

# przeгляд

10  
2019  
rocznik LXXIV  
cena 25,00 zł  
w tym 5% VAT



# komunikacyjny

UKAZUJE SIĘ OD 1945 ROKU



## Dynamika obiektów infrastruktury transportowej

eISSN  
2544-6037

ISSN  
0033-22-32

Analiza układów geometrycznych torów tramwajowych w oparciu o metodę bazy sztywnej wagonu. Wpływ sposobu odwzorowania pojazdu szynowego na odpowiedź dynamiczną przęśla mostowego. Analiza kolejowej dostępności komunikacyjnej do uzdrowisk województw dolnośląskiego i małopolskiego. Materiały niebezpieczne w przewozach intermodalnych

# Wpływ sposobu odwzorowania pojazdu szynowego na odpowiedź dynamiczną przęsła mostowego

## The influence of railway vehicle modeling approach on the dynamic response of a bridge span



**Marek Szafranski**

Dr inż.

Politechnika Gdańska, Wydział  
Inżynierii Lądowej i Środowiska,  
Katedra Transportu Szynowego  
i Mostów

mszafran@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono rezultaty analiz numerycznych oraz badań eksploatacyjnych dwóch przęseł mostowych wymuszonych ruchomym pojazdem szynowym. Pojazd odwzorowano za pomocą czterech modeli uproszczonych: strumienia sił skupionych, strumienia mas skupionych oraz strumieni oscylatorów jedno- i dwumasowych. Analizy numeryczne wykonano przy wykorzystaniu MES. Potrzebne parametry dynamiczne wyznaczono na podstawie wyników identyfikacji modalnej konstrukcji rzeczywistych – jednostki trakcyjnej serii EN57 oraz stalowych przęseł mostowych o rozpiętościach 10 i 30 m. W rezultacie, wyniki symulacji numerycznych w zakresie przemieszczeń oraz przyspieszeń pionowych przęseł odniesiono do wyników badań in-situ przeprowadzonych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Dokonano jakościowego oraz ilościowego porównania uzyskanych rozwiązań dla wszystkich analizowanych modeli obciążenia i konstrukcji w zakresie drgań wymuszonych.

**Słowa kluczowe:** Mosty kolejowe; Obciążenia kolejowe; Interakcja dynamiczna pojazd-przęsło

**Abstract:** The paper presents the results of numerical analysis and in-situ measurements of two railway bridge spans subjected to an action of moving vehicles. The railway vehicle is introduced using four simplified load models: series of concentrated forces, series of lumped masses and series of single-mass and two-mass oscillators. Numerical simulations are performed using FE method. The dynamic parameters of the vehicle and the bridge models are determined on the basis of modal identification results of existing structures – EN57 traction unit and steel bridges of 10 and 30 m theoretical span length. The vertical displacements and accelerations of the mid-span are analysed. The numerical results are referred to the results of in-situ measurements performed under operating conditions. A qualitative and quantitative comparison is made for all load models and bridge spans under analysis in the forced vibration range.

**Keywords:** Railway bridges; Railway loads; Vehicle-bridge dynamic interaction

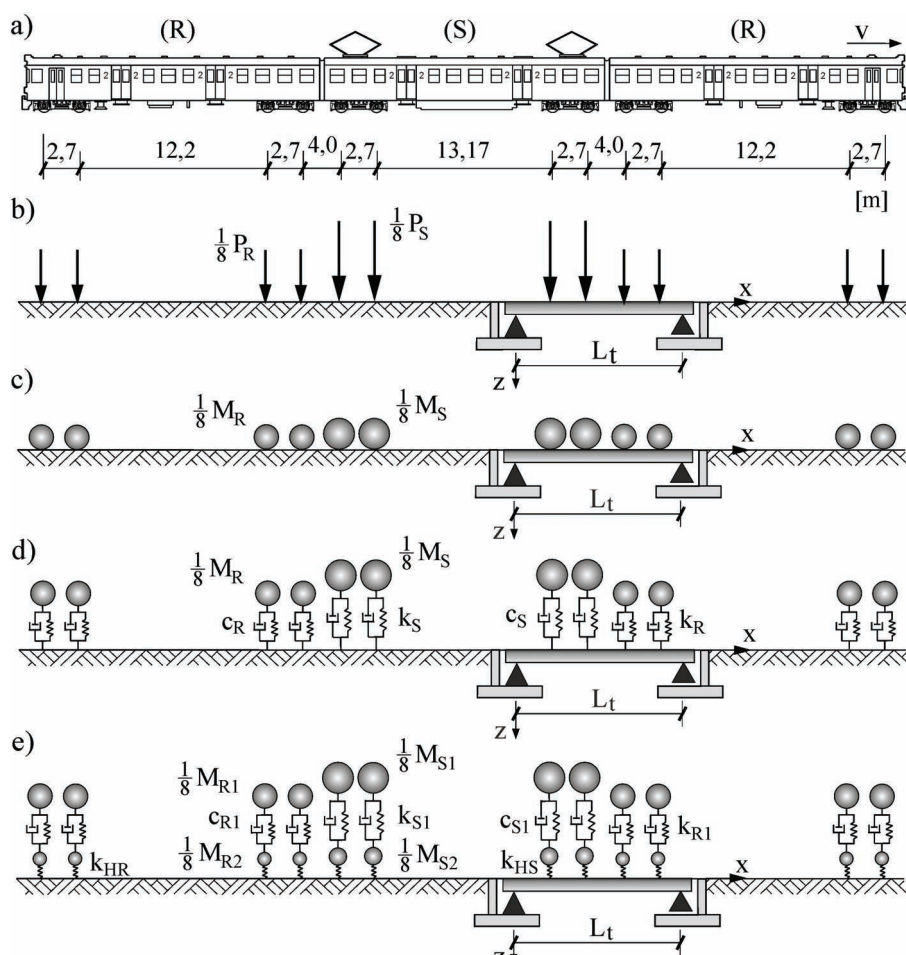
Zagadnienie ruchu pojazdu szynowego po przęsle mostowym stanowi złożone pytanie badawcze, np. [2, 10], a w przypadku linii dużych prędkości staje się kluczowe z uwagi na zwiększone wymogi bezpieczeństwa oraz komfort pasażerów. Podczas ruchu pojazdu szynowego po przęsle mostowym mamy do czynienia ze wzajemnie sprzężonym układem dynamicznym, w którym transfer sił i oddziaływań pomiędzy pojazdem i konstrukcją mostu odbywa się poprzez nawierzchnię kolejową i indukowany jest na styku koła i szyny. Na wielkość tych oddziaływań wpływa m.in. prędkość ruchu oraz stan techniczny toru kolejowego [14]. Dokładna analiza zjawiska wymaga uwzględnienia szeregu zagadnień z zakresu mechaniki pojazdu szynowego, toru kolejowego, konstrukcji

