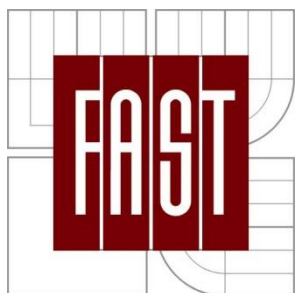


VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF STRUCTURAL MECHANICS

KMITÁNÍ ŠTÍHLÝCH MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ

VIBRATION OF SLENDER BRIDGE STRUCTURES

TEZE DOKTORSKÉ DISERTAČNÍ PRÁCE
PhD THESIS

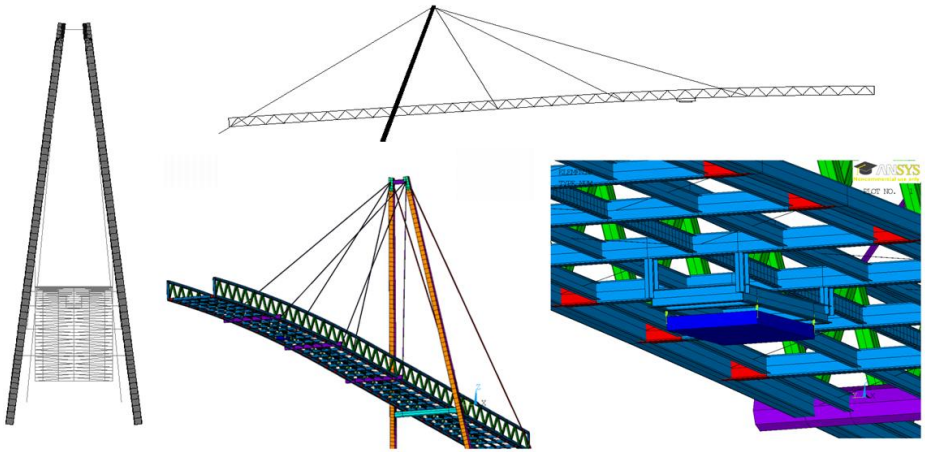
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. ONDŘEJ KIKA

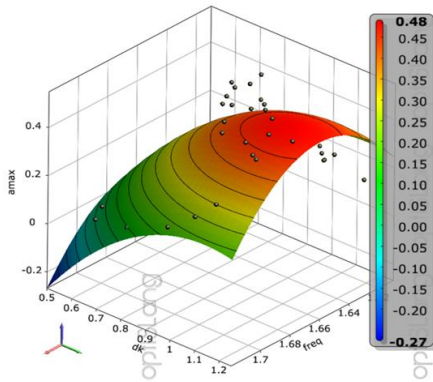
VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLASTISLAV SALAJKA, CSc.

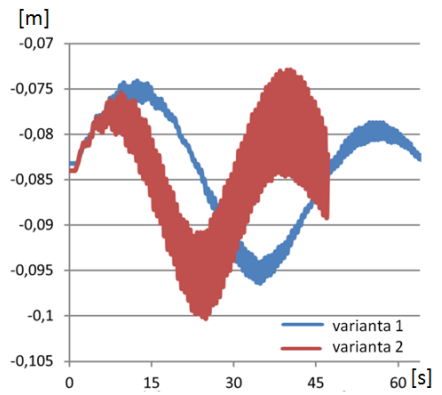
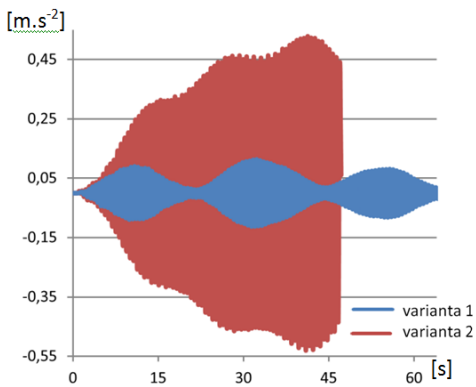
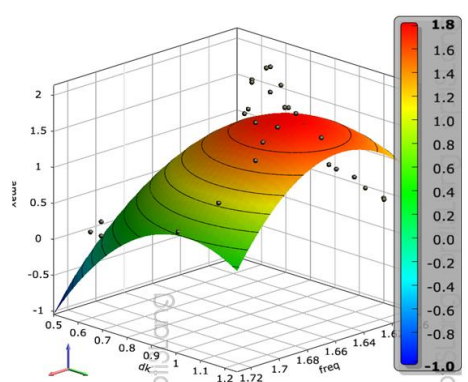
BRNO 2015



Quadratic no mixed regression of a_{max}



Quadratic no mixed regression of a_{max}



Obsah

Obsah	1
Úvod	2
2. Současný stav řešené problematiky	2
3. Cíle disertační práce	2
4. Shrnutí výsledků všech provedených výpočtů	4
4.1 Nejnepříznivější kroková frekvence chodců	4
4.2 Porovnání výsledků odezev na různých konstrukcích lávek s neaktivními tlumiči kmitání	5
4.3 Maximální hodnoty odezev na konstrukcích lávek s aktivními tlumiči kmitání	7
4.4 Optimální hmotnost tlumičů kmitání	9
4.5 Závislosti parametrů tlumičů kmitání na velikosti zatížení	10
4.6 Porovnání výsledků zjednodušeného modelu s modelem lávky L1	11
5. Závěr	11
6. Seznam podkladů a literatury	13
7. Publikační činnost	18
8. Summary	19
9. Životopis	21

Úvod

Štíhlé mostní konstrukce lávek s velkým rozpětím, pro pěší a cyklisty, se navrhují, aby svým ztvárněním tvořily významný architektonický prvek. Při návrhu těchto konstrukcí je většinou dáván důraz na štíhlost konstrukce a malou hmotnost. V důsledku těchto vlastností jsou konstrukce lávek citlivé na nadměrné kmitání a ztrátu komfortu užívání. Ztráta komfortu je zapříčiněna jak působením větru, tak i chodci.

