

Jaroslav Smutný<sup>1</sup>, Vladimír Tomandl<sup>2</sup>, Ivan Vukušič<sup>3</sup>, Luboš Pazdera<sup>4</sup>

## Vybrané metody modální analýzy uplatňované na železniční infrastrukturu

**Klíčová slova:** *modální analýza, modální útlum, rázové kladivo, elektrodynamický budič, kolejový rošt*

### Úvod

Neustálé zvyšování nároků na únosnost železničních konstrukcí vede k vyšší tuhosti konstrukčních vrstev a zemní pláně. Používají se rovněž již téměř výhradně betonové pražce, které mají mnohem vyšší ohybovou tuhost a menší pružnost než pražce dřevěné. Všechny tyto aspekty vedou k většímu namáhání kolejového lože, které pod zvyšujícím se zatížením mění svůj tvar a tím ovlivňuje geometrické parametry koleje. V běžné koleji z výše popsaných důvodů dochází ke zhroucení šterkové lavičky za hlavami pražců. Vlivem vysoké ohybové tuhosti betonových pražců, se zde vytvoří volné prostory mezi pražcem a šterkem. Při průjezdu vlaku pak pražce dosedají na zhroucenou šterkovou lavičku, čímž vzniká nerovnoměrné podepření pražců a zvyšují se dynamické účinky, což zrychluje degradaci kolejového lože.

---

<sup>1</sup> Prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D. je absolventem Fakulty elektrotechnické VUT v Brně. Od roku 1990 je zaměstnán na Fakultě stavební VUT v Brně. V roce 2009 byl jmenován profesorem pro obor Konstrukce a dopravní stavby. Je členem významných profesních společností, např. České akustické společnosti, České asociace pro geoinformace a společnosti sdružující aktivní uživatele časově frekvenčních metod signálové analýzy Time & frequency user club National Physical Laboratory. Je odborníkem v oblasti měřících metod a techniky, dále v problematice hluku a vibrací od dopravy. Zabývá se také problematikou aplikace umělé inteligence, dopravní telematiky a GIS. V rámci svého zaměření spolupracuje s průmyslovými podniky působícími v oblasti silniční a železniční dopravy.

<sup>2</sup> Ing. Vladimír Tomandl je absolventem oboru Konstrukce a dopravní stavby prezenční formy magisterského studia Fakulty stavební VUT v Brně, kde od roku 2008 pokračuje v postgraduálním studiu na Ústavu železničních konstrukcí a staveb. V roce 2007 vstoupil do Výzkumného Ústavu Železničního, a.s., kde na pracovišti v Brně zastává funkci specialisty pro železniční infrastrukturu.

<sup>3</sup> Ing. Ivan Vukušič je absolventem oboru Konstrukce a dopravní stavby prezenční formy magisterského studia Fakulty stavební VUT v Brně, kde od roku 2007 pokračuje v postgraduálním studiu na Ústavu železničních konstrukcí a staveb. V roce 2007 vstoupil do Výzkumného Ústavu Železničního, a.s., kde na pracovišti v Brně zastává funkci specialisty pro železniční infrastrukturu.

<sup>4</sup> Prof. Ing. Luboš Pazdera, CSc. je profesorem v oboru Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství na Vysokém učení technickém (VUT) v Brně. Absolvoval obor Regulační, přístrojová a automatizační technika na VUT v Brně. Od roku 1988 je zaměstnán na Stavební fakultě VUT v Brně. Je členem České společnosti pro nedestruktivní testování. Je akademickým pracovníkem na Ústavu fyziky Fakulty stavební VUT v Brně. V rámci svého zaměření spolupracuje s průmyslovými podniky působícími v oblasti výroby železničních dvojkolí a železničních pražců.

Abyste se těmto nežádoucím dějům co nejvíce zamezilo, musí být vkládány nemalé finanční prostředky do diagnostiky kvality geometrie koleje a její případné údržby. Kvalita geometrie běžné koleje je obecně řešena evropskými i vnitrostátními pravidly. V České republice jsou četnost provádění kontrol, stavební, provozní a mezní provozní odchylky geometrických parametrů koleje resp. stavební a provozní odchylky prostorové polohy koleje uvedeny v několika dokumentech, zejména pak v [1] a [2]. Vybranou sítí celostátních drah je Česká republika zavázána udržovat tak, aby byla interoperabilní vůči drahám ostatních států v evropském železničním systému [3].

Výše uvedené skutečnosti mj. vedou k neustálé snaze o zdokonalování konstrukcí železničního svršku a uzpůsobení jejich vlastností s ohledem na podmínky, v nichž mají být použity. Důležitým aspektem při rozhodování o výběru a použití nového konstrukčního prvku je teoretická analýza (modelování). Účinky kolejových vozidel na konstrukci tratě se řeší jako interakční účinky dvou mechanických soustav, a to pohyblivého se kolejového vozidla a konstrukce tratě. Všeobecně jde o řešení složité dynamické úlohy, ve které konstrukce tratě vystupuje jako mechanická soustava tvořená kolejových roštem a pražcovým podložím, která je typickou prostorovou 3D soustavou, avšak je možné ji modelovat také jako jednodušší rovinnou 2D soustavu, protože zjednodušené řešení dává přijatelné výsledky.

Běžná kolej se skládá z několika prvků, které mají různou schopnost deformace. V místě kontaktu kola vozidla s kolejnicí se přenáší síly mezi vozidlem a železniční tratí. Jedná se o složité dynamické síly obecného charakteru. Tyto interakční síly zahrnují zejména tíhové a setrvačné účinky vozidla, odstředivé síly, podélné síly způsobené změnou rychlosti pojezdu apod. Na jejich velikost mají vliv nerovnosti kolejnic i kol a další poruchy tratě. V místě kontaktu neplatí lineární vztah mezi interakční silou a deformací. Tento vztah závisí na geometrii kontaktní plochy a lze jej vyjádřit tuhostí Hertzovy pružiny. Kolejnice a pražce jsou charakterizovány ohybovou tuhostí. Podložky pod patu kolejnice jsou modelovány užitím soustavy pružin a tlumičů. Kolejové lože a podloží je obvykle modelováno podle Winklerovy hypotézy. I nejjednodušší modely pak zahrnují jak model koleje, tak i model kolejového vozidla.

V teoretických řešeních úloh mechaniky tratě má mimořádný význam koncepce přenosové funkce, protože představuje efektivní charakteristiky lineární soustavy, které se využívají i při všeobecném buzení, resp. při stochastické analýze konstrukce tratě nebo interakční soustavy kolejové vozidlo – trať. Frekvenční odezvovalá funkce je ovlivněna hmotností, tlumením a tuhostí. Tyto parametry určují vlastní frekvence. Pokud se v zatížení vyskytne složka s touto frekvencí, projevuje se vysokými dynamickými účinky.

Teoretická analýza konstrukčních prvků železničního svršku bývá současně podpořena laboratorními zkouškami na hotovém výrobku [4] a [5], příp. zkouškami in situ [6]. Velmi často je také experimentální analýza prováděna za účelem ověření správnosti výpočtových modelů. Experimentálním zjištěním modálních parametrů, tzn. vlastních frekvencí, vlastních tvarů, příp. modálního tlumení, lze srovnat takto získaná data s výstupy teoretické analýzy. Následně je možné zpětně upravit vstupy pro výpočtové modely, např. mírnou změnou materiálových charakteristik,

či přidáním modálního tlumení do výpočtu. Postupy aplikované na testované struktury za účelem získání matematického popisu jejich dynamického chování obecně nazýváme modálními zkouškami [7].

