LADĚNÝ HMOTNOSTNÍ TLUMIČ (TMD)
VYHODNOCENÍ VLIVU NA CHOVÁNÍ MOSTNÍ KONSTRUKCE

Radim Nečas, Jiří Kučera, Jan Koláček, Kristína Bezručová

Komfort chodců, štíhlý subtilní design, minimalizace počtu pevných opěr a v neposlední řadě úspora materiálu. To jsou hlavní důvody pro integraci tlumení kmitání do projektu mostní konstrukce. Cílem je chránit chodce, cyklisty i most před nežádoucím kmitáním či poškozením. Tento článek shrnuje poznatky z návrhu laděných hmotnostních tlumičů, jejich výroby i možnosti optimalizace. Účinnost laděných hmotnostních tlumičů byla ověřena na dvou ocelových lávkách pro pěší v České republice a na Slovensku, konkrétně na lávce přes řeku Svitavu v Bílovicích nad Svitavou a na lávce přes rychlostní komunikaci v Banské Bystrici. Na obou mostních konstrukcích bylo provedeno dynamické měření před a po osazení tlumiče. Sledování shody modálních parametrů bylo zpracováno pomocí provozní modální analýzy (OMA). Součástí vyhodnocení dynamických zkoušek je i odezva na účinky chodců (kritéria pohody) a stanovení logaritmického dekrementu útlumu.

Mosty, lávky, mrakodrapy, antény, stadiony i jiné inženýrské stavby mohou být náchylné na kmitání vyvolané působením větru, dopravy, lidí či zemětřesení především ze dvou důvodů. Mívají poměrně nízkou vlastní frekvenci kmitání a současně velmi malou vlastní schopnost tlumení (pod 1 %). Bez dalších tlumicích prvků pak mohou vzniknout nežádoucí situace s velkou amplitudou kmitání. Možným řešením je instalace tlumičů kmitů.

Tento příspěvek se zaměřuje na tlumení mostních konstrukcí, zejména lávek pro pěší, laděnými hmotnostními tlumiči kmitání. V úvodu jsou popsány možné směry kmitání nosné konstrukce v souvislosti s typem tlumičů kmitů a jsou načrtnuty principy a rozdíly mezi viskózním tlumičem a laděným hmotnostním tlumičem (pohlcovačem) kmitání. Vliv tlumiče na odezvu mostní konstrukce je demonstrován vyhodnocením měření na dvou reálných konstrukcích u nás i v zahraničí.

Příspěvek je výsledkem dlouhodobé spolupráce fakulty stavební VUT v Brně a společnosti KGF hydraulika v oboru vysokotlaké hydrauliky, a především v oblasti analýzy dynamické odezvy mostních konstrukcí, optimalizace a ladění tlumičů kmitání.

