

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V  
PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

**Katedra mechaniky**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Experimentální dynamická analýza stávající lávky  
pro pěší**

**The experimental dynamic analysis of an existing  
footbridge**

**Adam Čítek**

**2017**

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

**Studijní program: Stavební inženýrství**

**Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Adam	Jméno: Čítek	Osobní číslo: 401253
Zadávací katedra: K132 - Katedra mechaniky		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Experimentální dynamická analýza stávající lávky pro pěší	
Název bakalářské práce anglicky: The experimental dynamic analysis of an existing footbridge	
Pokyny pro vypracování: Příprava, realizace a vyhodnocení dynamického experimentu na stávající lávce pro pěší, který bude zaměřen na stanovení charakteristik vlastního kmitání lávky a na vyšetření dynamické odezvy lávky na přechody chodců.	
Seznam doporučené literatury: ČSN 736209 Zatěžovací zkoušky mostů. 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: 22.2.2017	Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017
<input type="text"/>	<input type="text"/>
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“.*

22.2.2017	<input type="text"/>
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

## **Čestné prohlášení:**

*Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Experimentální dynamická analýza stávající lávky pro pěší“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Michala Poláka, CSc., a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v přiloženém seznamu.*

*Adam Čítek*

*V ..... dne .....*

*.....*

## **Poděkování:**

Chtěl bych tímto poděkovat zejména vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Michalu Polákovi, CSc. za jeho trpělivost a čas strávený při konzultacích, kde mi poskytl mnoho nezbytných a velmi zajímavých informací k dané problematice. Také bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Plachému, Ph.D. za odbornou pomoc při experimentu. Dále bych chtěl poděkovat slečně Karolíně Berkové za poskytnutí výsledků z teoretického výpočtu. Tímto také děkuji studentům, kteří byli při experimentu nápomocni.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá experimentální dynamickou analýzou lávek pro pěší. Úvodní kapitoly jsou zaměřeny na experimentální dynamiku stavebních konstrukcí. Jsou zde popsány druhy dynamických zkoušek a přístroje pro měření a analýzu kmitání. Další kapitola je zaměřena na posouzení dynamické odezvy lávek. Hlavní část práce se zabývá stávající lávkou pro pěší přes Berounku v Dobřichovicích, na které byla provedena dynamická zkouška zaměřená na stanovení charakteristik vlastního kmitání a zejména dynamické odezvy na zatížení chodci. Vyhodnocené výsledky byly posouzeny podle současných norem stanovující kritéria komfortu chodců. Z tohoto hlediska lávka při běžném provozu vyhověla.

## **Klíčová slova**

Dynamika, analýza, experiment, lávka pro pěší, kmitání, dynamická odezva, posouzení dynamického chování, kritérium pohody

## **Abstract**

This thesis deals with the experimental dynamic analysis of footbridges. The opening chapter chapters are focused on the experimental structural dynamics. There are described the types of dynamic tests and devices for a vibration measurement. Another chapter is focused on the assessment of the dynamic response of the footbridges. The main part of the thesis deals with the existing footbridge across Berounka river in Dobřichovice, where a dynamic test was carried out aiming at the determination of modal characteristics and especially the dynamic response to pedestrian load. The evaluated results were assessed according to current standards setting the comfort criteria. From this aspect, the footbridge in normal operation has met the criteria.

## **Keywords**

Dynamics, analysis, experiment, footbridge, vibration, dynamic response, assessment of dynamic behavior, comfort criterion

# Obsah

1	ÚVOD.....	9
2	CÍLE PRÁCE .....	10
3	ZAKLADNÍ ÚLOHY DYNAMIKY .....	11
3.1	Vlastní netlumené kmitání.....	11
3.2	Vynucené tlumené kmitání.....	12
4	DYNAMICKÉ ZKOUŠKY .....	13
4.1	Dynamická zkouška zatěžovací.....	13
4.2	Dynamická zkouška informativní.....	14
4.3	Dynamické zkoušky lávek pro pěší.....	14
5	FOURIEROVA TRANSFORMACE .....	16
6	EXPERIMENTÁLNÍ MODÁLNÍ ANALÝZA .....	18
6.1	Ambient Vibration Testing (AVT).....	18
6.1.1	Měřicí linka .....	19
6.1.2	Princip vyhodnocení.....	20
6.2	Forced Vibration Testing (FVT) .....	20
6.2.1	Měřicí linka .....	20
6.2.2	Budící systém .....	21
6.2.3	Princip vyhodnocení.....	21
7	VYHODNOCENÍ A POSOUZENÍ DYNAMICKÉ ODEZVY LÁVEK PRO PĚŠÍ.....	23
7.1	Vyhodnocení a posouzení modálních charakteristik.....	23
7.1.1	Porovnání vlastních frekvencí .....	23
7.1.2	Porovnání vlastních tvarů.....	24
7.2	Vyhodnocení a posouzení úrovně vibrací .....	25
7.2.1	ČSN EN 1990 – Zásady navrhování konstrukcí.....	25
7.2.2	ČSN 73 6209 – Zatěžovací zkoušky mostů.....	25
7.2.3	SÉTRA - Footbridges (Technical Guide).....	26
7.2.3.1	Svislé kmitání .....	27
7.2.3.2	Vodorovní kmitání.....	27

8	PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ A ANALÝZU KMITÁNÍ .....	28
8.1	Snímače .....	28
8.1.1	Rozdělení snímačů.....	30
8.1.1.1	Relativní a absolutní snímače .....	30
8.1.1.2	Aktivní a pasivní snímače.....	30
8.1.2	Nejpoužívanější snímače ve stavební dynamice .....	31
8.1.2.1	Piezoelektrické snímače .....	31
8.1.2.2	Elektrodynamické snímače.....	31
8.2	Měřicí ústředna .....	32
8.3	A/D převodník .....	32
8.4	Budiče.....	33
9	DYNAMICKÁ ZKOUŠKA NA LÁVCE PRO PĚŠÍ V DOBŘICHOVICÍCH....	34
9.1	Úvod .....	34
9.2	Stručná historie objektu.....	35
9.3	Popis objektu .....	36
9.4	Měřicí linka .....	39
9.5	Nejistoty měření .....	39
9.6	Program dynamické zkoušky .....	40
9.7	Experimentální modální analýza .....	40
9.7.1	Příprava a průběh zkoušky .....	40
9.7.2	Vyhodnocení vlastních frekvencí a vlastních tvarů.....	42
9.7.3	Obrázky vyhodnocených vlastních tvarů .....	45
9.7.4	Porovnání naměřených a teoretických vlastních frekvencí a vlastních tvarů.....	55
9.8	Dynamická zatěžovací zkouška.....	57
9.8.1	Příprava a průběh zkoušky .....	57
9.8.1.1	Orientační experimentální modální analýza.....	57
9.8.1.2	Zatěžovací stavy .....	59
9.8.1.3	Záznam odezvy.....	62
9.8.2	Vyhodnocení a posouzení odezvy na zatížení chodci .....	63
9.8.2.1	Posouzení podle ČSN EN 1990 – Zásady navrhování konstrukcí ....	63
9.8.2.2	Posouzení podle ČSN 73 6209 – Zatěžovací zkoušky mostů .....	76
9.8.2.3	Posouzení podle SÉTRA .....	85

9.8.2.4	Maximální naměřené výchylky .....	87
9.8.2.5	Shrnutí posouzení .....	89
9.8.3	Vyhodnocení útlumu pro vybrané záznamy.....	90
10	ZÁVĚR.....	92
11	SEZNAM LITERATURY.....	94
12	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	97
13	SEZNAM TABULEK .....	101
14	POUŽITÝ SOFTWARE.....	102



# 1 ÚVOD

V dnešní době je kladen důraz na estetičnost stavebních konstrukcí a lávky nejsou výjimkou. Proto se jedná často o subtilní konstrukce, které působí velmi působivě, ale nalézt ten správný poměr mezi estetičností a spolehlivostí konstrukce je však někdy nesnadným úkolem. Dynamické vlastnosti lávek mají zásadní vliv nejen na jejich životnost a spolehlivost, ale také na pohodu osob pohybujících se po lávce. Kritérium pohody chodců je u lávek pro pěší důležité při jejich posouzení. Pro optimální návrh lávky je vhodné, aby vlastní frekvence konstrukce nebyly blízko krokové frekvenci a nemohl tak snadno nastat stav rezonance. Přesto u celé řady lávek se tomu vyhnout nejde, protože pro rozpětí zhruba 25 – 90m leží zpravidla některá z jejich vlastních frekvencí právě v této nežádoucí frekvenční oblasti [11].

Pozornost je nutné věnovat nejenom svislému kmitání ale také kmitání vodorovnému. Do roku 2000 se vodorovnému kmitání nevěnovala pozornost a tato problematika nebyla ani nijak ošetřena normami. Průlom v problematice vodorovného kmitání nastal po problémech na lávce Millenium Bridge v Londýně. Vodorovné kmitání se tu ukázalo jako velmi vážný problém. V prvních dnech provozu byla lávka vystavena velkým skupinám chodců. Lávka již od uvedení do provozu viditelně kmitala, ale davy lidí, snažící se přizpůsobit svůj krok vodorovným kmitům, tento stav mnohem více zhoršily. Lávka musela být krátce na to uzavřena, protože výrazné vodorovné kmitání ohrožovalo spolehlivost konstrukce a hlavně komfort chodců. Po této zkušenosti byla do norem zapracována kritéria omezující vodorovné kmitání lávek. Experimenty lze provádět různými metodami a přístroji pracujícími na rozličných fyzikálních principech. Aby bylo dosaženo požadovaných výsledků, je nutné, aby experimentátor měl povědomí o tom, jaké metody existují, na jakém principu pracují a za jakých podmínek je lze použít.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou experimentální dynamické analýzy konstrukcí, konkrétně analýzy lávek pro pěší. Úvodní část práce popisuje základy experimentální dynamiky a normy stanovující kritéria komfortu chodců. Hlavní část práce je věnována dynamické analýze stávající lávky pro pěší v Dobřichovicích. Jedná se o zavěšenou ocelovou lávku o 2 polích o celkové délce přemostění 180m. Pro výběr této lávky bylo hlavním důvodem to, že před uvedením do provozu nebo kdykoliv během doby jejího provozování nebyla na lávce provedena žádná dynamická zkouška. V rámci dynamické analýzy budou zjištěny modální charakteristiky a bude posouzena dynamická odezva na přechody chodců podle kritérií komfortu chodců.

## 2 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této práce bylo provedení dynamického experimentu na stávající lávce pro pěší, který byl zaměřen na stanovení charakteristik vlastního kmitání lávky a na vyšetření dynamické odezvy lávky na přechody chodců.

Hlavní cíl práce byl rozdělen do těchto dílčích cílů:

- příprava experimentu,
- realizace experimentu in situ,
- vyhodnocení charakteristik vlastního kmitání,
- vyhodnocení dynamické odezvy lávky na přechody chodců,
- posouzení dynamické odezvy lávky na přechody chodců podle kritérií komfortu chodců podle ČSN 73 6209 [4], ČSN EN 1990 [12] a technického předpisu SÉTRA[13].

### 3 ZAKLADNÍ ÚLOHY DYNAMIKY

Mechanika se obecně dělí na statiku a dynamiku. Zatímco úlohou statiky je rovnováha vnitřních a vnějších sil působících na těleso nacházející se v relativním klidu, dynamika se zabývá rovnováhou těles v pohybu. Do dynamické úlohy tedy vstupují kromě vnější a vnitřních sil i síly setrvačné a tlumící. Rovnováhu těchto sil popisuje D'Alembertův princip, jedna ze základních rovnic celé dynamiky, vyjádřený pro hmotný bod rovnicí (1), kde  $u$  značí posun,  $c$  útlum,  $m$  hmotnost a  $k$  tuhost.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) \quad (1)$$

Tento princip je odvozen z Newtonova druhého zákona o pohybu hmotného bodu a jedná se prakticky jen o jeho alternativní zápis. Odezva soustavy podle této rovnice závisí na tuhosti, hmotnosti, útlumu a časovému průběhu zatížení. Řešením je pak posun jako funkce času.

V dynamice se řeší dva základní problémy – vlastní kmitání a vynucené kmitání. Protože se v praxi málokdy můžeme setkat se soustavou s jedním stupněm volnosti, bude zde popsáno rovnou řešení vlastního a vynuceného kmitání pro soustavy s více stupni volnosti.

Stupeň volnosti je složka vektoru posunutí, kterému je přiřazena nenulová hmota [1]. Počet vlastních frekvencí a vlastních tvarů odpovídá počtu stupňů volnosti modelu. Reálné konstrukce mají hmotu spojitě rozloženou, a proto mají nekonečně mnoho stupňů volnosti. Při výpočtu je snaha omezit počet stupňů volnosti tzv. diskretizací hmoty a zjednodušit tak výpočet. Při diskretizaci se spojitě rozložená hmota koncentruje do konečného počtu bodů a posun lze vyjádřit konečným počtem složek vektoru posunutí [1].

#### 3.1 Vlastní netlumené kmitání

O vlastním kmitání mluvíme, pokud na kmitající konstrukci nepůsobí žádné vnější síly. Řešením pohybové rovnice (2) vlastního kmitání jsou modální charakteristiky, konkrétně vlastní frekvence a vlastní tvary.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{0} \quad (2)$$

V rovnici (2)  $\mathbf{M}$  značí matici tuhosti,  $\mathbf{K}$  matici tuhosti a  $\mathbf{u}$  vektor přemístění. Po dosazení výrazu pro vektor přemístění ve tvaru (3) do pohybové rovnice (2) dostáváme rovnici (4), ve které figurují dvě neznámé modální charakteristiky – vlastní kruhová frekvence  $\omega_n$  a vlastní tvar  $\Phi_n$ .

$$u(t) = \Phi_n(A\cos\omega t + B\sin\omega t) \quad (3)$$

$$(\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M})\Phi_n = \mathbf{0} \quad (4)$$

Pomocí spektrální matice  $\mathbf{\Omega}^2$  (matice kvadrátů vlastních frekvencí) a modální matice  $\mathbf{\Phi}$  (matice vlastních tvarů) lze rovnici (4) zapsat v kompaktním maticovém zápisu (5).

$$\mathbf{K}\mathbf{\Phi} = \mathbf{M}\mathbf{\Phi}\mathbf{\Omega}^2 \quad (5)$$

### 3.2 Vynucené tlumené kmitání

Vynucené kmitání je pohybový stav, kdy na soustavu působí vnější časově proměnná síla. Vynucené tlumené kmitání je zapsáno pohybovou rovnicí (6), kde  $\mathbf{u}$  značí vektor přemístění,  $\mathbf{C}$  matici útlumu,  $\mathbf{M}$  matici hmotnosti a  $\mathbf{K}$  matici tuhosti. Těmto parametrům odpovídají tlumící, setrvačné a vratné síly, které jsou v rovnováze s vnějšími budícími silami  $\mathbf{f}(t)$ . Řešením vynuceného kmitání je časový průběh odezvy soustavy na vnější budící síly [3].

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (6)$$

## 4 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY

Dynamická zkouška je proces sledování, zaznamenání a vyhodnocení úrovně kmitání stavebních konstrukcí. Je to tedy souhrn experimentálních metod, které umožňují mechanické kmitání sledovat [2]. Při dynamických zkouškách lze sledovat charakteristiky vlastního kmitání (modální charakteristiky) a dynamickou odezvu konstrukce na vnější dynamické zatížení.

Obecná problematika dynamických zkoušek stavebních konstrukcí je popsána normou ČSN 73 2044 [3], která stanovuje, za jakých podmínek a jak lze dynamické zkoušky provádět. Zatěžovacími zkouškami mostních konstrukcí se zabývá samostatná norma ČSN 73 6209 [4].

### 4.1 Dynamická zkouška zatěžovací

Dynamická zatěžovací zkouška slouží ke zjištění dynamické odezvy konstrukce na užité, popřípadě jiné dynamické zatížení. Užitným zatížením je myšleno zatížení provozní nebo extrémní. Dynamické účinky použitého zatížení při dynamické zatěžovací zkoušce se musí shodovat s účinky užitého zatížení, nebo se k nim co nejvíce přibližovat. Použité zatížení by se mělo shodovat s užitným zatížením z hlediska budící frekvence, velikosti budící amplitudy, místa, směru a času působení. Není-li všechno toto možné dodržet, například z technologických důvodů, je vhodně použít zatížení co nejvíce blízké zatížení užitému [3].

Předmětem vyhodnocení zkoušky jsou zpravidla frekvence a tvary vynuceného kmitání, výkmity a amplitudy vynuceného kmitání, efektivní hodnoty (RMS), případně dynamický součinitel konstrukce.

Podle [3] je dynamická zatěžovací zkouška provedena v případě nutnosti srovnání dynamické odezvy skutečné konstrukce s teoretickým výpočtem, nebo pokud dynamická zatěžovací zkouška nahrazuje teoretický výpočet. V některých případech může nahrazovat statickou zatěžovací zkoušku, a to v případě, kdy je statické zatížení zanedbatelné a převládají účinky zatížení dynamického. V situaci, kdy je konstrukce podrobena statické i dynamické zkoušce, statická zkouška se provádí zpravidla jako první v pořadí. V případě pochybností o technickém stavu konstrukce a její způsobilosti pro statickou zatěžovací zkoušku, může být dynamická zkouška provedena jako první v pořadí.

## 4.2 Dynamická zkouška informativní

Podle [3] slouží dynamická zkouška informativní ke zjištění modálních charakteristik konstrukce (charakteristiky vlastního kmitání). Mezi základní modální charakteristiky patří vlastní frekvence a k nim příslušné vlastní tvary, útlum konstrukce. K vyvolání odezvy konstrukce lze využít libovolný zdroj dynamického zatížení s širokopásmovým budícím charakterem, které vyvolá odezvu, ze které je možné vyhodnotit vlastní frekvence a tvary. Použité zatížení nesmí v žádném případě poškodit konstrukci a ohrozit tak její spolehlivost.

Předmětem vyhodnocení zkoušky jsou vlastní frekvence, vlastní tvary kmitání a útlum. Dynamickou informativní zkoušku lze využít pro získání údajů pro verifikaci výpočetního modelu. Často se informativní zkoušky využívá před samotnou dynamickou zatěžovací zkouškou zjištění modálních charakteristik a sestavení vhodných zatěžovacích stavů.

