

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ



Bakalářská práce

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra mechaniky

Dynamický experiment realizovaný na existující lávce pro pěší

The dynamic experiment carried out on an existing footbridge

Autor: Magdaléna Boháčová

Vedoucí práce: prof. Ing. Michal Polák, CSc.

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Boháčová Jméno: Magdaléna Osobní číslo: 468724

Zadávací katedra: K132 - katedra mechaniky

Studijní program: SI - stavební inženýrství

Studijní obor: K - konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Dynamický experiment realizovaný na existující lávce pro pěší

Název bakalářské práce anglicky: The dynamic experiment carried out on an existing footbridge

Pokyny pro vypracování:

Příprava, realizace a vyhodnocení dynamické zatěžovací a dynamické informativní zkoušky na stávající lávce pro pěší, které budou zaměřeny na stanovení charakteristik vlastního kmitání nosné konstrukce lávky a na vyšetření dynamické odezvy lávky na přechody různě uspořádaných skupin chodců.

Seznam doporučené literatury:

ČSN 736209 Zatěžovací zkoušky mostních objektů.

ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou.

ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.

Pirner, M. - Fischer, O.: Dynamika ve stavební praxi.


Maia a kolektiv: Theoretical and Experimental Modal Analysis.

Jméno vedoucího bakalářské práce: prof. Ing. Michal Polák, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 17. 2. 2020

Termín odevzdání bakalářské práce: 17. 5. 2020

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

17. 2. 2020

Datum převzetí zadání

Boháčová

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci na téma „Dynamický experiment realizovaný na existující lávce pro pěší“ vypracovala samostatně pod odborným vedením prof. Ing. Michala Poláka, CSc. a všechny použité zdroje jsem uvedla v příloženém seznamu.

V..... dne.....

Magdaléna Boháčová

Poděkování

Ráda bych poděkovala prof. Ing. Michalu Polákovi, CSc. za odborné vedení, trpělivost, čas a cenné rady, které mi při zpracování práce poskytl. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Tomáši Plachému, Ph.D. a Ing. Vladimíru Šánovi, Ph.D. za odbornou pomoc při experimentu. Tímto také děkuji studentům, kteří byli při experimentu nápomocni.

Abstrakt

Předmětem této práce je dynamický experiment realizovaný na existující lávce pro pěší. V první části práce je shrnuta problematika především experimentální dynamické analýzy lávek pro pěší. Součástí první části práce je také přehled norem, předpisů a doporučení, které se daného tématu týkají. V druhé části práce je popsána příprava, realizace a vyhodnocení dynamického experimentu uskutečněného na existující lávce pro pěší v Praze 6 přes Patočkovu ulici. V rámci experimentu byla provedena experimentální modální analýza, při které byly vyhodnoceny vlastní frekvence a vlastní tvary nosné konstrukce lávky. Dále byla realizována dynamická zkouška zatěžovací, při které byla sledována dynamická odezva konstrukce lávky na dynamické zatížení chodci. Získané výsledky byly na závěr posouzeny podle současných norem, předpisů a doporučení.

Klíčová slova

Dynamika, lávka pro pěší, experiment, vibrace, experimentální modální analýza, dynamická zkouška zatěžovací, kritérium pohody, chodci, posouzení dynamické odezvy

Abstract

The topic of this thesis is a dynamic experiment carried out on an existing footbridge. The first part of this thesis is primarily dedicated to an experimental dynamic analysis of footbridges. A summary of standards, regulations and recommendations, that are related to the topic, can be also found in the first part of the thesis. The second part of the thesis is focused on the dynamic experiment on an existing footbridge in Prague 6 across the Patočkova street. The experimental modal analysis was carried out within the experiment and natural frequencies and modes of the structure were evaluated from it. Then the dynamic load testing was performed. The dynamic response to dynamic pedestrian load was evaluated and the final results were assessed according to current standards, regulations and recommendations.

Keywords

Dynamics, footbridge, experiment, vibration, experimental modal analysis, dynamic load testing, comfort criterion, pedestrians, assessment of dynamic response

Obsah

1	Úvod	17
2	Cíle práce	18
3	Úvod do problematiky	19
3.1	Základní úlohy dynamiky.....	19
3.1.1	Soustavy s jedním stupněm volnosti (SDOF).....	19
3.1.1.1	Volné netlumené kmitání posuvné.....	20
3.1.1.2	Vynucené tlumené kmitání posuvné.....	20
3.1.2	Soustavy s konečným počtem stupňů volnosti (MDOF).....	21
3.1.2.1	Volné netlumené kmitání posuvné.....	21
3.1.2.2	Vynucené tlumené kmitání posuvné.....	23
3.2	Základní úlohy experimentální analýzy.....	23
3.2.1	Dynamické zkoušky.....	24
3.2.1.1	Dynamické zkoušky informativní.....	25
3.2.1.1.1	AVT (Ambient Vibration Testing).....	25
3.2.1.1.2	FVT (Forced Vibration Testing).....	26
3.2.1.2	Dynamické zkoušky zatěžovací.....	27
3.2.2	Fourierova transformace.....	29
4	Problematika lávek pro pěší	32
4.1	Numerická analýza.....	32
4.1.1	Aplikace základních úloh dynamiky na lávky pro pěší.....	33
4.1.2	Modely dynamického zatížení od chodců.....	36
4.2	Experimentální analýza.....	39

4.3	Přehled norem, předpisů a doporučení.....	39
4.3.1	Dynamický výpočet	41
4.3.1.1	ČSN EN 1991-2 ed.2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou [24].....	41
4.3.1.2	ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí [26]	44
4.3.1.3	Sétra: Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading [1]	45
4.3.1.4	ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations [27]	46
4.3.2	Dynamický experiment	48
4.3.2.1	ČSN 73 2044 Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí [9].....	48
4.3.2.2	ČSN 73 6209 Zatěžovací zkoušky mostních objektů [10]	49
4.3.2.3	Sétra: Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading [1]	50
5	Dynamický experiment na existující lávce pro pěší v Praze přes Patočkovu ulici	53
5.1	Úvod.....	53
5.2	Popis objektu.....	53
5.3	Měřicí linka.....	56
5.4	Meteorologické podmínky.....	58
5.5	Plán experimentu	59
5.6	Experimentální modální analýza.....	59
5.6.1	Příprava zkoušky	60
5.6.2	Průběh zkoušky.....	63

5.6.3	Vyhodnocení experimentální modální analýzy	64
5.7	Dynamická zkouška zatěžovací	75
5.7.1	Příprava zkoušky	75
5.7.1.1	Měřicí linka	75
5.7.1.2	Předběžné vyhodnocení vlastních frekvencí.....	76
5.7.1.3	Zatěžovací stavy.....	77
5.7.2	Průběh zkoušky.....	78
5.7.3	Vyhodnocení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci..	80
5.7.4	Vyhodnocení nárůstu dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci podle počtu chodců.....	102
5.7.5	Posouzení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci.	104
5.7.5.1	Posouzení podle ČSN 73 6209 Zatěžovací zkoušky mostních objektů [10]	105
5.7.5.2	Posouzení podle ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí [26]	108
5.7.5.3	Posouzení podle NAD ČSN EN 1991-2 NA ed. A [24].....	112
5.7.5.4	Posouzení podle Sétra: Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading [1].....	116
5.7.5.5	Posouzení podle ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations [27]	120
5.7.5.6	Shrnutí posouzení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci	122
6	Závěr	124
7	Seznam literatury.....	128

Seznam obrázků

Obr. 1 Průběh výchylky vynuceného tlumeného kmitání v čase [2]	21
Obr. 2 Schéma uspořádání měření [6]	27
Obr. 3 Fourierova transformace [14]	31
Obr. 4 Tři fáze řešení MKP – stanovení výpočtového modelu, rozdělení modelu na konečné prvky, vyhodnocení [18]	33
Obr. 5 Rezonanční křivka a fázová charakteristika ustáleného tlumeného vynuceného kmitání [2] [20]	36
Obr. 6 Časový průběh vertikálních kontaktních sil při chůzi (vlevo) a běhu (vpravo), upraveno z [29]	38
Obr. 7 Efektivní hodnota (RMS) [31]	40
Obr. 8 Rozsahy hodnot zrychlení [m/s^2] pro svislé kmitání mostovky [1]	46
Obr. 9 Rozsahy hodnot zrychlení [m/s^2] pro vodorovné kmitání mostovky [1]	46
Obr. 10 Přípustné hodnoty zrychlení pro svislé kmitání v závislosti na frekvenci [27] ..	47
Obr. 11 Přípustné hodnoty zrychlení pro vodorovné kmitání v závislosti na frekvenci [27] ..	48
Obr. 12 Přesná poloha zkoušeného mostního objektu – lávky pro pěší přes Patočkovu ulici (zdroj: mapy.cz)	54
Obr. 13 Pohled na příčný řez lávky včetně rozměrů.....	54
Obr. 14 Boční pohled na lávku včetně rozpětí polí.....	55
Obr. 15 Svařovaný styčník.....	55
Obr. 16 Pohled na nosnou konstrukci lávky zdola.....	56
Obr. 17 Únavové detaily v místě styku podélných výztuh s příčnickem.....	56
Obr. 18 Dva snímače zrychlení 8344 připevněné magnetem k ocelovému závaží.....	57
Obr. 19 Měřicí ústředna SIRIUS připojená k ovládacímu počítači.....	58
Obr. 20 Průběhy teploty vzduchu během experimentu	58
Obr. 21 Schéma konstrukce včetně označení sítě bodů.....	62

Obr. 22 „Complex Mode Identifier Function“ s vyznačenými vyhodnocenými vlastními frekvencemi.....	65
Obr. 23 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 3,265 Hz.....	67
Obr. 24 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 3,66 Hz	68
Obr. 25 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 4,625 Hz.....	68
Obr. 26 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 4,84 Hz	69
Obr. 27 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 5,84 Hz	69
Obr. 28 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 6,16 Hz	70
Obr. 29 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 7,44 Hz	70
Obr. 30 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 8,64 Hz	71
Obr. 31 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 10,45 Hz.....	71
Obr. 32 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 11,28 Hz.....	72
Obr. 33 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 12,03 Hz.....	72
Obr. 34 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 13,91 Hz.....	73
Obr. 35 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 15,66 Hz.....	73
Obr. 36 Schéma umístění snímačů při dynamické zatěžovací zkoušce.....	75
Obr. 37 Idealizace tuhosti mezilehlé kloubové podpory spojitého nosníku v závislosti na rozpětích polí.....	76
Obr. 38 Záznam č. 1, snímač 173z	84
Obr. 39 Detail záznamu č. 1 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení.....	84
Obr. 40 Záznam č. 1, snímač 251y.....	85
Obr. 41 Detail záznamu č. 1 dlouhý 5 s, kde byl naměřen extrém zrychlení	85
Obr. 42 Detail záznamu č. 1 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení.....	85
Obr. 43 Záznam č. 14, snímač 61z	86
Obr. 44 Detail záznamu č. 14 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení.....	86

Obr. 45 Záznam č. 14 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve svislém směru).....	87
Obr. 46 Záznam č. 14, snímač 61y.....	87
Obr. 47 Detail záznamu č. 14 dlouhý 5 s, kde byl naměřen extrém zrychlení	88
Obr. 48 Detail záznamu č. 14 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení.....	88
Obr. 49 Záznam č. 14 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve vodorovném směru)	88
Obr. 50 Záznam č. 18, snímač 251z	89
Obr. 51 Detail záznamu č. 18 dlouhý 5 s, kde byl naměřen extrém zrychlení.....	89
Obr. 52 Detail záznamu č. 18 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení.....	89
Obr. 53 Záznam č. 18 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve svislém směru).....	90
Obr. 54 Záznam č. 18, snímač 61y.....	90
Obr. 55 Detail záznamu č. 18 dlouhý 5 s, kde byl naměřen extrém zrychlení.....	90
Obr. 56 Detail záznamu č. 18 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení.....	91
Obr. 57 Záznam č. 18 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve vodorovném směru)	91
Obr. 58 Záznam č. 29, snímač 61z	91
Obr. 59 Detail záznamu č. 29 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení.....	92
Obr. 60 Záznam č. 29 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve svislém směru).....	92
Obr. 61 Záznam č. 28, snímač 61y.....	93
Obr. 62 Detail záznamu č. 28 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení.....	93
Obr. 63 Záznam č. 28 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve vodorovném směru)	93
Obr. 64 Záznam č. 35, snímač 61z	94
Obr. 65 Detail záznamu č. 35 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení.....	94
Obr. 66 Záznam č. 35 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve svislém směru).....	94

Obr. 67 Detail záznamu č. 35, tzv. dokmitání konstrukce, ze kterého byla vyhodnocena hodnota logaritmického dekrementu útlumu	95
Obr. 68 FFT Multispectra včetně vyhodnocené obalové křivky dokmitání konstrukce	95
Obr. 69 Záznam č. 36, snímač 171y.....	96
Obr. 70 Detail záznamu č. 36 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení.....	96
Obr. 71 Záznam č. 36 ve frekvenční oblasti (snímače ve vodorovném směru)	96
Obr. 72 Detail záznamu č. 36, tzv. dokmitání konstrukce, ze kterého byla vyhodnocena hodnota logaritmického dekrementu útlumu	97
Obr. 73 FFT Multispectra včetně vyhodnocené obalové křivky dokmitání konstrukce	97
Obr. 74 Záznam č. 37, snímač 173z	98
Obr. 75 Detail záznamu č. 37 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení.....	98
Obr. 76 Záznam č. 37 ve frekvenční oblasti (snímače ve svislém směru)	98
Obr. 77 Detail záznamu č. 37, tzv. dokmitání konstrukce, ze kterého byla vyhodnocena hodnota logaritmického dekrementu útlumu	99
Obr. 78 FFT Multispectra včetně vyhodnocené obalové křivky dokmitání konstrukce	99
Obr. 79 Záznam č. 38, snímač 61y.....	100
Obr. 80 Detail záznamu č. 38 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení.....	100
Obr. 81 Záznam č. 38 ve frekvenční oblasti (snímače ve vodorovném směru)	100
Obr. 82 Detail záznamu č. 38, tzv. dokmitání konstrukce, ze kterého byla vyhodnocena hodnota logaritmického dekrementu útlumu	101
Obr. 83 FFT Multispectra včetně vyhodnocené obalové křivky dokmitání konstrukce	101

Seznam tabulek

Tab. 1 <i>Hodnoty poměrného útlumu pro různé materiály konstrukcí podle [16]</i>	34
Tab. 2 <i>Hodnoty poměrného útlumu pro různé materiály konstrukcí podle [2]</i>	35
Tab. 3 <i>Hodnoty logaritmického dekrementu útlumu a poměrného útlumu podle zkušeností prof. Ing. Michala Poláka, CSc.</i>	35
Tab. 4 <i>Údaje o frekvencích a rychlostech lidského pohybu podle [21] a [22]</i>	37
Tab. 5 <i>Úrovně pohodlí chodců na lávkách pro pěší podle [24]</i>	42
Tab. 6 <i>Třídy provozu na lávkách pro pěší podle [24]</i>	43
Tab. 7 <i>Mezní hodnoty vážených hodnot zrychlení podle [10]</i>	49
Tab. 8 <i>Vyhodnocené vlastní frekvence a vlastní tvary</i>	66
Tab. 9 <i>Předpokládané vlastní frekvence, předpokládané charaktery vlastních tvarů a zvolené budicí krokové frekvence</i>	77
Tab. 10 <i>Provedené zatěžovací stavy s příslušnými čísly záznamů</i>	79
Tab. 11 <i>Extrémy zrychlení vyhodnocené na jednotlivých snímačích ve svislém směru</i> .	81
Tab. 12 <i>Extrémy zrychlení vyhodnocené na jednotlivých snímačích ve vodorovném směru</i>	82
Tab. 13 <i>Maximální RMS hodnoty zrychlení vyhodnocené na jednotlivých snímačích</i> ..	83
Tab. 14 <i>Označení figurantů</i>	102
Tab. 15 <i>Vyhodnocení nárůstu dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci podle počtu chodců</i>	103
Tab. 16 <i>Označení vyhovujících a nevyhovujících vážených RMS hodnot zrychlení dle [10]</i>	106
Tab. 17 <i>Posouzení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci podle [10]</i>	107
Tab. 18 <i>Označení vyhovujících a nevyhovujících hodnot zrychlení dle [26]</i>	108
Tab. 19 <i>Posouzení podle [26] pro svislé kmitání konstrukce</i>	110
Tab. 20 <i>Posouzení podle [26] pro vodorovné kmitání konstrukce</i>	111

Tab. 21 Označení úrovní pohodlí chodců pro posouzení podle NAD normy [24]	112
Tab. 22 Posouzení podle NAD normy [24] pro svislé kmitání konstrukce.....	114
Tab. 23 Posouzení podle NAD normy [24] pro vodorovné kmitání konstrukce.....	115
Tab. 24 Označení úrovní pohodlí chodců pro posouzení podle [1].....	116
Tab. 25 Posouzení podle [1] pro svislé kmitání konstrukce	118
Tab. 26 Posouzení podle [1] pro vodorovné kmitání konstrukce.....	119
Tab. 27 Posouzení podle [27]	121
Tab. 28 Srovnání kritérií pohody chodců podle [1] a NAD normy [24]	126

1 Úvod

V dnešní době jsou lávky pro pěší běžnou součástí infrastruktury. Často se jedná o subtilní konstrukce, ať už z důvodu estetiky či úspory materiálu. Lávky by měly být navrhovány s ohledem na předpokládaný provoz, a tím je pohyb chodců po jejich mostovce, při kterém na lávku působí dynamickými silami. Nejdůležitějšími charakteristikami lávek z hlediska jejich dynamické odezvy na účinky pohybujících se chodců jsou vlastní frekvence konstrukce. V ideálním případě žádná z vlastních frekvencí lávky pro pěší neleží v intervalu krokové frekvence. Ideálního návrhu se však málokdy podaří dosáhnout, neboť při rozpětí lávky zhruba 25 m a více leží zpravidla některá z vlastních frekvencí právě v tomto intervalu. Tato skutečnost může vést k výraznému kmitání lávky, což nepříznivě ovlivňuje pohodu chodců, v extrémním případě může dokonce znemožnit přirozenou chůzi, jako tomu bylo např. v roce 2000 u lávky Millennium Bridge v Londýně [1]. Proto je potřeba tomuto jevu věnovat zvýšenou pozornost, popř. navrhnout vhodná opatření již při projektování lávky.

První část práce obsahuje shrnutí problematiky dynamické analýzy lávek pro pěší, a to především experimentální, protože právě experiment je předmětem této práce. Součástí je také přehled norem, předpisů a doporučení, které se dané problematiky týkají.

Druhá část práce je věnována přípravě, realizaci a vyhodnocení dynamického experimentu na lávce pro pěší v Praze 6 přes Patočkovu ulici. V rámci experimentu byla provedena experimentální modální analýza metodou AVT (Ambient Vibration Testing), při které byly vyhodnoceny vlastní frekvence a vlastní tvary nosné konstrukce. Dále byla realizována dynamická zkouška zatěžovací, při které byla sledována dynamická odezva konstrukce lávky na dynamické zatížení chodci. Vyhodnocené výsledky byly posouzeny podle současných norem, předpisů a doporučení.

2 Cíle práce

Předmětem této práce bylo provedení dynamického experimentu na existující lávce pro pěší se zaměřením na stanovení charakteristik vlastního kmitání a dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci. Dílčí cíle práce lze rozdělit do následujících bodů:

- příprava experimentu,
- realizace experimentu,
- vyhodnocení charakteristik vlastního kmitání,
- vyhodnocení dynamické odezvy na dynamické zatížení chodci,
- vyhodnocení nárůstu odezvy podle počtu chodců,
- posouzení dynamické odezvy na dynamické zatížení chodci podle současných norem, předpisů a doporučení.

3 Úvod do problematiky

Základem klasické mechaniky jsou tři Newtonovy zákony, jež doplňuje d'Alembertův princip. Dynamika se na rozdíl od statiky zabývá příčinami pohybu hmotných objektů, řeší úlohy o dynamické rovnováze, do které jsou kromě pružných a vnějších sil zahrnuty i setrvačné a tlumicí síly. Dynamická odezva konstrukce závisí na dynamických vlastnostech konstrukce (tuhost, hmotnost, útlum) a na časovém průběhu zatížení. Statika řeší úlohy o statické rovnováze vnitřních a vnějších sil a odezva na statické zatížení závisí pouze na tuhosti konstrukce [2] [3].

3.1 Základní úlohy dynamiky

Na rozdělení dynamických úloh lze nahlížet z mnoha hledisek. Podle toho, je-li bráno v úvahu tlumení, rozlišuje se kmitání tlumené nebo netlumené. Je-li soustava zatížena časově proměnnou silou, jedná se o kmitání vynucené, v opačném případě se jedná o kmitání volné. Počet dynamických stupňů volnosti je roven počtu složek vektoru posunutí, kterým je přiřazena nenulová hmota [2] [4].

3.1.1 Soustavy s jedním stupněm volnosti (SDOF)

Nejdůležitějšími charakteristikami soustav s jedním stupněm volnosti je tuhost konstrukce k a hmotnost m , která je diskretizována do jediného bodu. Kmitání soustav s jedním stupněm volnosti popisují pohybové rovnice ve tvaru obyčejných diferenciálních rovnic¹. Podle toho, zda se jedná o kmitání posuvné či otáčivé, mluvíme o neznámém posunutí či pootočení [2] [4].

¹ obyčejné diferenciální rovnice jsou takové rovnice, které obsahují neznámou funkci jedné nezávislé proměnné a její derivace

3.1.1.1 Volné netlumené kmitání posuvné

V této kapitole bylo čerpáno z [2] a [4].

Volné kmitání nastává, když na soustavu nepůsobí žádná budící síla, ale soustava je uvedena do pohybu např. udělením počáteční výchylky či rychlosti. Útlum se zanedbává. Pohybová rovnice má potom tvar

$$m\ddot{w}(t) + kw(t) = 0, \quad (1)$$

kde m je soustředěná hmotnost konstrukce, k tuhost konstrukce a $w(t)$ je neznámé posunutí. Řešení pohybové rovnice má tvar

$$w(t) = w_{0S} \sin(\omega_0 t) + w_{0C} \cos(\omega_0 t), \quad (2)$$

kde w_{0S} a w_{0C} jsou konstanty, které lze určit z počátečních podmínek v čase $t = 0$, a ω_0 je vlastní kruhová frekvence.

$$w_{0C} = w(0), \quad (3)$$

$$w_{0S} = \frac{\dot{w}(0)}{\omega_0}. \quad (4)$$

Pro jeden stupeň volnosti je vlastní kruhová frekvence ω_0 definována vztahem

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

a vlastní frekvence f_0 (počet kmitů za sekundu) je definována jako

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}. \quad (6)$$

3.1.1.2 Vynucené tlumené kmitání posuvné

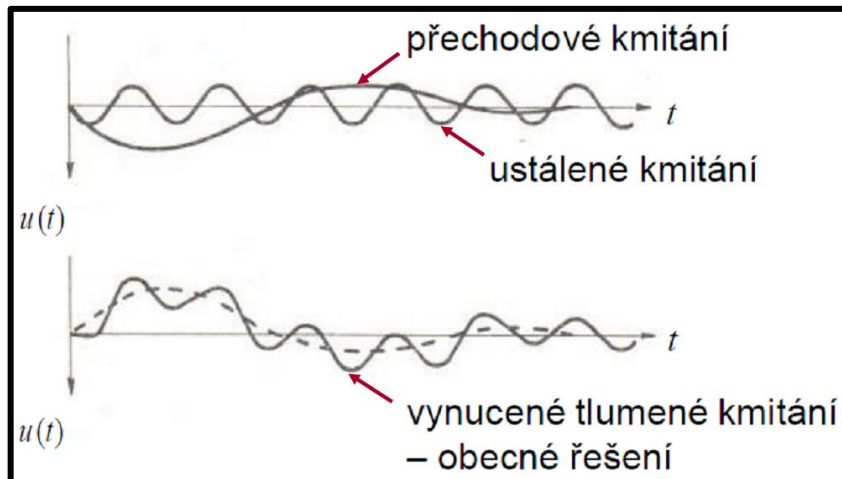
O vynucené tlumené kmitání se jedná v případě, že pohyb soustavy je způsobován budící silou $F(t)$ a tlumení se zanedbává. Pohybová rovnice má tvar

$$m\ddot{w}(t) + c\dot{w}(t) + kw(t) = F(t). \quad (7)$$

Řešení pro harmonickou budící sílu $F(t) = F_A \sin(\omega t)$ má tvar

$$w(t) = w_D e^{-\xi\omega_0 t} \sin(\omega_D t + \varphi_D) + w_A \sin(\omega t + \varphi), \quad (8)$$

kde první člen popisuje volné kmitání s vlastní frekvencí ω_D , tzv. přechodové kmitání, a zbylý člen pak popisuje vynucené kmitání s frekvencí budicí síly ω , tzv. ustálené kmitání, což ilustruje obr. 1 [2] [4].



Obr. 1 Průběh výchylky vynuceného tlumeného kmitání v čase [2]

3.1.2 Soustavy s konečným počtem stupňů volnosti (MDOF)

Kmitání soustav se soustředěnými hmotami a soustav s tuhými prvky se spojitě rozloženými hmotami vede na úlohy s konečným počtem stupňů volnosti. Kmitání soustav s více stupni volnosti je popsáno soustavami obyčejných diferenciálních rovnic, často se využívá vektorový a maticový zápis. Podobně jako ve staticce i zde existují dvě základní metody výpočtu. Jedná se o metodu konstant tuhosti, odpovídající deformační metodě, a metodu konstant poddajnosti, odpovídající silové metodě [2] [4]. Pro další kapitoly bude využívána metoda konstant tuhosti.

3.1.2.1 Volné netlumené kmitání posuvné

Stejně jako v kapitole 3.1.1.1, volné netlumené kmitání nastává, když na soustavu nepůsobí žádná budicí síla a tlumení se zanedbává. Cílem řešení pohybové rovnice je stanovit dynamické charakteristiky systému, a to vlastní kruhové frekvence

a odpovídající vlastní tvary kmitání. Volné netlumené kmitání soustavy s n stupni volnosti je popsáno pohybovou rovnicí

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{w}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{w}(t) = \mathbf{0}, \quad (9)$$

kde \mathbf{M} je matice hmotnosti, \mathbf{K} je matice tuhosti, $\mathbf{w}(t)$ je vektor posunutí a jeho druhá derivace je vektor zrychlení. Řešení rovnice je ve tvaru

$$\mathbf{w}(t) = \boldsymbol{\phi}(A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t)), \quad (10)$$

kde konstanty A a B lze určit z počátečních podmínek. Dosazením (10) do pohybové rovnice (9) vychází

$$(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M})\boldsymbol{\phi}(A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t)) = \mathbf{0} \quad (11)$$

a protože $(A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t))$ není identicky rovno nule, musí být

$$(\mathbf{K} - \omega_n^2\mathbf{M})\boldsymbol{\phi}_n = \mathbf{0}, \quad (12)$$

což je zobecněný problém vlastních čísel. Neznámé jsou vlastní kruhové frekvence ω_n a vlastní tvary kmitání $\boldsymbol{\phi}_n$, kdy n je počet stupňů volnosti a zároveň počet vlastních frekvencí soustavy. Tato homogenní soustava algebraických rovnic má nenulové řešení právě tehdy, když je matice soustavy $\mathbf{K} - \omega_n^2\mathbf{M}$ singulární. To lze např. vyjádřit pomocí podmínky pro determinant ve tvaru

$$|\mathbf{K} - \omega_n^2\mathbf{M}| = 0. \quad (13)$$

Po rozepsání determinantu (13) vychází tzv. charakteristická rovnice, což je algebraická rovnice n -tého stupně. V dynamice obvykle vychází n různých kořenů, které se označují ω_i . Vlastní frekvence se řadí vzestupně $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$. Pak lze ze soustavy rovnic (12) získat nenulové $\widehat{\boldsymbol{\phi}}_i$. Stríška nad vektorem $\boldsymbol{\phi}_i$ je proto, že řešení soustavy (12) není jednoznačné, protože se alespoň jedna složka vektoru řešení volí. Po přidání dodatečné podmínky lze získat normované vlastní tvary $\boldsymbol{\phi}_i$ [2] [4].

3.1.2.2 Vynucené tlumené kmitání posuvné

Vynucené tlumené kmitání soustavy s n stupni volnosti je popsáno pohybovou rovnicí

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{w}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{w}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{w}(t) = \mathbf{f}(t), \quad (14)$$

kde \mathbf{C} je matice útlumu, $\dot{\mathbf{w}}(t)$ je vektor rychlostí a $\mathbf{f}(t)$ je vektor budících sil. Určení matice útlumu soustavy je obvykle velmi obtížné, proto se používá tzv. Rayleighův útlum, který předpokládá matici útlumu jako lineární kombinaci matice hmotnosti a tuhosti pomocí koeficientů α a β . Tyto koeficienty závisí na první vlastní frekvenci ω_1 a poměrném útlumu ξ . Pro harmonické buzení ve tvaru $\mathbf{f}(t) = \mathbf{f}_s \sin(\omega t) + \mathbf{f}_c \cos(\omega t)$ musí být řešení pohybové rovnice ve tvaru

$$\mathbf{w}(t) = \mathbf{w}_s \sin(\omega t) + \mathbf{w}_c \cos(\omega t). \quad (15)$$

Dosazením řešení (15) do pohybové rovnice (14) vychází

$$\begin{pmatrix} \mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} & -\omega \mathbf{C} \\ \omega \mathbf{C} & \mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{w}_s \\ \mathbf{w}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_s \\ \mathbf{f}_c \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Je vidět, že na rozdíl od netlumeného kmitání je nutné řešit soustavu $2n$ lineárních algebraických rovnic pro soustavu s n stupni volnosti [2] [4].

Úlohu „vynucené tlumené kmitání posuvné“ je možné řešit také metodou rozkladů do vlastních tvarů. U této metody je možné postupovat dvěma způsoby, a to s použitím buď tzv. útlumu klasického, nebo neklasického [2] [4].

3.2 Základní úlohy experimentální analýzy

V následujících kapitolách bylo čerpáno z [5], [6] a [7].

Experimentální analýza je důležitou součástí stavební praxe. Experimenty mohou být zaměřeny na různé oblasti: zkoušení materiálových vlastností, experimenty prováděné na celých konstrukcích či konstrukčních prvcích, experimenty zaměřené na sledování zatížení stavebních konstrukcí. Pro tuto práci jsou důležité zejména

experimenty prováděné na celých konstrukcích. Důvodů k experimentálnímu zkoumání konstrukcí může být mnoho, například ověření výstižnosti výpočtových modelů, kontrola, zda je stavba postavena řádně, zjištění vstupních parametrů modelu konstrukce před provedením výpočtu její odezvy na zatížení, porovnání teoretických výsledků s výsledky experimentu a v neposlední řadě posouzení úrovně kmitání stavební konstrukce s ohledem na nepříznivý vliv na lidský organismus či experimentální zjištění důležitých parametrů konstrukce (které nelze spolehlivě určit výpočtem), což úzce souvisí s experimentem na lávce pro pěší, který je předmětem této práce [6].

3.2.1 Dynamické zkoušky

Dynamická zkouška je souhrn experimentálních metod používaných pro sledování kmitání stavebních konstrukcí. Účelem dynamických zkoušek je např. prověření dynamických vlastností nebo stavu konstrukce, ověření její spolehlivosti z hlediska odpovídajících mezních stavů únosnosti a použitelnosti, popř. získání pokladů pro teoretický výpočet. Dynamické zkoušky lze rozdělit na dynamické zkoušky zaměřené na stanovení charakteristik vlastního kmitání (experimentální modální analýza, dynamické zkoušky informativní), a na dynamické zkoušky zaměřené na sledování vynuceného kmitání stavebních konstrukcí (dynamické zkoušky zatěžovací) [5] [6].

Obecná problematika dynamických zkoušek stavebních konstrukcí je popsána normou ČSN 73 2044 „Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí“, která stanovuje jak a za jakých podmínek lze dynamické zkoušky provádět. Zatěžovacími zkouškami mostních konstrukcí se zabývá samostatná norma ČSN 73 6209 „Zatěžovací zkoušky mostních objektů“.

3.2.1.1 Dynamické zkoušky informativní

Dynamické zkoušky informativní jsou zkoušky zaměřené na charakteristiky vlastního kmitání konstrukce, kterými jsou frekvence vlastního kmitání, tvary vlastního kmitání a útlum vlastního kmitání (logaritmický dekrement útlumu, poměrný útlum) [6]. Ve smyslu názvosloví ČSN 73 2044 pojem „dynamická zkouška informativní“ odpovídá termínu „experimentální modální analýza“ [5].

Dynamickou informativní zkoušku lze provádět na stávajících konstrukcích jako nahrazení dynamického výpočtu vlastních frekvencí nebo jako ověření výpočtového modelu zkoušené konstrukce [6]. Existují dva základní postupy experimentálního určování charakteristik vlastního kmitání zkoušené konstrukce. Jsou jimi AVT (Ambient Vibration Testing) a FVT (Forced Vibration Testing). Tyto dva způsoby se liší ve vyhodnocení, ve většině případů i v buzení [5].

3.2.1.1.1 AVT (Ambient Vibration Testing)

Při metodě AVT se využívá zdrojů dynamického zatížení, které na konstrukci přirozeně působí. Přirozeným zdrojem dynamického zatížení může být např. vítr, mikrozeizmicita či pohyblivé zatížení, kam může spadat např. zatížení chodci či dopravou [6]. Při AVT je tedy objekt rozkmitáván neznámými budícími silami, jejichž dynamické vlastnosti není možné sledovat. Tento postup je možné použít u dynamicky citlivých konstrukcí s malým tlumením, tedy např. u ocelových konstrukcí. Ve většině případů je přesnost a vypovídatelnost výsledků menší než u metodiky FVT [5].

Měřicí linka pro metodu AVT se většinou skládá z několika snímačů odezvy konstrukce, včetně referenčního snímače umístěného v referenčním bodě, zesilovače, měřicí ústředny a řídicího počítače. Určení referenčního bodu vychází z požadavku, aby každý z hledaných vlastních tvarů měl v tomto bodě co největší pořadnici. Pokud by měl některý z vlastních tvarů v tomto bodě uzel kmitání, bylo by problematické jej vyhodnotit. Pro hledání optimální polohy tohoto bodu je nutná zkušenost

experimentátora, popř. provést numerickou modální analýzu, ze které lze pro většinu konstrukcí nejvhodnější polohu umístění zjistit. Na konstrukci je vhodně zvolena síť bodů, ve kterých je měřena dynamická odezva, a snímače jsou při měření mezi těmito body v ideálním případě postupně po řezech přemístovány. Snímači naměřené analogové signály jsou v měřicí ústředně převáděny na digitální signál a ten je následně v softwaru plnicím funkcí FFT analyzátoru převeden z časové oblasti do frekvenční [5].

3.2.1.1.2 FVT (Forced Vibration Testing)

Při metodě FVT působí na konstrukci řízená budicí síla, která konstrukci rozkmitává. K buzení konstrukce se většinou používá budič umístěný v jediném bodě. Určení referenčního bodu vychází z požadavku, aby každý z hledaných vlastních tvarů měl v tomto bodě co největší pořadnici. Pokud by měl některý z vlastních tvarů v tomto bodě uzel kmitání, bylo by prakticky nemožné jej vybudit. Výhodou metody FVT je, že na rozdíl od metody AVT je možné sledovat dynamické vlastnosti (budicí frekvence, amplituda) budicí síly. Nevýhodou metody FVT je nutnost připevnění budiče ke konstrukci [5] [8].

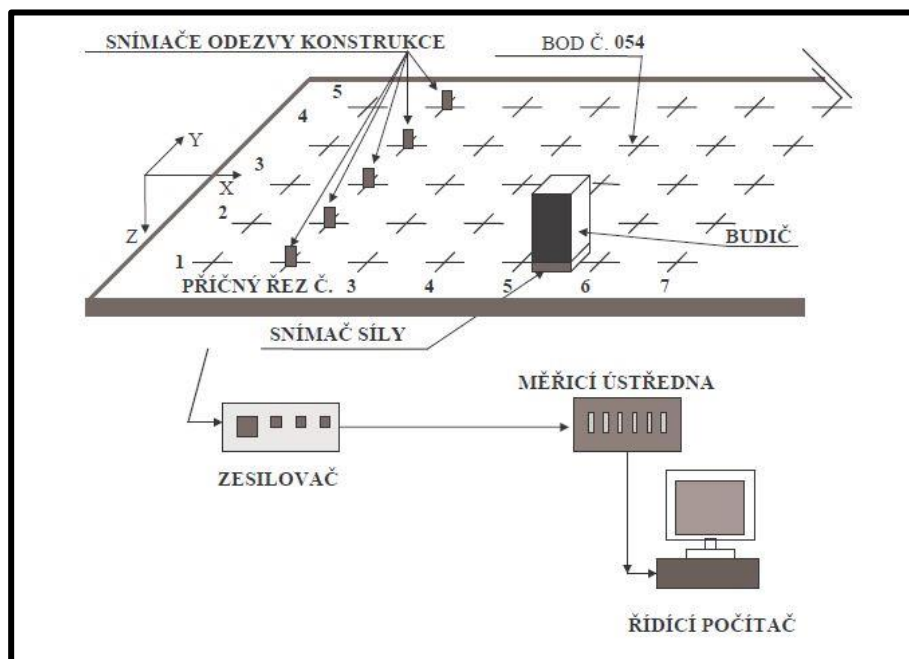
Budiče lze rozdělit na mechanické, elektrodynamické a hydraulické. Dále lze budiče rozdělit podle druhů budicích sil, které vyvozují. Druhy budicích sil jsou: harmonická budicí síla, lineárně proměnná budicí frekvence (Sweep, Swept), nahodilá (Random), budicí síla generovaná ve speciálním tvaru a VCS (Vibration Control System). Budicí síla je u budiče dána setrvačnou silou vzniklou při pohybu závaží. Součástí budičů je řídicí elektronika [5] [6] [8].

Mechanické budiče jsou tvořeny dvěma rotujícími excentry, které jsou poháněny jedním nebo dvěma elektromotory. Řídicí elektronika umožňuje měnit rychlost otáčení excentrů a tím i frekvenci harmonické budicí síly [5].

Elektrodynamické a hydraulické budiče jsou tvořeny setrvačnou hmotou, silovým prvkem a řídicí elektronikou. Řídicí elektronika generuje řídicí signál pro požadovaný

časový průběh budicí síly. Silový prvek, kterým je buď elektromagnetická cívka, nebo hydraulický válec, zajišťuje požadovaný pohyb setrvačné hmoty [5].

Základní část měřicí linky pro metodu FVT zůstává stejná jako při AVT, a to: snímače odezvy konstrukce, zesilovače, měřicí ústředna a řídicí počítač se softwarem pro FFT analýzu. Při FVT je nutné sledovat dynamické vlastnosti budicí síly, a proto jsou do měřicího systému zapojeny snímače síly umístěné mezi budič a konstrukcí.



Obr. 2 Schéma uspořádání měření [6]

3.2.1.2 Dynamické zkoušky zatěžovací

Dynamická zatěžovací zkouška se zabývá vynuceným kmitáním, slouží ke zjištění dynamické odezvy konstrukce na užité (provozní, extrémní), popřípadě jiné dynamické zatížení [5]. Použité zkušební zatížení musí dle [9] odpovídat užitému zatížení z hlediska místa působení i časového průběhu. Není-li možné uведенé parametry dodržet, je třeba použít budicí zařízení, které vyvozuje zatížení co nejvíce podobné požadovanému zatížení.

Při dynamické zatěžovací zkoušce norma [10] připouští použití budiče kmitání, kdy se zpravidla použije harmonická budicí síla s požadovanou frekvencí a amplitudou,

nebo náhodná budicí síla s požadovanou efektivní hodnotou v zadaném pásmu frekvencí. V normě [10] je také uvedeno, že budič se umístí v jednom nebo více místech na mostu tak, aby bylo dosaženo účelu zkoušky. Obdobně použití budiče připouští i norma ČSN 73 2044 „Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí“ [9].

