



Ověřovací protokol

1. Měřicí systémy

Ověřované zařízení (dále jen NI): Zařízení pro modální analýzu
Referenční zařízení (dále jen BK): snímače zrychlení BK 4379 (AL - vibrometr P 06 001 D) a systém HW a SW Pulse (AL – měřidlo P 06 005 D)
Datum a místo ověření: 23.2.2018, areál PRe v Kobyliších

2. Kalibrace měřících systémů

Referenční zařízení BK je standardně metrologicky udržovaný profesionální měřicí systém s platnými kalibračními listy. **Ověřované zařízení (NI)** je složeno z nových snímačů a nového vstupního zařízení, které byly kalibrovány a ověřeny u výrobce. V průběhu vývoje a prováděných zkoušek byly tyto hodnoty opakovaně ověřeny interními zkouškami. V budoucnu bude ověřované zařízení standardně kalibrováno.

Obě zařízení jsou funkčně srovnatelná pouze v určité oblasti frekvencí a amplitud měřených signálů. Tato oblast je vymezena maximální a minimální frekvencí ověřovaného zařízení (0,3 Hz – 5 kHz), jmenovitou hodnotou síly (2,2 kN) a zrychlení snímačů ($\pm 700 \text{ m.s}^{-2}$) a šumem elektroniky (zejména zesilovačů ve snímačích zrychlení).

Poznámka: Při ověřování byl použit piezoelektrický snímač síly, který při použití v referenčním zařízení měl standardní vlastnosti, ale v ověřovaném zařízení musel být použit s externím velmi citlivým zesilovačem IEPE, který jsme měli k dispozici. V této konfiguraci musela být měřená síla cca 10x menší než při použití stejného snímače v referenčním zařízení. To se projevilo 10x větším šumem v měřených přenosových funkcích. Pro zařízení (NI) byl v roce 2018 zakoupen vhodný IEPE snímač síly.

3. Způsob ověření funkce

Způsob ověření: Zjištění vlastních frekvencí demontovaného sloupu C altánu Šlechtovy restaurace (dále jen ŠR) nezávisle oběma měřicími systémy.

Předmět ověřování: Vlastní frekvence sloupu C

4. Doplnující informace

a) Při použití pro zkoušky sloupů se předpokládá měření tvarů kmitání sloupů od cca 1 Hz do 500 Hz. Jejich měření pro vyšší frekvence je technicky možné, ale z hlediska cíle nemá smysl pro velkou pracnost a časovou náročnost. Vlastní frekvence lze zjistit až do cca 5000 Hz. Záleží to na vlastnostech použitých snímačů a frekvenci vzorkování (zde až 12 800 Hz). Vyšetřování vlastních frekvencí v oblasti nízkých frekvencí je vhodné pro srovnávání okrajových podmínek instalovaných sloupů, vyšetřování v oblasti vysokých frekvencí je vhodné pro srovnávání vlastností sloupů (geometrie, materiál, porušení, defekty a výrobní nepřesnosti).

b) Základním zdrojem nejistot měření je instalace snímačů na sloupy, směr a místo úderu kladívkem. V případě demontovaných sloupů pak realizace podepření sloupů (sloup je obvykle

podepřen jako prostý nosník).

c) Místa pro instalaci snímačů se volí podle vnější geometrie sloupů. Tvar dutin a tloušťky stěn (excentricita) zpravidla nejsou známé. Vnější povrch sloupů není obvykle obrobený. Ve většině případů nejsou sloupy rotačně symetrické a je nutné instalovat snímače ve zvoleném průřezu ve dvou kolmých směrech kolmo k podélné ose sloupu. Sloupy tak mají dva systémy vlastních frekvencí. Opakovaná instalace snímačů je zdrojem nejistot plynoucích z pootočení os tohoto měřicího systému vzhledem k osám symetrie sloupu. Druhou příčinou je nepřesnost při opakované instalaci snímačů ve směru podélné osy sloupu. To je ovšem dobře kontrolovatelné a relativní nejistota je malá.