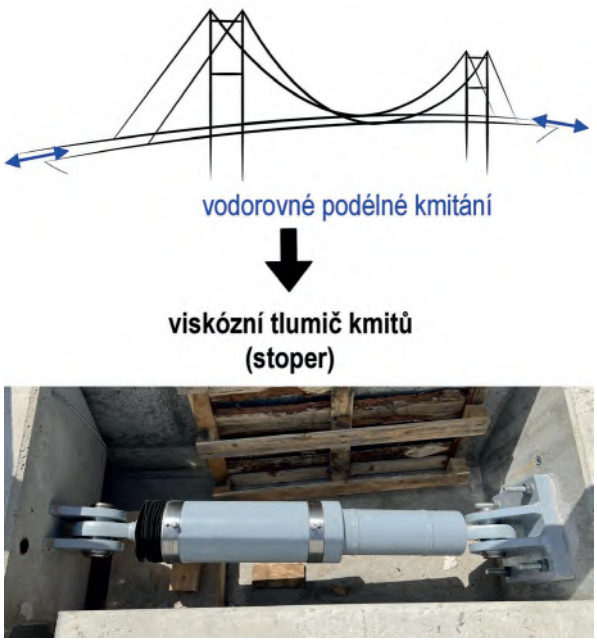
Tlumiče kmitání pro lávky a mosty

Kmitání mostní konstrukce

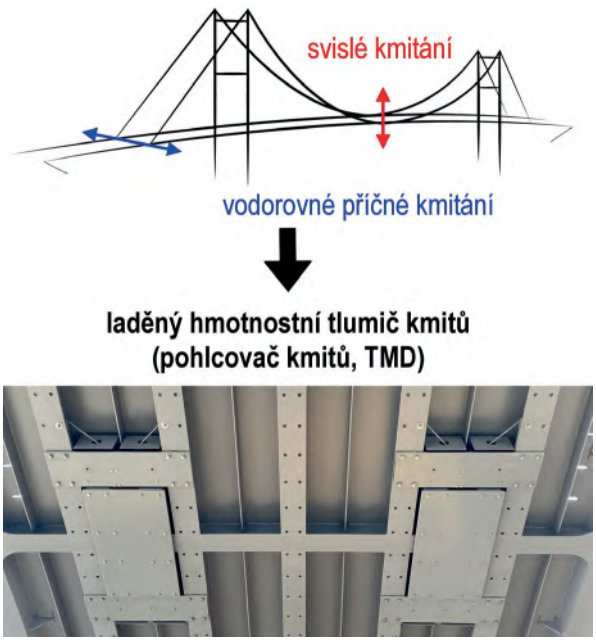
Lávky pro chodce, visuté, zavěšené (lanové) mosty nebo mosty s velkým rozpětím jsou často navrhovány jako štíhlé, subtilní konstrukce jak z architektonických důvodů, tak z důvodů úspory materiálu nosné konstrukce a minimalizace počtu pevných opěr. Tyto konstrukce však mohou být citlivé na dynamické zatížení způsobené chodci, cyklisty nebo větrem [2].

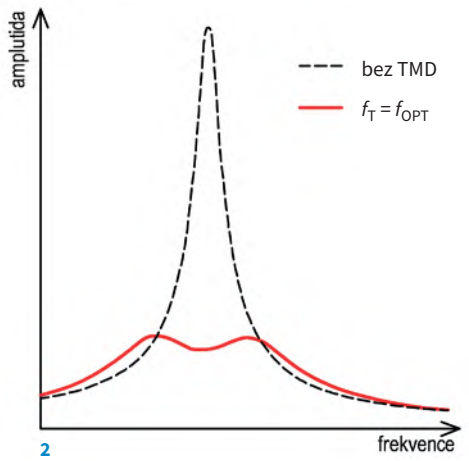
Charakteristikami každé konstrukce jsou vlastní frekvence a tvary kmitání, které jsou závislé na její hmotnosti a tuhosti. Pro štíhlé mostní konstrukce jsou typické nízké vlastní frekvence kmitání, které bývají blízké frekvenci budicích sil především chodců [1]. Nejběžnějším stavebním materiálem pro lávky je beton, ocel, příp. UHPC. Obzvlášť ocelové lávky se vyznačují nízkou vlastní schopností tlumení (poměrný útlum typický pro ocel je 0,4 %, pro beton kolem 1 %). Pokud dojde k rezonanci frekvence budicí síly s některou vlastní frekvencí nosné konstrukce při malém vlastním útlumu, může amplituda kmitů dosáhnout nepřípustných hodnot, zejména z hlediska komfortu chodců nebo i z hlediska únavového poškození konstrukce.

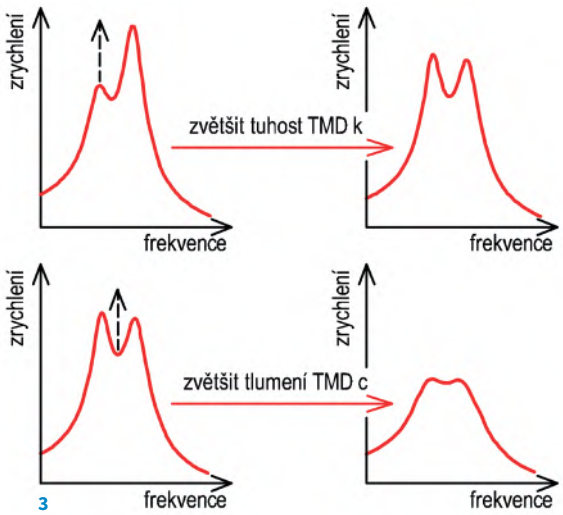
1a



1b







1 Souvislost mezi směrem kmitání a typem tlumiče kmitů **2** Vliv optimálně naladěného tlumiče a kmitání mostní konstrukce **3** Schéma doladění suboptimálně naladěného tlumiče

