 697 660 932
e-mail: m.wozniak@gm-roads.com

Siedziba firmy:

ul. Wrocławska 41, Łańcuch
58-130 Żarów



REKMA Sp. z o.o.

ul. Szlachecka 7

32-080 Brzezie

tel. +48 12/633 59 22

fax +48 12/397 52 20

www.rekma.pl

- Dylatacje bitumiczne EDM typ Rekma
- Dylatacje mechaniczno-asfaltowe
SILENT-JOINT^{RESA}
- Szczeliny dylatacyjne w nawierzchniach betonowych i asfaltowych
- Naprawa spękań nawierzchni
- Specjalistyczne cięcie nawierzchni betonowych i asfaltowych
- Wypełnianie szczelin dylatacyjnych w torowiskach tramwajowych
- Natrysk środkami hydrofobowymi i hydrofilowymi
- Rowkowanie (grooving) nawierzchni
- Specjalistyczne wiercenie otworów pod kotwy i dyble
- Kruszenie nawierzchni betonowych metodą ultradźwiękową – RMI



SPECJALISTYCZNE PRACE DROGOWE

Największy projekt inwestycyjny Szybkiej Kolei Miejskiej

Zakup pojazdów IMPULS 2

21 x 

liczba pojazdów

668 MLN PLN 

wartość inwestycji

czerwiec
2022 

w rozkładzie jazdy od

newac
GROUP

producent



dostęp do Wi-Fi



ładowarki USB



defibrylatory AED



przestrzeń na wózek, bagaż, rower



SMCV

SYSTEM POMIARU OBCIĄŻEŃ PIONOWYCH

System wagowy umożliwiający przeprowadzanie pomiaru obciążenia pionowego wywieranego przez każde pojedyncze koło taboru jadącego po torze z zainstalowanymi urządzeniami pomiarowymi.

Celem systemu jest monitorowanie taboru przejeżdżającego na określonym odcinku linii lub wyjeżdżającego ze stacji. Umożliwia to wskazanie przypadków nadmiernego i/lub dysproporcjonalnego obciążenia pionowego oraz ocenę geometrii kół.

SMCV to gwarancja kontroli jakości i zwiększenia bezpieczeństwa w kolejowych przewozach ładunków.

TransComfort
Bezpieczeństwo i wygoda w ruchu

MMR
TRADING POLSKA

TransComfort
ul. Hutnicza 25 DE, 81-061 Gdynia

T: 58 627 49 27
biuro@transcomfort.pl

transcomfort.pl