d) Druhým zdrojem nejistot je nepřesnost provedení poklepu. Jednou nepřesností je dvojitý úder, kdy po odrazu kladívko znovu dopadne na sloup. Tento technický nedostatek lze indikovat průběhu měření nebo při vyhodnocení. Chybné měření je nutné vyloučit. Maximální velikost síly při poklepu musí být v intervalu definovaném nastavenými hodnotami. Pokud je maximální špička síly mimo tuto toleranci, měření se vyloučí.

e) Místo a směr úderu je také zdrojem nejistoty měření. Zkušený pracovník je schopen opakovaně poklepnout kladívkem do kruhu o průměru 2 cm. Taková nepřesnost může být významná pouze pro buzení vysokých frekvencí (resp. jim odpovídajících tvarů kmitání), pro nízké frekvence nemá význam.

f) Maximální měřená frekvence závisí na vlastnostech snímačů, zesilovačů a použité frekvenci vzorkování. Rozlišovací schopnost spekter (Δf) závisí na délce záznamu. Při rázových dějích se ovšem odezva rychle utlumí a skutečná délka záznamu je stejná jako délka měřeného děje. Ta je dána vlastnostmi materiálů sloupů a hrotu kladívka.

5. Stanovení vlastních frekvencí

Je oprávněný předpoklad, že dominantní vrcholy autospekter resp. přenosových funkcí jsou projevem existence vlastní frekvence na stejné frekvenci. Při provádění klasické modální analýzy se vlastní frekvence a tvary kmitání vyhodnotí ze souboru všech přenosových funkcí. Vlastní frekvence jsou uvedeny v tabulce pro daný sloup v tabulce. Tento způsob vyhodnocení má v případě sloupů význam pouze v oblasti nízkých frekvencí (do cca 500 Hz). Pro vyšší frekvence je nutné zvyšovat počet míst měření a metoda ztrácí na efektivnosti. Z technického hlediska je ovšem realizovatelná.

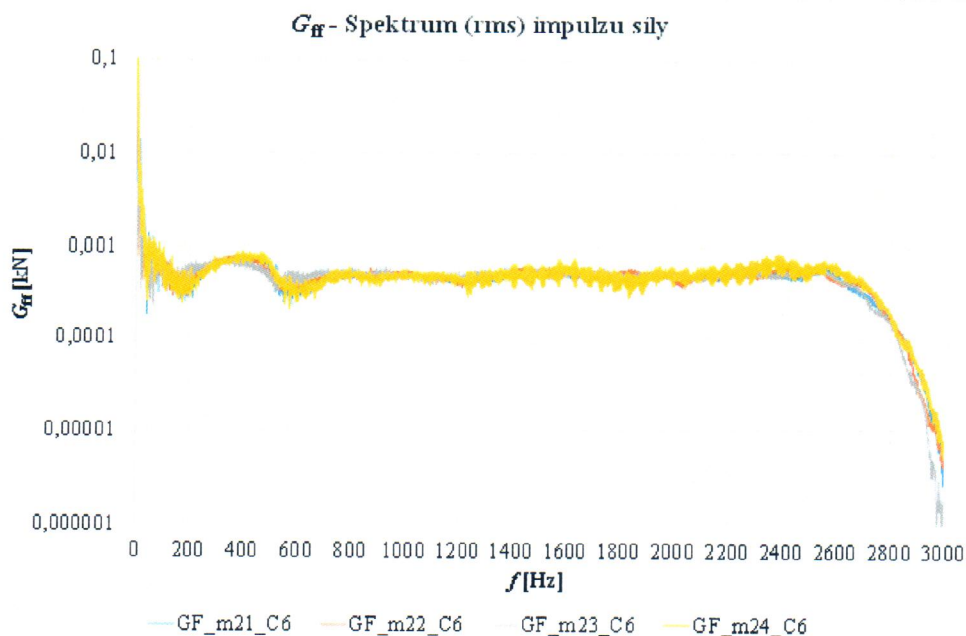
Záměrem bylo vyvinutí postupu měření, který by umožnil aplikaci principu modální analýzy jednodušeji a efektivněji. Ve srovnání s klasickou modální analýzou postup vyžaduje:

- redukcí míst měření resp. míst instalace snímačů (minimum 1 místo, optimum 2 místa, v případě nutnosti maximálně 4 místa);
- redukcí počtu míst poklepu kladívkem (minimum 1 místo, optimum 2 místa, v případě nutnosti 4 nebo více míst);
- zjednodušení způsobu vyhodnocení.