Zatížení konstrukce pohybem chodců je vzhledem k zatížení vlastní tíhou malé, nemá tedy velký vliv na posouzení podle standartních zatěžovacích stavů. Nicméně nadměrným kmitáním konstrukce od dynamického zatížení chodci může dojít k únavovým poruchám na konstrukci a zkrácení její životnosti. Komfort uživatele spadá do posouzení druhého mezního stavu. Je třeba vyhodnotit velikosti výchylek a zrychlení částí mostní konstrukce. Pokud jsou překročeny limity dané příslušnými normami, je třeba provést opatření na snížení vibrací. Toho je možné dosáhnout změnou konstrukčního uspořádání konstrukce, anebo umístěním na konstrukci vhodného zařízení snižující kmitání.

2. Současný stav řešené problematiky

Pokud se zaměříme na zatížení lávky pohybem chodců, jde většinou o buzení blízké rezonančnímu k jednomu nebo i více vlastních tvarů konstrukce. V důsledku toho dochází na konstrukci k nadměrným vibracím. Tyto vibrace se projevují na všech konstrukčních uspořádáních lávek, hlavně u visutých a zavěšených konstrukcí.

Velký zájem o vibrace mostů a lávek vlivem pohybu chodců vzbudilo v červnu roku 2000 otevření nové lávky v Londýně – Millennium Bridge. Vibrace konstrukce způsobené pohybem chodců byly tak zásadní, že nutily chodce zastavit se a držet se zábradlí. Toto nepřípustné chování konstrukce bylo nakonec odstraněno přidáním dodatečných zařízení k tlumení kmitání konstrukce. Tato událost ale dala impuls k detailnějšímu zkoumání interakce chodec – konstrukce.

3. Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je porovnat odezvy konstrukcí lávek na různé zatěžovací modely chodců. Jako první bude uvažován v praxi běžně používaný model, kde jsou účinky chodců nahrazeny silami působícími v určitém místě na mostní konstrukci. Druhý model zohlední zatížení chodci s proměnnou polohou sil odpovídající pohybu při přechodu chodců přes lávku. Pro porovnání bude třeba nalézt extrémní hodnoty odezvy závislé na parametrech chůze chodců, k čemuž lze

využít program OptiSlang. Výpočty odezev budou provedeny metodou konečných prvků v programovém prostředí ANSYS.

Nejprve budou zvolené modely chodců testovány na konečněprvkových modelech zjednodušených konstrukcí „lehké“ a „těžké“ lávky. Předpokládají se účinky dvou synchronně jdoucích chodců. Dále budou porovnány odezvy na třech konstrukcích visutých a zavěšených lávek. Model chodců bude nahrazovat dva synchronně jdoucí chodce, popřípadě čtyři dvojice za sebou synchronizovaně jdoucích chodců. Získané výsledné výsledky budou vyhodnoceny a porovnány.

Dílčím cílem práce je sledování komfortu při přechodu chodců lávky pro model s pevnou polohou sil a pro modely s proměnnou polohou sil. Jako jedna z možných sledovaných hodnot komfortu je velikost zrychlení pohybu konstrukce. Jako kritérium pro svislé kmitání se uvažuje limitní hodnota $0,700 \text{ m.s}^{-2}$. Bude analyzováno, pro jakou skupinu synchronizovaných a nesynchronizovaných chodců je toto kritérium splněno, a kdy je potřeba uvažovat o možné instalaci tlumičů nadměrného kmitání.

Další dílčím cílem je sledování závislostí mezi hmotností konstrukce a její citlivostí na zatížení chodci.

Jedním z cílů práce je zanalyzovat možnosti použití zařízení k redukci kmitání u konstrukcí překračující limitní hodnoty komfortu chodců. Určení optimálních parametrů vybraných variant tlumičů pomocí programu OptiSlang a vyhodnocení jejich účinnosti při odezvě na zatížení dvěma chodci a čtyřmi dvojicemi chodců. Dalšími z cílů je sledovat a zanalyzovat závislosti hmotnosti tlumiče kmitání a modální hmotnosti konstrukce lávky.

4. Shrnutí výsledků všech provedených výpočtů

Celkem bylo provedeno 6 výpočtů různě tlumených konstrukcí lávek pro pěší. Zavěšená lávka L1 s jedním tlumičem kmitání v mostovce, visutá lávka L2 s 1, 2, nebo 3mi tlumiči kmitání v mostovce nebo s tlumiči kmitání na nosných lanech a visutá lávka L3 se dvěma tlumiči kmitání v mostovce. Přehled viz tab. 1.

Tab. 1 Přehled řešených případů konstrukcí lávek

Číslo výpočtu	Lávka	Vlastní frekvence [Hz]	Celková hmotnost [kg]	Modální hmotnost [kg]	Umístění tlumičů	Počet tlumičů [ks]
1	Lávka L1	1,722	220500	50481,0	mostovka	1
2	Lávka L2 - var.A	1,628	84130	51008,6	mostovka	1
3	Lávka L2 - var.A	1,628	84130	51008,6	mostovka	2
4	Lávka L2 - var.A	1,628	84130	51008,6	mostovka	3
5	Lávka L2 - var.B	1,766	98340	46646,6	kabel	4
6	Lávka L3	1,819	112200	22474,2	mostovka	2

4.1 Nejnepříznivější kroková frekvence chodců

Tab. 2 Přehled vlastních a nejnepříznivějších frekvencí

Umístění TMD	Číslo výpočtu	Lávka	Vlastní frekvence [Hz]	Nejnepříznivější kroková frekvence 2 chodců	Rozdíl frekvencí [%]	Nejnepříznivější kroková frekvence pro čtyři dvojice chodců	Rozdíl frekvencí [%]
TMD v mostovce	1	L1	1,722	1,660	-3,6	1,656	-3,8
	2	L2 - var.A	1,628	1,585	-2,6	1,589	-2,4
	3	L2 - var.A					
	4	L2 - var.A					
	6	L3	1,819	1,782	-2,0	1,791	-1,5
TMD v lanech	5	L2 - var.B	1,766	1,780	0,8	1,780	0,8

Lávky jsou zatíženy pohyblivým harmonickým zatížením chodci. Kroková frekvence způsobující nejnepříznivější účinky není shodná s vlastní frekvencí konstrukce. Tato frekvence je pro všechny uvedené lávky a druhy zatížení průměrně o cca 2,7 % menší. Procentuální rozdíl vzhledem k vlastní frekvenci je uveden v tabulce 2. Na visuté lávce s tlumiči v kabelech ve výpočtu 5 přitížení chodci způsobí protažení pružin tlumičů kmitání a nejnepříznivější kroková frekvence mírně stoupne, v tomto případě o 0,8 %.

