

# Wpływ losowych nierówności toru na drgania wybranego układu most zespolony / nawierzchnia kolejowa / pociąg szybkiej

Monika Podworna<sup>1</sup>, Marian Klasztorny<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Zakład Dynamiki Budowli, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska,  
e-mail: monika.podworna@pwr.wroc.pl

<sup>2</sup> Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia  
Techniczna, e-mail: m.klasztorny@gmail.com

**Streszczenie:** Opracowano quasi-ściłą teorię modelowania jednowymiarowego (1D), fizycznego i matematycznego, układu most zespolony / nawierzchnia kolejowa podsypkowa / pociąg szybkiej (BTT), przy uwzględnieniu lepkosprężystych zawieszek pojazdów szynowych na dwuosiowych wózkach jezdnych, nieliniowej sztywności kontaktowej Hertza i jednostronnego kontaktu między zestawami kołowymi a szynami, cech lepkosprężystych i bezwładnościowych mostu, lepko sprężystej nawierzchni kolejowej na moście i poza mostem, płyt przejściowych i losowych nierówności toru. Na podstawie tej teorii opracowano zaawansowane algorytmy komputerowe modelowania numerycznego układów BTT oraz program komputerowy do symulacji drgań pionowych tych układów. W ramach wstępnych badań dynamicznych rozważono most zaprojektowany zgodnie z polskimi normami, o rozpiętości teoretycznej przęsła 15,00 m, oznaczony kodem SCB-15. Most obciążono niemieckim pociągiem szybkiej ICE-3, poruszającym się z prędkością krytyczną (270 km/h) i maksymalną (300 km/h).

**Słowa kluczowe:** most zespolony, nawierzchnia kolejowa podsypkowa, pociąg szybkiej ICE-3, losowe nierówności toru, modelowanie, symulacja, badania numeryczne

## 1. Wstęp

Mosty zespolone obciążone pociągami szybkiej poruszającymi się z prędkościami do 300 km/h wymagają projektowania lub modernizacji z uwzględnieniem warunku bezpieczeństwa ruchu pociągu (TSC) oraz warunku komfortu pasażerów (PCC) [1,2]. Nierówności toru kolejowego, związane głównie z technologią budowy toru, osiadaniem i zużyciem powierzchni tocznych szyn, są uważane za jeden z głównych czynników wpływających na odpowiedź dynamiczną układu BTT. Pomiarów eksperymentalne i/lub modelowanie nierówności toru jest przedmiotem szeregu prac, np. [3-6]. Uznany modelem profili pionowych nierówności toru jest stacjonarny ergodyczny przestrzenny proces Gaussa. Profile te są scharakteryzowane przez jednostronną funkcję gęstości widmowej mocy (PSD). Administracja Dróg Kolejowych USA (FRA) opracowała funkcje PSD dla linii kolejowych stopni 1 – 6 według normy dotyczącej dróg kolejowych USA.

Stan wiedzy do roku 2004 w dynamice mostów kolejowych obciążonych pociągami szybkiej przedstawiono w pracy [7]. W niniejszej pracy przegląd literatury rozszerzono o najważniejsze prace w ostatnich 10 latach. Au i in. [8] zaprezentowali studium drgań 1D kolejowego mostu podwieszonoego z uwzględnieniem losowych nierówności szyn. Belkę główną podzielono na elementy skończone Eulera o sześciu stopniach swobody (6DOF). Założono więzy dwustronne między zestawami kołowymi (masy nieresorowane) a szynami. Profile losowych nierówności toru generowano z wykorzystaniem empirycznej formuły PSD i parametrów FRA. Song i in. [9] opracowali model MES 3D układu most / pociąg szybkiej. Pomost modelowano z zastosowaniem elementów powłokowych płaskich 6DOF. Nawierzchnię kolejową modelowano jako belkę Eulera na sprężystym podłożu dwuparametrowym. Założono więzy dwustronne między zestawami kołowymi (masy nieresorowane) a szynami.

W pracach [10 – 12] rozwinięto teorię 1D modelowania układów BTT. Konstrukcję nośną mostu stalowego modelowano za pomocą lekko sprężystej belki Timoshenki, przyrządkowanej odcinkami. Szyny odwzorowano za pomocą ciągłej lekko sprężystej belki Eulera. Przytwierdzenia i podsypka są fizycznie nieliniowe, a podkłady są masami skupionymi drgającymi pionowo. Modelem pojazdu szynowego jest czteroosiowy model Matsuury (6DOF). Testowano mosty stalowe obciążone pociągiem Shinkansen.