Svým obsahem je dynamická zkouška informativní vystižena termínem experimentální modální analýza. Jelikož je právě experimentální modální analýza jedním z hlavních témat této bakalářské práce, bude podrobně rozebrána v další kapitole.

## 4.3 Dynamické zkoušky lávek pro pěší

Provádění dynamických zkoušek na lávkách se podřizuje normě ČSN 73 6209 – Zatěžovací zkoušky mostů [4]. V rámci dynamické zkoušky informativní (tento termín je definován v [3]) se na lávce provádí experimentální zjištění modálních charakteristik konstrukce.

Pro zjištění odezvy lávky při vynuceném kmitání se na lávce provádí dynamická zatěžovací zkouška. Před dynamickou zatěžovací zkouškou se zpravidla provádí buď orientační experimentální modální analýza z prosté odezvy konstrukce (vítr, dopravní proud) nebo se vychází z výsledků proběhlé podrobnější experimentální modální analýzy. Na základě zjištěných hodnot vlastních frekvencí jsou podle [4] sestaveny zatěžovací stavy pro ověření odezvy konstrukce při vynuceném kmitání.

Norma definuje tři možné způsoby, jak lze ověřit odezvu lávky pro pěší a cyklisty při provozu. Prvním způsobem je náhodný pohyb chodců po lávce při hustotě provozu odpovídající běžnému provozu. Druhým způsobem je situace, při které jdou dvě osoby krokovou frekvencí  $f_{(k)}$  shodnou s některou z vlastních frekvencí svislého kmitání lávky  $f_{(j)}$ , která spadá do frekvenčního intervalu 1,6 – 2,4 Hz. V případě, že nejnižší vlastní frekvence svislého kmitání je nižší než 5 Hz a současně neleží v uvedeném frekvenčním intervalu, je zvolena taková kroková frekvence, aby dosažená odezva lávky byla co možná největší [4]. Rovnice (7) vyjadřuje vztah mezi zvolenou krokovou frekvencí a některou z vlastních

frekvencí svislého kmitání, kde  $f_{(k)}$  značí krokovou frekvenci,  $f_{(j)}$  některou z vlastních frekvencí. Koeficient  $m$  se pro svislé kmitání volí z množiny  $\{0,5; 1\}$  tak, aby bylo dosaženo maximální odezvy konstrukce. [4]

$$f_{(k)} = mf_{(j)} \quad (7)$$

Pro svislé kmitání [4] ještě udává krokovou frekvenci  $f_{(k)}$  jako dvojnásobek vlastní frekvence  $f_{(j)}$ , ale jedná se o chybu. Při takové situaci by každý druhý nášlap působil do protipohybu konstrukce a nebylo by možné svislé tvary kmitání vybudit, nebo by bylo dosaženo velmi malé odezvy.

Třetím způsobem je přejezd lehkého nákladního vozidla. Tato možnost platí pouze v případě, že je daná lávka na přejezd lehkého vozidla navržena. Nutno dodat, že tento způsob není příliš často využíván.

Vodorovné kmitání v normě [4] není zmíněno a nejsou tak v tomto směru kladeny žádné požadavky. Přesto je vhodné vodorovné kmitání na lávkách ověřovat. Vodorovné síly vyvolané došlapem levé a pravé nohy mají navzájem opačný směr působení. Proto je nutné pro vybudění vodorovných tvarů zvolit krokovou frekvenci  $f_{(k)}$  rovnou dvojnásobku vlastní frekvence lávky  $f_{(j)}$ . Kdyby byla kroková frekvence rovna vlastní frekvenci lávky, každý druhý nášlap by působil do protipohybu konstrukce a kmitání by bylo utlumeno.

## 5 FOURIEROVA TRANSFORMACE

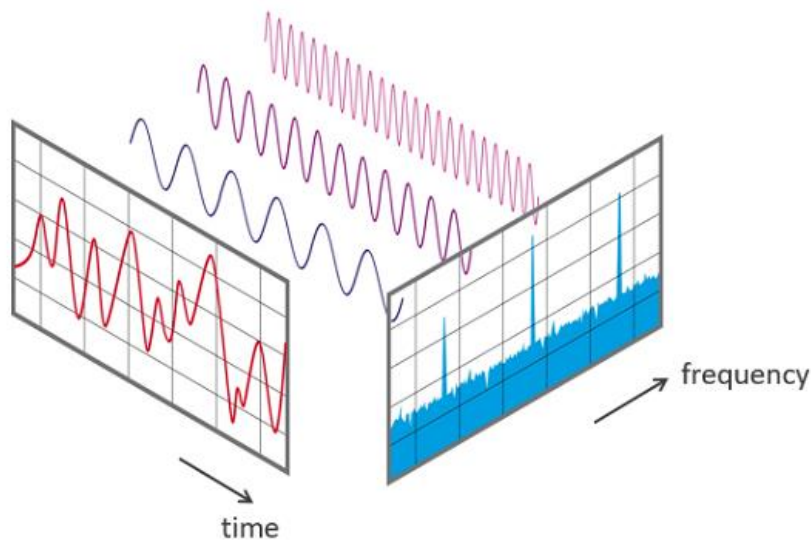
Fourierova transformace je algoritmus, pomocí kterého je za jistých podmínek možné převést libovolnou funkci z časové oblasti do frekvenční. Historie FT sahá až do roku 1822, kdy francouzský matematik Joseph Fourier dokázal, že lze každou periodickou funkci vyjádřit jako součet nekonečně mnoha harmonických funkcí [6]. Odvodil Fourierovu řadu, kterou lze zapsat rovnicí (8), kde koeficienty  $a_k$  a  $b_k$  jsou spočteny podle (9) a (10)

$$f(t) = a_0 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{T}) \quad (8)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad ; \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx \quad ; \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

Fourierova transformace je odvozena ze zmíněné Fourierovy řady. Lze jí aplikovat i na neperiodické funkce. Její princip lze zjednodušeně popsat jako vyjádření jedné funkce pomocí jiné funkce vyjádřené odlišnými proměnnými. Libovolnou funkci lze rozložit na množinu harmonických funkcí charakterizovaných amplitudou, fází a frekvencí. Pomocí těchto parametrů je signál z časové oblasti převeden do frekvenčního spektra, kde je amplituda měřené veličiny vyjádřena jako funkce frekvence (obr. 1). Tato transformace signálu umožňuje analyzovat, z jakých frekvencí se původní signál skládal.



Obr. 1 Princip Fourierovy transformace

(Zdroj: <http://www.nti-audio.com/portals/0/pic/news/FFT-Time-Frequency-View-540.png>)

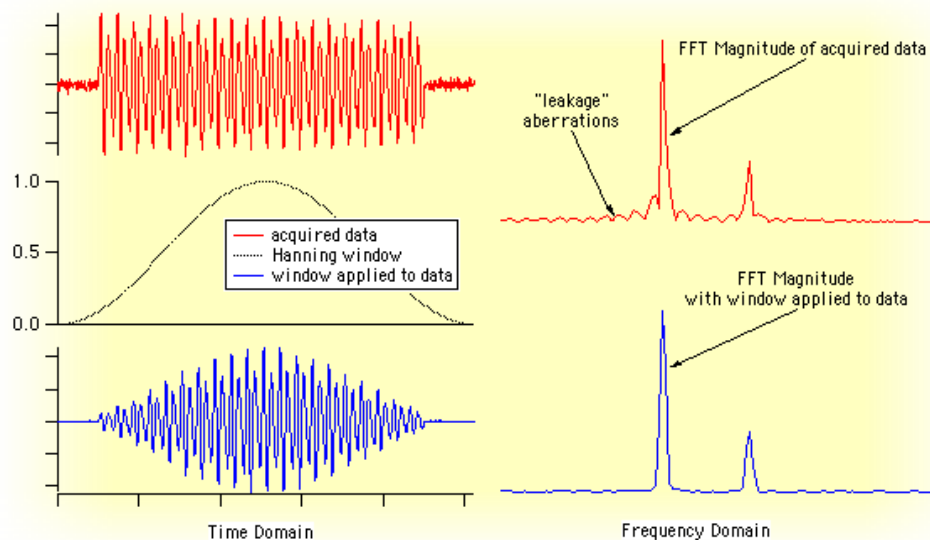


V praxi se ale pracuje s digitálním signálem, na který je potřeba aplikovat diskretní Fourierovu transformaci, která pracuje s diskretními funkcemi. V dnešní době je ale nejvíce používaná rychlá Fourierova transformace (FFT). Jedná se o velice efektivní algoritmus pro výpočet diskretní Fourierovy transformace, který byl představen v roce 1965 pány J. W. Cooleyem a J. W. Tukeyem [7]. Základním principem je omezení nutných operací pro aproximaci spojitého signálu harmonickými funkcemi z  $N^2$  na  $N \log N$  [8].

Výpočet FFT může být proveden jen na diskretním signálu s počtem vzorků rovným  $N$ -té mocnině čísla dvě a zároveň musí být proveden na úseku signálu, který obsahuje celý počet period. Proto je na daný úsek signálu aplikováno tzv. váhové okno (váhová funkce), které zaručí, že úsek zpracovávaného signálu začíná a končí s nulovou amplitudou [9]. Efekt použití váhového okna na úsek signálu, je vidět na obr. 2.

Pro stavební dynamiku má FFT zásadní význam. Pomocí tohoto algoritmu jsou převedeny složité časové záznamy odezvy do frekvenční oblasti, ve které lze analyzovat frekvenční složení odezvy.

V rámci této práce je FFT využito při vyhodnocování vlastních frekvencí a k vyhodnocení dominantních frekvencí v odezvě při dynamické zatěžovací zkoušce pro posouzení podle ČSN 73 6209 [4].



Obr. 2 Aplikace váhového okna a jeho vliv na výsledné frekvenční spektrum

(Zdroj: <https://www.wavemetrics.com/products/igorpro/dataanalysis/signalprocessing/spectralwindowingpix/fftwindowingdemo.png>)

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ MODÁLNÍ ANALÝZA

Modální analýza je metodou, která umožňuje poměrně rychle a jednoduše analyzovat vlastní kmitání konstrukce. Od 60 let 20. století, kdy byl odvozen algoritmus FFT, roste její popularita a dnes patří k nejběžnějším metodám, jak analyzovat vlastní kmitání konstrukce [10]. Obecně lze modální analýzu rozdělit na numerickou a experimentální.

Cílem numerické modální analýzy je určení charakteristik vlastního kmitání (modální charakteristiky) – vlastní frekvence  $f_{(j)}$ , k nim příslušné vlastní tvary  $\Phi_{(j)}$  a charakteristika útlumu (logaritmický dekrement, poměrný útlum).

Experimentální modální analýza (EMA) lze chápat jako soubor metod, které slouží k analýze modálních charakteristik stávající konstrukce [2]. Hodnoty modálních charakteristik získané experimentem jsou důležitými údaji, které poukazují na její aktuální stav.

V [2] jsou uvedeny dva základní způsoby, jak lze při provádění experimentální modální analýzy postupovat. Jsou jimi Forced Vibration Testing (FVT) a Ambient Vibration Testing (AVT). Tyto dva postupy se od sebe liší v přístupu k buzení konstrukce a vyhodnocením naměřených hodnot.

### 6.1 Ambient Vibration Testing (AVT)

Metoda AVT je založena na využití zdrojů dynamického zatížení, které na konstrukci přirozeně působí. V důsledku působení těchto přirozených zdrojů dynamického zatížení působí na konstrukci budící síly  $F(t)$ , které konstrukci rozkmitávají. Přirozeným zdrojem dynamického zatížení je myšleno jakékoliv dynamické zatížení, kterému může být konstrukce při běžném provozu vystavena. Mezi tyto dynamické zdroje patří například vítr, seismicita, zatížení dopravou nebo chodci, případně hluk. U takto vzniklých budících sil nelze sledovat jejich dynamické vlastnosti, a jedná se tedy o síly neznámé velikosti a budící frekvence.

Metodu AVT je vhodné využívat na konstrukcích s nízkou hodnotou útlumu [2]. Je tedy vhodná zejména pro ocelové a spřažené konstrukce, kde je hodnota logaritmického dekrementu výrazně nižší než u konstrukcí železobetonových. Pro lávky pro pěší je tato metoda díky jejich subtilní konstrukci vhodná téměř vždy. Přesnost výsledků ve srovnání s použitím metody FVT je většinou nižší, ale pro vhodně zvolené konstrukce může být přesnost dostačující a srovnatelná s FVT.

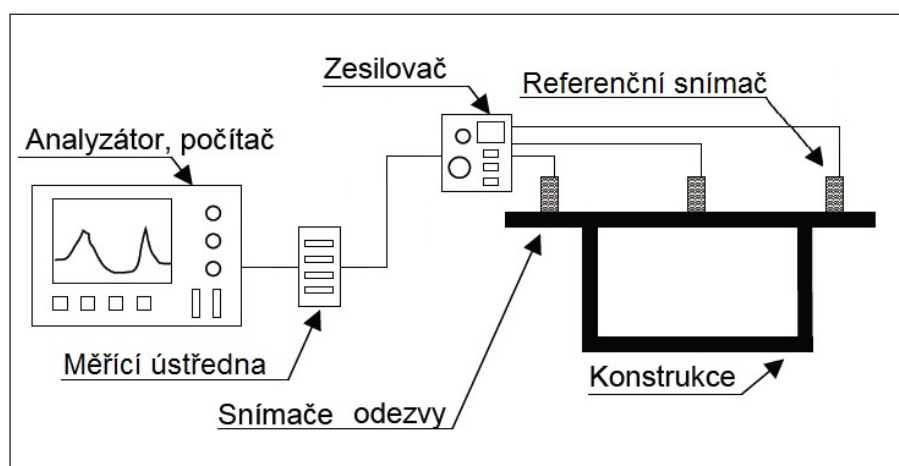
Naměřené hodnoty kmitání konstrukce jsou normovány k hodnotě, která byla změřena snímačem umístěným v referenčním bodě. Aby bylo možné co nejpřesněji zachytit všechny podstatné vlastní tvary, musí být referenční bod zvolen tak, aby v tomto bodě měly všechny hledané vlastní tvary co možná největší pořadnici [2]. V žádném případě by neměl být referenční snímač umístěn do uzlového bodu některého z vlastních tvarů. V takovém případě by nebylo možné daný vlastní tvar s příslušnou vlastní frekvencí zachytit. Vhodné zvolení polohy referenčního bodu vyžaduje zkušenosti experimentátora a je užitečné před experimentem provést numerickou modální charakteristiku, ze které lze pro většinu konstrukcí nejvhodnější polohu umístění poměrně snadno zjistit.

### 6.1.1 Měřící linka

Měřící linka pro metodu AVT se většinou sestává z několika snímačů odezvy mechanického kmitání, zesilovače, měřicí ústředny a řídicího počítače (obr. 3). Funkci měřicí ústředny může plnit multikanálový FFT analyzátor, ale v současnosti je běžnější využití FFT softwarů v řídicím počítači, který je napojen na měřicí ústřednu [2].

Na konstrukci je vhodně zvolena síť bodů, ve kterých je měřena dynamická odezva, a snímače jsou při měření mezi těmito body postupně po řezech přemísťovány. Měření lze provést i tak, že je každý bod zvolené sítě současně osazený jedním snímačem, a měření tak probíhá ve všech bodech najednou. Toto řešení je ale díky vysoké ceně snímačů neekonomické a při měření také mohou vznikat chyby měření způsobené rozdílnou frekvenční charakteristikou jednotlivých snímačů.

Snímači naměřené analogové signály jsou v měřicí ústředně převáděny na digitální signál (bodovou funkci) a ten je následně v softwaru plnicím funkci FFT analyzátoru převeden z časové oblasti do oblasti frekvenční.



Obr. 3 Typické uspořádání měřící linky pro AVT (Zdroj: Upraveno z TP 215[2])

### 6.1.2 Princip vyhodnocení

Zaznamenané signály jsou převedeny z časové do frekvenční oblasti pomocí FFT. Z takto upravených signálů je vyhodnocena tzv. frekvenční přenosová funkce pracovních tvarů kmitání (ODS FRF = Operation Deflection Shapes Frequency Response Function).

Podle [2] je ODS FRF komplexní funkce, kterou lze vyjádřit pomocí amplitudy v měřeném bodě a fázového posunu charakterizující zpoždění amplitud odezvy v měřeném a referenčním bodě.

Frekvence, jejichž funkční hodnota je lokální maximum ODS FRF, lze považovat za vlastní frekvence.

Protože měření probíhá většinou v několika sestavách a intenzita dynamického zatížení kolísá, pořadnice ODS FRF neodpovídají pořadnicím vlastního tvaru v měřeném bodě. Z frekvenční přenosové funkce pracovních tvarů kmitání tedy nelze přímo vyhodnotit vlastní tvary a je nutné přenosové funkce ODS FRF srovnat do stejného měřítka vůči amplitudám naměřeným v referenčním bodu referenčním snímačem [2].

## 6.2 Forced Vibration Testing (FVT)

Při metodě FVT na konstrukci působí řízená budící síla  $F(t)$ , která konstrukci rozkmitává. Na rozdíl od metody AVT je možno sledovat její dynamické vlastnosti jako velikost, směr působení a frekvenci. Během měření je zaznamenávána odezva konstrukce a současně i dynamické vlastnosti budící síly [2].

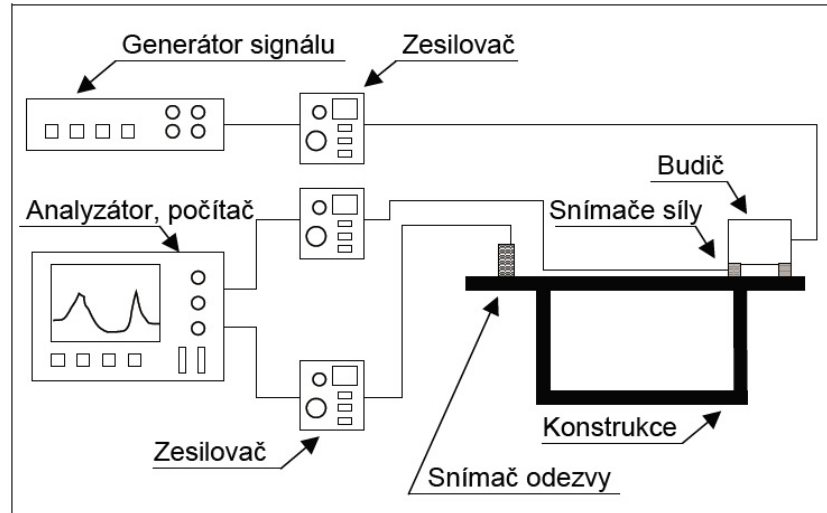
Pro určení polohy budícího bodu platí stejné pravidla jako při určování polohy referenčního bodu při metodě AVT. Hledané vlastní tvary musí mít v tomto bodě co možná největší pořadnici, aby bylo možné všechny tyto tvary kmitání vybudit a co nejpřesněji k nim určit příslušné vlastní frekvence. Je vhodné nejprve provést numerickou modální analýzu a z ní při hledání optimální polohy budícího bodu vycházet.