4.2 Porovnání výsledků odezev na různých konstrukcích lávek s neaktivními tlumiči kmitání

Pro každou ze tří lávek byla spočtena dynamická odezva na zatížení chodci čistě harmonickým výpočtem a výpočtem s pohyblivým zatížením. Nakolik se obě výpočtové metody výsledkově liší u prezentovaných tří modelů lávek, je ukázáno v tabulce 3.

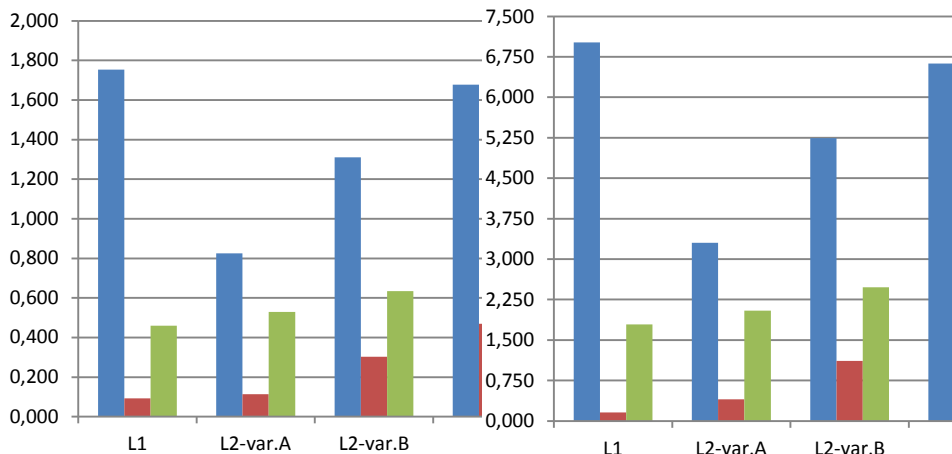
Tab. 4 Porovnání výsledků odezev na lávkách s neaktivními tlumiči kmitání

Maximální zrychlení na konstrukci s NEAKTIVNÍMI tlumiči kmitání [m.s ⁻²]										
Číslo výpočtu	Pro zatížení dvěma chodci					Pro zatížení 4 x 2 chodci				
	Harmonická odezva	Pohyblivé zatížení kroková frekvence = vlastní	Rozdíl maximálních hodnot amplitud zrychlení [-]	Pohyblivé zatížení nejnepříznivější kroková frekvence	Rozdíl maximálních hodnot amplitud zrychlení [-]	Čistě harmonická odezva	Pohyblivé zatížení kroková frekvence = vlastní	Rozdíl maximálních hodnot amplitud zrychlení [-]	Pohyblivé zatížení nejnepříznivější kroková frekvence	Rozdíl maximálních hodnot amplitud zrychlení [-]
1	1,754	0,093	18,9x	0,460	3,8x	7,018	0,160	43,9x	1,789	3,9x
2	0,825	0,113	7,3x	0,530	1,6x	3,300	0,399	8,3x	2,046	1,6x
3										
4										
5	1,311	0,302	4,3x	0,634	2,1x	5,245	1,112	4,7x	2,476	2,1x
6	1,677	0,470	3,6x	0,673	2,5x	6,625	1,768	3,7x	2,399	2,8x

Grafické znázornění maximálních hodnot amplitud zrychlení jednotlivých výpočtů odezvy jsou uvedeny na obrázcích 1 a 2. Hodnoty čistě harmonického výpočtu jsou zobrazeny modrou barvou, výpočet pohyblivého zatížení s krokovou frekvencí rovnou vlastní frekvenci lávky červenou barvou a výpočet pohyblivého zatížení s nejnepříznivější krokovou frekvencí zelenou barvou. Ve všech případech lávek jsou výsledky čistě harmonického výpočtu několikanásobně nadhodnocené vzhledem k výpočtům pohyblivého zatížení. Největší rozdíl ve výsledcích nastává u zavěšené lávky, kde se pohybuje kolem 74 %, nejmenší u visutých, kde je rozdíl průměrně kolem 50 % viz tabulka 4. Z těchto výsledků vyplývá, že výpočet dynamické odezvy lávky na zatížení chodci není ve většině případů možné ověřit pouze harmonickým výpočtem, ale je třeba použít přesnější, i když několika násobně časově náročnější a pracnější, simulaci pohybu chodců v čase po konstrukci.

Tab. 4 Porovnání výsledků jednotlivých výpočtů

Maximální zrychlení na konstrukci s NEAKTIVNÍMI tlumiči kmitání [m.s ⁻²]						
Číslo výpočtu	Pro zatížení dvěma chodci			Pro zatížení 4 x 2 chodci		
	Harmonická odezva	Pohyblivé zatížení nejnepříznivější kroková frekvence	Rozdíl maximálních amplitud zrychlení [%]	Harmonická odezva	Pohyblivé zatížení nejnepříznivější kroková frekvence	Rozdíl maximálních amplitud zrychlení [%]
1	1,754	0,460	-73,8	7,018	1,789	-74,5
2	0,825	0,530	-35,8	3,300	2,046	-38,0
3						
4						
5	1,311	0,634	-51,6	5,245	2,476	-52,8
6	1,677	0,673	-59,9	6,625	2,399	-63,8

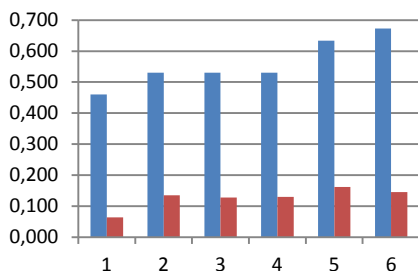


Obr. 1 Přehled maximálních odezev ve zrychlení na zatížení dvěma chodci [m.s^{-2}]