Lu i in. [6] adoptowali element VBI (interakcja pojazd – most) w teorii niestacjonarnych drgań losowych układów pojazd – most. Element VBI redukuje stopnie swobody pojazdu do stopni swobody mostu przy zastosowaniu schematu całkowania Newmarka. Most jest dyskretyzowany za pomocą belkowych elementów skończonych Eulera. Pojazdy odwzorowano za pomocą czteroosiowego modelu Matsuury (6DOF). Odpowiedź dynamiczną mostu na przejazd pociągów analizowano w pracy [13] z uwzględnieniem nierówności toru. Zastosowano model 3D DBTI (dynamiczna interakcja most – pociąg).

Zaawansowane modelowanie sztywności kontaktowej koło szyna, zgodnie z nieliniową teorią Hertza, zaprezentowano w pracy [5]. Kontakt koło – szyna jest rozpatrywany jako kontakt sprężysty dwóch walców prostopadłych do siebie. Względne skrócenie pionowe między kołem a szyną jest obliczane na podstawie formuły Hertza o postaci

$$u_H = d_H R_1^{2/3} \quad (1)$$

gdzie:  $u_H$  – skrócenie pionowe,  $d_H = 1/k_H$  – podatność kontaktowa,  $k_H$  – sztywność kontaktowa,  $R_1 = 0.5R$  – połowa siły interakcji przypadającej na zestaw kołowy. W odniesieniu do pociągu ICE-3 z kołami o promieniu  $r_w = 0.46$  m średnia sztywność kontaktowa wynosi  $k_H = 0.216 \cdot 10^8 \left[ \frac{N^{2/3}}{m} \right]$ .

## 2. Opis profili pionowych losowych nierówności toru

W modelowaniu prób losowych nierówności toru kolejowego uwzględniono tylko profil pionowy, tj. średnią nierówność dwóch szyn typu elewacja [3]. Pominięto nierówności krótkie szyn typu marszczenie oraz nierówności długie wynikające z geometrii toru. Stacjonarny ergodyczny przestrzenny proces Gaussa jest opisany przez jednostronną funkcję PSD,  $S_{rr}(\Omega)$ , przy czym  $\Omega = 2\pi/L_r$  [rad/m] jest tzw. częstością przestrzenną, natomiast  $L_r$  jest długością fali. Funkcja  $S_{rr}(\Omega)$  opracowana przez FRA, ma postać [3]

$$S_{rr}(\Omega) = kA \frac{\Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_c^2)\Omega^2} \left[ \frac{\text{mm}^2 \text{m}}{\text{rad}} \right] \quad (2)$$

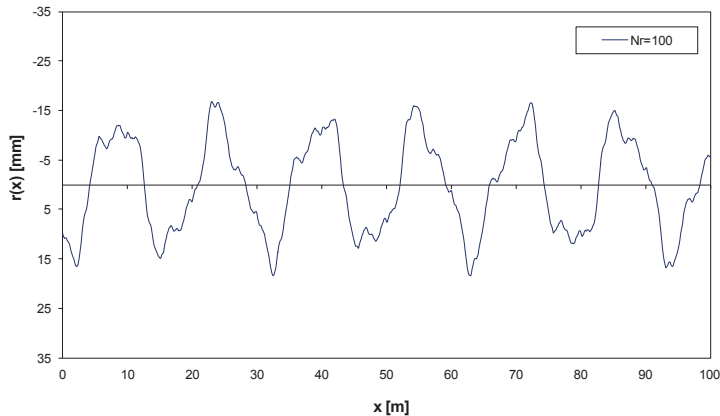
gdzie  $k = 0.25$ ,  $\Omega_c = 0.8245 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{m}} \right]$ , natomiast współczynnik  $A$  [mm<sup>2</sup>rad/m] jest specyfikowany dla stopni 1 – 6 linii kolejowych. W niniejszej pracy uwzględniono tylko lepsze linie o stopniach 4 ( $A=53.76$ ), 5 ( $A=20.95$ ), 6 ( $A=3.39$ ).

Próby losowe profili pionowych nierówności toru są generowane za pomocą metody Monte-Carlo, co prowadzi do formuły [4,5]

$$r(x) = 2 \sum_{i=1}^{N_r} \sqrt{S_{rr}(\Omega_i) \Delta\Omega} \cos(\Omega_i x + \varphi_i) \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

gdzie:  $\Omega_i = \Omega_{\min} + (i - 0.5)\Delta\Omega$  – częstość dyskretna,  $\varphi_i$  – losowy kąt fazowy o rozkładzie równomiernym na przedziale  $[0, 2\pi]$  [rad] i niezależny dla  $i = 1, 2, \dots, N_r$ ,  $\Delta\Omega = \frac{1}{N_r}(\Omega_{\max} - \Omega_{\min})$  – przyrost częstości,  $N_r$  – łączna liczba przyrostów częstości w przedziale  $[\Omega_{\min}, \Omega_{\max}]$ ,  $\Omega_{\min} = \frac{2\pi}{L_{r,\max}}$ ,  $\Omega_{\max} = \frac{2\pi}{L_{r,\min}}$  – dolna i górna granica częstości przestrzennej,  $L_{r,\min}, L_{r,\max}$  - dolna i górna granica długości fali.