Pro měření metodou FVT se používá budícího systému a měřící linky zaznamenávající odezvu konstrukce a dynamické vlastnosti budící síly, ke které je naměřené kmitání normováno.

### 6.2.1 Měřící linka

Základní část měřící linky pro metodu FVT zůstává stejná jako při AVT, a to: snímače odezvy, zesilovače, měřící ústředna a řídicí počítač nebo samotný FFT analyzátor (obr. 4).

Při FVT je nutné sledovat dynamické vlastnosti budící síly a proto jsou do měřicího systému zapojeny snímače síly umístěné mezi budič a konstrukci. Signál je opět veden přes zesilovač do měřicí ústředny.



Obr. 4 Typické uspořádání měřicí linky pro FVT (Zdroj: TP 215 [2])

## 6.2.2 Budicí systém

Budicí systém slouží k řízenému rozkmitání konstrukce. Zpravidla je tvořen generátorem signálu, zesilovačem signálu a samotným budičem.

Řídicí signál, který je generován řídicí elektronikou v budiči, udává časový průběh budící síly. Podle [2] se při modální analýze se používá několik typů signálu, respektive časových průběhů budící síly. Patří mezi ně náhodný (random), harmonický nebo lineárně proměnný průběh budící frekvence (frekvenční sweep). Zesilovač signálu zesiluje generovaný řídicí signál pro další zpracování.

Buzení konstrukce může probíhat několika způsoby. Jedním z nich je umístění jednoho budiče na určený budící bod a při měření se jeho poloha nemění. Polohu budiče ale lze při měření měnit. Díky tomu se měření zpřesní a lze tak vybudit i další vlastní tvary, které v původním budícím bodě měly minimální pořadnici nebo uzlový bod. Další možností je použití několika budičů současně rozmístěných na více budících místech. Toho řešení je však kvůli použití několika budících zařízení nepříliš ekonomické.

## 6.2.3 Princip vyhodnocení

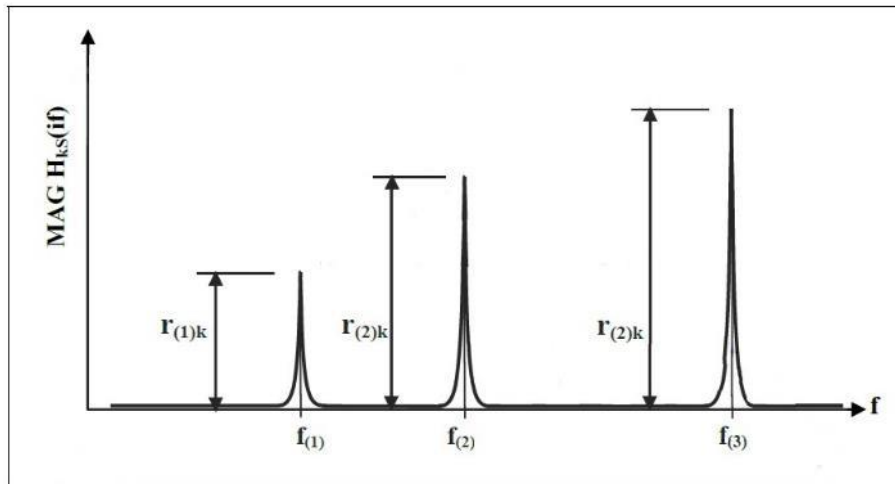
Zaznamenané signály jsou opět převedeny z časové do frekvenční oblasti pomocí FFT. Z takto upravených signálu je vyhodnocena tzv. frekvenční přenosová funkce (FRF = Frequency Response Function). Ta je v [2] definována jako závislost průběhu amplitudy

některé z měřených veličin charakterizující odezvu konstrukce, která byla vyvolána harmonickou budící silou s jednotkovou amplitudou, na budící frekvenci.

FRF komplexní funkce, kterou lze vyjádřit pomocí magnitudy a fázového posunu charakterizujícího zpoždění amplitud budící síly a odezvy v měřeném bodě. Její výpočet lze zjednodušeně interpretovat jako podíl výstupní veličiny (odezva konstrukce v měřeném bodě K) a vstupní veličiny (budící síla působící v bodě S).

$$FRF_{(ks)}(if) = \frac{r_k(if)}{F_s(if)} \quad (8)$$

Frekvence, jejíž funkční hodnota je lokální maximum přenosové funkce, můžeme považovat za vlastní frekvence. Pořadnice přenosové funkce  $r_{(j)k}$  v jejích lokálních maximech odpovídají pořadnicím vlastního tvaru v měřeném bodě, pro který je daná přenosová funkce vytvořena (obr. 5).



Obr. 5 Lokální extrémy přenosové funkce (Zdroj: TP 215 [2])

## 7 VYHODNOCENÍ A POSOUZENÍ DYNAMICKÉ ODEZVY LÁVEK PRO PĚŠÍ

### 7.1 Vyhodnocení a posouzení modálních charakteristik

Pro zjištění modálních charakteristik lávky se provádí experimentální modální analýza některou z možných metod (AVT, FVT). Vyhodnocení vlastních frekvencí a vlastních tvarů mostních konstrukcí podléhá normě ČSN 73 6209, Změna Z1 – Zatěžovací zkoušky mostů [5]. Podle této normy se pro účely modální analýzy zpravidla používá budiče, ale podle [2] lze využít i přirozených zdrojů dynamického zatížení (vítr, seismicita, dopravní proud), pokud tyto zdroje dokáží vyvolat dostatečnou odezvu. U těchto zdrojů se předpokládá, že jejich dynamický charakter odpovídá tzv. bílému šumu.

Výsledkem experimentální modální analýzy jsou zpravidla vlastní tvary, vlastní frekvence a útlum. Z hlediska [5] je ověřována shoda pro tzv. základní soubor vlastních frekvencí. Základní soubor musí obsahovat nejméně 5 nejnižších vlastních frekvencí v pořadí podle výpočtu, z toho dvě musí být se svislým ohybovým tvarem a jedna s krouživým tvarem kmitání. Pokud nebyl proveden teoretický výpočet, nejsou na konstrukci vzneseny z hlediska modálních charakteristik žádné požadavky a posuzuje se jen odezva vynuceného kmitání podle příslušných norem. Pokud byl proveden teoretický výpočet, provádí se ověření vypočtených hodnot s naměřenými hodnotami. Aby bylo možné konstatovat shodu mezi naměřenými a vypočtenými frekvenčními charakteristikami, musí být splněny následující podmínky.

#### 7.1.1 Porovnání vlastních frekvencí

V rámci vyhodnocení modálních charakteristik podle [5] je vypočtena mezní odchylka  $\Delta_{(j)}$  naměřených hodnot od teoretických hodnot vlastních frekvencí. Ta je vypočtena podle rovnice (9), kde  $f_{(j)cal}$  značí j-tou vypočtenou vlastní frekvenci a  $f_{(j)obs}$  značí j-tou naměřenou vlastní frekvenci.

$$\Delta_{(j)} = \frac{f_{(j)cal} - f_{(j)obs}}{f_{(j)cal}} \times 100 \quad (9)$$

Hodnota mezní odchylka pro každou vlastní frekvenci ze základního souboru ověřovaných frekvencí musí splňovat kritéria daná tabulkou na obr. 6.  $F_{(min)cal}$  je nejnižší

vlastní frekvence globálního vlastního tvaru, který má dominantní pořadnice ve svislém směru.

FREKVENCE	f(MIN)CAL	f(j)CAL
MEZNÍ ODCHYLKA	+10 AŽ -15	$\pm \left( 14 + \frac{f_{(j)CAL}}{f_{(MIN)CAL}} \right) \leq \pm 25$

Obr. 6 Mezní odchylky vlastních frekvencí  
(Zdroj: ČSN 73 6209, Změna Z1 – Zatěžovací zkoušky mostů [5])

### 7.1.2 Porovnání vlastních tvarů

Aby mohli být porovnány naměřené a vypočtené frekvence, musí být k sobě přiřazeny na základě shody vlastních tvarů.

Vlastní tvary se musí shodovat počtem uzlů, které jsou na stejném poli lávky. Dále je shoda ověřena pomocí koeficientu korelace modální analýzy MAC. Hodnotu koeficientu pro zkouškou zjištěný vlastní tvar  $r_{(k)OBS}$  a vypočtený vlastní tvar  $r_{(j)CAL}$  lze vyjádřit podle vzorce (10).

$$MAC_{(j,k)} = \frac{\left| \{r_{(j)CAL}^*\}^T \{r_{(k)OBS}\} \right|^2}{\left( \{r_{(j)CAL}^*\}^T \{r_{(j)CAL}\} \right) \left( \{r_{(k)OBS}\}^T \{r_{(k)OBS}\} \right)} \quad (10)$$

Princip koeficientu MAC je zjednodušeně založen na předpokladu, že dva odlišné vlastní tvary jsou navzájem ortogonální (nezávislé). Jeho hodnota se pohybuje intervalu  $\langle 0;1 \rangle$  a vyjadřuje míru shody vypočteného a naměřeného vlastního tvaru. Pokud je hodnota koeficientu rovna 1, jedná se o dokonalou shodu, pokud je roven 0, jedná se o dva navzájem nezávislé vlastní tvary.

Podle [5] může být vypočtený a naměřený tvar považován za shodný, když je hodnota koeficientu MAC pro porovnávané tvary větší než 0,85 a zároveň pro všechny ostatní naměřené tvary menší než 0,40.



## 7.2 Vyhodnocení a posouzení úrovně vibrací

Při posouzení lávek pro pěší jsou z hlediska mezního stavu použitelnosti zásadní kritéria komfortu chodců. Podle [11] je vnímání chodců mnohem citlivější než vnímání řidičů dopravních prostředků, a je tedy vhodné se kritérii pohody chodců při posouzení lávky zabývat.

Lidský organismus vnímá i velmi malé vibrace. Je známo, že osoby vystavené nějaké úrovni vibrací mají zkreslené představy o tom, jak velkých hodnot odezva konstrukce nabývala. Mají pocit, že konstrukce kmitala mnohem více, než tomu ve skutečnosti bylo.

Reakce každého jednotlivce vystaveného vibracím je ryze subjektivní záležitostí a nelze tedy jednoznačně určit hranice, kdy každý lidský organismus začne pociťovat snížený komfort. Přesto je snaha zavést obecná kritéria, která by zaručovala jistý komfort a pocit bezpečnosti chodců. V následujících odstavcích budou uvedeny příklady současných norem a technických příruček, které se zabývají kritérii komfortu chodců.

### 7.2.1 ČSN EN 1990 – Zásady navrhování konstrukcí

V [12] jsou kritéria komfortu chodců vyjádřena maximálními přípustnými hodnotami okamžitého zrychlení konstrukce. Norma udává pouze doporučené hodnoty kritérií pro kmitání lávek, které lze upravit národní přílohou nebo podle specifických potřeb konkrétního projektu.

Doporučená maximální hodnota zrychlení je pro svislé kmitání  $0,7 \text{ ms}^{-2}$  a pro vodorovné kmitání  $0,2 \text{ ms}^{-2}$ . Pro vodorovné kmitání vyvolané výjimečným zatížením je doporučena hodnota  $0,4 \text{ ms}^{-2}$ .

Výše uvedená kritéria by se měla ověřit v případě, že první vlastní frekvence je pro ohybový vlastní tvar kmitání menší než 5 Hz a pro vodorovný nebo torzní vlastní tvar menší než 2,5 Hz.

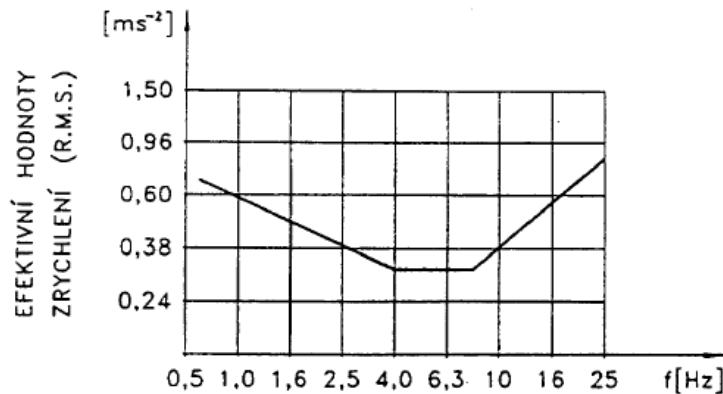
### 7.2.2 ČSN 73 6209 – Zatěžovací zkoušky mostů

V případě [4] jsou hraniční hodnoty účinků vibrací stanoveny pomocí hodnoty  $a_{\text{RMS}}$ . Hodnota RMS (z anglického root mean square) je efektivní hodnota dané veličiny, v tomto případě zrychlení. Výpočet této hodnoty pro spojitou funkci odezvy je stanoven rovnicí (11). Vzhledem k tomu, že při vyhodnocení se pracuje s digitálním signálem, který je bodovou funkcí, výpočet hodnoty RMS se provádí podle vzorce (12).

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_0^T \ddot{u}(t)^2 dt}{T}} \quad (11)$$

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^n u^2}{N}} \quad (12)$$

Hranice přípustných efektivních hodnot zrychlení pro posouzení komfortu chodců je pak znázorněna grafem na obr. 7. Je nutné podotknout, že pro lávky není stanoveno, jak přesně by měla být hodnota RMS stanovena. Není stanovena délka časového úseku ani z jaké oblasti záznamu by měla být hodnota vypočtena. Je tedy čistě na uvážení experimentátora, jak vyhodnocení pojme. Norma stanovuje kritérium pouze pro svislé vibrace.



Obr. 7 Hranice snížené pohody chodců pro svislé vibrace lávek  
(Zdroj: ČSN 73 6209 – Zatěžovací zkoušky mostů [4])

### 7.2.3 SÉTRA - Footbridges (Technical Guide)

SÉTRA [13] je technický předpis sdružující současné znalosti o dynamickém chování lávek. Tento dokument je cílený spíše na problematiku navrhování lávek, ale kritéria komfortu chodců zde nejsou opomenuta. Na základě zkušeností s chováním lávek a odborných poznatků autoři sestavili systém kritérií komfortu chodců. Tento systém hodnocení je tvořen stupnicí úrovně komfortu v hodnotách okamžitého zrychlení.

Stupnice komfortu je rozdělena do čtyř intervalů zrychlení (odlišné pro svislé a vodorovné kmitání). Při maximálním komfortu chodec skoro nepocítuje, že by konstrukce kmitala. Při střední úrovni komfortu chodec již pocítuje kmitání lávky, které ho však nijak neomezuje. Pro minimální úroveň komfortu je již kmitání na hranici snesitelnosti a hodnoty nad touto hranicí jsou posuzovány již jako nepřijatelná úroveň kmitání.

### 7.2.3.1 Svislé kmitání

Pro maximální úroveň komfortu [13] stanovuje pro svislé kmitání hranici  $0,5 \text{ ms}^{-2}$ . Pro střední úroveň komfortu je stanoven interval  $0,5 - 1,0 \text{ ms}^{-2}$  a minimální komfort odpovídá intervalu  $1,0 - 2,5 \text{ ms}^{-2}$ . Zrychlení nad hranicí  $2,5 \text{ ms}^{-2}$  je posuzováno jako nepřijatelné. (obr. 8)

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

Obr. 8 Kritéria komfortu chodců pro svislé kmitání lávek (Zdroj: SÉTRA [13])

### 7.2.3.2 Vodorovné kmitání

Pro vodorovné kmitání je podle [13] hranicí maximálního komfortu  $0,15 \text{ ms}^{-2}$ . Střední úroveň komfortu odpovídá intervalu  $0,15 - 0,3 \text{ ms}^{-2}$ . Minimálního komfortu je dosaženo při hodnotách zrychlení v intervalu  $0,3 - 0,8 \text{ ms}^{-2}$ . Hodnoty nad touto hranicí jsou již z hlediska komfortu nepřijatelné. [13] také varuje před vznikem lock-in efektu, a proto doporučuje maximální hodnotu vodorovného zrychlení  $0,1 \text{ ms}^{-2}$ . (obr. 9)

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

Obr. 9 Kritéria komfortu chodců pro vodorovné kmitání lávek (Zdroj: SÉTRA [13])

## 8 PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ A ANALÝZU KMITÁNÍ

Mechanické kmitání je lze charakterizovat třemi základními veličinami. Jsou jimi dráha  $u$ , rychlost  $v$  a zrychlení  $a$ . Mezi těmito veličinami platí matematické vztahy podle (13).

To znamená, že měřenou veličinu můžeme zvolit a zaznamenávat pouze ji. Ostatní veličiny pak lze při analýze získat matematickými operacemi podle vztahů (13). Volba snímané veličiny závisí na dané situaci, na zkušenostech experimentátora a jeho technických možnostech.

$$u; v = \frac{du}{dt}; a = \frac{dv}{dt} \quad \wedge \quad a; v = \int a dt; u = \int v dt \quad (13)$$

Měřicí linka (experimentální řetězec) je soustava přístrojů, která má za úkol zaznamenat časový průběh určité veličiny mechanického kmitání. Skladba měřicí linky závisí na typu dynamické zkoušky, měřené veličině a povaze dat, které chceme získat.

Měřicí linka pro měření a analýzu kmitání se ve většině případů skládá z jednoho nebo několika snímačů, zesilovače, měřicí ústředny a řídicího počítače. Zesilovače mohou být samostatnými přístroji, často jsou součástí měřicí ústředny. V některých případech je zesilovač součástí snímače. Pokud je při dynamické zkoušce použit budič, přibývá do měřicí linky také budič, generátor budícího signálu a snímače síly, které sledují dynamické vlastnosti budící síly.