Mostní konstrukce se může od proměnného zatížení rozkmitat v několika směrech. Z hlediska tlumení je vhodné rozlišovat zejména následující globální směry:

- vodorovné podélné kmitání *(x)*,
- vodorovné příčné (ohybové) kmitání *(y)*,
- svislé (ohybové) kmitání *(z)*,
- torzní kmitání (kolem osy *x*).

Útlum kmitání konstrukce lze v jakémkoliv směru posílit osazením vhodného tlumiče kmitů [3]. Nejdůležitějším faktorem pro volbu vhodného typu tlumiče je právě směr kmitání. Souvislost mezi směrem kmitání a typem tlumiče je znázorněna na obr. 1.

Viskózní tlumič vs. laděný hmotnostní tlumič

Dle směru kmitání mostní konstrukce a při zohlednění dalších technických parametrů konkrétního projektu je vybrána vhodná varianta ze dvou různých typů tlumičů:

- **viskózní tlumič kmitů** – hydraulický tlumič, stoper, **FVD** (Fluid Viscous Damper), **Bridge LUD** (Lock-up Device), **STU** (Shock Transmission Unit),
- **laděný hmotnostní tlumič kmitů – TMD** (Tuned Mass Damper), pohlcovač kmitání, omezovač kmitání.

Pro fixaci mostu v podélném směru jsou vhodné viskózní tlumiče kmitů (stopery, FVD), které omezují rychlé pohyby způsobené např. větrem nebo proměnným zatížením od chodců a cyklistů, ale současně umožňují pomalé posuvy mostovky např. vlivem teplotní dilatace (obr. 1a). Tento typ tlumiče je řešen jako hydraulický válec se stejnou činnou plochou na obou stranách pístu, obvykle je umístěn mezi mostovkou a opěrou.

Viskózní tlumiče kmitů jsou použity např. na lávce ke Strakonickému hradu, tlumí cyklistickou lávku přes Labe v Čelákovicích, nebo lávku pro pěší a cyklisty přes řeku Bečvu u obce Ústí.

Laděné hmotnostní tlumiče (TMD) pohlcují svislé nebo vodorovné příčné kmitání mostovky bez nutnosti reakce k pevné opěře (obr. 1b). V principu je tlumič řešen jako závaží, obvykle o hmotnosti 4 až 6 % hmotnosti kmitající hmoty lávky, uložené na pružinách s přesně určenou tuhostí. Paralelně k pružinám je zapojen hydraulický tlumicí prvek s daným útlumem, který eliminuje energii vzniklých kmitů. Tlumiče jsou na mostovce umístěny v místech největších rozkmitů mostovky v tzv. „kmitnách“.

Laděné hmotnostní i viskózní tlumiče vedou k několikanásobnému snížení kmitání lávky a tím podstatně zvýší komfort pro pěší i cyklisty tak, aby byly dodrženy povolené limity kmitání dle příslušných norem, zejména dle ČSN 73 6209 [5] anebo např. dle Technického průvodce pro posouzení lávek vydaného Sétra [4].

Laděné hmotnostní tlumiče (TMD) byly v České republice a na Slovensku instalovány např. na lávce přes Jizeru v Mladé Boleslavi, v Praze na nové Trojské lávce a od léta 2023 také na Štvanické lávce spojující Holešovice a Karlín v Praze.

Následující část příspěvku se dále zaměří na užití laděných hmotnostních tlumičů (TMD) v praxi.

