

MOSTY 2024

29. MEZINÁRODNÍ SYMPOZIUM
MOSTY/BRIDGES 2024

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ



LADĚNÝ HMOTNOSTNÍ TLUMIČ V MOSTNÍ KONSTRUKCI

doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.

FAST VUT Brno, Veveří 95, 602 00 Brno
Tel.: +420 541 147 855, E-mail: necas.r@fce.vutbr.cz

Ing. Jiří Kučera

KGF hydraulika s.r.o., Bohunická 1a/743, 619 00 Brno
Tel.: +420 543 245 870, E-mail: kgf@kgf.cz

Ing. Jan Koláček, Ph.D.

FAST VUT Brno, Veveří 95, 602 00 Brno
Tel.: +420 541 147 870, E-mail: kolacek.j@fce.vutbr.cz

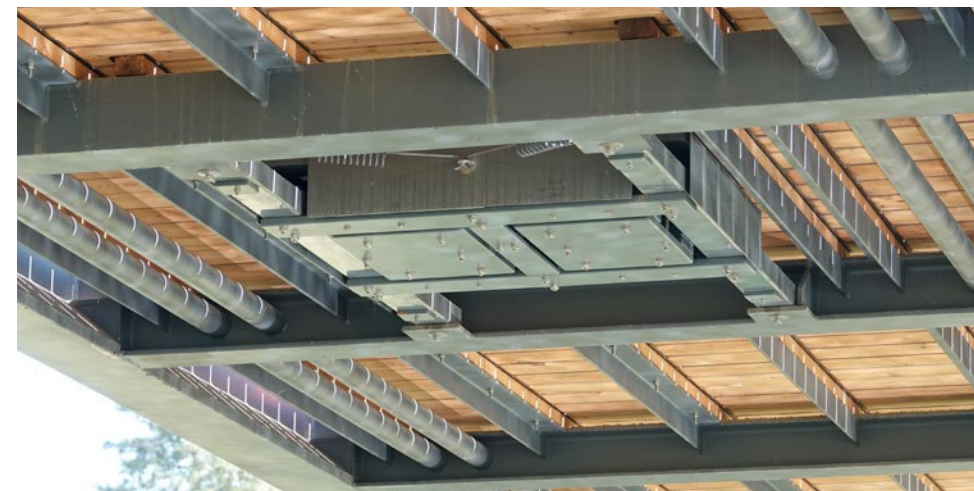
Ing. Kristína Bezručová

FAST VUT Brno, Veveří 95, 602 00 Brno
Tel.: +420 541 147 870, E-mail: bezrucova.k@fce.vutbr.cz

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. V předloženém textu jsou uvedeny poznatky z návrhu laděných hmotnostních tlumičů, z jejich výroby i možnosti optimalizace. Správnost návrhu byla ověřena na dvojici lávek 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 logaritického dekrementu útlumu.

TUNED MASS DAMPER IN BRIDGE STRUCTURE

Pedestrian comfort, subtle design, minimizing the number of fixed supports of the footbridge or material saving. These are the key arguments for integrating Tuned Mass Dampers into the bridge project. The goal is to protect people and structure from vibrations and damage. The following paper presents findings from the design, production and tuning of mass dampers, their optimization possibilities and benefits for bridge engineering. The validity of damper design was verified on two footbridges in the Czech Republic and Slovakia. It concerns the footbridge over the Svitava River in Bílovice nad Svitavou and the footbridge over the high-speed road in Banská Bystrica, both are characterized by outstanding structural and architectural design. Dynamic tests including measurement were carried out on both bridges before and after the installation of the dampers. The dynamic monitoring of the compliance of modal parameters was conducted using operational modal analysis (OMA). The evaluation of the dynamic tests also includes the response to pedestrian effects (comfort criteria) and the determination of the logarithmic decrement of the damping.



1. ÚVOD

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

Příspěvek se zabývá tlumením 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 načrtnuty principy a rozdíly mezi viskózním a laděným hmotnostním tlumičem. Vliv tlumiče na odezvu mostní konstrukce je prezentován vyhodnocením měření na dvou reálných konstrukcích u nás i v zahraničí. Publikace je výsledkem dlouhodobé spolupráce fakulty stavební VUT a společnosti KGF hydraulika v oboru vysokotlaké hydrauliky, a především v oblasti analýzy dynamické odezvy mostních konstrukcí, optimalizace a ladění tlumičů kmitání.