### 8.1 Snímače

Snímač je přístroj, který reaguje na časový průběh měřené veličiny. Obecně můžeme snímač definovat jako přístroj nebo zařízení, který zpracovává informace spjaté s nějakým druhem energie. Během měření dochází k přenosu informací o měřené veličině a transformaci těchto informací v signál (elektrický, mechanický nebo optický) [15]. Pro měření mechanického kmitání se používají snímače některé z veličin charakterizující dynamickou odezvu konstrukce, tzn. snímače dráhy, rychlosti nebo zrychlení.

Konstrukčně lze snímač rozdělit na dvě části – čidlo a převodník. Čidlo je část snímače, která mechanicky reaguje na změny měřené veličiny v závislosti na čase. Mechanické působení na čidlo je převodníkem převáděno na signál fyzikální povahy, který lze dále zpracovávat [14]. K této transformaci energie může docházet přímo (u aktivních snímačů) nebo dochází ke změně nějakého určujícího parametru snímače a tím ke změně toku energie

z externího zdroje (u pasivních snímačů) [15]. Převodníky můžeme mít elektrické, mechanické nebo například optické.

Snímačů mechanického kmitání existuje celá řada. Volba druhu snímače ovlivňuje přesnost a správnost výsledků. Každý typ snímače pracuje na rozdílném fyzikálním principu a jeho vlastnosti jako přesnost, mezní odchylka, měřicí rozsah, citlivost na vnější prostředí atd. jsou pro měření důležité faktory. V některých situacích je dobré využít při měření dvou typů snímačů, aby byly zachyceny všechny potřebné údaje i v případě výpadku nebo nepoužitelnosti dat jednoho z nich.

Frekvenční rozsah snímačů je jedním z faktorů, který určuje frekvenční rozsah, ve kterém může být měření provedeno. Je vhodné nejprve provést teoretický výpočet a poté podle vypočtených důležitých vlastních frekvencí a tvarů zvolit snímače s dostatečným frekvenčním rozsahem. Většina dnešních snímačů kmitání je určena primárně pro účely strojírenského průmyslu, a má proto dostatečně velký frekvenční rozsah. Ve stavební dynamice je potřeba měřit ve srovnání se strojírenstvím nízké frekvence, na které mnoho snímačů není svým rozsahem stavěno. Proto je spíše problém se spodní hranicí frekvenčního rozsahu.

Citlivost snímače na vnější prostředí je velmi důležitý faktor, který často rozhoduje o zvoleném typu snímače. Je nutné uvážit, jakým vlivům bude snímač během měření vystaven. Mezi nepříznivé vnější vlivy patří vlhkost, změny teploty, působení chemických látek, výskyt elektromagnetických polí, vysoká úroveň hluku, radiace, deformace základny uchycení snímače a nedokonalé uchycení snímače. Nedokonalé uchycení může vést ke vzniku dalších rezonančních frekvencí nebo může být zdrojem parazitních kmitů, které by měření znehodnotily [15]. Ke spojení snímače a konstrukce lze využít například epoxidových lepidel, sádry, včelího vosku, šroubového spoje nebo magnetu. Použité uchycení má vliv na použitelný frekvenční rozsah snímače. Uchycení snímače pomocí magnetu přímo na konstrukci nebo na ocelové závaží, které se položí na konstrukci, je velmi častým řešením. Ocelové závaží dostatečné hmotnosti zabraňuje nadskakování snímače během kmitání konstrukce. Problém nastává při kmitání konstrukce se zrychlením blízkým hodnotě gravitačního zrychlení. V tomto případě musí být zvoleno pevné uchycení, aby nedocházelo k nadskakování závaží se snímačem.

Důležité je, aby vlastní frekvence snímače byla rozdílná od vlastní frekvence konstrukce. Pokud by nastala situace, kdy vlastní frekvence snímače je shodná nebo leží blízko vlastní frekvenci konstrukce, dojde k rezonanci snímače a hodnoty měření jsou znehodnoceny [11].

### 8.1.1 Rozdělení snímačů

Snímače mechanického kmitání můžeme rozdělovat podle různých hledisek. Mezi základní hlediska patří dělení podle vztahné soustavy, ve které je veličina měřena. Podle tohoto hlediska dělíme snímače na relativní a absolutní. Dalším základním je dělení podle pracovní funkce převodníku. Toto hledisko dělí snímače na skupinu aktivních a pasivních.

#### 8.1.1.1 Relativní a absolutní snímače

Relativní snímač mechanického kmitání měří vybranou veličinu, jejíž hodnoty jsou vztaženy k libovolně zvolenému bodu. Obecně tedy měříme relativní pohyb mezi dvěma body kmitající soustavy. Pokud je zvolen pevný vztahný bod, pohyb mezi vztahným a měřeným bodem pak odpovídá pohybu absolutnímu. Pevným bodem je myšlen bod mimo konstrukci, který není ovlivněn jiným kmitáním nebo okolním neklidem, nebo část konstrukce, která nekmitá nebo kmitá zanedbatelně. Relativní snímače jsou vhodné pro měření výchylek, zejména jsou využívány ve staticce pro vyhodnocení vzájemného pohybu dvou částí konstrukce. Naopak k měření zrychlení vhodné nejsou.

Absolutní snímač mechanického kmitání měří vybranou veličinu, jejíž hodnoty jsou vztaženy k setrvačné neboli seismické soustavě uvnitř snímače, která plní funkci pevného vztahného bodu.

Celková hmotnost snímače by měla být výrazně nižší než hmotnost měřeného objektu. Konkrétně v [15] je uvedeno, že by hmotnost snímače neměla přesáhnout 1/10 hmotnosti měřené konstrukce. Toto pravidlo ale najde uplatnění spíše v oblasti strojního inženýrství, kde jsou měřené objekty daleko menších rozměrů a hmotností než ve stavebním inženýrství.

#### 8.1.1.2 Aktivní a pasivní snímače

Snímače rozdělujeme z hlediska pracovní funkce převodníku na aktivní a pasivní. To zjednodušeně znamená, zda převodník pro svou funkci potřebuje externí zdroj napájení.

Aktivní snímač se chová při působení měřené veličiny jako zdroj napětí. Funguje tedy jako generátor elektrického napětí, kde změny generovaného napětí jsou úměrné změnám měřené veličiny. Příkladem aktivního snímače je piezoelektrický snímač.

Pasivní snímač naproti tomu nedokáže fungovat bez zdroje napájení ať už střídavého nebo stejnosměrného proudu. Snímač negeneruje žádné napětí, ale změny měřené veličiny způsobují změnu některého z parametrů snímače (materiálové vlastnosti, tvar,...). Změna parametru snímače způsobí změnu velikosti napětí v obvodu, která je úměrná změně

velikosti měřené veličiny [14]. V praxi mezi nejpoužívanější typy pasivních snímačů pak patří snímače odporové nebo indukční.

### 8.1.2 Nejpoužívanější snímače ve stavební dynamice

Snímačů, kterých se v minulosti pro účely stavební dynamiky používalo, existuje celá řada. Některé ze starších typů již patří zcela do historie nebo se používají zcela výjimečně, pokud je pro jejich použití nějaký důvod. V dnešní době patří k nejpoužívanějším typům snímačů kmitání piezoelektrické a elektrodynamické snímače.

#### 8.1.2.1 Piezoelektrické snímače

Princip fungování tohoto druhu snímače je založen na tzv. piezoelektrickém jevu. Piezoelektrický materiál má tu vlastnost, že při mechanickém namáhání generuje elektrický náboj, jehož velikost je úměrná velikosti mechanického namáhání. Jedná se tedy aktivní snímač. Mechanickým namáháním rozumíme setrvačnou sílu seismické hmoty působící při pohybu snímače na piezoelektrický materiál. Příkladem piezoelektrických materiálů používaných do snímací techniky je křemen ( $\text{SiO}_2$ ), titaničitan barnatý ( $\text{BaTiO}_3$ ) nebo zirkoničitan olovnatý  $\text{PbZrO}_3$  [14].

Čidlo snímače je tvořeno krystalem materiálu s piezoelektrickými vlastnostmi a seismickou hmotou. Skříň snímače se pohybuje vzhledem k seismické hmotě s určitým zrychlením a seismická hmota tak působí silou na piezoelektrický materiál, který generuje napětí úměrné působící síle, respektive zrychlení. Tento druh snímače funguje tedy jako akcelerometr (můžeme se na něj koukat i jako na snímač síly) [14],[15]

Výhodou piezoelektrických snímačů je jejich konstrukční jednoduchost a dynamický rozsah pro měření zrychlení – jsou schopny měřit zrychlení v rozmezí  $10^{-3} \text{ ms}^{-2}$  až  $10^6 \text{ ms}^{-2}$ . Frekvenční rozsah se pohybuje v závislosti na typu snímače od 0,1 až do  $10^5 \text{ Hz}$ , a nelze je tedy použít pro měření velmi nízkých frekvencí a statických výchylek [14]. Nevýhodou těchto snímačů je jejich citlivost na okolní hluk, a není je proto vhodné používat v hlučném prostředí, kde by mohly být měřené hodnoty zkresleny.

Piezoelektrických snímačů bylo využito v experimentální části této práce.

#### 8.1.2.2 Elektrodynamické snímače

Tento druh snímačů patří do skupiny indukčních snímačů, které pracují na fyzikálním principu magnetické indukce. Obecně je snímač tvořen cívkou umístěnou v magnetickém poli vytvořeným nejčastěji dutým permanentním magnetem nebo vinutím. Cívka představuje čidlo, na kterém se při pohybu cívky magnetickým polem indukuje napětí. Tento

předpoklad vychází z Faradayova zákona. Ze své fyzikální podstaty se jedná o aktivní snímače rychlosti. [14]

Elektrodynamické snímače mohou být konstruovány jako absolutní i relativní. U relativního snímače je pohyb cívky totožný s pohybem konstrukce. Absolutní verze elektrodynamického snímače má cívku osazenou na setrvačné (seismické) hmotě.

## 8.2 Měřicí ústředna

Měřicí ústředna slouží ke sběru dat přicházejících ze snímačů. Jádrem měřicí ústředny tvoří procesorová jednotka, která načítá data z jednotlivých vstupních kanálů [16]. Vstupním kanálem je zdroj analogového signálu, tzn. snímač.

Zesilovače signálu mohou být součástí ústředny nebo fungují jako samostatné přístroje. V některých případech jsou již součástí snímače.

Jelikož mají dnešní počítače konečnou kapacitu paměti, umí pracovat pouze s digitálním signálem. Digitální signál, je bodová funkce s omezeným počtem vzorků a omezeným počtem funkčních hodnot, kterých může nabývat. Proto jsou sesbírané spojité analogové signály převáděny přes tzv. A/D převodník. Ten je v dnešní době většinou součástí měřicí ústředny, ale může fungovat i jako samostatný přístroj.

## 8.3 A/D převodník

A/D převodník je součástka, která umožňuje převádět analogový signál na digitální signál, který lze dále softwarově zpracovávat. V průběhu převodu dochází k tzv. vzorkování a kvantování signálu [17].

Vzorkování lze zjednodušeně popsat jako rozdělení vodorovné časové osy na rovnoměrné úseky, kde na každý takový časový úsek připadne jeden vzorek z původní analogové funkce [18]. Vzorkovací frekvence je důležitý parametr A/D převodníků a určuje počet vytvořených vzorků za sekundu. Čím vyšší vzorkovací frekvence, tím více detailů z původního analogového signálu zůstane zachováno. Vzorkovací frekvence je tedy kromě frekvenčního rozsahu snímačů dalším faktorem, který jednoznačně určuje frekvenční interval, ve kterém lze měřit.

Protože počítače dokáží vyjádřit čísla jen s omezenou přesností, nemůžou být v digitálním signálu zaznamenány přesné funkční hodnoty původního analogového signálu. Proto signál prochází procesem kvantování, při kterém je každému vzorku přiřazena určitá zaokrouhlená hodnota z konečného počtu hodnot [18]. Počet těchto hodnot je u každého A/D převodníku vyjádřen  $N$ -tou mocninou čísla 2. Čím větší počet řádů, tím je převod do digitálního signálu přesnější.



Je nutné také zmínit tzv. aliasing. K tomuto jevu dochází, když se v analogovém záznamu objevuje frekvence vyšší než polovina vzorkovací frekvence. Pokud tomu tak je, dochází ke zkreslení celého záznamu. Tato frekvence se někdy nazývá jako Nyquistova frekvence a určuje maximální měřitelný frekvenční rozsah pro daný A/D převodník. Aby se tomuto jevu předešlo, je zpravidla součástí A/D převodníku antialiasingový filtr. Jedná se o filtr s dolní propustí, předřazený převodníku, který ze záznamu odfiltruje frekvence, které jsou nad hranicí Nyquistovy frekvence. [19]

## 8.4 Budiče

Budič je zařízení sloužící jako zdroj vnější dynamické síly, která vyvolá odezvu konstrukce. Konstrukce budičů se liší podle typu, respektive fyzikálního principu, na kterém pracují, ale obecně u všech budičů je budící síla důsledkem pohybu nevyvážené hmoty nebo několika hmot umístěných v budiči. Důležitými parametry budiče jsou jeho hmotnost, hmotnost nevyvážené hmoty a charakter budící síly. Existují budiče pro svislé i vodorovné kmitání.

Ve stavební praxi se nejčastěji používají budiče pracující na mechanickém, elektrodynamickém nebo hydraulickém principu [2]. Podle [11] se využívá nejčastěji právě elektrodynamických budičů.

## 9 DYNAMICKÁ ZKOUŠKA NA LÁVCE PRO PĚŠÍ V DOBŘICHOVICÍCH

### 9.1 Úvod

V této části práce je popsána příprava, realizace a vyhodnocení experimentu, konkrétně dynamické zatěžovací zkoušky, na stávající lávce pro pěší přes Berounku v Dobřichovicích (obr. 10). Důvody k vybrání této lávky byly již uvedeny v úvodu práce. Jedním z cílů prací bylo experimentálně zjistit modální charakteristiky konstrukce a vyhodnotit shodu s hodnotami z teoretického modelu [20] podle ČSN 73 6209, Změna Z1 [5]. Hlavním cílem pak bylo prověřit chování lávky při vynuceném kmitání a následně posoudit na základě kritérií komfortu chodců stanovených v ČSN EN 1990 [12], ČSN 73 6209 [4], a technického předpisu SÉTRA [13].

V rámci prací byla provedena experimentální modální analýza a dynamická zatěžovací zkouška. Během zkoušky nebyl přerušen ani omezen běžný provoz na lávce. Dynamická zatěžovací zkouška v tomto případě nahrazuje teoretický výpočet.

Podkladem pro přípravu dynamické zkoušky (volba polohy snímačů) byly vlastní frekvence a tvary z teoretického výpočtu [20] provedeného Karolínou Berkovou v rámci její bakalářské práce.

Dynamická zkouška proběhla dne 6. 4. 2017. Zkouška byla provedena za asistence prof. Ing. Michala Poláka, CSc. a Ing. Tomáše Plachého, Ph.D..



Obr. 10 Lávka v Dobřichovicích

## 9.2 Stručná historie objektu

Lávka se nachází v Dobřichovicích nedaleko Prahy, kde přemostňuje tok řeky Berounky a spojuje ulici 5. května a ulici Všenorská. Tvoří důležitou dopravní komunikaci pro pěší mezi dvěma řekou oddělenými částmi Dobřichovic. Na pravém břehu po směru toku je umístěna železniční zastávka Dobřichovice na trati Praha – Beroun (obr. 11). Tato trať hraje významnou roli v dopravní obsluze příměstských oblastí jihozápadně od Prahy. Lávka tvoří nejkratší spojení železniční stanice a levého břehu Berounky a zajišťuje tak dostupnost železniční dopravy pro občany Dobřichovic.

Lávka byla postavena v roce 2003 jako náhrada za původní lávku, která byla zničena při záplavách v roce 2002. Nová lávka nese jméno profesora K. Lewita. Při návrhu bylo cílem navrhnout lávku, která je nejenom na kvalitní technické úrovni a odpovídá současným normám, ale především také aby dokázala odolat dalším případným záplavám podobných rozměrů, jako byla velká voda v roce 2002. Z tohoto důvodu lávka na rozdíl od své předchůdkyně přemostňuje i inundační území na levém břehu Berounky, po kterém nyní vede cyklostezka. Projekt byl zpracován firmou TopCon Servis s.r.o. s vedoucím projektu Ing. P. Dobrovským a zodpovědným projektantem Ing. O. Lojíkem. Hlavním dodavatelem byla firma SDS Exmost a důležitým subdodavatelem byla firma Vítkovice a.s., která byla pověřena výrobou a montáží nosné ocelové konstrukce.



Obr. 11 Letecký pohled na lávku v Dobřichovicích

(Zdroj: <https://mapy.cz/zakladni?x=14.2825880&y=49.9285645&z=17&base=ophoto&source=muni&id=4241>)

### 9.3 Popis objektu

Jedná se o zavěšenou ocelovou spojitou trémovou konstrukci o 2 polích s rozpětím 88 + 92 m s dolní spřaženou železobetonovou mostovkou. Šířka nosné konstrukce je 3,80m a délka nosné konstrukce 180,60m. Šířka průchozího prostoru je 3,00m. Podélný sklon nosné konstrukce je po délce proměnný – ve směru staničení v úseku 0,0-63,0m je podélný sklon +2,55%, v úseku 63,0 – 113,0m se nachází vrcholový oblouk  $R=1097,7m$ , který přechází v podélný sklon -2,4% v úseku.

Vodorovná nosná konstrukce je zavěšena na 34,6m vysoký ocelový pylon tvaru A pomocí systému 4 dvojic lanových závěsů (obr. 13). Lanové závěsy jsou tvořeny kabely ze 14 předpínacích lan (kratší závěsy) a 16 předpínacích lan (delší závěsy) specifikace 15.7-1570/1770. Na chrániče závěsu je vytvořeno vinutí, které má zabránit rozkmitávání lan od větru. Vodorovnou nosnou konstrukce tvoří dva hlavní ocelové svařované nosníky profilu I proměnné výšky 1200 -1400mm. Osová vzdálenost hlavních nosníků je na celé lávce 3400mm. V oblasti ukotvení závěsů dochází k navýšení hlavních nosníků na 1400mm. V této oblasti zároveň profil nosníku přechází plynulým náběhem z profilu I do uzavřeného obdélníkového profilu. Horní pásnice nosníku je po celé délce konstrukce zarovnána do roviny a výškový náběh je realizován pouze na spodní pásnici (obr. 14 a 15). V osově vzdálenosti 2,0m jsou hlavní nosníky svisle vyztuženy dutými ocelovými výztuhami tloušťky stěny 6mm. Půdorysně v osově vzdálenosti 2m (v místě výztuh) jsou nosníky propojeny ocelovými příčnicími profilu I (obr. 12). Rozměry průřezů příčnicíků nejsou po celé délce konstrukce jednotné. V ose lávky jsou příčnicíky spojeny podélníkem I průřezu (obr. 12). Mostovka je tvořena spřaženou železobetonovou deskou z betonu C30/37 – XF1 a její tloušťka je 120 – 142,5mm. Odvodnění desky je provedeno příčným sklonem 1,5% k ose mostu, kde jsou v osově vzdálenosti 10m umístěny odvodňovače. Spřažení je zajištěno pomocí spřahovacích trnů z oceli 11343.

