

EXPERIMENTÁLNE HODNOTENIE RÁZOVÝCH ÚČINKOV V KONŠTRUKCII TRATE

EXPERIMENTAL VALUATION IMPACT LOADING IN THE TRACK STRUCTURE

Milan MORAVČÍK¹

Abstrakt

Rázové zaťaženie vyskytujúce sa opakovane je dôležitým činiteľom zaťaženia konštrukcie trate. V článku je predstavená testovacia metóda dynamickej odozvy konštrukcie trate na ráz a prechodové impulzné zaťaženie. Dynamické zaťaženie je vytvárané testovacím zariadením pre rázové zaťaženie a dynamická odozva koľajovej dráhy – koľajníc, pražcov a lôžka je meraná a analyzovaná v časovej a frekvenčnej oblasti. Výsledky sú využité pri dynamickej analýze odozvy trate od pohybujúcich sa vlakov.

Kľúčové slová: experimentálne metódy, rázové zaťaženie, dynamická odozva konštrukcie trate, dynamická dátová analýza.

Abstract

The impact loading are encountered repeatedly as a important factor of the load in the track structure. The dynamic response of track structure to impact and transient impulsive load as a test method of the track structure is presented. The dynamic load is performed by a impact loading test device and the dynamic response of the railway track - rails, sleepers and the ballast bed is measured and analysed in the time and frequency domain. The result are exploited in the dynamic analysis of the track response due to moving trains.

Keywords: experimental methods, impact loading, dynamic response of the track structure, dynamic data analysis.

ÚVOD

Rázové zaťaženie konštrukcie trate od účinkov pohybujúcich sa koľajových vozidiel, resp. prejazdu vlakov predstavuje významnú zložku dynamického zaťaženia, ktoré nepriaznivo ovplyvňuje pohodlie jazdy, konštrukciu trate, aj koľajových vozidiel. V konštrukcii trate sa vyskytuje a hodnotí rázové zaťaženie:

1/ Vertikálne rázové zaťaženie:

- Priame rázy neodpružených podvozkov, resp. dvojkolesí koľajových vozidiel pri prejazde koľajových stykov, nerovnosti na koľajniciach, výhybiek a pod.
- Priame opakované rázy koľajových vozidiel s nerovnosťami na kolesách (ploché kolesá).
- Nepriame rázové účinky pohybujúcich sa vozidiel na konštrukciu trate pri jazde vysokými rýchlosťami.

¹ prof. Ing. Milan MORAVČÍK, CSc., KSM, SvF ŽU v Žiline, mimo@fstav.ute.sk
Lektoroval: doc. Ing. Vladimír KRIŠTOFOVIČ, CSc., KSM, SvF TU v Košiciach,
vladimir.kristofovic@tuke.sk

2/ *Horizontálne priečne rázové zaťaženie:*

- Priame rázy neodpružených dvojkolesí koľajových vozidiel – okolkov kolies na koľajové pásy. Rázové zaťaženie trate predstavuje veľmi krátko trvajúce silové účinky ($\Delta t \approx 0,008 - 0,015s$) s veľkými amplitúdami, ktoré vznikajú v dôsledku vzájomnej interakcie hmôt mechanickej sústavy pohybujúce sa koľajové vozidlo – trať, resp. interakčné silové účinky dvojkolesí podvozkov a koľajového roštu. Ide teda o krátkodobé časovo aj miestne koncentrované zaťaženie – hovoríme aj o impulzovom pôsobení interakčných síl koleso – koľajnica, ktorá sa následne prenáša celou konštrukciou trate. Všeobecne definujeme impulzové pôsobenie sily $F(t)$ integrálnou hodnotou

$$I_p = \int_0^{\Delta t} F(t)dt = F \int_0^{\Delta t} f(t)dt, \quad (1)$$

kde F je amplitúda sily, $f(t)$ je funkcia popisujúca charakter impulzu, Δt je dĺžka pôsobenia impulzu.

V súvislosti s rázovým zaťažením konštrukcie trate, ale všeobecne aj iných mechanických sústav, sa aplikujú teoreticko-experimentálne postupy riešenia, ktoré sa využívajú v dvoch smeroch

1. Hodnotenie dynamického chovania – dynamickej odozvy konštrukcie na rázové činky.
2. Určovanie dynamických vlastností a charakteristík konštrukcie.