Podle [9] se dynamická zatěžovací zkouška provádí v daných případech. Jedním z nich je například nutnost zjistit dynamickou odezvu konstrukce pro srovnání s dynamickým výpočtem. Norma v článku 4.2.2. odstavci d) také připouští, že dynamická zatěžovací zkouška může nahradit teoretický výpočet. V článku 5.4.4 je uvedeno, že dynamická zatěžovací zkouška může nahradit statickou zatěžovací zkoušku, a to na konstrukcích, u kterých převládají dynamické účinky užitého zatížení nad statickými, nebo na něž nepůsobí užité statické zatížení. Jako první v pořadí se zpravidla provádí statická zatěžovací zkouška, v případě pochybností o technickém stavu konstrukce a její způsobilosti pro statickou zatěžovací zkoušku však může být jako první v pořadí provedena dynamická zatěžovací zkouška.

Při dynamické zatěžovací zkoušce s užitným zatížením nebo zatížením jemu podobným se vyhodnocují maximální výkmity měřených veličin při vynuceném kmitání v dostatečném počtu bodů konstrukce, frekvenční spektra měřených veličin a další amplitudové a frekvenční charakteristiky odezvy konstrukce. Pokud na konstrukci při dynamické zatěžovací zkoušce působí harmonické zkušební zatížení (při použití budicího zařízení), vyhodnocují se frekvence a tvary vynuceného kmitání a amplitudy vynuceného kmitání v dostatečném počtu bodů konstrukce. Pokud na konstrukci při dynamické zatěžovací zkoušce působí náhodné zatížení, vyhodnocují se frekvence a tvary vynuceného kmitání, směrodatné odchylky měřených veličin v dostatečném počtu bodů konstrukce, vlastní frekvence a tvary vlastního kmitání, umožní-li to charakter zaznamenané odezvy [9].

V normě [10] i v jejím předchozím znění [11] je uvedeno, že se při dynamické zatěžovací zkoušce lávek pro chodce a cyklisty zavádí kritérium použitelnosti z hlediska

účinku vibrací na lidský organismus. Kritériem je vážená hodnota zrychlení, která se stanoví nezávisle pro vertikální a horizontální směr kmitání. Mezní hodnoty vážených hodnot zrychlení budou podrobněji zmíněny v kapitole 4.3.

V normě [10] je uvedeno: „Při dynamické zatěžovací zkoušce lávek pro pěší a/nebo cyklisty se provoz na lávce simuluje zpravidla čtyřmi způsoby:

- a) náhodné přechody chodců po lávce na úrovni předpokládané hustoty provozu (počet chodců za jednotku času);
- b) vybuzení kroutivého nebo svislého ohybového kmitání lávky synchronizovaným přechodem dvou chodců našlapujících vždy „stejnou nohou“; kroková frekvence se volí tak, aby odezva lávky na přechod chodců byla co největší;
- c) vybuzení vodorovného příčného kmitání synchronizovaným přechodem dvou chodců našlapujících vždy „stejnou nohou“; kroková frekvence se volí tak, aby odezva lávky na přechod chodců byla co největší;
- d) přejezd lehkého nákladního auta u lávek, které jsou na tento přejezd navrhovány.“

V předchozím znění normy ČSN 73 6209 „Zatěžovací zkoušky mostů“ z roku 1996 [11] zcela chybí zmínka o vodorovném kmitání, a to z důvodu, že norma byla vydána dříve, než nastal problém s vodorovným kmitáním na Millennium Bridge v Londýně v roce 2000. Teprve po této události začala odborná veřejnost vodorovnému kmitání lávek věnovat pozornost.

3.2.2 Fourierova transformace

Fourierova transformace je považována za základní nástroj pro zpracování dynamického signálu, časového záznamu kmitání konstrukce. Umožňuje vzájemně jednoznačný převod z časové oblasti do frekvenční, anebo naopak. Pomocí Fourierovy transformace je tedy možné analyzovat frekvenční obsah (frekvenční spektrum) signálu

[12]. Pro vysvětlení Fourierovy transformace je nutné definovat Fourierovu řadu, která má tvar

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(2\pi f_n t) + b_n \sin(2\pi f_n t)), \quad (17)$$

kde koeficienty a_n a b_n jsou definovány jako

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(2\pi f_n t) dt, \quad (18)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(2\pi f_n t) dt. \quad (19)$$

Pro účely dynamiky je výhodnější zavést Fourierovu řadu ve tvaru

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n), \quad (20)$$

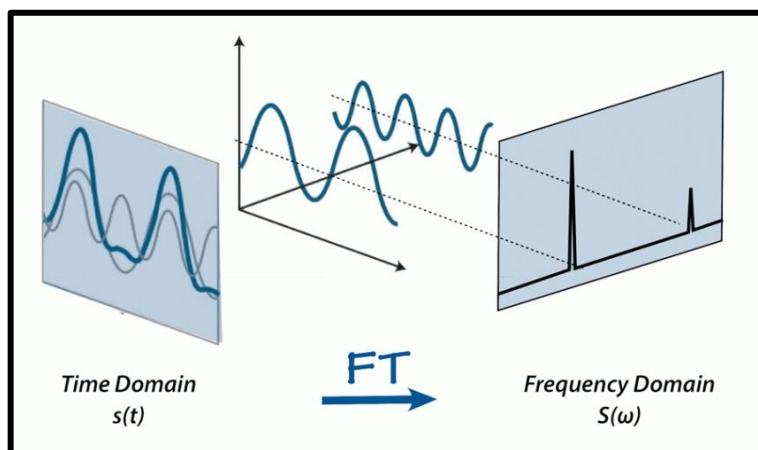
přičemž platí, že amplituda harmonického členu řady s frekvencí f_n je

$$B_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (21)$$

a pro úhel fázového posunu platí

$$\tan \varphi_n = \frac{a_n}{b_n}. \quad (22)$$

Fourierova řada je aproximační funkcí k funkci $f(t)$, jejíž proměnnou je v případě dynamiky čas. Fourierova transformace zavádí funkci nové proměnné, kterou je v případě dynamiky frekvence [13].



Obr. 3 Fourierova transformace [14]

Na obr. 3 převzatém z [14] lze vidět, že díky Fourierově transformaci můžeme získat informaci o frekvenčním složení, amplitudách a fázovém posunu harmonických funkcí, ze kterých se původní signál skládal.

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) pracuje s funkcí času nikoli spojitou, ale bodovou. Musí být definován interval, na kterém se matematická operace provádí. V definici diskrétní Fourierovy transformace nevystupuje jako matematická operace integrál, ale suma [13].

Z hlediska výpočetní techniky vyžadovala diskrétní Fourierova transformace hodně času, což bylo pro praktické využití nevýhodné. Proto byla snaha vyvinout algoritmus, který bude pracovat rychleji. V roce 1965 byla popsána tzv. rychlá Fourierova transformace (FFT), která minimalizuje počet potřebných matematických operací. Použití FFT je vázáno na podmínku, že interval, na kterém pracuje, má velikost 2^n bodových signálů. Pro dynamické experimenty se využívají především intervaly o počtu bodových signálů 512, 1024, 2048, 4096 a 8192 [13].

4 Problematika lávek pro pěší

Lávky pro pěší mají oproti běžným mostům určitá specifika. Mezi ně patří například větší štíhlost a vyšší poddajnost konstrukce, menší šířka a menší hmotnost konstrukce. Jsou na ně častěji kladeny větší požadavky z hlediska architektonického řešení, často se jedná o neobvyklé konstrukční systémy jako např. visuté či zavěšené konstrukce. Mezi další specifika mohou patřit např. požadavky na zábradlí či mostovku [15]. První frekvence vlastního kmitání jsou blízké dominantním frekvencím dynamického zatížení chůzí nebo během. Pokud dojde k rezonanci, je pro ni typická vyšší hladina vibrací ve srovnání s mosty pozemních komunikací či železničními mosty. Tyto vibrace obvykle nezpůsobují problémy konstrukce samotné, mohou ale značně ovlivnit komfort chodců, a proto jsou v normách definovány maximální přípustné hodnoty zrychlení [16].

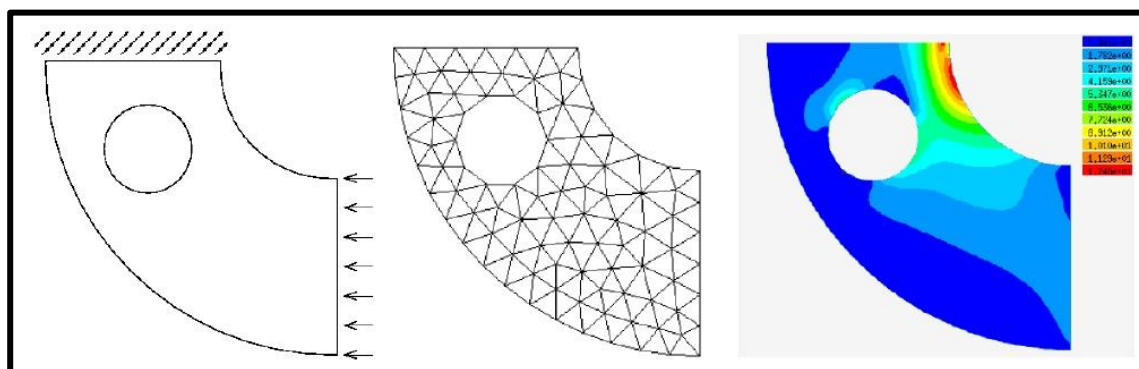
4.1 Numerická analýza

Numerická analýza je matematická disciplína, která má zásadní uplatnění při řešení inženýrských výpočtů. Numerické metody výpočtu pracují s konkrétními číselnými hodnotami, umožňují přibližné řešení úloh, využívají tzv. aproximací². Výpočet úlohy numerickou metodou spočívá v definování zjednodušeného, ale dostatečně přesného matematického modelu, určení vstupních dat a algoritmu, kterým budou výstupní data vypočtena [17].

Numerické metody výpočtu začaly mít zásadní význam s rozvojem výpočetní techniky. Nejvíce využívaná numerická metoda výpočtu, tzv. metoda konečných prvků (MKP), vznikla na počátku 40. let minulého století díky potřebě řešit složité úlohy v inženýrské praxi. Její idea spočívá v rozdělení spojité oblasti do množiny samostatných podoblastí [18]. MKP využívá Lagrangeova principu minima celkové potenciální energie: *„Ze všech možných deformačních stavů tělesa, které neporušují jeho spojitost a respektují*

² zjednodušení, které ale přináší dostatečně přesné výsledky

okrajové podmínky, nastane právě ten, při kterém je potenciální energie systému minimální.“ [19]



Obr. 4 Tři fáze řešení MKP – stanovení výpočtového modelu, rozdělení modelu na konečné prvky, vyhodnocení [18]

MKP umožňuje řešit složité úlohy v různých vědeckých oborech, dynamika stavebních konstrukcí není výjimkou. Dynamické výpočty se dělí na výpočty vlastního a vynuceného kmitání konstrukce [5].

Řešení vlastního kmitání je zobecněný problém vlastních čísel [2].

U vynuceného kmitání je předmětem řešení pohybová rovnice, což je obyčejná diferenciální rovnice 2. řádu. Při řešení se uplatní přímá integrace pohybových rovnic. Základní ideou výpočtu je postupné řešení pohybových rovnic v jednotlivých okamžicích $t_i, t_{i+1}, t_{i+2}, t_{i+3}$ atd. Časová osa se rozdělí pomocí délky integračního kroku $\Delta t = t_{i+1} - t_i$, derivace se nahradí diferencemi a soustava diferenciálních rovnic se převede na rovnice algebraické. Mezi metody výpočtu tohoto typu patří např. metoda centrálních diferencí či Newmarkova metoda [16].

4.1.1 Aplikace základních úloh dynamiky na lávky pro pěší

Při analýze dynamické odezvy konstrukce na zatížení chodci se řeší úloha „vynucené tlumené kmitání“, přičemž pohybová rovnice má tvar

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{r}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{r}(t) = \mathbf{f}(t), \quad (23)$$

kde \mathbf{M} je matice hmotnosti, \mathbf{C} je matice útlumu, \mathbf{K} je matice tuhosti, $\mathbf{r}(t)$ je vektor neznámých přemístění (posunů či pootočení), jeho první derivace je vektor rychlostí, druhá derivace je vektor zrychlení a $\mathbf{f}(t)$ je vektor budících sil, který vystihuje zatížení chodci. Problematika popisu dynamického zatížení chodci je v této práci vysvětlena v následující kapitole 4.1.2.

Při řešení tlumeného kmitání se definuje tzv. poměrný útlum konstrukce ξ :

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}}, \quad (24)$$

kde c je skutečný útlum konstrukce a c_{cr} je tzv. kritická hodnota útlumu, která vyjadřuje rozhraní mezi periodickým a neperiodickým charakterem dynamické odezvy na dynamické zatížení. Pro reálné stavební konstrukce lze obvykle uvažovat $\xi < 0,2$, hodnoty pro různé materiály konstrukcí jsou uvedeny v následujících tab. 1, tab. 2 a tab. 3 [2] [20].

Tab. 1 Hodnoty poměrného útlumu pro různé materiály konstrukcí podle [16]

Materiál konstrukce	Poměrný útlum ξ [%]		
	minimum	průměr	maximum
Železobeton	0,8	1,3	2,0
Předpjatý beton	0,5	1,0	1,7
Ocelobeton	0,3	0,6	-
Ocel	0,2	0,4	-
Dřevo	-	1,0 nebo 1,5*	-
* v závislosti na typech spojů			

V levém sloupci následující tab. 2 převzaté z [2] jsou uvedeny hodnoty pro konzervativní návrh s vyššími požadavky na bezpečnost, v pravém sloupci jsou hodnoty pro běžné konstrukce (úroveň namáhání více než 50% meze kluzu).

Tab. 2 Hodnoty poměrného útlumu pro různé materiály konstrukcí podle [2]

Materiál konstrukce	Poměrný útlum ξ [%]	
Svařovaná ocel, předpjatý beton, železobeton bez trhlin	2-3	5-7
Železobeton s trhlinami	3-5	7-10
Šroubovaná či nýtovaná ocel, dřevo	5-7	10-15

K popisu útlumu konstrukce se používá i tzv. logaritmický dekrement útlumu ϑ , který je definován jako

$$\vartheta = \ln \frac{w(t_i)}{w(t_i + T_D)} \quad (25)$$

kde T_D je vlastní perioda tlumeného kmitání. Pro malý útlum ($\xi < 0,2$) platí [2]:

$$\vartheta \doteq 2\pi\xi. \quad (26)$$

Tab. 3 Hodnoty logaritmického dekrementu útlumu a poměrného útlumu podle zkušeností prof. Ing. Michala Poláka, CSc.

Materiál konstrukce	Logaritmický dekrement útlumu ϑ	Poměrný útlum ξ [%]
Železobeton	0,20	2,5-3,5
Předpjatý beton	0,07	1,0-2,0
Ocelobeton	0,08	1,0-2,0
Ocel	0,05	0,5-1,5

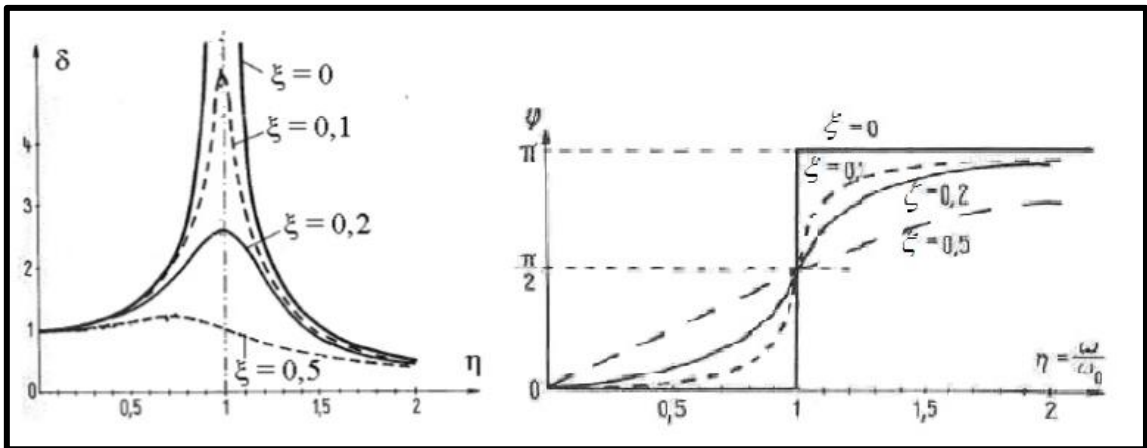
Dalším důležitým a v praxi hojně využívaným pojmem je tzv. dynamický součinitel δ . Je definován jako poměr amplitudy výchylky ustáleného kmitání w a výchylky od statického působení amplitudy budících sil w_{st} :

$$\delta = \frac{w}{w_{st}}. \quad (27)$$

Pro netlumené kmitání platí

$$\delta = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} = \frac{1}{1 - \eta^2} \quad (28)$$

kde η je součinitel naladění, který je definován jako poměr budící frekvence ω a vlastní kruhové frekvence ω_0 [2] [20].



Obr. 5 Rezonanční křivka a fázová charakteristika ustáleného tlumeného vynuceného kmitání [2] [20]

Rezonanční křivka, která je na obr. 5, graficky vyjadřuje vzájemný vztah dynamického součinitele, součinitele naladění a poměrného útlumu konstrukce. Z obr. 5 je patrné, že čím více se frekvence budících sil přibližuje k vlastní frekvenci konstrukce, tím se zvětšují amplitudy výchylek. Zároveň je zjevný vliv útlumu, a to především v rezonanční oblasti [20].

4.1.2 Modely dynamického zatížení od chodců

V následujících kapitolách bylo čerpáno z [1], [16], [21] a [22].

Zatížení chodci je dynamické zatížení, které je charakterizováno časově proměnným průběhem $F(t)$ a mění se pozicí působení. Vznikají nezanedbatelné setrvačné a tlumicí síly, které je nutné zahrnout v dynamickém výpočtu. Chůzi lze chápat jako sinusový pohyb, který vykonává těžiště lidského těla, a to v horizontálním i vertikálním směru. Lidský pohyb v závislosti na rychlosti a způsobu pohybu vyvozuje

odlišnou periodickou sílu působící na konstrukci ve svislém, vodorovném podélném i příčném směru. Frekvence budící síly je nejdůležitější charakteristikou chůze z hlediska dynamiky. Údaje o vztahu mezi vybranými budícími frekvencemi a přibližnými rychlostmi chůze jsou uvedeny v následující tab. 4 [21].

Tab. 4 Údaje o frekvencích a rychlostech lidského pohybu podle [21] a [22]

Druh lidského pohybu	frekvence f [Hz]	rychlost v [m/s]
Pomalá chůze	1,7	1,1
Normální chůze	2,0	1,5
Rychlá chůze	2,3	2,2
Pomalý běh	2,5	3,3
Rychlý běh	>3,2	5,5

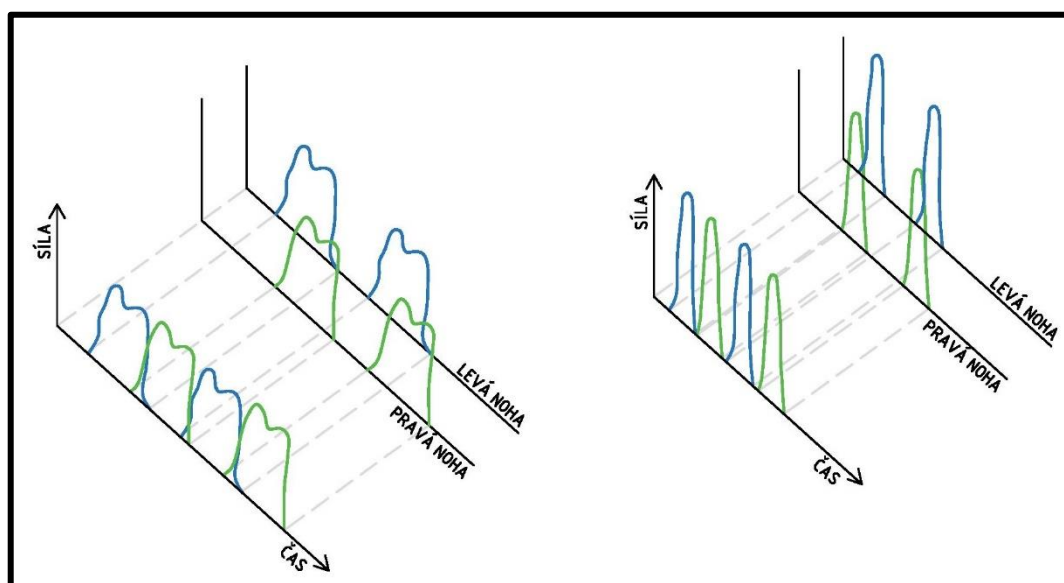
Aby bylo možné při návrhu lávky ověřit mezní stav použitelnosti související s vibracemi její mostovky způsobenými chodci, je nutné definovat modely zatížení chodci. Možné způsoby zatížení lze rozdělit do pěti kategorií:

- a) zatížení jedním chodcem,
- b) normální provoz – prostorově neomezený provoz, kde se každý jednotlivec může volně pohybovat, nemusí měnit vzorec chůze, aby se vyhnul kontaktu s ostatními,
- c) zatížení davem – prostorově omezený provoz, chůze jednotlivce je ovlivněna omezeným prostorem pro jeho pohyb, který je závislý na pohybu chodců v jeho okolí,
- d) skupina chodců – několik osob, které jdou blízko u sebe,
- e) vandalismus – osoba nebo skupina lidí se snaží úmyslně rozkmitat konstrukci [22].

Kromě těchto skupin zatížení se při modelování dynamického zatížení chodci uvažují tři druhy lidského pohybu, a to chůze, běh a rytmický skok [22].

Nejjednodušší způsob modelování dynamických účinků chodců je stacionární osamělá harmonická budicí síla, která je umístěná do nejúčinnější pozice, nebo stacionární harmonické spojité zatížení [16].

Je možné použít i složitější dynamická zatížení, např. budicí síly, jejichž pozice na mostovce se mění a jejichž časový průběh odpovídá skutečnému charakteru kontaktní síly mezi nohama chodce a mostovkou, viz obr. 6.



Obr. 6 Časový průběh vertikálních kontaktních sil při chůzi (vlevo) a běhu (vpravo), upraveno z [29]

Na obr. 6 jsou typické časové průběhy vertikálních kontaktních sil při lidské chůzi a běhu. Svislá složka nášlapové síly při chůzi dosahuje maxima, když je těžiště chodce nejvýše nad pocházenou plochou. Tzv. sedlový bod mezi oběma vrcholy je okamžik, kdy je těžiště nejnižší nad pocházenou plochou, tedy v okamžiku, když se nohy chodce míjejí. Průsečík jednotlivých křivek je okamžik, kdy se obě nohy chodce dotýkají pocházené plochy a kdy je tíha chodce rozložena rovnoměrně na obě nohy. Při běhu tento sedlový bod zmizí [23].

4.2 Experimentální analýza

V této kapitole bylo čerpáno ze zkušeností prof. Ing. Michala Poláka, CSc. a také ze zkušeností, které autorka nabyla při realizaci dynamického experimentu v rámci této bakalářské práce.

Dynamické zkoušky, které byly podrobně popsány v této práci v kapitole 3.2.1, mají při provádění na lávkách pro pěší určitá specifika.

Měřicí linka byla již podrobně popsána v kapitole 3.2.1.1.1. Při dynamických zkouškách na lávkách pro pěší se používají nejčastěji snímače zrychlení (akcelerometry).

Jako první v pořadí se zpravidla provádí experimentální modální analýza (dynamická zkouška informativní), podle konkrétního případu lávky může být provedena metodou AVT či FVT (obě metody již byly v této práci podrobně popsány v kapitolách 3.2.1.1.1 a 3.2.1.1.2). Očekává-li se minimální útlum konstrukce, na které je dynamický experiment prováděn, pak je možné k buzení využít pouze vítr, pokud to umožňují meteorologické podmínky. Pakliže buzení větrem není dostačující pro relevantní výsledky, přistoupí se k buzení silovými impulsy, které mohou být vyvolány např. poskoky figurantů či rázovadlem (při metodě AVT), nebo budičem či rázovadlem (při metodě FVT).

V [10] je uvedeno, jakými způsoby se simuluje provoz na láce pro pěší, přesné znění je již uvedeno v této práci v kapitole 3.2.1.2. Taktéž mohou být aplikována jiná doporučení, např. podle [1], která jsou podrobně popsána v této práci v kapitole 4.3.2.3.

4.3 Přehled norem, předpisů a doporučení

Pro posouzení mezního stavu použitelnosti lávek z hlediska účinků vibrací na člověka se používá kritérium pohody chodců. Toto kritérium se stanovuje prostřednictvím nejvýše přijatelných hodnot zrychlení, RMS hodnot zrychlení či

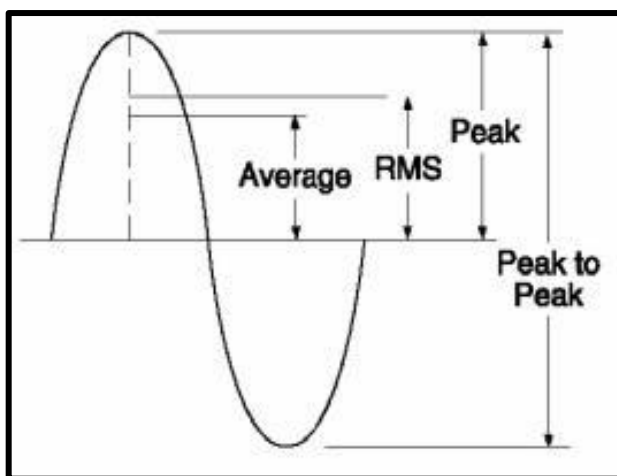
vážených RMS hodnot zrychlení. V [1] jsou popsány tři úrovně pohody chodců na lávkách pro pěší:

- 1) maximální pohodlí – zrychlení, kterým je konstrukce vystavena, jsou prakticky nepostřehnutelná,
- 2) průměrné pohodlí – zrychlení, kterým je konstrukce vystavena, jsou pro uživatele pouze postřehnutelná,
- 3) minimální pohodlí – při konfiguracích zatížení, které se vyskytují jen zřídka, jsou zrychlení uživateli vnímána, nejsou však nesnesitelná.

Je ovšem nutné podotknout, že termín „pohoda chodců“ je velmi subjektivní pojem. Výběr úrovně pohodlí může být ovlivněn např. předpokládaným provozem na lávce. Požadavky mohou být vyšší zejména u lávek, kde se dá předpokládat pohyb dětí či zdravotně postižených osob, které jsou na vibrace citlivější. Nižší požadavky mohou být např. u kratších lávek [1].

V souvislosti s termínem „zrychlení“ lze v některých normách najít i termín „efektivní hodnota zrychlení“. Efektivní hodnota (RMS) zrychlení je definována jako

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a(t)]^2 dt}. \quad (29)$$



Obr. 7 Efektivní hodnota (RMS) [31]

Normy, předpisy a doporučení lze rozdělit podle toho, zda se týkají výpočtu či experimentu.

4.3.1 Dynamický výpočet

4.3.1.1 ČSN EN 1991-2 ed.2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou [24]

V normě je článek 5.7 Dynamické modely zatížení chodci rozdělen do tří částí. V prvním bodě je uvedeno, že v závislosti na dynamických charakteristikách konstrukce se mají stanovit vlastní frekvence (příslušející svislému, vodorovnému a krouživému kmitání) nosné konstrukce lávky na vhodném výpočetním modelu konstrukce. Ve druhém bodě je uvedeno, že dynamické síly buzené chodci ve frekvenci totožné s některou vlastní frekvencí lávky mohou zapříčinit vznik rezonance a je nutné tyto síly uvažovat při ověření mezních stavů kmitání. V poznámce se připouští, že účinky pěší dopravy na lávce závisí na různých faktorech. Pokud nedochází k významné dynamické odezvě lávky, normálně se pohybující chodci budí na lávce periodické současně působící síly ve svislém směru s frekvencí v rozmezí 1 až 3 Hz, ve vodorovném směru v rozmezí 0,5 až 1,5 Hz a skupiny klusajících uživatelů se mohou pohybovat po lávce ve frekvenci okolo 3 Hz. Ve třetím bodě je uvedeno, že se mají definovat vhodné modely zatížení chodci a kritéria pohody uživatelů. V poznámce je uvedeno, že dynamické modely zatížení chodci a související kritéria pohody uživatelů lze definovat v národní příloze nebo pro konkrétní projekt. Norma se zde odkazuje také na přílohu A2 k EN 1990.

Národní aplikační dokument ČSN EN 1991-2 NA ed. A

V národním aplikačním dokumentu normy [24] je problematika dynamického zatížení lávek pro pěší chodci popsána v dodatku 5.7. V prvním bodě je uvedeno, že ověření dynamického chování lávky při dynamickém zatížení chodci se provede, jestliže jakákoli vlastní frekvence konstrukce při svislém kmitání spadá do intervalu frekvencí 1,3 Hz až 2,3 Hz, popř. pro konstrukce s malým útlumem (logaritmický dekrement

útlumu $\leq 0,05$) se ověření provede také pro interval frekvencí 2,5 Hz až 4,6 Hz. Pro kmitání ve vodorovném směru platí, že se provede ověření dynamického chování hlavní nosné konstrukce lávky při dynamickém zatížení chodci, jestliže jakákoli vlastní frekvence konstrukce vodorovného kmitání v příčném směru spadá do intervalu frekvencí 0,5 Hz až 1,2 Hz, popř. 2,6 Hz až 3,4 Hz.

Ve druhém bodě je uvedeno, že dynamická analýza by měla zahrnovat výpočet vlastních frekvencí a vlastních tvarů lávky na odpovídajícím výpočetním modelu, odhad útlumu konstrukce, výpočet vynuceného kmitání od zatížení chodci. Mělo by být prokázáno, že

- zrychlení mostovky ve svislém a vodorovném směru splňují dané limity,
- nehrozí vznik tzv. „lock-in“ efektu (který bude vysvětlen v následující podkapitole 4.3.1.3),
- vynucené kmitání lávky způsobené vandaly (tj. úmyslné rozkmitávání konstrukce) nezpůsobí poškození či kolaps konstrukce.

Ve třetím bodě je uvedeno, že přípustné limity kmitání lávky stanoví zhotovitel projektu, který by měl zároveň brát v potaz požadavky správce a vlastníka lávky v souladu s úrovněmi pohodlí chodců uvedenými v tab. 5. Toto zařazení je nedílnou součástí dynamické analýzy lávky. Pokud není specifikováno jinak, měla by být zvolena úroveň pohodlí chodců „průměrná“, což vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 1990/A1 A.2.4.3.2.

Tab. 5 Úrovně pohodlí chodců na lávkách pro pěší podle [24]

Úroveň pohodlí chodců	Svislé zrychlení [m/s ²]	Vodorovné zrychlení [m/s ²]
Maximální	$\leq 0,50$	$\leq 0,10$
Průměrná	$\leq 0,70$	$\leq 0,20$
Minimální	$\leq 1,00$	$\leq 0,40$

Ve čtvrtém bodě je uvedeno, že analýza vlastního a vynuceného kmitání, parametry útlumu, modely zatížení chodci a vandaly a posouzení jejich dynamických účinků na konstrukci (např. způsobení „lock-in“ efektu) může být provedeno v souladu s postupem uvedeným v [25] spolu s dodržáním specifických požadavků uvedených v tomto dodatku.

V pátém bodě je uvedeno, že pro posouzení přípustného kmitání mostovky lávky se používá příslušná třída provozu, jak je popsáno v tab. 6. Třídu provozu určuje zadavatel, jenž bere v potaz požadavky vlastníka a uživatelů. Tyto požadavky by měly být v souladu s umístěním stavby a předpokládanou hustotou provozu. V poznámce je uvedeno, že podrobnější informace o třídách provozu na lávkách pro pěší lze najít např. v tabulce 4.3 v [25].

V šestém bodě je uvedeno, že pokud není stanoveno jinak, použijí se třídy „hustoty“ dopravního provozu podle tab. 6.

Tab. 6 Třídy provozu na lávkách pro pěší podle [24]

Třída provozu	Hustota (počet osob na 1 m ²)
Velmi slabá	0,10, ne méně než $15/(B \cdot L)$
Slabá	0,20, ne méně než $15/(B \cdot L)$
Hustá	0,50, ne méně než $15/(B \cdot L)$
Velmi hustá	1,00
Mimořádně hustá	$\geq 1,50$

V tab. 6 je použito označení B, čímž je myšlena šířka lávky [m], a L, čímž je myšleno rozpětí lávky [m].

Je zde také připuštěno, že je možné specifikovat více tříd provozu a modelů zatížení chodci pro stanovení vhodných návrhových situací na lávce (normální provoz, slavnostní otevření, společenské akce atd.).

V sedmém bodě je uvedeno, že při návrhu zvláštní konstrukce či předpokladu neobvyklých způsobů rozkmitání lávky (např. synchronizované pohyby skupin lidí) se doporučuje konzultace s odborníkem v oboru.

4.3.1.2 ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí [26]

V normě se kmitání lávek pro pěší věnuje kapitola A2.4.3 Ověření kmitání lávek pro chodce od zatížení chodci. Článek je rozdělen na dvě podkapitoly. První z nich, A2.4.3.1 Návrhové situace a souvisící předpoklady o provozu na lávce, obsahuje tři body. V prvním bodě je uvedeno, že návrhové situace se mají volit v závislosti na provozu, který bude přípustný po dobu návrhové životnosti příslušné lávky. V poznámce se připouští, že v návrhových situacích lze zohlednit způsob, jakým bude provoz na lávce ověřován, regulován a kontrolován pro konkrétní projekt. Ve druhém bodě je uvedeno, že pro trvalé návrhové situace je třeba v závislosti na velikosti plochy nosné konstrukce lávky nebo její části uvážit zatížení skupinou 8 až 15 chodců jdoucích běžným způsobem po lávce. Ve třetím bodě je uvedeno, že se mají uvážit podle velikosti plochy nosné konstrukce nebo její části další zatížení chodci, která souvisí s trvalou, dočasnou nebo mimořádnou návrhovou situací, a to souvislý proud chodců na lávce (významně více než 15 osob) nebo příležitostné akce souvisící s oslavami, uměleckými a sportovními událostmi. V poznámkách je uvedeno, že tyto kategorie provozu a příslušné návrhové situace by měly být schváleny pro konkrétní projekt.

Druhá podkapitola, A2.4.3.2 Kritéria pohody chodců (z hlediska použitelnosti), je rozdělena na dva body. V prvním bodě je uvedeno, že kritéria pohody chodců se mají stanovit pomocí nejvýše přijatelných hodnot zrychlení libovolné části hlavní nosné konstrukce. V poznámce je uvedeno, že vhodná kritéria lze definovat v národní příloze nebo pro konkrétní projekt. Jsou doporučeny maximální hodnoty zrychlení mostovky lávky, a to $0,7 \text{ m/s}^2$ pro svislá kmitání, $0,2 \text{ m/s}^2$ pro vodorovná kmitání od běžné dopravy a $0,4 \text{ m/s}^2$ pro vodorovné vibrace od výjimečného zatížení davem lidí. Ve druhém bodě

je uvedeno, že kritéria pohody chodců se mají ověřit v případech, když základní frekvence nosné konstrukce mostu je menší než 5 Hz pro svislé kmitání lávky a 2,5 Hz pro vodorovné (příčné) kmitání lávky. V poznámce je uvedeno, že data použitá při výpočtu i výsledky jsou vystaveny velkým nejistotám, pokud kritéria pohody chodců nejsou splněna s dostatečnou rezervou, má projektant zvážit a specifikovat požadavky na dynamickou zkoušku konstrukce před jejím uvedením do provozu.

4.3.1.3 Sétra: Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading [1]

Sétra je souhrn poznatků a pokynů týkajících se kmitání lávek pro pěší. Podle doporučení Sétra vlastník lávky určuje při návrhu třídu lávky (v závislosti na očekávaném provozu) a stanovuje úroveň pohody chodců. Třídy lávek jsou stanoveny podle očekávaného provozu, a to následovně:

- třída IV: zřídka používaná lávka postavená pro spojení řídkce osídlených oblastí nebo pro zajištění plynulosti pěší dopravy např. v blízkosti dálnice,
- třída III: lávka standardně používaná, po které mohou občas projít velké skupiny chodců, ale nikdy nebude zatížená na celé pochozí ploše,
- třída II: městská lávka spojující osídlené oblasti vystavená silnému provozu, může být občas zatížená na celé pochozí ploše
- třída I: městská lávka spojující oblasti s vysokou hustotou chodců např. poblíž stanice městské hromadné dopravy, je často využívána hustými davy chodců.

Úrovně pohody chodců podle [1] byly v této práci již popsány na začátku kapitoly 4.3 Přehled norem, předpisů a doporučení. Předpokládá se, že lávky třídy IV nevyžadují žádný výpočet pro ověření chování z hlediska dynamiky. U lávek tříd I až III je nutný výpočet vlastních frekvencí konstrukce (pro svislé, vodorovné i torzní kmitání), pokud některá z vlastních frekvencí lávky spadá do intervalu frekvencí, které mohou být vybuzeny lidským pohybem, pak je vhodné vyšetřit i dynamické zatěžovací stavy.

Získaná maximální zrychlení by měla být menší než limity odpovídající předem zvolené úrovni pohodlí chodců. Tabulky hodnot zrychlení a odpovídající úrovně pohodlí chodců podle [1] jsou znázorněny na obr. 8 a obr. 9.

Acceleration ranges	0	0.5	1	2.5
Range 1	Max			
Range 2		Mean		
Range 3			Min	
Range 4				

Obr. 8 Rozsahy hodnot zrychlení [m/s^2] pro svislé kmitání mostovky [1]

Acceleration ranges	0	0.1	0.15	0.3	0.8
Range 1	Max				
Range 2		Mean			
Range 3			Min		
Range 4					

Obr. 9 Rozsahy hodnot zrychlení [m/s^2] pro vodorovné kmitání mostovky [1]

Na obr. 9 je také naznačeno, že pro předcházení vzniku tzv. „lock-in“ efektu je vhodné nepřekračovat hodnotu vodorovného zrychlení $0,1 m/s^2$. „Lock-in“ efekt vzniká v situaci, kdy lávka začne kmitat ve vodorovném směru, chodci ve snaze z pohodlnější chůze sjednotí svůj krok s kmitáním lávky, čímž ještě zvětší amplitudu budících sil. „Lock-in“ efekt může vést k výraznému vodorovnému kmitání mostovky tak, jak se stalo na lávce Millennium Bridge v Londýně.