Biorąc pod uwagę dane eksperymentalne podane w pracach [3–6,8,9], przyjęto wartości  $L_{r,\min} = 0.10$  m,  $L_{r,\max} = 70.00$  m jako adekwatne do symulacji układów BTT z mostami o rozpiętości do 30.00 m. Na podstawie symulacji wstępnych, wartość  $N_r = 100$  została oceniona jako adekwatna do generowania prób losowych profili nierówności zgodnych z rzeczywistością. Przykładową próbę losową dla  $N_r = 100$  pokazano na rys. 1.



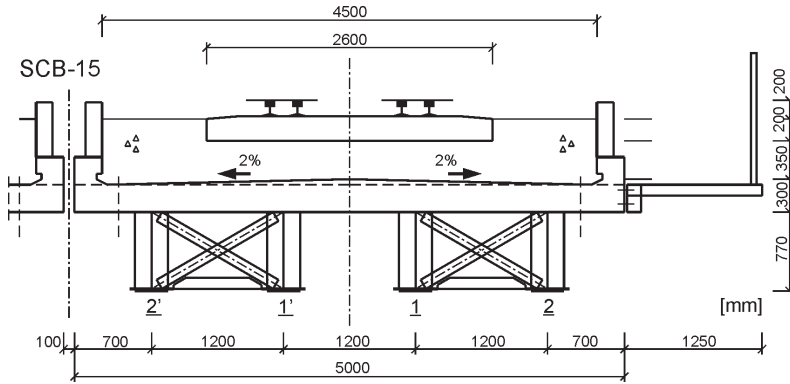
Rys. 1. Próba losowa profilu pionowych nierówności toru dla linii o stopniu 4

### 3. Modelowanie fizyczne i matematyczne układu BTT

Na rys. 2 pokazano w pełni symetryczny przekrój poprzeczny mostu SCB-15 w środku rozpiętości, z zastosowaniem powłokowych ścianek kompozytowych GFRP do zabezpieczenia bocznego podsypki. Komponenty nawierzchni kolejowej podsypkowej dostosowanej do ruchu pociągów z prędkościami do 300 km/h są następujące: szyny główne i odbojnice 60E1 (UIC-60), przytwierdzenia szyn głównych i odbojnic Vossloh 300-1, podkłady z betonu sprężonego B 320 U60 / B 320 U60-U, podsypka o grubości 35 cm pod podkładem w osi toru, żelbetowe płyty przejściowe, podtorze stabilizowane cementem w strefach przejściowych, piaskowo żwirowa warstwa górna podtorza, nasyp wzmocniony włókniną poza strefami przejściowymi. Charakterystyka sprężysta pary przytwierdzeń Vossloh 300-1 jest nieliniowa. Podsypka jest liniowo sprężysta przy ściskaniu i nie przenosi rozciągania. Właściwości tłumiące przytwierdzeń i podsypki są aproksymowane modelem tłumienia wiskotycznego.

W modelowaniu fizycznym i matematycznym układu BTT przyjęto następujące główne założenia. Rozpatruje się skończenie długi odkształcalny tor ciągły, obejmujący most, strefy przejściowe i strefy pozap przejściowe. Poza tymi strefami tor jest prostoliniowy nieodkształcalny. Płaszczyzna drgań pionowych układu BTT pokrywa się z płaszczyzną symetrii podłużnej tego układu. Szyny główne i boczne są lepkosprężystymi belkami Eulera. Podkłady są odwzorowane przez masy skupione drgające pionowo. Podsypka jest modelowana przez dyskretne więzy nieliniowe sprężysto-tłumiące pod każdym podkładem. Masa podsypki jest granulowana poza mostem i płytami przejściowymi. Podtorze jest aproksymowane przez zbiór oscylatorów lepko sprężystych. Płyty przejściowe są modelowane jako lepkosprężyste belki Eulera. Zespolona konstrukcja nośna mostu jest odwzorowana przez belkę odcinkowo pryzmatyczną, swobodnie podpartą, odkształcalną giętnie, symetryczną względem środka rozpiętości. Pociąg ICE-3 składa się z ośmiu pojazdów czteroosiowych, modelowanych za pomocą rozszerzonego modelu Matsuury, uwzględniającego nieliniowe, jednostronne sprężyny kontaktowe Hertza. Układ BTT jest liniowy geometrycznie i nieliniowy fizycznie.