2. TLUMIČE KMITÁNÍ PRO LÁVKY A MOSTY

2.1 Kmitání mostní konstrukce

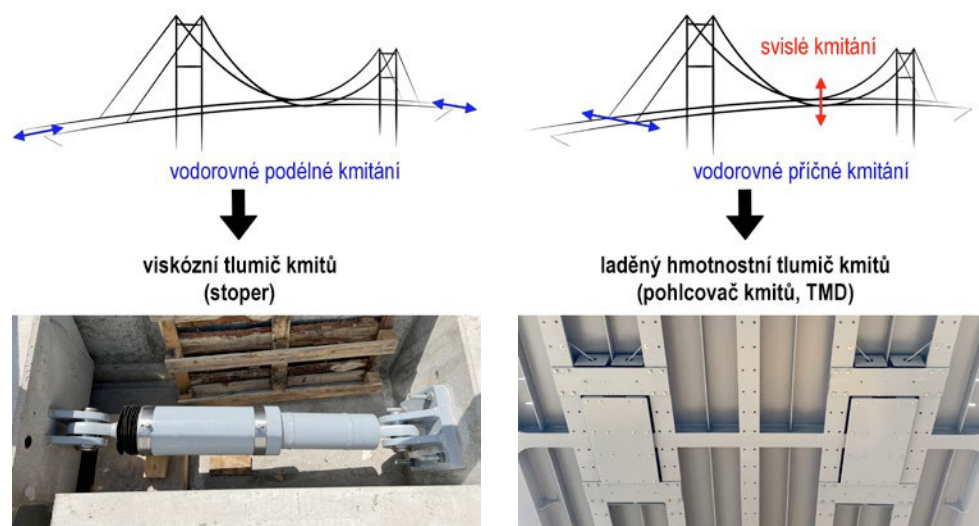
Lávky pro chodce, visuté, zavěšené (lanové) mosty nebo mosty s velkým rozpětím jsou často navrhovány jako štíhlé, subtilní konstrukce jak z architektonických důvodů, tak z důvodů úspory materiálu nosné konstrukce a minimalizace počtu pevných opěr. Tyto konstrukce mohou být však citlivé na dynamické zatížení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

Charakteristikou 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 budících sil především chodců [1]. Nejběžnějším stavebním materiálem pro lávky je beton, ocel, příp. UHPC. Obzvláště 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 budící síly s některou vlastní frekvencí nosné konstrukce při malém vlastním útlumu, může amplituda kmitů dosáhnout nepřístupných hodnot, zejména z hlediska komfortu chodců nebo i z hlediska únavového poškození konstrukce.

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.



Obr. 1 Souvislost mezi směrem kmitání a typem tlumiče kmitů

2.2 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,
- **laděný hmotnostní tlumič kmitů** – TMD (Tuned Mass Dampers), pohlčovač kmitání, omezovač kmitání.

Pro fixaci mostu v podélném směru jsou vhodné **viskózní tlumiče kmitů (stopery)**, 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. 1 vlevo). Tento typ tlumiče je řešen jako hydraulický válec se stejnou činnou plochou na obou stranách pístu, obvykle je umístěn mezi mostovkou a opěrou.

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

Laděné hmotnostní tlumiče i stopery 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].

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

2.3 Laděný hmotnostní tlumič: proces návrhu, výroby a osazení

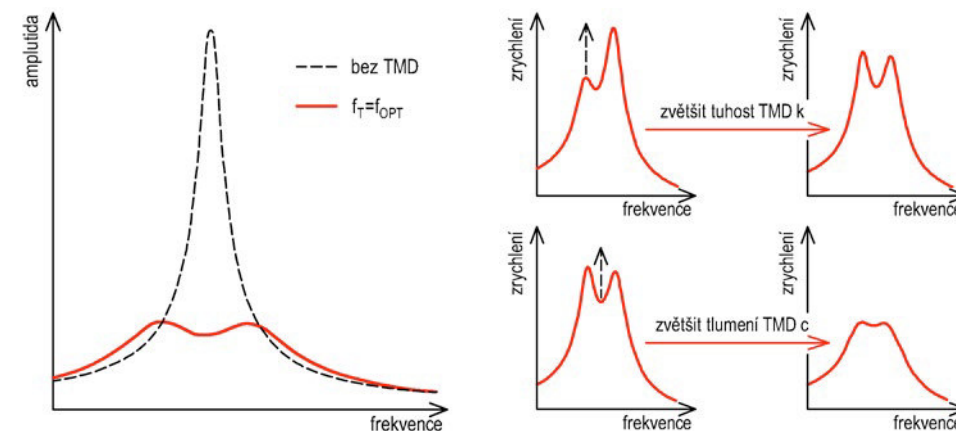
Technické parametry tlumičů jsou navrženy na základě podrobného statického a dynamického výpočtu lávky, ze kterého vyplývá základní specifikace, např. hmotnost závaží nebo tuhost pružin [1]. Provedení tlumiče, způsob jeho uchycení a poloha umístění na lávce projednává výrobce s projektantem mostu. U 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.