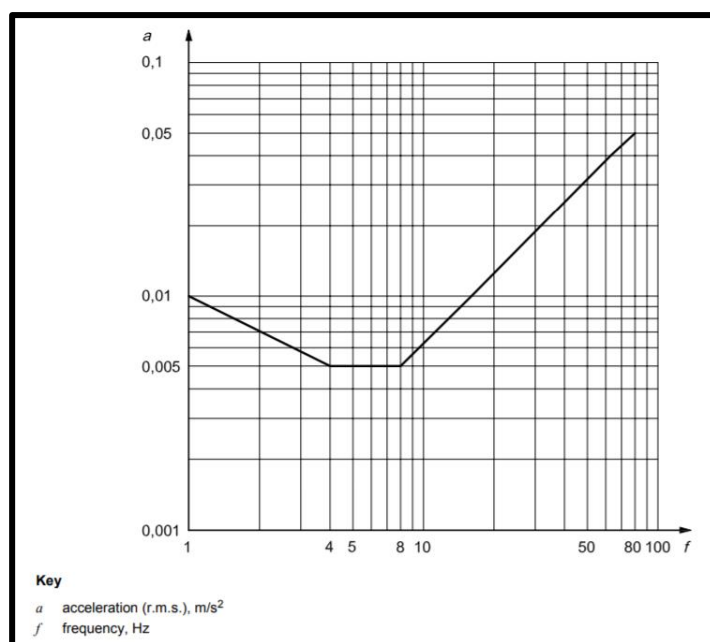
4.3.1.4 ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations [27]

Normy ISO patří mezi uznávané mezinárodní standardy. V normě ISO 10137 je lávkám pro pěší věnován článek C.1.2. Je v něm uvedeno, že návrhové zatěžovací stavy by měly být zvoleny podle pěší dopravy na lávce v průběhu její návrhové životnosti. Je vhodné uvažovat následující situace:

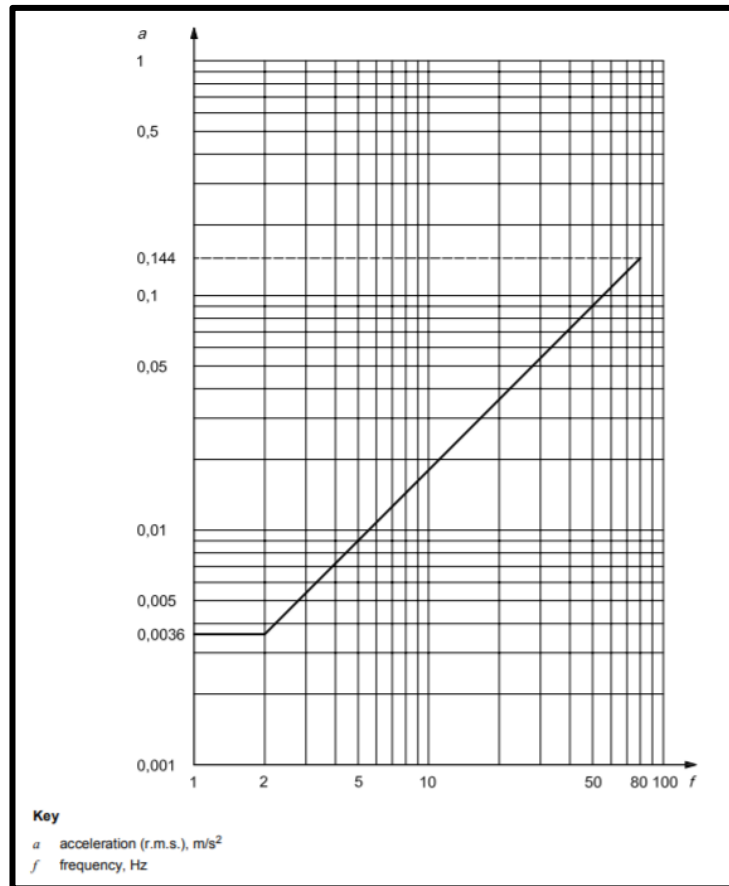
- 1 osoba prochází přes lávku a další stojí uprostřed rozpětí,

- průměrný proud chodců (v závislosti na denní míře výskytu), např. skupina chodců 8 až 15 osob, v závislosti na délce a šířce lávky,
- dav chodců (znatelně více než 15 osob),
- konání slavností či hromadných akcí, pokud to přichází v úvahu.

Efektivní hodnoty (RMS) zrychlení pro svislé kmitání u lávek pro pěší přes pozemní komunikace nebo vodní toky by neměly překročit šedesátinásobek hodnot patrných z grafu na obr. 10, a to v případě, že neexistují podrobnější požadavky. V případě, že jedna osoba či skupina osob stojí uprostřed rozpětí (jak bylo uvedeno v prvním bodě doporučených situací), pak by efektivní hodnoty (RMS) zrychlení pro svislé kmitání neměly překročit třicetinásobek hodnot patrných z grafu na obr. 10. Pro vodorovné kmitání platí, že by efektivní hodnoty (RMS) zrychlení neměly přesáhnout šedesátinásobek hodnot patrných z grafu na obr. 11. Pro výpočet efektivní hodnoty (RMS) zrychlení se doporučuje uvažovat průměrný čas 1 s.



Obr. 10 Přípustné hodnoty zrychlení pro svislé kmitání v závislosti na frekvenci [27]



Obr. 11 Přípustné hodnoty zrychlení pro vodorovné kmitání v závislosti na frekvenci [27]

4.3.2 Dynamický experiment

4.3.2.1 ČSN 73 2044 Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí [9]

Norma ČSN 73 2044 Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí se dopodrobna zabývá dynamickými zkouškami všech typů stavebních konstrukcí. V kapitole 4 je popsán účel dynamických zkoušek a jejich typy, tj. dynamická zkouška informativní, dynamická zkouška zatěžovací, dynamická zkouška zatěžovací dlouhodobá a dynamická zkouška zatěžovací na únavu. V dalších kapitolách (6, 7, 8, 9) jsou popsány podrobnosti týkající se jednotlivých typů dynamických zkoušek, např. použité zatížení, postup provádění, průběh, vyhodnocení či kritéria pro vyhodnocení. V kapitole 5 jsou popsány

podrobnosti týkající se dynamických zkoušek, tj. příprava, program, podmínky pro provádění, dynamický výpočet konstrukce, vyhodnocení a zápis o zkoušce. Poslední kapitola 10 popisuje protokol o dynamické zatěžovací zkoušce konstrukce.

4.3.2.2 ČSN 73 6209 Zatěžovací zkoušky mostních objektů [10]

Norma ČSN 73 6209 „Zatěžovací zkoušky mostních objektů“ obsahuje základní ustanovení pro přípravu, provádění a vyhodnocení statických a dynamických zkoušek nosných konstrukcí mostních objektů.

Při dynamické zatěžovací zkoušce lávek pro pěší se podle této normy provoz na lávce simuluje zpravidla čtyřmi způsoby, které byly v této práci v přesném znění uvedeny již v kapitole 3.2.1.2.

Kritériem použitelnosti při dynamické zatěžovací zkoušce lávky z hlediska účinků vibrací na lidský organismus je vážená efektivní hodnota zrychlení s použitím váhové funkce W_m . Vážená efektivní hodnota zrychlení se stanovuje nezávisle pro svislý a vodorovný směr, mezní hodnoty mohou být uvedeny v projektu (např. podle požadavků investora). Pokud v projektu uvedeny nejsou, použijí se hodnoty z následující tab. 7

Tab. 7 Mezní hodnoty vážených hodnot zrychlení podle [10]

Druh kmitání	$a_{ef} [m/s^2]$
Svislé kmitání	0,5
Vodorovné kmitání	0,14
Vodorovné kmitání při výjimečném zatížení davem lidí	0,28

Efektivní hodnoty kritéria použitelnosti byly odvozeny z maximálních hodnot zrychlení v ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí [26], které byly v této práci zmíněny v bodu 2 kapitoly 4.3.1. Za běžný provoz na lávce pro chodce a cyklisty se pro účely této normy pokládají zatížení: náhodné přechody chodců po lávce na úrovni

předpokládané hustoty provozu, synchronizovaný přechod dvou chodců našlapujících vždy „stejnou nohou“ (příčemž kroková frekvence je zvolena tak, aby dynamická odezva mostovky byla co největší). Za běžný provoz se nepovažuje chůze více osob pochodujících stejným krokem (např. vojenský útvar), jakýkoli synchronizovaný pohyb více osob či vandalismus (úmyslné rozkmitávání lávky).

4.3.2.3 Sétro: Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading [1]

V [1] je uvedeno, že v technické specifikaci lávek pro pěší by měla být uvedena třída lávky (I až IV) a přijatelná úroveň pohodlí chodců (maximální, průměrná, minimální). Pokud bylo vypočteno, že přijatelné dynamické chování lávky lze zajistit pouze pomocí tlumičů nebo že existují pochybnosti o velikosti útlumu konstrukce použité v dynamickém výpočtu, je nutné provést dynamické zkoušky. Dynamické zkoušky jsou nákladné experimenty, jejichž provádění by mělo být zvažováno pouze ve zvláštních případech. V každém případě by měly být provedeny odborníky v oboru.

V případě, že je nutnost použití tlumičů avizována již v projektu, výrazně se doporučuje změřeni frekvencí a tvarů vlastního kmitání a útlumu reálné konstrukce lávky ještě před jejich výrobou, aby mohly být jejich parametry ještě upraveny a ideálně nastaveny. U již existující konstrukce můžou být dynamické zkoušky naplánovány v případě, že se při provozu lávky projeví problémy s nadměrným kmitáním a že je žádoucí projevy kmitání zmírnit.

Při dynamické zkoušce se doporučuje použít následující vybavení:

- instalace dostatečného množství dynamických snímačů (např. akcelerometrů) do vhodných bodů konstrukce, společně s vhodnou měřicí ústřednou,
- instalace vizuálního monitorovacího systému, aby bylo možné propojit dynamické měření s vizualizací dynamického chování lávky,

- dynamický budič, který je schopen vyvolat kmitání lávky, ze kterého je možné přesně vyhodnotit vlastní tvary, vlastní frekvence či útlum konstrukce. Tento systém musí umožňovat řízené svislé či vodorovné buzení s frekvenčním rozsahem minimálně 0,5 až 3 Hz.

V následujících odstavcích jsou uvedeny doporučené způsoby provedení dynamických zkoušek. Tato doporučení mohou být upravena podle velikosti konstrukce a rozsahu a charakteru nepříznivých jevů, které mají být zkoumány.

První fáze experimentu je zaměřena na určení vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání, může být provedena buď pomocí dynamického budiče, anebo bez něj. Dynamický budič se použije v případě, kdy je zapotřebí dosáhnout velké přesnosti výsledků.

Druhá fáze dynamické zkoušky se zaměřuje na vyšetřování dynamického chování mostovky při dynamickém zatížení chodci. Počet chodců by měl být určen v závislosti na velikosti lávky, jejích teoreticky určených vlastnostech a složitosti koordinace pohybu davu. Pro získání výstižných výsledků je potřeba několik desítek chodců. Zkoušky mohou obsahovat následující situace:

- náhodné přecházení chodců po lávce, např. z jedné strany na druhou či opakování přecházení tam a zpět,
- chůze s krokovou frekvencí co nejbližší vlastní frekvenci konstrukce,
- rozkmitání lávky tak, aby bylo možné změřit útlum konstrukce,
- běh, skákání či vandalismus, tzn. vyšetření dynamického chování konstrukce při extrémním zatížení.

Při zkouškách musí být definovány určité limity, při jejichž překročení dojde k zastavení zkoušek (a spustí se signalizace). Pokud jsou předmětem zkoušky tlumiče, měly by se zkoušky provést s tlumiči aktivními i nefunkčními, aby se určila jejich skutečná účinnost. Konstrukce vyhoví, pokud dynamické účinky chůze nesynchronizovaného davu splňují

limity, v případě synchronizovaného davu jsou dynamické účinky přijatelné a v případě výjimečných zatěžovacích stavů (běh, skákání, vandalismus) nejsou příliš nepříjemné. Posouzení provede vždy vlastník lávky, a to podle jeho požadavků na úroveň pohodlí chodců.

5 Dynamický experiment na existující lávce pro pěší v Praze přes Patočkovu ulici

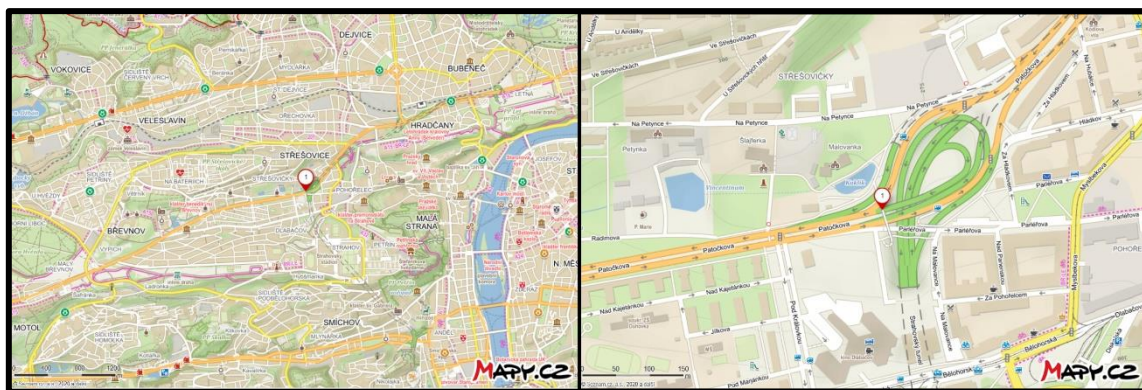
5.1 Úvod

Předmětem této práce je realizace dynamického experimentu na existující lávce pro pěší. V následujících kapitolách bude podrobně popsána příprava, realizace a vyhodnocení experimentu na existující lávce pro pěší v Praze 6, která vede přes Patočkovu ulici. Cílem experimentu bylo zjistit vlastní frekvence a vlastní tvary konstrukce, za tímto účelem byla provedena experimentální modální analýza lávky, a následně zjistit dynamické chování konstrukce při vynuceném kmitání způsobeném chodci a vyhodnotit komfort chodců.

Realizace experimentu byla rozdělena do dvou dnů, první část byla provedena ve čtvrtek 26. 3. 2020 a druhá část v pátek 27. 3. 2020. Při experimentu nebylo nutné přerušit běžný provoz na lávce. Pro přípravu experimentu nebyl k dispozici žádný teoretický výpočet. Dynamická zkouška lávky byla provedena za asistence prof. Ing. Michala Poláka, CSc., Ing. Tomáše Plachého, Ph.D. a Ing. Vladimíra Šány, Ph.D.

5.2 Popis objektu

Lávka pro pěší, na které byl proveden dynamický experiment, se nachází v Praze 6 a vede přes Patočkovu ulici v blízkosti autobusových zastávek Na Petynce. Lávka umožňuje mimoúrovňový přechod chodců přes frekventovanou čtyřpruhovou směrově rozdělenou silniční komunikaci. V bezprostřední blízkosti lávky je silniční mimoúrovňová křižovatka a portály dvou tunelů, Strahovského a Brusnického, které jsou součástí Městského (vnitřního) okruhu.



Obr. 12 Přesná poloha zkoušeného mostního objektu – lávky pro pěší přes Patočkovu ulici (zdroj: mapy.cz)

Jedná se o ocelovou lávku o 3 polích s hlavním příhradovým nosníkem a dolní ocelovou ortotropní mostovkou. Příhradová konstrukce hlavního nosníku je bezsvislicová, prostorová, příčný řez má tvar písmene „A“. Horní pás hlavního nosníku tvoří jedna ocelová trubka, dolní pás tvoří dvě ocelové trubky, styčníky jsou svařované (obr. 15). Průchozí prostory se nacházejí po obou stranách hlavního nosníku a jejich šířka 1,95 m je shodná (viz obr. 13).



Obr. 13 Pohled na příčný řez lávky včetně rozměrů

Při přípravě experimentu nebyla k dispozici projektová dokumentace lávky, a tak byla rozpětí jednotlivých polí lávky změřena in situ pásmem. Rozpětí polí jsou 33,04 m,

30,00 m a 21,00 m, jak je zřejmé z obr. 14. Podélný sklon mostovky je proměnný, niveleta lávky je vedena ve vypuklém oblouku.



Obr. 14 Boční pohled na lávku včetně rozpětí polí



Obr. 15 Svařovaný styčník

Mostovka je ortotropní ocelová se systémem příčníků a podélných výztuh. Příčníky mají rozteč 3,00 m, pouze mezi řezy 03-05 je rozteč příčníků 3,02 m, jak je naznačeno na obr. 21. Výška příčníků je proměnná, jejich spodní pásnice má tvar oblouku

(obr. 16). Na obr. 17 jsou vidět únavové detaily v místech styku podélných výztuh s příčnickem.



Obr. 16 Pohled na nosnou konstrukci lávky zdola



Obr. 17 Únavové detaily v místě styku podélných výztuh s příčnickem

5.3 Měřicí linka

Měřicí linka použitá při dynamické zkoušce lávky se skládala z osmi snímačů zrychlení (akcelerometrů) Brüel&Kjaer 8344, měřicí ústředny SIRIUS 6ACC-2ACC+ (v.č. DB18002762) od firmy Dewesoft s.r.o., která byla přes počítač ovládána pomocí

programu DEWESoft. Tento program mimo jiné umožnil i on-line vyhodnocení FFT analýzy naměřeného kmitání lávky.

Snímače zrychlení jsou absolutní nízkofrekvenční piezoelektrické snímače s pracovním rozsahem 0,2 Hz až 3 kHz, pracovním teplotním rozsahem od -50 °C do 100 °C, citlivostí přibližně 2500 mV/g, příčnou citlivostí menší než 5 % a vlastní frekvencí 10 kHz. Během měření byly snímače připevněny magnetem k ocelovým závažím (obr. 18) a připojeny kabelem k měřicí ústředně.

Měřicí ústředna SIRIUS 6ACC – 2ACC+ je osmikanálová elektronická měřicí ústředna firmy DEWESoft, která je řízena pomocí osobního počítače přes USB port. Všechna elektronická zařízení pro obsluhu jednotlivých kanálů a provádění měření jsou zabudována v jediné skřínce a ovládat je lze pouze pomocí programu DEWESoft přes počítač. Měřicí ústředna SIRIUS je především určena pro elektrická měření vibrací pomocí osmi napěťových vstupů. Všechny kanály mají svůj vlastní 2×24bitový A/D převodník, tzv. DualCore, který je schopen měřit s dynamickým rozsahem až 160 dB. Pro zajištění současného měření na všech aktivních kanálech jsou A/D převodníky navzájem synchronizovány.



Obr. 18 Dva snímače zrychlení 8344 připevněné magnetem k ocelovému závaží

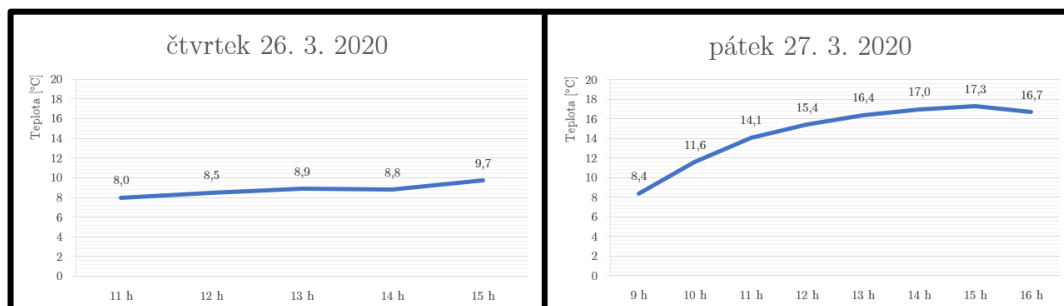


Obr. 19 Měřicí ústředna SIRIUS připojená k ovládacímu počítači

5.4 Meteorologické podmínky

Meteorologické podmínky při experimentu byly příznivé. Údaje o teplotě a rychlostech větru byly převzaty z aplikace Aladin (oficiální aplikace Českého hydrometeorologického ústavu).

Ve čtvrtek 26. 3. 2020 měření probíhalo cca od 11 h do 15 h. Bylo polojasno až zataženo, teplota se pohybovala mezi 8,0 °C a 9,7 °C (obr. 20), foukal mírný vítr, jehož rychlost se pohybovala mezi 3,8 m/s a 5,9 m/s.



Obr. 20 Průběhy teploty vzduchu během experimentu

V pátek 27. 3. 2020 měření probíhalo cca od 9 h do 16 h. Bylo polojasno až jasno, teplota se pohybovala mezi 8,4 °C a 17,3 °C (obr. 20), foukal mírný vítr, jehož rychlost se pohybovala mezi 2,9 m/s a 4,9 m/s.

Teploty při experimentu byly v definovaném teplotním pracovním intervalu snímačů, který udává výrobce, na nejistotu měření tedy teplota neměla žádný vliv.

5.5 Plán experimentu

Původně bylo plánováno realizovat experiment na existující lávce pro pěší přes řeku Ohří ve vesnici Boč, která je součástí obce Stráž nad Ohří. Tato lávka je velmi citlivá na dynamické účinky chodců, proto je nařízeno, že se na ní smí současně pohybovat nejvýše tři osoby. Kvůli omezením souvisejícím s pandemií Covid-19 a s karanténou nařízenou vládou České republiky bylo rozhodnuto o přesunutí experimentu na lávku nacházející se v Praze, vybrána byla lávka v Praze 6 přes Patočkovu ulici.

Začátek experimentu byl naplánován na čtvrtek 26. 3. 2020 v 11 hodin. Plán experimentu byl následující:

- 1) příprava experimentu;
- 2) experimentální modální analýza;
- 3) dynamická zkouška zatěžovací.

Vzhledem ke skutečnosti, že se lávka se nachází v Praze, rozdělení experimentu do dvou dnů nepřineslo žádné zásadní komplikace.

5.6 Experimentální modální analýza

Cílem experimentální modální analýzy (dynamické zkoušky informativní) bylo zjistit vlastní frekvence a vlastní tvary nosné konstrukce lávky. Jak již bylo řečeno výše, při přípravě experimentu nebyl k dispozici žádný teoretický výpočet.

5.6.1 Příprava zkoušky

Na začátku dynamického experimentu byla změřena rozpětí polí lávky pásmem, a to z důvodu, že při přípravě zkoušky nebyla k dispozici projektová dokumentace lávky. Rozpětí polí jsou uvedena již v kapitole 5.2.

Pro provedení experimentální modální analýzy byla zvolena metoda AVT (Ambient Vibration Testing), a to z důvodu, že předmětem experimentu byla ocelová konstrukce, u které se předpokládá nízký útlum. Jak bylo již podrobněji popsáno v kapitolách 3.2.1.1.1 a 5.3, měřicí linka se skládala z osmi snímačů zrychlení (včetně dvou referenčních snímačů, jeden byl orientován ve svislém směru, druhý ve vodorovném směru kolmém k podélné ose lávky), měřicí ústředny a počítače s řídicím softwarem, který umožnil provést FFT analýzu naměřeného kmitání lávky.

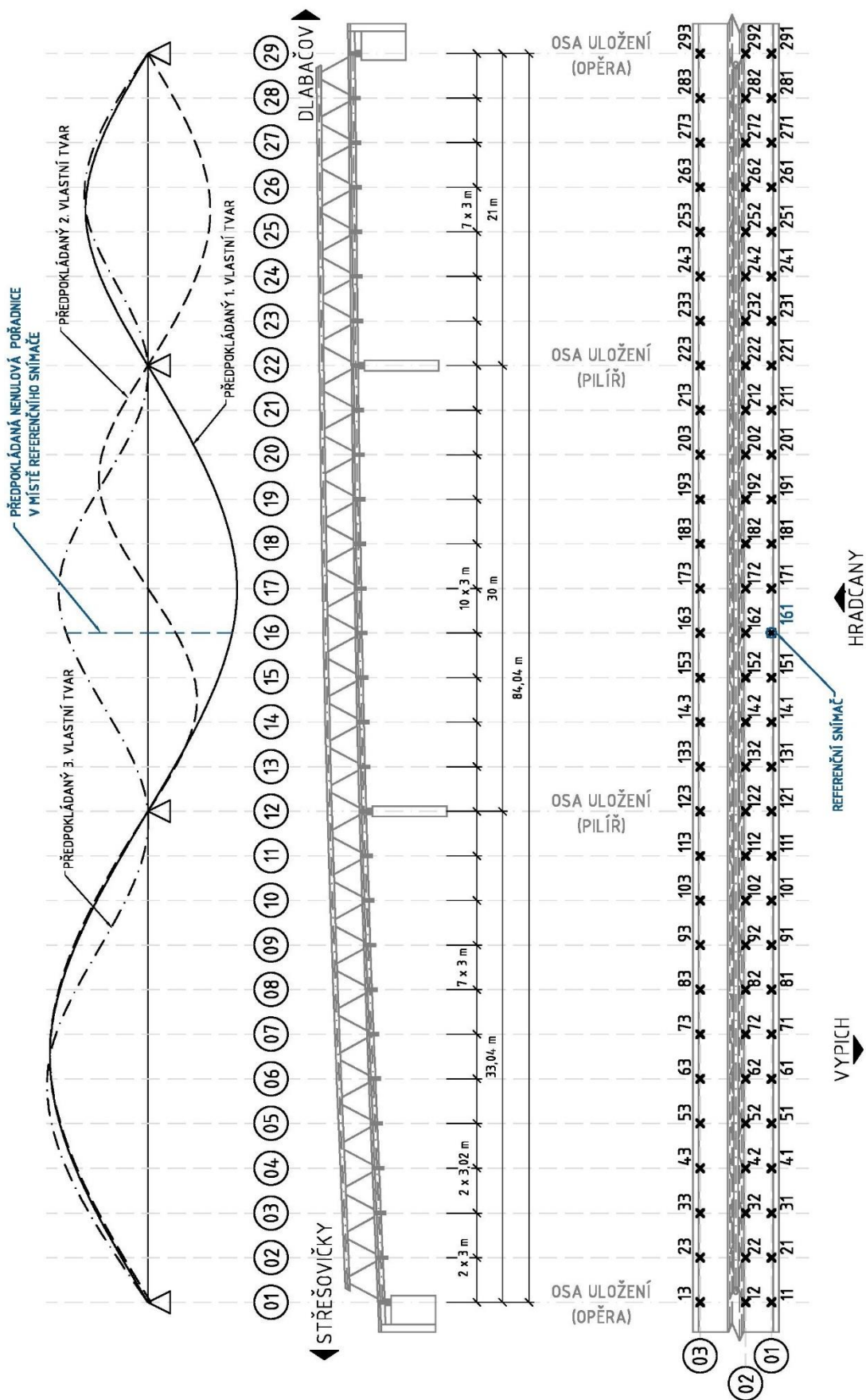
Referenční snímač je nutné umístit do takového bodu, ve kterém všechny vyšetřované vlastní tvary mají nenulovou pořadnici, referenční snímač zůstává během celého měření v tomto bodě.

Pro vyšetření podoby vlastních tvarů lávky byla na její mostovce zvolena síť bodů (obr. 21). Řezy č. 01-29 byly zvoleny v místech příčníků. V příčném řezu nosné konstrukce lávky byly umístěny tři body (body x1 až x3, kde x je číslo příčného řezu) tak, aby bylo možné rozlišit, zda nosná konstrukce lávky v zachycených vlastních tvarech kmitá svislým ohybovým kmitáním, torzním kmitáním nebo vodorovným kmitáním.

Pro svislé kmitání se předpokládá stejná pořadnice ve svislém směru pro body x1 až x3, pro vodorovné kmitání se předpokládá stejná pořadnice ve vodorovném směru pro body x1 až x3 a pro kmitání torzní se předpokládá pořadnice opačných znamének pro body x1 a x3, pro bod x2 se předpokládá pořadnice v absolutní hodnotě minimální.

Při experimentu byly použity dva referenční snímače, jeden měřil kmitání ve svislém směru a druhý ve vodorovném směru kolmém k podélné ose lávky. Oba referenční

snímače byly při experimentu umístěny do referenčního bodu č. 161, kde se předpokládala nenulová pořadnice u všech důležitých vlastních tvarů nosné konstrukce lávky.



Obr. 21 Schéma konstrukce včetně označení sítě bodů

5.6.2 Průběh zkoušky

Konstrukce byla buzena silovými impulsy, které byly vyvolány skoky figurantů. Silové impulsy (skoky) prováděli figuranti postupně po jednom zhruba každých 5 s. Jako nejvhodnější místo k buzení byla zvolena oblast mostovky přibližně v řezech č. 14 a č. 15 a také uprostřed mezi řezy č. 14 a č. 15, tedy blízko referenčnímu bodu.

V každém řezu byly sledovány tři body mostovky, do kterých byla umístěna ocelová závaží s přichycenými snímači. Měření bylo realizováno pomocí šesti snímačů zrychlení, na každém závaží byly upevněny snímače ve svislém a vodorovném směru kolmém k podélné ose lávky. Kvůli nedopatření, které bylo zjištěno zhruba ve třetině realizace zkoušky, byl po celou dobu měření referenční snímač zrychlení ve vodorovném směru orientován naopak, než byly zbývající vodorovné snímače zrychlení. Tato skutečnost neznehodnocuje měření, ale je ji nutné vzít v potaz při vyhodnocování výsledků.

Postupovalo se po řezech od řezu č. 01 do řezu č. 29. Měření v řezech č. 01 až č. 19 bylo provedeno ve čtvrtek 26. 3. 2020. Poté bylo měření přerušeno. V pátek 27. 3. 2020 se na měření z předchozího dne navázalo, začalo se řezem č. 20. Zachovala se i poloha referenčního snímače zrychlení ve vodorovném směru (tedy obrácená orientace oproti ostatním vodorovným snímačům zrychlení). V řezu č. 17 bylo zjištěno, že je v počítači tento řez označen jako č. 16, jeden řez byl tedy omylem vynechán. Při vyhodnocení bylo zjištěno, že vynechán byl řez č. 14. Do obrázků vlastních tvarů byly v tomto řezu doplněny interpolované hodnoty ze sousedních řezů č. 13 a č. 15.

5.6.3 Vyhodnocení experimentální modální analýzy

Pro vyhodnocení vlastních frekvencí a vlastních tvarů bylo pořízeno celkem 28 záznamů kmitání konstrukce. Každý záznam byl dlouhý přibližně 3 minuty. K vyhodnocení vlastních frekvencí a vlastních tvarů byl použit profesionální program ME'scopeVES firmy Vibrant Technology, Inc.

Naměřené záznamy kmitání mostu byly pomocí FFT převedeny z časové do frekvenční oblasti. Vzhledem k tomu, že velikosti budících sil rozkmitávajících lávku nebyly měřeny, byly z frekvenčních spekter odezvy v jednotlivých bodech mostu \mathbf{k} vyhodnoceny tzv. frekvenční přenosové funkce pro vyhodnocení pracovních tvarů kmitání $ODSH_{kR}(if)$. Funkce $ODSH_{kR}(if)$ je komplexní skládající se z reálné a imaginární složky a většinou se udává v goniometrickém vyjádření pomocí velikosti (magnitudy) a fáze. Magnituda $ODSH_{kR}(if)$ je vyjádřena čistě jako magnituda frekvenční funkce kmitání konstrukce $rk(if)$ (výchyly, rychlosti kmitání, zrychlení) naměřeného v bodě \mathbf{k} . Při vyhodnocení fázového úhlu φ_k funkce $ODSH_{kR}(if)$ je fáze frekvenčního spektra odezvy v bodě \mathbf{k} vztažena k fázi frekvenčního spektra odezvy v referenčním bodě \mathbf{R} .

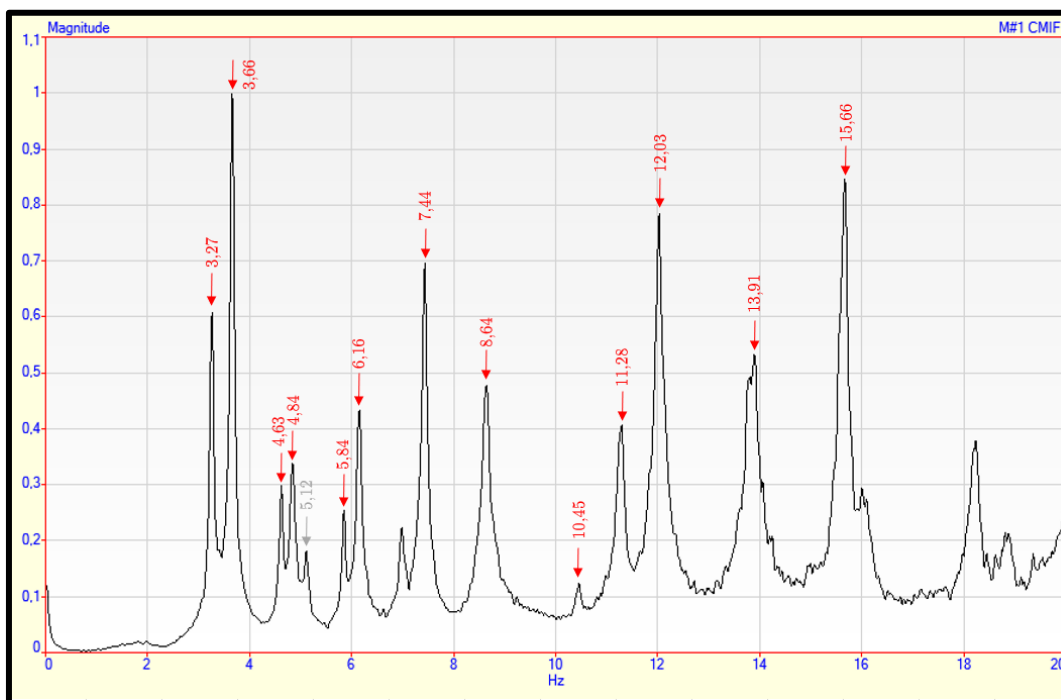
Protože všechny měřené body nosné konstrukce nebyly při experimentu osazeny ve shodném časovém okamžiku, ale měření bylo rozděleno na 28 měřicích sestav, a tedy úroveň budících sil v jednotlivých měřicích sestavách nemusela být shodná, byly pro přesnější stanovení tvarů vlastního kmitání stanoveny i funkce Transmisibility $T_{kR}(if)$. Tato funkce se stanoví obdobně jako klasická přenosová funkce $H_{kR}(if)$ (v měřítku inertance) pouze funkce budící síly je nahrazena funkcí odezvy v referenčním bodě

$$T_{kR}(if) = \frac{\ddot{w}_k(if)}{\ddot{w}_R(if)}, \quad (30)$$

kde i je imaginární jednotka, $\ddot{w}_k(if)$ je odezva konstrukce v měřítku zrychlení v bodě \mathbf{k} zobrazená ve frekvenční oblasti a $\ddot{w}_R(if)$ je odezva konstrukce v měřítku zrychlení ve referenčním bodě \mathbf{R} . Při takto sestavených funkcích jsou odezvy konstrukce

v jednotlivých měřicích sestavách vzájemně vždy ve stejném poměru bez ohledu na velikost budících sil a pokud jsou známy vlastní frekvence konstrukce, mohou být z těchto funkcí zpřesněny tvary vlastního kmitání.

Na obr. 22 je vykreslena integrální funkce vyhodnocovacího programu, ve které jsou vyznačeny vyhodnocené vlastní frekvence lávky.



Obr. 22 „Complex Mode Indicator Function“ s vyznačenými vyhodnocenými vlastními frekvencemi

Vyhodnocené vlastní frekvence jsou shrnuty v tab. 8.

Tab. 8 Vyhodnocené vlastní frekvence a vlastní tvary

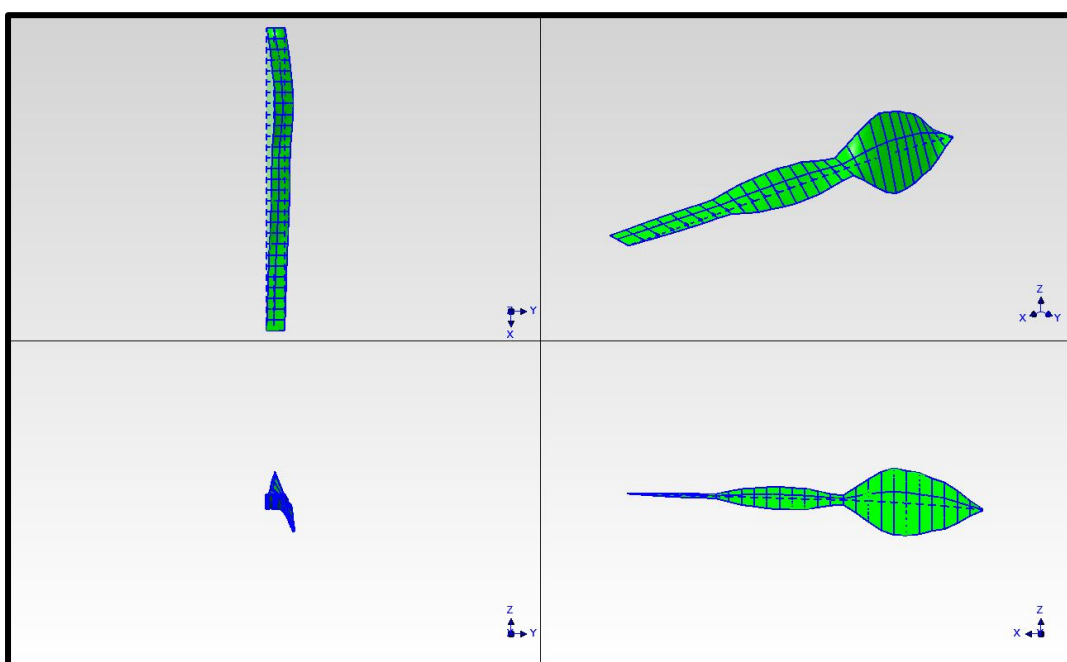
Pořadové číslo (j)	Vlastní frekvence f_j [Hz]	Převládající charakter vlastního tvaru kmitání
(1)	3,27	Torzní
(2)	3,66	Torzní
(3)	4,63	Svislý ohybový/Torzní
(4)	4,84	Torzní/Vodorovný
(5)	5,84	Torzní/Vodorovný
(6)	6,16	Svislý ohybový
(7)	7,44	Torzní/Vodorovný
(8)	8,64	Torzní/Vodorovný
(9)	10,45	Torzní/Vodorovný
(10)	11,28	Torzní/Vodorovný
(11)	12,03	Torzní/Vodorovný
(12)	13,91	Svislý ohybový
(13)	15,66	Torzní

Pozn.: Označení „Torzní/Vodorovný“ je použito u vlastních tvarů, které kmitají výrazně jak ve vodorovném směru, tak i torzně. Nelze tedy jednoznačně rozhodnout, který typ kmitání je převládající. Z následujících vyobrazených vlastních tvarů je nejednoznačnost charakteru kmitání patrná, ve velké většině vlastních tvarů se objevuje torzní charakter kmitání, ale zároveň je z půdorysu zjevné, že kmitání má i charakter vodorovného kmitání.

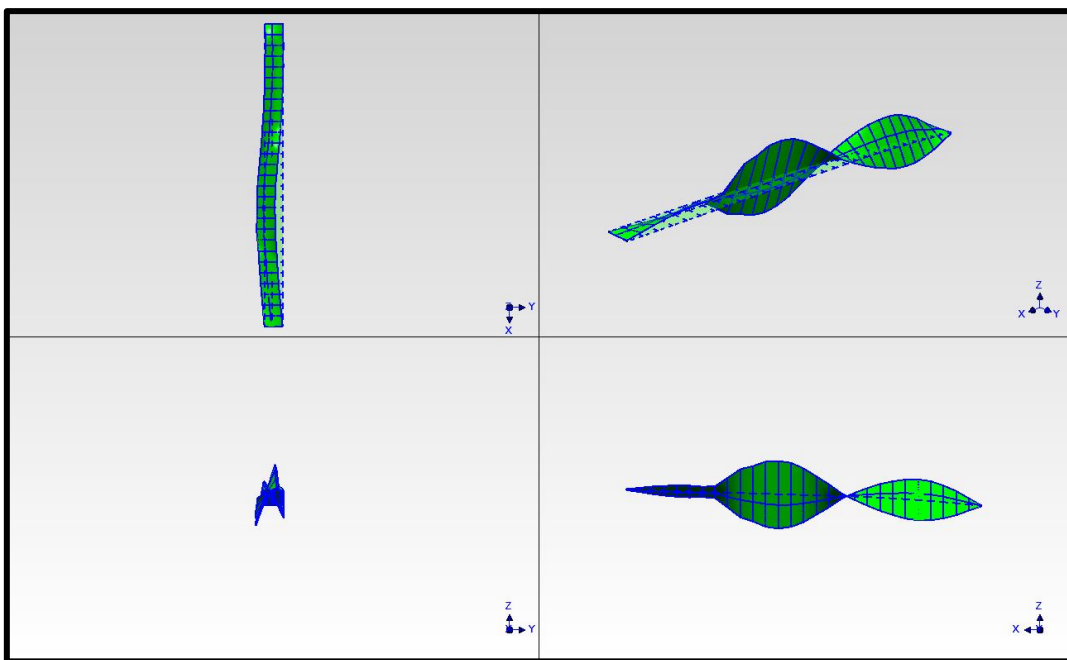
Jak bude podrobněji zmíněno v kapitole 5.7.1.2, v předběžném vyhodnocení vlastních frekvencí se objevila frekvence 5,12 Hz, která v tab. 8 chybí. Na obr. 22 (kde je frekvence 5,12 Hz označena šedivou barvou) je vidět, že magnituda funkce $ODSH_{KR}(if)$ nedosahuje vysoké úrovně ve srovnání s ostatními vlastními frekvencemi. Při vyhodnocení vlastního tvaru spjatého s frekvencí 5,12 Hz bylo v programu ME'scopeVES patrné, že jednotlivé body konstrukce kmitají s různou fází. Dalo by se tedy usoudit, že

5,12 Hz není vlastní frekvence. Přesto byla naměřená dynamická odezva konstrukce na dynamické zatížení chodci při dynamické zkoušce zatěžovací mířené na tuto frekvenci u některých záznamů nadprůměrná. Pro tuto skutečnost však není žádný zřejmý důvod.