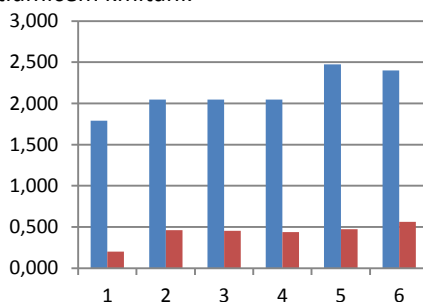
Obr. 2 Přehled maximálních odezev ve zrychlení na zatížení 4x2 chodci [m.s^{-2}]

4.3 Maximální hodnoty odezev na konstrukcích lávek s aktivními tlumiči kmitání

V tab. 5 jsou uvedeny výsledky redukováných odezev ve formě zrychlení na lávkách s aktivovanými tlumiči kmitání. Redukce odezvy po aktivaci tlumičů se u zavěšené konstrukce lávky L1 pohybuje v rozmezí 85 – 90 %. Redukce odezvy na visutých lávkách L2 a L3 v rozmezí 75 – 80 %. Grafické znázornění redukcí odezev je vykresleno na obrázcích 3 pro dva a na obrázku 4 pro čtyři dvojice chodců, kde je pro každý ze šesti výpočtů modře vykreslená maximální hodnota amplitudy zrychlení s neaktivním tlumičem a červeně s aktivním tlumičem kmitání.



Obr. 3 Přehled maximálních odezev ve zrychlení na zatížení dvěma chodci [m.s^{-2}]

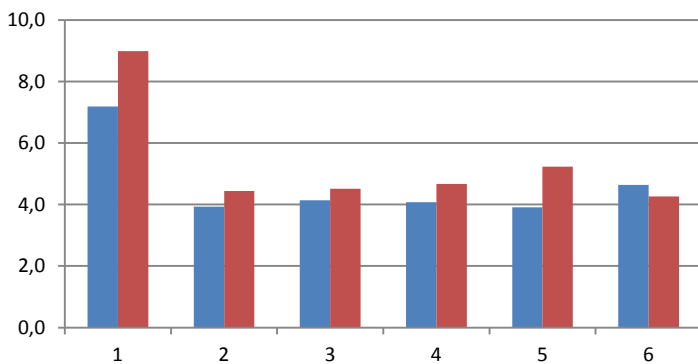


Obr. 4 Přehled maximálních odezev ve zrychlení na zatížení 4x2 chodci [m.s^{-2}]

Tab. 5 Redukce odezvy po aktivaci tlumičů kmitání

Maximální dynamická odezva na konstrukcích s AKTIVNÍMI tlumiči kmitání									
Číslo výpočtu	Lávka	Pro zatížení dvěma chodci				Pro zatížení 4 x 2 chodci			
		Zrychlení – lávka s neaktivním tlumičem kmitání [m.s^{-2}]	Zrychlení – lávka s aktivním tlumičem kmitání [m.s^{-2}]	Redukce odezvy [%]	Redukce odezvy [x]	Zrychlení – lávka s neaktivním tlumičem kmitání [m.s^{-2}]	Zrychlení – lávka s aktivním tlumičem kmitání [m.s^{-2}]	Redukce odezvy [%]	Redukce odezvy [x]
1	L1	0,460	0,064	-86,1	7,2	1,789	0,199	-88,9	9,0
2	L2 - var.A	0,530	0,135	-74,5	3,9	2,046	0,461	-77,5	4,4
3	L2 - var.A		0,128	-75,8	4,1		0,453	-77,9	4,5
4	L2 - var.A		0,130	-75,5	4,1		0,438	-78,6	4,7
5	L2 - var.B	0,634	0,162	-74,4	3,9	2,476	0,473	-80,9	5,2
6	L3	0,673	0,145	-78,5	4,6	2,399	0,563	-76,5	4,3

U zavěšené konstrukce lávky L1 se redukce odezvy pohybuje v rozmezí 7,0 – 9,0x. U visutých lávek s různými sestavami tlumičů v rozmezí 4,0 – 5,0x. To je graficky zobrazeno na obrázku 5, kde modrý sloupec znázorňuje redukcí kmitání pro zatížení dvou chodců a červený sloupec redukcí pro zatížení čtyřmi dvojicemi chodců.



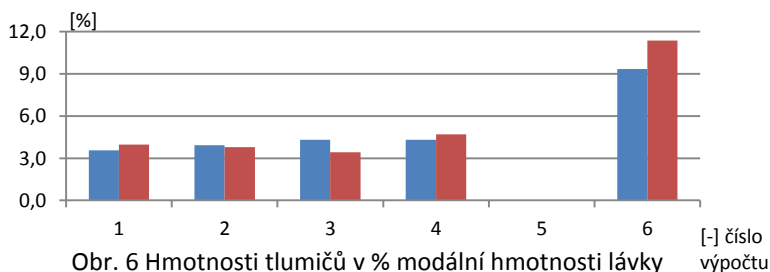
Obr. 5 Redukce kmitání

4.4 Optimální hmotnost tlumičů kmitání

Z provedených výpočtů vyplývá, že aby tlumiče co nejvíce redukovaly dynamickou odezvu konstrukcí, musí mít určitou hmotnost. U lávek L1 a L2 se tato hmotnost pohybuje v rozmezí 4,0 – 5,0 % modální hmotnosti lávky příslušného vlastního tvaru. U lávky L3 se optimální hmotnost tlumičů pohybuje mezi 9,0 – 11,0 %. Grafické znázornění hmotností tlumičů v procentech modální hmotnosti lávky je na obrázku 6. Modré sloupce grafů odpovídají lávkám zatíženým dvěma chodci, červené sloupce zatížené čtyřmi dvojicemi chodců.