Tento príspevok je venovaný prvej skupine úloh – experimentálnej analýze dynamickej odozvy konštrukcie trate na rázové zaťaženie trate priamo v prevádzkových podmienkach, ktorá dáva najlepší obraz o chovaní konštrukcie na takéto účinky. V poslednom období je v obľube aj počítačová simulácia takýchto účinkov, využívajúce štandardné programové systémy, ktoré majú zabudované výpočtové dynamické moduly na impulzové účinky rôzneho tvaru.

POPISOVANIE RÁZOVÝCH ÚČINKOV

Rázové účinky na konštrukciu popisujeme ako impulzové účinky vzťahom (1) a im odpovedajúca dynamická odozva konštrukcie sa obyčajne popisuje cez kinematické veličiny odozvy konštrukcie – dynamické posunutia a ich zrýchlenia a pomerné pretvorenia v charakteristických miestach konštrukcie.

- *Impulzové účinky sily*

Vhodnou metódou popisovania a analýzy impulzových účinkov je aplikácia Fourierovej transformácie (F.T.) na namerané časové funkcie $f(t)$, ktoré sú diskretizované na časové postupnosti

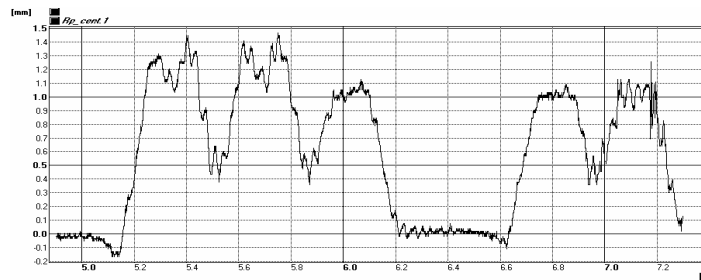
$$f(t) \rightarrow F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t).e^{-i2\pi ft} dt, \quad (2)$$

kde $f(t) \rightarrow f(n) : 0 \leq n \leq N-1$ je diskreditovaná časová funkcia na meranom intervale $\langle \Delta t \rangle$.

Experimentálne získané priebehy impulzov na konštrukciu trate majú charakteristické spojité spektrá (pozri spektrum rázovej sily na obr.6) a im odpovedajúce spektrá odozvy konštrukcie majú rôznorodý tvar v širokom frekvenčnom pásme (pozri spektrum spektra odozvy na obr.8).

- Časovo obmedzené zaťaženie – prechodové nestacionárne zaťaženie

V analýze dynamických účinkov pôsobiacich na konštrukciu trate prakticky najčastejšie sa stretávame s opakovaným zaťažením periodicky opakovaných silových impulzov vytváraných prejazdom podvozkov koľajových vozidiel vyšetřovaným miestom, obr. 1.



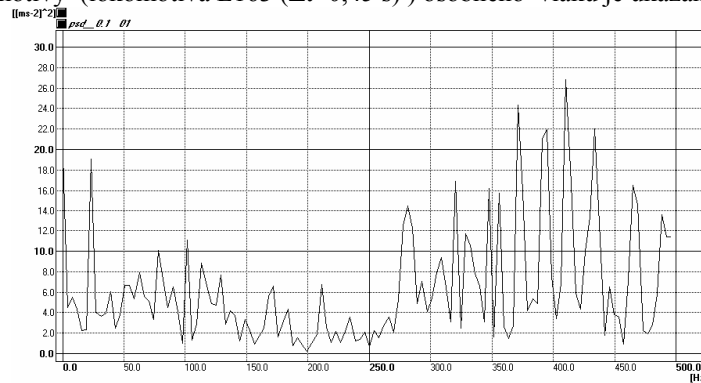
Obr.1 Vertikálny posun koľajového pásu $w_k(t)$ od účinku periodicky opakovaného zaťaženia podvozkami lokomotívy a prvého vagóna, snímač R_k BOSH - Teplička 2005

SPEKTRÁ ODOZVY KONŠTRUKCIE NA RÁZOVÉ ZAŤAŽENIE

Pri rázovom zaťažení konštrukcie nastáva prenos kinetickej energie rázu celou konštrukciou trate, ktorý sa odohráva v krátkom časovom intervale, pričom rozhodujúci je pomer doby trvania rázu v porovnaní s vlastnou frekvenciou kmitania konštrukcie. Pri prechodových dejoch kmitania, resp. nestacionárnom zaťažení konštrukcie sa porovnáva skúmaná odozva konštrukcie s niekoľkými periódami kmitania konštrukcie.