Obě opěry jsou založeny na 6 ŽB mikropilotách délky 4,0m a pylon je založen na ŽB patce, která je založena na 8 velkopřůměrových ŽB pilotách. Celá spodní stavba je z betonu C30/37 – XF1.

Vodorovná nosná konstrukce je na opěrách uložena na dvojice příčně pevných hrncových ložisek s teflonovým kluzným dílem pro celkový délkový podélný posun 120mm. Na pylonu jsou hlavní nosníky uloženy na dvojici všesměrně pevných hrncových ložisek. Mostu je tedy umožněna dilatace do obou směrů od pylonu k opěrám, kde jsou instalovány jednoduché ocelové povrchové mostní závěry pro celkový posun 120mm. [22]



Obr. 12 Spodní pohled na nosnou konstrukci



Obr. 13 Boční pohled na lávku



Obr. 14 Navýšení hlavních nosníků v oblasti ukotvení závěsů



Obr. 15 Pohled na 1. pole

## 9.4 Měřící linka

Kmitání lávky bylo měřeno absolutními snímači zrychlení Brüel&Kjaer 8344. Jedná se o nízkofrekvenční seismické piezoelektrické snímače s pracovním rozsahem 0,2Hz až 3kHz, citlivostí přibližně 2500 mV/g a vlastní frekvencí 10kHz. Pracovní teplotní rozsah je od -50°C do +100°C. Příčná citlivost snímače je menší než 5%. Během měření byly snímače připevněny magnetem na ocelová závaží (obr. 16 a 17).

Pro měření byla použita 4-kanálová měřící ústředna Brüel&Kjaer 3050-B s maximálním frekvenčním rozsahem 51,2 kHz s 24bitovým A/D převodníkem.

Při modální analýze lávky byla data zaznamenávána softwarem PULSE (Brüel&Kjaer, Dánsko). Následná analýza záznamů proběhla v softwaru ME'scope VES (Vibrant Technology Inc., USA). Při dynamické zatěžovací zkoušce lávky byla data zaznamenávána softwarem PULSE (Brüel&Kjaer, Dánsko). Následná analýza záznamů proběhla v softwaru Material Damping (prof. Ing. Michal Polák, CSc.).



Obr. 16 Upevnění snímače na ocelové závaží

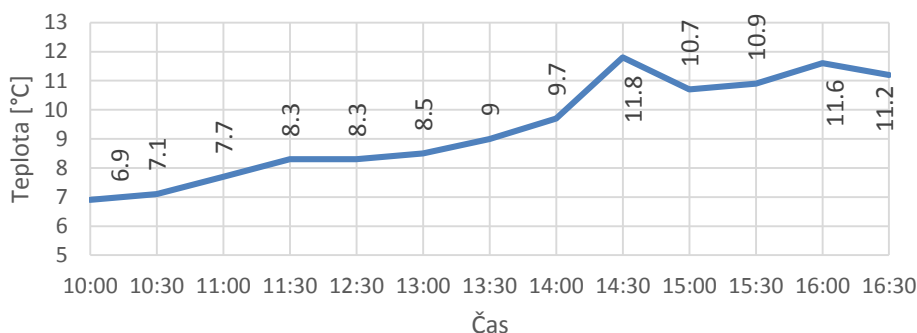


Obr. 17 Upevnění snímačů na ocelové závaží

## 9.5 Nejistoty měření

Meteorologické podmínky v době provádění dynamické zatěžovací zkoušky byly pro měření příznivé. V době měření bylo polojasno až slunečno a teplota okolního prostředí se pohybovala mezi 7°C a 12°C. Průběh teplot zaznamenaný místní meteorologickou stanicí Dobřichovice je zobrazen na obr. 18. Použité piezoelektrické snímače zrychlení jsou za těchto teplot použitelné, a proto se vliv teploty neprojevil změnou vlastností snímačů a neměl

vliv na nejistotu měření. Upevnění snímačů a použitá kabeláž splňovaly požadavky výrobce a neměly tak v měřené frekvenční oblasti vliv na nejistotu měření.



Obr. 18 Graf průběhu teplot během dynamické zkoušky

## 9.6 Program dynamické zkoušky

Dynamická zatěžovací zkouška proběhla dne 6. 4. 2017. Časový program dynamické zkoušky byl následující:

- příprava dynamické zkoušky 9:00 – 10:30
- experimentální modální analýza 10:30 – 13:00
- dynamická zatěžovací zkouška 13:30 – 17:00

V dopoledních hodinách byla tedy nejprve provedena experimentální modální analýza (odpovídá obsahem dynamické zkoušky informativní definované v ČSN 73 2044 [3]). V odpoledních hodinách byla následně na základě hodnot vlastních frekvencí vyhodnocených on-line z orientační modální analýzy provedena dynamická zatěžovací zkouška. Odezva konstrukce na vynucené kmitání byla prověřena zatěžovacími stavy stanovenými ČSN 73 6209 [4] a vandalismem.

## 9.7 Experimentální modální analýza

Na konstrukci nebyla nikdy v minulosti provedena žádná dynamická zkouška a nebyly tak dosud známy skutečné modální charakteristiky konstrukce. Cílem provedené modální analýzy bylo zjištění skutečných vlastních frekvencí a příslušných vlastních tvarů a následné porovnání s teoretickými hodnotami [20].

### 9.7.1 Příprava a průběh zkoušky

Jelikož se jedná o ocelovou spřaženou konstrukci, u které se předpokládá nízký útlum, byla zvolena pro provedení modální analýzy metoda Ambient Vibration Testing (AVT).



Předpokládaný nízký útlum a rozměry konstrukce nasvědčovaly, že odezva konstrukce by měla být pro tuto metodu dostačující. Během experimentu nemohl být na lávce přerušen ani omezen provoz a případné využití budiče a metody FVT by tak nebylo vhodným a také ekonomickým řešením.

Na konstrukci bylo pro modální analýzu zvoleno 17 příčných řezů, ve kterých probíhalo měření. Takový počet řezů byl zvolen, aby bylo možné vyhodnotit dostatečný počet tvarů a zároveň bylo možné experiment provést za jeden den. V každém řezu byly měřeny vždy dva body. Oba body byly umístěny přibližně ve vzdálenosti 5cm od příslušného bližšího nosníku. Měřené body byly ve směru od ulice 5. května pracovně označeny číslem příslušného řezu od 1 do 17 a číslem 1-2 pro polohu v řezu (levá strana =1; pravá strana =2). Poloha měřených řezů s označenými body je zakreslena do zjednodušené situace na obr. 19.



Obr. 19 Zjednodušená situace s vyznačením sítě měřených bodů

Při volbě vhodné polohy referenčního snímače se vycházelo z vlastních tvarů získaných teoretickým výpočtem [20]. Podle doporučených požadavků na polohu referenčního snímače uvedených v [2] byla jako nejvhodnější poloha vyhodnocen řez ve vzdálenosti 3m ve směru od levého břehu za prvním kotvením závěsů v 1. poli (obr. 20). V tomto místě měla většina vlastních tvarů z výpočtu do frekvence 5Hz alespoň nějakou dostatečně velkou pořadnici, aby bylo možné tyto tvary zachytit. Problematicky zachytitelné měly být pouze vodorovné a kroutivé vlastní tvary, které měly mít podle výpočtu [20] větší výchylky v 2. poli.

Konstrukce byla buzena silovými impulzy vyvolanými poskoky figurantů. Jako nejvhodnější místo pro buzení konstrukce bylo zvoleno místo v řezu s referenčním snímačem (pro volbu místa pro buzení konstrukce platí stejné požadavky jako pro volbu referenčního bodu).

Bylo měřeno čtyřmi snímači zrychlení přichycenými magnetem na ocelová závaží položená na mostovce. V bodech (1-17)1 bylo měřeno ve svislém směru, v bodech (1-17)2 ve svislém i vodorovném směru (kolmo na hlavní nosníky) a v referenčním bodě pouze svisle.

Měření probíhalo od řezu 17 směrem k řezu 1. Pro každý řez byl vytvořen jeden záznam a poté byla sestava snímačů přemístěna do dalšího řezu. Poloha referenčního snímače se během měření neměnila. V každém řezu bylo měřeno po dobu pěti minut, aby záznamy dostatečně vypovídaly o odezvě konstrukce.



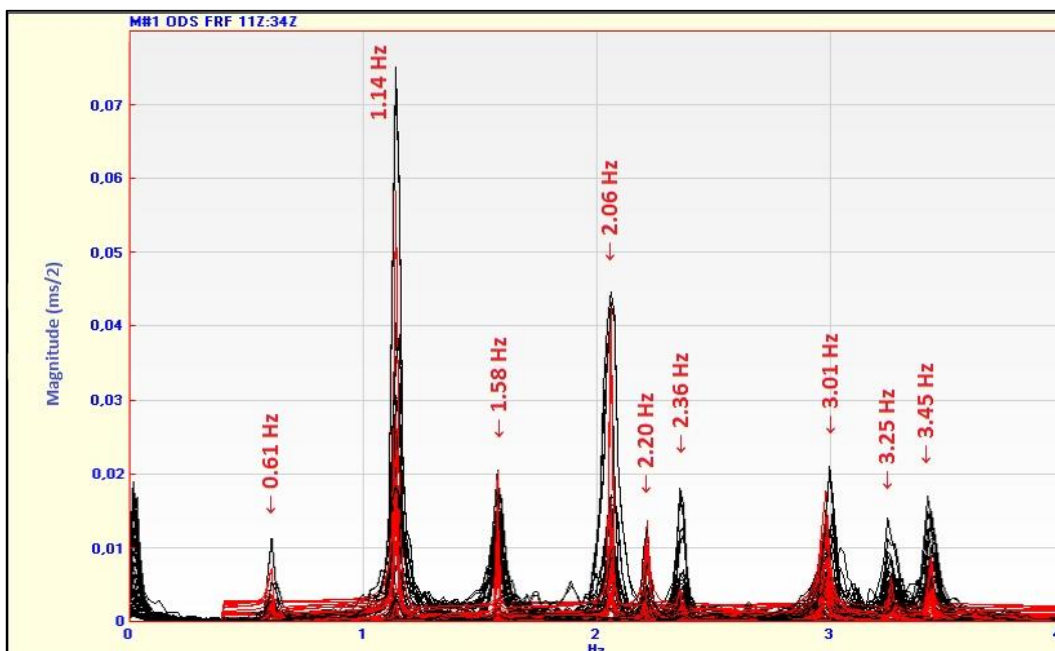
Obr. 20 Poloha referenčního snímače

### 9.7.2 Vyhodnocení vlastních frekvencí a vlastních tvarů

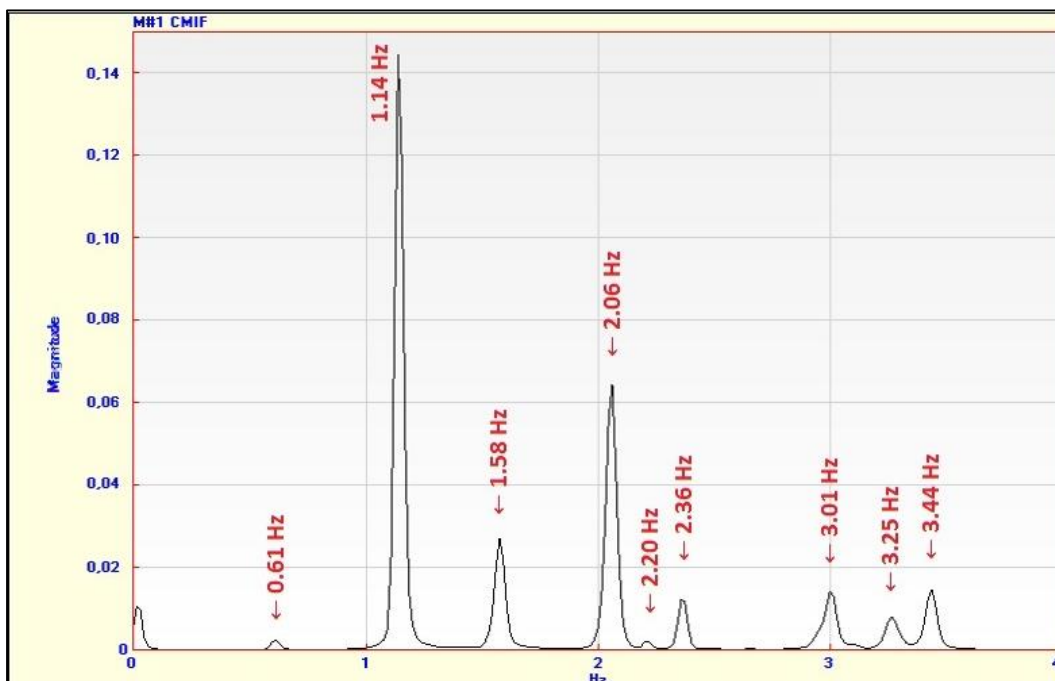
Pro vyhodnocení modální analýzy bylo k dispozici sedmnáct pětiminutových záznamů pořízených v každém ze zvolených řezů. Každý záznam obsahoval hodnoty zrychlení naměřené referenčním snímačem a třemi snímači v řezu.

Zpracování záznamů probíhalo v programu ME'scopeVES. Naměřené signály ze všech kanálů byly nejprve převedeny FFT analýzou z časové do frekvenční oblasti. Z takto upravených signálů byly vyhodnoceny frekvenční přenosové funkce pracovních tvarů kmitání ODS FRF pomocí kterých byly vyhodnoceny vlastní frekvence konstrukce (princip vyhodnocení je vysvětlen v kapitole 6). Pro přehlednější určení vlastních frekvencí byla programem vyhodnocena tzv. CMIF (Complex Mode Indicator Function) zobrazená na obr. 22. Graf přenosových funkcí s vyznačenými vlastními frekvencemi je znázorněn

na obr. 21. Vzhledem k počtu řezů, byl vyhodnocen pouze soubor prvních devíti zachycených vlastních frekvencí, neboť vyšší vlastní tvary už nebylo možné kvůli počtu bodů přesně vyhodnotit. Ostatně norma [5] vyžaduje pouze zjištění tzv. základního souboru vlastních tvarů, a proto zkouškou zjištěných devět tvarů z tohoto pohledu zcela dostačuje.



Obr. 21 Graf ODS FRF s vyznačenými vlastními frekvencemi



Obr. 22 Graf CMIF s vyznačenými vlastními frekvencemi

Vzhledem k tomu, že byla použita metoda AVT a nebyly všechny řezy měřeny najednou, nelze určit vlastní tvary z frekvenční přenosové funkce ODS FRF. Pořadnice

vlastních tvarů v měřených bodech totiž neodpovídají hodnotám lokálních maxim ODS FRF. Díky tomu, že intenzita silových impulzů kolísala, je potřeba převést hodnoty z jednotlivých záznamů do stejného měřítka vůči amplitudám naměřeným v referenčním bodu. Toto bylo provedeno v programu ME'scopeVES pomocí funkce *Transmissibility*, ze které byly vyhodnoceny vlastní tvary konstrukce. Hodnoty vyhodnocených vlastních frekvencí s popisem charakteru příslušného vlastního tvaru jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Vlastní frekvence a tvary

Pořadí (j)	Vlastní frekvence $f_{(j)}$ [Hz]	Charakter vlastního tvaru kmitání
(1)	<b>0.61</b>	1. vlastní tvar svislého ohybového kmitání
(2)	<b>1.14</b>	2. vlastní tvar svislého ohybového kmitání
(3)	<b>1.58</b>	3. vlastní tvar svislého ohybového kmitání
(4)	<b>2.06</b>	4. vlastní tvar svislého ohybového kmitání
(5)	<b>2.20</b>	1. vlastní tvar kroutivého kmitání
(6)	<b>2.36</b>	2. vlastní tvar kroutivého kmitání
(7)	<b>3.01</b>	5. vlastní tvar svislého ohybového kmitání
(8)	<b>3.25</b>	3. vlastní tvar kroutivého kmitání
(9)	<b>3.45</b>	6. vlastní tvar svislého ohybového kmitání

Když uvážíme nejběžnější krokový interval pro chůzi 1,7 – 2,2 Hz a běh 2,2 – 2,7 Hz [21], mezi potencionálně nebezpečné vlastní frekvence patří čtvrtá vlastní frekvence se svislým ohybovým vlastním tvarem a dále pátá a šestá vlastní frekvence (2,20 a 2,36 Hz), obě s kroutivým vlastním tvarem. Sedmá vlastní frekvence 3,01 Hz se svislým ohybovým vlastním tvarem a osmá vlastní frekvence 3,25 Hz s kroutivým tvarem vlastního kmitání patří již do frekvenčního intervalu, který odpovídá rychlému běhu.

Ze zjištěných vlastních frekvencí je určitě z hlediska dynamických účinků chodců nejzajímavější a potencionálně nejnebezpečnější 4. vlastní frekvence 2,06 Hz se svislým ohybovým tvarem kmitání, která odpovídá té úplně nejpřirozenější krokové frekvenci lidské chůze. Vzhledem k tomu, že se lávka nachází v blízkosti cyklostezky a tvoří hlavní spojení města s nádražím, můžou být nebezpečné i vyšší vlastní frekvence (lidé si jdou zaběhat nebo například spěchají na vlak).