Tab. 6 Přehled jednotlivých parametrů tlumičů kmitání pro zatížení dvěma a osmi chodci

Číslo výpočtu	Lávka	Počet chodců	Vlastní frekvence [Hz]	Modální hmotnost [kg]	Hmotnost 1 tlumiče [kg]	Procento modální hmoty [%]
1	Lávka 1	2	1,722	50481,0	1800	3,6
		4 x 2			2000	4,0
2	Lávka 2 - var.A	2	1,628	51008,6	2000	3,9
		4 x 2			1930	3,8
3	Lávka 2 - var.A	2	1,628	51008,6	2200	4,3
		4 x 2			1750	3,4
4	Lávka 2 - var.A	2	1,628	51008,6	2200	4,3
		4 x 2			2400	4,7
5	Lávka 2 - var.B	2	1,766	46646,6		
		4 x 2				
6	Lávka 3	2	1,819	22474,2	2100	9,3
		4 x 2			2550	11,3



Obr. 6 Hmotnosti tlumičů v % modální hmotnosti lávky

4.5 Závislosti parametrů tlumičů kmitání na velikosti zatížení

V tab. 7 je uveden přehled jednotlivých parametrů tlumičů kmitání pro všechny typy lávek pro redukci odezvy na zatížení dvěma a čtyřmi dvojicemi chodců. V dolní části tabulky jsou procentuálně vyjádřeny zeleně nárůsty a červeně poklesy hodnot parametrů tlumičů. Procentuální rozdíly vyjadřují, jak se změní optimální parametry tlumičů při zatížení konstrukce čtyřmi dvojicemi chodců, místo dvou chodců.

Tab. 7 Přehled jednotlivých parametrů tlumičů

Porovnání optimálních hodnot parametrů tlumičů kmitání pro 2 a 4 x 2 chodců							
Číslo výpočtu		1	2	3	4	5	6
Lávka		L1	L2 - var.A	L2 - var.A	L2 - var.A	L2 - var.B	L3
Zatížení 2 chodci	m_1 [kg]	1800		1900	2550		2100
	k_1 [N.m ⁻¹]	54000		54500	65000	4,80E+06	47500
	c_1 [N.m ⁻¹ .s ⁻²]	1200		2200	2200	5500	1600
	m_2 [kg]		2000		1600		
	k_2 [N.m ⁻¹]		44500		55000		
	c_2 [N.m ⁻¹ .s ⁻²]		2550		2600		
Zatížení 4 x 2 chodci	m_1 [kg]	2000		1750	2400		2550
	k_1 [N.m ⁻¹]	58500		55000	70000	1,80E+06	63000
	c_1 [N.m ⁻¹ .s ⁻²]	1650		2300	2450	5500	1500
	m_2 [kg]		1930		1950		
	k_2 [N.m ⁻¹]		51000		64500		
	c_2 [N.m ⁻¹ .s ⁻²]		2600		1500		
Rozdíl	[%]	11,1		-7,9	-5,9		21,4
	[%]	8,3		0,9	7,7	-62,5	32,6
	[%]	37,5		4,5	11,4	0,0	-6,3
	[%]		-3,5		21,9		
	[%]		14,6		17,3		
	[%]		2,0		-42,3		

4.6 Porovnání výsledků zjednodušeného modelu s modelem lávky L1

V tab. 8 jsou porovnány výsledky analýz dvou konstrukcí – zjednodušené konstrukce ocelové lávky a reálné konstrukce lávky. Obě konstrukce mají přibližně stejnou hmotnost na běžný metr a blízkou vlastní frekvenci konstrukce v rozmezí 1,7 – 1,8 Hz.

Tab. 8 Porovnání zjednodušeného modelu lávky s reálnou konstrukcí

	Zjednodušená ocelová konstrukce lávky	Lávka L1
Poměrný útlum	0,5 %	0,32 %
VI. frekvence	1,820 Hz	1,722 Hz
Nejnepříznivější kroková frekvence chodců	1,755 Hz	1,660 Hz
Rozdíl [%]	3,6 %	3,6 %
Odpovídající rychlost pohybu chodců	2,194 m.s ⁻¹	1,859 m.s ⁻¹
Odezva - zrychlení s neaktiv. TMD	0,880 m.s ⁻²	0,460 m.s ⁻²
Odezva - zrychlení s aktiv. TMD	0,084 m.s ⁻²	0,064 m.s ⁻²
Redukce odezvy	10,4 x	7,2 x

Z porovnání je patrné, že nejnepříznivější kroková frekvence chodců je v obou případech nižší o 3,6 % než vlastní frekvence. Redukce dynamické odezvy po aktivaci tlumičů vychází vyšší na zjednodušené konstrukci lávky.

5. Závěr

Disertační práce je věnována modelování metodou konečných prvků konstrukcí lávek pro pěší s cílem určit odezvu těchto modelů na účinky chodců. Byl zkoumán vliv výběru modelu zatížení nahrazující pohybující se chodce na konstrukci lávky. V případě nadměrného kmitání konstrukce byl zkoumán vliv výběru tlumicích prvků na odezvu. Konečněprvkové modely konstrukcí zavěšených a visutých lávek byly sestaveny v programovém systému ANSYS. Odezva podle výběru modelu zatížení chodci byla řešena jako harmonická analýza, popřípadě byla vypočtena přímou integrací pohybových rovnic. Pro určení extrémní odezvy při působení sil s proměnnou polohou modelující účinek chodců byl využit program OptiSlang.

V praxi se zatížení chodci na konstrukci modeluje harmonickými silami umístěnými do kmitny vlastního tvaru konstrukce. Jde o síly odpovídající dynamickému účinku skupiny chodců. Velikost budících sil je závislá na zvoleném modelu popisující přechod chodců přes konstrukci mostu. V uvedeném případě byl zvolen model chodce o tíze 700 N s dynamickými účinky 270 N. Dalším zatěžovacím modelem je skupina chodců pohybující po mostovce podél mostu. Oba modely chodců byly nejprve testovány na zjednodušené konstrukci „lehké“ a „těžké“ lávky pro dva synchronně jdoucí chodce. Druhá varianta modelu chodců nedává extrémní hodnoty odezvy pro frekvenci chůze rovné vlastní frekvenci konstrukce. Parametry chůze vyvolující extrémní odezvu na konstrukci byly zjištěny pomocí parametrických výpočtů v programu OptiSlang. Tato extrémní odezva byla porovnána s odezvou na první model chodců. Bylo zjištěno, že odezva na tento model chodců v podobě harmonických sil, dává velmi nadhodnocené výsledky. Z porovnání výsledků odezev také vyplývá, že je odezva také závislá na hmotnosti konstrukce. Bylo zjištěno že odezva na působení chodců je u hmotnější konstrukce nižší než u lehčí konstrukce.