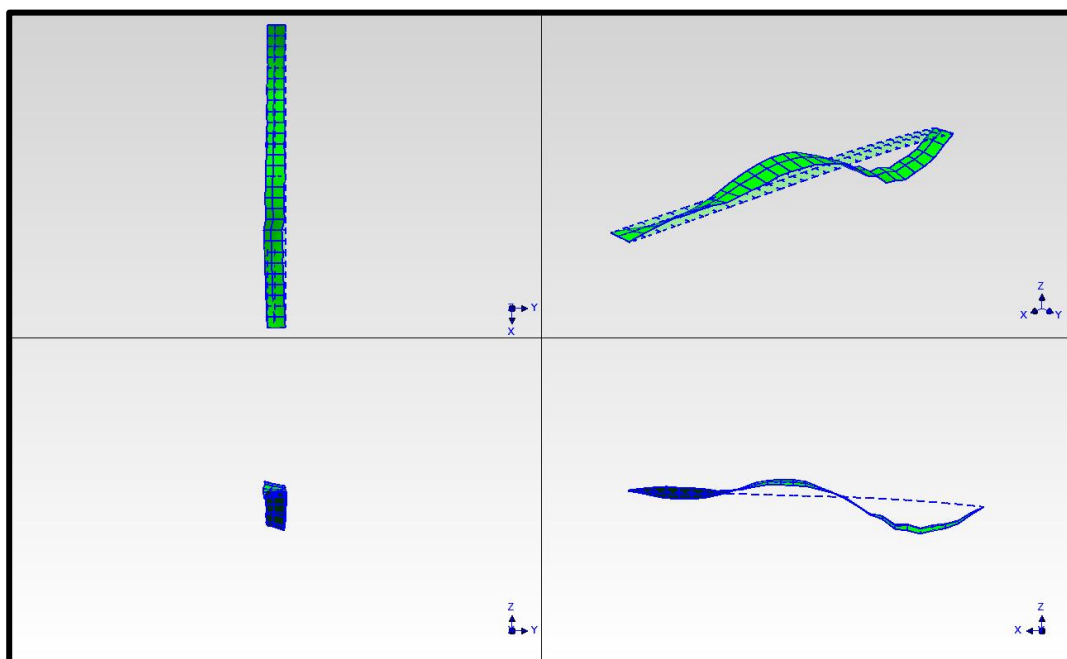
Na následujících obrázcích je vidět síť bodů, které odpovídají řezům č. 01 až č. 29 a bodům x1 až x3 (ve směru kolmém k podélné ose lávky). Řezy jsou vzhledem k ose x (v souřadném systému) řazeny vzestupně.



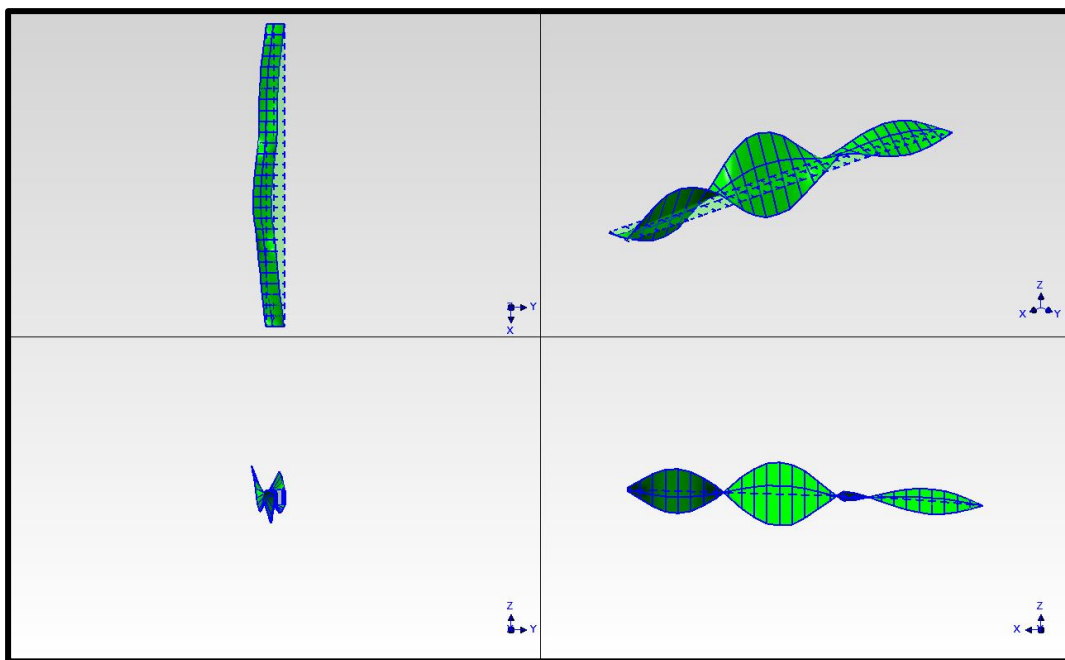
Obr. 23 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 3,265 Hz



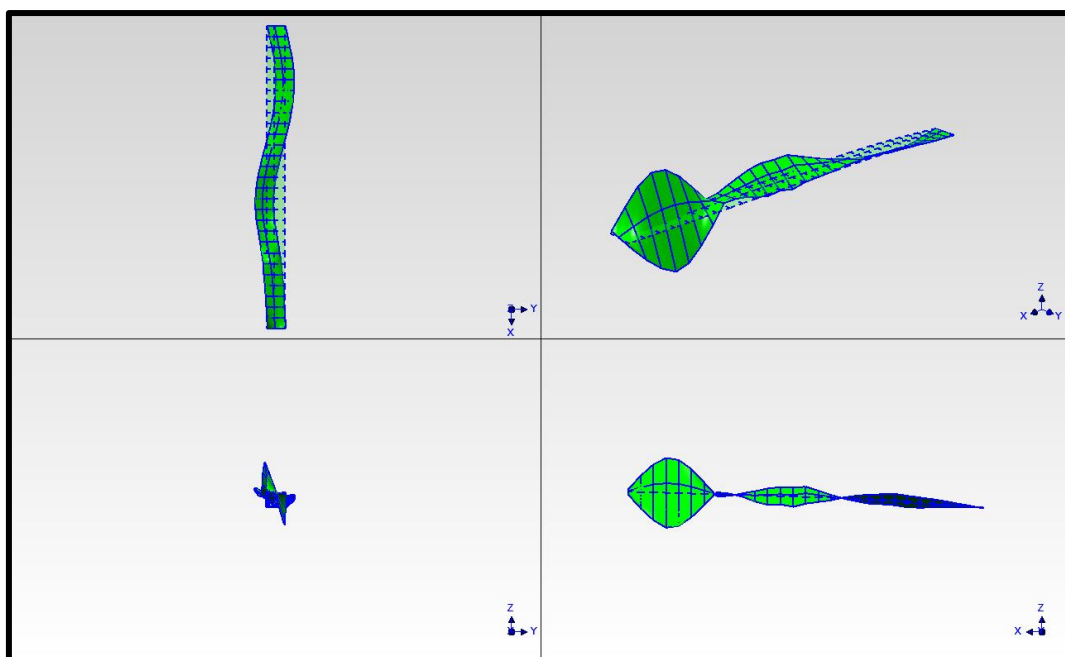
Obr. 24 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 3,66 Hz



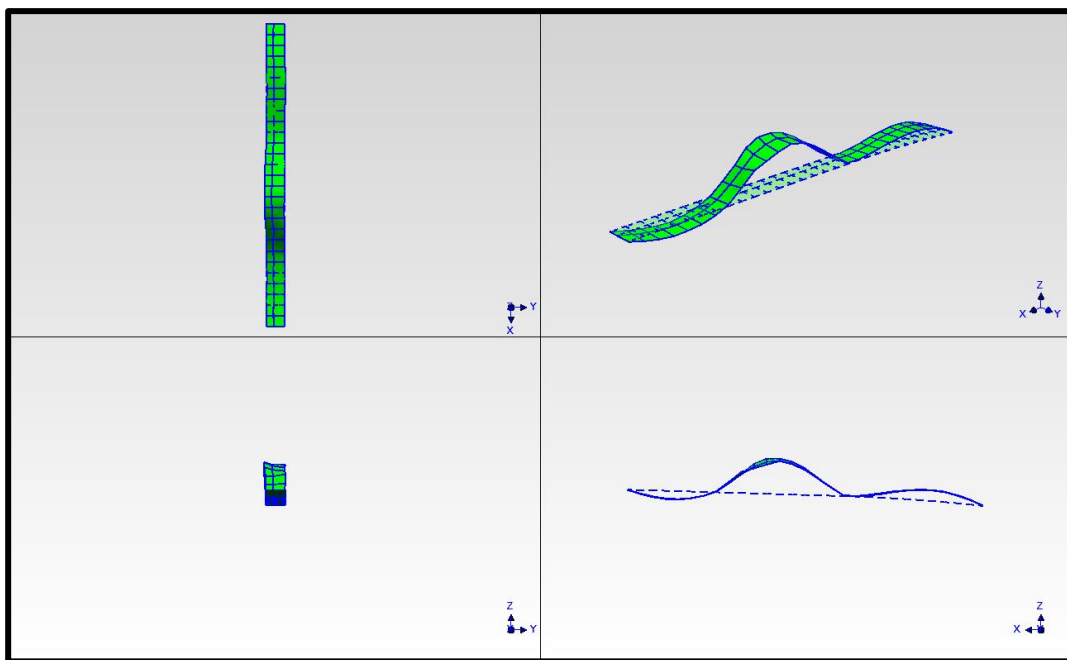
Obr. 25 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 4,625 Hz



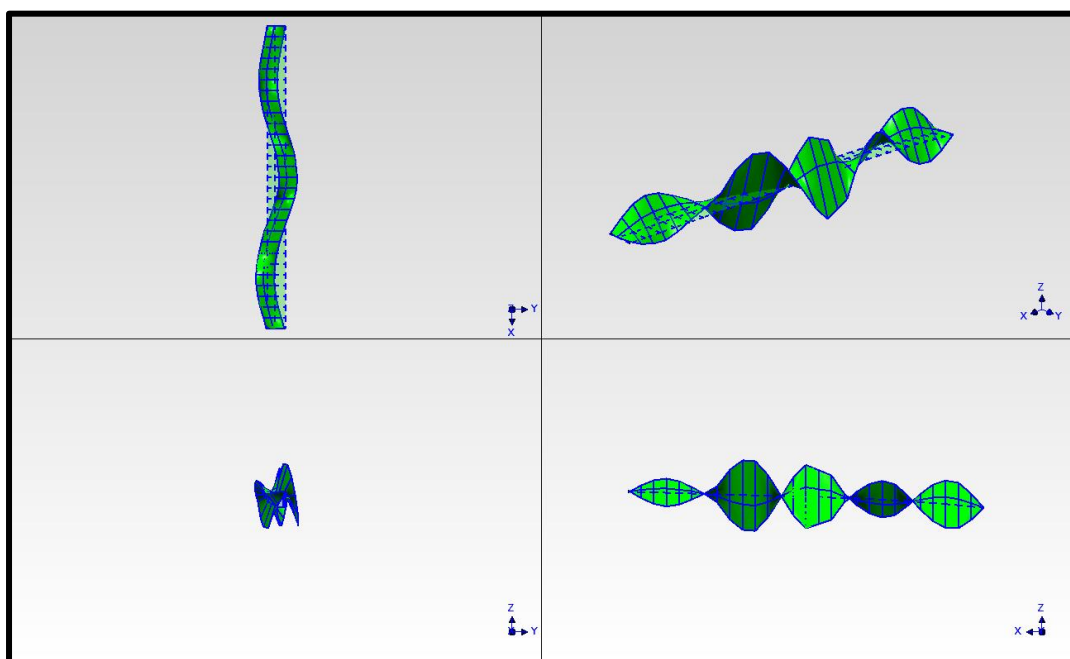
Obr. 26 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 4,84 Hz



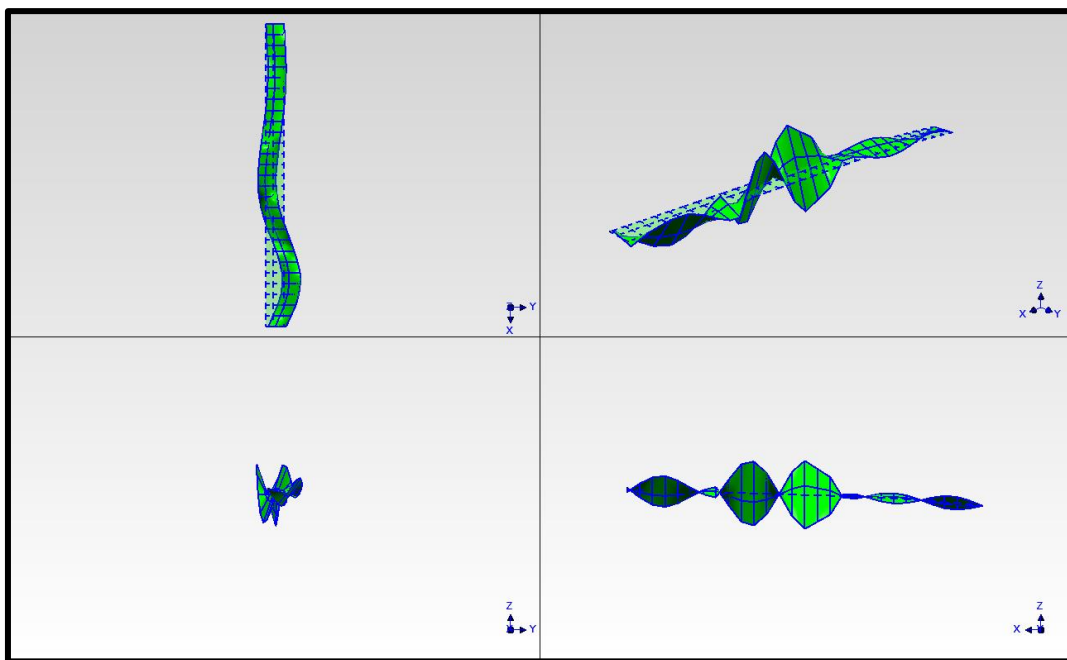
Obr. 27 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 5,84 Hz



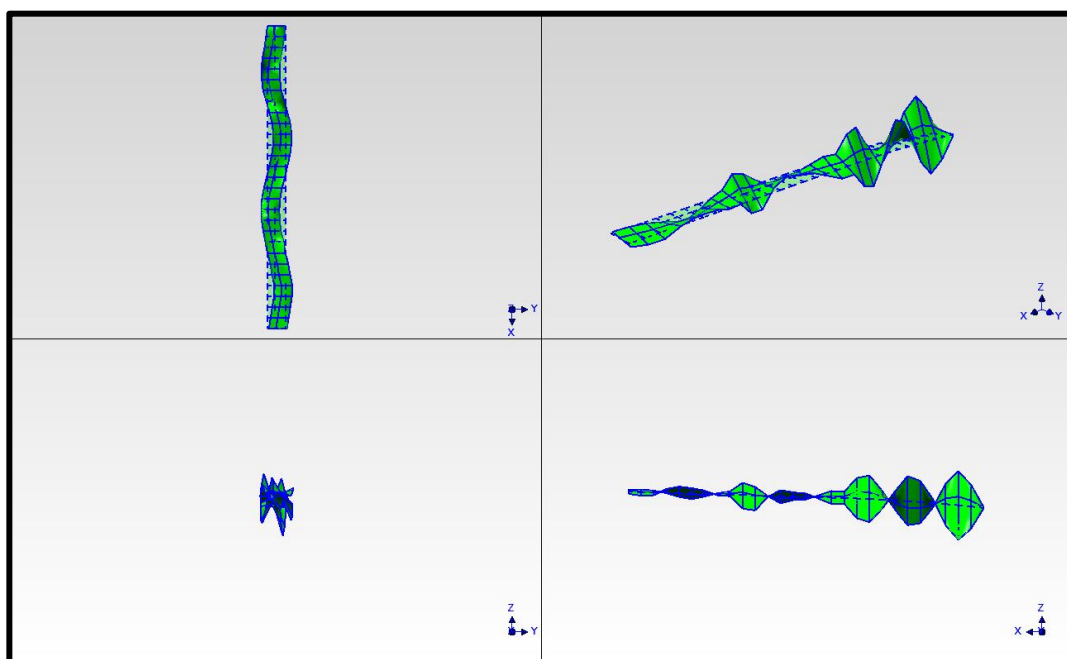
Obr. 28 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 6,16 Hz



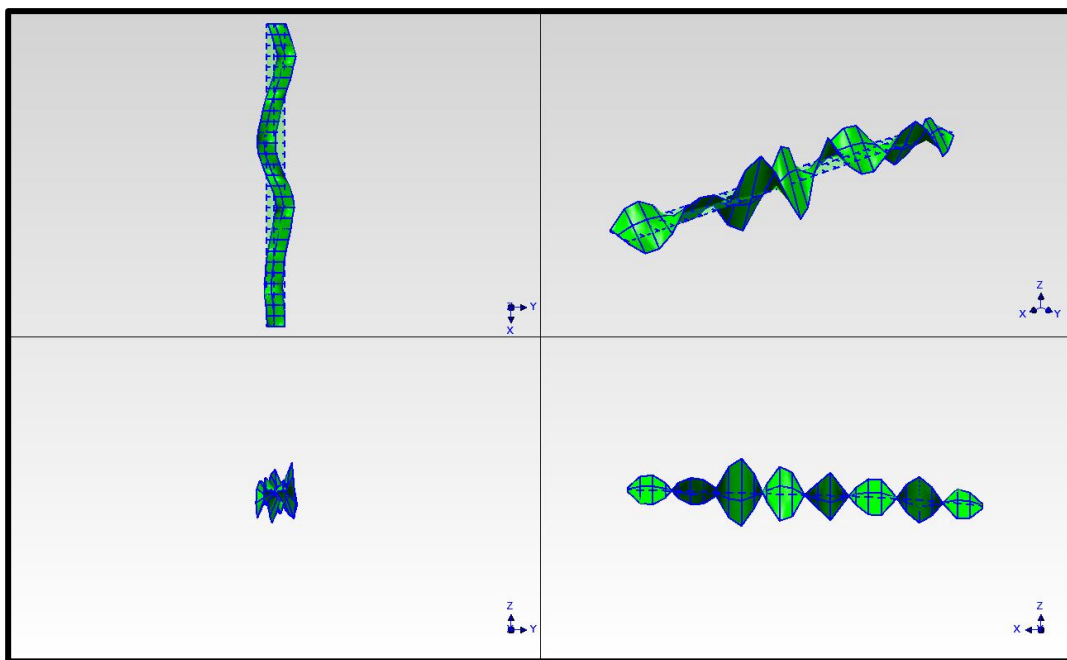
Obr. 29 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 7,44 Hz



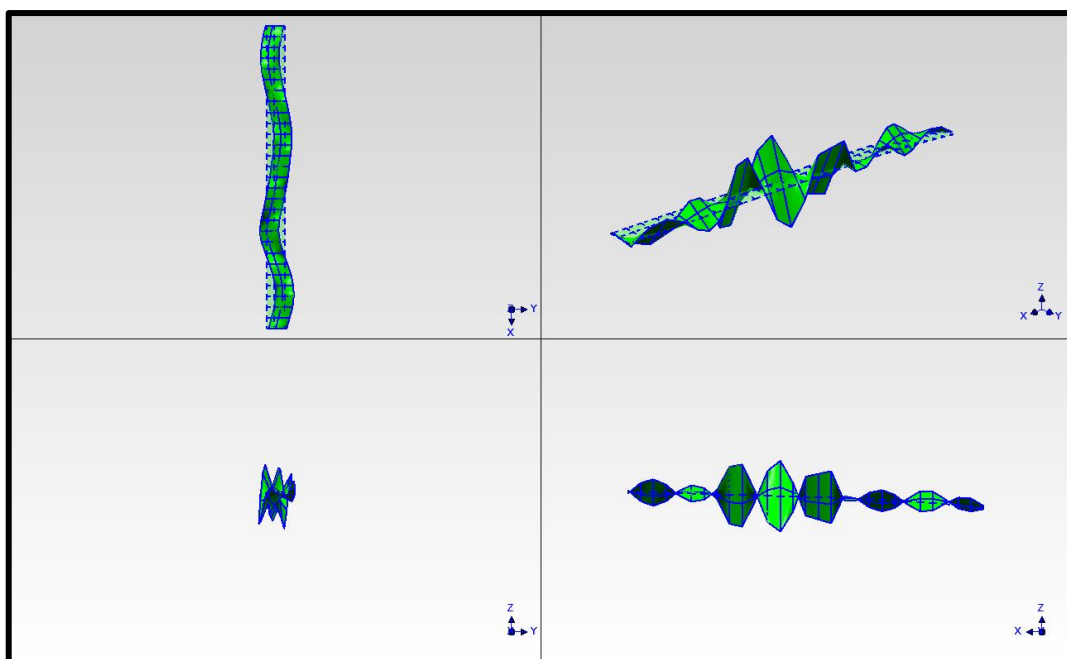
Obr. 30 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 8,64 Hz



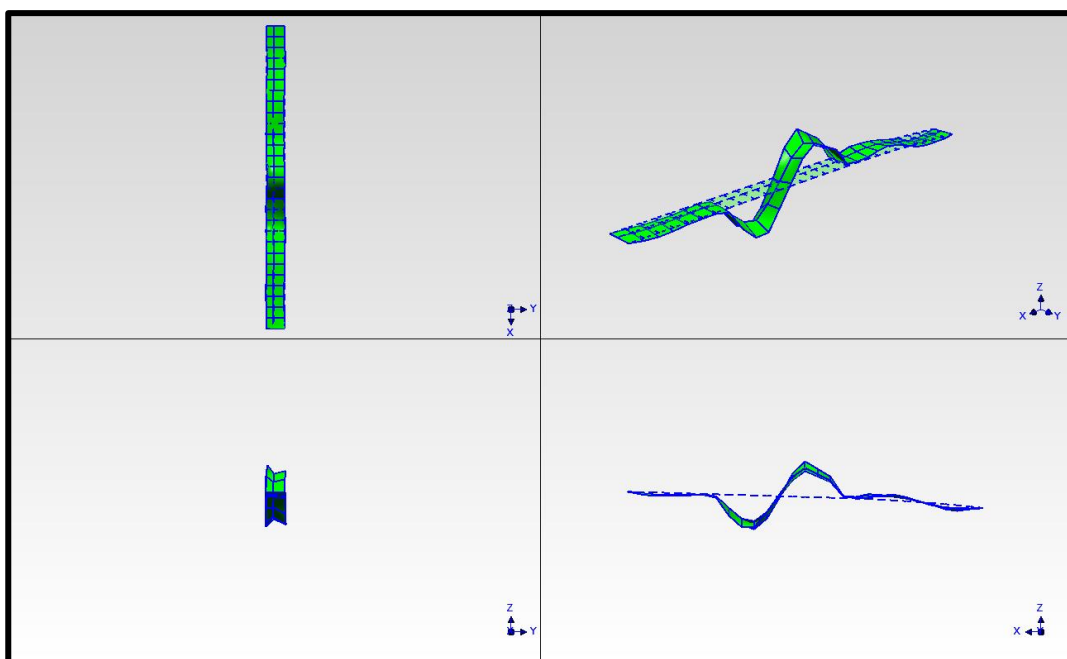
Obr. 31 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 10,45 Hz



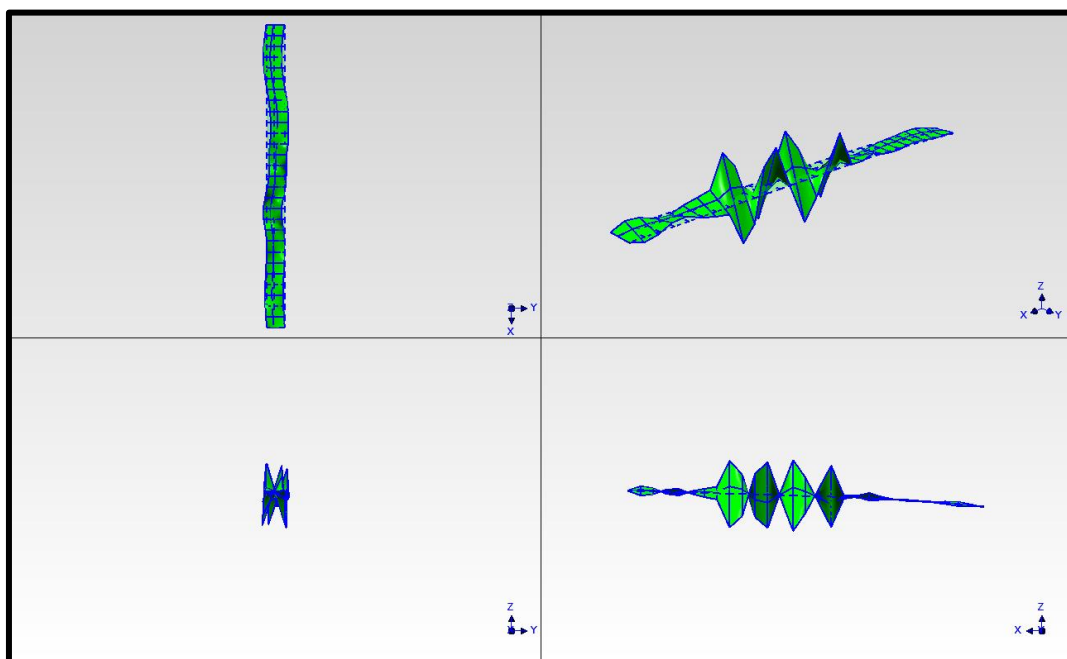
Obr. 32 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 11,28 Hz



Obr. 33 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 12,03 Hz



Obr. 34 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 13,91 Hz



Obr. 35 Vlastní tvar kmitání spjatý s vlastní frekvencí 15,66 Hz

Z vyobrazených vlastních tvarů, a to především z obr. 23, obr. 26, obr. 28, obr. 31, obr. 34, je patrná určitá nespojitost v řezu č. 12, tzn. v řezu nad pilířem. Podle práce [28] se v tomto místě nenachází žádný specifický konstrukční prvek, který by byl příčinou tohoto jevu. Na základě tohoto jevu se doporučuje při běžné nebo hlavní

prohlídce této lávky, které jsou prováděny v předepsaných periodách, tuto oblast nosné konstrukce podrobněji prozkoumat.

Podle [26] se kritéria pohody chodců mají ověřit v případech, když základní frekvence nosné konstrukce lávky je menší než 5 Hz pro svislé kmitání lávky a menší než 2,5 Hz pro vodorovné (příčné) a torzní kmitání lávky, což je v tomto případě splněno pro vlastní frekvenci 4,63 Hz spjatou se svislým ohybovým tvarem kmitání. Kritéria pohody chodců podle [26] budou posouzena v kapitole 5.7.5.2.

Podle národního aplikačního dokumentu normy [24] se prověření dynamického chování lávky při dynamickém zatížení chodci provede v případech, kdy některá z vlastních frekvencí nosné konstrukce při svislém kmitání lávky leží v intervalu 1,3 Hz až 2,3 Hz, pro konstrukce s malým útlumem (logaritmický dekrement útlumu $\leq 0,05$) se ověření provede také pro interval frekvencí 2,5 Hz až 4,6 Hz. V tomto případě by tedy nebylo nutné kritéria pohody prověřovat, protože nejnižší vlastní frekvence konstrukce spjatá se svislým tvarem kmitání je 4,63 Hz. Pro kmitání ve vodorovném směru platí, že se provede ověření dynamického chování hlavní nosné konstrukce lávky při dynamickém zatížení chodci, jestliže jakákoli vlastní frekvence konstrukce vodorovného kmitání v příčném směru spadá do intervalu frekvencí 0,5 Hz až 1,2 Hz, popř. 2,6 Hz až 3,4 Hz. V tomto případě by tedy taktéž nebylo nutné kritéria pohody chodců ověřovat, protože nejnižší vlastní frekvence spjatá s vodorovným tvarem kmitání je 4,84 Hz. Přesto budou kritéria pohody chodců i podle národního aplikačního dokumentu normy [24] posouzena ze studijních důvodů, a to v kapitole 5.7.5.3.

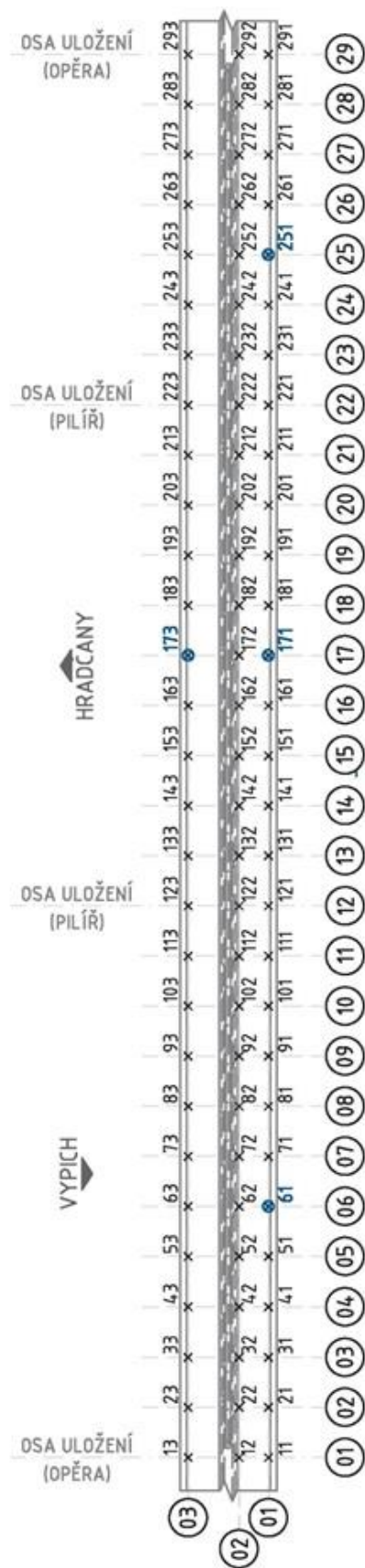
5.7 Dynamická zkouška zatěžovací

Cílem dynamické zkoušky zatěžovací bylo zjištění dynamické odezvy nosné konstrukce lávky na dynamické zatížení chodci a následné posouzení zjištěné úrovně vibrací podle kritéria komfortu chodců v souladu se současnými normami, předpisy a doporučeními.

5.7.1 Příprava zkoušky

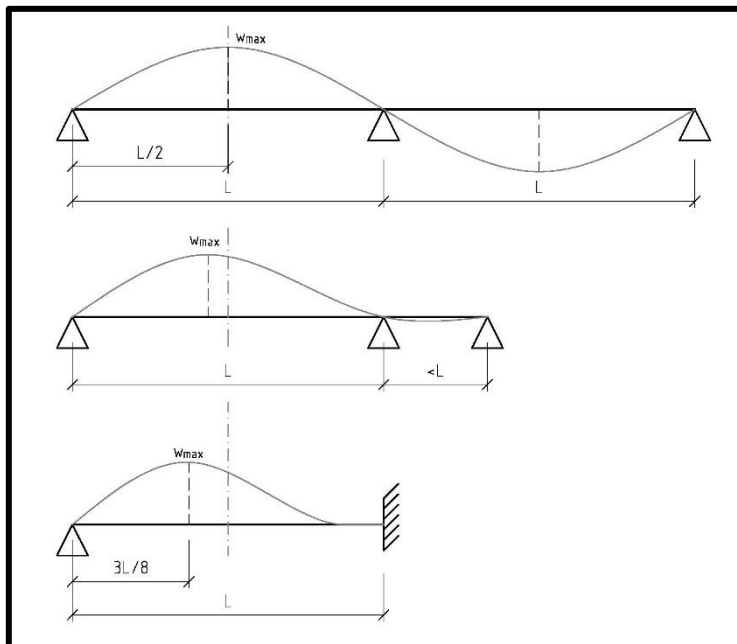
5.7.1.1 Měřicí linka

Měřicí linka zůstala stejná jako při experimentální modální analýze. Vždy dva snímače zrychlení byly umístěny do bodů 61, 171, 173 a 251 (viz obr. 36), kde zůstaly po celou dobu měření. Jeden ze snímačů měřil svislé vibrace, druhý byl orientován ve vodorovném směru kolmém k podélné ose lávky. Body byly zvoleny tak, aby pořadnice vlastních tvarů, na které bylo buzení mířeno, byly co největší. Body v řezu č. 17 se nachází uprostřed pole. Vzhledem k počtu řezů v jednotlivých polích nebylo možné vždy vybrat body v řezech přesně uprostřed pole. Umístění snímačů bylo provedeno na základě myšlenky, že čím je rozpětí jednoho pole spojitého nosníku o 2 polích kratší, tím více se mezilehlá kloubová podpora svou tuhostí blíží vetknutí. Princip této myšlenky je naznačen na obr. 37. Na základě této myšlenky byly vybrány body v řezech v krajních polích. V nejdelším poli (mezi řezy č. 01 až č. 12) se předpokládala maximální výchylka v řezu č.



Obr. 36 Schéma umístění snímačů při dynamické zatěžovací zkoušce

6, tedy blíže k opěře, dál od středu rozpětí směrem od kratšího (středního) pole. V nejkratším poli (mezi řezy č. 22 až č. 29) se naopak předpokládala maximální výchylka v řezu č. 25, tedy dál od opěře, blíže k delšímu (střednímu) poli.



Obr. 37 Idealizace tuhosti mezilehlé kloubové podpory spojitého nosníku v závislosti na rozpětích polí

5.7.1.2 Předběžné vyhodnocení vlastních frekvencí

Aby bylo možné vybudit maximální odezvu nosné konstrukce lávky na dynamické zatížení chodci, bylo nutné znát její vlastní frekvence. Předběžné vyhodnocení vlastních frekvencí bylo možné provést pomocí FFT analýzy v režimu on-line v programu DEWESoft. Bylo určeno šest nejnižších předpokládaných vlastních frekvencí nosné konstrukce lávky a předpokládaný charakter vlastního tvaru kmitání (viz tab. 9).

Tab. 9 Předpokládané vlastní frekvence, předpokládané charaktery vlastních tvarů a zvolené budící krokové frekvence

Pořadové číslo (j)	Vlastní frekvence f_j [Hz]	Charakter vlastního tvaru kmitání	Budící frekvence [Hz] $f = \frac{1}{2} \cdot f_j$
(1)	3,27	Torzní	1,63
(2)	3,67	Torzní	1,83
(3)	4,62	Svislý ohybový	2,31
(4)	4,83	Torzní	2,41
(5)	5,12	Torzní	2,56
(6)	5,83	Torzní	2,91

5.7.1.3 Zatěžovací stavy

Frekvence budících sil, kterým byla konstrukce vystavena, byly zvoleny jako poloviny předpokládaných vlastních frekvencí s pořadovým číslem 1, 2, 3 a 5 (podle značení v tab. 9). Zvolené budící frekvence tedy byly 1,63 Hz, 1,83 Hz, 2,31 Hz a 2,56 Hz. Záměrně byla vynechána budící frekvence 2,41 Hz, protože není pro lidský pohyb přirozená. Dále byla vynechána budící frekvence 2,92 Hz, která také není pro lidský pohyb obvyklá, muselo by se jednat o rychlý běh (sprint).

Zatěžovací stavy byly zvoleny následovně:

- 1) náhodné přechody chodců po lávce,
- 2) 2 chodci jdoucí shodnou krokovou frekvencí za sebou,
- 3) 1 chodec,
- 4) vandalismus.

První dva zatěžovací stavy byly zvoleny podle normy [10], kde jsou definovány jako simulace běžného provozu lávky. Běžný provoz definovaný v [10] bude nadále označován jako „běžná úroveň dynamického zatížení“. První zatěžovací stav, tj. náhodné přechody chodců po lávce, bude nadále označován jako „běžný provoz“. Norma [10] doporučuje, aby u zatěžovacího stavu „2 chodci jdoucí shodnou krokovou frekvencí“ šli chodci vedle

sebe. Pro účely tohoto experimentu však bylo určeno, že 2 chodci půjdou za sebou. Z odhadů charakterů vlastních tvarů kmitání bylo totiž patrné, že většina vlastních tvarů má torzní charakter. Když jdou 2 chodci za sebou, nachází se ve stejné účinné poloze pro vybudení torzního kmitání, což je pro účel tohoto experimentu příznivější. Třetí zatěžovací stav byl zvolen kvůli ověření předpokladu, že odezva konstrukce na dynamické zatížení chodci narůstá podle \sqrt{n} , kde n je počet chodců [29]. Čtvrtý zatěžovací stav nemířil na posouzení mezního stavu použitelnosti (kritérium pohody chodců), podle [24] by mělo být splněno, že vandalismus nezpůsobí poškození či kolaps konstrukce. Při vandalismu může být zaznamenána větší dynamická odezva konstrukce na působící zatížení než při běžné úrovni dynamického zatížení, záznamy jsou také mnohdy vhodné k vyhodnocení útlumu konstrukce.

5.7.2 Průběh zkoušky

V následující tab. 10 jsou uvedena čísla záznamů kmitání lávky s příslušnými zatěžovacími stavy a krokovými frekvencemi tak, jak skutečně proběhly.

Aby bylo dosaženo požadované krokové frekvence, šli chodci podle úderů metronomu. Metronom udává počet úderů za minutu (bpm), tzn. pro správné nastavení metronomu bylo nutné požadovanou frekvenci vynásobit šedesáti.

Při zatěžovacím stavu „běžný provoz“ byly pořizeny dva záznamy, oba byly dlouhé 5 minut. Čtyři chodci se pohybovali nesynchronizovaně od řezu 01 k řezu 29 a zpět, měnili tempo svého pohybu od pomalé chůze až po středně rychlý běh.

Při zatěžovacím stavu „2 chodci za sebou“ kráčeli 2 chodci za sebou synchronizovaným krokem podle metronomu od řezu 29 k 01 a zpět.

Tab. 10 Provedené zatěžovací stavy s příslušnými čísly záznamů

Záznam č.	Budicí frekvence [Hz]	Zatěžovací stav
1-2	---	Běžný provoz
3-6	1,63	2 chodci (za sebou)
7-12	1,83	2 chodci (za sebou)
13-16	2,31	2 chodci (za sebou)
17-18	2,56	2 chodci (za sebou)
19-22	1,63	1 chodec
23-27	1,83	1 chodec
28-31	2,56	1 chodec
32-33	1,63	Vandalismus
34-35	2,31	Vandalismus
36-37	1,83	Vandalismus
38-39	2,56	Vandalismus

Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ bylo pořízeno osm záznamů. Nosná konstrukce lávky byla buzena ve čtyřech frekvencích. Buzení prováděli čtyři figuranti pohupováním v kolenou v místě, kde byla předpokládána maximální pořadnice vlastního tvaru, na který bylo buzením mířeno. Při záznamech č. 32 a č. 33 (budicí frekvence 1,63 Hz) budili figuranti konstrukci okolo bodu č. 063, tamtéž budili figuranti konstrukci i při záznamech č. 34 a č. 35 (budicí frekvence 2,31 Hz). Při záznamech č. 36 a č. 37 (budicí frekvence 1,83 Hz) budili figuranti konstrukci okolo bodu č. 173, při záznamech č. 38 a č. 39 (budicí frekvence 2,56 Hz) okolo bodu č. 253.

5.7.3 Vyhodnocení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci

Naměřené záznamy byly zpracovány v programu Material Damping v4.0, který byl vytvořen na katedře mechaniky na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Nejprve byly hromadným vyhodnocením z jednotlivých záznamů vyhodnoceny maximální výkmity zrychlení a největší RMS hodnoty zrychlení. Pomocí filtru byly odstraněny nižší frekvence, tzv. kvazistatické složky. Pro výpočet hodnoty RMS byl v programu nastaven časový interval 5 s. Také byly vyhodnoceny vážené RMS hodnoty zrychlení s použitím váhové funkce W_m . Pro vyhodnocení výchylek bylo využito dvojnásobné integrace v časové oblasti pomocí Simpsonova pravidla. Z vhodných záznamů volného tlumeného dokmitání lávky (tj. ze zatěžovacích stavů „vandalismus“) byl vyhodnocen logaritmický dekrement útlumu za použití metody zpracování frekvenčních multispekter volného tlumeného kmitání. Vandalismus je pro vyhodnocení útlumu vhodný z toho důvodu, že figuranti vybudí konstrukci na maximální úroveň kmitání v nejúčinnější poloze a poté zastaví buzení konstrukce v jediném okamžiku.