mostowej, a także znajomości rzeczywistych parametrów mechanicznych wspomnianych układów. Sprawia to podstawową trudność w modelowaniu dynamicznym, dlatego w analizach konstrukcji mostowych przyjmowane są często uproszczenia, m.in. dotyczące obciążeń oraz nawierzchni kolejowej, np. [12, 16, 17].

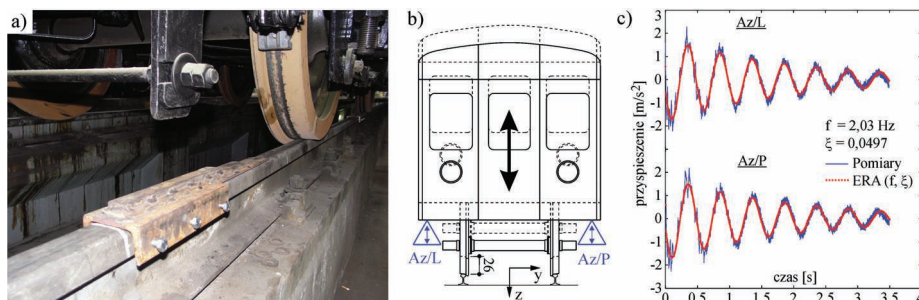
Historia problematyki ruchu obciążenia po przęsle mostowym sięga pierwszej połowy XIX wieku [20]. Przełomowym momentem było uruchomienie w 1964 roku w Japonii pierwszej na świecie linii kolejowej dużych prędkości (KDP). Od tego czasu obserwuje się dużą intensywność prac badawczych, a praktyczne wnioski z nich płynące przyczyniają się do rozwoju technologii KDP, przez co poprawy bezpieczeństwa ruchu kolejowego.

W niniejszej pracy przedstawiono rezultaty analiz dynamicznych dwóch przęseł mostowych obciążonych ruchomym pojazdem szynowym. Pytaniem badawczym jest ocena wpływu stopnia uproszczeń modelu pojazdu na odpowiedź dynamiczną przęsła mostowego w zakresie przemieszczeń oraz przyspieszeń pionowych. Oceny dokonano na podstawie symulacji numerycznych oraz badań in-situ. Modele pojazdu przyjęto na podstawie układu konstrukcyjnego jednostki trakcyjnej serii EN57 [4]. Rozważono strumień sił skupionych, strumień mas skupionych oraz strumienie oscylatorów jedno- i dwumasowych. Pierwszy model wykorzystywany jest w praktyce projektowej, np. [23], drugi uwzględnia dodatkowo inercję obciążenia, np. [11], dwa ostatnie





1. Rozważane modele mechaniczne obciążenia kolejowego: (a) schemat podstawowego układu jednostki EN57, (b) strumień sił skupionych, (c) strumień mas skupionych, (d) strumień oscylatorów jednomasowych, (e) strumień oscylatorów dwumasowych