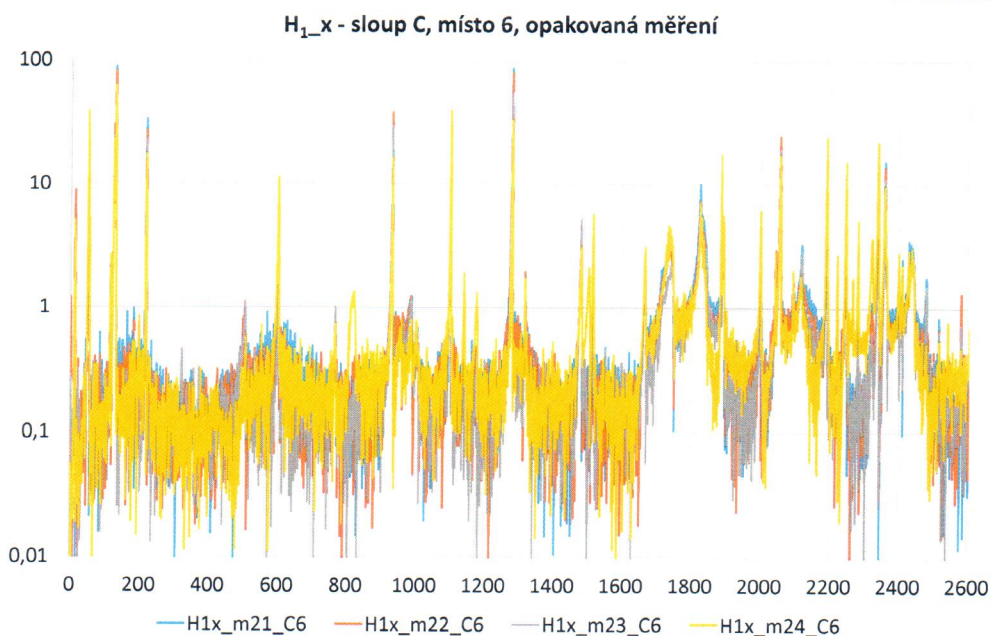
Zjednodušení způsobu vyhodnocení vychází z poznání, že pro identifikaci stejných sloupů resp pro vyhledání sloupů s jinými vlastnostmi nejsou důležité všechny vlastní frekvence, ale postačí pouze dominantní frekvence přenosových funkcí nebo autospekter v širokém pásmu frekvencí. Jejich vyhodnocení je možné provést z grafů těchto funkcí, které jsou k dispozici již v okamžiku měření, jsou uloženy do paměti PC a mohou být následně dále zpracovány.

Dále jsou prezentovány výsledky ověřovacího měření sloupu „C“ v areálu firmy PRE s použitím ověřovaného a referenčního zařízení. Odezva sloupů ve zvoleném místě je monitorována snímači zrychlení ve směrech x a y kolmých na podélnou osu sloupu z . Výsledky měření popisují níže uvedená autospektra impulzu síly $G_{xx}(f)$ a amplitudy komplexních

přenosových funkcí $H_1(f)$ mezi impulzem síly a odezvou sloupů, která jsou vynesena na obr. 2 až obr. 6. Autospektrum impulsu síly je na obr. 1. Vzorkovací frekvence byla 6400 Hz/kanál. V tomto případě umožňuje ploché spektrum budícího impulsu spolehlivě měřit přenosové funkce až do frekvence cca 2600 Hz. Vlastním frekvencím zpravidla odpovídají vrcholy přenosových funkcí $H_1(f)$ mezi místem buzení a místem měření odezvy. Při podrobnější analýze je vhodné provést měření minimálně pro dvě různé pozice snímačů. Ukázka přenosových funkcí ze čtyř opakovaných měření (stejně místo buzení i měření) je na obr. 2. Tato měření byla provedena zařízením NI.