## 1. Teoretický rozbor řešené problematiky

Testovanou strukturu je možné popsat pomocí tří různých typů modelů, jež se navzájem liší v zápisu systémových matic:

- fyzikální model
- modální model
- odezvový model

Odezvovým modelem se při experimentální vibrační analýze rozumí počáteční změření vhodné množiny frekvenčních odezvových funkcí FRF (z angl. Frequency Response Function). Následnou analýzu naměřených dat lze označit jako modální model. V rámci experimentální analýzy se zpravidla neuplatňuje fyzikální model. Ten slouží k sestavení pohybových rovnic v rámci vytváření výpočtového modelu.

Modální zkoušky lze v obecnosti rozdělit na dva základní typy:

- měření vstupních i výstupních parametrů
- měření jednoho parametru (obvykle úrovně odezvy na buzení)

Princip experimentální modální analýzy prvního typu spočívá ve vybuzení měřené konstrukce určitou silou a v současném měření vibrační odezvy převážně snímačem zrychlení. Tento přístup předpokládá současné měření budící síly snímačem síly. Pokud chceme získat odezvový model dané struktury, musíme měření realizovat v dostatečném počtu měřících míst na struktuře. Odezvový model je pak tvořen maticí frekvenčních přenosových funkcí. Je vhodné podotknout, že pokud jde jen o analýzu přenosu vibrací od místa buzení do určitého cílového místa, je možné použít zjednodušený přístup měření. Tzn. působení buzení v jednom bodě a snímání odezvy v druhém vhodně zvoleném bodě. Je zřejmé, že tento přístup je vhodný při zkoumání přenosových vlastností různých typů upevnění. Způsoby buzení jsou v zásadě dva:

- rázem, realizuje se převážně rázovým kladívkem se snímačem síly
- elektrodynamickým budičem, kde budící síla působící na měřenou strukturu je opět měřena snímačem síly. Výhodou tohoto způsobu buzení je zejména velký výběr budících signálů. Používá se zejména náhodný signál, rozmítaný sinus apod. Přenos budících vibrací se realizuje pomocí budící tyčky

V rámci modálních zkoušek druhého typu není možné určit, zda vysoká úroveň odezvy testované struktury je způsobená silným buzením nebo rezonancí. Tento typ měření je v oblasti železničních konstrukcí využíván při vibrodiagnostických zkouškách in situ, kdy budící jednotkou je přímo kolejové vozidlo. V rámci srovnávacích měření pak bývá podmínkou, aby toto vozidlo bylo charakterizováno stejným nebo podobným chováním (rychlost, nápravové zatížení, geometrie podvozku).

## 1.1 Frekvenční odezvosvá funkce FRF

Frekvenční odezvosvá funkce FRF je specifickým případem přenosové funkce. Jedná se o funkci získanou řezem přenosovou funkcí v komplexní Laplaceově oblasti. Tento řez je rovnoběžný s imaginární osou oblasti. FRF je možné vyjádřit poměrem výstupu ke vstupu, pohybem vůči síle, resp. odezvou na příslušné buzení. Odezvosvé parametry FRF mohou být vyjádřeny formou výchylky, rychlosti nebo zrychlení. FRF vyjadřující poměr výchylky vůči síle se nazývá funkcí receptance (dynamické poddajnosti), která je základní funkcí výpočtové modální analýzy. Inverzí této funkce vyjádříme strukturální dynamickou tuhost. Při aplikaci experimentální modální analýzy, kdy se pro měření odezvy systému nejčastěji používají akcelerometrické snímače, je praktičtější využití funkce akcelerance, tedy vzájemného vztahu mezi zrychlením a budicí silou. Inverzí funkce akcelerance získáme vztah pro zdánlivou hmotnost zkoumaného systému. Pro převod mezi jednotlivými typy FRF platí základní matematický vztah mezi výchylkou  $y$  [m], rychlostí  $v$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] a zrychlením  $a$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]:

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}. \quad (1)$$

Konstrukci železničního svršku si lze představit jako viskózně tlumenou soustavu o jednom stupni volnosti s vynuceným kmitáním, která je charakterizována svojí pružností  $k$  [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ], tlumením  $c$  [ $\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1}$ ] a hmotností  $m$  [kg]. Chování této soustavy je popsáno následující diferenciální rovnicí pro neznámou funkci posunutí  $w(t)$  [m]:

$$m \frac{d^2 w(t)}{dt^2} + c \frac{dw(t)}{dt} + kw = F(t). \quad (2)$$

Nalezení řešení v časové oblasti je obtížné. Pro jednoduché funkce  $F(\tau)$  je možné jej nalézt při použití funkce odezvy na jednotkový impuls  $h(\tau)$  ve tvaru [8]:

$$w(t) = \int_0^t h(\tau) F(t - \tau) d\tau. \quad (3)$$

Volí se cesta nalezení funkce frekvenční odezvy  $H(f)$  pomocí Fourierových transformací. Tato funkce popisuje vztah mezi odezvou a buzením ve frekvenční oblasti. Známe-li časový průběh zatížení, provede se její Fourierova transformace a odezva ve frekvenční oblasti  $W(f)$  se vypočte násobením funkcí frekvenční odezvy:

$$W(f) = H(f) \cdot F(f). \quad (4)$$

Funkce frekvenční odezvy pro soustavu s jedním stupněm volnosti je definována vztahem:

$$H(f) = \frac{W(f)}{F(f)} = \frac{1}{k} \frac{1}{1 - \frac{f^2}{f_n^2} + i \cdot 2\beta \frac{f}{f_n}}, \quad (5)$$

kde  $f_n$  [Hz] jsou netlumené vlastní frekvence a  $\beta$  [-] je poměrný útlum soustavy:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}; \beta = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}}. \quad (6) \text{ a } (7)$$

Dosazením za  $f = 0$  získáme ze vzorce (5) vztah pro statické hodnoty:

$$H(0) = \frac{1}{k}. \quad (8)$$

V polárních komplexních souřadnicích lze napsat funkci (5) jako součin faktoru zisku  $|H(f)|$  a fázového posunu  $\Phi(f)$ :

$$H(f) = |H(f)|e^{-i\phi(f)}, \quad (9)$$

kde je:

$$|H(f)| = \frac{\frac{1}{k}}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_n^2}\right)^2 + 4\beta^2 \cdot \frac{f^2}{f_n^2}}}, \quad (10)$$

$$\phi(f) = -\arctan \frac{2\beta \cdot \frac{f}{f_n}}{1 - \frac{f^2}{f_n^2}}. \quad (11)$$

I když je pouze velmi málo praktických struktur, které mohou být realisticky modelovány systémem s jedním stupněm volnosti SDOF (Single Degree of Freedom), vlastnosti takového systému jsou velmi důležité, protože vlastnosti složitějšího systému s více stupni volnosti MDOF (Multi Degree of Freedom) mohou být vždy vyjádřeny jako lineární superpozice mnoha SDOF charakteristik [9].

## 1.2 Buzení rázem

Nejrychlejším a nejjednodušším způsobem, jak vybudit kmitání testované struktury je použití rázového kladiva. Rozsah frekvencí, který je účinně vybuzen, je dán tuhostí dotýkajících se povrchů a hmotností hlavy kladiva. Úderem hrotu do testované struktury je vyvolán silový impuls. Z hlediska frekvenčního obsahu je tento impuls do určité frekvence v podstatě plochý. Tím je dán frekvenční rozsah kladiva. Ten je možné měnit použitím různých typů hrotů a příp. hlav kladiva. Čím jsou materiály tužší, tím kratší je délka trvání pulsu a tím vyšší je frekvenční rozsah. Mezi hmotností kladiva a frekvenčním rozsahem pak platí nepřímá úměra.

Výhodami této metody jsou snadná použitelnost v provozních podmínkách a rychlost daná malým rozsahem přípravných prací. Nevýhoda buzení rázovým kladívkem spočívá ve velkém činiteli amplitudy  $A_{max}/A_{ef}$ . V případě některých struktur může vysoký činitel amplitudy způsobit nelineární odezvu.