2. Badania wagonu jednostki EN57: (a) progi testowe do wymuszenia drgań, (b) lokalizacja czujników pomiarowych przyspieszeń pionowych pudła, (c) odpowiedź swobodna pudła (drżania pionowe) – porównanie sygnałów pomierzonych oraz teoretycznych (ERA) dla zidentyfikowanej częstotliwości  $f = 2,03 \text{ Hz}$  i liczby tłumienia  $\xi = 0,0497$

modele umożliwiają analizę interakcji obciążenia i konstrukcji mostu, np. [9, 22]. Analizowane przęsła mostowe to układy belkowe o stosunkowo prostych konstrukcjach. Pierwsze z nich to stalowe przęsło odciażające KO30 o przekroju skrzynkowym i bezpośrednim mocowaniu szyn. Drugie to stalowe przęsło blachownicowe mostu nad rzeką Radunią w Gdańsku o jezdni otwartej. Strukturalna prostota oraz brak nawierzchni podsypkowej eliminuje z układu szereg trudnych do

identyfikacji niewiadomych, przez co ułatwia porównanie i ocenę wyników symulacji. Istotnym etapem analizy jest walidacja modeli numerycznych na podstawie wyników identyfikacji modalnej konstrukcji rzeczywistych – zarówno taboru jak i przęseł mostowych. Parametry modalne (częstotliwości drgań, postaci drgań, liczby tłumienia) zidentyfikowano na podstawie odpowiedzi swobodnych wykorzystując algorytmy metod ERA (ang. *Eigensystem Realization Algori-*

*thm*) [8] oraz PP (ang. *Peak-Picking*) [1]. Oceny uzyskanych rozwiązań numerycznych dokonano na podstawie wyników badań eksploatacyjnych obu przęseł w zakresie drgań wymuszonych. Mierzono przemieszczenia oraz przyspieszenia przęseł podczas przejazdów zespołów EN57.

## Modele obciążenia kolejowego

Modele obciążenia kolejowego zdefiniowano na podstawie jednostki trakcyjnej serii EN57. Jednostki składają się z wagonów rozrządowych (R) oraz silnikowych (S) w różnych konfiguracjach. Rozważono cztery sposoby odwzorowania pojazdu w postaci strumienia sił skupionych, strumienia mas skupionych oraz strumieni oscylatorów jedno- i dwumasowych (rys. 1). Po każdej szynie porusza się strumień obciążeń w rozstawie osi zestawów kołowych i o wartościach nacisków (mas) przypadających na poszczególne koła. Przyjęte oznaczenia to:  $P_S, P_R$  – ciężar wagonu silnikowego i rozrządowego,  $M_S, M_R$  – masa całkowita wagonu silnikowego i rozrządowego,  $M_{S1}, M_{R1}$  – masa resorowana wagonu silnikowego i rozrządowego w modelu oscylatorów dwumasowych,  $M_{S2}, M_{R2}$  – masa nieresorowana (cztery zestawy kołowe) wagonu silnikowego i rozrządowego w modelu oscylatorów dwumasowych,  $k_S, c_S, k_R, c_R$  – sztywności i współczynniki tłumienia resorów w modelu oscylatorów jednomasowych odpowiednio dla wagonu S i R,  $k_{S1}, c_{S1}, k_{R1}, c_{R1}$  – sztywności i współczynniki tłumienia resorów w modelu oscylatorów dwumasowych odpowiednio dla wagonu S i R.

Przyjęto symetryczny rozkład masy w każdym z wagonów. W modelu oscylatorów jednomasowych całkowitą masę przyjęto jako resorowaną. W modelu oscylatorów dwumasowych wydzielono niezależne masy zestawów kołowych. Parametry dynamiczne zdefiniowano na podstawie wyników identyfikacji modalnej wagonu jednostki EN57. W tym celu przeprowadzono badania polegające na impulsowym wzbudzeniu i pomiarze odpowiedzi swobodnej wa-

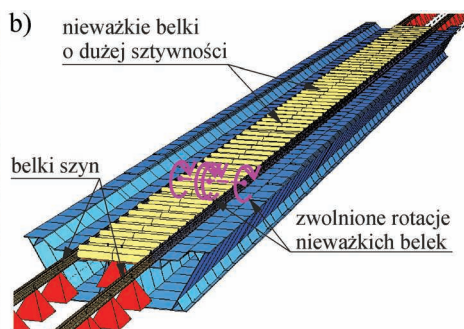
gonu stosując metodę typu „zeskok z progu” (ang. *wedge method*) – rys. 2a. Metodę badawczą, przyjęte założenia oraz wyniki identyfikacji modalnej przedstawiono w pracy [18].

Dla rozważanych modeli oscylatorów, sztywności  $k_i$  oraz współczynniki tłumienia  $c_i$  wyznaczono na podstawie zidentyfikowanych globalnych parametrów modalnych (częstotliwości  $f$  oraz liczby tłumienia  $\xi$ ) wzbudzonej pionowej postaci drgań (rys. 2b i 2c):

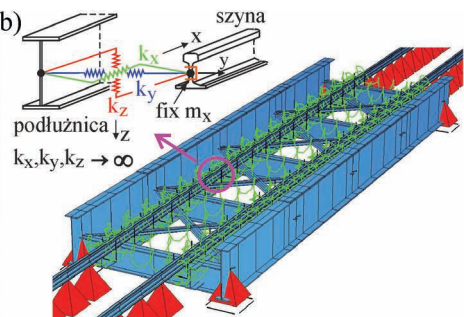
$$k_i = \frac{(2\pi f)^2 M_i}{8}, \quad c_i = \frac{\xi c_i^{kr}}{8} = \frac{\xi 2M_i(2\pi f)}{8},$$

gdzie  $c_i^{kr}$  oznacza tłumienie krytyczne natomiast przez  $i$  należy rozumieć odpowiednio: R, S (model oscylatorów jednomasowych) oraz R1, S1 (model oscylatorów dwumasowych). Za kryterium poprawności definicji modelu przyjęto zgodność globalnych parametrów modalnych uzyskanych z pomiarów (identyfikacja) oraz z rozwiązania numerycznego (problem własny). Parametry dynamiczne poszczególnych modeli obciążenia zestawiono w tabeli 1. W masie wagonów uwzględniono również masę pasażerów  $M_p$  przyjmując ich liczbę równą liczbie miejsc siedzących. Masę jednego pasażera przyjęto równą 80 kg.