2.4 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, nejčastěji splnění limitního zrychlení při používání lávky lidmi. Nicméně lze najít vliv osazeného tlumiče i na ostatních veličinách. 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. Z obrázku je patrné více jak čtyřnásobné zmenšení amplitudy kmitání.

Dle tvaru průběhu funkce závislosti výchylky nebo zrychlení na frekvenci lze posoudit, zda je tlumič optimálně naladěný z hlediska frekvence i útlumu (symetrické snížení max. amplitudy). Pokud ne, lze následně provést doladění tlumiče (Obr. 3). Symetričnost lze dosáhnout drobnou změnou tuhosti tlumiče (vlastní frekvence). Vyhazení amplitudy pak zvýšením účinnosti tlumícího prvku tlumiče.



Obr. 2 Vliv optimálně naladěného tlumiče na kmitání mostní konstrukce

Obr. 3 Schéma doladění suboptimálně naladěného tlumiče

3. REÁLNÁ APLIKACE TLUMIČE V MOSTNÍ KONSTRUKCI

3.1 Popis měřených konstrukcí

Lávka pro pěší o jednom poli s rozpětím 33,2 m slouží k převedení pěší dopravy mezi dvěma břehy řeky Svitavy (Obr. 4). Jedná se o spojnicí centra obce Bílovice nad Svitavou a Fügnerova nábřeží. Lávka 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 naváhány na ocelových příčnících. Příčnky v osové vzdálenosti 2,0 m jsou s hlavními nosníky spojeny tuze, čímž tvoří současně ztužení lávky v příčném směru (Vierendeelův nosník). Nosná konstrukce je

vetknuta na levém břehu do betonové masivní tížné opěry s betonovými parapetními zdmi, na pravém břehu je uložena přes elastomerová ložiska na betonový úložný práh. Založení lávky je hlubinné na mikropilotách.



Obr. 4 Lávka pro pěší v přes řeku Svitavu v Bílovicích nad Svitavou

Druhá měřená lávka se nachází na jižním okraji města Banská Bystrica (Obr. 5). Přemostuje rychlostní komunikaci R1, Zvolenskou cestu (I/69) v křižovatkovém rozvětvení a navazuje na městskou cyklotrasu Hušták - Králová. Cyklořádka je navržena jako visutá s jedním skloněným pylonem a se závěsy umístěnými po vnějším okraji hlavního pole. Rozpětí jednotlivých polí lávky jsou 3,060 + 24,686 + 22,899 + 76,300 + 22,264 + 24,686 + 13,060 m. V příčném směru je nosná konstrukce tvořená 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 dělicí profil na dvě komory. Spodní stavba je tvořená dvěma opěrami, dvěma kotevními bloky kotevních závěsů, jedním základem pylonu a šestící pilířů. Založení lávky je hlubinné na velkopřůměrových pilotách. Na kotevních blocích je založení doplněno trvalými zemními kotvami.



Obr. 5 Cyklořádka přes rychlostní komunikaci R1 v Banské Bystrici

3.2 Parametry osazených tlumičů kmitů

Na obou mostních konstrukcích byly na základě návrhu projektanta a výrobce tlumiče (KGF hydraulika s.r.o., Brno) osazeny laděné hmotnostní tlumiče vertikální. Výroba některých komponent

a ladění tlumičů byly upřesněny dynamickým měřením po dokončení výstavby. Na lávce v Bílovicích nad Svitavou byl instalován jeden tlumič kmitání, lávku v Banské Bystrici tlumí dva tlumiče kmitání. Technické parametry obou tlumičů jsou uvedeny v Tab. 1. Správná funkce tlumičů byla následně prokázána druhým dynamickým měřením po uložení tlumiče. Do mostovky jsou tlumiče zabudovány tak, aby nenarušovaly architektonický vzhled lávky (Obr. 4 a Obr. 6).



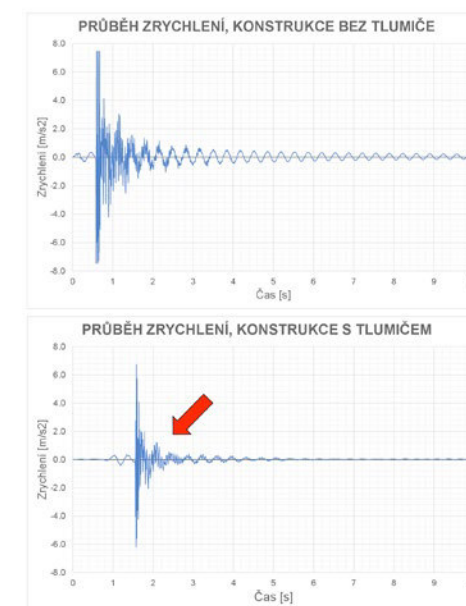
Obr. 6 Uložení tlumiče v komoře

Označení	TMDV-350-2.93 Bílovce nad Svit.	TMDV-1000-1.706 Banská Bystrica
Rozměry [mm]	1800×1000×163	1446×860×265
Počet tlumičů na k-ci	1	2
Kmitající hmotnost [kg]	350	1000
Celková hmotnost [kg]	440	1280
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