Laděný hmotnostní tlumič: proces návrhu, výroby a osazení

Počet tlumičů na lávce a jejich technické parametry, jako např. hmotnost závaží nebo tuhost pružin, jsou navrženy na základě statického a dynamického výpočtu [1]. Provedení tlumiče, způsob jeho uchycení a poloha umístění na lávce projednává výrobce s projektantem mostu. U hmotnostních tlumičů je zhotovení posledních komponentů a naladění na požadovanou frekvenci uskutečněno na základě výsledků měření první dynamické zkoušky, která je provedena po dokončení výstavby. Následuje instalace tlumičů na stavbě. Fakultativní druhá dynamická zkouška zpravidla ověřuje účinnost tlumení a zároveň poskytuje možnost, aby tlumiče byly ještě doladěny.

Vliv tlumiče na dynamickou odezvu konstrukce

U mostní konstrukce osazené laděnými hmotnostními tlumiči dochází ke změnám modálních parametrů. Podstatný je vliv tlumiče na dynamickou odezvu konstrukce s ohledem na splnění kritérií pohody uvedených v doporučeních pro návrh lávek nebo technických normách, nejčastěji splnění limitního zrychlení při používání lávky lidmi. Nicméně lze najít vliv osazeného tlumiče i na ostatní veličiny. Tlumič do jisté míry tlumí všechny vlastní frekvence konstrukce, nejvíce pak v pásmu frekvencí kolem vlastní frekvence samotného tlumiče. Dochází také ke změnám logaritmického útlumu konstrukce.

Optimálně naladěné tlumiče několikanásobně snižují kmitání konstrukce. Srovnání kmitání konstrukce bez tlumičů a s tlumiči je uvedeno na obr. 2, kde je patrné více než čtyřnásobné zmenšení amplitudy kmitání.

Dle tvaru průběhu funkce závislosti výchylky nebo zrychlení na frekvenci lze posoudit, zda je tlumič optimálně naladěn z hlediska frekvence i útlumu (symetrické snížení maximální amplitudy). Pokud ne, lze následně provést doladění tlumiče (obr. 3). Symetričnosti lze dosáhnout drobnou změnou tuhosti tlumiče (vlastní frekvence), vyhlazení amplitudy pak zvýšením účinnosti tlumicího prvku tlumiče.

4a

4b

Reálná aplikace tlumiče v mostní konstrukci

Popis měřených konstrukcí

První měřená lávka se nachází v Bílovicích nad Svitavou. Přemosťuje řeku Svitavu, spojuje centrum obce s Fügnerovým nábřežím a slouží pro pěší (obr. 4). Lávka má jedno pole s rozpětím 33,2 m a je navržena jako ocelový parapetní nosník proměnné výšky s jednostranným náběhem směrem k levobřežní opěře. Dřevěná podlaha mostovky je uložena na ocelových podélnících, které jsou navařeny na ocelových příčnících. Příčníky v osové vzdálenosti 2 m jsou s hlavními nosníky spojeny tuze, čímž současně tvoří ztužení lávky v příčném směru (Vierendeelův nosník). Nosná konstrukce je vetknuta na levém břehu do betonové masivní tížné opěry s betonovými parapetními stěnami, na pravém břehu je uložena přes elastomerová ložiska na betonový úložný práh. Založení lávky je hlubinné na mikropilotách.

Druhá lávka se nachází na jižním okraji města Banská Bystrica na Slovensku (obr. 5). Přemosťuje rychlostní komunikaci R1, Zvolenskou cestu (I/69) v křižovatkovém rozvětvení a navazuje na městskou cyklotrasu Hušťák-Kráľová. Cyklolávka je navržena jako visutá s jedním skloněným pylonem a se závěsy umístěnými po vnějším okraji hlavního pole. Rozpětí jednotlivých polí lávky je 3,060 + 24,686 + 22,899 + 76,300 + 22,264 + 24,686 + 13,060 m. V příčném směru je nosná konstrukce tvořena dvojkomorovým nosníkem tvaru nepravidelného lichoběžníku o výšce 0,75 m, který je v základním tvaru tvořený horní pásnicí, vodorovnou dolní pásnicí, šikmými stěnami a svislou stojinou dělící profil na dvě komory. Spodní stavba se skládá ze dvou opěr, dvou kotevních bloků kotevních závěsů, jednoho základu pylonu a ze šestice pilířů. Založení lávky je hlubinné na velkoprůměrových pilotách. Na kotevních blocích je založení doplněno trvalými zemními kotvami.