### **1.3 Buzení pomocí připojeného budiče vibrací**

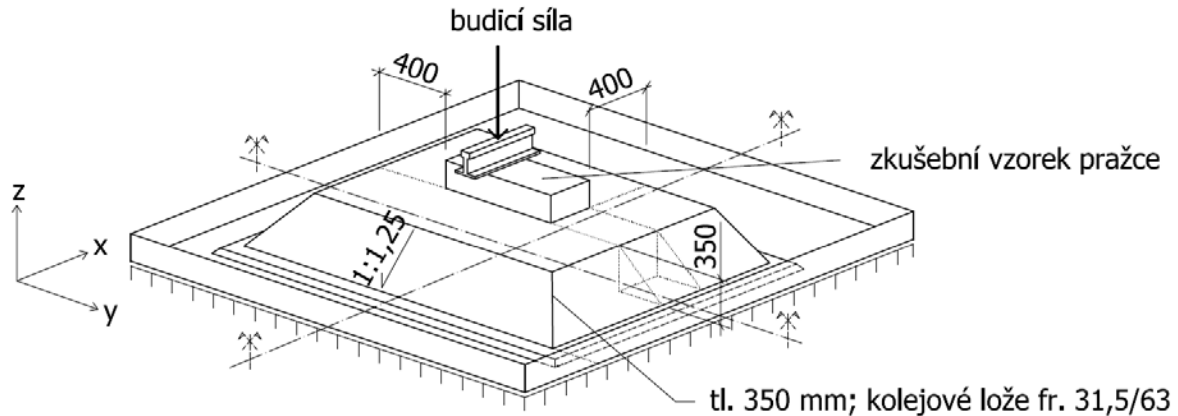
V případě buzení vzorků kolejnicových upevnění elektrodynamickým budičem použil autorský kolektiv jiný způsob buzení, než je popsán v rychlém přehledu na začátku této kapitoly. Bylo využito inerciálního elektrodynamického budiče s řídicím systémem. Jeho hlavní výhodou je, že se přímo prostřednictvím připojovací desky montuje na zkoušenou strukturu a nevyžaduje použití finančně nákladného snímače síly. Zároveň umožňuje i aplikaci budících signálů získaných v rámci měření v terénu, jež jsou charakterizovány reálným frekvenčním obsahem. Z těchto důvodů je budící systém vybaven elektronickým řídicím systémem, který eliminuje v rámci buzení rezonance struktury. Kmitočtová charakteristika buzení není plochá, obsahuje rezonanční maxima a další rezonance zanáší testovaný objekt namontovaný na budiči. V rámci frekvenčního pásma se tedy zisk zesilovače musí měnit s kmitočtem. Tento zisk je nastavován kontrolérem, jenž dostává zpětnovazební informaci ze snímačů umístěných na testovaném objektu.

K hlavním řídicím prvkům budiče patří generátor kmitočtu, měřič vibrací a obvod, který nastavuje úroveň. Digitální řídicí systém budiče tedy představuje výkonné a ekonomické řešení pro široké spektrum otřesových a vibračních testů. Jak je navíc z výše uvedeného popisu patrné, tento způsob buzení nevyžaduje snímač budící síly, vystačí se pouze se snímačem zrychlení v blízkosti budiče. Ve spojení s elektrodynamickým budičem umožňuje reprodukovat vlivy skutečného prostředí v laboratorních podmínkách. Pro testování konstrukcí se používá klasická průmyslová metoda testů náhodnými vibracemi, rozmítanými sinusovými kmity, otřesovými vibracemi i signály zemětřesení.

## **2. Metodika měření**

Základním cílem měření bylo srovnání zkušebních vzorků kolejnicových upevnění v laboratoři z hlediska odezvy na vibrace s výsledky získanými in situ, stejně tak jako ověření, zda lze na základě získaných frekvenčních odezvových funkcí predikovat praktické využití jednotlivých systémů upevnění kolejnic, jejich vlastnosti apod. Byla zvolena metoda buzení rázovým kladivem doplněná o buzení pomocí elektrodynamického budiče.

V laboratoři byla jako zkušební vzorek použita část pražce s uzlem upevnění. Pražec byl uložen do štěrkového lože tvaru komolého jehlanu, které bylo zřízeno ve zkušební vaně o rozměrech 2,0 x 2,0 m. Rozměry a tvar vzorku jsou zachyceny na obrázku č. 1. Zkušební vana byla od základové desky odizolována mezivrstvou z korku. Laboratorní zkoušky byly prováděny v březnu 2012 v laboratoři Ústavu pozemních komunikací a Ústavu železničních konstrukcí a staveb VUT v Brně. O měsíc později byla uskutečněna doplňková měření in situ. Pro tyto účely byl vybrán zkušební úsek na trati č. 260 v km 166,140 v lokalitě u Bílovic nad Svitavou. In situ byla z důvodů pravidelného provozu na trati využita pouze metoda buzení rázovým kladivem.



Obr. 1 Schéma zkušebního vzorku

## 2.1 Zkušební vzorky

V laboratoři byly testovány následující typy přímých pružných bezpodkladnicových upevnění pro soustavu UIC 60 a rozšíření rozchodu +RK 0 mm:

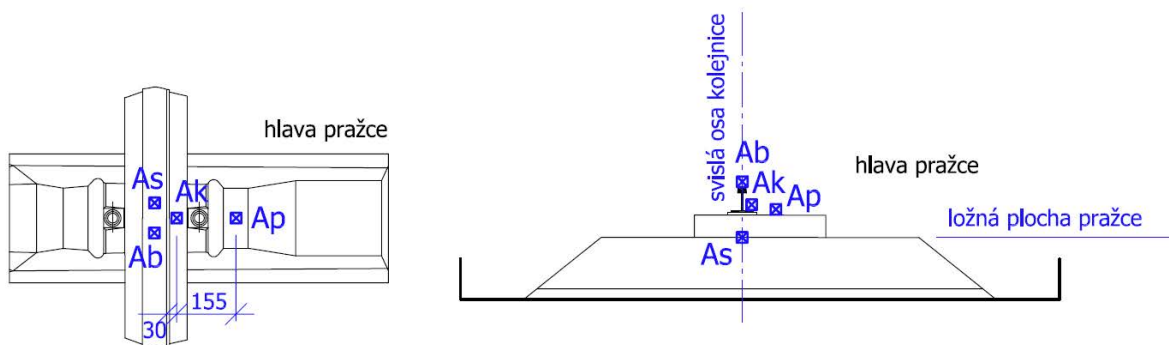
- část pražce B 91P s kotvami Fastclip a bočním izolátorem 7049
  - upevnění Pandrol FC I
    - pružné spony FC 1501 s izolátory 8494, podložka pod patu kolejnice 6530
- část pražce B 91S/1 s polyamidovou otevřenou hmoždinkou
  - upevnění Vossloh W 14
    - pružné svěrky Skl 14, úhlové vodící vložky Wfp 14K-12, vrtule R1 s podložkami Uls 7, podložka pod patu kolejnice WU 7 se statickou sečnou tuhostí  $55 \div 75 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ , stanovenou vybranými postupy dle [10]
  - upevnění Vossloh W 14NT
    - pružné svěrky Skl 14, úhlové vodící vložky Wfp 14K NT, vrtule R1 s podložkami Uls 7, podložka pod patu kolejnice Zw 900 NT 150/160 se statickou sečnou tuhostí  $55 \div 75 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$
  - upevnění Vossloh W 21NT
    - pružné svěrky Skl 21, úhlové vodící vložky Wfp 21K NT-12, vrtule R1 s podložkami Uls 7, podložka pod patu kolejnice Zw 1000/150 HS-35 se statickou sečnou tuhostí  $35 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$
  - upevnění Vossloh E 14
    - pružné svěrky Skl 21, úhlové vodící vložky Wfp 16G / Wfp 16F, vrtule R3 s podložkami Uls 7, podložka pod patu kolejnice Zw 693/150, ocelová roznášecí deska Grp 22/150, vysoce pružná podložka Zwp E14 NT/150 se statickou sečnou tuhostí  $27,5 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$  ( $40 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$  v přechodových úsecích)

Ověřující měření in situ byla prováděna na upevnění Vossloh W 14 v koleji č. 1, resp. na upevnění Pandrol FC I v koleji č. 2 předmětného úseku trati.