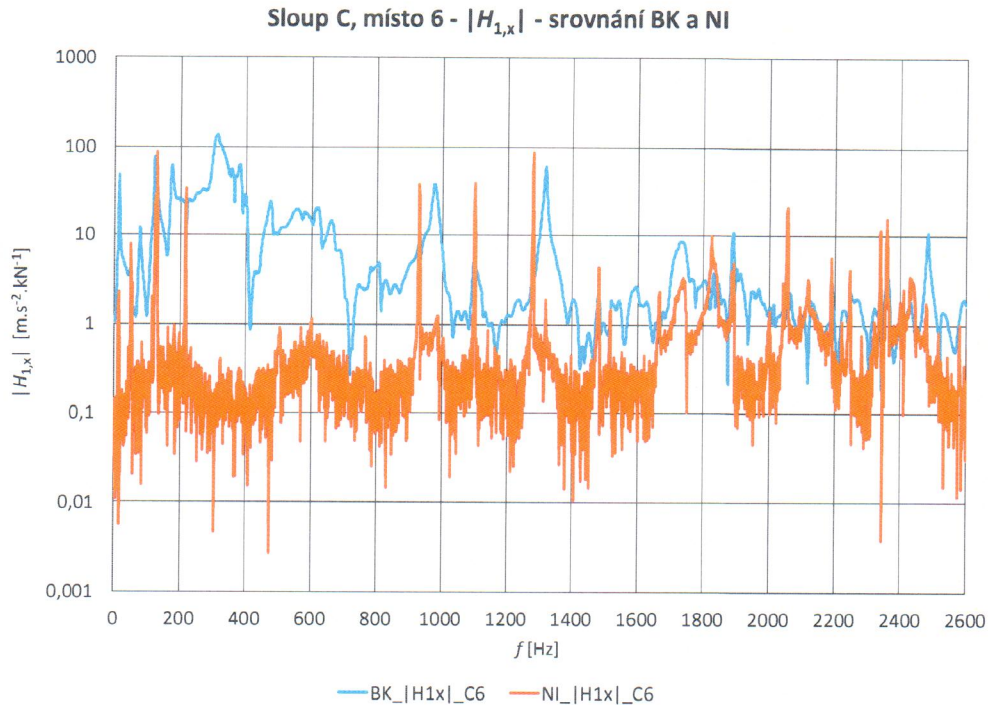


Obr. 1 Spektrum impulsu síly (rms) - $G_{xx}(f)$ (kN)