W przypadku modelu oscylatorów



3. Przęsło odciążające KO30: (a) konstrukcja wbudowana w torze 502 PKP SKM podczas badań eksploatacyjnych, (b) wizualizacja modelu numerycznego przęsła (SOFISTIK)



4. Most nad rzeką Radunią w Gdańsku: (a) przęsło skrajne podczas badań eksploatacyjnych, (b) wizualizacja modelu numerycznego przęsła (SOFISTIK)

jednomasowych za miarę sprzężenia dynamicznego pomiędzy pojazdem a konstrukcją mostu przyjęto zmienność siły w resorze. W modelu oscylatorów dwumasowych, pomiędzy masą koła a szyną zastosowano kontaktowe więzy sprężyste opisane prawem Hertza [7]:

$$F_i = d_H u_i^{3/2}$$

gdzie  $F_i$  [N] oraz  $u_i$  [m] oznaczają odpowiednio siłę nacisku oraz skrócenie pionowe pomiędzy  $i$ -tym kołem a szyną w obszarze kontaktu,  $d_H$  jest nieliniowym współczynnikiem sztywności Hertza [ $N/m^{3/2}$ ]. Przyjmując, iż skrócenia są małe, posłużyć się można zlinearyzowaną sztywnością Hertza  $k_H$  [N/m] jako sztywnością sieczną pomiędzy wartością zerową a statycznym naciskiem koła [5]:

$$k_H = \frac{dF_i}{du_i} = \frac{3}{2} d_H u_i^{1/2} = \frac{3}{2} d_H^{2/3} F_i^{1/3} = \frac{3}{2} G^{-1} F_i^{1/3}.$$

Wartość  $G = d_H^{-2/3}$  [ $m/N^{2/3}$ ] oznacza podatność Hertza. W pracy [6] autorzy podali zależności stałej  $G$  od promienia koła:  $G = 4.57R - 0.149 \times 10^{-8}$  [ $m/N^{2/3}$ ] dla koła nowego oraz  $G = 3.86R - 0.115 \times 10^{-8}$  [ $m/N^{2/3}$ ] dla koła zużytego. W niniejszej pracy, podobnie jak w [15], w obliczeniach przyjęto średnią wartość  $G$ .

## Modele przęseł mostowych

Pierwszą analizowaną konstrukcją jest stalowe przęsło odciążające KO30 o rozpiętości 30 m (rys. 3a). Konstrukcję przęsła omówiono w pracy [24] wraz ze szczególnym rozwiązaniem przyczółków zastosowanym w torze nr 2 PKP PLK, które umożliwiło prowadzenie ruchu kolejowego z prędkościami do 60 km/h podczas budowy połączenia drogowego przez istniejący nasyp kolejowy w Gdańsku. W niniejszej pracy dyskutowane wyniki dotyczą przęsła wbudowanego w sąsiednim torze nr 502 PKP SKM. W tym przypadku przęsło posadowiono w oparciu o rozwiązanie standardowe (tymczasowe przyczółki wykonane z drewnianych podkładów kolejowych i mostownic, patrz [24]).

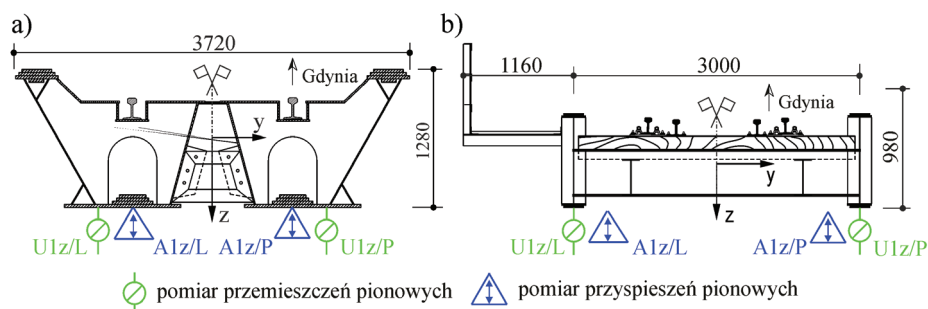
Model numeryczny przęsła wykonano jako przestrzenny, belkowy model MES w programie SOFiSTiK [3]. Podobnie jak w pracy [20], elementy opisano na jednej osi węzłów leżącej na płaszczyźnie symetrii poprzecznej przęsła. W tym przypadku jednak, z uwagi na inne układy obciążeń, tor jezdny odwzorowano w postaci dwóch niezależnych szyn (elementy belkowe o przekroju szyny 60E1 i rozstawie 1435 mm) połączonych z osią konstrukcji za pomocą nieważkich belek o bardzo dużej sztywności ( $E = 205 \times 109$  MPa). Zwolniono dodatkowo więzy rotacyjne wokół osi podłużnych belek. Model zwizualizowano na rysunku 3b.