Dále byly porovnány výsledky odezev obou modelů pro dva případy zatížení chodci. Zatížení bylo aplikováno na konstrukce visutých a zavěšených lávek. Při použití modelu chodců v podobě harmonických sil, tak v případě modelu chodců simulující pohyb chodců po konstrukci byly nejprve uvažováni dva synchronně jdoucí chodci a dále čtyři dvojice za sebou synchronizovaně jdoucích chodců. Z porovnání výsledků vyplývá, že výsledné odezvy modelu chodců v podobě harmonických sil jsou opět výrazně nadhodnocené. Největší rozdíl hodnot maximálních amplitud odezev vzhledem k modelu chodců simulující pohyb chodců po konstrukci byl zjištěn u zavěšené lávky, kde se pohybuje kolem 74 %, u visutých je rozdíl průměrně kolem 50 %. Dále byl detailněji analyzován model chodců odpovídající pohybu chodců přes lávku. Konkrétně závislost maximální hodnoty odezvy na parametrech chůze skupiny osob. Bylo zjištěno, že maximální odezva nenastane při chůzi s budící frekvencí shodnou s vlastní frekvencí lávky, ale při frekvenci o něco nižší. Tento pokles byl analyzován parametrickými výpočty na intervalech budících frekvencí a je průměrně pro všechny uvedené lávky a modely chodců roven 2,7 %.

Maximální hodnoty odezev byly dále posuzovány na podmínky komfortu chodců na konstrukci. Jako jedna z možných kritických hodnot komfortu byla vybrána hodnota $0,700 \text{ m.s}^{-2}$. Na základě linearit výpočtu bylo analyzováno, pro jakou skupinu synchronizovaných a nesynchronizovaných chodců je toto kritérium splněno, a kde je potřeba uvažovat o instalaci zařízení k redukci kmitání. Ukázalo se, že na všech třech lávkách mezní hodnota komfortu pro běžnou skupinu patnácti nesynchronizovaných chodců byla překročena. Vyplývala potřeba redukce kmitání

konstrukcí pomocí tlumičů. Byly analyzovány různé sestavy mechanických tlumičů a sledována jejich teoretická účinnost. Dále byla hledána jejich největší možná účinnost pomocí parametrických výpočtů v programu OptiSlang. Zatížení odpovídalo modelu dvou, popřípadě modelu čtyř dvojic chodců přecházejících konstrukci mostů. Bylo zjištěno, že u zavěšené konstrukce lávky lze vhodnými tlumiči dosáhnout snížení kmitání v mezích 7,0 až 9,0 krát. U visutých lávek se podařilo dosáhnout různými sestavami tlumičů snížení kmitání čtyřikrát až pětkrát. Dále byly také hledány optimální hmotnosti tlumičů kmitání. Parametrické výpočty potvrdily všeobecně doporučené hodnoty pohybující se kolem 4,0 až 5,0 procent kmitající hmotnosti lávky v příslušném vlastním tvaru.

Ze zjištěných poznatků vyplývá, že pro optimální návrh lávky pro pěší je třeba použít vhodnější model chodců odpovídající jejich pohybu podél mostovky. Nicméně je třeba nalézt odpovídající parametry chůze, při kterých nastane nejnepříznivější odezva. Ukázalo se, že při nalezení nejnepříznivější odezvy je frekvence chůze nižší než je vlastní frekvence konstrukce, a to kolem 2,7 procent. Při zanedbání rozdílu ve frekvencích nastává významný pokles v odezvě. Běžně využívaný harmonický výpočet odezvy pro model chodců v podobě harmonických budících sil s pevně zvolenou polohou dává naopak hodnoty odezvy nadhodnocené, a to až kolem 50 % u konstrukcí s lehkou mostovkou. Použití zjednodušeného postupu při řešení odezvy je konzervativní a může vést ke zbytečným návrhům opatření a tudíž ke zvýšení ceny projektu. Z hlediska nejistoty při výpočtech je vždy vhodné se dožadovat provedení dynamické zkoušky. Největším problémem se jeví stanovení úrovně tlumení konstrukce.

6. Seznam podkladů a literatury

- [1] Dallard, P., Fitzpatrick, T., *The millennium bridge, London: Problems and Solutions*, Structural Engineer, 2001
- [2] Fujino, Y., Benito, M., *Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge*, 2006
- [3] Bachman, Amman, *Vibrations in structures induced by man and machines*, 1987
- [4] Wheeler, J.E., *Prediction and control of pedestrian-induced vibration in footbridge*, Journal of Structural Division, 1982
- [5] Newland, D.E., *Pedestrian excitation of bridges – recent results*, Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden, 2003

-
- [6] McRobie, A., Morgenthal, G., *Parallels between wind and crowd loading of bridges*, 2013
- [7] Dallard, P., Fitzpatrick, T., Flint, A., *London Millennium Bridge: Pedestrian-Induced Lateral Vibration*, New York City Bridge Conference
- [8] Matsumoto, Y., Sato, S., Nishioka, T., Shiojiri, H., *A study on design of pedestrian over-bridges*, 1972
- [9] Pretlove, A., Rainer, J., *Human response to vibrations, Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*, Basel, 1995
- [10] Heinemeyer, Ch., Feldmann, M., *European design guide for footbridge vibration*, 2008
- [11] CEB, *BI 209, Srpen 1991*
- [12] Maurer, *Tuned Mass and Viscous Dampers, Technical Information and Products*, 2011
- [13] Chen, J., Chen, K., Chen, I., Liu, L., *A new concept of modal participation factor for numerical instability in the dual BEM for exterior acoustics*. Mechanics Research Communications. 2003
- [14] Bachmann, Lively, H., *Footbridges – A real challenge*. AFGF and OTUA Footbridge Conference, Paris, 2002.
- [15] Kreuzinger, H. *Dynamic design strategies for pedestrian and wind actions*. Footbridge 2002.
- [16] British Standards Institutions, BS 5400, Part 2, Appendix C: *Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges* 1978.
- [17] *Norma ČSN EN 1995-2:2004 Navrhování dřevěných konstrukcí – část 2: Mosty*
- [18] *Norma ČSN EN 1990 – Eurocode : Basic of Structural Design – prAnnex A2*