Układ BTT podzielono na następujące podukłady (kody od terminów angielskich): BS – konstrukcja nośna mostu, LAS – lewa płyta przejściowa, RAS – prawa płyta przejściowa, LB – lewa warstwa podsypki, RB – prawa warstwa podsypki, SL – podkłady, OR – szyny główne, SR – szyny boczne,  $RVi, i = 1, 2, \dots, N_v$  – pociąg ruchomy ( $N_v$  – liczba pojazdów). Model fizyczny 1D podukładu nawierzchnia kolejowa / most pokazano na rys. 3. Belki modelujące podukłady OR, SR, LAS, RAS, BS są dyskretyzowane przy zastosowaniu elementów skończonych odkształcalnych giętnie (4DOF) o długości  $d$  (rozstaw podkładów).



Rys. 2. Przekrój poprzeczny mostu SCB-15 w środku rozpiętości

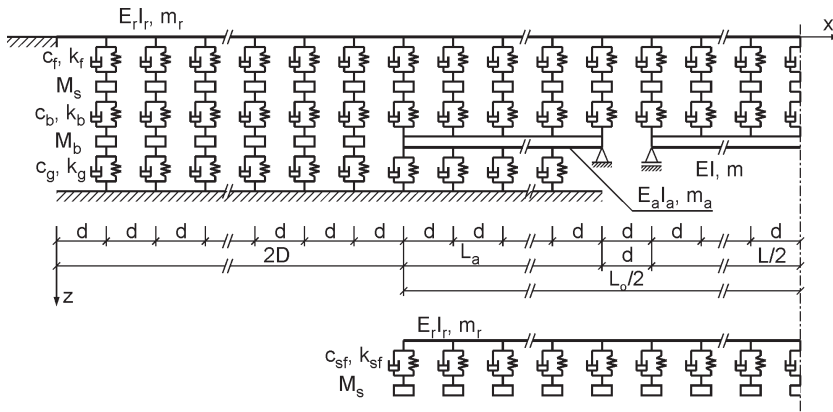
Podukłady tworzące układ BTT są obciążone podukładami pionowych interakcji przenoszonych przez sprężyste lub lepkosprężyste, fizycznie liniowe lub nieliniowe więzy. Stosując równania Lagrange'a i agregację wewnętrzną podukładów dyskretyzowanych zgodnie z metodą elementów skończonych, otrzymuje się macierzowe równania ruchu podukładów, z jawnymi liniowymi stronami lewymi i niejawnymi nieliniowymi stronami prawymi. Sprężenie równań jest ukryte w wektorach stron. Takie sformułowanie daje w wyniku macierzowe równania ruchu o stałych współczynnikach, które są całkowane za pomocą algorytmu rekurencyjno – iteracyjnego.

Drgania nieustalone i quasi-ustalone układu BTT są opisane przez  $8 + N_v$  macierzowych równań ruchu o następującej postaci niejawnej:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{B}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F} \\
 & \mathbf{B}_{la}\ddot{\mathbf{q}}_{la} + \mathbf{C}_{la}\dot{\mathbf{q}}_{la} + \mathbf{K}_{la}\mathbf{q}_{la} = \mathbf{F}_{la} \\
 & \mathbf{B}_{ra}\ddot{\mathbf{q}}_{ra} + \mathbf{C}_{ra}\dot{\mathbf{q}}_{ra} + \mathbf{K}_{ra}\mathbf{q}_{ra} = \mathbf{F}_{ra} \\
 & \{\mathbf{M}_b\}\ddot{\mathbf{q}}_{lb} = \mathbf{F}_{lb} \\
 & \{\mathbf{M}_b\}\ddot{\mathbf{q}}_{rb} = \mathbf{F}_{rb} \\
 & \{\mathbf{M}_s\}\ddot{\mathbf{q}}_s = \mathbf{R}_f - \mathbf{R}_b \\
 & \mathbf{B}_r\ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}_r\dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{K}_r\mathbf{q}_r = \mathbf{F}_r \\
 & \mathbf{B}_{sr}\ddot{\mathbf{q}}_{sr} + \mathbf{C}_{sr}\dot{\mathbf{q}}_{sr} + \mathbf{K}_{sr}\mathbf{q}_{sr} = \mathbf{F}_{sr} \\
 & \mathbf{B}_i\ddot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{F}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N_v
 \end{aligned} \tag{4}$$