Najpoužívanejšie prístupy popísania dynamickej odozvy na rázové, resp. impulzové zaťaženie konštrukcie sú:

1/ *Amplitúdové spektrum odozvy konštrukcie* v jej charakteristických miestach a prierezoch, obyčajne na základe experimentálnej analýzy rázových účinkov aplikovanej v skutočných prevádzkových podmienkach využívania konštrukcie. V tejto súvislosti treba spomenúť využívanie teórie prenosových funkcií, ktoré priamo súvisia s aplikáciou Fourierových spektier na časové signály [3, 4] a dobre popisujú a objasňujú prenos silových účinkov rázu konštrukciou vo frekvenčnej oblasti. Príklad amplitúdového spektra zrýchlenia podvalu $\ddot{w}_p(t)$ pri prejazde prvého podvozku lokomotívy (lokomotíva L163 ($\Delta t=0,45$ s) osobného vlaku je ukázaný na obr.2.



Obr.2 Spektrum odozvy: vertikálne zrýchlenie podvalu A_p odpovedajúce prejazdu 1. podvozku lokomotívy ($\Delta t=0,45$ s)

2/ Aplikácia metódy konečných prvkov – teoreticko-simulačná analýza impulzových účinkov, ktorá využíva hodnotenie odozvy konštrukcie na simulované impulzové zaťaženie.

Teoretické riešenie rázových účinkov koľajových vozidiel na konštrukciu trate vedie na pomerne zložité numerické výpočtové postupy spojené s riešením odozvy koľajnice ako nosníka na pružnom podklade zaťaženého rázom neodpruženej hmoty m_o s výšky h (napríklad Frýba [1] a ďalší autori). Riešenie pohybových rovníc tejto úlohy pre dané okrajové a počiatočné podmienky, napr. L.C. transformáciou je komplikované a prácne, čo je hlavný dôvod hľadania iných prístupov riešenia úlohy. Takýmto prístupom je aj experimentálna analýza dynamickej odozvy založená na dynamickej rázovej skúške popísanej v ďalšom.

DYNAMICKÁ RÁZOVÁ SKÚŠKA

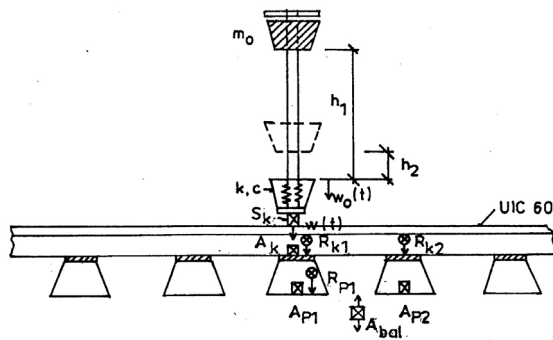
Za účelom hodnotenia vyššie uvedených dynamických interakčných javov koleso – koľajnica, najmä hodnotenia dynamickej odozvy trate od prevádzkového zaťaženia, sa navrhla dynamická rázová skúška konštrukcie trate, resp. koľajnicových pásov a podvalov pomocou mechanického pádstroja vyvodzujúceho impulzové zaťaženie konštrukcie trate (obr.3). Rázovou skúškou sa rýchlo a efektívne získa dynamická odozva trate – dynamické priehyby $w(x,t)$ zrýchlenia pohybov koľajnicových pásov a podvalov $\ddot{w}(x,t)$, prípadne prenosové funkcie budiaca sila – posunutie koľajového pásu H_{P-w} . Výsledky testov možno priamo využívať pre:

1/ Experimentálne overovanie dynamickej odozvy komponentov trate a účinky prenosu dynamických síl konštrukciou trate a účinnosť systémov pružného upevnenia koľajnice na podvaloch a ich tlmiace vlastnosti.