Z těchto důvodů lze konstatovat, že provedení dynamické zatěžovací zkoušky na této lávce je skutečně opodstatněno a je tak stanoveno i normou ČSN EN 1990 [12]. Podle této normy se má prověřit odezva konstrukce, pokud je první vlastní frekvence pro svislé kmitání

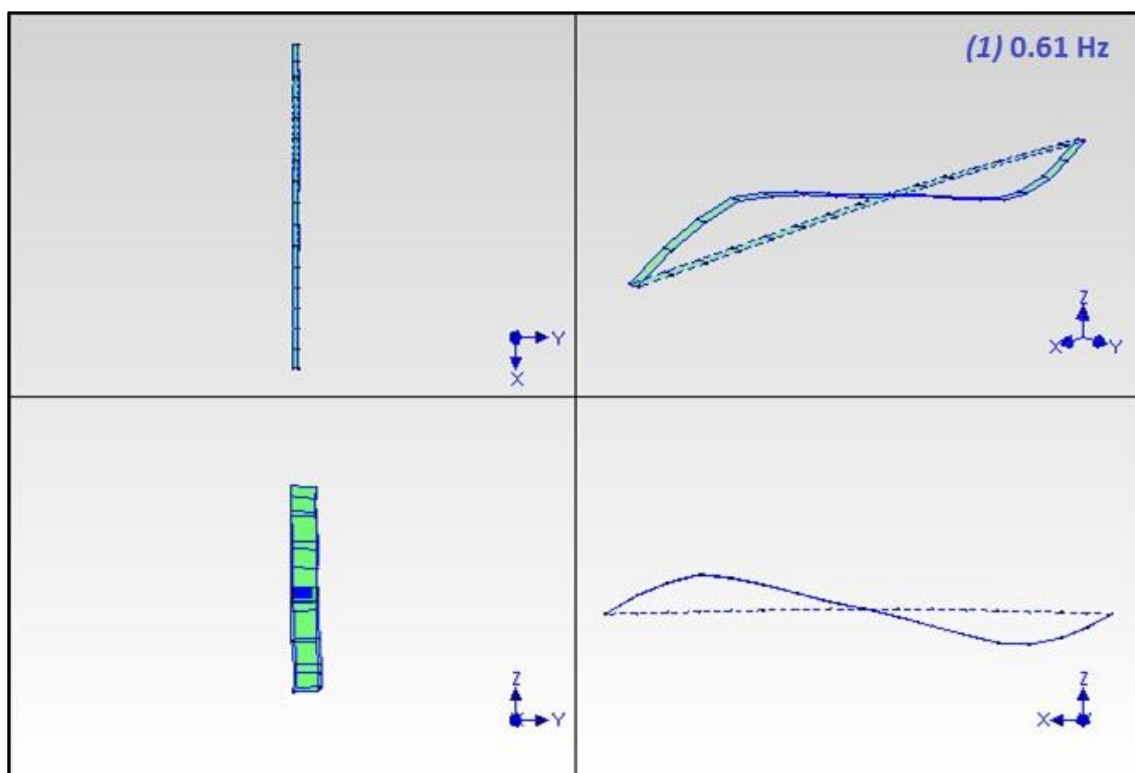
nižší než 5 Hz nebo pro vodorovný nižší než 2,5 Hz. V případě této lávky je splněna první podmínka. Vodorovný tvar při měření nebyl zachycen (více v kapitole 9.7.4).

### 9.7.3 Obrázky vyhodnocených vlastních tvarů

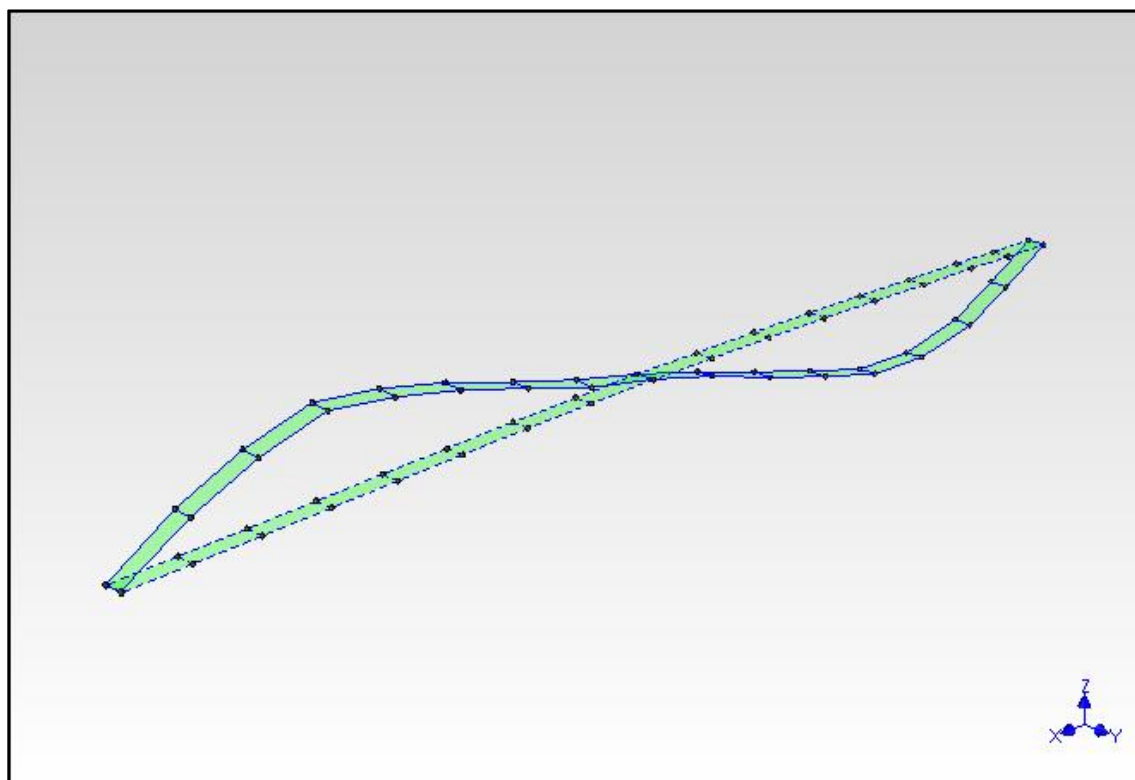
Na obr. 23 až 40 je zobrazeno prvních devět vlastních tvarů, které byly vyhodnoceny. Z posledních vlastních tvarů je zřetelné, že vyhodnocení vyšších tvarů by právě díky počtu měřených bodů nebylo relevantní.

Grafické zobrazení vlastních tvarů je převzato z programu ME'scopeVES, ve kterém bylo vyhodnocení celé modální analýzy provedeno. Program pracuje s pootočeným souřadným systémem, a proto je lávka zobrazena opačně, než tomu je na zjednodušené situaci na obr. 19.