gdzie:  $\mathbf{q}(t), \mathbf{q}_{la}(t), \mathbf{q}_{ra}(t), \mathbf{q}_{lb}(t), \mathbf{q}_{rb}(t), \mathbf{q}_s(t), \mathbf{q}_r(t), \mathbf{q}_{sr}(t)$  – wektory współrzędnych uogólnionych odpowiednio podukładów BS, LAS, RAS, LB, RB, SL, OR, SR,  $\mathbf{q}_i(t), i = 1, 2, \dots, N_v$  – wektory współrzędnych uogólnionych pojazdów ruchomych,  $\mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{K}, \mathbf{B}_{la}, \mathbf{C}_{la}, \mathbf{K}_{la}, \mathbf{B}_{ra}, \mathbf{C}_{ra}, \mathbf{K}_{ra}, \mathbf{B}_r, \mathbf{C}_r, \mathbf{K}_r, \mathbf{B}_{sr}, \mathbf{C}_{sr}, \mathbf{K}_{sr}$  – macierze bezwładności, tłumienia i sztywności odpowiednio podukładów BS, LAS, RAS, OR, SR,  $\{\mathbf{M}_b\}, \{\mathbf{M}_s\}$  – macierze bezwładności podukładów LB, RB, SL,  $\mathbf{B}_i$  – macierz bezwładności  $i$ -tego pojazdu szynowego (10DOF),  $\mathbf{R}_f, \mathbf{R}_{sf}, \mathbf{R}_b, \mathbf{R}_g$  – wektory interakcji przenoszonych przez przytwierdzenia szyn OR, SR, podsypkę, podtorze,  $\mathbf{R}_{wi}$  – wektor ruchomych sił nacisku zestawów kołowych  $i$ -tego pojazdu na szyny,  $\mathbf{F}(\mathbf{R}_b)$  – wektor obciążeń uogólnionych podukładu BS,  $\mathbf{F}_{la}(\mathbf{R}_b, \mathbf{R}_g), \mathbf{F}_{ra}(\mathbf{R}_b, \mathbf{R}_g)$  – wektory obciążeń uogólnionych podukładów LAS i RAS,  $\mathbf{F}_{lb}(\mathbf{R}_b, \mathbf{R}_g), \mathbf{F}_{rb}(\mathbf{R}_b, \mathbf{R}_g)$  – wektory obciążeń uogólnionych podukładów LB i RB,  $\mathbf{F}_r(\mathbf{R}_f, \mathbf{R}_{wi}), i = 1, 2, \dots, N_v, \mathbf{F}_{sr}(\mathbf{R}_{sf})$  – wektory obciążeń uogólnionych podukładów OR i SR,  $\mathbf{R}_i = \text{col}(R_{1i} \ R_{2i} \ \dots \ R_{10,i})$  – wektor interakcji przenoszonych przez zawieszenia I i II stopnia  $i$ -tego pojazdu,  $\mathbf{G}$  – wektor obciążeń uogólnionych odwzorowują-

cy naciski statyczne zestawów kołowych na szyny,  $\mathbf{F}_i(\mathbf{R}_i, \mathbf{G}), i = 1, 2, \dots, N_v$  – wektor obciążeń uogólnionych podukładu  $RVi, i = 1, 2, \dots, N_v$ ,  $(\dot{\phantom{x}}) = d/dt$  – różniczkowanie podług zmiennej czasowej  $t$ . Wzory szczegółowe definiujące macierze i wektory w równaniach (4) oraz wartości parametrów fizycznych podukładów podano w raporcie [15]. Niejawne macierzowe równania ruchu (4) całkowano numerycznie metodą Newmarka z parametrami  $\beta_N=1/4, \gamma_N=1/2$ , rozwiniętą do postaci rekurencyjno – iteracyjnej w pracy [14].