2/ Porovnávanie výsledkov analýzy dynamickej odozvy trate pri prejazde podvozkov vozidiel s výsledkami dobre definovaných rázových skúšok na koľajový rošt – odozvou koľajnicových pásov, podvalov a štrkového lôžka na krátkodobé impulzové zaťaženie.

Tlmený ráz - silový impulz I_p konečnej intenzity a konečného trvania je generovaný pádom pohyblivej hmoty m_o umiestnenej na vodiacej tyči ktorá dopadá zo zvolenej výšky h na pružinami odpružený tlmič pádstroja, charakterizovaný tuhosťou k_z pružín pádstroja, (obr. 3). Dopadom hmoty m_o na tlmič vzniká nepružný ráz. Za predpokladu, že silový impulz spôsobí okamžitú zmenu hybnosti hmoty m_o platí

$$I_{(m_o)} = m_o \cdot c_o = m_o \sqrt{2gh} \quad (3)$$



Obr.3 Schéma budenia impulzovým zariadením

Charakteristiky nami aplikovaného pádstroja sú: $m_o = 12,5 \text{ kg}$, $h_1 = 0,65 \text{ m}$, alebo $h_2 = 0,85 \text{ m}$ pričom sa vyvodzuje impulz s dĺžkou trvania $\Delta t \approx 0,014 \text{ s}$.

Veľkosť a priebeh reakcie $R(t)$ mechanického pádostroja, ktorou je v zmysle akcie a reakcie priamo zaťažovaná testovaná konštrukcia, má tiež charakter impulzu. Sila $R(t)$ sa určí pomocou známej tuhosti $k_{z,pad}$ pružín pádostroja, (obr.4)

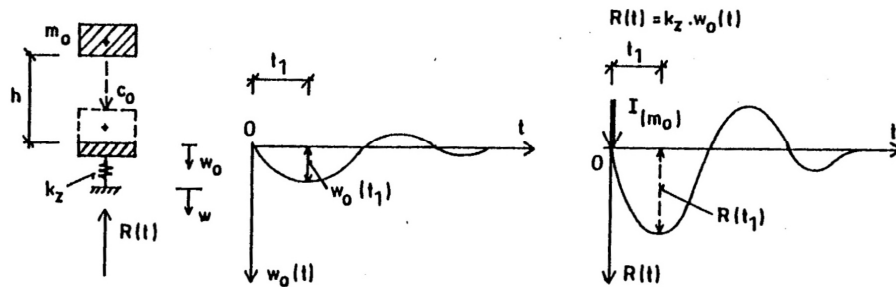
$$R(t) = k_{z,pad} (w_o(t) - w(t)) \quad (4)$$

kde $w_o(t)$ je stlačenie pružín pádostroja, $w(t)$ je vertikálny posun základne pádostroja, ktorý je rovný pružnému priehybu testovanej konštrukcie.

Za predpokladu, že posunutie $w(t) \ll w_o(t)$, čo je prakticky dobré splnené, pohybová rovnica hmoty m_o po ráze má jednoduchý tvar kmitania sústavy s jedným stupňom voľnosti (obr.4), ktorej riešenie je známe

$$\begin{aligned} w_o(t) &= w_{st} \frac{c_o \omega_o}{g} \sin \omega_o t + w_{st} (1 - \cos \omega_o t) \\ &= \sqrt{\frac{2G_o h}{k_{z,pad}}} \sin \omega_o t + \frac{G_o}{k_{z,pad}} (1 - \cos \omega_o t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{kde } \omega_o^2 = \frac{k_{z,pad}}{m_o}, \quad c_o = \sqrt{2gh}, \quad G_o = m_o g \quad (6)$$



Obr.4 Predpoklady teoretického určenia reaktívnej rázovej sily pádostroja

Reaktívnu silu mechanického pádostroja $R(t)$ môžeme pomocou priehybu $w_o(t)$ vyjadriť v tvare

$$R(t) = k_{z,pad} \cdot w_o(t) = \sqrt{2G_o h \cdot k_{z,pad}} \cdot \sin \omega_o t + G_o (1 - \cos \omega_o t). \quad (7)$$