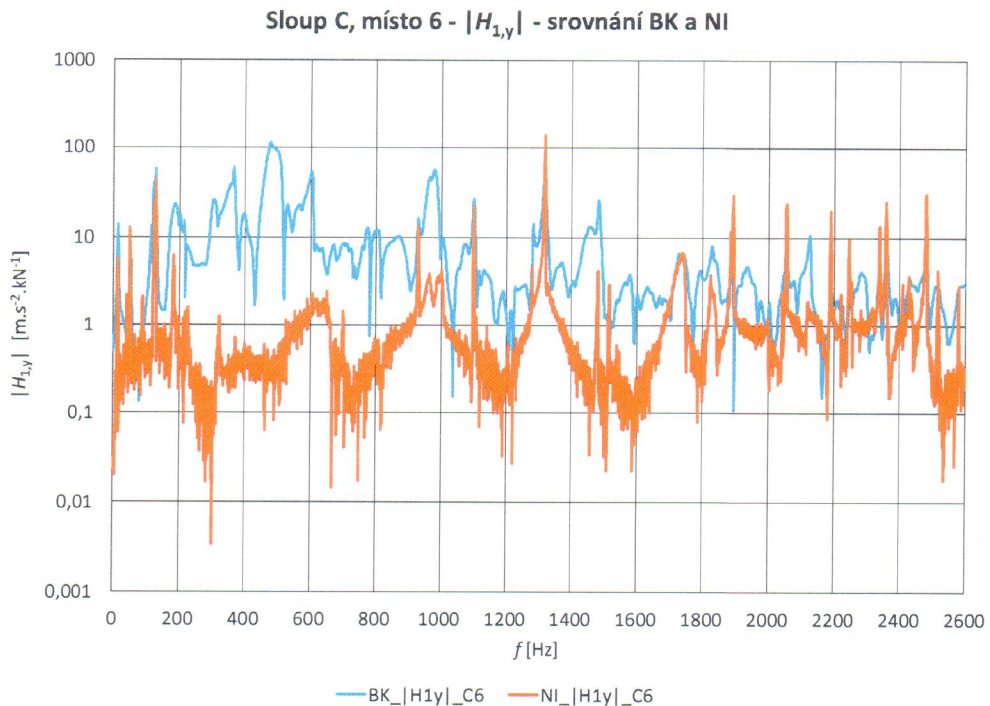


Obr. 2 Sloup ŠR, zařízení NI: Amplitudy přenosových funkcí $|H_{1,x}|$ při čtyřech opakovaných měřeních v místě C6.

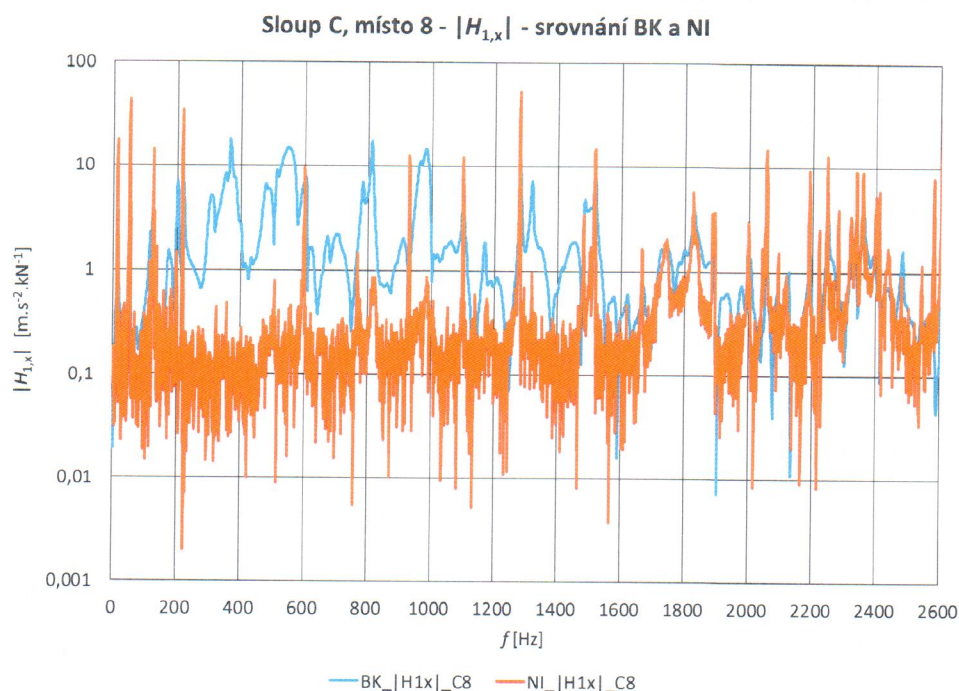
Na obr. 3 a obr. 6 jsou přenosové funkce v místě C6 a C8 pro směry x a y . Modrá stopa ukazuje přenosovou funkci získanou měřením s referenčním systémem (BK) a červené resp. oranžové stopy ukazují přenosové funkce získané ověřovaným systémem při dvou různých měřeních (stejně místo buzení, stejné umístění snímačů).