- [19] Bachman,H. at all, *Vibration problems in structures: Practical Guidelines*, Birkhauser, Basel, ISBN 3-7643-5148-91995, 1995.
- [20] da Silva,J.G.S., da S. Vellasco,P.C.G., de Andrade,S.A.L., de Lima,L.R.O., Figueiredo F. P., *Vibration analysis of footbridges due to vertical human loads*, ScienceDirect, 2006.
- [21] Obata,T., Miyamori,Y., *Identification of a human walking force model based on dynamic monitoring data from pedestrian bridges*. Comput Struct, 2006.
- [22] Bachmann,H., Ammann,W., *Vibrations in structures induced by man and machines*, IABSE Structural Engineering Document 3E, International Association for Bridge and Structural Engineering, ISBN 3-85748-052-X, 1987
- [23] Figueiredo,F.P., da Silva, J.G.S., de Lima, L.R.O., da S. Vellasco, de Andrade, S.A.L., *A parametric study of composite footbridges under pedestrian walking loads*, ScienceDirect, 2006
- [24] Ohlsson,S., *Floor vibrations and human discomfort*, PhD. Thesis, Sweden, Department of structural Engineering, Chalmers University of technology, 1982
- [25] Hashlamoun,W., Hassouneh,M., Abed,E., *New Results on Modal Participation Factors: Revealing a Previously Unknown Dichotomy*. IEEE Transactions on automatic control. 2009
- [26] McRobie,A., Morgenthal,G., *Risk Mananagement for Pedestrian-Induced Dynamics of Footbridges*, Proc. Int. Conf. footbridge 2002, Paris, 2002
- [27] Brownjohn,J. M. W., *Vibration characteristics of a suspension footbridge*. J Sound Vibrat 1997;202(1):29-46.
- [28] Pletz,E., *Construction of Brazil's first cable stayed Stress-laminated timber footbridge*, Advances in engineering software, 2008
- [29] Gentile,C., Gallino,N., *Ambient vibration testing and structural evaluation of an historic suspension footbridge*, Milan, Italy, 2007
- [30] Brincker,R., Zhang,L.M., Andersen, P., *Modal identification from ambient*

responses using frequency domain decomposition. In: Proceedings of 18th int modal analysis conference (IMAC), San Antonio, TX, USA, 2000. p. 625-30.

- [31] Coletti,D.A., *Analytical and field investigation of Roma suspension bridge*. ASCE J Bridge Eng 2002;7(3):156-65.
- [32] Živanović,S., Pavic,A., Reynolds,P., *Vibration serviceability of footbridges under human- induced excitation*. A literature review, *Journal of Sound and Vibration* 279, 2005.
- [33] Salajka,V., Kala,J., Smutný,J., *Uplatnění pokročilých materiálů v integrovaném návrhu konstrukcí*. CIDEAS, Brno, 2008
- [34] Huang,M.H., *Dynamic characteristics of slender suspension footbridges*. Queensland, 2006
- [35] Schlaich,M., *Planning conditions for footbridges*. Proceedings of the international conference on the design and dynamic behaviour of footbridges, Paris, France, 2002
- [36] Pimentel,R., Frenandes,H., *A simplified formulation for vibration serviceability of footbridges*. Proceedings of the international conference on the design and dynamic behaviour of footbridges, Paris, France, 2002
- [37] O'Connor,C., Shaw,P.A., *Bridge loads*. Spon press, London, UK, 2000
- [38] Nakamura,S.I., *Field measurements of lateral vibration on a pedestrian suspension bridge*. The Structural Engineer, 2003
- [39] *User's guide Ansys 12.1*, SAS IP Inc., 2010
- [40] Sadek,F., Mohraz,B., Taylor,W.A., Chung,M.R., *A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications*, National institute of standards and technology, Gaithersburg 1997
- [41] Girard,A., *Modal effective mass models in structural dynamics*. Florence : International Modal Analysis Conference. 1991

- [42] Pirner,M., *Actual behaviour of a ball vibration absorber*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, 2002
- [43] ISO 10137, *Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*, 2007
- [44] Chen,R.S., Cai,S.C., *Coupled vibration control with tuned mass damper for long-span bridges*, Journal of sound and vibration, 2004
- [45] Osinski,Z., *Tlumenie drgan mechanicznych*, Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1986
- [46] Pirner,M., Urushadze,S., *Tunned ball absorber acting in one direction*, Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic
- [47] Náprstek,J., Fischer,C., Pirner,M., *Dynamics of a vibration damper working on a principle of a heavy ball rolling inside a spherical dish*, 17th International Conference, Svratka 2011
- [48] Aslan,H., Starossek,U., *Passive control of bridge deck flutter using tuned mass dampers and control surfaces*, 7th European Conference on Structural Dynamics Eurodyn 2008, Southampton 2008
- [49] Zuo,L., Nayfeh,A.S., *Minimax optimization of multi-degree-of-freedom tuned mass dampers*, Journal of Sound and Vibration, 2003
- [50] Taylor,P.D., Metzger,J., Horne,D., *Modular tuned mass damper units for the spring mountain road pedestrian bridges*,
- [51] Marano,C.G., Morrone,E.,Quaranta,G.,Trentadue,F., *Fuzzy Structural Analysis of a tuned mass damper subject to random vibration*, Hindawi publishing corporation advances in acoustics and vibration volume 2008
- [52] Stráský, J., *Stress gibbon and cable-supported pedestrián bridges*, Thomas Telford Publishing, London, ISBN 0-7277- 3282-X, 2005.