V následujících tab. 11 a tab. 12 jsou uvedeny maximální výkmity zrychlení pro svislý a vodorovný směr kmitání konstrukce. Tučně jsou označeny extrémní hodnoty zrychlení pro daný zatěžovací stav v dané frekvenci ze všech snímačů. V tab. 13 jsou uvedeny maximální vyhodnocené RMS hodnoty zrychlení na jednotlivých snímačích ve svislém i vodorovném směru kmitání, tučně jsou opět označeny extrémní hodnoty zrychlení pro daný zatěžovací stav v dané frekvenci ze všech snímačů.

Tab. 11 Extrémy zrychlení vyhodnocené na jednotlivých snímačích ve svislém směru

Záznam			Extrémy zrychlení naměřených na snímačích [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	61z		171z		173z		251z	
			max	min	max	min	max	min	max	min
1	Běžný provoz		0,56	-0,47	0,40	-0,44	0,59	-0,44	0,50	-0,54
2	Běžný provoz		0,51	-0,49	0,58	-0,45	0,51	-0,50	0,45	-0,44
3	2 chodci	1,63	0,19	-0,20	0,21	-0,21	0,26	-0,24	0,18	-0,16
4	2 chodci	1,63	0,19	-0,19	0,19	-0,18	0,18	-0,22	0,16	-0,19
5	2 chodci	1,63	0,47	-0,46	0,37	-0,38	0,42	-0,44	0,33	-0,32
6	2 chodci	1,63	0,35	-0,35	0,24	-0,23	0,26	-0,25	0,20	-0,21
7	2 chodci	1,83	0,16	-0,17	0,15	-0,17	0,17	-0,19	0,17	-0,18
8	2 chodci	1,83	0,41	-0,40	0,45	-0,44	0,52	-0,42	0,38	-0,30
9	2 chodci	1,83	0,29	-0,31	0,29	-0,32	0,30	-0,37	0,29	-0,28
10	2 chodci	1,83	0,29	-0,29	0,35	-0,38	0,37	-0,34	0,30	-0,29
11	2 chodci	1,83	0,29	-0,37	0,36	-0,34	0,40	-0,37	0,29	-0,28
12	2 chodci	1,83	0,35	-0,35	0,44	-0,47	0,47	-0,43	0,34	-0,31
13	2 chodci	2,31	0,28	-0,29	0,18	-0,28	0,24	-0,30	0,24	-0,24
14	2 chodci	2,31	0,89	-0,72	0,56	-0,68	0,71	-0,60	0,64	-0,62
15	2 chodci	2,31	0,62	-0,57	0,50	-0,48	0,45	-0,37	0,65	-0,62
16	2 chodci	2,31	0,69	-0,59	0,37	-0,38	0,46	-0,40	0,54	-0,54
17	2 chodci	2,56	0,38	-0,38	0,28	-0,31	0,38	-0,40	0,37	-0,43
18	2 chodci	2,56	0,79	-0,69	0,86	-0,74	0,87	-0,66	0,97	-0,95
19	1 chodec	1,63	0,28	-0,31	0,22	-0,23	0,28	-0,30	0,19	-0,18
20	1 chodec	1,63	0,36	-0,34	0,21	-0,34	0,23	-0,26	0,24	-0,18
21	1 chodec	1,63	0,13	-0,14	0,11	-0,10	0,15	-0,15	0,10	-0,09
22	1 chodec	1,63	0,16	-0,19	0,15	-0,15	0,16	-0,20	0,13	-0,13
23	1 chodec	1,83	0,23	-0,30	0,32	-0,35	0,33	-0,38	0,32	-0,36
24	1 chodec	1,83	0,28	-0,34	0,33	-0,36	0,37	-0,36	0,29	-0,29
25	1 chodec	1,83	0,14	-0,13	0,14	-0,14	0,13	-0,13	0,10	-0,11
26	1 chodec	1,83	0,07	-0,07	0,11	-0,11	0,11	-0,11	0,08	-0,06
27	1 chodec	1,83	0,15	-0,20	0,12	-0,12	0,14	-0,15	0,12	-0,14
28	1 chodec	2,56	0,51	-0,56	0,42	-0,44	0,45	-0,52	0,63	-0,86
29	1 chodec	2,56	0,79	-0,90	0,55	-0,69	0,67	-0,65	0,73	-0,81
30	1 chodec	2,56	0,36	-0,32	0,20	-0,17	0,21	-0,18	0,21	-0,23
31	1 chodec	2,56	0,32	-0,33	0,22	-0,26	0,28	-0,32	0,23	-0,33
32	4 vandalové	1,63	1,12	-1,14	0,58	-0,54	0,53	-0,57	0,20	-0,21
33	4 vandalové	1,63	1,14	-1,14	0,60	-0,55	0,56	-0,61	0,21	-0,21
34	4 vandalové	2,31	1,59	-1,63	0,66	-0,65	0,73	-0,66	0,38	-0,37
35	4 vandalové	2,31	1,42	-1,62	0,67	-0,64	0,69	-0,66	0,39	-0,42
36	4 vandalové	1,83	1,02	-0,97	1,33	-1,47	1,29	-1,35	0,43	-0,44
37	4 vandalové	1,83	0,93	-0,92	1,37	-1,37	1,37	-1,49	0,36	-0,40
38	4 vandalové	2,56	0,67	-0,71	0,40	-0,41	0,35	-0,35	1,14	-1,13
39	4 vandalové	2,56	0,65	-0,66	0,31	-0,30	0,29	-0,33	1,00	-1,10

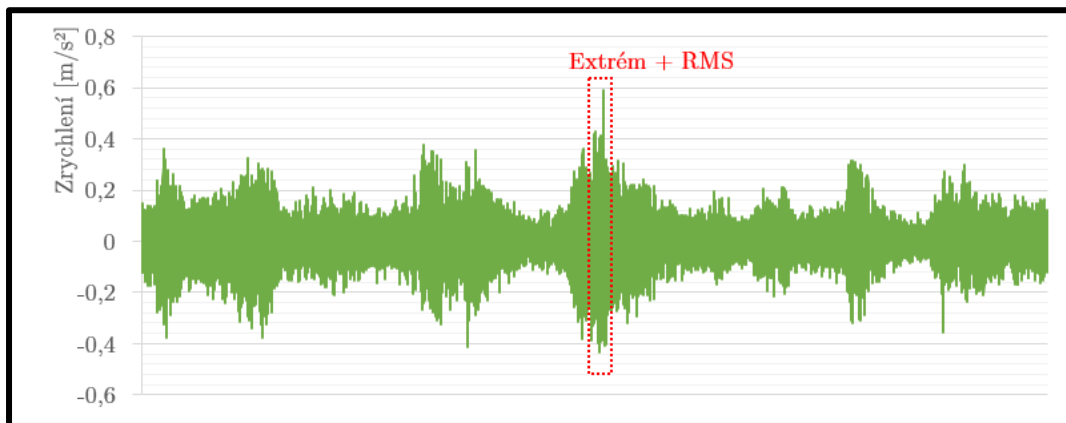
Tab. 12 Extrémy zrychlení vyhodnocené na jednotlivých snímačích ve vodorovném směru

Záznam			Extrémy zrychlení naměřených na snímačích [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	61y		171y		173y		251y	
			max	min	max	min	max	min	max	min
1	Běžný provoz		0,18	-0,17	0,17	-0,17	0,16	-0,16	0,20	-0,22
2	Běžný provoz		0,14	-0,14	0,16	-0,15	0,15	-0,14	0,20	-0,20
3	2 chodci	1,63	0,06	-0,06	0,11	-0,09	0,09	-0,09	0,05	-0,06
4	2 chodci	1,63	0,07	-0,06	0,08	-0,08	0,08	-0,08	0,06	-0,05
5	2 chodci	1,63	0,13	-0,15	0,15	-0,15	0,15	-0,15	0,12	-0,10
6	2 chodci	1,63	0,10	-0,10	0,09	-0,09	0,09	-0,08	0,05	-0,06
7	2 chodci	1,83	0,06	-0,05	0,07	-0,07	0,05	-0,05	0,06	-0,06
8	2 chodci	1,83	0,10	-0,10	0,14	-0,14	0,12	-0,13	0,12	-0,12
9	2 chodci	1,83	0,09	-0,08	0,11	-0,09	0,10	-0,09	0,09	-0,09
10	2 chodci	1,83	0,09	-0,08	0,13	-0,15	0,12	-0,14	0,13	-0,12
11	2 chodci	1,83	0,08	-0,08	0,10	-0,09	0,09	-0,08	0,08	-0,09
12	2 chodci	1,83	0,10	-0,09	0,13	-0,13	0,12	-0,12	0,11	-0,11
13	2 chodci	2,31	0,08	-0,10	0,07	-0,07	0,05	-0,06	0,07	-0,06
14	2 chodci	2,31	0,21	-0,21	0,13	-0,14	0,14	-0,13	0,18	-0,18
15	2 chodci	2,31	0,15	-0,13	0,10	-0,10	0,10	-0,10	0,12	-0,12
16	2 chodci	2,31	0,17	-0,15	0,10	-0,10	0,10	-0,09	0,13	-0,10
17	2 chodci	2,56	0,14	-0,13	0,10	-0,17	0,09	-0,12	0,11	-0,09
18	2 chodci	2,56	0,34	-0,30	0,17	-0,18	0,18	-0,16	0,18	-0,19
19	1 chodec	1,63	0,10	-0,11	0,09	-0,10	0,08	-0,08	0,06	-0,06
20	1 chodec	1,63	0,11	-0,09	0,22	-0,24	0,10	-0,11	0,10	-0,09
21	1 chodec	1,63	0,04	-0,05	0,05	-0,05	0,04	-0,05	0,03	-0,03
22	1 chodec	1,63	0,05	-0,05	0,05	-0,06	0,05	-0,05	0,04	-0,05
23	1 chodec	1,83	0,06	-0,05	0,10	-0,15	0,08	-0,09	0,08	-0,08
24	1 chodec	1,83	0,09	-0,09	0,14	-0,17	0,13	-0,13	0,14	-0,14
25	1 chodec	1,83	0,04	-0,04	0,05	-0,06	0,04	-0,05	0,05	-0,05
26	1 chodec	1,83	0,03	-0,02	0,04	-0,04	0,03	-0,03	0,05	-0,04
27	1 chodec	1,83	0,04	-0,06	0,09	-0,12	0,06	-0,04	0,11	-0,13
28	1 chodec	2,56	0,27	-0,28	0,12	-0,13	0,11	-0,13	0,17	-0,16
29	1 chodec	2,56	0,22	-0,25	0,14	-0,15	0,14	-0,14	0,17	-0,18
30	1 chodec	2,56	0,13	-0,12	0,08	-0,08	0,06	-0,06	0,07	-0,10
31	1 chodec	2,56	0,09	-0,10	0,06	-0,07	0,05	-0,06	0,08	-0,09
32	4 vandalové	1,63	0,39	-0,39	0,29	-0,27	0,27	-0,26	0,11	-0,10
33	4 vandalové	1,63	0,40	-0,39	0,29	-0,26	0,27	-0,25	0,11	-0,10
34	4 vandalové	2,31	0,32	-0,26	0,16	-0,18	0,17	-0,16	0,11	-0,14
35	4 vandalové	2,31	0,31	-0,31	0,21	-0,19	0,23	-0,21	0,15	-0,12
36	4 vandalové	1,83	0,11	-0,11	0,50	-0,53	0,46	-0,46	0,24	-0,27
37	4 vandalové	1,83	0,10	-0,11	0,46	-0,50	0,42	-0,44	0,25	-0,27
38	4 vandalové	2,56	0,65	-0,65	0,35	-0,28	0,35	-0,29	0,33	-0,31
39	4 vandalové	2,56	0,63	-0,66	0,34	-0,29	0,32	-0,29	0,35	-0,30

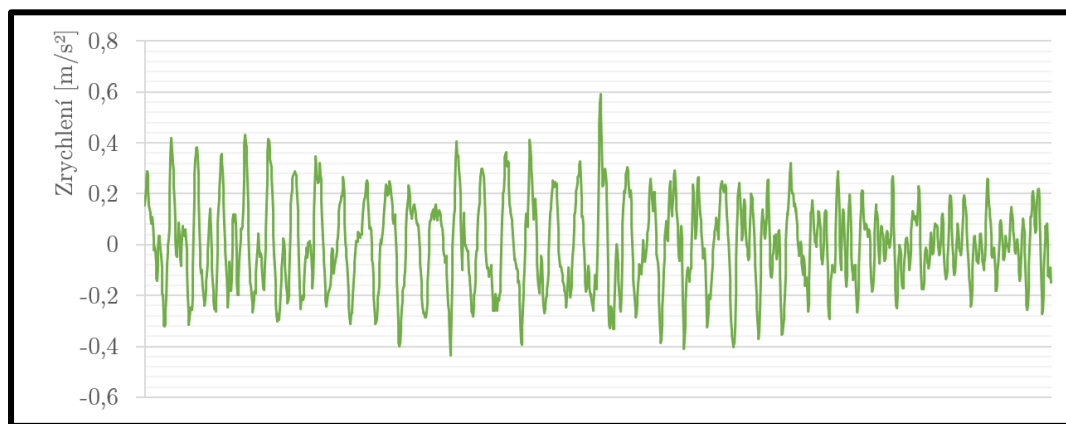
Tab. 13 Maximální RMS hodnoty zrychlení vyhodnocené na jednotlivých snímačích

Záznam			RMS hodnoty zrychlení na jednotlivých snímačích [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	Svislý směr				Vodorovný směr			
			61z	171z	173z	251z	61y	171y	173y	251y
1	Běžný provoz		0,18	0,17	0,18	0,15	0,05	0,06	0,06	0,10
2	Běžný provoz		0,18	0,24	0,24	0,18	0,05	0,07	0,06	0,09
3	2 chodci	1,63	0,09	0,09	0,10	0,06	0,03	0,04	0,04	0,02
4	2 chodci	1,63	0,08	0,08	0,08	0,06	0,03	0,04	0,04	0,02
5	2 chodci	1,63	0,21	0,17	0,17	0,11	0,06	0,07	0,08	0,04
6	2 chodci	1,63	0,17	0,09	0,09	0,06	0,05	0,04	0,04	0,02
7	2 chodci	1,83	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03
8	2 chodci	1,83	0,15	0,20	0,20	0,10	0,04	0,06	0,06	0,05
9	2 chodci	1,83	0,10	0,14	0,14	0,10	0,03	0,04	0,04	0,04
10	2 chodci	1,83	0,13	0,19	0,19	0,10	0,04	0,07	0,06	0,06
11	2 chodci	1,83	0,10	0,12	0,12	0,09	0,03	0,04	0,04	0,03
12	2 chodci	1,83	0,13	0,18	0,18	0,10	0,04	0,06	0,05	0,04
13	2 chodci	2,31	0,11	0,06	0,07	0,07	0,04	0,02	0,02	0,03
14	2 chodci	2,31	0,31	0,18	0,20	0,23	0,10	0,05	0,05	0,07
15	2 chodci	2,31	0,23	0,12	0,13	0,18	0,07	0,03	0,03	0,04
16	2 chodci	2,31	0,25	0,11	0,12	0,18	0,09	0,03	0,03	0,06
17	2 chodci	2,56	0,12	0,10	0,12	0,13	0,07	0,03	0,02	0,03
18	2 chodci	2,56	0,26	0,21	0,23	0,27	0,18	0,07	0,07	0,08
19	1 chodec	1,63	0,13	0,08	0,08	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02
20	1 chodec	1,63	0,15	0,10	0,10	0,08	0,04	0,05	0,06	0,03
21	1 chodec	1,63	0,06	0,05	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01
22	1 chodec	1,63	0,08	0,06	0,06	0,04	0,02	0,03	0,03	0,01
23	1 chodec	1,83	0,11	0,17	0,17	0,11	0,02	0,05	0,05	0,03
24	1 chodec	1,83	0,12	0,16	0,16	0,10	0,04	0,06	0,06	0,06
25	1 chodec	1,83	0,05	0,07	0,07	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
26	1 chodec	1,83	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
27	1 chodec	1,83	0,05	0,04	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02
28	1 chodec	2,56	0,17	0,14	0,15	0,25	0,16	0,05	0,05	0,07
29	1 chodec	2,56	0,28	0,19	0,20	0,22	0,12	0,05	0,05	0,06
30	1 chodec	2,56	0,12	0,06	0,07	0,08	0,06	0,03	0,03	0,03
31	1 chodec	2,56	0,11	0,08	0,09	0,08	0,04	0,02	0,02	0,02
32	4 vandalové	1,63	0,72	0,30	0,30	0,09	0,23	0,15	0,15	0,05
33	4 vandalové	1,63	0,70	0,29	0,30	0,09	0,23	0,15	0,14	0,05
34	4 vandalové	2,31	0,78	0,33	0,35	0,13	0,12	0,06	0,06	0,04
35	4 vandalové	2,31	0,81	0,35	0,35	0,17	0,14	0,09	0,10	0,05
36	4 vandalové	1,83	0,57	0,81	0,80	0,19	0,04	0,29	0,27	0,15
37	4 vandalové	1,83	0,54	0,78	0,79	0,16	0,04	0,27	0,25	0,13
38	4 vandalové	2,56	0,43	0,16	0,15	0,53	0,42	0,14	0,14	0,18
39	4 vandalové	2,56	0,41	0,14	0,13	0,52	0,40	0,14	0,14	0,18

Při prvním zatěžovacím stavu „běžný provoz“ bylo dosaženo extrému zrychlení na záznamu č. 1, a to jak ve svislém, tak ve vodorovném směru. Ve svislém směru má extrém hodnotu $0,59 \text{ m/s}^2$ a byl naměřen na snímači 173z. Maximální RMS hodnota zrychlení ve svislém směru je $0,18 \text{ m/s}^2$ a byla vyhodnocena na tomtéž snímači, a to v časovém intervalu, kde se nachází i extrém zrychlení. Maximální výkmit výchylky ve svislém směru byl $0,47 \text{ mm}$.

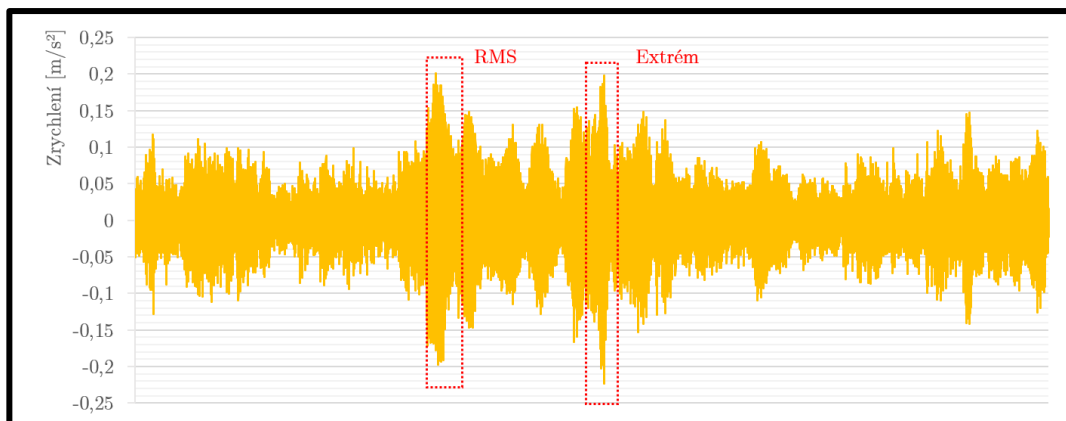


Obr. 38 Záznam č. 1, snímač 173z

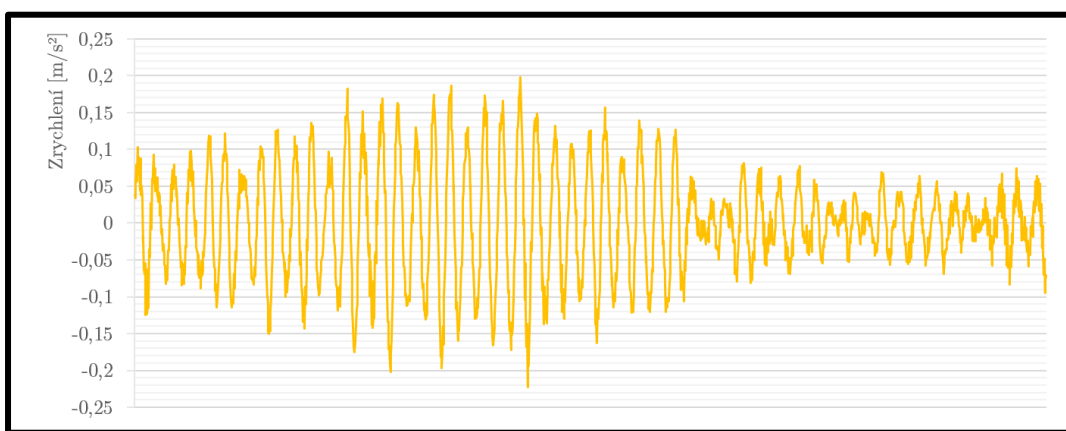


Obr. 39 Detail záznamu č. 1 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení

Ve vodorovném směru má extrém hodnotu $-0,22 \text{ m/s}^2$ a byl naměřen na snímači 251y. Maximální RMS hodnota zrychlení ve vodorovném směru je $0,10 \text{ m/s}^2$ a byla vyhodnocena na tomtéž snímači. Časový interval, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení, není totožný s intervalem, kde se nachází extrém zrychlení (viz obr. 40). Maximální výkmit výchylky ve vodorovném směru byl $0,07 \text{ mm}$.



Obr. 40 Záznam č. 1, snímač 251y



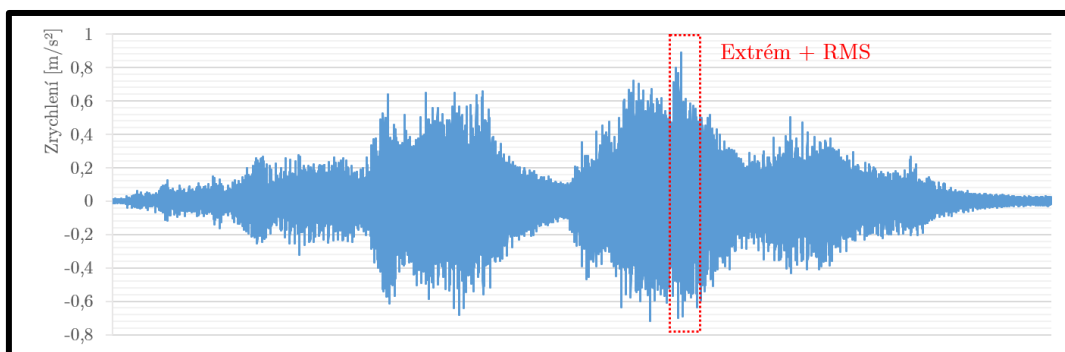
Obr. 41 Detail záznamu č. 1 dlouhý 5 s, kde byl naměřen extrém zrychlení



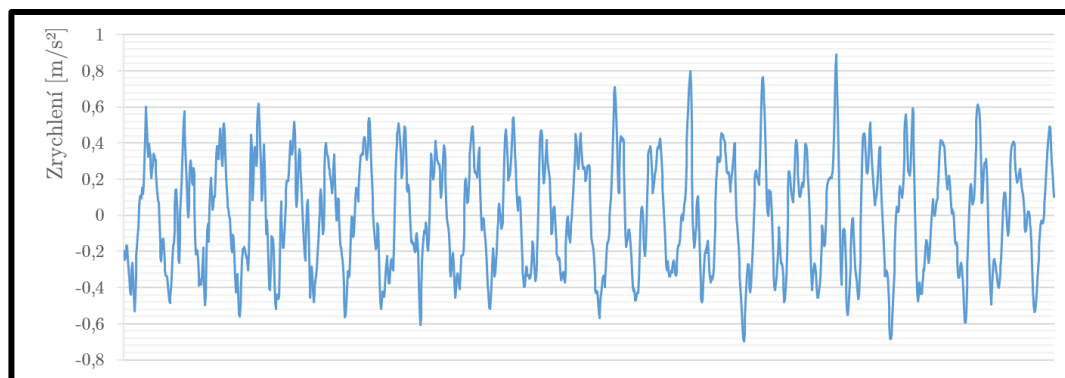
Obr. 42 Detail záznamu č. 1 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení

Při druhém zatěžovacím stavu „2 chodci za sebou“ při budicí frekvenci 2,31 Hz na záznamu č. 14 má extrém zrychlení ve svislém směru hodnotu 0,89 m/s² a byl

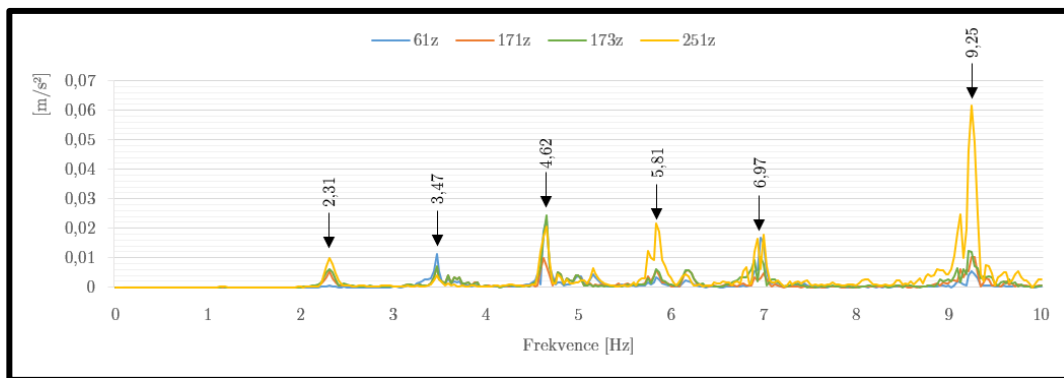
naměřen na snímači 61z. Maximální RMS hodnota zrychlení ve svislém směru je $0,31 \text{ m/s}^2$ a byla vyhodnocena na tomtéž snímači, a to v časovém intervalu, kde se nachází i extrém zrychlení. Na obr. 45 je zobrazeno frekvenční složení signálu. Je zde vidět, že se podařilo vybudit nejen frekvenci, kterou kráčeli chodci ($2,31 \text{ Hz}$), ale i její celé násobky (dvojnásobek $4,62 \text{ Hz}$, což je vlastní frekvence, přibližně trojnásobek $6,97 \text{ Hz}$, přibližně čtyřnásobek $9,25 \text{ Hz}$), dokonce i její 1,5násobek $3,47 \text{ Hz}$. Dále byla vybudena vlastní frekvence $5,81 \text{ Hz}$. Maximální výkmit výchylky ve svislém směru byl $0,77 \text{ mm}$.



Obr. 43 Záznam č. 14, snímač 61z

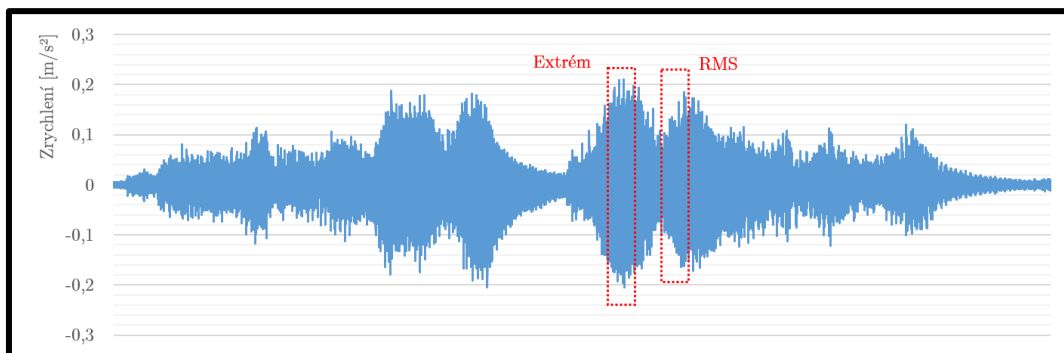


Obr. 44 Detail záznamu č. 14 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení

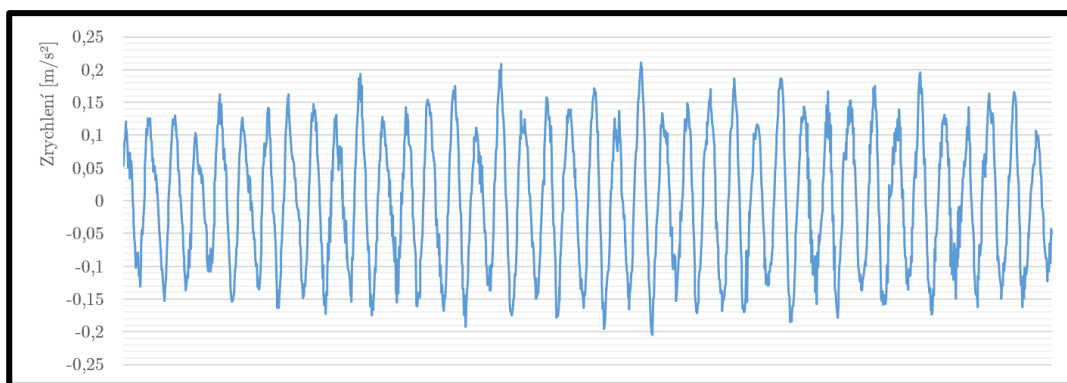


Obr. 45 Záznam č. 14 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve svislém směru)

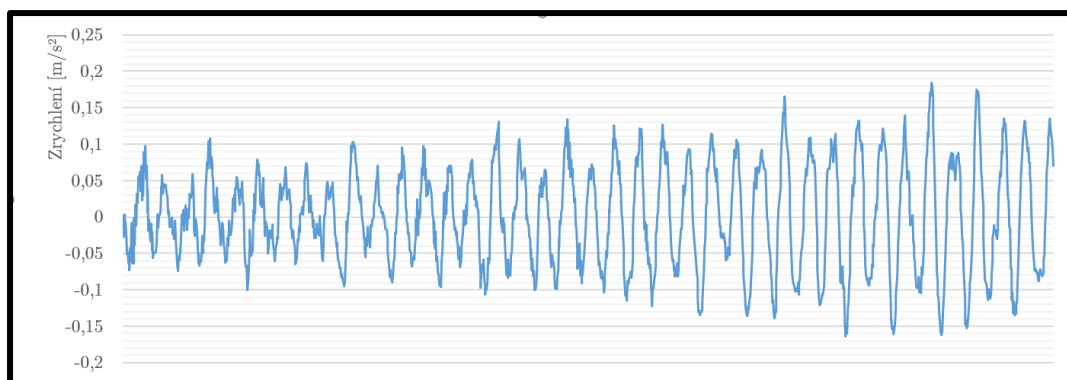
Ve vodorovném směru má extrém zrychlení hodnotu $0,21 \text{ m/s}^2$ a byl naměřen na snímači 61y. Maximální RMS hodnota zrychlení ve vodorovném směru je $0,10 \text{ m/s}^2$ a byla vyhodnocena na tomtéž snímači. Časový interval, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení, není totožný s intervalem, kde se nachází extrém zrychlení (viz obr. 46). Na obr. 49 je zobrazeno frekvenční složení signálu. Zde je vidět, že kromě krokové frekvence $2,31 \text{ Hz}$ se podařilo vybudit její dvojnásobek ($4,62 \text{ Hz}$), což je vlastní frekvence, trojnásobek ($6,92 \text{ Hz}$), čtyřnásobek ($9,24 \text{ Hz}$), ale také $1,5$ násobek ($3,47 \text{ Hz}$). Dále se podařilo vybudit frekvenci $5,83 \text{ Hz}$, což je přibližně vlastní frekvence. Maximální výkmit výchylky ve vodorovném směru byl $0,14 \text{ mm}$.



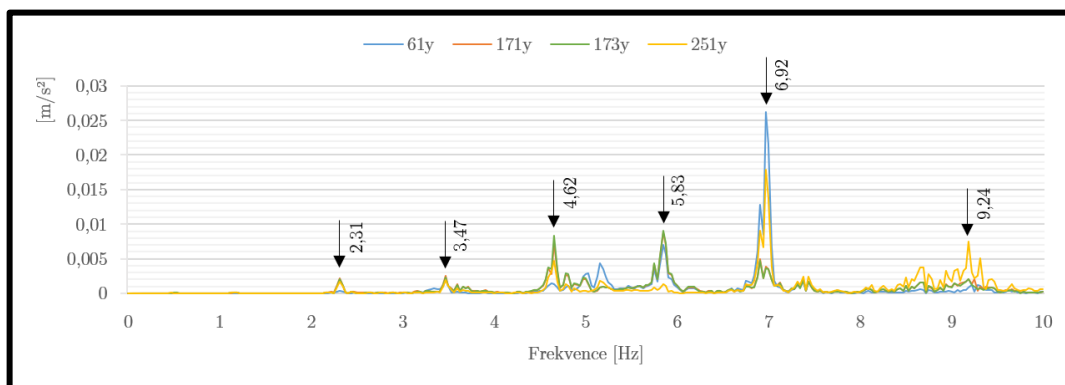
Obr. 46 Záznam č. 14, snímač 61y



Obr. 47 Detail záznamu č. 14 dlouhý 5 s, kde byl naměřen extrém zrychlení



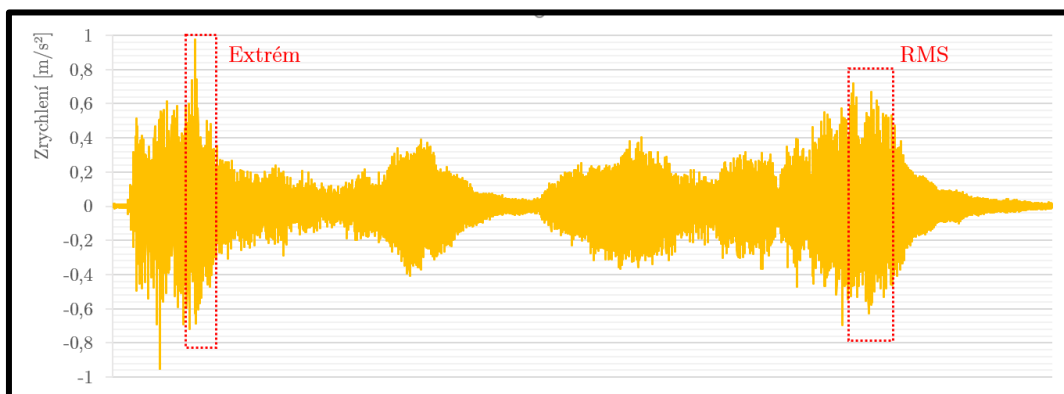
Obr. 48 Detail záznamu č. 14 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení



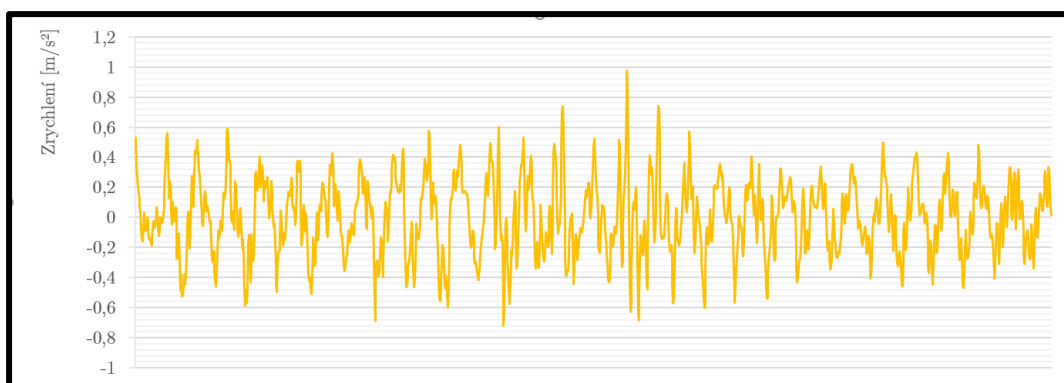
Obr. 49 Záznam č. 14 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve vodorovném směru)

Při druhém zatěžovacím stavu „2 chodci za sebou“ při budicí frekvenci 2,56 Hz na záznamu č. 18 má extrém zrychlení ve svislém směru hodnotu $0,97 \text{ m/s}^2$ a byl naměřen na snímači 251z. Maximální RMS hodnota zrychlení ve svislém směru je $0,27 \text{ m/s}^2$ a byla vyhodnocena na tomtéž snímači. Časový interval, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení, není totožný s intervalem, kde se

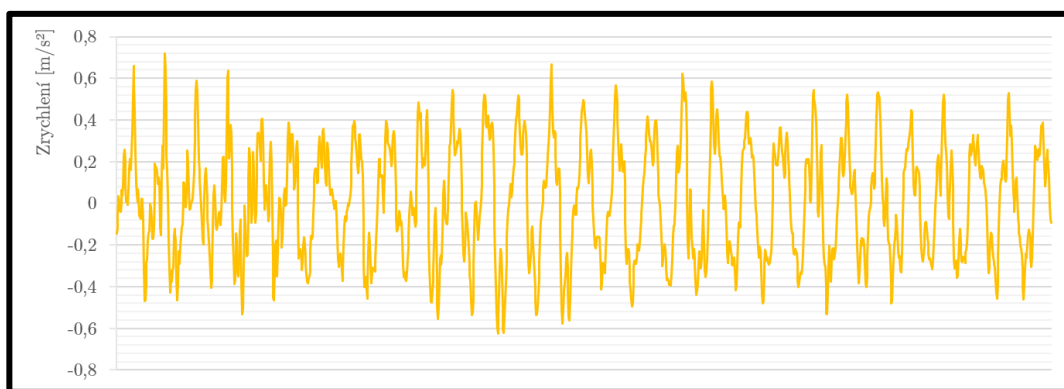
nachází extrém zrychlení (viz obr. 50). Na obr. 53 je zobrazeno frekvenční složení signálu. Zde je vidět, že kromě budicí frekvence 2,56 Hz se podařilo vybudit i její dvojnásobek 5,12 Hz, což je vlastní frekvence, a dále frekvenci 3,67 Hz, což je také vlastní frekvence. Maximální výkmit výchylky ve svislém směru byl 0,50 mm.