Rys. 3. Model fizyczny 1D podukładu nawierzchnia kolejowa / most

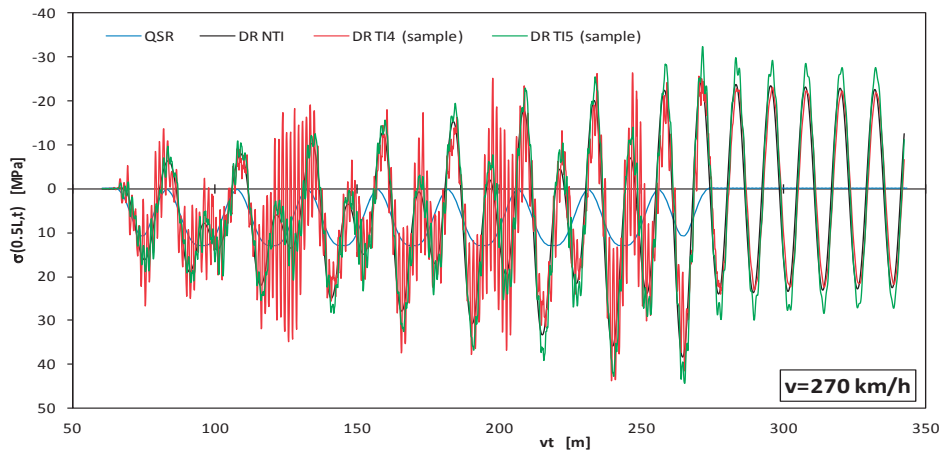
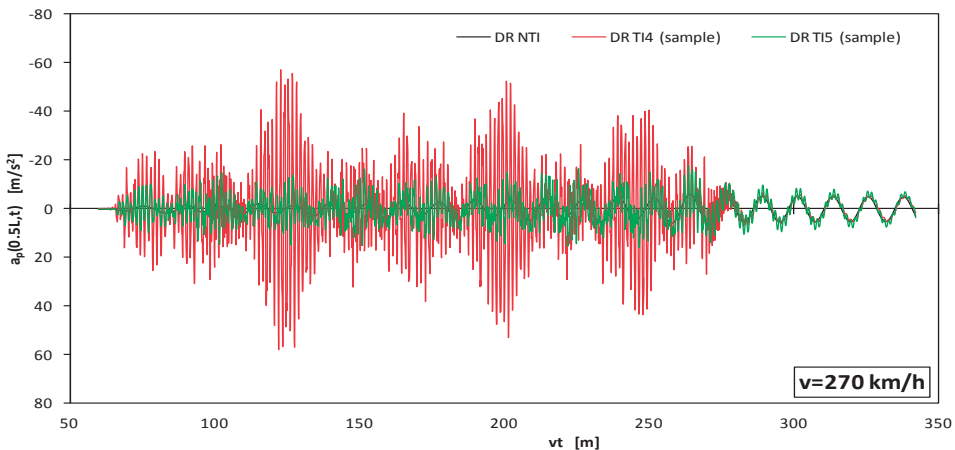
#### 4. Wielkości wynikowe i projektowe oraz wyniki symulacji

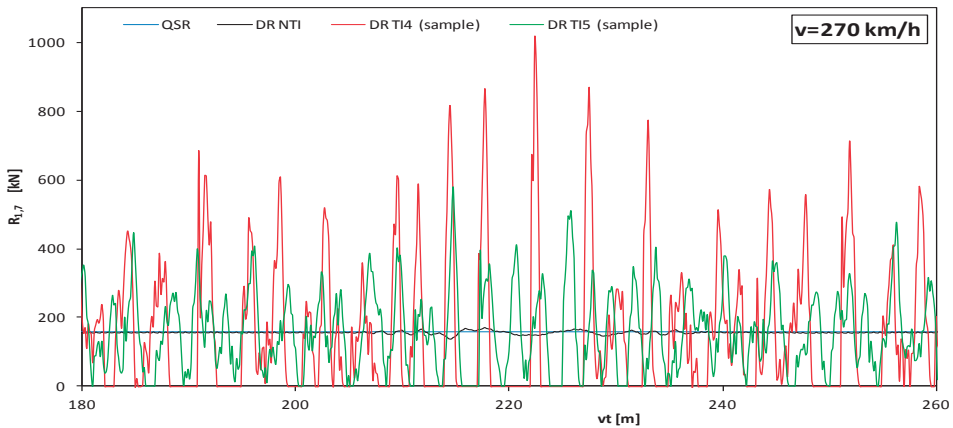
Wprowadzono następujące kody (pierwsze litery określeń angielskich): QSR – odpowiedź quasi-statyczna, DR – odpowiedź dynamiczna, NTI – brak nierówności toru, TI6, TI5, TI4 – nierówności toru odpowiadające stopniom linii kolejowych  $L_g = 6, 5, 4$ . Odpowiedź dynamiczną układu BTT charakteryzują następujące wielkości wynikowe:  $w(0.5L, t)$  – ugięcie konstrukcji nośnej mostu w środku rozpiętości [mm],  $\sigma(0.5L, t)$  – naprężenia normalne wzdłużne we włóknach dolnych stalowych belek głównych w środku rozpiętości [MPa],  $a_p(0.5L, t)$  – przyspieszenie pionowe pomostu w środku rozpiętości [ $m/s^2$ ],  $R_{ki}(t), k = 1, 2, 3, 4, i = 1, 2, \dots, N_v$  – dynamiczne naciski zestawów kołowych na szyny [kN],  $a_{bi}(t), i = 1, 2, \dots, N_v$  – przyspieszenia pionowe rejestrowane nad czopami zawiesznień wózka przedniego i tylnego w każdym nadwoziu [ $m/s^2$ ]. Ekstremalne wartości wielkości wynikowych nazwano wielkościami projektowymi. Dokładność całkowania sił interakcji wynosi  $\epsilon = 10^{-8}$  N, a dopuszczalna liczba iteracji wynosi 15.