Z podmienky extrémnej funkcie, napr. nulová rýchlosť $\dot{w}_o(t)$ pohybu hmoty m_o , sa určí amplitúda

$$w_{o,max} = w_o(t_1) = w_{st} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{c_o^2 \omega_o^2}{g^2}} \right] = w_{st} \cdot \delta, \quad (8)$$

$$\text{kde } \delta = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{c_o^2 \omega_o^2}{g^2}} \right) \text{ je dynamický súčiniteľ.} \quad (9)$$

Amplitúda rázovej sily vyvodzovaná pádostrojom vyjadrená pomocou (8) má potom hodnotu

$$R_{max} = R(t_1) = k_{z,pad} \cdot w_{o,max} = G \left[1 + \sqrt{1 + \frac{c_o^2 \omega_o^2}{g^2}} \right]. \quad (10)$$

Pre vstupné parametre pádostroja: $h = 0,65\text{m}$; $G_o = 12,5\text{ kg}$; $^{(1)}c_o^2 = 13\text{m}^2/\text{s}^2$ a tuhosť pružín tlmiča $k_{z,pad} = 0,65 \cdot 10^6\text{ N/m}$ teoretická hodnota rázovej sily podľa vzťahu (10) má hodnotu

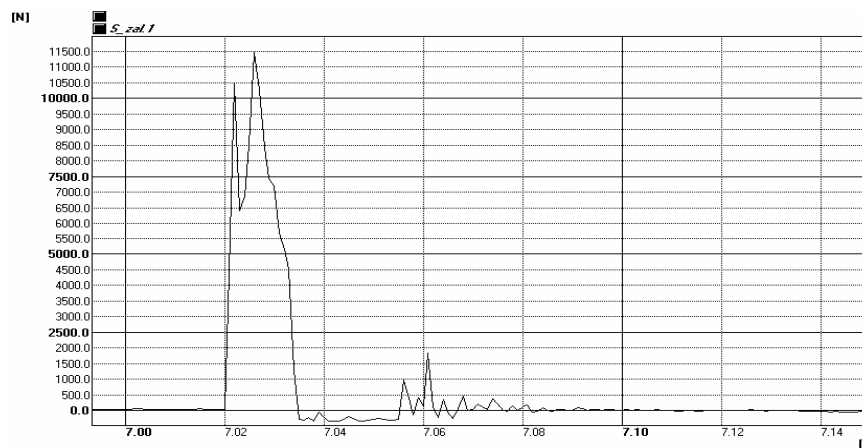
$$R_{max} = 10,65\text{ kN} \quad (10a)$$

Teoreticky získanú hodnotu rázovej sily R_{max} podstatne ovplyvňuje tuhosť pružín k_z [N/m] pádostroja, priebeh ktorej je všeobecne nelineárny, preto do (10) treba dosadzovať nastavené tuhosti z ciachovacej krivky tuhosti pružín pádostroja.

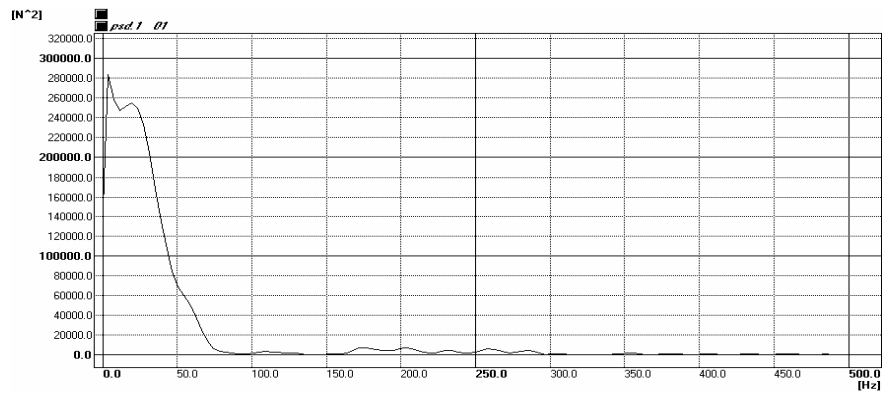
Podstatné zjednodušenie vyhodnocovania merania zaisťuje priame meranie veľkosti silového impulzu vnášaného do testovanej konštrukcie a následne aj jeho priamu transformáciu na meranú odozvu (pohyb, zrýchlenie konštrukcie, obr.5-8) pomocou snímača sily KISTLER (priame meranie sily do $P=200\text{kN}$) medzi pádostroj a meranú konštrukciu. Priame merania veľkosti rázovej sily snímačom sily KISTLER potvrdilo dobrú zhodu rázovej sily s teoreticky vypočítanou hodnotou podľa vzťahu (10).