Druga konstrukcja to blachownicowe przęsło mostu nad rzeką Radunią w Gdańsku z jazdą pośrednią i o jezd-

Tab. 1. Parametry mechaniczne jednostki EN57 dla rozważanych modeli obciążenia

Rodzaj parametru	Wartość parametru		
	Wagon R	Wagon S	
$M_R/M_S$	[t]	34,00	57,00
$M_{R1}/M_{S1}$	[t]	28,720	50,12
$M_{R2}/M_{S2}$	[t]	5,28	6,88
$M_p$	[t]	4,96	7,68
$k_R/k_S$	[kN/m]	690,74	1158,00
$k_{R1}/k_{S1}$	[kN/m]	583,47	1018,22
$c_R/c_S$	[kNs/m]	5,39	9,03
$c_{R1}/c_{S1}$	[kNs/m]	4,55	7,94
$k_H$	[kN/m]	$1,167 \times 10^6$	$1,382 \times 10^6$
$R$	[m]	0,47	0,47





5. Czujniki i kierunki pomiaru drgań przęseł – analizowane przekroje w środkach rozpiętości: (a) przęsła KO30, (b) przęsła mostu nad rzeką Radunią

ni otwartej (rys. 4a). Przeprowadzenie składa się z trzech przęseł swobodnie podpartych, każde o rozpiętości 10,24 m. Konstrukcję przęsła omówiono w pracy [21]. Badaniom i analizie poddano skrajne przęsło od strony Warszawy.

Model MES wykonano z elementów belkowych (rys. 4b). W tym przypadku elementy opisano na płaszczyźnie węzłów, którą przyjęto na poziomie środka ciężkości dźwigarów głównych. Przekroje elementów pomostu i stężeń zlokalizowano na odpowiednich mimośrodkach. Nawierzchnię kolejową typu otwartego uwzględniono w sposób uproszczony. Elementami belkowymi odwzorowano jedynie szyny kolejowe. Ich połączenie (oparcie) z podłużnicami zrealizowano za pomocą więzów sprężystych o bardzo dużej sztywności. Nie rozważono tym samym wpływu rzeczywistej podatności nawierzchni na wyniki symulacji.

## Wyniki badań i symulacji numerycznych

Na obu przęsłach przeprowadzono badania eksploatacyjne (patrz rys. 3a i 4a) mające na celu: (a) walidację modeli numerycznych przęseł na podstawie sygnałów odpowiedzi swobodnych, (b) porównanie wyników badań z rezultatami symulacji numerycznych w zakresie drgań wymuszonych.

Walidację parametrów dynamicznych modeli przęseł (masa, sztywność, tłumienie) przeprowadzono na podstawie zidentyfikowanych globalnych parametrów modalnych – częstotliwości  $f$  oraz liczb tłumienia  $\xi$  (tab. 2). Wykorzystano techniki identyfikacji modalnej ERA oraz PP. Metodykę oraz rezultaty identyfikacji przęsła mostu nad rzeką Radunią przedstawiono w

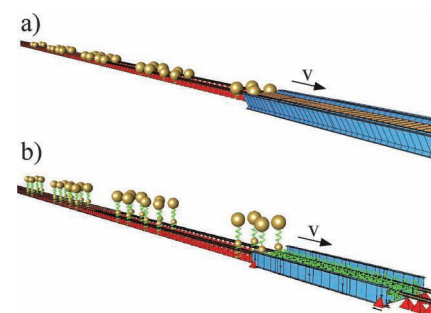
pracy [21]. Zidentyfikowano jedynie pierwszą formę własną oraz odpowiadające jej parametry modalne  $f_1$  oraz  $\xi_1$ . W pracy [20] omówiono metodykę oraz wyniki identyfikacji przęsła KO30 wbudowanego torze nr 2 PKP PLK, dla którego zidentyfikowano cztery stabilne częstotliwości i liczby tłumienia. Analogicznie postąpiono w przypadku przedmiotowej konstrukcji w torze nr 502 PKP SKM. W tym przypadku zidentyfikowano jedynie pierwszą postać drgań giętnych, a różnice w uzyskanych parametrach modalnych (szczególnie tłumienia) wynikają z odmiennych warunków podparcia charakteryzujących obie konstrukcje (tymczasowe klatki drewniane zamiast żelbetowych przyczółków i łożysk stalowych).

Sztywność i masę w modelach przęseł zweryfikowano na podstawie porównania częstotliwości drgań własnych (pomierzonej i uzyskanej z rozwiązania problemu własnego) dla pierwszej postaci drgań giętnych. Model tłumienia przyjęto jako sztywnościowy  $\mathbf{C} = b\mathbf{K}$ , w którym współczynnik proporcjonalności obliczono jako  $b = \xi_1 / \pi f_1$ .