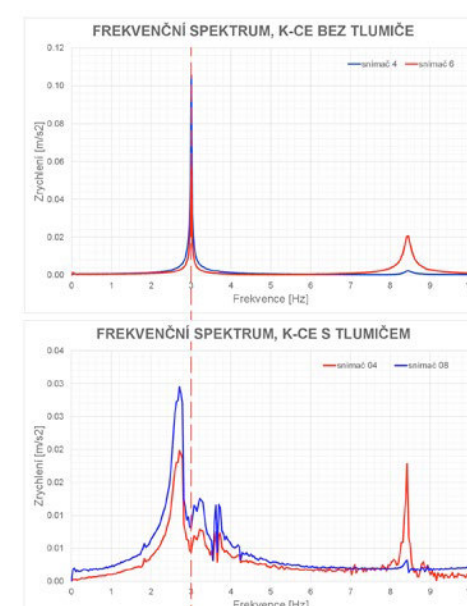
Tab. 1 Parametry tlumičů kmitů

3.3 Výsledky dynamických měření

Obecně lze konstatovat, že díky osazení tlumiče kmitání u obou popisovaných konstrukcí lávek po pěší dochází k okamžitému tlumení konstrukce ve frekvenci budící síly. Vnášenými impulzy proto nedochází k jejich harmonickému rozkmitávání. Změřený průběh zrychlení proto nemá typický charakter (pozvolné zvyšování zrychlení reflektující přechod osob uzly vlastních tvarů), ale obě konstrukce se jeví jako tuhé prvky. Rychlejší tlumení je patrné i ze samotných naměřených záznamů zrychlení na časové ose (Obr. 7).



Obr. 7 Časový průběh zrychlení - lávka v Bílovicích nad Svitavou



Obr. 8 Frekvenční spektra - lávka v Bílovicích nad Svitavou

Ve frekvenčním spektru po osazení tlumiče na lávce v Bílovicích nad Svitavou (Obr. 8) se dle předpokladů objevují dva vrcholy ve vzdálenosti cca $\pm 0,27$ Hz od hodnoty frekvence prvního vlastního tvaru (2,98 Hz). Kmitání konstrukce ve frekvenci obou vrcholů je ve tvaru jedné svislé ohybové půlvlny. Tohle 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. 8 dole) by mohl být tlumič na této lávce ještě doladěn drobnou změnou vlastní frekvence tlumiče, tak aby oba vrcholy byly v jedné úrovni (viz 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 impulsu, 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 (souvise 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.

RMS hodnota maximálního vertikálního zrychlení při buzení lidmi dominantní frekvencí 2,9 Hz na lávce v Bílovicích nad Svitavou bez tlumení byla přibližně $1,0 \text{ m/s}^2$, což značně převyšovalo limitní hodnoty. RMS hodnota zrychlení na tlumené konstrukci je $0,311 \text{ m/s}^2$, tedy více jak $3\times$ menší. U lávky v Banské Bystrici osazené tlumiče zmenšily vertikální zrychlení více jak $2,5\times$. RMS hodnota vertikálního zrychlení v hlavním visutém poli na konstrukci bez tlumiče byla pro dominantní frekvenci $0,263 \text{ m/s}^2$ a po osazení tlumičů pak $0,101 \text{ m/s}^2$.

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 – 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.

4. ZÁVĚR

Provedené dynamické zkoušky byly provedeny v souladu s normovými předpoklady a obě lávky bylo možné uvést do provozu. Dynamické chování obou lávek s osazenými tlumiči kmitání splňuje normové předpoklady s ohledem na kritéria pohody.

Dílejší závěry, vzniklé ze 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 konstrukce má KGF hydraulika s.r.o. pro stavbu hmotnostních tlumičů vyvinuty nové třecí tlumicí prvky, které rozšiřují oblast použití hmotnostních tlumičů i pro nízkonákladové a provizorní lávky a pro tlumení závěsů mostů bez nutnosti úprav závěsů a jeho okolí. Vhodným návrhem těchto třecích tlumících prvku lze docílit životnosti hmotnostních tlumičů bez údržby až na úroveň životnosti samotné lávky či mostu.

5. PODĚKOVÁNÍ

Článek vznikl za podpory projektu FAST-S-22-7945 - Vliv velikosti předpětí a nespojitě 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.

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.