Obě lávky byly projektovány českou projekční kanceláří Link projekt, lávku v Bílovicích nad Svitavou zhotovila společnost Mitrenga - stavby, spol. s r. o., cyklolávku v Banské Bystrici společnost INGSTEEL, spol. s r.o.

Parametry osazených tlumičů kmitů

Obě mostní konstrukce byly na základě návrhu projektanta a výrobce tlumiče (KGF hydraulika s.r.o., Brno) osazeny vertikálními laděnými hmotnostními tlumiči kmitání. Na lávce v Bílovicích nad Svitavou byl instalován jeden tlumič kmitání, lávku v Banské Bystrici tlumí dva tlumiče kmitání. Do mostovky jsou tlumiče zabudovány tak, aby nenarušovaly architektonický vzhled lávky (obr. 4 a 6). Technické parametry obou tlumičů jsou uvedeny v tab. 1. Výroba některých komponent a ladění tlumičů byly upřesněny dynamickým měřením po dokončení výstavby. Správná funkce tlumičů byla následně prokázána druhým dynamickým měřením po uložení tlumiče.

Provozní modální analýza

Pro stanovení modálních parametrů obou měřených konstrukcí před i po instalaci tlumičů kmitání byla použita provozní modální analýza (OMA) s vyhodnocením ve frekvenční

4 Lávka pro pěší přes řeku Svitavu v Bílovicích nad Svitavou **5** Cyklolávka přes rychlostní komunikaci R1 v Banské Bystrici (zdroj: INGSTEEL, 2024)
6 Uložení tlumiče v komoře

5a

5b

6

Tab. 1 Parametry tlumičů kmitů

Označení		**TMDV-350-2.93 Bílovice nad Svitavou**	**TMDV-1000-1.706 Banská Bystrica**
rozměry	[mm]	1 800 × 1 000 × 163	1 446 × 860 × 265
počet tlumičů na konstrukci		1	2
kmitající hmotnost	[kg]	350	1 000
celková hmotnost	[kg]	440	1 280
vlastní frekvence	[Hz]	2,93	1,706
celková tuhost pružin	[kN m^{-1}]	118,72	115,0
jmenovitý útlum	[kN s m^{-1}]	0,99	2,25

doméně [6]. Modální parametry jsou stanovovány při běžném provozu, přičemž budící síly působící na konstrukci nejsou známé. Tato metoda podává informace o modálních charakteristikách objektu při skutečných okrajových podmínkách a skutečné úrovni zatížení.

Protože budící síly působící na konstrukci nejsou známé ani zaznamenávané, algoritmy OMA pro stanovení modálních charakteristik pracují pouze se změřenou odezvou konstrukce. Předpokládá se, že budící síly jsou Gaussovským bílým šumem s nulovou střední hodnotou. Čili buzení je širokopásmové a při buzení jsou vyvozeny všechny módy. Tento předpoklad není při samotném měření nijak kontrolován. Dva základní přístupy způsobů identifikace modálních parametrů se liší v doméně, ve které pracují. Identifikace v podprostoru (SSI – Stochastic Subspace Identification) pracuje se záznamem v časové oblasti, dekompozice ve frekvenční oblasti (FDD – Frequency Domain Decomposition) pracuje ve frekvenční doméně.

FDD vychází ze zápisu pohybové rovnice pomocí konvoluce. Pracuje se záznamem po Fourierové transformaci, ze které je následně stanovena výkonová spektrální hustota (PSD – Power Spectral Density). Matice PSD je čtvercová a pozůstává z autospekter umístněných na diagonále a křížových spekter mimo ni. Rozměr matice *m* je dán počtem použitých snímačů. Vlastní frekvence jsou dány rezonančními vrcholy v grafech jednotlivých PSD, což vede na úlohu hledání maxim [m^2] v grafech. Tato úloha se řeší singulárním rozkladem matice PSD na singulární čísla a singulární vektory. Vlastní frekvence jsou pak dány vrcholy v grafech singulárních čísel. Odpovídající vlastní tvar je singulárním vektorem příslušejícím k danému singulárnímu číslu.