Symulacje przejazdu obciążenia po przęsła mostowym przeprowadzono w programie SOFiSTiK przy wykorzystaniu metody Newmarka (wariant bezwarunkowo stabilny). Rozważono drgania środków rozpiętości przęseł (rys. 5) w zakresie przemieszczeń oraz przyspieszeń pionowych wokół położenia równowagi statycznej. W rezultacie analizy zbieżności, kroki całkowania dobrano jako  $\Delta t = 0,004$  s (przęsła KO30) oraz  $\Delta t = 0,002$  s (przęsła mostu nad rzeką Radunią). Weryfikacji zaimplementowanej procedury dokonano w pracy [19], rozważając model poje-

dynczej siły skupionej oraz oscylatora jednomasowego poruszających się po belce Eulera. W przypadku modelu sił skupionych obliczenia realizowane są dla kolejnych ustawień obciążenia zgodnie z przyjętym krokiem całkowania przy wykorzystaniu informacji z kroku aktualnego i poprzedniego. W przypadku modeli inercyjnych, dodatkową interakcją pomiędzy przęsłem a pojazdem zapewniają kontaktowe więzy lepko-sprężyste pomiędzy masami pojazdu a węzłami kontaktowymi toru jezdni. Dla modelu mas skupionych oraz oscylatorów dwumasowych, sztywność wspomnianych więzów odpowiada zlinearyzowanej sztywności Hertza. W przypadku oscylatorów jednomasowych, więzom nadano charakterystyki resorowania pojazdu. Wizualizacje modeli obliczeniowych dla dwóch wybranych przypadków pokazano na rysunku 6.

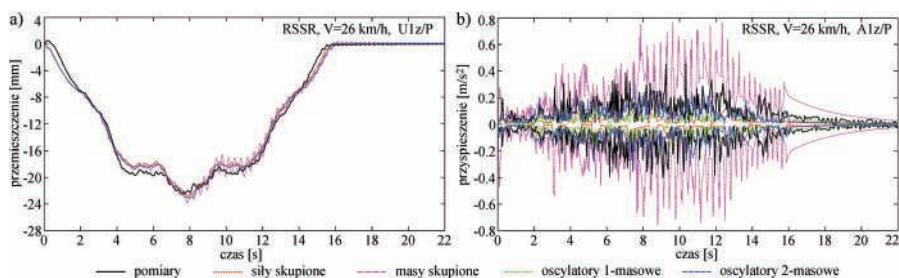
Na rysunku 7 porównano czasowe przebiegi drgań przęsła KO30 uzyskane dla konfiguracji taboru RSSR i prędkości przejazdu 26 km/h. Na rysunku 8 pokazano analogiczne wyniki dla przęsła mostu nad rzeką Radunią uzyskane dla konfiguracji taboru RSR i prędkości przejazdu 49 km/h. Zastosowano wytyczne normy [13] rozważając przyspieszenia w paśmie 0÷30 Hz (przęsła KO30) oraz 0÷35 Hz (przęsła mostu nad rzeką Radunią). Stosowa-



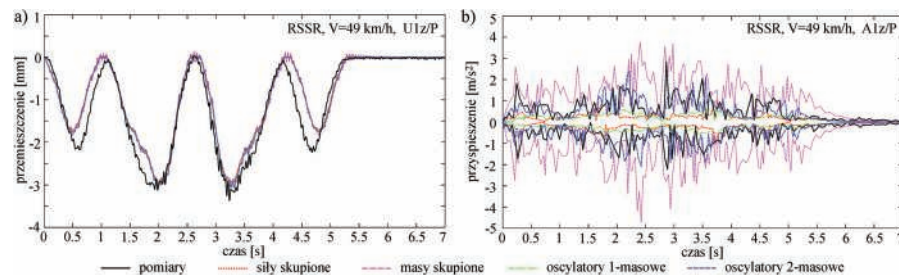
6. Wizualizacje wybranych modeli obliczeniowych (SOFiSTiK): (a) przęsła KO30 obciążone masami skupionymi, (b) przęsła mostu nad rzeką Radunią obciążone oscylatorami dwumasowymi

Tab. 2. Parametry modalne analizowanych przęseł mostowych

Przęsło / Parametr	ERA, PP		Model MES	
	$f_1$ [Hz]	$\xi_1$ [-]	$f_1$ [Hz]	$b$ ( $\mathbf{C} = b\mathbf{K}$ )
KO30	4,07	0,0117	4,06	$9,150 \cdot 10^{-4}$
Radunia	22,18	0,0104	21,91	$1,492 \cdot 10^{-4}$



7. Drgania środka przęsła KO30 – porównanie wyników badań oraz symulacji numerycznych dla poszczególnych modeli obciążeń: (a) przemieszczenia pionowe U1z/P, (b) przyspieszenia pionowe A1z/P



8. Drgania środka przęsła mostu nad rzeką Radunią – porównanie wyników badań oraz symulacji numerycznych dla poszczególnych modeli obciążeń: (a) przemieszczenia pionowe U1z/P, (b) przyspieszenia pionowe A1z/P

nym często wskaźnikiem ilościowego porównania sygnałów jest wartość średniokwadratowa (skuteczna), stanowiąca miarę średniej mocy sygnału (RMS). Wartości RMS wyznaczono dla sygnałów przyspieszeń w zakresie drgań wymuszonych, liczonych od momentu wjazdu obciążenia do chwili jego całkowitego zjazdu z konstrukcji. W przypadku przęsła KO30 czas ten wyniósł 15,5 s, natomiast dla przęsła mostu nad rzeką Radunią 5,3 s. Stosowane porównanie przedstawia rysunek 9.