DYNAMICKÁ ODOZVA KOĽAJOVÉHO ROŠTU NA IMPULZOVÉ ZAŤAŽENIE

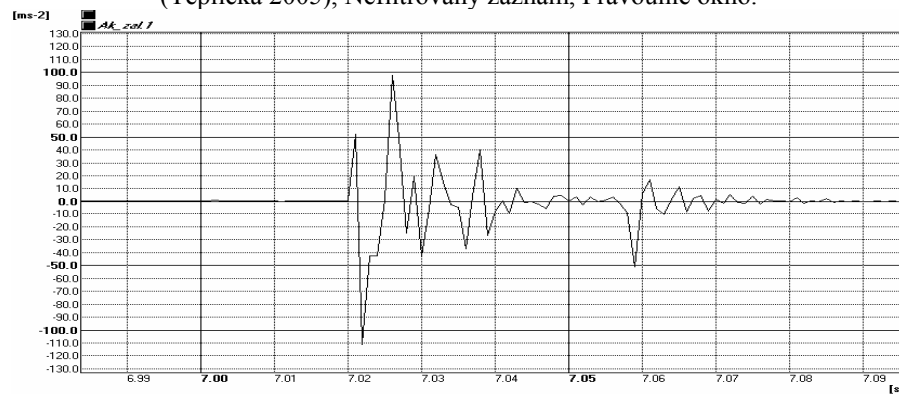
Schéma aplikovania silových impulzov na konštrukciu koľajového roštu, priamo v konštrukcii prevádzkovaných tratí, je ukázané na obr. 3. Merací reťazec sa skladal zo snímačov meranej odozvy – snímače BOSH vertikálne posunutia koľajového pásu R_k , posunov podvalov R_p a štrkového lôžka R_b a snímače zrýchlenia BK 450 A_k , A_p , A_b . Do meracieho reťazca bol zapojený aj snímač priameho merania impulzu sily KISTLER S_k vnášaného do konštrukcie trate a záznamového a vyhodnocovacieho systému DISYS riadeného počítačom. Príklad niektorých výsledkov analýzy rázového zaťaženia na konštrukciu trate vyhodnocovacím systémom DISYS je ukázaný na obr.5 až obr.8.



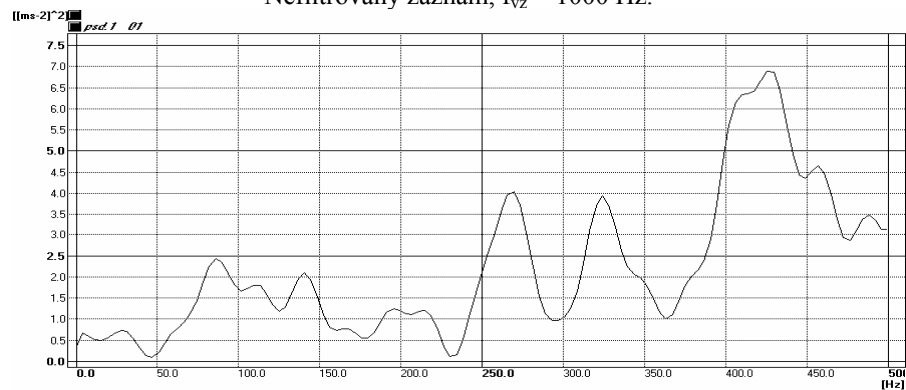
Obr.5 Rázové zaťaženie koľajového roštu mechanickým pádostrojom (Teplička 2005) - časový priebeh rázovej sily – snímač KISTLER S_k , $f_{vz} = 1000\text{ Hz}$



Obr.6 Analýza DISYS: Amplitúdové spektrum rázovej sily S_k – ráz na koľajový pás (Teplička 2005), Nefiltrovaný záznam, Pravouhlé okno.