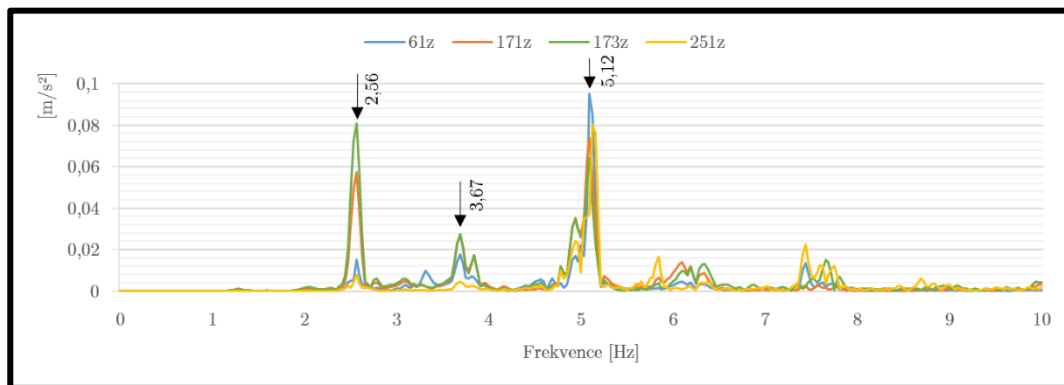
Obr. 50 Záznam č. 18, snímač 251z



Obr. 51 Detail záznamu č. 18 dlouhý 5 s, kde byl naměřen extrém zrychlení

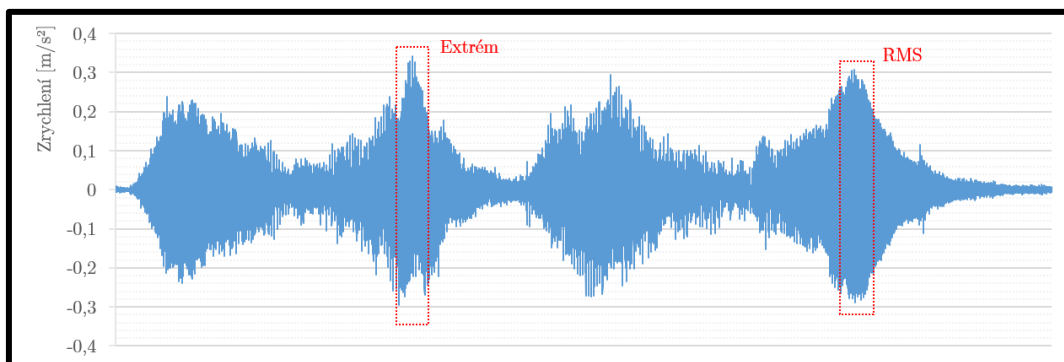


Obr. 52 Detail záznamu č. 18 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení

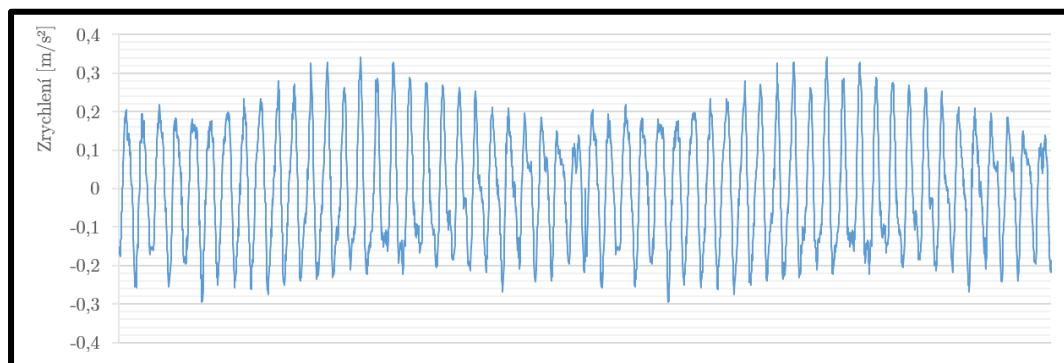


Obr. 53 Záznam č. 18 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve svislém směru)

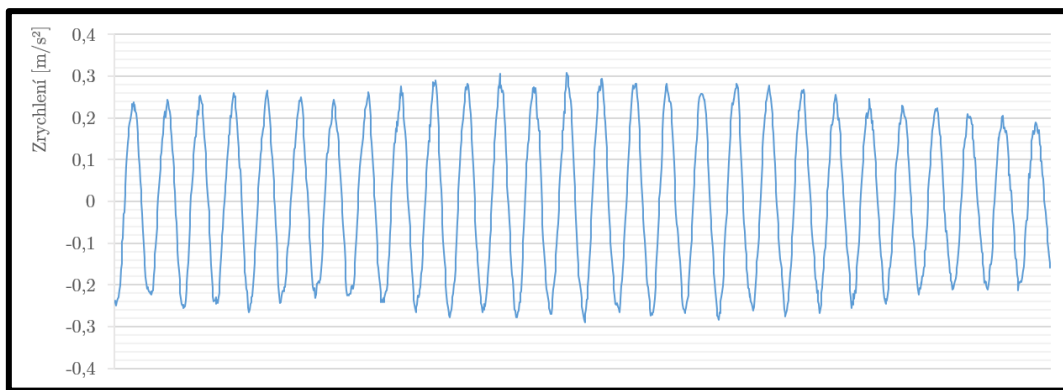
Ve vodorovném směru má extrém zrychlení hodnotu $0,34 \text{ m/s}^2$ a byl naměřen na snímači 61y. Maximální RMS hodnota zrychlení ve vodorovném směru je $0,18 \text{ m/s}^2$ a byla vyhodnocena na tomtéž snímači. Časový interval, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení, není totožný s intervalem, kde se nachází extrém zrychlení (viz obr. 54). Kromě budicí frekvence $2,56 \text{ Hz}$ se podařilo vybudit její dvojnásobek $5,12 \text{ Hz}$, což je vlastní frekvence, dále vlastní frekvenci $3,67 \text{ Hz}$ a vlastní frekvenci $7,43 \text{ Hz}$ (obr. 57). Maximální výkmit výchylky ve vodorovném směru byl $0,14 \text{ mm}$.



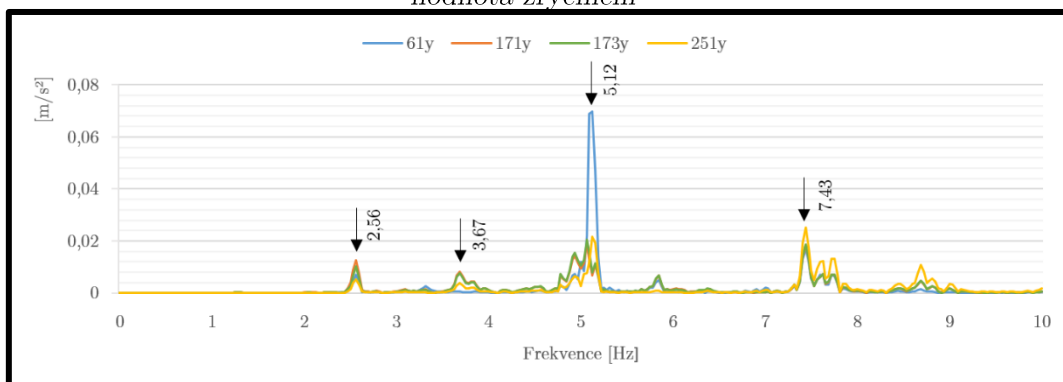
Obr. 54 Záznam č. 18, snímač 61y



Obr. 55 Detail záznamu č. 18 dlouhý 5 s, kde byl naměřen extrém zrychlení

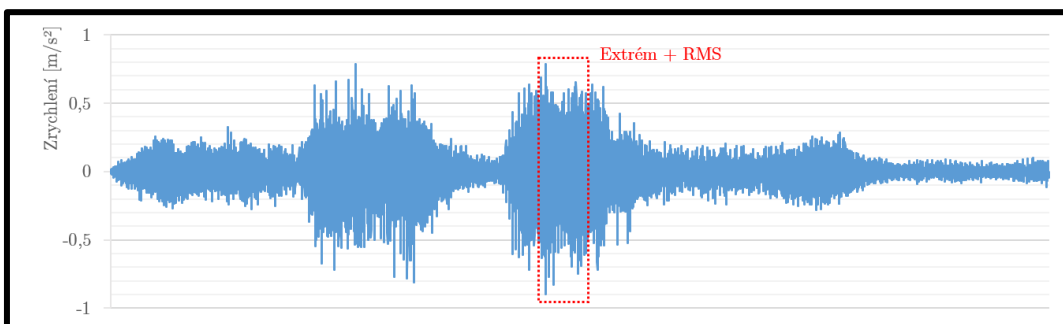


Obr. 56 Detail záznamu č. 18 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení

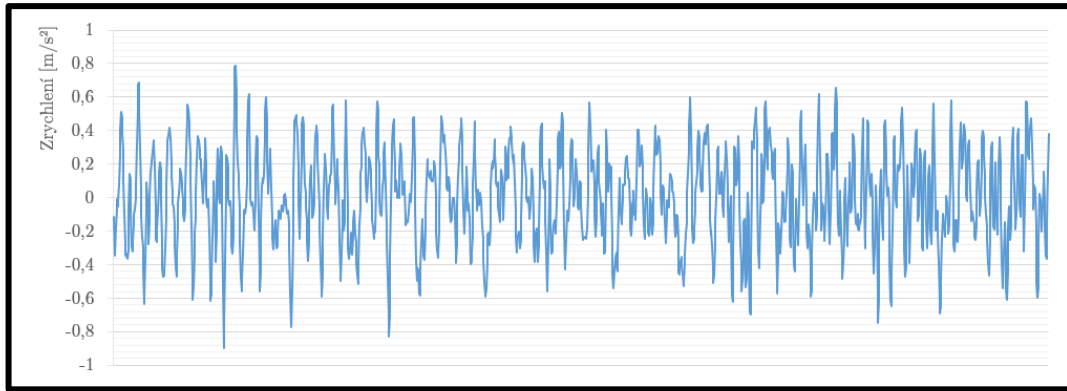


Obr. 57 Záznam č. 18 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve vodorovném směru)

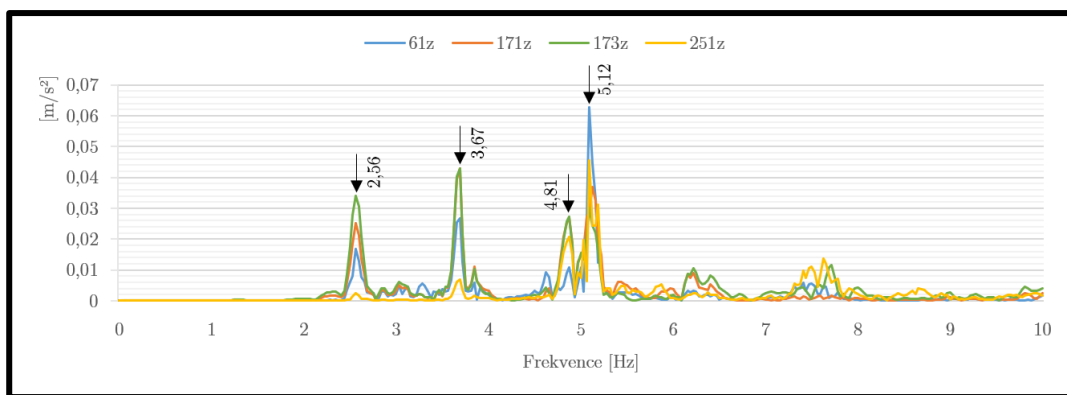
Ze všech záznamů zatěžovacího stavu „1 chodec“ byla extrémní hodnota zrychlení ve svislém směru zaznamenána při budicí frekvenci 2,56 Hz na záznamu č. 29. Extrém zrychlení má hodnotu $-0,90 \text{ m/s}^2$ a byl naměřen na snímači 61z. Maximální RMS hodnota zrychlení ve svislém směru je $0,28 \text{ m/s}^2$ a byla vyhodnocena na tomtéž snímači, a to v časovém intervalu, kde se nachází i extrém zrychlení. Kromě budicí frekvence 2,56 Hz se podařilo vybudit její dvojnásobek 5,12 Hz, což je vlastní frekvence, dále vlastní frekvence 3,67 Hz a 4,81 Hz (obr. 60). Maximální výkmit výchylky ve svislém směru byl 0,47 mm.



Obr. 58 Záznam č. 29, snímač 61z

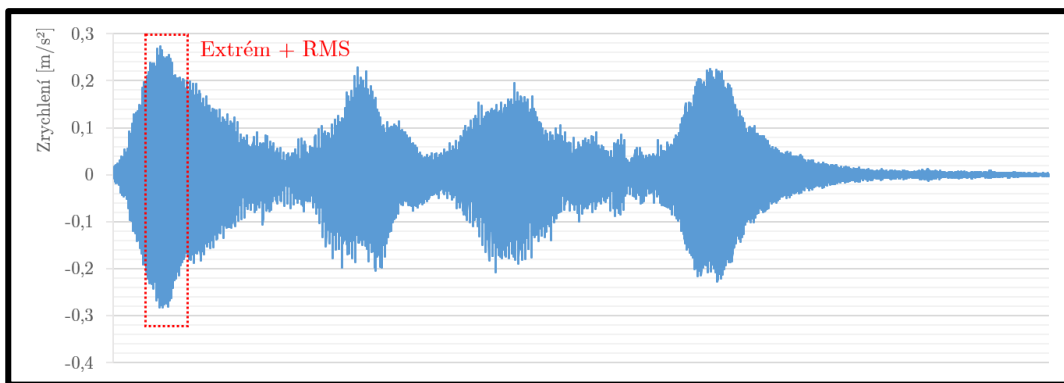


Obr. 59 Detail záznamu č. 29 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení

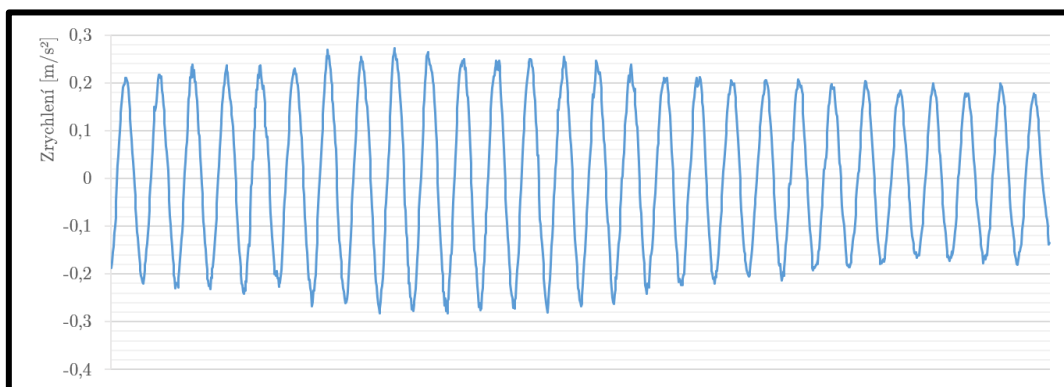


Obr. 60 Záznam č. 29 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve svislém směru)

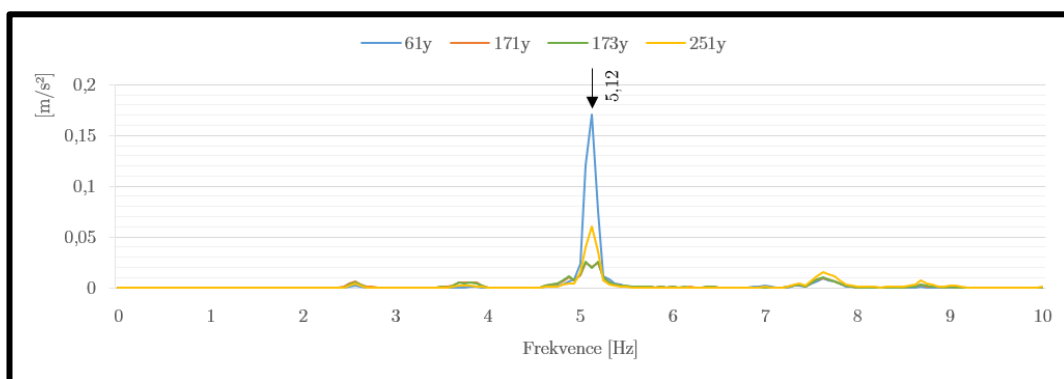
Ve vodorovném směru byla extrémní hodnota zrychlení ze všech záznamů zatěžovacího stavu „1 chodec“ zaznamenána při frekvenci 2,56 Hz na záznamu č. 28. Extrém zrychlení má hodnotu -0,28 m/s² a byl naměřen na snímači 61y. Maximální RMS hodnota zrychlení ve vodorovném směru je 0,16 m/s² a byla vyhodnocena na tomtéž snímači, a to v časovém intervalu, kde se nachází i extrém zrychlení. Podařilo se vybudit jedinou dominantní frekvenci 5,12 Hz, což je vlastní frekvence, a také dvojnásobek budící frekvence 2,56 Hz (obr. 63). Maximální výkmit výchylky ve svislém směru byl 0,26 mm.



Obr. 61 Záznam č. 28, snímač 61y

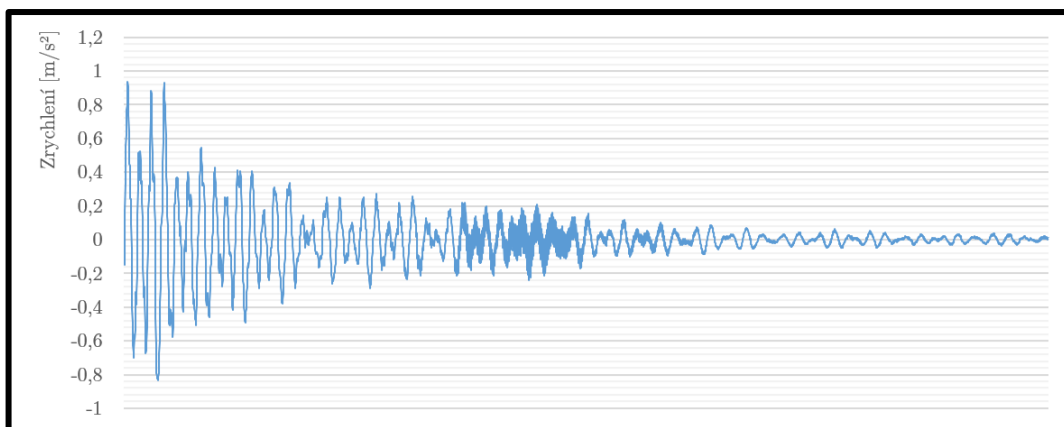


Obr. 62 Detail záznamu č. 28 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení

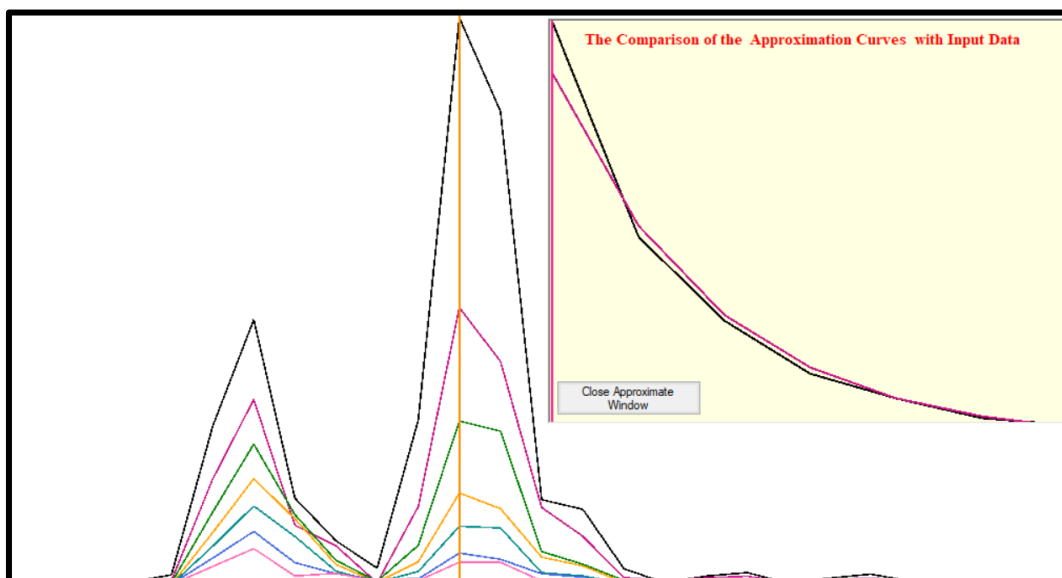


Obr. 63 Záznam č. 28 ve frekvenční oblasti (snímače zrychlení ve vodorovném směru)

Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ při budicí frekvenci 2,31 Hz na záznamu č. 35 byla naměřena extrémní hodnota zrychlení ve svislém směru - 1,62 m/s² na snímači 61z. Maximální RMS hodnota zrychlení ve svislém směru je 0,81 m/s² a byla vyhodnocena na tomtéž snímači, a to v časovém intervalu, kde se nachází i extrém zrychlení. Kromě budicí frekvence 2,31 Hz se podařilo vybudit také její dvojnásobek



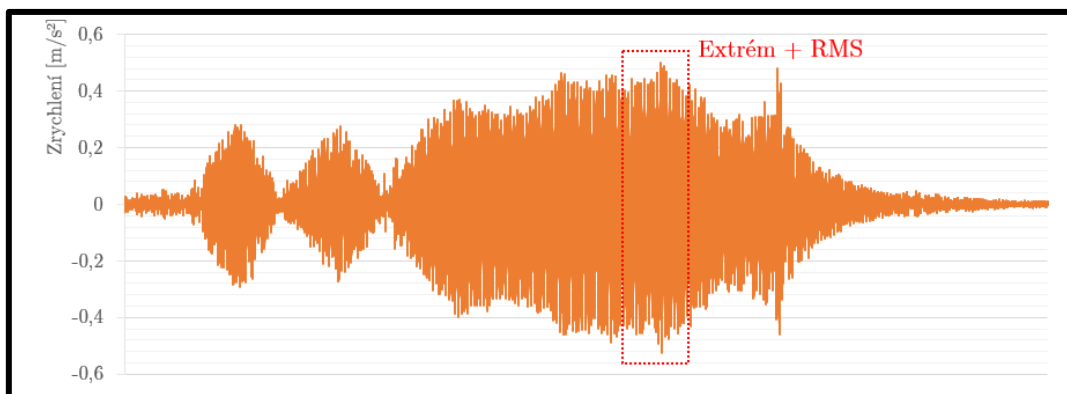
Obr. 67 Detail záznamu č. 35, tzv. dokmitání konstrukce, ze kterého byla vyhodnocena hodnota logaritmického dekrementu útlumu



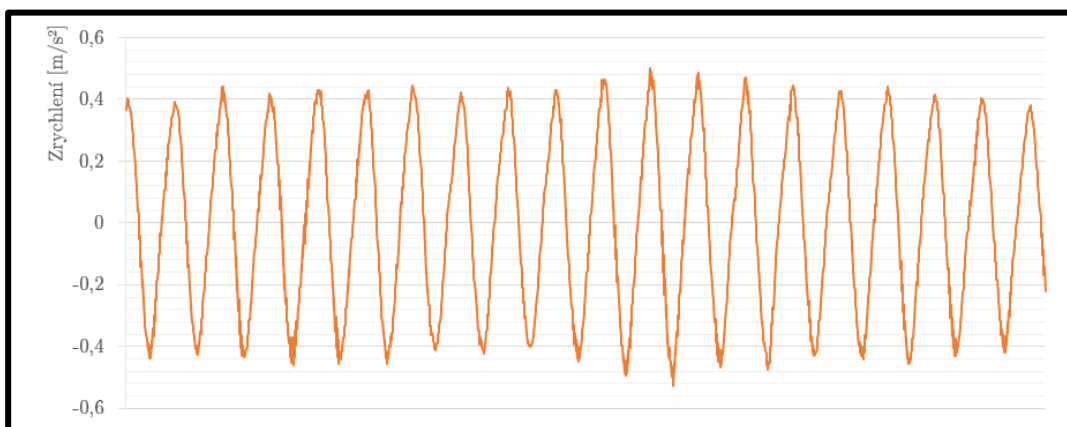
Obr. 68 FFT Multispectra včetně vyhodnocené obalové křivky dokmitání konstrukce

Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ při budicí frekvenci 1,83 Hz na záznamu č. 36 byla naměřena extrémní hodnota zrychlení ve vodorovném směru - 0,53 m/s² na snímači 171y. Maximální RMS hodnota zrychlení ve vodorovném směru je 0,29 m/s² a byla vyhodnocena na tomtéž snímači, a to v časovém intervalu, kde se nachází i extrém zrychlení. Podařilo se vybudit jedinou dominantní frekvenci 3,66 Hz (dvojnásobek budicí frekvence 1,83 Hz), což je vlastní frekvence, na jejíž vybudění byl vandalismus zaměřen (obr. 71). Maximální výkmit výchylky ve vodorovném směru byl 0,87 mm. Hodnota

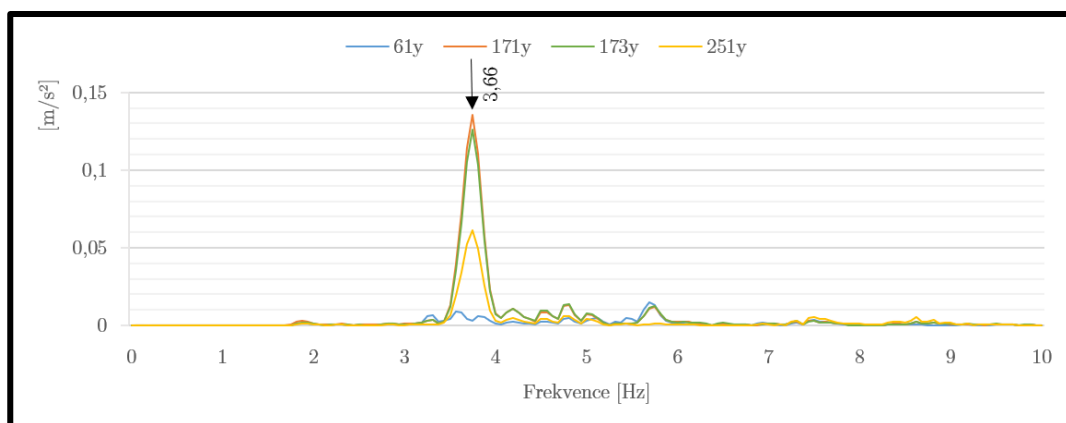
logaritmického dekrementu útlumu pro vlastní frekvenci 3,66 Hz byla vyhodnocena $\vartheta = 0,0455$, což po dosazení do (26) odpovídá $\xi = 0,72 \%$



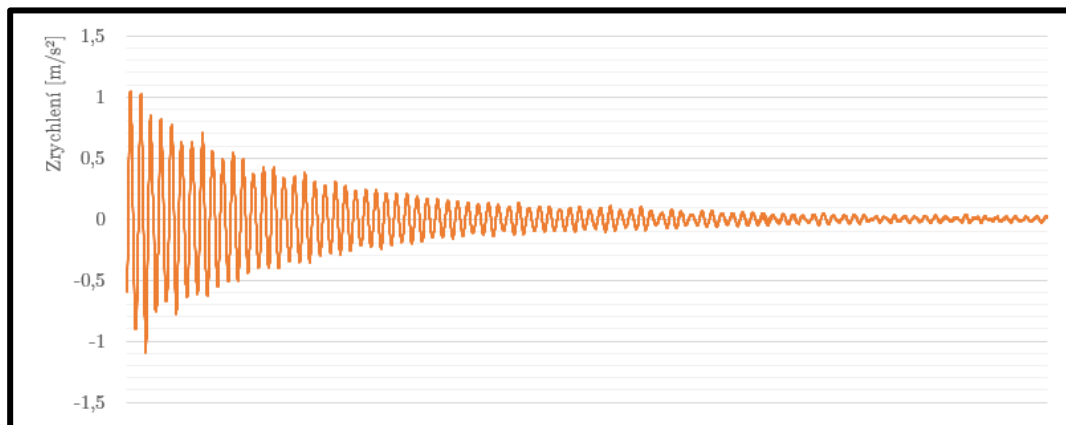
Obr. 69 Záznam č. 36, snímač 171y



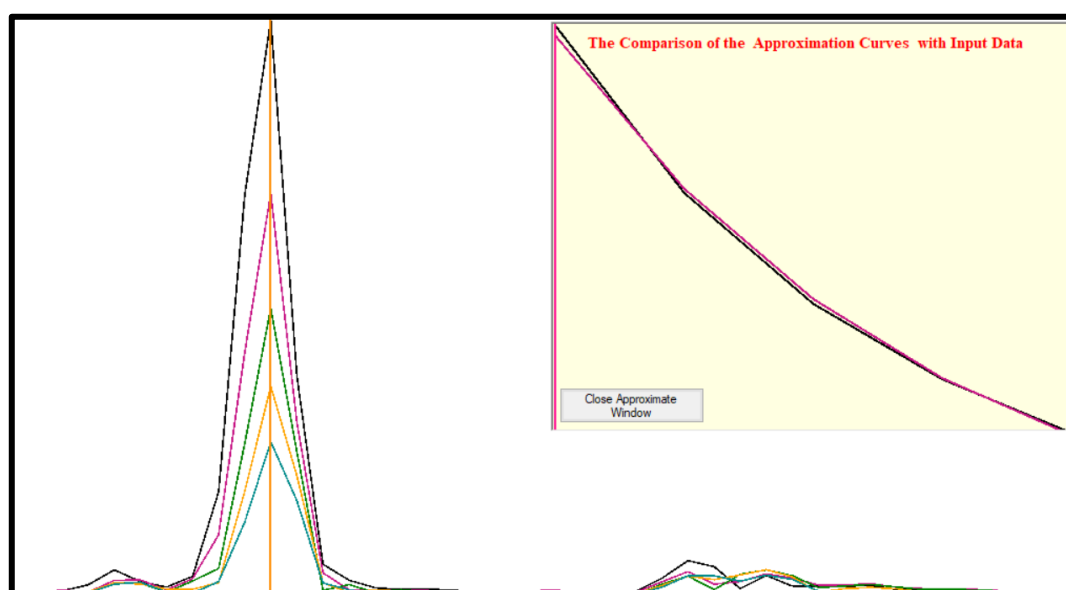
Obr. 70 Detail záznamu č. 36 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení



Obr. 71 Záznam č. 36 ve frekvenční oblasti (snímače ve vodorovném směru)

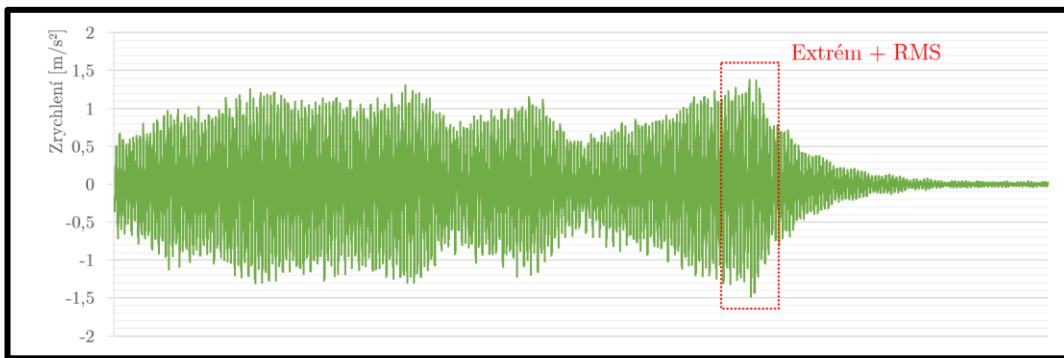


Obr. 72 Detail záznamu č. 36, tzv. dokmitání konstrukce, ze kterého byla vyhodnocena hodnota logaritmického dekrementu útlumu

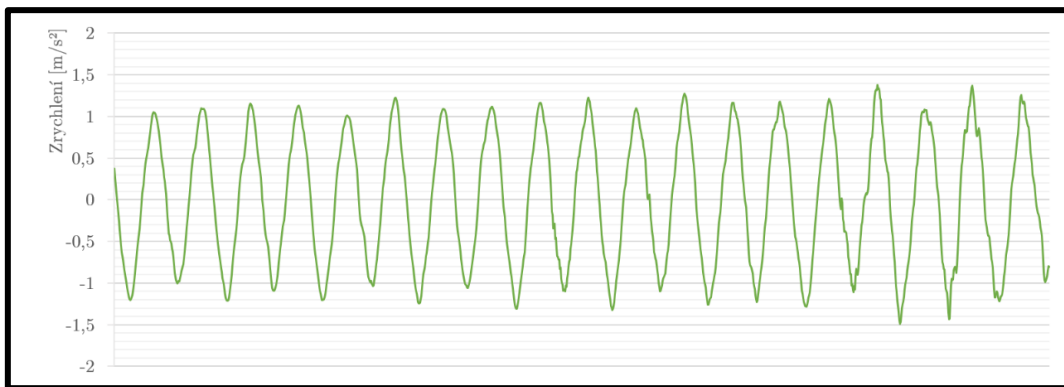


Obr. 73 FFT Multispectra včetně vyhodnocené obalové křivky dokmitání konstrukce

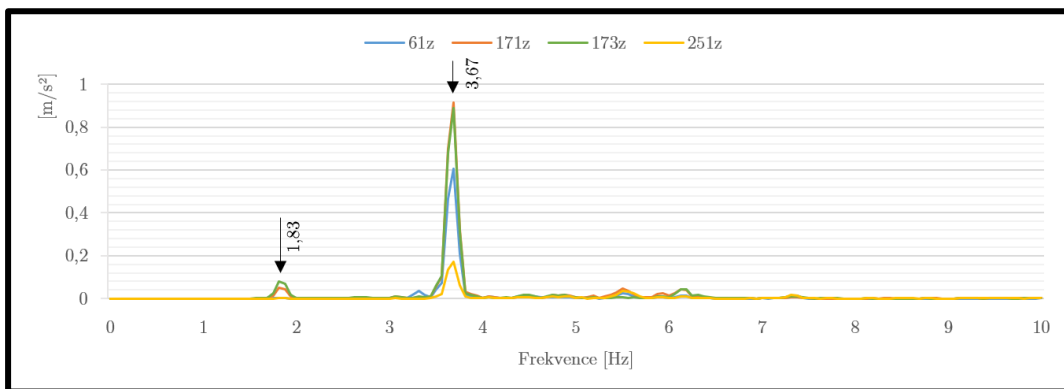
Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ při budicí frekvenci 1,83 Hz na záznamu č. 37 byla naměřena extrémní hodnota zrychlení ve svislém směru - 1,49 m/s² na snímači 173z. Maximální RMS hodnota zrychlení ve svislém směru je 0,79 m/s² a byla vyhodnocena na tomtéž snímači, a to v časovém intervalu, kde se nachází i extrém zrychlení. Kromě budicí frekvence 1,83 Hz se podařilo vybudit také její dvojnásobek 3,66 Hz, což je vlastní frekvence, na jejíž vybudení byl vandalismus zaměřen (obr. 76). Maximální výkmit výchylky ve svislém směru byl 2,96 mm, maximální rozkmit výchylky tedy byl 5,92 mm. Hodnota logaritmického dekrementu útlumu pro vlastní frekvenci 3,66 Hz byla vyhodnocena $\vartheta = 0,0633$, což po dosazení do (26) odpovídá $\xi = 1,01 \%$.



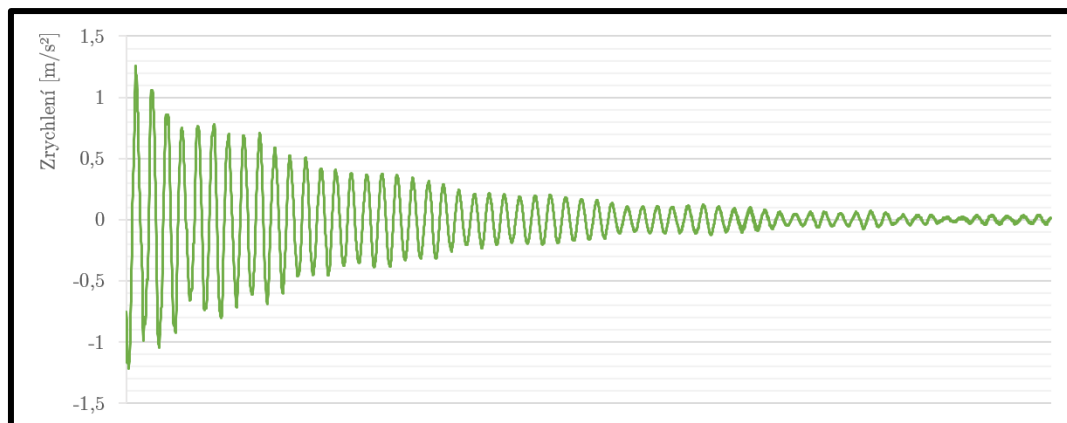
Obr. 74 Záznam č. 37, snímač 173z



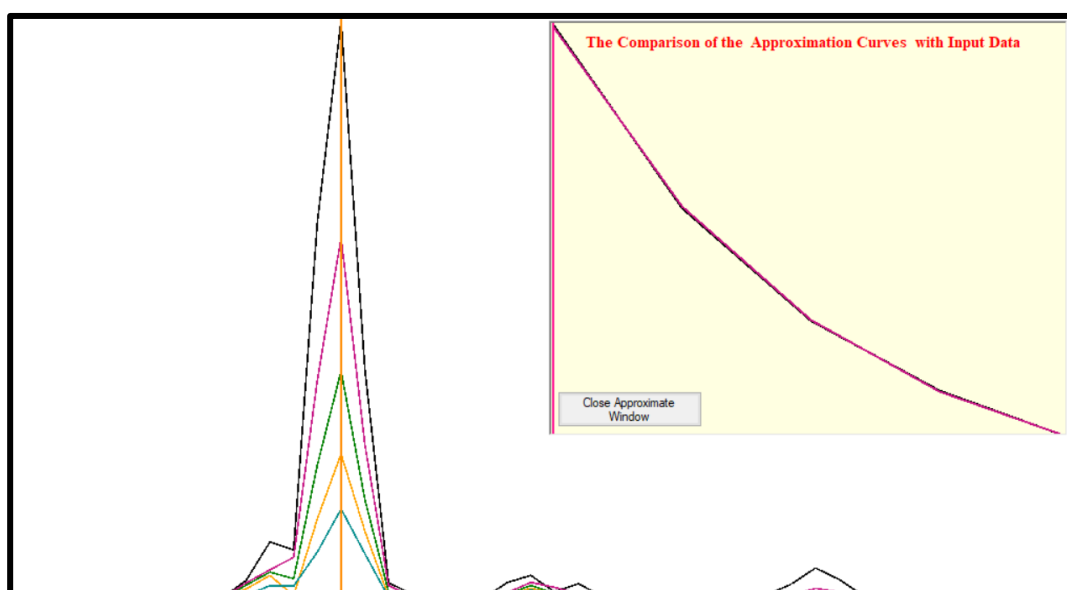
Obr. 75 Detail záznamu č. 37 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení



Obr. 76 Záznam č. 37 ve frekvenční oblasti (snímače ve svislém směru)

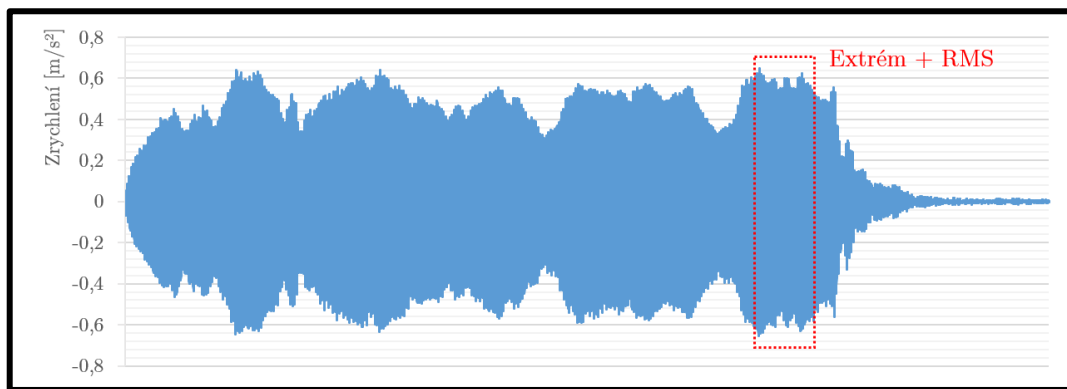


Obr. 77 Detail záznamu č. 37, tzv. dokmitání konstrukce, ze kterého byla vyhodnocena hodnota logaritmického dekrementu útlumu

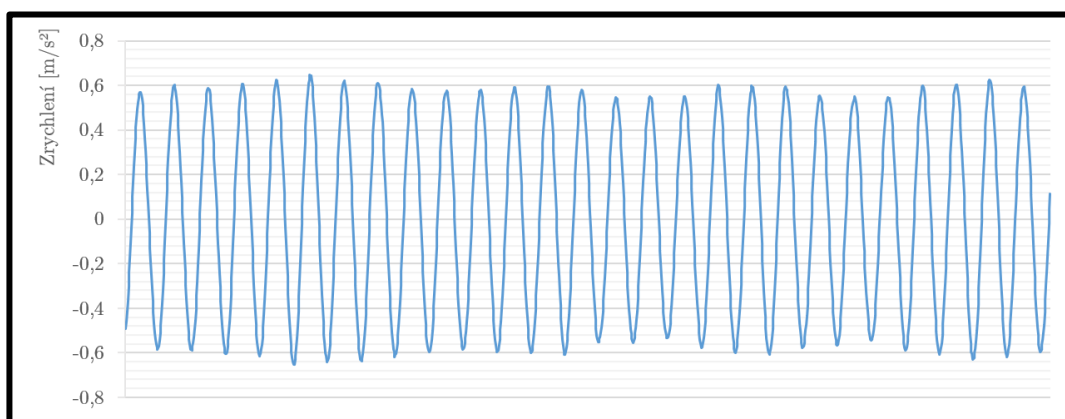


Obr. 78 FFT Multispectra včetně vyhodnocené obalové křivky dokmitání konstrukce

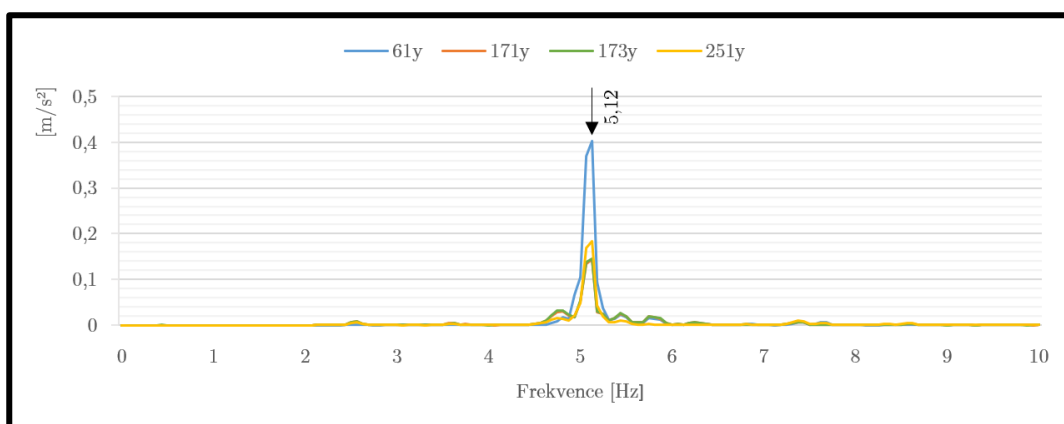
Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ při budicí frekvenci 2,56 Hz na záznamu č. 38 byla naměřena extrémní hodnota zrychlení ve vodorovném směru - 0,65 m/s² na snímači 61y. Maximální RMS hodnota zrychlení ve vodorovném směru je 0,42 m/s² a byla vyhodnocena na tomtéž snímači, a to v časovém intervalu, kde se nachází i extrém zrychlení. Podařilo se vybudit jedinou dominantní frekvenci 5,12 Hz (dvojnásobek budicí frekvence 2,56 Hz), což je vlastní frekvence, na jejíž vybudení byl vandalismus zaměřen (obr. 81). Maximální výkmit výchylky ve vodorovném směru byl 0,63 mm. Hodnota logaritmického dekrementu byla pro vlastní frekvenci 5,12 Hz vyhodnocena $\vartheta = 0,0642$, což po dosazení do (26) odpovídá $\xi = 1,02 \%$.