Výsledky dynamických měření

Díky instalaci laděných hmotnostních tlumičů kmitání (TMD) dochází na obou lávkách k okamžitému tlumení konstrukce ve frekvenci budící síly. Vnášené impulzy nevedou k harmonickému rozkmitání lávek. A proto změřený průběh zrychlení nemá typický charakter (pozvolné zvyšování zrychlení reflektující přechod osob uzly vlastních tvarů), ale obě konstrukce se jeví jako tuhý prvek. Rychlejší tlumení je patrné i ze samotných naměřených záznamů zrychlení na časové ose (obr. 7).

Na lávce v Bílovicích nad Svitavou se ve frekvenčním spektru po osazení tlumiče (obr. 8) objevují dva vrcholy ve vzdálenosti cca ±0,27 Hz od hodnoty frekvence prvního vlastního tvaru (2,98 Hz). Kmitání konstrukce ve frekvenci obou vrcholů je ve tvaru jedné svislé ohybové půlvlny. Toto pozorování indikuje správné naladění tlumiče kmitů na frekvenci prvního vlastního tvaru, který byl projektantem požadován k tlumení. Druhá dynamická zkouška potvrdila účinnost tlumiče, přičemž z průběhu frekvenčního spektra (obr. 8b) je patrné, že by tlumič mohl být na této lávce ještě doladěn drobnou změnou vlastní frekvence tlumiče, tak aby oba vrcholy byly v jedné úrovni (obr. 2). Frekvenční spektra uvedená na obr. 8 nejsou pro přehlednost zobrazena se stejným měřítkem na svislé ose zrychlení (zrychlení konstrukce s tlumičem je cca třetinové). Je nutno podotknout, že hodnoty zrychlení jsou závislé na velikosti impulzu, na tlumení konstrukce a také na délce analyzovaného úseku. OMA navíc nepracuje se známou hodnotou zatížení, proto nelze odezvu velikostně porovnávat, ale pro naladění tlumiče na konstrukci je zobrazení i tak více než dostatečné. Obdobné závěry je možné pozorovat i v měření před a po osazení tlumiče kmitání na lávce v Banské Bystrici.

Další výsledky dynamického měření uvádíme pouze heslovitě. Na lávce v Bílovicích poklesla dominantní (tlumená) první vlastní frekvence ohybového kmitání z hodnoty 2,98 Hz bez tlumiče na frekvenci 2,71 Hz s tlumičem (souvisí s doladěním tlumiče). V případě konstrukce v Banské Bystrici se mění dominantní frekvence svislého ohybového kmitání z hodnoty 1,75 Hz na 1,64 Hz.

Efektivní hodnota (RMS – Root Mean Squared) maximálního vertikálního zrychlení při buzení lidmi dominantní frekvencí 2,9 Hz na lávce v Bílovicích nad Svitavou bez tlumení byla přibližně 1 m/s^2, což značně převyšovalo limitní hodnoty. RMS hodnota zrychlení na tlumené konstrukci je 0,311 m/s^2, tedy více jak 3× menší. U lávky v Banské Bystrici osazené tlumiče zmenšily vertikální zrychlení více než 2,5×. RMS hodnota vertikálního zrychlení v hlavním visutém poli na konstruk-

Literatura:

[1] HEINEMEYER, C., BUTZ, C., KEIL, A., SCHLAICH, M., GOLDBECK, A., TROMETOR, S., LUKIC, M., CHABROLIN, B., LEMAIRE, A., MARTIN, P., CUNHA, A., CAETANO, E. Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations. EUR 23984 EN. *Luxembourg (Luxembourg): European Commission;* 2009. JRC53442.