Kolejnicová upevnění Pandrol FC I a zejména Vossloh W14 jsou nejběžněji používaná pružná bezpodkladnicová upevnění v České republice. Setkáme se s nimi ve všech modernizovaných úsecích tranzitních železničních koridorů a drah celostátního významu. Upevnění W 14NT je vybaveno úhlovými vodicími vložkami Wfp 14K NT opatřenými na spodní ploše speciální vodicí lištou. Tato lišta zasahuje v montážní poloze pod patu kolejnice, čímž zabraňuje nadměrnému vyklápění či poklesu kolejnice. Z tohoto důvodu je upevnění W 14NT s výhodou používáno v koleji se směrovými oblouky o malých poloměrech. Upevnění E 14 řadíme mezi upevnění se zvýšenou svislou pružností. Upevnění E 14 je vhodné tam, kde je potřeba zvýšit tlumení dynamických účinků, resp. snížit emitovanou hladinu hluku. Konstrukce tohoto upevnění vychází principiálně z upevnění typu System 300 určeného pro pevnou jízdní dráhu. Vysoce pružná podložka Zw E14 NT/150 částečně nahrazuje tlumící účinky kolejového lože, takže upevnění E 14 lze s výhodou použít například v místech, kde není možné zřídit kolejové lože dostatečné tloušťky. Pro ukázkou lze uvést hlavní staniční koleje vedoucí nad stávajícím podchodem v železniční stanici Kolín. Upevnění W 21NT prochází v České republice stádiem provozního ověřování. Jedná se o upevnění s vysoce pružnou podložkou pod patu kolejnice Zw 1000/150 HS-35. Této zvýšené svislé pružnosti odpovídá také vyšší únavový limit svěrek Skl 21. Oblast použití upevnění W 21NT je obdobná jako u upevnění W 14NT resp. E 14.

## 2.2 Uspořádání zkoušky

Laboratorní vzorky kolejového roštu byly osazeny snímači dle obrázku č. 2. Z pohledu příčného řezu byla všechna čidla umístěna do podélné osy pražce. Umístění snímačů Ak a Ap vzhledem ke stojině kolejnice bylo voleno koncepčně v souladu s předchozími měřeními [11]. Vzhledem k umístění čidla As do šterku pod ložnou plochu pražce byl na Ústavu železničních konstrukcí a staveb vyvinut speciální měřicí kámen. Měřicí kámen byl opatřen otvorem pro vložení snímače. Tento otvor byl následně zaslepen, viz obrázek č. 3. V rámci měření in situ nebylo čidlo As osazeno.



Ab ... snímač na budiči (v případě eldyn. vibrátoru bude akcelerometr umístěn na roznášecí desce)

Ak ... snímač na patě kolejnice

Ap ... snímač na hlavě pražce

As ... měřicí kámen na ložné ploše pražce

Obr. 2 Schéma rozmístění čidel





Obr. 3 Měřicí kámen se snímačem As

Jako snímače byly využity vhodné akcelerometry Brüel & Kjær, jež byly před měřením kalibrovány. Ráz byl buzen kladivem Brüel & Kjær, typ 8210 Impact Hammer, s budícím hrotem Hard tip black. Pro řízené buzení byl použit elektrodynamický budič TIRA TV 51165-IN. Shaker S 517-IN byl umístěn přímo na hlavu kolejnice, a sice prostřednictvím speciálně upravené roznášecí desky. Aparatura budiče TIRA se dále sestávala ze zesilovače Amplifier BAA 1000, Bloweru SB0140 a čtyř-kanálového řídicího systému VibrationVIEW. Data z obou metodik měření byla zpracovaná pomocí modulárního analyzátoru PULSE 3560D od společnosti Brüel & Kjær. Uspořádání zkoušky je patrné z obrázků č. 4 až 6.



Obr. 4 Uspořádání zkoušky buzení rázem



Obr. 5 Uspořádání zkoušky buzení vibrátorem



Obr. 6 Uspořádání ověřovací zkoušky in situ

### 3. Vyhodnocení získaných dat

Hodnocenou veličinou rázového buzení byla akcelerance a v případě buzení elektrodynamickým budičem TIRA normovaná hodnota zrychlení vibrací. Po počátečním odzkoušení byl nastaven frekvenční rozsah měření  $0 \div 1000$  Hz.

V případě rázového vyhodnocení byla provedena pro každý typ upevnění tři opakovaná laboratorní měření akcelerance, každé získané z deseti úderů kladiva.

U upevnění Vossloh bylo navíc testováno chování nedotažené a přetažené sestavy. Tento typ měření byl prováděn pouze dvakrát. Utahovací moment vrtule byl nastaven v kroku 150 MN (nedotažení), 200 MN (předpisové utažení) a 250 MN (přetažení).

Laboratorní měření normovaného zrychlení vibrací bylo pro každý typ upevnění uskutečněno také metodou elektrodynamického buzení ve dvou cyklech. Zrychlení generované budičem bylo po počátečním odzkoušení nastaveno na  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . V tomto případě již nebyl sledován vliv dotažení vrtule. Všechna upevnění Vossloh tak byla dotažena utahovacím momentem 200 MN.

Rázové kladivo bylo použito také v případě ověřovacího měření in situ. Frekvenční rozsah i metodika zjišťování akcelerance byla obdobná jako v laboratoři. Z důvodu zajištění bezpečného provozu na trati však nebyl u upevnění Vossloh měřen vliv dotažení vrtule.

Výsledky jednotlivých měření byly zprůměrovány a zobrazeny do grafů frekvenční odezvy funkce  $H_3$ , příp. normovaného amplitudového spektra zrychlení vibrací. Tlumení testovaných struktur bylo určeno pomocí bodů s polovičním výkonem [6]. Vyhodnocení bylo provedeno v programu ME'Scope.

Vlastní vyhodnocení bylo zaměřeno na nízkofrekvenční oblast  $0 \div 80 \text{ Hz}$ , středněfrekvenční oblast  $80 \div 400 \text{ Hz}$  a vysokofrekvenční oblast  $400 \div 1000 \text{ Hz}$ . Toto rozdělení vychází z předchozích úloh a je založeno na principu, že v oblasti nízkých frekvencí se projevují zejména účinky vyvolané působením podvozků a dvojkolí jedoucích železničních vozidel, pásmo středních frekvencí je projevem imperfekcí na stykové ploše kolo kolejnice stejně tak, jako vysokofrekvenční oblast do  $1000 \text{ Hz}$ . Zde se však navíc přidává vliv akustických jevů zapříčiněných pohybem vozidla.