## 1. VLASTNÍ TVAR

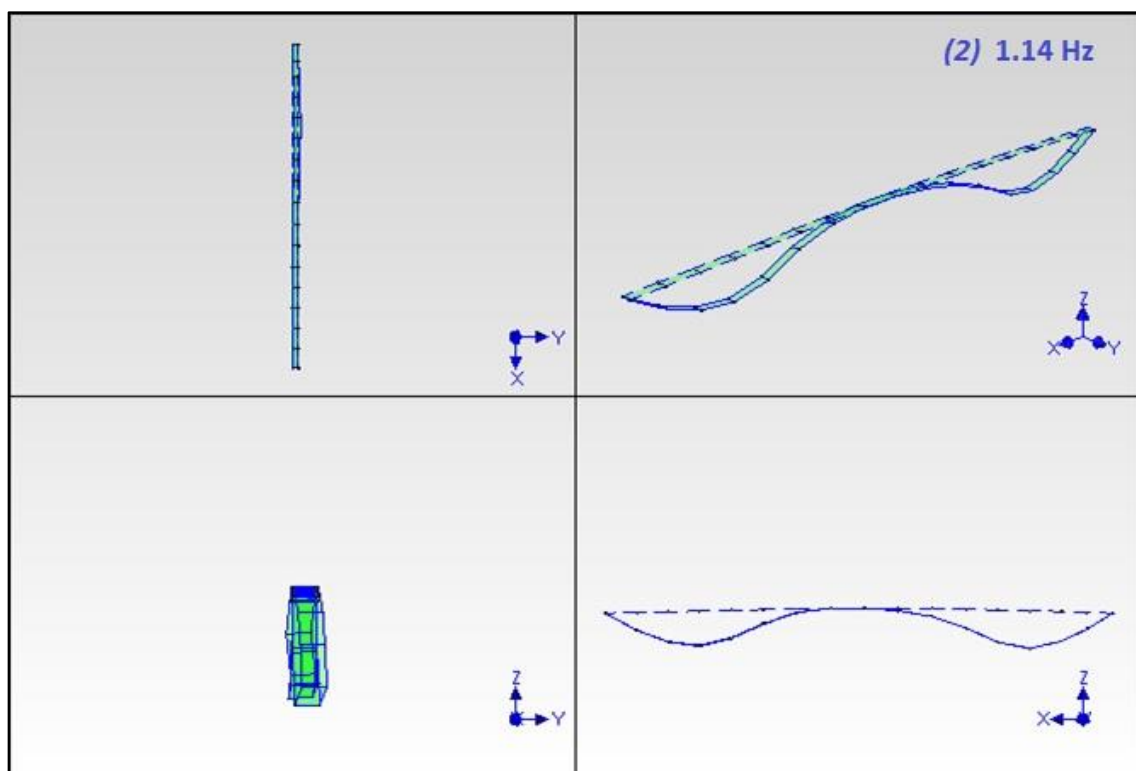


Obr. 23 1. vlastní tvar

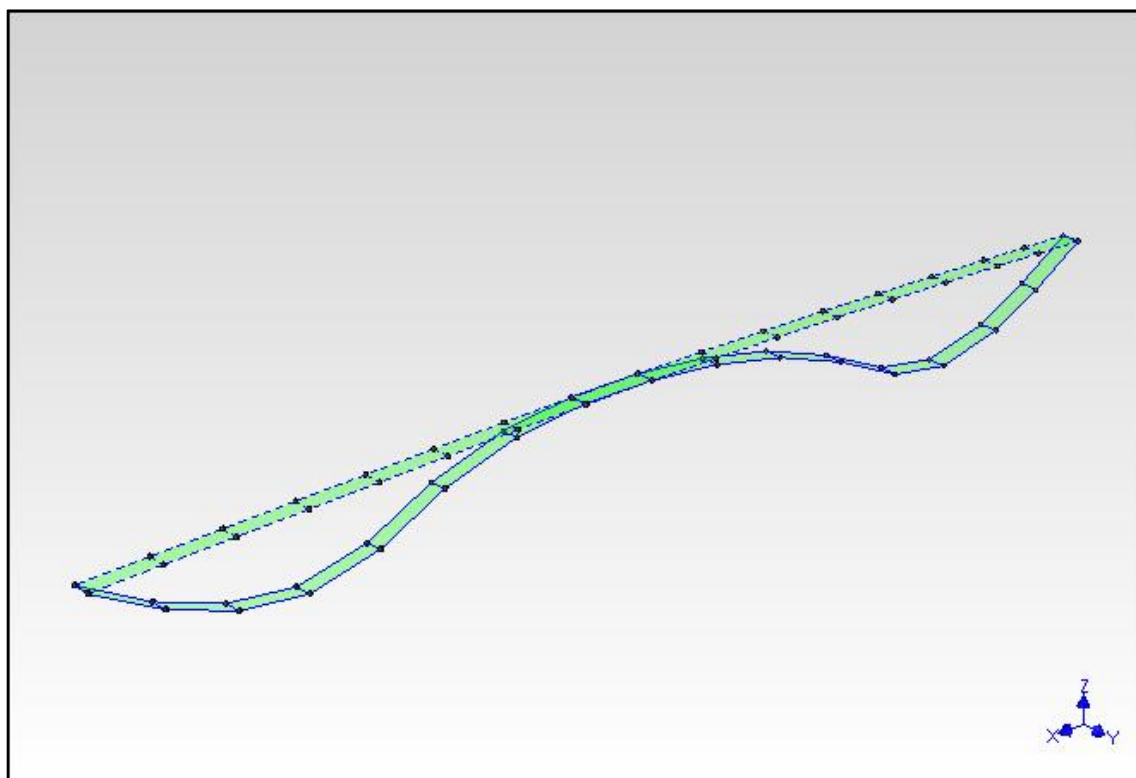


Obr. 24 1. vlastní tvar detailně v axonometrii

## 2. VLASTNÍ TVAR

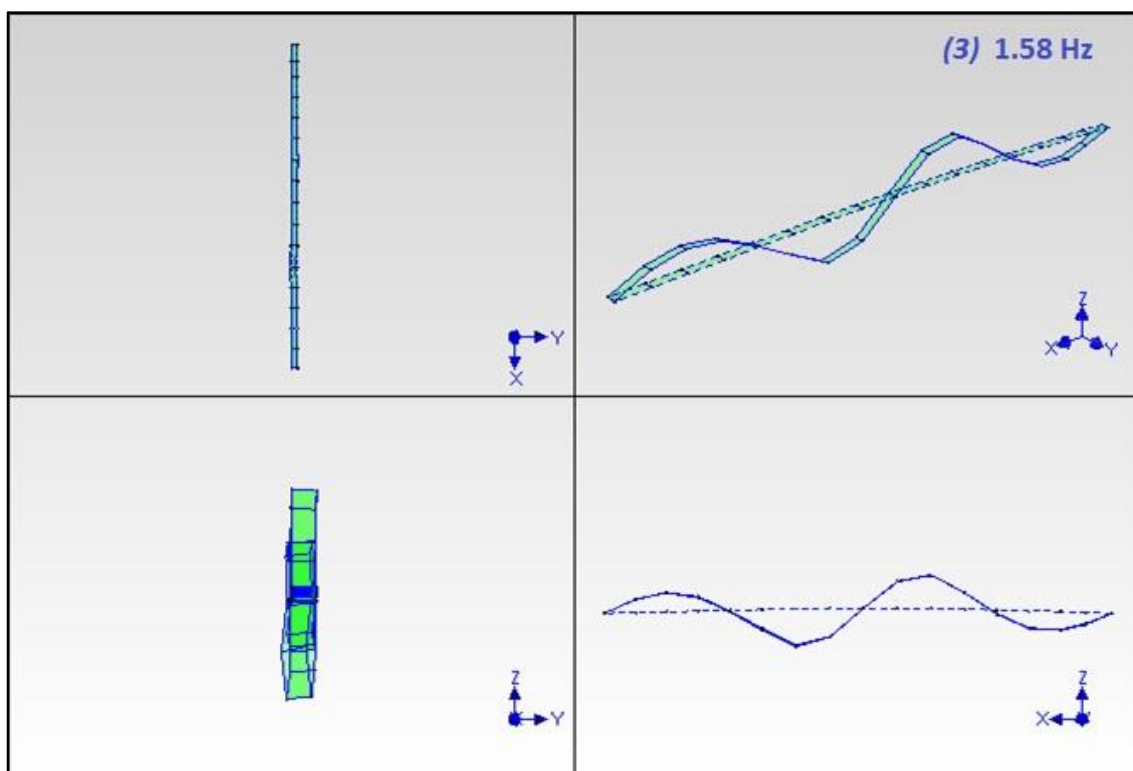


Obr. 25 2. vlastní tvar

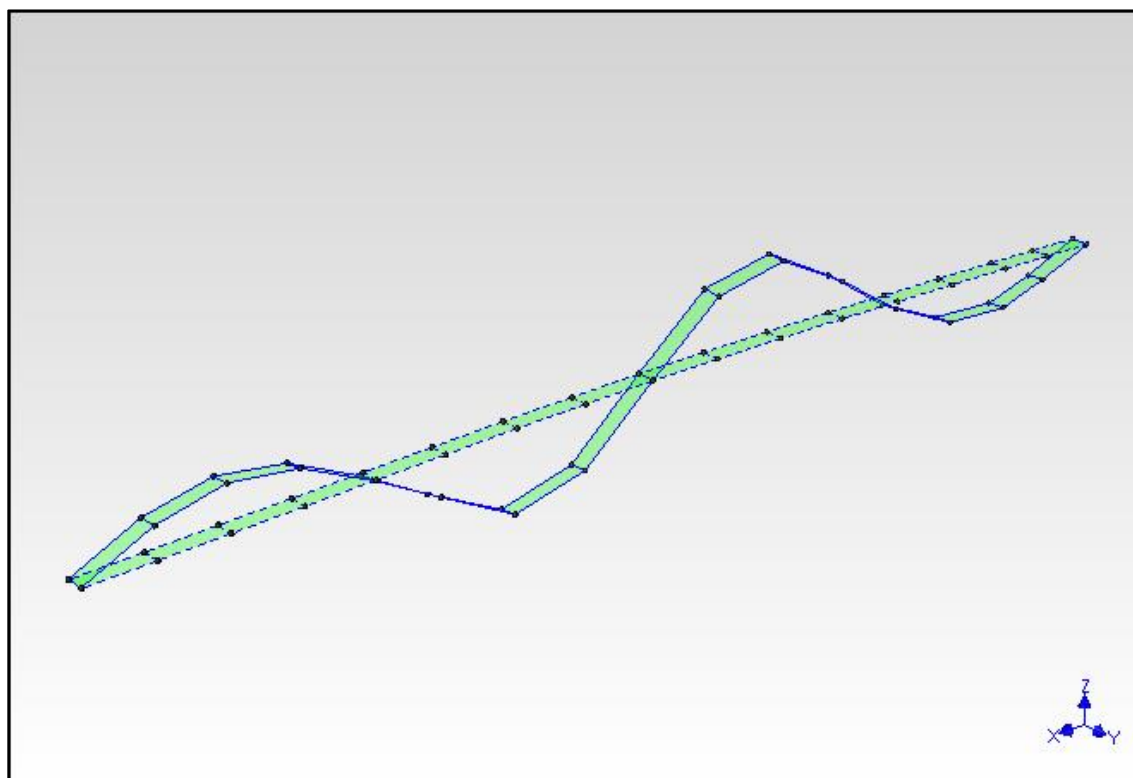


Obr. 26 2. vlastní tvar detailně v axonometrii

### 3. VLASTNÍ TVAR



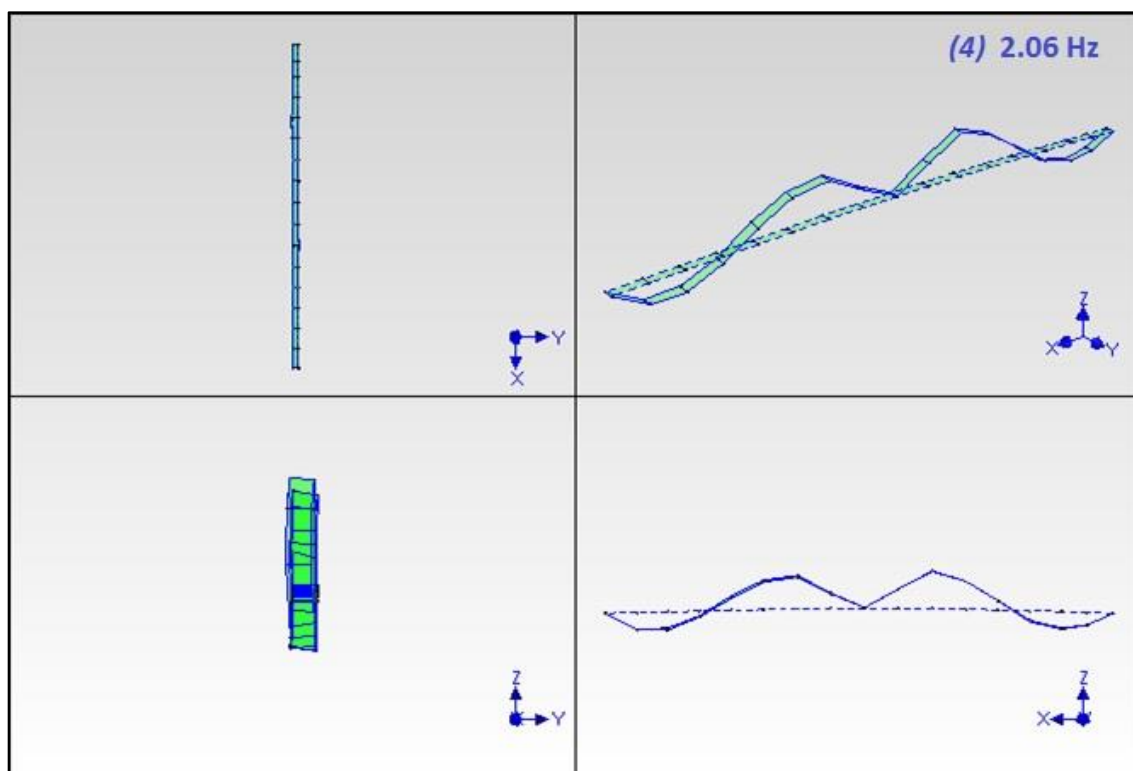
Obr. 27 3. vlastní tvar



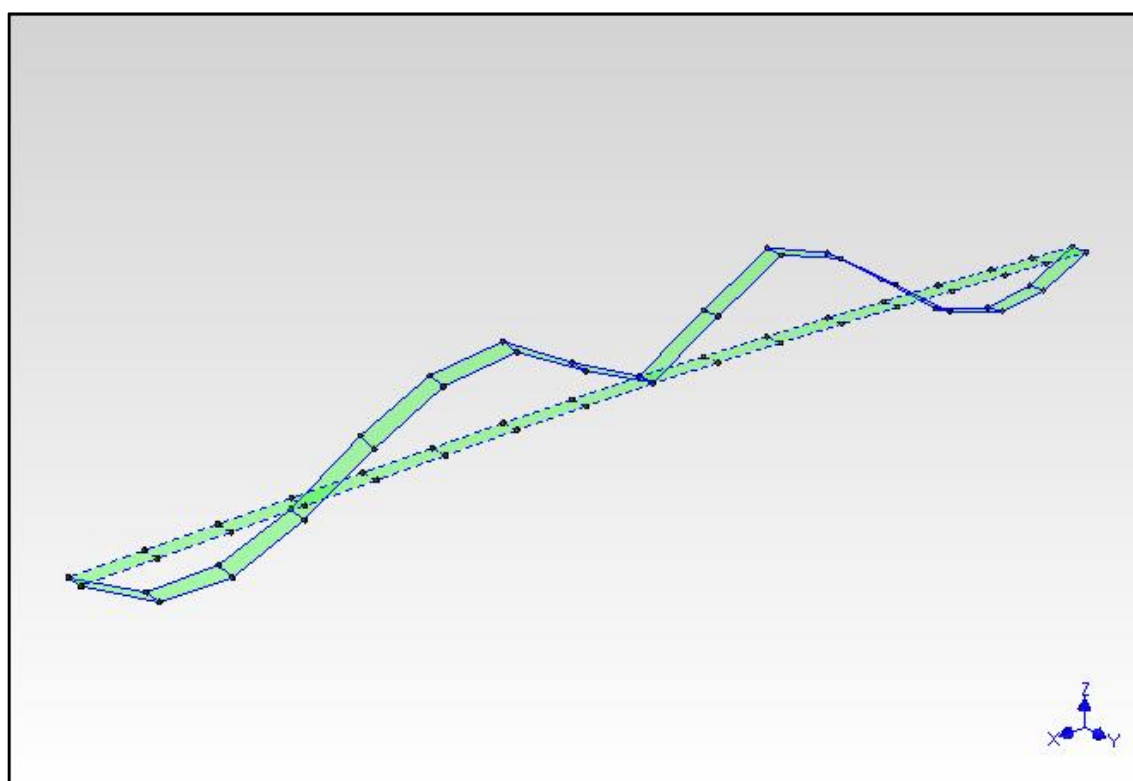
Obr. 28 3. vlastní tvar detailně v axonometrii