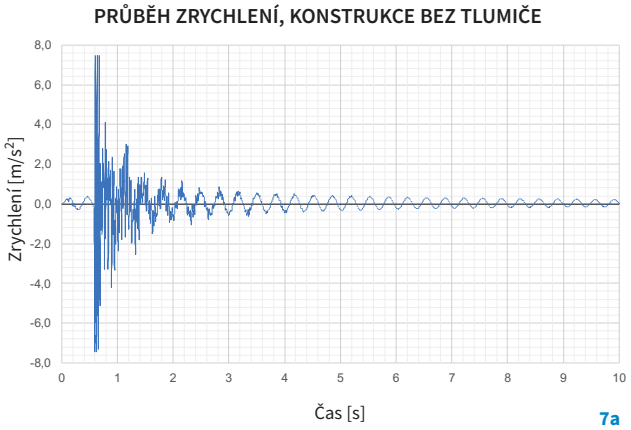
[2] STRÁSKÝ, J., NEČAS, R., KOLÁČEK, J. Dynamic response of concrete footbridges, *Structural Concrete* Vol. 13/2 – Journal of the *fib*, Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlín, červen 2012, ISSN 1464-4177, str. 109–118.

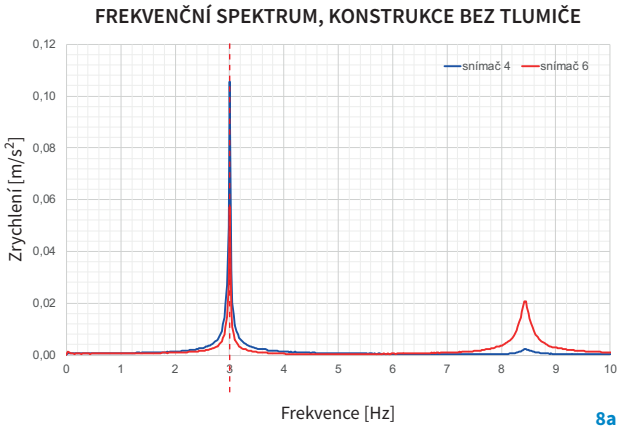
[3] KUČERA, J. Tlumiče kmitů pro lávky a mosty, laděné hmotnostní tlumiče kmitů (TMD), viskózní tlumiče kmitů (stopery). *Konference České asociace ocelových konstrukcí 2023*, sborník přednášek s. 88-90.

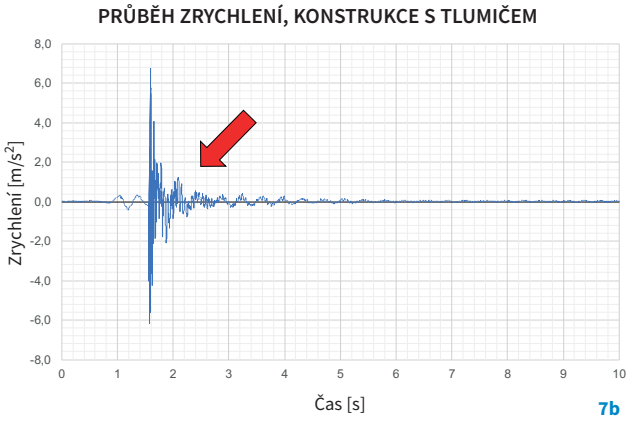
[4] "Footbridges - Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridges under Pedestrian Loading." Published by the Sétra, realized within a Sétra/Afgc (French association of civil engineering) working group © 2006 Sétra – Reference: 0644A - ISRN: EQ-SETRA--06-ED17--FR+ENG.

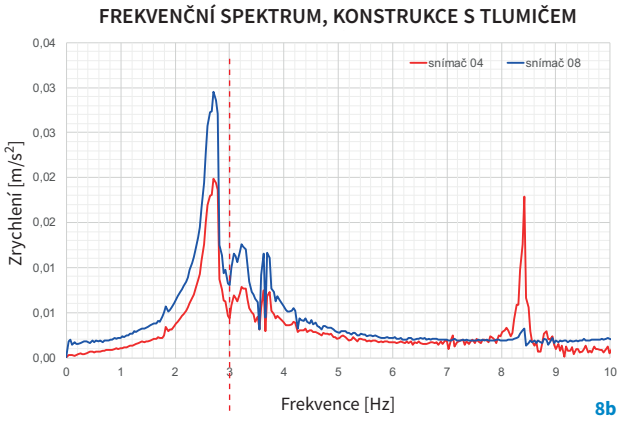
[5] ČSN 73 6209. *Zatěžovací zkoušky mostních objektů.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019, 20 s. Třídící znak 73 6209.