Opracowano algorytmy obliczeniowe i program komputerowy do symulacji deterministycznych i losowych drgań pionowych układów BTT. Badania wstępne przeprowadzono w odniesieniu do pociągu ICE-3 poruszającego się z prędkościami rezonansowymi  $v_{31} = 180$  km/h,  $v_{21} = 270$  km/h (rezonans 1. układu modalnego z 3. i 2. składową harmoniczną ruchomego obciążenia okresowego) oraz z prędkością operacyjną maksymalną  $v_{max} = 300$  km/h. Wartości wielkości projektowych, odpowiadające próbom quasi-statycznym, deterministycznym i losowym, zestawiono w tab. 1, przy czym:  $maxw = \max_t w(0.5L, t)$ ,  $maxs = \max_t \sigma(0.5L, t)$ ,  $maxap = \max_t |a_p(0.5L, t)|$ ,  $minR = \min_t R_{ki}(t), k = 1, 2, 3, 4, i = 1, 2, \dots, N_v$ ,  $maxab = \max_t |a_{bi}(t)|, i = 1, 2, \dots, N_v$ . Przebiegi czasowe wybranych wielkości wynikowych pokazano na rys. 4-6.

Tabela 1. Wartości wielkości projektowych dla układu SCB-15 / nawierzchnia podsypkowa / ICE-3

Task	$maxw$ [mm]	$maxs$ [MPa]	$maxap$ [m/s <sup>2</sup> ]	$minR$ [kN]	$maxab$ [m/s <sup>2</sup> ]
$v = 30$ km/h, NTI	2,20	13,00	0,02	156,38	0,03
$v_{31} = 180$ km/h, NTI	6,74	43,29	7,44	141,43	0,24
$v_{31} = 180$ km/h, TI6 (próba losowa)	6,92	44,78	9,56	49,87	0,42
$v_{31} = 180$ km/h, TI5 (próba losowa)	6,39	42,06	12,92	0	0,66
$v_{31} = 180$ km/h, TI4 (próba losowa)	5,76	42,42	16,29	0	1,08
$v_{21} = 270$ km/h, NTI	5,82	38,25	6,12	136,51	0,22
$v_{21} = 270$ km/h, TI6 (próba losowa)	5,99	40,01	10,25	21,16	0,40
$v_{21} = 270$ km/h, TI5 (próba losowa)	6,57	44,39	18,03	0	0,63
$v_{21} = 270$ km/h, TI4 (próba losowa)	4,95	43,62	57,88	0	1,10
$v_{max} = 300$ km/h, NTI	4,37	27,18	3,75	138,74	0,12
$v_{max} = 300$ km/h, TI6 (pr. losowa)	4,28	27,51	6,47	0	0,23
$v_{max} = 300$ km/h, TI5 (pr. losowa)	4,29	29,26	12,71	0	0,41
$v_{max} = 300$ km/h, TI4 (pr. losowa)	4,19	33,84	34,85	0	0,74

Rys. 4. Naprężenie  $\sigma(0.5L, t)$  [MPa] odpowiadające prędkości rezonansowej  $v_{21} = 270$  km/hRys. 5. Przyspieszenie  $a_p(0.5L, t)$  [m/s<sup>2</sup>] odpowiadające prędkości rezonansowej  $v_{21} = 270$  km/h



Rys. 6. Dynamiczny nacisk  $R_{1,7}(t)$  [kN] odpowiadający prędkości rezonansowej  $v_{21} = 270$  km/h

Na podstawie prac [1, 9] warunek TSC ma postać  $maxap \leq a_{p,max} = 3.50$  m/s<sup>2</sup>, natomiast warunek PCC określa wzór  $maxab \leq a_{b,max}$ , gdzie  $a_{b,max} = 1.0, 1.3, 2.0$  m/s<sup>2</sup> odpowiednio dla bardzo dobrego, dobrego i akceptowalnego poziomu komfortu pasażerów.

## 5. Wnioski

Na podstawie wstępnych badań układu SCB-15 / nawierzchnia podsypkowa / ICE-3 sformułowano następujące główne wnioski. Wpływ nierówności toru na ugięcia i naprężenia konstrukcji mostu jest mały. Z kolei wpływ nierówności toru na przyspieszenia pomostu, dynamiczne naciski zestawów kołowych i przyspieszenia nadwozi pojazdów może być duży. Losowe nierówności toru mogą wywoływać nieznaczne rozstrojenie układu w rezonansie, co przekłada się na wzrost lub spadek ugięć i naprężeń. Ugięcia mostu SCB-15 nie przekraczają  $L/2000 = 7.5$  mm, a zatem warunek użyteczności jest spełniony. Warunek trwałości [7] jest spełniony z marginesem bezpieczeństwa 25%. Warunek TSC jest znacznie przekroczony w przypadku nierówności toru o stopniu  $L_g = 5$  i 4, co prowadzi do ryzyka destabilizacji podsypki na moście. Warunek PCC jest spełniony; zapewniony jest bardzo dobry lub dobry komfort podróży. Losowe nierówności toru o stopniu  $L_g = 5$  i 4 wywołują serię impulsów. W porównaniu z naciskiem statycznym, dynamiczne naciski zestawów kołowych mogą osiągać wartości kilkakrotnie większe w przypadku krytycznych lub bardzo dużych prędkości pociągu ICE-3. Nierówności toru  $L_g = 4$  są niedopuszczalne, gdyż prowadzą do przyspieszonej degradacji powierzchni tocznych kół i szyn.