7. Publikační činnost

- [1] Kika, O., *Statická a dynamická analýza technologické pece s komínem*, Diplomová práce, VUT FAST, Brno, 2008
- [2] Kika, O., Kratochvíl, O., Križan, J., *Numerická analýza průběhu porušení betonového trámce za ohybu, část II*, Juniorstav 2008, VUT v Brně, Fakulta stavební, ISBN 978-80-86433-45-5, Brno, 2008
- [3] Kika O., *Seismická analýza nosné konstrukce vertikální průmyslové pece*, Medzinárodná konferencia 70 rokov SvF STU, Fakulta stavební v Bratislavě, ISBN 978-80-227-2979-6, Bratislava, 2008
- [4] Kika O., *Studie účinků seismického zatížení na reálné konstrukci*, 12th International Scientific Conference, VUT Fakulta stavební, ISBN 978-80-7204-629-4, Brno, 2009
- [5] Kika O., *Statická a dynamická analýza nosné konstrukce vertikální průmyslové pece*, Juniorstav 2009, VUT v Brně, Fakulta stavební, ISBN 978-80-214-3810-1, Brno, 2009
- [6] Kratochvíl, O., Kika O., *Dynamická analýza štíhlé mostní konstrukce na zatížení vyvolané chodci se zaměřením na způsob zatěžování*, Juniorstav 2011, VUT v Brně, Fakulta stavební, ISBN 978-80-214-4232-0, Brno, 2011
- [7] Kika O., Kratochvíl, O., *Laděný tlumič na visuté lávce*, Juniorstav 2011, VUT v Brně, Fakulta stavební, ISBN 978-80-214-4232-0, Brno, 2011
- [8] Kika O., Kratochvíl, O., *Dynamické modely zatížení chodci pro dynamickou analýzu mostních konstrukcí*, Juniorstav 2012, VUT v Brně, Fakulta stavební, ISBN 978-80-214-4393-8, Brno, 2012
- [9] Kika O., Kratochvíl, O., *Pohlcovače kmitání na konstrukcích*, Juniorstav 2012, VUT v Brně, Fakulta stavební, ISBN 978-80-214-4393-8, Brno, 2012

- [10] Kika O., *Efektivní modální hmotnost konstrukce*, Juniorstav 2013, VUT v Brně, Fakulta stavební, ISBN 978-80-214-4669-4, Brno, 2013

8. Summary

Doctoral thesis deals to modeling of footbridges using finite element method to determine the response of these models on the effects of pedestrians. It was studied the influence of the selection of pedestrians' model. In the case of excessive vibration of the structure, the influence of the selection of dampers was investigated. Finite element models of structures were made in the program ANSYS. The response was solved as harmonic analysis, or was calculated by direct integration of equations of motion. To determine the extreme response on structure by pedestrians' load it was used program OptiSlang.

In practice, it is used the model of pedestrian load as harmonic forces placed in the maximum of structure's eigenmode. It is a equivalent of effect of the dynamic force of pedestrians. The size of the excitation forces depends on the pedestrians' model and in this case, it was chosen model of pedestrian with weight 700 N with dynamic force 270 N. Another load model is a group of pedestrians moving along the bridge deck. Both models of pedestrians were at first tested on a simplified design of "light" and "heavy" bridges for two synchronously passing pedestrians. The second variant of the model does not give extreme response of structure. Parameters of walk caused extreme response were determined using parametric calculations in the program OptiSlang. This extreme response was compared with response of the first model of pedestrians. It was found that the response to the pedestrian model in the form of harmonic forces gives very exaggerated results.

Results of both responses were compared to two load cases of pedestrians. The load was applied on the suspension and suspended bridges. It was used the load of two pedestrians and load of four pairs of pedestrians. From the comparison of results it is clear, than the model of pedestrians in the form of harmonic forces is significantly overvalued again. The biggest difference of amplitudes of the responses is on suspension bridge and it is about 74%, and for suspended bridges difference is about 50%. It was also detailed analyze the pedestrian model, specifically the dependence of the maximum value of the response and parameters of walking. It was found that maximal response does not occur during walking with the excitation

frequency equaled to the natural frequency of structure, but at a frequency slightly lower. This decline was analyzed by parametric calculations and it is an average for all of these models about 2,7 %.

Maximum values of responses were also assessed on pedestrians' comfort. As one of the possible critical levels of comfort it has been chosen a value 0,700 m.s⁻². Question was for which group of synchronized and non-synchronized pedestrians this criterion is met. This was analyzed based on the calculation of linearity. On all three bridges a limit of comfort for a common group of fifteen unsynchronized pedestrians has been exceeded, it is need to use dampers. Several combination of dampers were analyzed and also it were monitored their theoretical efficiency. The best efficiency of mechanical dampers was analyzed by using parametric calculations in the program OptiSlang. A load corresponds to the model of two or to the model of four pairs of pedestrians crossing the bridge construction. It has been found out that it is possible to reduce vibration 7 to 9 times on suspension bridge and 4 to 5 times on suspended bridges.

Conclusions show that it is better to use pedestrian model based on pedestrian movement along the deck, but it is necessary to find the appropriate parameters which caused maximum response of structure. It turned out that the worst walking frequency for response is lower than the natural frequency of the structure and it is lower about 2,7 percent. Commonly used model for pedestrians in the form of harmonic excitation forces gives overrated values, around 50% for constructions with a lightweight deck. From point of uncertainty in the calculations, it is always recommended to demand the dynamic test on real structure. The biggest problem is determination of damping of the structures.

9. Životopis

OSOBNÍ ÚDAJE

Jméno	Ondřej Kika
Datum narození	30. Července 1984

DOSAŽENÉ VZDĚLÁNÍ

2008 – 2012	VUT Fakulta stavební, Brno, Doktorské studium - Obor konstrukce a dopravní stavby, katedra Stavební mechaniky
2003 – 2008	VUT Fakulta stavební, Brno - Obor konstrukce a dopravní stavby, katedra Stavební mechaniky
1999 – 2003	Gymnázium Čs. Exilu 669, Ostrava - Poruba

ODBORNÁ PRAXE A ZAMĚŘENÍ

2008 – dosud	Pedagogická činnost na Ústavu Stavební Mechaniky Odborné zaměření výuky: Statika stavebních konstrukcí
--------------	---