V pásmu nízkých frekvencí vykazují všechna upevnění výraznější odezvu mezi  $60$  a  $80 \text{ Hz}$ . Nejvýraznější poměrný útlum na kolejnici  $5,3 \%$  zde dosahuje upevnění Vossloh W 14NT, nejmenší  $0,8 \%$  naopak upevnění Vossloh E 14. Vysoký poměrný útlum upevnění W 14 NT je s největší pravděpodobností zapříčiněn vodící lištou na spodní ploše úhlové vodící vložky, která brání větším pohybům kolejnice. Naopak upevnění E 14 je charakterizováno zvýšenou svislou pružností, která může mít za následek vyšší vibrace na kolejnici. Na pražci bylo největší strukturální tlumení  $9,3 \%$  zaznamenáno na upevnění Vossloh W 21NT, nejmenší pak na Pandrolu FC I, resp. Vosslohu W 14NT (shodně  $3,1 \%$ ). Rozdíl mezi útlumem na kolejnici a na pražci nám může indikovat svislou pružnost upevnění. Jako upevnění s největší svislou pružností lze proto definovat upevnění Vossloh E 14 a Vossloh W 21NT. Získaný poměrný útlum  $4,3 \pm 2,2 \%$  v kolejovém loži naznačuje, že ztuhlá vrstva šterku vytvořila pro všechny zkoušené sestavy upevnění stabilní podklad.

Pro upevnění Pandrol FC I neexistují na kolejnici v pásmu středních frekvencí významnější kmitočty, vyjma frekvence  $277 \text{ Hz}$  in situ, kde testovaná konstrukce vykazuje tlumení  $3,1 \%$ . Tato frekvence je ekvivalentem ke kmitočtu  $430 \text{ Hz}$ , který byl zaznamenán při laboratorních měřeních. Na pražci jsou výraznou frekvenční oblastí upevnění Pandrol kmitočty  $145 \div 165 \text{ Hz}$ , kde dosahuje průměrného útlumu  $5,3 \%$ . V kolejovém loži nebylo většího útlumu na středních frekvencích dosaženo. Ani na kolejnici u upevnění Vossloh W 14 nebyla nalezena žádná výrazná frekvence. Na pražci průměrně dosahuje toto upevnění poměrného útlumu  $2,6 \%$ . Důležité je v tomto ohledu zejména pásmo  $110 \div 215 \text{ Hz}$ . Ve šterku bylo vypočteno tlumení

6,4 % na kmitočtech  $115 \div 155$  Hz. Upevnění W 14NT vykazuje na vybraných frekvencích v pásmu  $110 \div 340$  Hz poměrné útlumy 4,0 % na kolejnici, 3,4 % na pražci, resp. 4,2 % v kolejovém loži. V případě upevnění Vossloh W 21NT je zásadní rezonanční frekvence 290 Hz. Upevnění zde vykazuje poměrné útlumy 7,3 % na kolejnici, 6,3 % na pražci a 7,4 % ve šterku. Další spektrum frekvencí  $130 \div 145$  Hz již není tolik významné, konstrukce zde dosahuje tlumení 4,5 %. Poslední testovaná konstrukce Vossloh E 14 vykazuje vysoká rezonanční pásma  $120 \div 130$  Hz s poměrnými útlumy 3,6 % na kolejnici, 3,1 % na pražci a 3,9 % v kolejovém loži. Ještě výraznější poměrné útlumy cca 5,2 % byly získány na kmitočtu  $220 \div 265$  Hz. Celkově lze z chování srovnávaných konstrukcí odhalit, že s rostoucí svíslou pružností upevnění roste také velikost rezonančního pásma v oblasti středních frekvencí  $80 \div 400$  Hz. Nejméně příznivě v tomto ohledu vyznívá upevnění Vossloh W 21NT, upevnění Pandrol FC I, resp. upevnění Vossloh E 14.

V pásmu vyšších frekvencí  $400 \div 1000$  Hz je pro upevnění Pandrol FC I důležitá frekvence 430 Hz, kde vycházejí průměrné útlumy 2,6 % a v kolejovém loži navíc frekvence  $630 \div 730$  Hz s vypočteným tlumením 1,9 %. V případě upevnění Vossloh W 14 bylo zjištěno tlumení na velké řadě kmitočtů vysokofrekvenční oblasti. Pouze hodnoty z oblasti  $450 \div 500$  Hz a  $600 \div 700$  Hz však vycházejí vyšší než 1,0 %. U upevnění Vossloh W 14NT byly nalezeny poměrné útlumy ve frekvenčním pásmu  $510$  Hz  $\div$   $600$  Hz v průměru 1,5 %. V kolejovém loži pak bylo navíc zjištěno vnitřní tlumení 3,3 % odpovídající frekvencím  $410 \div 445$  Hz. Průměrné hodnoty útlumu 1,9 % byly vypočteny pro systém upevnění Vossloh W 21NT. Uvedeného poměrného útlumu bylo dosaženo na frekvencích  $415 \div 445$  Hz. Druhou významnou frekvencí je 562 Hz, kde bylo zjištěno tlumení 3,3 %. Upevnění E 14 nevykazovalo ve zvoleném pásmu frekvencí  $400 \div 1000$  Hz žádné významnější poměrné útlumy překračující hodnoty 0,5 %. V pásmu vyšších frekvencí vykazují všechna testovaná upevnění horší schopnost tlumení vibrací, než v pásmech pod 400 Hz. Nejméně příznivě působí upevnění Vossloh W 14NT, které v oblasti  $510$  Hz  $\div$   $600$  Hz vykazuje ze všech testovaných konstrukcí nejvyšší amplitudy zrychlení vibrací na pražci, potažmo v kolejovém loži.

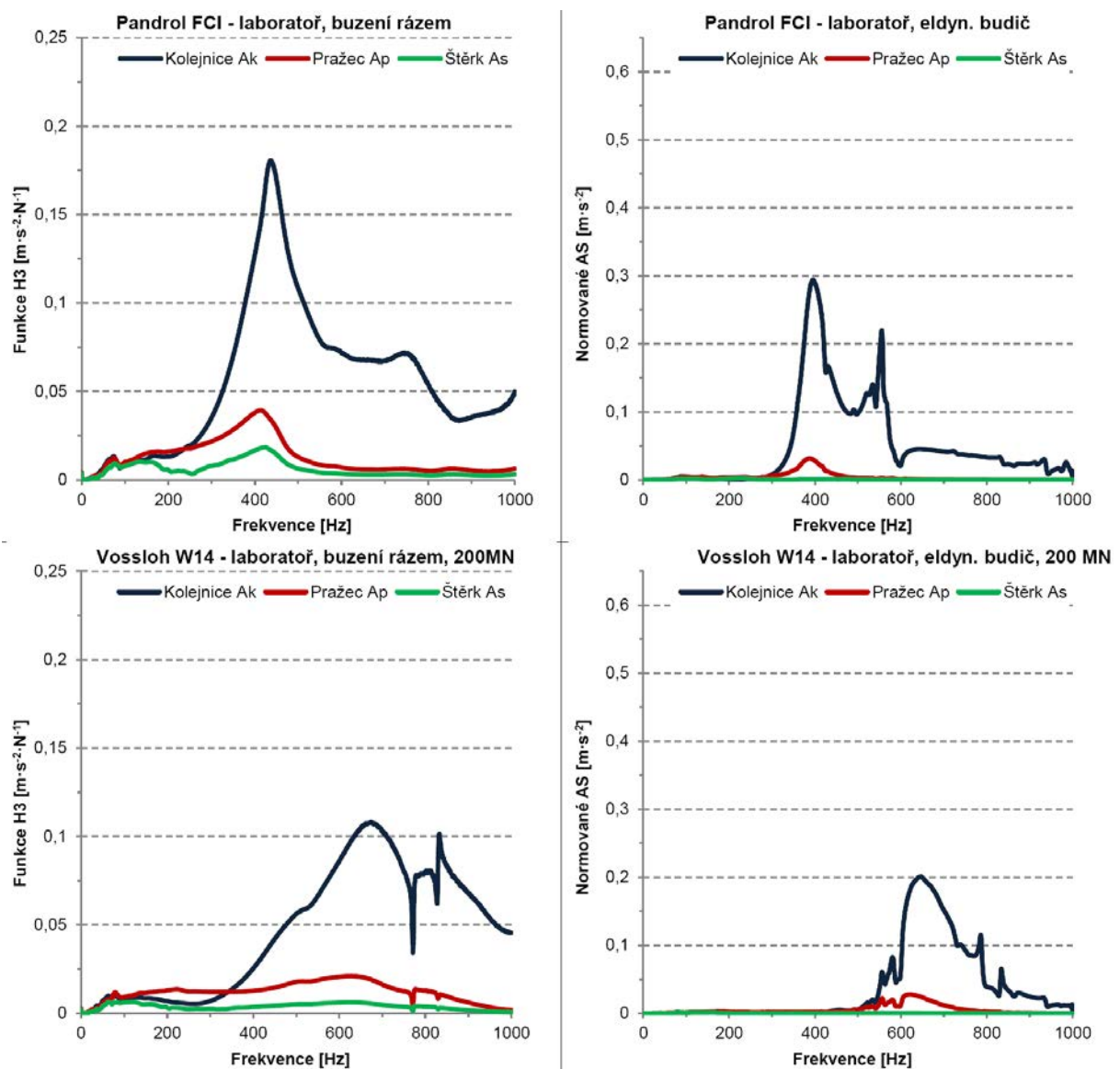
Z průběhů frekvenčních odezвовých funkcí, resp. normovaného amplitudového spektra zrychlení vibrací lze vyčíslením plochy mezi křivkami  $A_k$  a  $A_p$  orientačně stanovit charakteristiky testovaných uzlů upevnění z hlediska jejich tuhosti, lépe řečeno z hlediska relativních zrychlení vibrací kolejnice vůči pražci ve svíslém směru. V pásmu nízkých frekvencí do 80 Hz je dobře patrná přítomnost vodící lišty na spodní ploše úhlové vodící vložky upevnění W 14NT a W 21NT, která zapříčiňuje velmi malé plochy mezi danými křivkami v tomto frekvenčním pásmu – relativní svíslá zrychlení kmitání kolejnice vůči pražci jsou minimální. V celkovém frekvenčním měřítku pak vycházejí největší rozdíly mezi křivkami  $A_k$  a  $A_p$  u upevnění E 14, nejmenší pak u upevnění W 14. Měření tak orientačně potvrdilo statické sečné tuhosti testovaných sestav upevnění uvedených v kapitole 3.1.