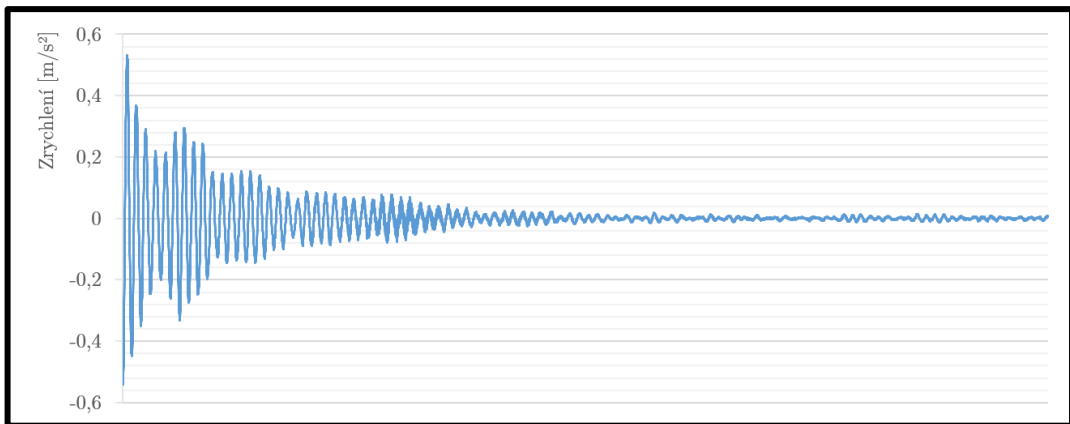
Obr. 79 Záznam č. 38, snímač 61y



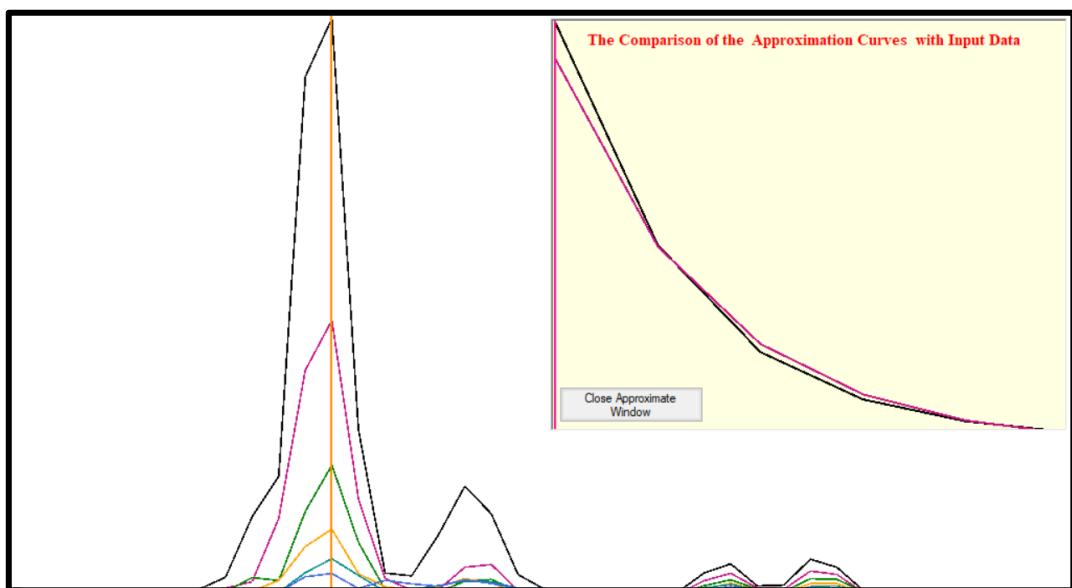
Obr. 80 Detail záznamu č. 38 dlouhý 5 s, ze kterého byla vyhodnocena maximální RMS hodnota zrychlení a kde byl naměřen extrém zrychlení



Obr. 81 Záznam č. 38 ve frekvenční oblasti (snímače ve vodorovném směru)



Obr. 82 Detail záznamu č. 38, tzv. dokmitání konstrukce, ze kterého byla vyhodnocena hodnota logaritmického dekrementu útlumu



Obr. 83 FFT Multispectra včetně vyhodnocené obalové křivky dokmitání konstrukce

5.7.4 Vyhodnocení nárůstu dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci podle počtu chodců

Jedním z cílů dynamického experimentu bylo ověření předpokladu, že odezva konstrukce na dynamické zatížení chodci narůstá podle \sqrt{n} , kde n je počet chodců [29]. Byly porovnávány RMS hodnoty zrychlení ze záznamů, kde kráčeli chodci ve dvojici a následně sami. RMS hodnoty zrychlení v následující tab. 15 jsou vypočteny podle

$$a_{n,RMS} = a_{RMS} \cdot \sqrt{n}, \quad (31)$$

po dosazení $n = 2$ platí

$$a_{2,RMS} = a_{RMS} \cdot \sqrt{2}. \quad (32)$$

Podle poznámek bylo určeno, který figurant při konkrétním záznamu kráčel na lávce. V poznámkách byl u některých záznamů nesoulad s popisem záznamů v počítači, byly tedy vyhodnoceny pouze záznamy, u kterých byl popis považován za správný. Figuranti jsou dále označeni podle následující tab. 14.

Tab. 14 Označení figurantů

Figurant č.	Jméno
1	Martin Mildner
2	Magdaléna Boháčová
3	Ing. Vladimír Šána, Ph.D.
4	prof. Ing. Michal Polák, CSc.

Následující tab. 15 je rozdělena na dvě části, které se nachází na následujících dvou stranách. V levém sloupci tab. 15 je budicí frekvence, kterou figuranti kráčeli (popř. běželi), označena jako f .

Tab. 15 Vyhodnocení nárůstu dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci podle počtu chodců

f [Hz]	Zatěžovací stav	RMS hodnoty zrychlení [m/s ²]								Průměrný poměr
		61z	171z	173z	251z	61y	171y	173y	251y	
1,63	Dvojice chodců 1+2	0,09	0,09	0,10	0,06	0,03	0,04	0,04	0,02	
	Chodec 1	0,06	0,05	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	
	Výpočet dle (32)	0,09	0,07	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	
	Poměr výpočet/skutečnost	97%	76%	80%	80%	97%	78%	78%	82%	83%
	Chodec 2	0,08	0,06	0,06	0,04	0,02	0,03	0,03	0,01	
	Výpočet dle (32)	0,11	0,08	0,08	0,06	0,03	0,04	0,04	0,02	
	Poměr výpočet/skutečnost	123%	89%	88%	100%	119%	85%	85%	89%	97%
1,63	Dvojice chodců 3+4	0,08	0,08	0,08	0,06	0,03	0,04	0,04	0,02	
	Chodec 3	0,13	0,08	0,08	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	
	Výpočet dle (32)	0,18	0,11	0,12	0,07	0,06	0,05	0,05	0,03	
	Poměr výpočet/skutečnost	213%	136%	140%	130%	221%	116%	116%	147%	152%
	Chodec 4	0,15	0,10	0,10	0,08	0,04	0,05	0,06	0,03	
	Výpočet dle (32)	0,22	0,14	0,15	0,12	0,06	0,07	0,08	0,04	
	Poměr výpočet/skutečnost	258%	173%	173%	211%	241%	188%	191%	193%	203%
1,63	Dvojice chodců 1+3	0,21	0,17	0,17	0,11	0,06	0,07	0,08	0,04	
	Chodec 1	0,06	0,05	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	
	Výpočet dle (32)	0,09	0,07	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	
	Poměr výpočet/skutečnost	41%	43%	45%	45%	41%	44%	44%	43%	43%
	Chodec 3	0,13	0,08	0,08	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	
	Výpočet dle (32)	0,18	0,11	0,12	0,07	0,06	0,05	0,05	0,03	
	Poměr výpočet/skutečnost	85%	68%	69%	65%	91%	61%	61%	71%	72%
1,83	Dvojice chodců 3+4	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	
	Chodec 3	0,11	0,17	0,17	0,11	0,02	0,05	0,05	0,03	
	Výpočet dle (32)	0,15	0,24	0,24	0,16	0,03	0,07	0,06	0,04	
	Poměr výpočet/skutečnost	318%	455%	465%	294%	141%	308%	300%	171%	306%
	Chodec 4	0,12	0,16	0,16	0,10	0,04	0,06	0,06	0,06	
	Výpočet dle (32)	0,16	0,23	0,23	0,14	0,05	0,08	0,08	0,08	
	Poměr výpočet/skutečnost	339%	436%	438%	265%	250%	370%	374%	304%	347%
1,83	Dvojice chodců 1+3	0,15	0,20	0,20	0,10	0,04	0,06	0,06	0,05	
	Chodec 1	0,05	0,07	0,07	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	
	Výpočet dle (32)	0,08	0,10	0,10	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	
	Poměr výpočet/skutečnost	51%	54%	53%	44%	70%	54%	57%	78%	58%
	Chodec 3	0,11	0,17	0,17	0,11	0,02	0,05	0,05	0,03	
	Výpočet dle (32)	0,15	0,24	0,24	0,16	0,03	0,07	0,06	0,04	
	Poměr výpočet/skutečnost	104%	122%	124%	158%	72%	113%	112%	89%	112%

f [Hz]	Zatěžovací stav	RMS hodnoty zrychlení [m/s ²]								Průměrný poměr
		61z	171z	173z	251z	61y	171y	173y	251y	
1,83	Dvojice chodců 2+4	0,10	0,14	0,14	0,10	0,03	0,04	0,04	0,04	
	Chodec 2	0,05	0,04	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	
	Výpočet dle (32)	0,07	0,06	0,06	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	
	Poměr výpočet/skutečnost	70%	43%	42%	47%	68%	50%	47%	74%	55%
	Chodec 4	0,12	0,16	0,16	0,10	0,04	0,06	0,06	0,06	
	Výpočet dle (32)	0,16	0,23	0,23	0,14	0,05	0,08	0,08	0,08	
	Poměr výpočet/skutečnost	158%	167%	165%	142%	164%	196%	198%	202%	174%
2,56	Dvojice chodců 1+2	0,12	0,10	0,12	0,13	0,07	0,03	0,02	0,03	
	Chodec 1	0,12	0,06	0,07	0,08	0,06	0,03	0,03	0,03	
	Výpočet dle (32)	0,18	0,09	0,10	0,12	0,08	0,04	0,04	0,05	
	Poměr výpočet/skutečnost	146%	91%	88%	92%	115%	143%	150%	158%	123%
	Chodec 2	0,11	0,08	0,09	0,08	0,04	0,02	0,02	0,02	
	Výpočet dle (32)	0,16	0,11	0,12	0,12	0,05	0,03	0,03	0,03	
	Poměr výpočet/skutečnost	133%	109%	106%	91%	78%	112%	113%	114%	107%
2,56	Dvojice chodců 3+4	0,26	0,21	0,23	0,27	0,18	0,07	0,07	0,08	
	Chodec 3	0,17	0,14	0,15	0,25	0,16	0,05	0,05	0,07	
	Výpočet dle (32)	0,24	0,20	0,21	0,36	0,23	0,08	0,08	0,10	
	Poměr výpočet/skutečnost	93%	95%	92%	132%	126%	111%	109%	124%	110%
	Chodec 4	0,28	0,19	0,20	0,22	0,12	0,05	0,05	0,06	
	Výpočet dle (32)	0,40	0,28	0,28	0,31	0,17	0,07	0,07	0,08	
	Poměr výpočet/skutečnost	150%	130%	124%	114%	92%	106%	99%	104%	115%

Pokud je průměrný poměr (průměr ze snímačů) v pravém sloupci tab. 15 menší než 100 %, pak byly naměřené RMS hodnoty od dvou chodců větší než RMS hodnoty vypočtené podle (32), popř. naopak, pokud je průměrný poměr větší než 100 %. Průměr všech průměrných poměrů v pravém sloupci tab. 15 je 134,9 %, což znamená, že výpočet udává průměrně větší hodnoty zrychlení, než ve skutečnosti byly naměřeny. To může být způsobeno např. nedostatečnou synchronizací obou chodců při chůzi ve dvojici.

5.7.5 Posouzení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci

Posouzení dynamické odezvy na dynamické zatížení chodci bylo provedeno podle norem, předpisů a doporučení, které byly podrobně popsány v této práci v kapitole 4.3. Posouzení se pro jednotlivé normy, předpisy a doporučení liší, každý z dokumentů má jiná kritéria pro komfort chodců. Kritériem jsou okamžité hodnoty zrychlení, RMS

hodnoty zrychlení, nebo vážené hodnoty zrychlení. Okamžité hodnoty zrychlení nejsou vždy pro vyhodnocení experimentu zcela optimální. Při experimentu může snadno dojít k situaci, kdy naměřený extrém zrychlení není způsoben výhradně odezvou konstrukce na zatížení chodci, ale může být způsoben např. náhlým poryvem větru či nechtěným pohybem závaží, na kterém jsou připevněny snímače.

Některé normy, předpisy a doporučení míří na navrhování konstrukcí, a to konkrétně [26], národní aplikační dokument normy [24], [1], [27]. Přesto budou zmíněné normy, předpisy a doporučení do posouzení zahrnuty, a to ze studijních důvodů.

Posouzení podle jednotlivých norem, předpisů a doporučení bude podrobněji popsáno v následujících kapitolách.

5.7.5.1 Posouzení podle ČSN 73 6209 Zatěžovací zkoušky mostních objektů [10]

Norma [10] stanovuje jako kritérium použitelnosti z hlediska účinků vibrací na lidský organismus váženou hodnotu zrychlení stanovenou nezávisle pro svislý a vodorovný směr s použitím váhové funkce W_m , která je definována v [30]. V normě [10] však není doporučen žádný časový interval, který se má použít při vyhodnocování RMS hodnoty zrychlení. Mezní hodnoty přípustných vážených efektivních hodnot zrychlení ve svislém a vodorovném směru uvedené v tab. 7 musí být podle [10] splněny při běžné úrovni dynamického zatížení, nevztahují se tedy na vandalismus. Přesto byl vandalismus ze studijních důvodů podle stanovených kritérií posouzen.

Kritéria použitelnosti jsou v této práci podrobněji zmíněna již v kapitole 4.3.2.2, ale pro lepší orientaci čtenáře v textu jsou zde kritéria znovu uvedena. Mezní hodnoty vážených RMS hodnot zrychlení jsou:

- $0,5 \text{ m/s}^2$ pro svislý směr kmitání,
- $0,14 \text{ m/s}^2$ pro vodorovný směr kmitání,
- $0,28 \text{ m/s}^2$ pro vodorovný směr kmitání při výjimečném zatížení davem lidí.

Označení vyhovujících a nevhovujících vážených RMS hodnot zrychlení bude provedeno podle následující tab. 16.

Tab. 16 Označení vyhovujících a nevhovujících vážených RMS hodnot zrychlení dle [10]

Svislý směr kmitání		Vodorovný směr kmitání	
Označení	Kritérium [m/s^2]	Označení	Kritérium [m/s^2]
$a_{w,RMS}$	<0,5	$a_{w,RMS}$	<0,14
$a_{w,RMS}$	>0,5	$a_{w,RMS}$	<0,28
		$a_{w,RMS}$	>0,28

Podle kritérií stanovených v [10] tedy lávka při běžné úrovni dynamického zatížení vyhověla, jak je patrné z tab. 17. Kritéria pro běžnou úroveň dynamického zatížení splňuje 100 % vyhodnocených vážených RMS hodnot ve svislém i vodorovném směru kmitání.

Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ splňuje kritérium pro svislý směr kmitání 84,4 % hodnot. Kritérium pro vodorovný směr kmitání splňuje 81,3 % hodnot, 100 % hodnot splňuje kritérium pro vodorovné kmitání při výjimečném zatížení davem lidí.

Tab. 17 Posouzení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci podle [10]

Záznam			Vážené efektivní hodnoty zrychlení [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	Svislý směr				Vodorovný směr			
			61z	171z	173z	251z	61y	171y	173y	251y
1	Běžný provoz		0,047	0,054	0,053	0,045	0,017	0,018	0,018	0,018
2	Běžný provoz		0,053	0,059	0,060	0,045	0,022	0,022	0,021	0,026
3	2 chodci	1,63	0,019	0,037	0,038	0,026	0,011	0,018	0,019	0,008
4	2 chodci	1,63	0,046	0,026	0,026	0,021	0,018	0,012	0,012	0,008
5	2 chodci	1,63	0,083	0,075	0,078	0,048	0,028	0,035	0,037	0,017
6	2 chodci	1,63	0,055	0,049	0,051	0,029	0,018	0,022	0,023	0,010
7	2 chodci	1,83	0,011	0,014	0,014	0,019	0,009	0,009	0,009	0,008
8	2 chodci	1,83	0,034	0,051	0,052	0,031	0,013	0,019	0,018	0,016
9	2 chodci	1,83	0,023	0,037	0,037	0,019	0,008	0,014	0,013	0,009
10	2 chodci	1,83	0,020	0,021	0,020	0,037	0,012	0,013	0,013	0,014
11	2 chodci	1,83	0,017	0,016	0,016	0,035	0,011	0,012	0,012	0,012
12	2 chodci	1,83	0,050	0,064	0,064	0,024	0,017	0,022	0,020	0,019
13	2 chodci	2,31	0,013	0,014	0,015	0,018	0,007	0,006	0,006	0,006
14	2 chodci	2,31	0,064	0,046	0,057	0,038	0,022	0,017	0,018	0,019
15	2 chodci	2,31	0,016	0,017	0,020	0,064	0,011	0,009	0,009	0,013
16	2 chodci	2,31	0,142	0,060	0,051	0,033	0,037	0,009	0,008	0,022
17	2 chodci	2,56	0,043	0,037	0,045	0,055	0,037	0,013	0,013	0,015
18	2 chodci	2,56	0,084	0,084	0,093	0,094	0,069	0,025	0,025	0,030
19	1 chodec	1,63	0,014	0,024	0,025	0,022	0,008	0,013	0,014	0,006
20	1 chodec	1,63	0,114	0,048	0,047	0,024	0,033	0,023	0,023	0,009
21	1 chodec	1,63	0,010	0,017	0,019	0,012	0,005	0,009	0,009	0,004
22	1 chodec	1,63	0,018	0,027	0,028	0,019	0,007	0,012	0,013	0,006
23	1 chodec	1,83	0,066	0,103	0,106	0,026	0,008	0,031	0,028	0,017
24	1 chodec	1,83	0,048	0,074	0,075	0,024	0,012	0,024	0,022	0,019
25	1 chodec	1,83	0,007	0,007	0,007	0,014	0,004	0,005	0,005	0,005
26	1 chodec	1,83	0,012	0,013	0,013	0,007	0,005	0,005	0,005	0,006
27	1 chodec	1,83	0,009	0,012	0,012	0,010	0,004	0,005	0,005	0,005
28	1 chodec	2,56	0,070	0,063	0,064	0,063	0,053	0,019	0,020	0,022
29	1 chodec	2,56	0,060	0,069	0,074	0,054	0,043	0,021	0,021	0,023
30	1 chodec	2,56	0,038	0,025	0,028	0,026	0,020	0,009	0,009	0,011
31	1 chodec	2,56	0,018	0,025	0,029	0,017	0,012	0,007	0,007	0,008
32	4 vandalové	1,63	0,571	0,236	0,242	0,061	0,183	0,121	0,115	0,036
33	4 vandalové	1,63	0,477	0,215	0,222	0,057	0,155	0,107	0,101	0,033
34	4 vandalové	2,31	0,577	0,228	0,240	0,053	0,080	0,029	0,035	0,019
35	4 vandalové	2,31	0,590	0,244	0,229	0,049	0,075	0,029	0,031	0,019
36	4 vandalové	1,83	0,178	0,265	0,254	0,061	0,020	0,092	0,085	0,043
37	4 vandalové	1,83	0,363	0,551	0,537	0,109	0,018	0,193	0,178	0,092
38	4 vandalové	2,56	0,273	0,088	0,078	0,345	0,272	0,093	0,095	0,121
39	4 vandalové	2,56	0,212	0,074	0,067	0,267	0,211	0,073	0,075	0,094

5.7.5.2 Posouzení podle ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí [26]

Norma [26] stanovuje kritéria pohody chodců prostřednictvím nejvýše přijatelných hodnot zrychlení libovolné části nosné konstrukce, které byly podrobněji zmíněny v kapitole 4.3.1.2, ale pro lepší orientaci čtenáře v textu jsou zde kritéria znovu uvedena.

Nejvýše přijatelné hodnoty zrychlení jsou:

- 0,7 m/s² pro svislý směr kmitání,
- 0,2 m/s² pro vodorovný směr kmitání,
- 0,4 m/s² pro vodorovný směr kmitání při výjimečném zatížení davem lidí.

Označení vyhovujících a nevyhovujících hodnot zrychlení bude podle následující tab. 18.

Tab. 18 Označení vyhovujících a nevyhovujících hodnot zrychlení dle [26]

Svislý směr kmitání		Vodorovný směr kmitání	
Označení	Kritérium [m/s ²]	Označení	Kritérium [m/s ²]
a	<0,7	a	<0,2
a	>0,7	a	<0,4
		a	>0,4

V první řadě je vhodné uvést, že norma [26] je určena pro navrhování konstrukcí a posuzování vypočteného dynamického zatížení, pro vyhodnocení dynamického experimentu tedy nemusí být zcela optimální. Při běžné úrovni dynamického zatížení splňuje kritérium pro svislý směr kmitání 94,4 % hodnot, kritérium pro vodorovný směr kmitání splňuje 94,8 % hodnot. Při běžné úrovni dynamického zatížení byl vyhodnocen maximální výkmit zrychlení ve svislém směru ze všech záznamů a snímačů 0,97 m/s², normou [26] daná limitní hodnota byla překročena o 0,27 m/s². Maximální vyhodnocený výkmit zrychlení ve vodorovném směru ze všech záznamů a snímačů při běžné úrovni dynamického zatížení byl 0,34 m/s², normou [26] daná limitní hodnota byla překročena o 0,14 m/s².

Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ splňuje kritérium pro svislý směr kmitání 59,4 % hodnot, kritérium pro vodorovný směr splňuje pouze 26,6 % hodnot, ale 81,3 % hodnot splňuje kritérium pro vodorovné vibrace od výjimečného zatížení davem lidí.

Tab. 19 Posouzení podle [26] pro svislé kmitání konstrukce

Záznam			Zrychlení naměřená na jednotlivých snímačích [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	61z		171z		173z		251z	
			max	min	max	min	max	min	max	min
1	Běžný provoz		0,56	-0,47	0,40	-0,44	0,59	-0,44	0,50	-0,54
2	Běžný provoz		0,51	-0,49	0,58	-0,45	0,51	-0,50	0,45	-0,44
3	2 chodci	1,63	0,19	-0,20	0,21	-0,21	0,26	-0,24	0,18	-0,16
4	2 chodci	1,63	0,19	-0,19	0,19	-0,18	0,18	-0,22	0,16	-0,19
5	2 chodci	1,63	0,47	-0,46	0,37	-0,38	0,42	-0,44	0,33	-0,32
6	2 chodci	1,63	0,35	-0,35	0,24	-0,23	0,26	-0,25	0,20	-0,21
7	2 chodci	1,83	0,16	-0,17	0,15	-0,17	0,17	-0,19	0,17	-0,18
8	2 chodci	1,83	0,41	-0,40	0,45	-0,44	0,52	-0,42	0,38	-0,30
9	2 chodci	1,83	0,29	-0,31	0,29	-0,32	0,30	-0,37	0,29	-0,28
10	2 chodci	1,83	0,29	-0,29	0,35	-0,38	0,37	-0,34	0,30	-0,29
11	2 chodci	1,83	0,29	-0,37	0,36	-0,34	0,40	-0,37	0,29	-0,28
12	2 chodci	1,83	0,35	-0,35	0,44	-0,47	0,47	-0,43	0,34	-0,31
13	2 chodci	2,31	0,28	-0,29	0,18	-0,28	0,24	-0,30	0,24	-0,24
14	2 chodci	2,31	0,89	-0,72	0,56	-0,68	0,71	-0,60	0,64	-0,62
15	2 chodci	2,31	0,62	-0,57	0,50	-0,48	0,45	-0,37	0,65	-0,62
16	2 chodci	2,31	0,69	-0,59	0,37	-0,38	0,46	-0,40	0,54	-0,54
17	2 chodci	2,56	0,38	-0,38	0,28	-0,31	0,38	-0,40	0,37	-0,43
18	2 chodci	2,56	0,79	-0,69	0,86	-0,74	0,87	-0,66	0,97	-0,95
19	1 chodec	1,63	0,28	-0,31	0,22	-0,23	0,28	-0,30	0,19	-0,18
20	1 chodec	1,63	0,36	-0,34	0,21	-0,34	0,23	-0,26	0,24	-0,18
21	1 chodec	1,63	0,13	-0,14	0,11	-0,10	0,15	-0,15	0,10	-0,09
22	1 chodec	1,63	0,16	-0,19	0,15	-0,15	0,16	-0,20	0,13	-0,13
23	1 chodec	1,83	0,23	-0,30	0,32	-0,35	0,33	-0,38	0,32	-0,36
24	1 chodec	1,83	0,28	-0,34	0,33	-0,36	0,37	-0,36	0,29	-0,29
25	1 chodec	1,83	0,14	-0,13	0,14	-0,14	0,13	-0,13	0,10	-0,11
26	1 chodec	1,83	0,07	-0,07	0,11	-0,11	0,11	-0,11	0,08	-0,06
27	1 chodec	1,83	0,15	-0,20	0,12	-0,12	0,14	-0,15	0,12	-0,14
28	1 chodec	2,56	0,51	-0,56	0,42	-0,44	0,45	-0,52	0,63	-0,86
29	1 chodec	2,56	0,79	-0,90	0,55	-0,69	0,67	-0,65	0,73	-0,81
30	1 chodec	2,56	0,36	-0,32	0,20	-0,17	0,21	-0,18	0,21	-0,23
31	1 chodec	2,56	0,32	-0,33	0,22	-0,26	0,28	-0,32	0,23	-0,33
32	4 vandalové	1,63	1,12	-1,14	0,58	-0,54	0,53	-0,57	0,20	-0,21
33	4 vandalové	1,63	1,14	-1,14	0,60	-0,55	0,56	-0,61	0,21	-0,21
34	4 vandalové	2,31	1,59	-1,63	0,66	-0,65	0,73	-0,66	0,38	-0,37
35	4 vandalové	2,31	1,42	-1,62	0,67	-0,64	0,69	-0,66	0,39	-0,42
36	4 vandalové	1,83	1,02	-0,97	1,33	-1,47	1,29	-1,35	0,43	-0,44
37	4 vandalové	1,83	0,93	-0,92	1,37	-1,37	1,37	-1,49	0,36	-0,40
38	4 vandalové	2,56	0,67	-0,71	0,40	-0,41	0,35	-0,35	1,14	-1,13
39	4 vandalové	2,56	0,65	-0,66	0,31	-0,30	0,29	-0,33	1,00	-1,10

Tab. 20 Posouzení podle [26] pro vodorovné kmitání konstrukce

Záznam			Zrychlení naměřená na jednotlivých snímačích [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	61y		171y		173y		251y	
			max	min	max	min	max	min	max	min
1	Běžný provoz		0,18	-0,17	0,17	-0,17	0,16	-0,16	0,20	-0,22
2	Běžný provoz		0,14	-0,14	0,16	-0,15	0,15	-0,14	0,20	-0,20
3	2 chodci	1,63	0,06	-0,06	0,11	-0,09	0,09	-0,09	0,05	-0,06
4	2 chodci	1,63	0,07	-0,06	0,08	-0,08	0,08	-0,08	0,06	-0,05
5	2 chodci	1,63	0,13	-0,15	0,15	-0,15	0,15	-0,15	0,12	-0,10
6	2 chodci	1,63	0,10	-0,10	0,09	-0,09	0,09	-0,08	0,05	-0,06
7	2 chodci	1,83	0,06	-0,05	0,07	-0,07	0,05	-0,05	0,06	-0,06
8	2 chodci	1,83	0,10	-0,10	0,14	-0,14	0,12	-0,13	0,12	-0,12
9	2 chodci	1,83	0,09	-0,08	0,11	-0,09	0,10	-0,09	0,09	-0,09
10	2 chodci	1,83	0,09	-0,08	0,13	-0,15	0,12	-0,14	0,13	-0,12
11	2 chodci	1,83	0,08	-0,08	0,10	-0,09	0,09	-0,08	0,08	-0,09
12	2 chodci	1,83	0,10	-0,09	0,13	-0,13	0,12	-0,12	0,11	-0,11
13	2 chodci	2,31	0,08	-0,10	0,07	-0,07	0,05	-0,06	0,07	-0,06
14	2 chodci	2,31	0,21	-0,21	0,13	-0,14	0,14	-0,13	0,18	-0,18
15	2 chodci	2,31	0,15	-0,13	0,10	-0,10	0,10	-0,10	0,12	-0,12
16	2 chodci	2,31	0,17	-0,15	0,10	-0,10	0,10	-0,09	0,13	-0,10
17	2 chodci	2,56	0,14	-0,13	0,10	-0,17	0,09	-0,12	0,11	-0,09
18	2 chodci	2,56	0,34	-0,30	0,17	-0,18	0,18	-0,16	0,18	-0,19
19	1 chodec	1,63	0,10	-0,11	0,09	-0,10	0,08	-0,08	0,06	-0,06
20	1 chodec	1,63	0,11	-0,09	0,22	-0,24	0,10	-0,11	0,10	-0,09
21	1 chodec	1,63	0,04	-0,05	0,05	-0,05	0,04	-0,05	0,03	-0,03
22	1 chodec	1,63	0,05	-0,05	0,05	-0,06	0,05	-0,05	0,04	-0,05
23	1 chodec	1,83	0,06	-0,05	0,10	-0,15	0,08	-0,09	0,08	-0,08
24	1 chodec	1,83	0,09	-0,09	0,14	-0,17	0,13	-0,13	0,14	-0,14
25	1 chodec	1,83	0,04	-0,04	0,05	-0,06	0,04	-0,05	0,05	-0,05
26	1 chodec	1,83	0,03	-0,02	0,04	-0,04	0,03	-0,03	0,05	-0,04
27	1 chodec	1,83	0,04	-0,06	0,09	-0,12	0,06	-0,04	0,11	-0,13
28	1 chodec	2,56	0,27	-0,28	0,12	-0,13	0,11	-0,13	0,17	-0,16
29	1 chodec	2,56	0,22	-0,25	0,14	-0,15	0,14	-0,14	0,17	-0,18
30	1 chodec	2,56	0,13	-0,12	0,08	-0,08	0,06	-0,06	0,07	-0,10
31	1 chodec	2,56	0,09	-0,10	0,06	-0,07	0,05	-0,06	0,08	-0,09
32	4 vandalové	1,63	0,39	-0,39	0,29	-0,27	0,27	-0,26	0,11	-0,10
33	4 vandalové	1,63	0,40	-0,39	0,29	-0,26	0,27	-0,25	0,11	-0,10
34	4 vandalové	2,31	0,32	-0,26	0,16	-0,18	0,17	-0,16	0,11	-0,14
35	4 vandalové	2,31	0,31	-0,31	0,21	-0,19	0,23	-0,21	0,15	-0,12
36	4 vandalové	1,83	0,11	-0,11	0,50	-0,53	0,46	-0,46	0,24	-0,27
37	4 vandalové	1,83	0,10	-0,11	0,46	-0,50	0,42	-0,44	0,25	-0,27
38	4 vandalové	2,56	0,65	-0,65	0,35	-0,28	0,35	-0,29	0,33	-0,31
39	4 vandalové	2,56	0,63	-0,66	0,34	-0,29	0,32	-0,29	0,35	-0,30

5.7.5.3 Posouzení podle NAD ČSN EN 1991-2 NA ed. A [24]

Komfort chodců je v národním aplikačním dokumentu normy [24] popsán pomocí třech úrovní pohodlí chodců – maximální, průměrná a minimální. Přesné hodnoty zrychlení, které přísluší daným úrovním pohodlí chodců, jsou podrobně popsány v této práci již v kapitole 4.3.1.1, ale pro lepší orientaci čtenáře v textu jsou zde kritéria znovu uvedena, a to i s příslušným barevným označením, které odpovídá následnému posouzení v tab. 22.

Tab. 21 Označení úrovní pohodlí chodců pro posouzení podle NAD normy [24]

Úroveň pohodlí chodců	Zrychlení ve svislém směru kmitání [m/s^2]	Zrychlení ve vodorovném směru kmitání [m/s^2]
Maximální	$\leq 0,5$	$\leq 0,1$
Průměrná	$\leq 0,7$	$\leq 0,2$
Minimální	$\leq 1,0$	$\leq 0,4$
Nevyhovující	$\geq 1,0$	$\geq 0,4$

Podle národního aplikačního dokumentu normy [24] by při návrhu lávky mělo být ověřeno, že vandalismus nezpůsobí poškození či kolaps konstrukce, jedná se tedy o ověření mezního stavu únosnosti, což není předmětem této práce. Přesto byl vandalismus ze studijních důvodů podle stanovených kritérií posouzen.

Lávka při běžné úrovni dynamického zatížení splnila úroveň pohodlí chodců „maximální“ ve svislém směru kmitání na 82,3 %, úroveň „průměrnou“ na 94,4 %, pouze 5,6 % hodnot odpovídá úrovni „minimální“. Ve vodorovném směru kmitání splnila lávka úroveň pohodlí chodců „maximální“ na 54,0 %, úroveň „průměrnou“ na 94,8 %, pouze 5,2 % hodnot odpovídá úrovni „minimální“.

Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ splnila lávka ve svislém směru kmitání úroveň pohodlí chodců „maximální“ na 31,3 %, úroveň „průměrnou“ na 59,4 %, úroveň „minimální“ na 68,8 % a 31,3 % hodnot je nevyhovujících. Ve vodorovném směru

kmitání splnila lávka úroveň pohodlí chodců „maximální“ na 3,1 %, úroveň „průměrnou“ na 26,6 %, úroveň „minimální“ na 81,3 % a 18,8 % hodnot je nevyhovujících.