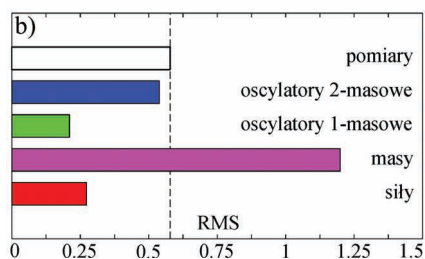
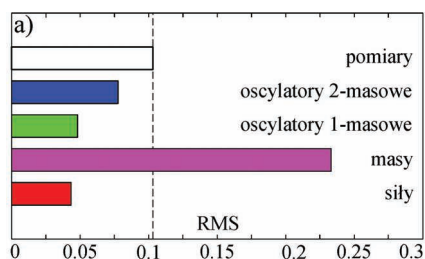
## Dyskusja i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułować można główne wnioski:

- Obiektywna analiza dynamiczna mostów kolejowych pod obciążeniem ruchomym wymaga określenia rzeczywistych parametrów dynamicznych zarówno przęseł jak i obciążeń ruchomych. Przedstawiona metodologia definicji modeli numerycznych stanowić może skuteczną drogę do obiektywizacji wyników analiz dynamicznych.
- Sposób odwzorowania pojazdu szynowego w analizach interakcji pojazd-przęsło wpływa istotnie na wyniki przyspieszeń przęsła mostowego. Porównanie wyników badań i symulacji numerycznych uwidacznia znaczne różnice w ilościowej odpowiedzi przęseł dla rozważanych modeli obciążeń. Jednocześnie zauważyć można ogólną prawidłowość uzyskanych rezultatów dla obu przypadków analizowanych konstrukcji.
- Pominięcie sił inercyjnych obciążenia (model sił skupionych) wyraźnie zaniżyło amplitudy przyspieszeń. Z kolei przyjęcie całej masy pojazdu jako nieresorowanej (mo-

del mas skupionych) spowodowało dwukrotne zawiązanie poziomu odpowiedzi. Modele resorowane pojazdu wpływają stabilizująco na drgania przęsła, przy czym najbliższe pomierzonym wyniki uzyskano dla modelu oscylatorów dwumasowych. Model oscylatorów jednomasowych znacznie zaniżył poziom odpowiedzi przęsła.

- Analizy przyspieszeń przęseł mostów kolejowych o podobnych do rozważanych układach konstrukcyjnych oraz rodzajach nawierzchni, wymagają uwzględnienia dynamicznych modeli obciążeń ruchomych. Istotnym elementem tych modeli jest nieresorowana masa zestawów kołowych. Pozostałą masę należy przyjąć jako resorowaną, uwzględniając przynajmniej jeden stopień odsprężynowania.
- Sposób odwzorowania pojazdu nie wpływa istotnie na wartości globalnych przemieszczeń przęsła. Charakter i poziom odpowiedzi uzyskany dla wszystkich rozważanych modeli jest podobny i bliski wartościom pomierzonym. Pod tym względem, model sił skupionych stosowany w praktyce inżynierskiej daje wyniki bliskie obu modelom resorowanym. Jedynie w przypadku modelu mas skupionych widoczny jest zwiększony poziom przemieszczeń dynamicznych (względem wartości quasi-statycznych) oraz większy poziom wzbudzenia drgań swobodnych (efekt progowy). Model mas skupionych prowadzi do zawiązonych wyników w przypadku analizy np. współczynników przeciążenia dynamicznego.
- Zgodność maksymalnych przemieszczeń pomierzonych i teoretycznych pozwala wnioskować o poprawności odwzorowania geometrii i sztywności analizowanych przęseł oraz dobrego oszacowania masy taboru. Jedynie w przypadku mostu nad rzeką Radunią widoczne są pewne rozbieżności w ekstremalnych wartościach



9. Wartości średniokwadratowe (RMS) sygnałów przyspieszeń pomierzonych i numerycznych w zakresie drgań wymuszonych: (a) przęsło KO30, (b) przęsło mostu nad rzeką Radunią

przemieszczeń wywołanych wagonami rozrządczymi. Możliwym powodem jest faktyczny brak symetrii w rozkładzie masy konstrukcyjnej wagonu oraz niedoszacowanie masy pasażerów (ładunku), których liczba na badanym odcinku jest zmienna i mocno zależna od pory dnia.