Obr.7 Vertikálne zrýchlenie koľajového pásu A_k , ráz na koľajový pás (Teplička 2005) Nefiltrovaný záznam, $f_{vz} = 1000$ Hz.



Obr.8 Analýza DISYS: Amplitúdové spektrum zrýchlenia A_k pre $\Delta t=0,04$ s. Nefiltrovaný záznam, pravouhlé okno

ZÁVER

Prezentovaná metodika experimentálneho vyšetrovania dynamickej odozvy konštrukcie trate, resp. je komponentov – koľajových pásov, podvalov, štrkového lôžka a pružných väzieb medzi týmito komponentmi umožňuje hodnotiť vlastnosti konštrukcie trate v čase jej

prevádzkovania, najmä s ohľadom na jej premenné stavy v čase. Hlavné výhody popísanej metodiky experimentálneho hodnotenia dynamickej odozvy konštrukcie trate možno zhrnúť:

- Hodnotenie dynamickej odozvy konštrukcie na impulzové zaťaženie predstavuje rýchlu a efektívnu metódu monitorovania mechanických vlastností a zmien tuhosti väzieb konštrukcie počas doby jej prevádzkovania.
- Časové priebehy posunov meraných komponentov koľajového roštu – vertikálne pružné posunutia koľajových pásov $w_k(t)$, podvalov $w_p(t)$, štrkového lôžka $w_b(t)$, pomerné pretvorenia koľajníc $\varepsilon_k(t)$, na dobre definované impulzové zaťaženie dávajú základnú informáciu o tuhosti a pružných vlastnostiach konštrukcie priamo na neporušenej prevádzkovej konštrukcii.
- Časové priebehy zrýchlení posunov meraných komponentov $\ddot{w}_k(t)$, $\ddot{w}_p(t)$, $\ddot{\varepsilon}_k(t)$ a najmä ich spektrálna skladba – amplitúdové spektrá odozvy dávajú podrobnú informáciu o dynamických vlastnostiach konštrukcie a o vplyve dynamického zaťaženia na dynamickú odozvu v čase.
- Získané amplitúdové spektrá odozvy sledovaných veličín, resp. prenosové funkcie, merané cez posuny a ich zrýchlenia umožňujú priame zrovnávanie s meranou odozvou komponentov trate pri prejazdoch vlakov charakteristických úsekov trate, ktorá sa experimentálne meria a vyhodnocuje rovnakým meracím reťazcom.
- Navrhovaná metodika sa výhodne uplatňuje aj pri hodnotení funkčnosti systémov pružného upevnenia koľajníc a podvalov pri prenose interakčných dynamických síl koleso – koľajnica a pri určovaní dynamických charakteristík komponentov trate.
- Popísaný prístup hodnotenia dynamickej odozvy sa uplatní najmä pri prevádzkovaní železničných koridorov s vysokými prevádzkovými rýchlosťami, kedy prejazd každého dvojkolesia, resp. podvozku koľajového vozidla vyvodzuje v danom mieste trate impulzové zaťaženie konštrukcie.

Experimentálne dynamické merania sa vykonali za finančnej podpory grantovej agentúry VEGA MŠ SR v rámci riešenia projektu č.1/0340/03

LITERATÚRA

- [1] KOLOUŠEK, V.: *Dynamika stavebných konštrukcií* III. SNTL Praha 1961.
- [2] BRUEL & KJAER: Booklet Vibration testing 1983
- [3] MORAVČÍK M.: *Mechanika železničných tratí*. Diel 3 – Experimentálna analýza namáhania a pretvorenia komponentov trate. EDIS Žilana 2002
- [4] MORAVČÍK M.: *Skúsenosti z testovania trate pre overovanie teoretických modelov*. Komunikácie, Vedecké listy ŽU 1/99