Upevnění Pandrol FC I vykazuje zajímavé vlastnosti v rezonančním pásmu kolem frekvence 430 Hz. Tato frekvence bývá projevem vlnkovitosti s délkou vlnek cca  $7 \div 9$  cm v závislosti na jízdní rychlosti, která je uvažována v rozmezí typickém pro koridorové tratě, tj.  $120 \div 160$  km·h<sup>-1</sup>. Použití upevnění Pandrol na tratích, kde hrozí vznik vlnkovitosti s uvedenou vlnovou délkou, může urychlit rozvoj této kolejnicové vady. Obdobnou charakteristiku vykazuje rovněž upevnění Vossloh

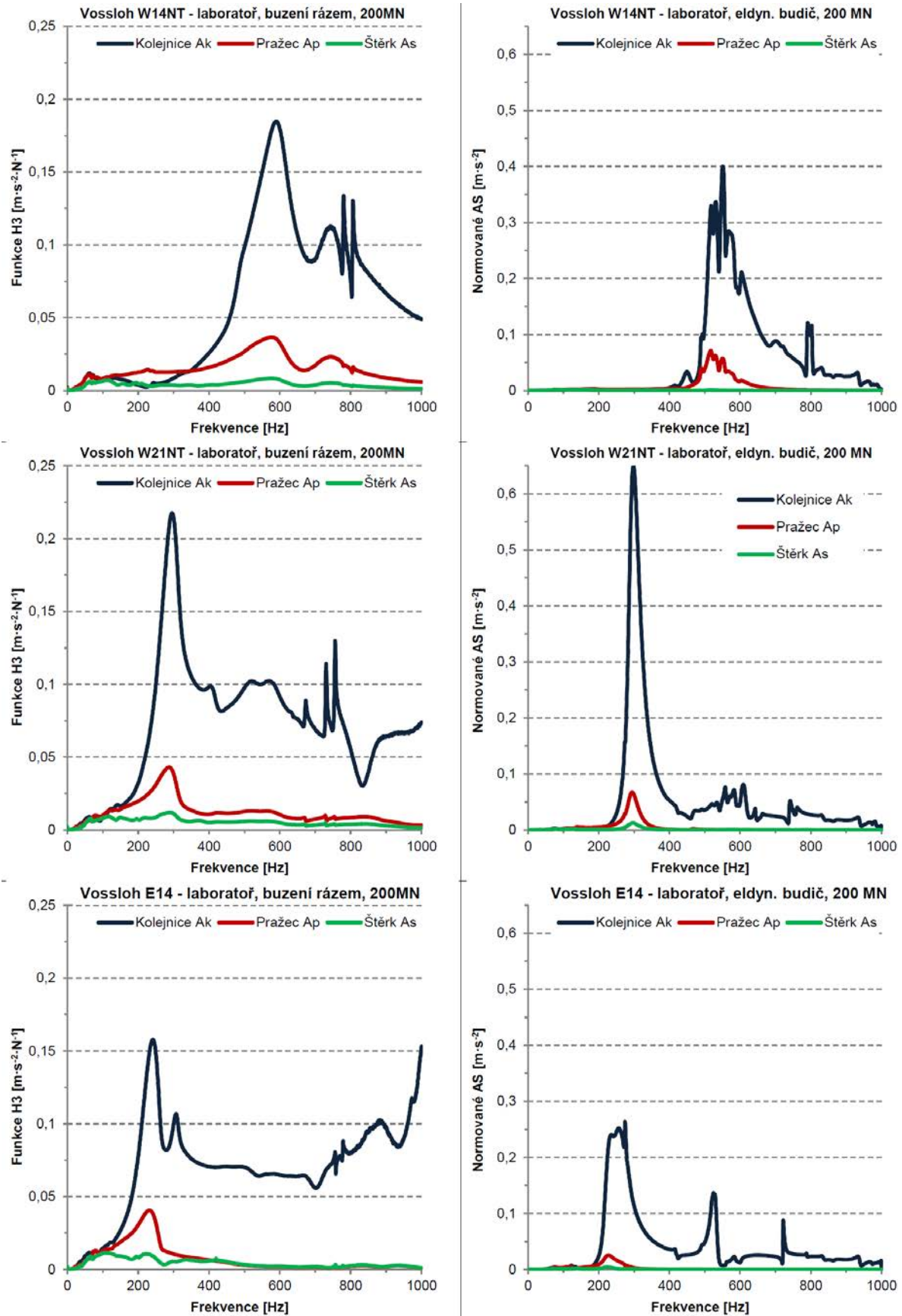
W 21NT na středních frekvencích kolem 290 Hz, resp. upevnění Vossloh E 14 na frekvencích v pásmu 220 ÷ 265 Hz.

U testovaných upevnění s největší statickou sečnou tuhostí Vossloh W 14 a Vossloh W 14NT je patrný posun nejdůležitějších rezonančních pásem směrem k vyšším frekvencím. Na koridorových tratích se v těchto vysokofrekvenčních pásmech může projevovat přítomnost vlnek kratších vlnových délek do 5 cm.