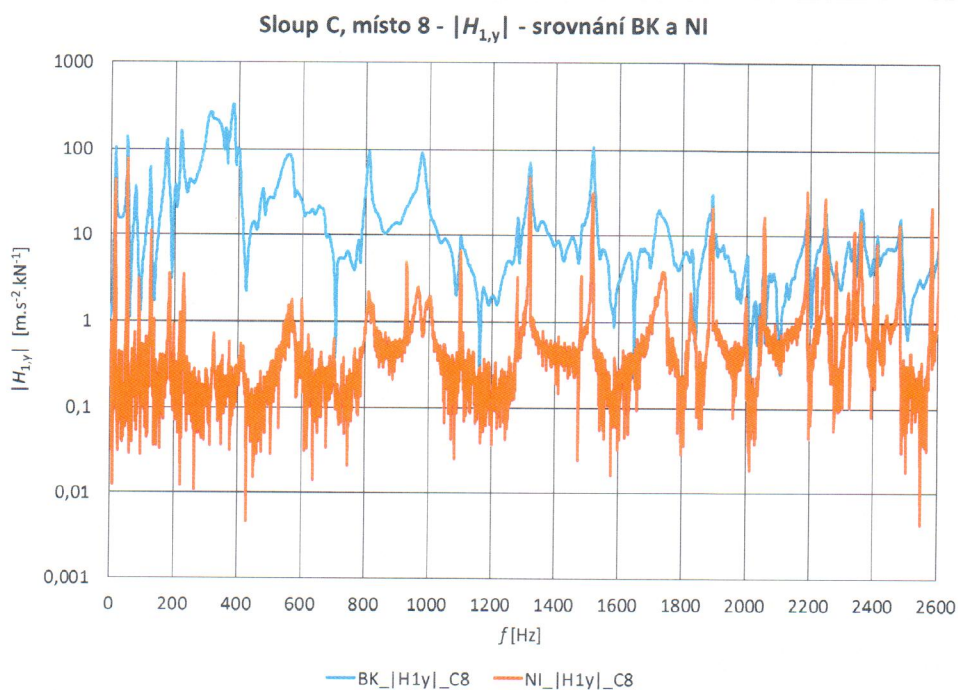
Obr. 3 Sloup ŠR, zařízení BK a NI: Srovnání amplitud přenosových funkce $|H_{1,x}|$ z měření referenčním a ověřovaným zařízením v místě C6 ve směru x .



Obr. 4 Sloup ŠR, zařízení BK a NI: Srovnání amplitud přenosových funkce $|H_{1,y}|$ z měření referenčním a ověřovaným zařízením v místě C6 ve směru y .

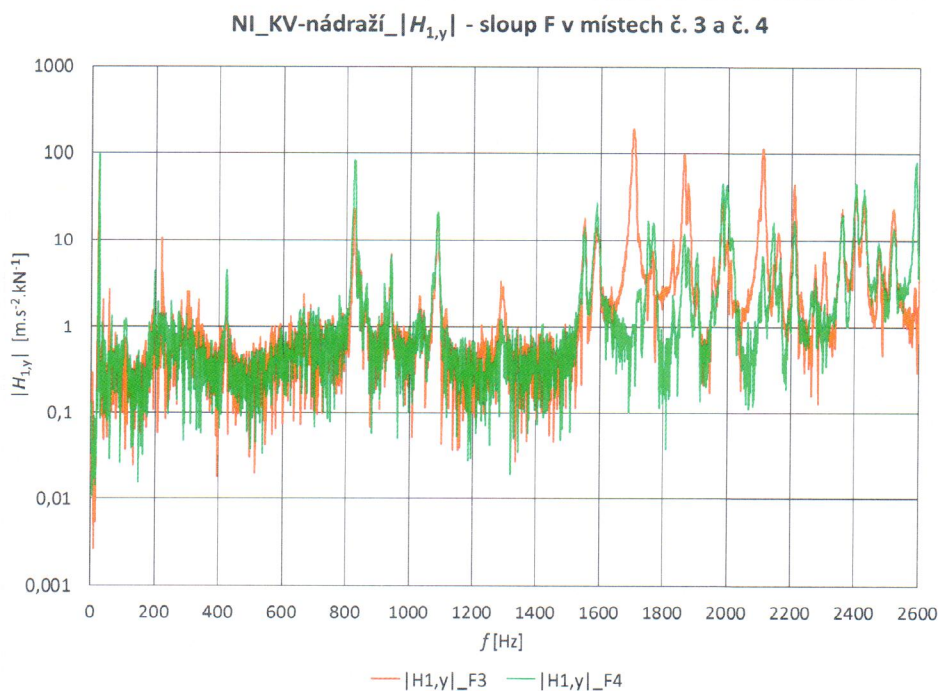


Obr. 5 Sloup ŠR, zařízení BK a NI: Srovnání amplitud přenosových funkce $|H_{1,x}|$ z měření referenčním a ověřovaným zařízením v místě C8 ve směru x .