*Praca została wykonana w ramach projektu badawczego własnego N N506 0992 40, finansowanego w latach 2011 – 2013 przez Narodowe Centrum Nauki.*

## Literatura

- 1 EN 1991-2. Eurocode 1: Actions on structures. Part 2: General actions – traffic loads on bridges. 2003.
- 2 EN 1990. Eurocode: Basis of structural design. Annex A2: Application for bridges, 2004.
- 3 Fryba L. Dynamics of railway bridges. Academia, Praha, 1996.
- 4 Wiriyachai A et al. Bridge impact due to wheel and track irregularities, J Engng Mech Div ASCE 108, 4 (1982) 648 – 666.
- 5 Lei X., Noda N.-A. Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile. J. Sound and Vibration 258, 1 (2002) 147 – 165.

- 6 Lu F. et al. An algorithm to study non-stationary random vibrations of vehicle – bridge system. *Computers & Structures* 87 (2009) 177 – 185.
- 7 Klasztorny M. *Dynamika mostów belkowych obciążonych pociągami szybkobieżnymi*. WNT, 2005.
- 8 Au F.T.K. et al. Impact study of cable stayed railway bridges with random rail irregularities. *Engineering Structures* 24 (2002) 529 – 541.
- 9 Song M.K. et al. A new three dimensional finite element analysis model of high-speed train – bridge interactions. *Engineering Structures* 25 (2003) 1611 – 1626.
- 10 Podworna M. Vertical vibrations of steel beam bridges induced by trains moving at high speeds. Part 1 – theory. *Archives of Civil Engineering* 51, 2 (2005) 179-209.
- 11 Podworna M. Vertical vibrations of steel beam bridges induced by trains moving at high speeds. Part 2 – numerical analysis. *Archives of Civil Engineering*, 51, 2 (2005) 211-231.
- 12 Podworna M. Determination of the design model for simulating vibrations of steel beam bridges under moving trains. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 4, 1 (2004) 57-69.
- 13 Majka M., Hartnett M. Dynamic response of bridges to moving trains: A study on effects of random track irregularities and bridge skewness. *Computers & Structures*, 87 (2009) 1233 – 1253.
- 14 Podworna M. Dynamics of a bridge beam under a stream of moving elements. Part 1 – Modelling and numerical integration. *Structural Engineering and Mechanics* 38, 3 (2011) 283-300.
- 15 Podworna M. et al. Modelowanie mostów zespolonych obciążonych pociągami szybkobieżnymi z uwzględnieniem losowych nierówności toru, Raport Bad. SPR/8/2013, Inst. Inż. Łądowej PWr, 2013.

## Effect of random track irregularities on selected composite bridge / track structure / high-speed train system vibrations

Monika Podworna<sup>1</sup>, Marian Klasztorny<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Department of Structural Dynamics, Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Technology, e-mail: monika.podworna@pwr.wroc.pl*

<sup>2</sup> *Department of Mechanics and Applied Computer Science, Faculty of Mechanical Engineering, Military University of Technology, Warsaw, e-mail: m.klasztorny@gmail.com*

**Abstract:** A theory of the quasi-exact physical and mathematical modelling of the composite (steel–concrete) bridge / ballasted track structure / high-speed train system (BTT) was developed, including viscoelastic suspensions of rail-vehicles on two-axle bogies, the non-linear Hertz contact stiffness and one-sided contact between the wheel sets and the rails, the viscoelastic and inertia features of the bridge, the viscoelastic track structure on and beyond the bridge, the approach slabs, and random track irregularities. Based on this theory, advanced computer algorithms for the BTT numerical modelling were written and a computer program to simulate the vertical vibrations of the BTT systems was developed. The bridge subject to the preliminary dynamic analysis and designed according to Polish standards has a 15.00 m span length. The bridge was loaded by the German ICE-3 high-speed train moving at the critical (180 and 270 km/h) and the maximum (300 km/h) operating speeds.

**Keywords:** steel–concrete composite bridge, ballasted track structure, ICE-3 high-speed train, random track irregularities, modelling, simulation, numerical analysis.