[6] GREINER, B. *Operational Modal Analysis and its Application for SOFIA Telescope Assembly Vibration Measurements.* Stuttgart (2009). Information on https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/3843/1/StudyThesis_Greiner_OMA_hyperlinks.pdf Studienarbeit, Universität Stuttgart. Supervisor Prof. Dr. Alfred Krabbe.









7 Časový průběh zrychlení – lávka v Bílovicích nad Svitavou **8** Frekvenční spektra – lávka v Bílovicích nad Svitavou

ci bez tlumiče byla pro dominantní frekvenci 0,263 m/s^2 a po osazení tlumičů pak 0,101 m/s^2.

Vliv tlumiče kmitání pro dominantní první svislý ohybový vlastní tvar lze ukázat také na zvýšení poměrného útlumu z hodnoty 0,70 % (měření v Bílovicích nad Svitavou v roce 2022) na hodnotu 2,05 až 2,80 % (měření 2023). Útlum netlumené ocelové visuté konstrukce na Slovensku pro dominantní frekvenci je pro ilustraci jen 0,13 %. Útlum pro tlumenou konstrukci nebyl, pro komplexní provázanost ohybových, příčných a kroutivých tvarů ovlivněných tlumičem, stanoven.

Závěr

Dynamické zkoušky lávek byly provedeny v souladu s normovými předpoklady [5]. Dynamické chování obou lávek s osazenými tlumiči kmitání splňuje české i mezinárodní normy s ohledem na kritéria pohody [4], [5] a obě lávky bylo možné uvést do provozu.

Dílčí závěry, jež jsou výsledkem spolupráce mezi výzkumnou organizací a praktickou sférou na poli dynamika stavebních konstrukcí, ukazují, že komfort chodců, štíhlý subtilní design, minimalizace počtu pevných opěr a v neposlední řadě úspora materiálu jsou hlavními důvody pro integraci tlumení kmitání do projektu mostní konstrukce. Stěžejním cílem je chránit chodce, cyklisty i most před nežádoucím kmitáním či poškozením.

Pro budoucí mostní konstrukce má společnost KGF hydraulika vyvinuty nové třecí tlumicí prvky, které rozšiřují oblast použití laděných hmotnostních tlumičů (TMD) i pro nízkonákladové a provizorní lávky a pro tlumení závěsů mostů bez nutnosti úprav závěsů a jeho okolí. Tyto nové tlumicí prvky jsou založeny na rotačních třecích discích. Výhodou je, že velikost tlumicí síly je téměř nezávislá na teplotě. Přestože tlumicí síla není lineárně závislá na rychlosti, tak jako v případě viskózních tlumičů, závislost pohlcené energie může být velmi dobře aproximována vhodným designem. Výsledná odchylka pohlcené energie od ideální charakteristiky viskózních tlumicích prvků může být tak menší než odchylka způsobená změnou teploty viskózních tlumicích prvků.

Vhodným návrhem těchto třecích tlumicích prvků lze docílit životnosti laděných hmotnostních tlumičů (TMD) bez údržby až na úroveň životnosti samotné lávky či mostu.

Článek vznikl za podpory projektu FAST-S-22-7945 Vliv velikosti předpětí a nespojité hmoty na dynamické vlastnosti předpjatých betonových mostních konstrukcí a výzkumného projektu Technologické agentury České republiky CK04000261 - AMODIS Pokročilé monitorování a diagnostika mostů s využitím provozní modální analýzy.

doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.
Fakulta stavební VUT v Brně
necas.r@fce.vutbr.cz

Ing. Jiří Kučera
KGF hydraulika s.r.o.
kgf@kgf.cz

Ing. Jan Koláček, Ph.D.
Fakulta stavební VUT v Brně
kolacek.j@fce.vutbr.cz

Ing. Kristína Bezručová
Fakulta stavební VUT v Brně
bezrucova.k@fce.vutbr.cz