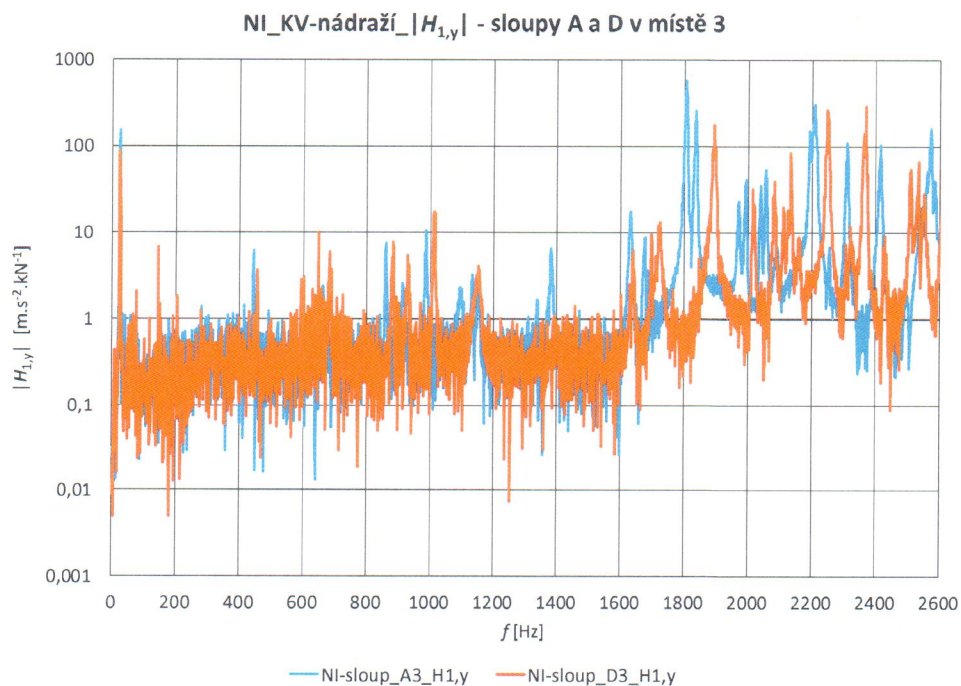


Obr. 6 Sloup ŠR, zařízení BK a NI: Srovnání amplitud přenosových funkcí $|H_{1,y}|$ z měření referenčním a ověřovaným zařízením v místě C8 ve směru y .

Na obr. 7 a obr. 9 jsou vybrané ukázky přenosových funkcí z měření sloupů z Horního nádraží v Karlových Varech v areálu závodu v Dublovicích. Na obr. 7 jsou vyneseny přenosové funkce mezi body č. 3 (střed sloupu) a č. 4 ve $\frac{3}{4}$ délky sloupu G a místem měření odezvy. Ukazuje, že měření je třeba provést ve více místech, protože v náhodně zvolených místech měření nebo poklepu mohou mít některé tvary uzly.