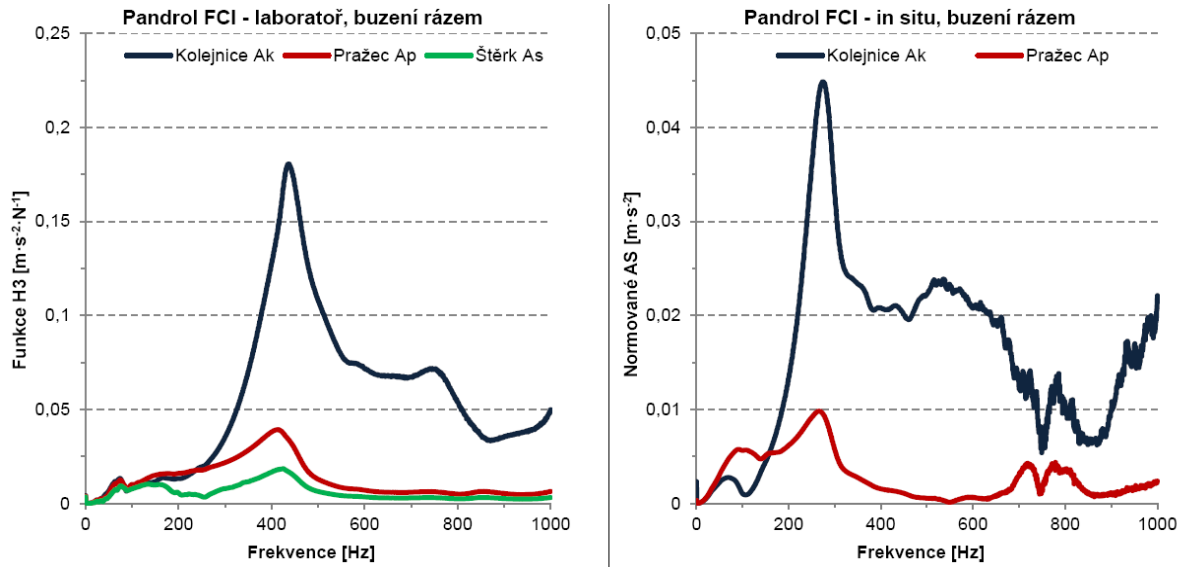
Z uvedeného vyplývá, že v oblastech kde lze očekávat rozvoj periodických vad pojižděné plochy kolejnice malých a středních délek je vlivem obecných vlastností vhodné použití svisle zpružněných systémů upevnění kolejnic, jako např. Vossloh E 14, či Vossloh W 21NT. Naopak v místech, kde lze očekávat kolejnicové vady typu skluzových či dlouhých vln, jsou vhodnější upevnění s vyšší statickou sečnou tuhostí podložky pod patu kolejnice. Mezi tato upevnění patří např. konstrukce Vossloh W 14, ať již v provedení s vodicí lištou na spodní ploše úhlové vodicí vložky (typ NT) či bez ní.



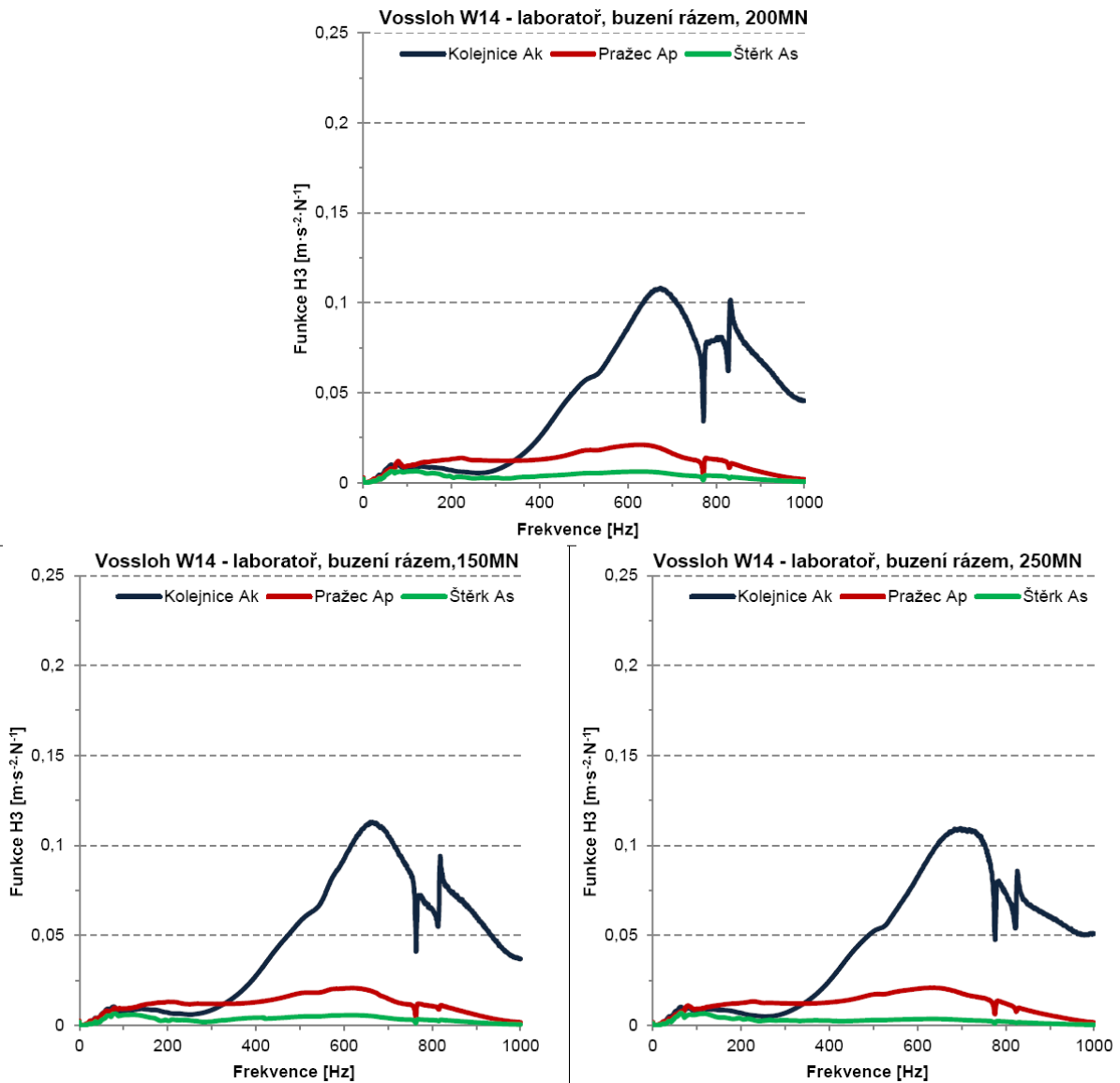
Obr. 7 Frekvenční charakteristika laboratorních vzorků upevnění



Obr. 7 Frekvenční charakteristika laboratorních vzorků upevnění - pokračování



Obr. 8 Srovnání laboratorních výstupů s měřením v terénu



Obr. 9 Srovnání vlivu velikosti utahovacího momentu na průběhu FRF

Upevnění Pandrol FC I						
Snímač	Laboratoř, buzení rázem		Laboratoř, elektrodynamický budič		In situ, buzení rázem	
	f [Hz]	Útlum [%]	f [Hz]	Útlum [%]	f [Hz]	Útlum [%]
Kolejnice Ak	69	3,0	98	4,0	83	3,3
	167	1,3	399	4,7	277	3,1
	-	-	-	-	359	0,4
	573	0,1	429	1,4	518	0,6
	650	0,1	538	0,8	774	0,5
	701	0,1	557	0,8	931	0,1
	-	-	569	0,9	-	-
	-	-	836	0,7	-	-
	-	-	938	0,7	-	-
Pražec Ap	73	4,0	-	-	64	2,1
	114	1,7	107	4,1	147	7,7
	165	2,6	144	5,4	278	4,6
	-	-	380	8,9	-	-
	422	5,6	420	0,5	591	0,1
	651	0,1	558	0,8	773	0,1
	874	0,1	601	1,0	798	0,1
Kolejové lože As	70	2,8	77	4,5	-	-
	89	2,8	119	3,1	-	-
	198	2,4	233	0,9	-	-
	222	1,3	383	0,6	-	-
	437	5,3	481	0,3	-	-
	733	4,5	628	1,2	-	-
	850	0,2	-	-	-	-