Tab. 22 Posouzení podle NAD normy [24] pro svislé kmitání konstrukce

Záznam			Zrychlení naměřená na jednotlivých snímačích [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	61z		171z		173z		251z	
			max	min	max	min	max	min	max	min
1	Běžný provoz		0,56	-0,47	0,40	-0,44	0,59	-0,44	0,50	-0,54
2	Běžný provoz		0,51	-0,49	0,58	-0,45	0,51	-0,50	0,45	-0,44
3	2 chodci	1,63	0,19	-0,20	0,21	-0,21	0,26	-0,24	0,18	-0,16
4	2 chodci	1,63	0,19	-0,19	0,19	-0,18	0,18	-0,22	0,16	-0,19
5	2 chodci	1,63	0,47	-0,46	0,37	-0,38	0,42	-0,44	0,33	-0,32
6	2 chodci	1,63	0,35	-0,35	0,24	-0,23	0,26	-0,25	0,20	-0,21
7	2 chodci	1,83	0,16	-0,17	0,15	-0,17	0,17	-0,19	0,17	-0,18
8	2 chodci	1,83	0,41	-0,40	0,45	-0,44	0,52	-0,42	0,38	-0,30
9	2 chodci	1,83	0,29	-0,31	0,29	-0,32	0,30	-0,37	0,29	-0,28
10	2 chodci	1,83	0,29	-0,29	0,35	-0,38	0,37	-0,34	0,30	-0,29
11	2 chodci	1,83	0,29	-0,37	0,36	-0,34	0,40	-0,37	0,29	-0,28
12	2 chodci	1,83	0,35	-0,35	0,44	-0,47	0,47	-0,43	0,34	-0,31
13	2 chodci	2,31	0,28	-0,29	0,18	-0,28	0,24	-0,30	0,24	-0,24
14	2 chodci	2,31	0,89	-0,72	0,56	-0,68	0,71	-0,60	0,64	-0,62
15	2 chodci	2,31	0,62	-0,57	0,50	-0,48	0,45	-0,37	0,65	-0,62
16	2 chodci	2,31	0,69	-0,59	0,37	-0,38	0,46	-0,40	0,54	-0,54
17	2 chodci	2,56	0,38	-0,38	0,28	-0,31	0,38	-0,40	0,37	-0,43
18	2 chodci	2,56	0,79	-0,69	0,86	-0,74	0,87	-0,66	0,97	-0,95
19	1 chodec	1,63	0,28	-0,31	0,22	-0,23	0,28	-0,30	0,19	-0,18
20	1 chodec	1,63	0,36	-0,34	0,21	-0,34	0,23	-0,26	0,24	-0,18
21	1 chodec	1,63	0,13	-0,14	0,11	-0,10	0,15	-0,15	0,10	-0,09
22	1 chodec	1,63	0,16	-0,19	0,15	-0,15	0,16	-0,20	0,13	-0,13
23	1 chodec	1,83	0,23	-0,30	0,32	-0,35	0,33	-0,38	0,32	-0,36
24	1 chodec	1,83	0,28	-0,34	0,33	-0,36	0,37	-0,36	0,29	-0,29
25	1 chodec	1,83	0,14	-0,13	0,14	-0,14	0,13	-0,13	0,10	-0,11
26	1 chodec	1,83	0,07	-0,07	0,11	-0,11	0,11	-0,11	0,08	-0,06
27	1 chodec	1,83	0,15	-0,20	0,12	-0,12	0,14	-0,15	0,12	-0,14
28	1 chodec	2,56	0,51	-0,56	0,42	-0,44	0,45	-0,52	0,63	-0,86
29	1 chodec	2,56	0,79	-0,90	0,55	-0,69	0,67	-0,65	0,73	-0,81
30	1 chodec	2,56	0,36	-0,32	0,20	-0,17	0,21	-0,18	0,21	-0,23
31	1 chodec	2,56	0,32	-0,33	0,22	-0,26	0,28	-0,32	0,23	-0,33
32	4 vandalové	1,63	1,12	-1,14	0,58	-0,54	0,53	-0,57	0,20	-0,21
33	4 vandalové	1,63	1,14	-1,14	0,60	-0,55	0,56	-0,61	0,21	-0,21
34	4 vandalové	2,31	1,59	-1,63	0,66	-0,65	0,73	-0,66	0,38	-0,37
35	4 vandalové	2,31	1,42	-1,62	0,67	-0,64	0,69	-0,66	0,39	-0,42
36	4 vandalové	1,83	1,02	-0,97	1,33	-1,47	1,29	-1,35	0,43	-0,44
37	4 vandalové	1,83	0,93	-0,92	1,37	-1,37	1,37	-1,49	0,36	-0,40
38	4 vandalové	2,56	0,67	-0,71	0,40	-0,41	0,35	-0,35	1,14	-1,13
39	4 vandalové	2,56	0,65	-0,66	0,31	-0,30	0,29	-0,33	1,00	-1,10

Tab. 23 Posouzení podle NAD normy [24] pro vodorovné kmitání konstrukce

Záznam			Zrychlení naměřená na jednotlivých snímačích [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	61y		171y		173y		251y	
			max	min	max	min	max	min	max	min
1	Běžný provoz		0,18	-0,17	0,17	-0,17	0,16	-0,16	0,20	-0,22
2	Běžný provoz		0,14	-0,14	0,16	-0,15	0,15	-0,14	0,20	-0,20
3	2 chodci	1,63	0,06	-0,06	0,11	-0,09	0,09	-0,09	0,05	-0,06
4	2 chodci	1,63	0,07	-0,06	0,08	-0,08	0,08	-0,08	0,06	-0,05
5	2 chodci	1,63	0,13	-0,15	0,15	-0,15	0,15	-0,15	0,12	-0,10
6	2 chodci	1,63	0,10	-0,10	0,09	-0,09	0,09	-0,08	0,05	-0,06
7	2 chodci	1,83	0,06	-0,05	0,07	-0,07	0,05	-0,05	0,06	-0,06
8	2 chodci	1,83	0,10	-0,10	0,14	-0,14	0,12	-0,13	0,12	-0,12
9	2 chodci	1,83	0,09	-0,08	0,11	-0,09	0,10	-0,09	0,09	-0,09
10	2 chodci	1,83	0,09	-0,08	0,13	-0,15	0,12	-0,14	0,13	-0,12
11	2 chodci	1,83	0,08	-0,08	0,10	-0,09	0,09	-0,08	0,08	-0,09
12	2 chodci	1,83	0,10	-0,09	0,13	-0,13	0,12	-0,12	0,11	-0,11
13	2 chodci	2,31	0,08	-0,10	0,07	-0,07	0,05	-0,06	0,07	-0,06
14	2 chodci	2,31	0,21	-0,21	0,13	-0,14	0,14	-0,13	0,18	-0,18
15	2 chodci	2,31	0,15	-0,13	0,10	-0,10	0,10	-0,10	0,12	-0,12
16	2 chodci	2,31	0,17	-0,15	0,10	-0,10	0,10	-0,09	0,13	-0,10
17	2 chodci	2,56	0,14	-0,13	0,10	-0,17	0,09	-0,12	0,11	-0,09
18	2 chodci	2,56	0,34	-0,30	0,17	-0,18	0,18	-0,16	0,18	-0,19
19	1 chodec	1,63	0,10	-0,11	0,09	-0,10	0,08	-0,08	0,06	-0,06
20	1 chodec	1,63	0,11	-0,09	0,22	-0,24	0,10	-0,11	0,10	-0,09
21	1 chodec	1,63	0,04	-0,05	0,05	-0,05	0,04	-0,05	0,03	-0,03
22	1 chodec	1,63	0,05	-0,05	0,05	-0,06	0,05	-0,05	0,04	-0,05
23	1 chodec	1,83	0,06	-0,05	0,10	-0,15	0,08	-0,09	0,08	-0,08
24	1 chodec	1,83	0,09	-0,09	0,14	-0,17	0,13	-0,13	0,14	-0,14
25	1 chodec	1,83	0,04	-0,04	0,05	-0,06	0,04	-0,05	0,05	-0,05
26	1 chodec	1,83	0,03	-0,02	0,04	-0,04	0,03	-0,03	0,05	-0,04
27	1 chodec	1,83	0,04	-0,06	0,09	-0,12	0,06	-0,04	0,11	-0,13
28	1 chodec	2,56	0,27	-0,28	0,12	-0,13	0,11	-0,13	0,17	-0,16
29	1 chodec	2,56	0,22	-0,25	0,14	-0,15	0,14	-0,14	0,17	-0,18
30	1 chodec	2,56	0,13	-0,12	0,08	-0,08	0,06	-0,06	0,07	-0,10
31	1 chodec	2,56	0,09	-0,10	0,06	-0,07	0,05	-0,06	0,08	-0,09
32	4 vandalové	1,63	0,39	-0,39	0,29	-0,27	0,27	-0,26	0,11	-0,10
33	4 vandalové	1,63	0,40	-0,39	0,29	-0,26	0,27	-0,25	0,11	-0,10
34	4 vandalové	2,31	0,32	-0,26	0,16	-0,18	0,17	-0,16	0,11	-0,14
35	4 vandalové	2,31	0,31	-0,31	0,21	-0,19	0,23	-0,21	0,15	-0,12
36	4 vandalové	1,83	0,11	-0,11	0,50	-0,53	0,46	-0,46	0,24	-0,27
37	4 vandalové	1,83	0,10	-0,11	0,46	-0,50	0,42	-0,44	0,25	-0,27
38	4 vandalové	2,56	0,65	-0,65	0,35	-0,28	0,35	-0,29	0,33	-0,31
39	4 vandalové	2,56	0,63	-0,66	0,34	-0,29	0,32	-0,29	0,35	-0,30

5.7.5.4 Posouzení podle Sétra: Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading [1]

V [1] je uvedeno, že posouzení provede vlastník objektu, a to podle požadavků na úroveň pohodlí chodců. V případě výjimečných zatěžovacích stavů (vandalismus) by neměly být dynamické účinky příliš nepříjemné. V [1] jsou definovány tři úrovně pohodlí chodců – maximální, průměrná a minimální, jak bylo podrobně popsáno již v kapitole 4.3.1.3, ale pro lepší orientaci čtenáře v textu jsou zde kritéria uvedena znovu, a to i s příslušným barevným označením, které odpovídá následnému posouzení, tučně jsou označeny hodnoty zrychlení, které nesplňují limit pro vznik tzv. „lock-in“ efektu.

Tab. 24 Označení úrovní pohodlí chodců pro posouzení podle [1]

Úroveň pohodlí chodců	Zrychlení ve svislém směru kmitání [m/s ²]	Zrychlení ve vodorovném směru kmitání [m/s ²]
Maximální	≤0,5	≤0,15
Průměrná	≤1,0	≤0,3
Minimální	≤2,5	≤0,8
Nepříjemná	≥2,5	≥0,8

Při běžné úrovni dynamického zatížení lávka splnila úroveň pohodlí chodců „maximální“ ve svislém směru kmitání na 82,3 %, úroveň „průměrnou“ na 100 %. Ve vodorovném směru kmitání splnila lávka úroveň pohodlí chodců „maximální“ na 83,9 %, úroveň „průměrnou“ na 99,6 %, to znamená, že pouze 0,4 % hodnot (1 naměřená hodnota) odpovídá úrovni „minimální“. Ve vodorovném směru kmitání byla při běžné úrovni dynamického zatížení limitní hodnota pro vznik „lock-in“ efektu překročena u 46,4 % naměřených hodnot zrychlení.

Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ lávka splnila úroveň pohodlí chodců „maximální“ ve svislém směru kmitání na 31,3 %, úroveň „průměrnou“ na 68,8 %, 31,3 % naměřených hodnot odpovídá úrovni „minimální“ a žádná naměřená hodnota nespadá

mimo interval snesitelné úrovně vibrací. Ve vodorovném směru kmitání splnila lávka úroveň pohodlí chodců „maximální“ na 18,8 %, úroveň „průměrnou“ na 57,8 %, 42,2 % naměřených hodnot odpovídá úrovni „minimální“ a žádná naměřená hodnota nespadá mimo interval snesitelné úrovně vibrací. Ve vodorovném směru kmitání byla při zatěžovacím stavu „vandalismus“ limitní hodnota pro vznik „lock-in“ efektu překročena u 96,9 % naměřených hodnot zrychlení.

Tab. 25 Posouzení podle [1] pro svislé kmitání konstrukce

Záznam			Zrychlení naměřená na jednotlivých snímačích [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	61z		171z		173z		251z	
			max	min	max	min	max	min	max	min
1	Běžný provoz		0,56	-0,47	0,40	-0,44	0,59	-0,44	0,50	-0,54
2	Běžný provoz		0,51	-0,49	0,58	-0,45	0,51	-0,50	0,45	-0,44
3	2 chodci	1,63	0,19	-0,20	0,21	-0,21	0,26	-0,24	0,18	-0,16
4	2 chodci	1,63	0,19	-0,19	0,19	-0,18	0,18	-0,22	0,16	-0,19
5	2 chodci	1,63	0,47	-0,46	0,37	-0,38	0,42	-0,44	0,33	-0,32
6	2 chodci	1,63	0,35	-0,35	0,24	-0,23	0,26	-0,25	0,20	-0,21
7	2 chodci	1,83	0,16	-0,17	0,15	-0,17	0,17	-0,19	0,17	-0,18
8	2 chodci	1,83	0,41	-0,40	0,45	-0,44	0,52	-0,42	0,38	-0,30
9	2 chodci	1,83	0,29	-0,31	0,29	-0,32	0,30	-0,37	0,29	-0,28
10	2 chodci	1,83	0,29	-0,29	0,35	-0,38	0,37	-0,34	0,30	-0,29
11	2 chodci	1,83	0,29	-0,37	0,36	-0,34	0,40	-0,37	0,29	-0,28
12	2 chodci	1,83	0,35	-0,35	0,44	-0,47	0,47	-0,43	0,34	-0,31
13	2 chodci	2,31	0,28	-0,29	0,18	-0,28	0,24	-0,30	0,24	-0,24
14	2 chodci	2,31	0,89	-0,72	0,56	-0,68	0,71	-0,60	0,64	-0,62
15	2 chodci	2,31	0,62	-0,57	0,50	-0,48	0,45	-0,37	0,65	-0,62
16	2 chodci	2,31	0,69	-0,59	0,37	-0,38	0,46	-0,40	0,54	-0,54
17	2 chodci	2,56	0,38	-0,38	0,28	-0,31	0,38	-0,40	0,37	-0,43
18	2 chodci	2,56	0,79	-0,69	0,86	-0,74	0,87	-0,66	0,97	-0,95
19	1 chodec	1,63	0,28	-0,31	0,22	-0,23	0,28	-0,30	0,19	-0,18
20	1 chodec	1,63	0,36	-0,34	0,21	-0,34	0,23	-0,26	0,24	-0,18
21	1 chodec	1,63	0,13	-0,14	0,11	-0,10	0,15	-0,15	0,10	-0,09
22	1 chodec	1,63	0,16	-0,19	0,15	-0,15	0,16	-0,20	0,13	-0,13
23	1 chodec	1,83	0,23	-0,30	0,32	-0,35	0,33	-0,38	0,32	-0,36
24	1 chodec	1,83	0,28	-0,34	0,33	-0,36	0,37	-0,36	0,29	-0,29
25	1 chodec	1,83	0,14	-0,13	0,14	-0,14	0,13	-0,13	0,10	-0,11
26	1 chodec	1,83	0,07	-0,07	0,11	-0,11	0,11	-0,11	0,08	-0,06
27	1 chodec	1,83	0,15	-0,20	0,12	-0,12	0,14	-0,15	0,12	-0,14
28	1 chodec	2,56	0,51	-0,56	0,42	-0,44	0,45	-0,52	0,63	-0,86
29	1 chodec	2,56	0,79	-0,90	0,55	-0,69	0,67	-0,65	0,73	-0,81
30	1 chodec	2,56	0,36	-0,32	0,20	-0,17	0,21	-0,18	0,21	-0,23
31	1 chodec	2,56	0,32	-0,33	0,22	-0,26	0,28	-0,32	0,23	-0,33
32	4 vandalové	1,63	1,12	-1,14	0,58	-0,54	0,53	-0,57	0,20	-0,21
33	4 vandalové	1,63	1,14	-1,14	0,60	-0,55	0,56	-0,61	0,21	-0,21
34	4 vandalové	2,31	1,59	-1,63	0,66	-0,65	0,73	-0,66	0,38	-0,37
35	4 vandalové	2,31	1,42	-1,62	0,67	-0,64	0,69	-0,66	0,39	-0,42
36	4 vandalové	1,83	1,02	-0,97	1,33	-1,47	1,29	-1,35	0,43	-0,44
37	4 vandalové	1,83	0,93	-0,92	1,37	-1,37	1,37	-1,49	0,36	-0,40
38	4 vandalové	2,56	0,67	-0,71	0,40	-0,41	0,35	-0,35	1,14	-1,13
39	4 vandalové	2,56	0,65	-0,66	0,31	-0,30	0,29	-0,33	1,00	-1,10

Tab. 26 Posouzení podle [1] pro vodorovné kmitání konstrukce

Záznam			Zrychlení naměřená na jednotlivých snímačích [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	61y		171y		173y		251y	
			max	min	max	min	max	min	max	min
1	Běžný provoz		0,18	-0,17	0,17	-0,17	0,16	-0,16	0,20	-0,22
2	Běžný provoz		0,14	-0,14	0,16	-0,15	0,15	-0,14	0,20	-0,20
3	2 chodci	1,63	0,06	-0,06	0,11	-0,09	0,09	-0,09	0,05	-0,06
4	2 chodci	1,63	0,07	-0,06	0,08	-0,08	0,08	-0,08	0,06	-0,05
5	2 chodci	1,63	0,13	-0,15	0,15	-0,15	0,15	-0,15	0,12	-0,10
6	2 chodci	1,63	0,10	-0,10	0,09	-0,09	0,09	-0,08	0,05	-0,06
7	2 chodci	1,83	0,06	-0,05	0,07	-0,07	0,05	-0,05	0,06	-0,06
8	2 chodci	1,83	0,10	-0,10	0,14	-0,14	0,12	-0,13	0,12	-0,12
9	2 chodci	1,83	0,09	-0,08	0,11	-0,09	0,10	-0,09	0,09	-0,09
10	2 chodci	1,83	0,09	-0,08	0,13	-0,15	0,12	-0,14	0,13	-0,12
11	2 chodci	1,83	0,08	-0,08	0,10	-0,09	0,09	-0,08	0,08	-0,09
12	2 chodci	1,83	0,10	-0,09	0,13	-0,13	0,12	-0,12	0,11	-0,11
13	2 chodci	2,31	0,08	-0,10	0,07	-0,07	0,05	-0,06	0,07	-0,06
14	2 chodci	2,31	0,21	-0,21	0,13	-0,14	0,14	-0,13	0,18	-0,18
15	2 chodci	2,31	0,15	-0,13	0,10	-0,10	0,10	-0,10	0,12	-0,12
16	2 chodci	2,31	0,17	-0,15	0,10	-0,10	0,10	-0,09	0,13	-0,10
17	2 chodci	2,56	0,14	-0,13	0,10	-0,17	0,09	-0,12	0,11	-0,09
18	2 chodci	2,56	0,34	-0,30	0,17	-0,18	0,18	-0,16	0,18	-0,19
19	1 chodec	1,63	0,10	-0,11	0,09	-0,10	0,08	-0,08	0,06	-0,06
20	1 chodec	1,63	0,11	-0,09	0,22	-0,24	0,10	-0,11	0,10	-0,09
21	1 chodec	1,63	0,04	-0,05	0,05	-0,05	0,04	-0,05	0,03	-0,03
22	1 chodec	1,63	0,05	-0,05	0,05	-0,06	0,05	-0,05	0,04	-0,05
23	1 chodec	1,83	0,06	-0,05	0,10	-0,15	0,08	-0,09	0,08	-0,08
24	1 chodec	1,83	0,09	-0,09	0,14	-0,17	0,13	-0,13	0,14	-0,14
25	1 chodec	1,83	0,04	-0,04	0,05	-0,06	0,04	-0,05	0,05	-0,05
26	1 chodec	1,83	0,03	-0,02	0,04	-0,04	0,03	-0,03	0,05	-0,04
27	1 chodec	1,83	0,04	-0,06	0,09	-0,12	0,06	-0,04	0,11	-0,13
28	1 chodec	2,56	0,27	-0,28	0,12	-0,13	0,11	-0,13	0,17	-0,16
29	1 chodec	2,56	0,22	-0,25	0,14	-0,15	0,14	-0,14	0,17	-0,18
30	1 chodec	2,56	0,13	-0,12	0,08	-0,08	0,06	-0,06	0,07	-0,10
31	1 chodec	2,56	0,09	-0,10	0,06	-0,07	0,05	-0,06	0,08	-0,09
32	4 vandalové	1,63	0,39	-0,39	0,29	-0,27	0,27	-0,26	0,11	-0,10
33	4 vandalové	1,63	0,40	-0,39	0,29	-0,26	0,27	-0,25	0,11	-0,10
34	4 vandalové	2,31	0,32	-0,26	0,16	-0,18	0,17	-0,16	0,11	-0,14
35	4 vandalové	2,31	0,31	-0,31	0,21	-0,19	0,23	-0,21	0,15	-0,12
36	4 vandalové	1,83	0,11	-0,11	0,50	-0,53	0,46	-0,46	0,24	-0,27
37	4 vandalové	1,83	0,10	-0,11	0,46	-0,50	0,42	-0,44	0,25	-0,27
38	4 vandalové	2,56	0,65	-0,65	0,35	-0,28	0,35	-0,29	0,33	-0,31
39	4 vandalové	2,56	0,63	-0,66	0,34	-0,29	0,32	-0,29	0,35	-0,30

5.7.5.5 Posouzení podle ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations [27]

Limitní RMS hodnoty zrychlení jsou v [27] zadány pomocí grafů. Aby nemusel být graf převeden z logaritmického měřítka do lineárního, bylo posouzení provedeno následujícím způsobem: nejprve bylo ověřeno, zda RMS hodnoty zrychlení splňují nejpřísnější kritérium (zda jsou menší než $0,3 \text{ m/s}^2$ pro svislé kmitání a menší než $0,216 \text{ m/s}^2$ pro vodorovná kmitání), pokud toto kritérium nebylo splněno, muselo se přistoupit k podrobnějšímu posouzení. V první řadě bylo nutné v konkrétním záznamu zjistit dominantní frekvenci kmitání v časovém intervalu, ze kterého byla RMS hodnota zrychlení vyhodnocena, následně k příslušné frekvenci v grafu (obr. 10 pro svislé kmitání a obr. 11 pro vodorovné kmitání) nalézt mezní přípustnou RMS hodnotu zrychlení a s touto mezní hodnotou porovnat vyhodnocenou RMS hodnotu zrychlení. Toto podrobnější posouzení však bylo nutné provést (s výjimkou jednoho případu) jen u vandalismu, který daná kritéria ani splňovat nemusí.

V následující tab. 27 jsou sytě zelenou barvou označeny RMS hodnoty zrychlení, které splňují nejpřísnější kritérium, světlejší zelenou barvou jsou označeny hodnoty, které toto nejpřísnější kritérium nesplňují, ale po podrobnějším posouzení jsou menší než příslušné mezní hodnoty z grafu, červenou barvou jsou označeny hodnoty, které ani po podrobnějším posouzení nevyhověly.

Při běžné úrovni dynamického zatížení vyhovělo 99,2 % vyhodnocených RMS hodnot zrychlení ve svislém směru, nevyhověla jediná hodnota, a to $0,307 \text{ m/s}^2$. Ve vodorovném směru vyhovělo 100 % vyhodnocených RMS hodnot zrychlení.

Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ vyhovělo 43,8 % vyhodnocených RMS hodnot zrychlení ve svislém směru a dokonce 100 % RMS hodnot zrychlení ve vodorovném směru.

Tab. 27 Posouzení podle [27]

Záznam			RMS hodnoty zrychlení jednotlivých snímačích [m/s ²]							
č.	Zatěžovací stav	frekvence [Hz]	Svislý směr				Vodorovný směr			
			61z	171z	173z	251z	61y	171y	173y	251y
1	Běžný provoz		0,179	0,168	0,184	0,149	0,055	0,062	0,062	0,099
2	Běžný provoz		0,181	0,236	0,236	0,184	0,054	0,072	0,064	0,091
3	2 chodci	1,63	0,088	0,094	0,095	0,063	0,026	0,042	0,045	0,020
4	2 chodci	1,63	0,084	0,083	0,085	0,056	0,026	0,039	0,042	0,018
5	2 chodci	1,63	0,210	0,166	0,171	0,112	0,062	0,074	0,079	0,038
6	2 chodci	1,63	0,174	0,091	0,095	0,058	0,052	0,038	0,040	0,019
7	2 chodci	1,83	0,048	0,052	0,053	0,054	0,020	0,023	0,021	0,026
8	2 chodci	1,83	0,147	0,196	0,198	0,101	0,039	0,062	0,057	0,050
9	2 chodci	1,83	0,103	0,137	0,140	0,101	0,031	0,043	0,040	0,039
10	2 chodci	1,83	0,131	0,192	0,194	0,103	0,037	0,066	0,062	0,057
11	2 chodci	1,83	0,097	0,122	0,124	0,088	0,027	0,038	0,035	0,032
12	2 chodci	1,83	0,131	0,181	0,183	0,102	0,036	0,056	0,051	0,042
13	2 chodci	2,31	0,109	0,063	0,068	0,067	0,045	0,018	0,016	0,027
14	2 chodci	2,31	0,307	0,177	0,196	0,226	0,103	0,048	0,048	0,066
15	2 chodci	2,31	0,228	0,117	0,130	0,177	0,068	0,034	0,033	0,044
16	2 chodci	2,31	0,251	0,114	0,120	0,182	0,090	0,031	0,031	0,058
17	2 chodci	2,56	0,120	0,100	0,116	0,127	0,069	0,027	0,025	0,030
18	2 chodci	2,56	0,264	0,211	0,227	0,273	0,180	0,069	0,071	0,080
19	1 chodec	1,63	0,126	0,080	0,084	0,051	0,040	0,032	0,034	0,019
20	1 chodec	1,63	0,153	0,102	0,103	0,083	0,044	0,052	0,056	0,025
21	1 chodec	1,63	0,060	0,051	0,054	0,036	0,018	0,023	0,025	0,012
22	1 chodec	1,63	0,076	0,059	0,059	0,045	0,022	0,026	0,027	0,013
23	1 chodec	1,83	0,108	0,168	0,173	0,113	0,020	0,050	0,045	0,032
24	1 chodec	1,83	0,115	0,161	0,163	0,102	0,036	0,060	0,056	0,056
25	1 chodec	1,83	0,053	0,074	0,074	0,031	0,020	0,024	0,023	0,028
26	1 chodec	1,83	0,023	0,030	0,030	0,024	0,011	0,013	0,013	0,015
27	1 chodec	1,83	0,051	0,041	0,042	0,034	0,015	0,015	0,013	0,021
28	1 chodec	2,56	0,173	0,142	0,148	0,253	0,160	0,054	0,055	0,070
29	1 chodec	2,56	0,279	0,194	0,199	0,221	0,117	0,052	0,050	0,059
30	1 chodec	2,56	0,124	0,064	0,072	0,083	0,056	0,027	0,026	0,034
31	1 chodec	2,56	0,114	0,077	0,087	0,082	0,038	0,021	0,020	0,024
32	4 vandalové	1,63	0,717	0,296	0,303	0,089	0,231	0,154	0,147	0,045
33	4 vandalové	1,63	0,699	0,287	0,296	0,093	0,226	0,151	0,143	0,046
34	4 vandalové	2,31	0,784	0,332	0,346	0,132	0,119	0,058	0,065	0,043
35	4 vandalové	2,31	0,815	0,345	0,355	0,172	0,144	0,089	0,098	0,055
36	4 vandalové	1,83	0,567	0,812	0,798	0,190	0,040	0,291	0,268	0,146
37	4 vandalové	1,83	0,536	0,783	0,785	0,165	0,042	0,271	0,249	0,134
38	4 vandalové	2,56	0,426	0,160	0,146	0,531	0,416	0,137	0,141	0,182
39	4 vandalové	2,56	0,405	0,138	0,125	0,517	0,399	0,139	0,142	0,175

5.7.5.6 Shrnutí posouzení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci

Podle ČSN 73 6209 Zatěžovací zkoušky mostních objektů [10] jsou kritériem použitelnosti z hlediska účinků vibrací na lidský organismus vážené RMS hodnoty zrychlení, což je pro účel vyhodnocení experimentu vhodnější kritérium než okamžité hodnoty zrychlení. Při běžné úrovni dynamického zatížení vyhověly všechny vyhodnocené vážené RMS hodnoty zrychlení. Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ lávka ve svislém směru nevyhovuje, ve vodorovném směru by vyhověla pouze při využití kritéria pro vodorovné kmitání při výjimečném zatížení davem lidí. Norma [10] ale přímo stanovuje, že vandalismus se nepovažuje za běžný provoz, tudíž nemusí daným kritériím vyhovět.

ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí [26] míří na navrhování konstrukcí, proto nemusí být kritéria pro posouzení experimentu zcela vhodná. S přihlédnutím na tuto skutečnost by se dalo usoudit, že lávka vyhovuje, i když 5,6 % okamžitých hodnot zrychlení ve svislém směru a 5,2 % okamžitých hodnot zrychlení ve vodorovném směru nevyhovuje. Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ by lávka z hlediska mezního stavu použitelnosti nevyhověla, což ale podle norem, standardů a doporučení ani nemusí.

V národním aplikačním dokumentu ČSN EN 1991-2 NA ed. A [24] jsou definovány tři úrovně pohodlí chodců podle okamžitých hodnot zrychlení. Úroveň pohodlí lávky by se dala vyhodnotit jako „průměrná“, ačkoli 5,6 % hodnot zrychlení ve svislém směru a 5,2 % hodnot zrychlení ve vodorovném směru odpovídá úrovni „minimální“, a to ze stejného důvodu, jako při posouzení podle [26] (viz výše).

V Sétra: Technical guide, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading [1] jsou definovány tři úrovně pohodlí chodců podle okamžitých hodnot zrychlení. Úroveň pohodlí chodců by se dala vyhodnotit jako „průměrná“, a to ze stejného důvodu, jenž byl popsán v předchozích dvou odstavcích.

Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ splňovala naměřená zrychlení limity pro „minimální“ úroveň pohodlí chodců.

Podle ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations [27] jsou kritériem komfortu chodců RMS hodnoty zrychlení, což je pro vyhodnocení experimentu výhodnější než okamžité hodnoty zrychlení. V [27] je doporučeno pro výpočet RMS hodnoty zrychlení uvažovat průměrný čas 1 s, v této práci byl při vyhodnocení uvažován čas 5 s. Při běžné úrovni dynamického zatížení lávka podle stanovených kritérií vyhověla. Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ nevyhověla pro svislý směr kmitání, ale pro vodorovný směr kmitání vyhověla. Tato skutečnost by se dala odůvodnit tak, že konstrukce byla při zatěžovacím stavu „vandalismus“ buzena výhradně ve svislém směru.

6 Závěr

V první části práce jsou shrnuty informace, které se týkají problematiky dynamické analýzy lávek pro pěší, se zaměřením spíše na experimentální analýzu, protože právě experiment je hlavním tématem této práce. Součástí je také přehled norem, předpisů a doporučení, které se týkají navrhování lávek pro pěší i dynamických experimentů na lávkách pro pěší.

Předmětem této práce byla příprava, realizace a vyhodnocení dynamického experimentu na existující lávce pro pěší. Experiment byl původně plánován na existující lávce pro pěší v Boči (Karlovarský kraj), která je známá svou velkou citlivostí na dynamické účinky chodců a ke které byl k dispozici dynamický výpočet. Po neočekávaných komplikacích, které vznikly kvůli nouzovému stavu vyhlášenému vládou při koronavirové pandemii, byla jako náhrada vybrána existující lávka pro pěší v Praze 6 přes Patočkovu ulici.

Při experimentu na této lávce byla nejprve provedena experimentální modální analýza, a to metodou AVT (Ambient Vibration Testing), z níž byly vyhodnoceny vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání konstrukce. Nejnižší vyhodnocená vlastní frekvence konstrukce byla 3,263 Hz, neleží tedy v nejčastějším intervalu frekvencí přirozeného lidského pohybu (přibližně 1,7 Hz až 3,2 Hz [22]). Protože má ale konstrukce poměrně nízký útlum (ξ přibližně 0,72 % až 1,02 %), podařilo se při experimentu vybudit poměrně vysokou úroveň vibrací i z toho důvodu, že některé z vlastních frekvencí spadaly do intervalu dvojnásobků frekvencí přirozeného lidského pohybu. Charakter vlastních tvarů kmitání je především torzní, ze třinácti vyhodnocených vlastních tvarů byly zachyceny dva svislé ohybové.

Dále byla provedena dynamická zkouška zatěžovací, a to v souladu s normou [10]. Při zkoušce byly provedeny čtyři zatěžovací stavy. První dva zatěžovací stavy, „běžný provoz“ a „2 chodci za sebou“, byly provedeny na základě doporučení v normě [10].

Druhé dva zatěžovací stavy, „1 chodec“ a „vandalismus“, byly provedeny pro možnost podrobnějšího vyhodnocení dynamické odezvy konstrukce na dynamické zatížení chodci.

Naměřené záznamy byly dále zpracovány v programu Material Damping v4.0. Byly vyhodnoceny extrémy zrychlení, RMS hodnoty zrychlení, vážené RMS hodnoty zrychlení, výchylky pomocí dvojnásobné integrace a logaritmický dekrement útlumu. Hodnoty zrychlení (okamžité, RMS, vážené RMS) byly posouzeny podle [10], [26], národního aplikačního dokumentu normy [24], dále podle [1] a [27].

Citlivost lidského organismu na vibrace je velmi individuální záležitost, proto jsou v různých normách, předpisech a doporučeních kritéria pohody chodců definována různě. Pro vyhodnocení dynamického experimentu jsou podle autorky výstižnější kritéria, která definují pohodu chodců pomocí RMS hodnot zrychlení (např. [27]) nebo pomocí vážených RMS hodnot zrychlení (např. [10]). Naopak méně vhodné k vyhodnocení dynamického experimentu je podle autorky kritérium, které definuje pohodu chodců podle okamžitých hodnot zrychlení (např. [26], národní aplikační dokument normy [24] či [1]). Nicméně toto kritérium je součástí norem, které míří na návrhy konstrukcí.

Podle všech zmíněných norem, předpisů a doporučení lávka vyhověla a úroveň pohodlí chodců byla vyhodnocena jako „průměrná“. Kritérium pro potenciální vznik „lock-in“ efektu uvedené v [1] bylo překročeno při běžné úrovni dynamického zatížení u 46,4 % naměřených hodnot zrychlení ve vodorovném směru. Pokud by na lávce hrozilo sročení velkého davu chodců, autorka by doporučila snížit úroveň kmitání mostovky např. pomocí dodatečné instalace pohlcovačů kmitání, stejně jako tomu bylo na Millennium Bridge v Londýně [23] [30].

Co se týče srovnání jednotlivých kritérií pohody chodců, je nutno poznamenat, že kritéria uvedená v [26], v národním aplikačním dokumentu normy [24] a v [10] jsou navzájem kompatibilní. Mezní hodnoty zrychlení uvedené v [26] odpovídají „průměrné“ úrovni pohodlí chodců v národním aplikačním dokumentu normy [24].

Z těchto mezních hodnot zrychlení úzce vycházejí vážené efektivní hodnoty zrychlení, které jsou jako kritérium pohody chodců uvedeny v [10]. Nabízí se také srovnání [1] a národního aplikačního dokumentu normy [24], jelikož v obou zmíněných dokumentech jsou úrovně pohody chodců popsány obdobným způsobem, ovšem konkrétní mezní hodnoty zrychlení se liší, jak je přehledně uvedeno v tab. 28.

Tab. 28 Srovnání kritérií pohody chodců podle [1] a NAD normy [24]

Úroveň pohodlí chodců	Svislý směr kmitání [m/s ²]		Vodorovný směr kmitání [m/s ²]	
	NAD 1991-2 ed.2 [24]	SÉTRA [1]	NAD 1991-2 ed.2 [24]	SÉTRA [1]
Maximální	≤0,5	≤0,5	≤0,1	≤0,15
Průměrná	≤0,7	≤1,0	≤0,2	≤0,3
Minimální	≤1,0	≤2,5	≤0,4	≤0,8
Nevyhovující	≥1,0	≥2,5	≥0,4	≥0,8

Podle tab. 28 je vidět, že kritéria pohody chodců uvedená v národním aplikačním dokumentu normy [24] jsou mnohem přísnější než kritéria uvedená v [1]. Podle autorky jsou vhodnější kritéria v národním aplikačním dokumentu normy [24], a to především z důvodu, že podle [1] vyhověly úrovni „minimální“ všechny naměřené hodnoty zrychlení i v zatěžovacím stavu „vandalismus“, které jsou ale podle všech ostatních norem, předpisů i doporučení nevyhovující.

Podle osobních pocitů autorky byla nejméně komfortní situace, kdy stála na mostovce a jiný chodec šel po lávce. Za nekomfortní míru dynamické odezvy na dynamické zatížení chodci nepovažovala situaci, kdy sama po lávce přecházela. Možný důvod je ale ten, že sama nevybudila takové hodnoty zrychlení, které by mohly být nepříjemné (hodnoty zrychlení nepřekračovaly mezní hodnoty dané výše zmíněnými normami). Při zatěžovacím stavu „vandalismus“ byla pro autorku nejméně komfortní situace, kdy v jednom okamžiku přestali všichni figuranti konstrukci budít, a bylo tak

zřetelně cítit dokmitání konstrukce. Autorka v těchto situacích odhadovala maximální rozkmit výchyly lávky rozhodně větší než vyhodnocených necelých 6 mm.

7 Seznam literatury

[1] SÉTRA. *Footbridges*. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading. Technical guide. Paris: Ministry of Transport and Infrastructure, The Technical Department for Transport, Roads and Bridges Engineering and Road Safety, October 2006 [online]. [citace: 12. 03. 2020].

Dostupné z: <http://www.projektering.nu/files/Footbridges.pdf>

[2] MÁCA, Jiří. *Dynamika stavebních konstrukcí 1 [přednáška]*. [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2019. [citace: 04. 04. 2020].

Dostupné z: <https://mech.fsv.cvut.cz/student/>

[3] *Úvod do dynamiky* [online]. Jaroslav Reichl, Martin Všeticka, © 2006–2020. [citace: 02. 03. 2020].

Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/23-uvod-do-dynamiky>

[4] MÁCA, Jiří, KREJČÍ, Tomáš, KRUIS, Jaroslav. *Dynamika stavebních konstrukcí. Řešené příklady*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018. ISBN 978-80-01-05719-3.

[5] TP 215. *Využití modální analýzy pro návrh, posouzení, opravy, kontrolu a monitorování mostů pozemních komunikací*. Praha: Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, prosinec 2009 [online]. [citace: 05. 03. 2020]

Dostupné z: www.pjpk.cz/viewFile.asp?file=1673

[6] POLÁK, Michal. *Experimentální analýza a diagnostika K [přednáška]*. [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2020. [citace: 12. 05. 2020].

Dostupné z: <https://mech.fsv.cvut.cz/student/>

[7] ČÍTEK, Adam. *Experimentální dynamická analýza stávající lávky pro pěší*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra mechaniky.

Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68675/F1-BP-2017-Citek-Adam-EDASLPP.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[8] MAIA, Silva, HE, Lieven, LIN, Skingle, TO, Urgueira. *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. 3rd series. Taunton, Somerset, England: Research Sudies Press LTD., 1997. ISBN 0 86380 208 7.

[9] ČSN 73 2044. *Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1983.

[10] ČSN 73 6209. *Zatěžovací zkoušky mostních objektů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

[11] ČSN 73 6209. *Zatěžovací zkoušky mostů*. Praha: Český normalizační institut, 1996.

[12] GREGOR, Radoslav. *Analýza časových řad s využitím Fourierovy transformace a keprstrální analýzy*. Pardubice, 2012. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta ekonomicko-správní, Ústav systémového řízení a informatiky.

Dostupné z:

https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/46423/GregorR_AnalyzaCasovych_PP_2012.pdf?sequence=3&isAllowed=y.

[13] POLÁK, Michal. *Diagnostika stavebních konstrukcí* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 01. 04. 2020.

[14] Fourier transform. In: AAVOS International [online]. Aavos Int., © 2017. [citace: 10. 04. 2020].

Dostupné z: <https://aavos.eu/glossary/fourier-transform/>

[15] RYJÁČEK, Pavel. *Ocelové mosty 1* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 2019.

[16] MÁCA, Jiří. *Dynamika stavebních konstrukcí 2* [přednáška]. [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2019. [citace: 25. 11. 2019].

Dostupné z: <https://mech.fsv.cvut.cz/student/>

[17] DALÍK, Josef. *Matematika IV*. Numerická analýza [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2008. [citace: 12. 04. 2020].

Dostupné z: [http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CA02-Matematika%20IV%20\(K\)/M01-Numerická%20analýza.pdf](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CA02-Matematika%20IV%20(K)/M01-Numerická%20analýza.pdf)

[18] PATZÁK, Bořek. *Numerická analýza konstrukcí* [přednáška]. [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2019. [citace: 10. 12. 2019].

Dostupné z: <https://mech.fsv.cvut.cz/student/>

[19] BROŽOVSKÝ, Jiří, MATERNA, Alois. *Metoda konečných prvků ve stavební mechanice* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, 2012. [citace: 11. 04. 2020].

Dostupné z:

http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_stavebni_mechanika.pdf

[20] BÍLÝ, Petr, TIPKA, Martin. *Úvod do problematiky dynamiky betonových konstrukcí*. Rešeršní práce [online]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2012. [citace: 15. 04. 2020].

Dostupné z:

http://people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Uvod_do_problem_dynamiky_bet_konstrukci.pdf

[21] PROKŠ, Tomáš. *Dynamická analýza mostních konstrukcí*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky.

Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=143658

[22] MÁCA, Jiří, ŠTĚPÁNEK, Jan. *Pedestrian load models of footbridges*. MATEC Web of Conferences [online]. DOI 107. 00009. 10.1051/mateconf/201710700009. ResearchGate, 2017. [citace: 15. 03. 2020].

Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/317132258_Pedestrian_load_models_of_footbridges

[23] PIRNER, Miroš, FISCHER, Ondřej. *Dynamika ve stavební praxi*. Praha: ČKAIT, 2010. ISBN 978-80-87438-18-3.

[24] ČSN EN 1991-2 ed. 2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

[25] HEINEMEYER, Christoph, BUTZ, Christiane, KEIL, Andreas, SCHLAICH, Mike, DOLDACK, Arndt, TROMETER, Stefan, LUKIĆ, Mladen, CHABROLIN, Bruno, LEMAIRE, Arnaud, MARTIN, Pierre-Olivier, CUNHA, Álvaro, CAETANO, Elsa. *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations*. Luxembourg: Office

for Official Publications of the European Communities, 2009 [online]. [citace: 25. 04. 2020]. ISSN 1018-5593.

Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/38613152.pdf>

[26] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[27] ISO 10137:2007. *Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. International Organization for Standardization, 2004.

[28] NÁLEPA, Lukáš. *Prohlídka ocelové lávky v Praze 6*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí.

Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68831/F1-BP-2017-Nalepa-Lukas-BP.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[29] ROOS, Iemke. *Human Induced Vibrations on Footbridges*. Application and comparison of pedestrian load models. Brisbane: Arup, May 2009 [online]. [citace: 12. 04. 2020].

Dostupné z: http://homepage.tudelft.nl/p3r3s/MSc_projects/reportRoos.pdf

[30] ČSN ISO 2631-2. *Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím – Část 2: Vibrace v budovách (1 Hz až 80 Hz)*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[31] FITZPATRICK, Tony, RIDSDILL SMITH, Roger. *Stabilising the London Millennium Bridge*. London: Royal Academy of Engineering, Ingenia online, 2001 [online]. [citace: 25. 04. 2020]

Dostupné z: <https://www.ingenia.org.uk/getattachment/Ingenia/Issue-9/Stabilising-the-London-Millennium-Bridge/Fitzpatrick.pdf>

[32] Root Mean Square Value. In: Wira Electrical Engineering Portal [online]. Wira Electrical, © 2020. [citace: 02. 03. 2020].

Dostupné z: <https://www.wiraelectrical.com/2020/02/root-mean-square-formula.html>