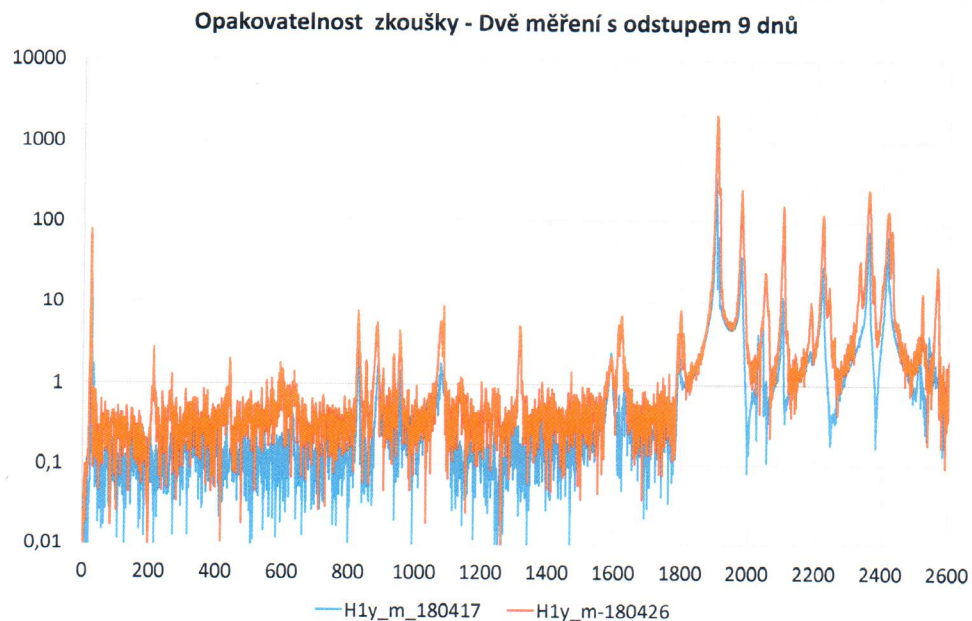


Obr. 7 Sloup z nádraží v KV: Amplitudy přenosových funkcí $|H_{1,y}|$ sloupu G v místech č. 3 a č. 4 z měření ověřovaným zařízením (NI)



Obr. 8 Sloupy z nádraží v KV: Amplitudy přenosových funkcí $|H_{1,y}|$ ve směru y sloupů A a D v místě 3 z měření ověřovaným zařízením (NI).

Na obr. 12 jsou vyneseny přenosové funkce ve směru y z měření na dvou sloupech téhož typu (sloupy A a D, z Horního nádraží v Karlových Varech) pro stejné místo měření a stejné místo buzení. Rozdílné vlastní frekvence lze snadno identifikovat.



Obr. 9 Sloupy z nádraží v KV: Amplitudy přenosových funkcí $|H_{1,y}|$ v místě 3 ze dvou zkoušek sloupu G ověřovaným zařízením (NI) provedených s odstupem 9 dnů. V mezidobí došlo k přemístění sloupu.

Na obr. 9 jsou dvě přenosové funkce ze zkoušky sloupu G z Horního nádraží v Karlových Varech, provedené s časovým odstupem 9 dní. Snímače byly po první zkoušce demontovány a sloupy byly přemístěny. Při druhé zkoušce byl sloup znovu připraven na zkoušku, snímače namontovány do stejných míst a sloup byl rozkmitán impulzem kladívka ve stejném místě. I když v obou případech nebyly vybudeny všechny frekvence, je možné poměrně velký počet shodných frekvencí.

6. Závěr

Ověřované zařízení (NI) se z metrologického hlediska standardně ověřuje kalibrací. Přesnost a nejistota prováděných měření závisí na:

- a) podmínkách provádění zkoušky (definované okrajové podmínky);
- b) instalace snímačů (přesnost umístění, dostatečné upevnění na povrch sloupu);
- c) provádění poklepů kladívkem (vhodný hrot, přesnost poklepu, očištěný povrch sloupu);
- d) optimálním nastavení parametrů zkoušky (pásmo frekvencí, maximální velikost síly, frekvence vzorkování);
- e) operativní kontrole provedených zkoušek a vyloučení chybných zkoušek.

Uvedené výsledky ukazují, že lze jednoduchým postupem získat informaci o tom, že zkoušené sloupy mají stejné nebo podobné vlastnosti a naopak ukázat, že sloupy mají rozdílné vlastnosti. V případě potřeby ověřované zařízení může být použito pro standardní modální analýzu sloupů s výrazně odchylnými vlastnostmi.

V Praze, 12.11.2018

Zpracoval: Ing. Jaromír Král, CSc.