Tab. 1 Závislost zjištěného útlumu na frekvenci – upevnění Pandrol FC I

Upevnění Vossloh W 14						
Snímač	Laboratoř, buzení rázem		Laboratoř, elektrodynamický budič		In situ, buzení rázem	
	f [Hz]	Útlum [%]	f [Hz]	Útlum [%]	f [Hz]	Útlum [%]
Kolejnice Ak	72	2,3	-	-	-	-
	128	2,3	-	-	119	1,0
	497	0,4	553	1,2	-	-
	646	0,2	583	1,0	595	0,6
	772	0,3	626	1,1	752	0,1
	830	0,2	788	0,6	781	1,0
	905	0,1	833	0,4	802	1,8
	-	-	-	-	906	0,1
Pražec Ap	74	6,1	58	4,0	-	-
	96	3,2	-	-	-	-
	112	3,7	179	2,0	149	6,2
	215	3,1	-	-	305	0,3
	499	6,9	532	1,0	473	0,1



Upevnění Vossloh W 14						
Snímač	Laboratoř, buzení rázem		Laboratoř, elektrodynamický budič		In situ, buzení rázem	
	f [Hz]	Útlum [%]	f [Hz]	Útlum [%]	f [Hz]	Útlum [%]
Pražec Ap	633	0,5	558	0,9	583	0,1
	772	0,3	583	1,0	792	0,1
	831	0,2	619	5,6	803	0,1
	834	0,1	789	0,6	-	-
Kolejové lože As	40	1,6	41	5,6	-	-
	72	4,5	82	8,9	-	-
	85	2,2	-	-	-	-
	146	4,2	116	8,8	-	-
	222	0,3	153	6,3	-	-
	-	-	276	1,5	-	-
	-	-	361	5,0	-	-
	500	0,4	451	5,0	-	-
	699	0,2	556	0,6	-	-
	751	0,1	602	0,8	-	-
821	0,1	-	-	-	-	

Tab. 2 Závislost zjištěného útlumu na frekvenci – upevnění Vossloh W 14

#### 4. Závěr

Uskutečněná laboratorní a provozní měření prokázala stabilní vlastnosti všech zkoušených typů upevnění pro danou oblast zkoušení. Byla odhalena závislost na velikosti statické sečné tuhosti a rezonanční oblasti jednotlivých systémů upevnění. Čím je upevnění tužší, tím se oblast nejvýznamnějších kmitočtů přesouvá směrem k vyšším frekvencím. Z uvedeného lze učinit závěr, že např. v České republice provozně ověřované upevnění typu Vossloh W 21NT nelze doporučit do oblouků s malými poloměry, kde hrozí vznik skluzových vln u tratí v rychlostním pásmu RP3. Skluzové vlny jsou při jízdách rychlostech  $120 \div 160 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  významným přispěvatelem k úrovni zrychlení vibrací ve středněfrekvenčním pásmu  $80 \div 400 \text{ Hz}$ . Díky svým vlastnostem by tedy upevnění W 21NT mohlo v tomto rychlostním pásmu přispět k rychlejšímu rozvoji uváděné kolejnicové vady. U ostatních typů zkoušených upevnění lze na základě získaných dat potvrdit vhodnost použití pro teoretické oblasti použití popsané v kapitole 3.1. Obecně lze ale poznamenat, že každý typ upevnění je vždy nutné podrobit komplexnímu zhodnocení vhodnosti použití při zvážení místních podmínek, jako např. traťové rychlosti, poloměrů směrových oblouků, provozního zatížení apod.

Při porovnání výsledků laboratorního měření pomocí různých metod buzení bylo možné vyzorovat určitý vliv umístění elektrodynamického budiče přímo na testované struktuře. Projevoval se na frekvencích  $530 \div 570 \text{ Hz}$ . Globálně však bylo možné tento vliv na měření zanedbat.

Srovnáním výsledků laboratorních měření s měřeními v terénu, bylo možné obecně konstatovat, že z měření in situ byl patrný trend snižování významných

středních kmitočtových oblastí na kolejnici i na pražci o přibližně 100 ÷ 150 Hz směrem k počátku. Toto platilo pro obě srovnávaná upevnění Pandrol FC I i Vossloh W 14. Měřeními nebyla prokázána příčina tohoto jevu. Souvislosti lze nejpravděpodobněji spatřovat v průběžně podepřené kolejnici a v působení osových sil a napětí v bezстыkové koleji, což nebylo v laboratorních podmínkách zohledněno. Lehce odlišná charakteristika obou zkoumaných upevnění ve vyšších frekvenčních pásmech pak pravděpodobně rovněž souvisí s obecně složitějšími vazbami kolejnice – pražec – kolejové lože in situ, které nelze v laboratorních podmínkách plně simulovat.

V rámci laboratorních zkoušek buzení rázem byl mj. testován vliv tvaru frekvenční odezvové funkce na velikosti utahovacího momentu vrtule upevnění. Výsledky neprokázaly pro utahovací momenty 150 – 200 – 250 MN žádnou viditelnou změnu průběhu frekvenční odezvové funkce. Nedotažená, resp. přetažená neměla zásadní vliv na dynamické chování zkoušených typů upevnění Vossloh.

V grafických výstupech měření bylo někdy obtížné rozlišit jednotlivé křivky v oblasti nízkých frekvencí, zejména pak u konstrukcí buzených vibrátorem. Rozlišení frekvenční odezvové funkce resp. amplitudového spektra by bylo možné zlepšit pomocí logaritmického měřítka osy y, čímž by se ovšem vytratil na první pohled viditelný rozdíl mezi maximálními a minimálními hodnotami sledované veličiny. Rezonanční oblasti jsou navíc zřejmé z tabulek útlumu, viz tabulky č. 1 a 2.

## Literatura

- [1] Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah, ve znění pozdějších předpisů.
- [2] Česká technická norma ČSN 73 6360-2. *Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba*. Říjen 2009.
- [3] Příloha rozhodnutí komise 2011/275/EU. *Technická specifikace pro interoperabilitu, subsystém Infrastruktura transevropského konvenčního železničního systému*. Duben 2011.
- [4] České technické normy řady ČSN EN 13481-1 až 5 a ČSN EN 13481-7. *Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění*. Leden 2013.
- [5] Česká technická norma ČSN EN 13481-8. *Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění – Část 8: Systémy upevnění kolejí pro vysoká nápravová zatížení*. Září 2006.
- [6] Česká technická norma ČSN EN 13146-8. *Železniční aplikace - Trať - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 8: Provozní ověřování*. Leden 2013.
- [7] BILOŠOVÁ, A. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Modální zkoušky. VŠB – Technická univerzita Ostrava. 2012.
- [8] ESVELD C.: *Modern Railway Track, Second edition*. MRT Production, Delft. 2001. 654 stran. ISBN 90-800324-3-3.

- [9] MAN A. P. DE: *Dynatrack, A Survey of Dynamic Railway Track Properties and their Quality*. Disertační práce. TU Delft. DUP-Science. Delft. Prosinec 2002. ISBN 9-406-2355-9.
- [10] Česká technická norma ČSN EN 13146-9. *Železniční aplikace - Trať - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 9: Stanovení tuhosti*. Květen 2012. Změna A1.
- [11] SMUTNÝ, J.; TOMANDL, V.; PAZDERA, L. *Dynamická a akustická analýza pružného upevnění kolejnic bez podkladnic*. Stavební obzor. 2009. Roč. 18, č. 8, s. 231-239. ISSN: 1210- 4027.

Praha, březen 2013

Lektoroval:

Ing. Vladimír Dubský

Vossloh Drážní technika, s.r.o.