Przedstawione analizy dotyczą stosunkowo niewielkich prędkości jakie osiągnęły przez tabor podczas badań eksploatacyjnych. Badania te stanowią jednak kluczowy element umożliwiający porównanie i ocenę wyników symulacji, co było celem niniejszej pracy. Z całą pewnością analizy przeprowadzone w szerszym zakresie prędkości oraz rozbudowa modeli pojazdów o kolejne dynamiczne stopnie swobody (identyfikacja modalna) pozwoliłyby na szerszą ocenę zjawiska. Dodatkowym pytaniem badawczym jest ocena wpływu nawierzchni podsypkowych lub niekonwencjonalnych na odpowiedź dynamiczną przęsła mostowego przy uwzględnieniu rzeczywistych charakterystyk dynamicznych oraz imperfekcji geometrycznych toru. Wspomniane nawierzchnie są obecnie dominujące, a w przypadku linii dużych prędkości jedyne dopuszczalne. Podatność nawierzchni, jej dobre właściwości tłumiące oraz znacząca masa, wpływają korzystnie na dynamikę przęseł mostowych oraz redukują wielkość oddziaływań pomiędzy przęsłem i pojazdem szynowym. Z kolei niedokładności geometryczne toru stanowią źródło dodatkowego, często znaczącego wymuszenia drgań zarówno przęsła jak i pojazdu szynowego. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Bendat J.S., Piersol A.G. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. John Wiley & Sons, 1980.
- [2] Bryja D., Hołubowski R., Gisterek I. Railroad vehicle modeling in probabilistic vibration analysis of a railway bridge with randomly fluctuating track ballast stiffness. 9th European Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2014, 30th June – 2nd July 2014, 2737-2744.
- [3] Catz C., Deinzer F., Maly S., Fink T. SOFiSTiK A.G., v.2014, www.sofistic.com, 08.2019.
- [4] Domański E., Kowalczyk E., Skoniecki J. Elektryczne zespoły trakcyjne serii EW55 i EN57. WKiŁ, 1974.
- [5] Esveld C. Modern railway track. MRT Productions, 1989.
- [6] Jenkins H.H., Stephenson J.E., Clayton G.A., Morland H.W., Lyon D. The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces. Railway Engineering Journal, 3(1), 1974, 2-16.
- [7] Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 1985.
- [8] Juang J.N., Pappa R.S. An eigen-system realization algorithm for modal parameter identification and model reduction. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 8(5), 1985, 620-627.
- [9] Klasztorny M. Analiza drgań belki mostowej przenoszącej jednorodny strumień obciążeń ruchomych. Archiwum Inżynierii Lądowej 36(3), 1990, 207-227.
- [10] Klasztorny M. Dynamika mostów belkowych obciążonych pociągami szybkojeźdnymi. WNT, 2005.
- [11] Michaltsos G. T., Sophianopoulos D., Kounadis A. N. The effect of a moving mass and other parameters on the dynamic response of a simply supported beam. Journal of Sounds and Vibration, 191(3), 1996, 357-362.
- [12] Oleszek R., Radomski W. Dynamic analysis of an existing arch railway bridge according to Eurocodes. Archives of Civil Engineering, LXII, 4/1, 2016, 99-117.
- [13] PN-EN 1990 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji. Załącznik A2: Zastosowanie do mostów. Polski Komitet Normalizacyjny, 2008.
- [14] Podworna M. Współczynniki dynamiczne ugięć pionowych w analizie numerycznej belkowych mostów kolejowych. Przegląd Komunikacyjny, 9, 2017, 7-11.
- [15] Podworna M. Dynamic response of steel-concrete composite bridges loaded by high-speed train. Structural Engineering and Mechanics 62(2), 2017, 179-196.
- [16] Poprawa G., Pradelok S., Łaziński P., Rudzik A. Obiekty mostowe na liniach kolejowych dużych prędkości – studium przypadku. Inżynieria i Budownictwo, 11, 2014, 636-640.
- [17] Ribeiro D., Calcada R., Delgado R. Dynamic analysis of Alcácer do Sal railway bridge. EUROLYN 2005. 4-7th September 2005, 1661-1667.
- [18] Szafrąński M. Oddziaływania taboru na mosty kolejowe przy zmiennych parametrach ruchu. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2014.
- [19] Szafrąński M. Vibration of the bridge under moving singular loads - theoretical formulation and numerical solution. Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics, 15(1), 2016, 169-180.
- [20] Szafrąński M. Dynamic analysis of the railway bridge span under moving loads. Roads and Bridges – Drogi i Mosty. 17, 2018, 299-316.
- [21] Szafrąński M. Dynamics of the small-span railway bridge under moving loads, MATEC Web Conf. 262 10014 (2019) 1-8.
- [22] Szcześniak W., Ataman M., Zbiciak A. Drgania belki sprężystej wywołane ruchomym, liniowym oscylatorem jednomasowym. Roads and Bridges – Drogi i Mosty 1(2), 2002, 53-83.
- [23] Żółtowski K., Kozakiewicz A., Romaszkiwicz T., Szafrąński M., Madaj A., Falkiewicz R., Raduszkiewicz K., Redzimski K. Przebudowa mostu kolejowego przez rzekę Pilicę z przystosowaniem do dużych prędkości. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, 8, 2010, 289-299.
- [24] Żółtowski K., Szafrąński M., Kozakiewicz A. Zastosowanie istniejących przęseł odciążających typu mostowego dla prędkości eksploatacyjnych do 60 km/h. Mosty 2/2013, 24-27.