## 4. VLASTNÍ TVAR

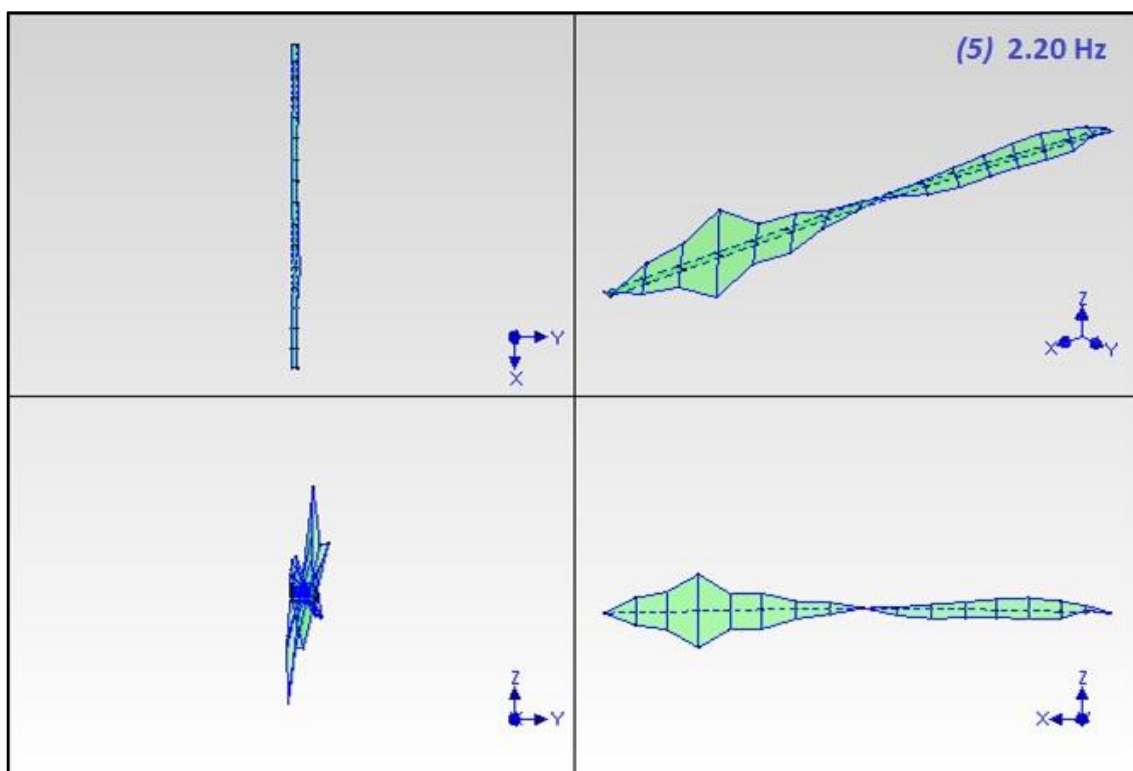


Obr. 29 4. vlastní tvar

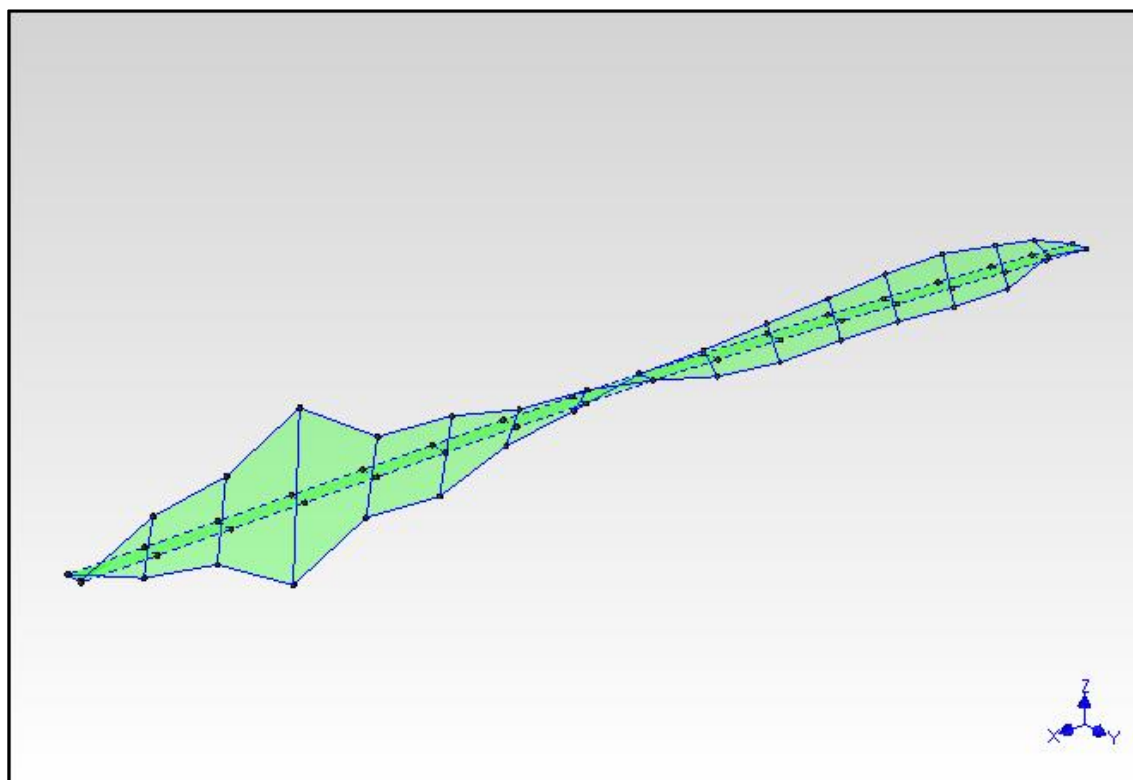


Obr. 30 4. vlastní tvar detailně v axonometrii

## 5. VLASTNÍ TVAR

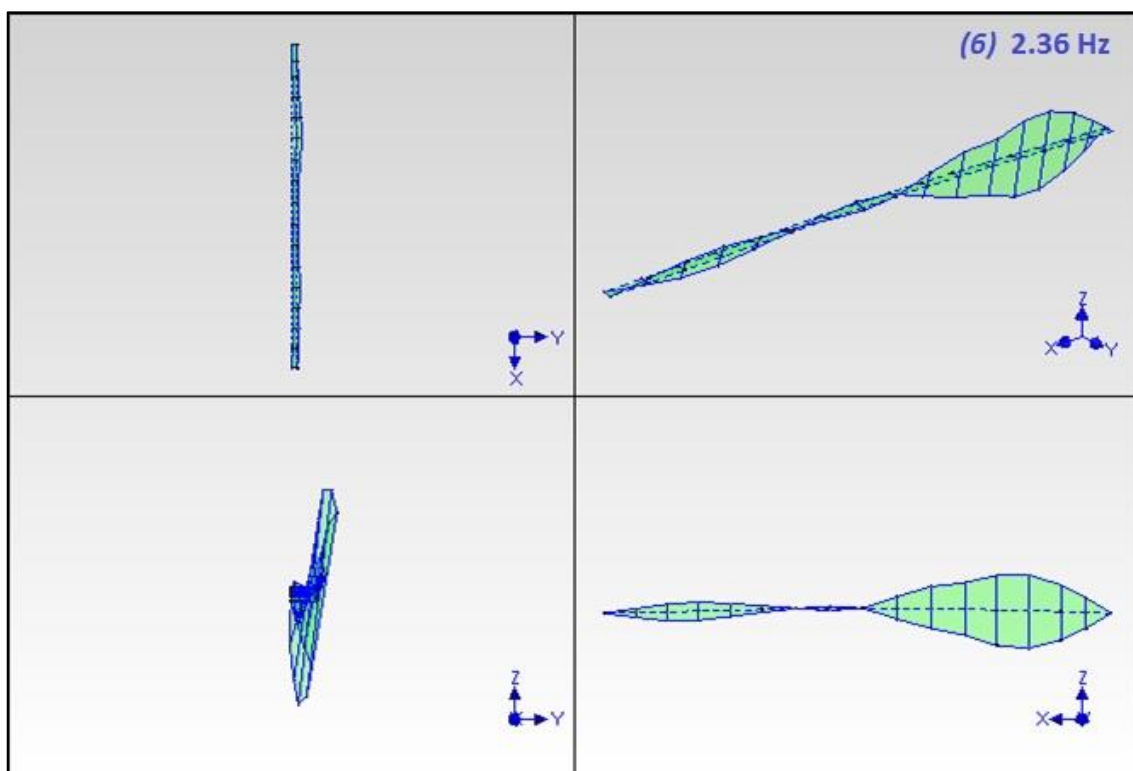


Obr. 31 5. vlastní tvar

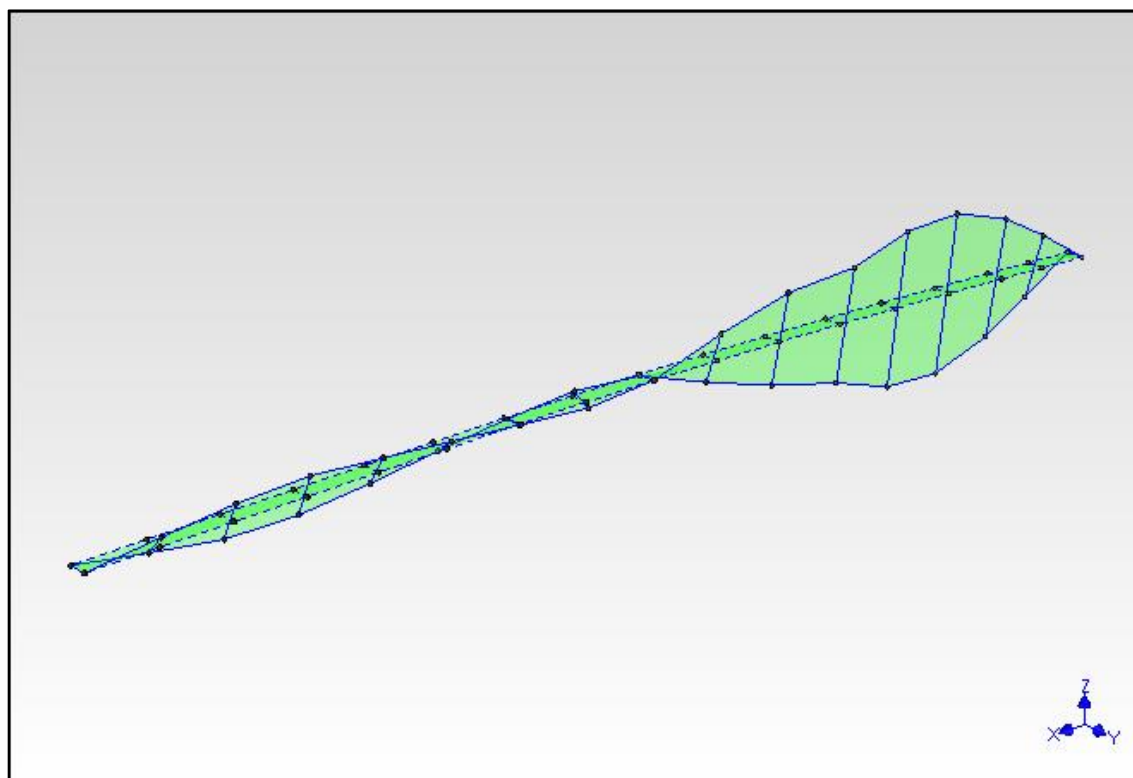


Obr. 32 5. vlastní tvar detailně v axonometrii

## 6. VLASTNÍ TVAR

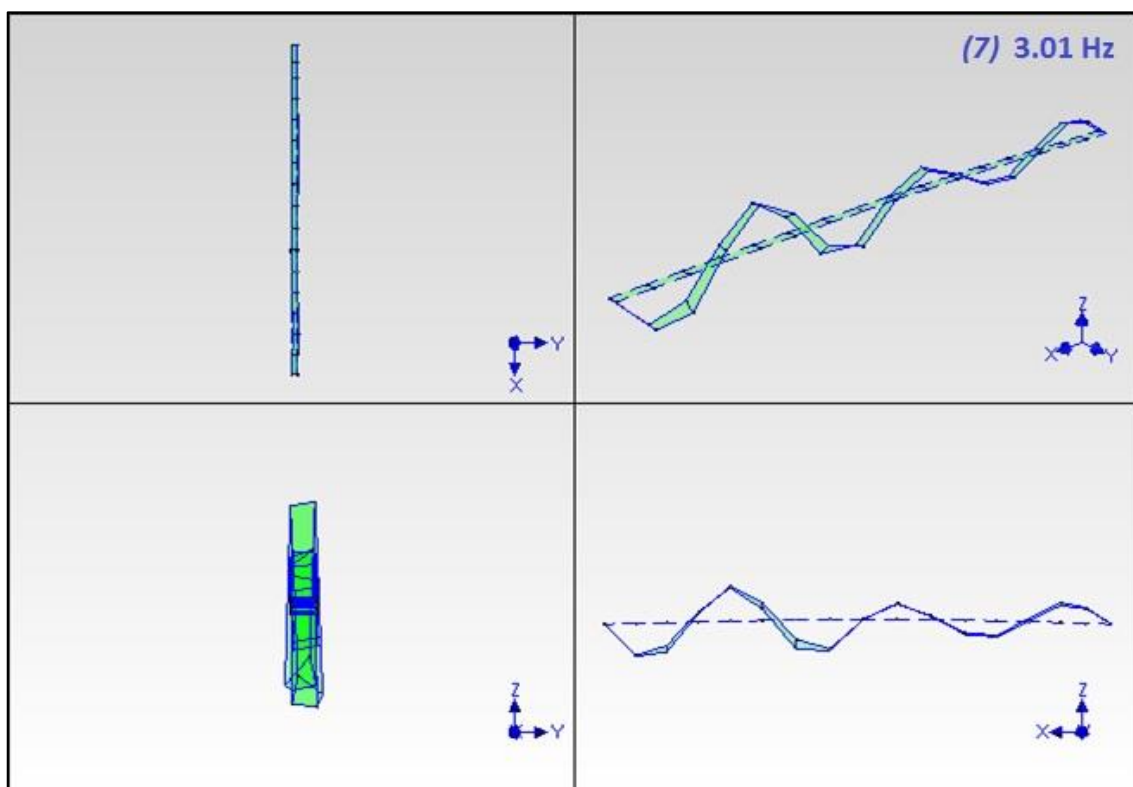


Obr. 33 6. vlastní tvar

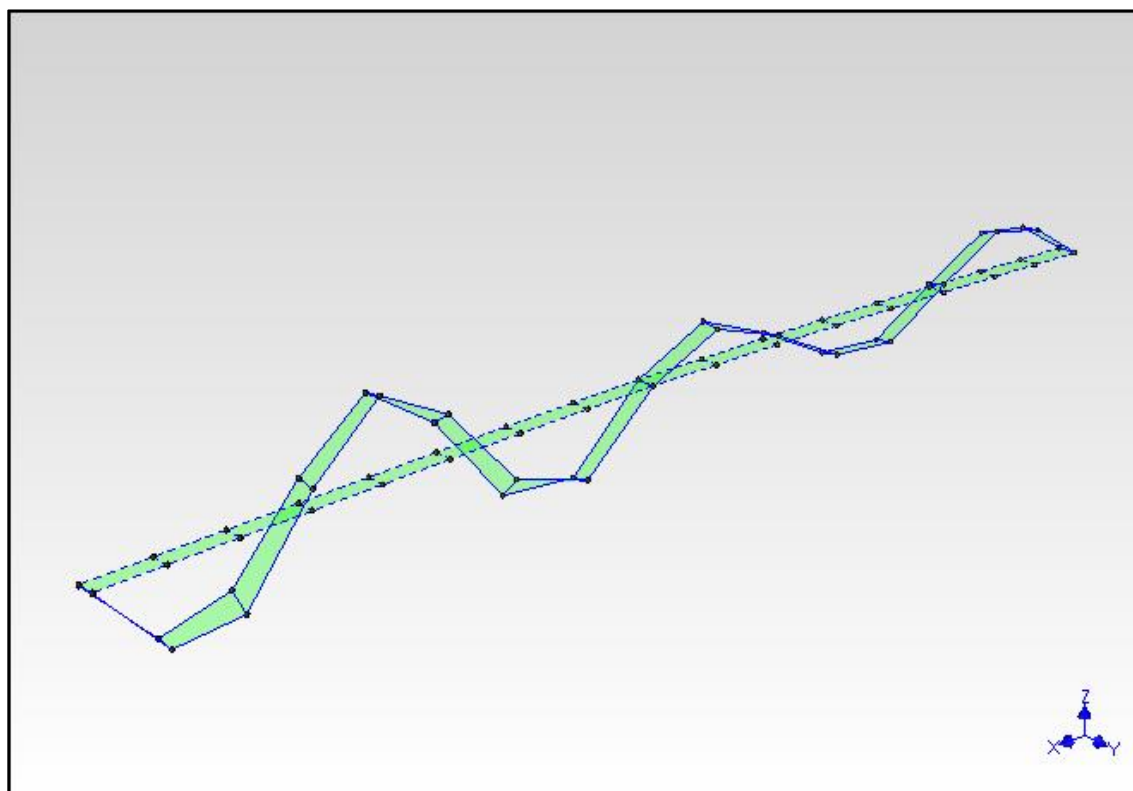


Obr. 34 6. vlastní tvar detailně v axonometrii

## 7. VLASTNÍ TVAR

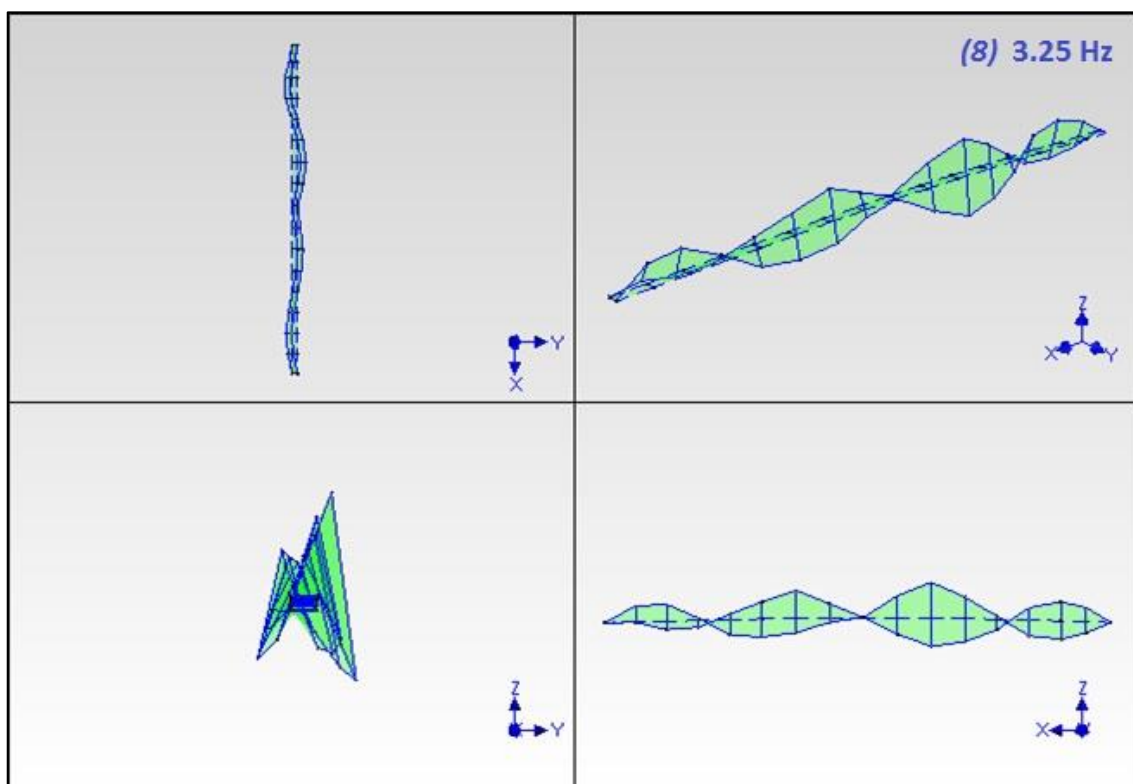


Obr. 35 7. vlastní tvar

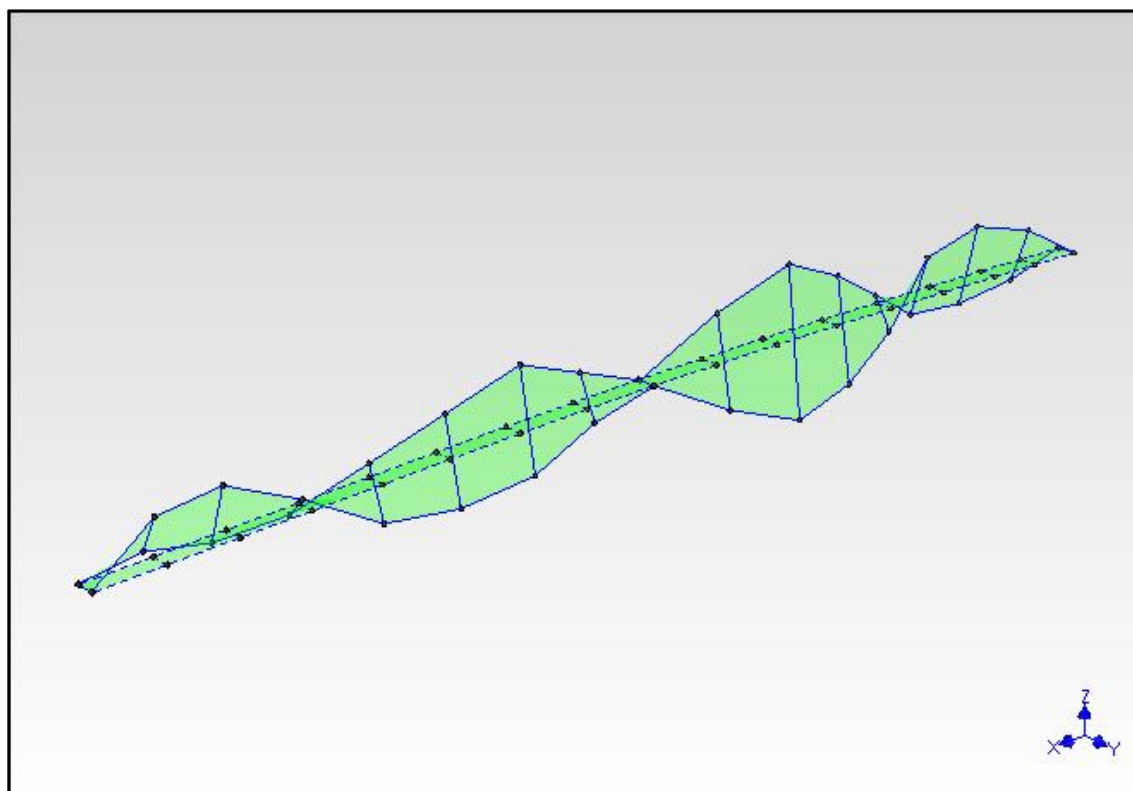


Obr. 36 7. vlastní tvar detailně v axonometrii

## 8. VLASTNÍ TVAR

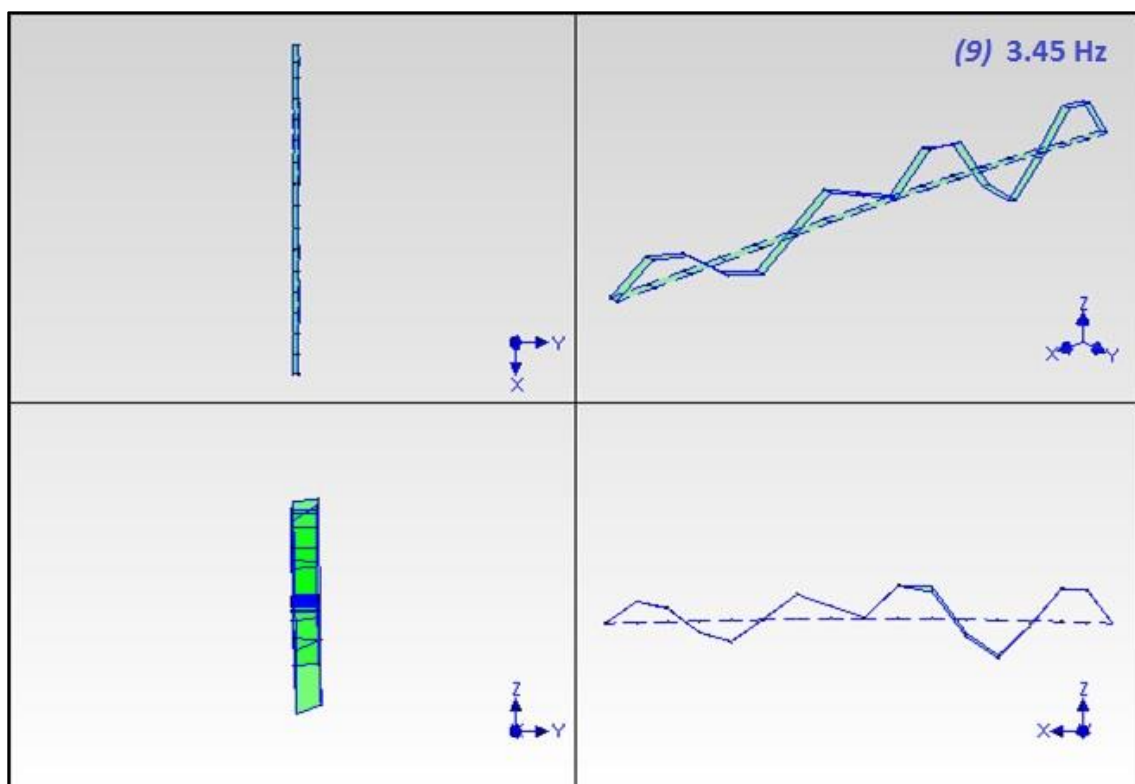


Obr. 37 8. vlastní tvar

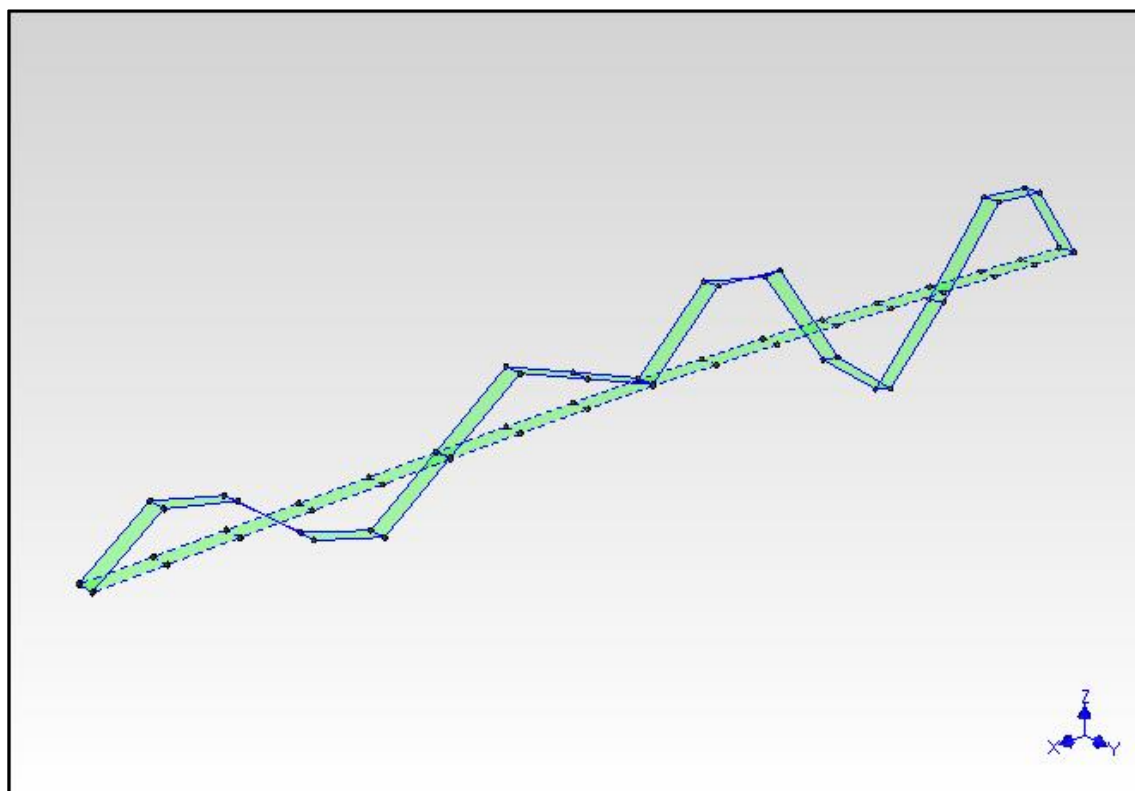


Obr. 38 8. vlastní tvar detailně v axonometrii

## 9. VLASTNÍ TVAR



Obr. 39 9. vlastní tvar



Obr. 40 9. vlastní tvar detailně v axonometrii

### 9.7.4 Porovnání naměřených a teoretických vlastních frekvencí a vlastních tvarů

Vzhledem k tomu, že byl k přípravě zkoušky k dispozici teoretický výpočet [20], bylo příhodné na závěr vyhodnocení experimentální modální analýzy provést porovnání zkouškou naměřených hodnot a hodnot získaných z výpočtu podle [5].

Aby bylo možné provést posouzení shody frekvencí, nejprve bylo nutné k sobě přiřadit odpovídající vlastní tvary. Přiřazení vlastních tvarů a vyčíslení míry vzájemné tvarové shody bylo pro potřeby této zkoušky provedeno pomocí koeficientu MAC. Hodnoty vypočtených koeficientů pro jednotlivé kombinace dvojic vlastních frekvencí jsou zobrazeny v tabulce 2. Výpočet koeficientu byl proveden v programu ME'ScopeVES podle rovnice (10) uvedeném v kapitole 7.1.2.

Tabulka 2 MAC koeficient

MAC		Teoretický výpočet											
		0.60	1.13	1.52	1.66	1.72	2.09	2.29	2.49	3.10	3.11	3.19	3.58
Experiment	0.61	0.998	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	1.14	0.000	0.994	0.002	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
	1.58	0.000	0.001	0.002	0.991	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000
	2.06	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.990	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
	2.20	0.002	0.004	0.032	0.005	0.003	0.033	0.816	0.016	0.010	0.000	0.000	0.001
	2.36	0.000	0.000	0.001	0.000	0.059	0.001	0.064	0.876	0.001	0.000	0.029	0.000
	3.01	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.002	0.002	0.000	0.028	0.946	0.004	0.001
	3.25	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.009	0.021	0.031	0.890	0.027
	3.45	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.002	0.002	0.992

Při experimentální modální analýze nebyly zachyceny dva vodorovné tvary a jeden kroutivý vlastní tvar z výpočtu [20]. Lze to vysvětlit polohou referenčního snímače, ve kterém 3. a 9. vlastní tvar z teoretického výpočtu [20] měly minimální pořadnice. Konstrukce byla buzena poskoky, takže zároveň nebyla dostatečně buzena ve vodorovném směru a nebyla tak vyvolána vodorovná odezva. Proto nejspíš nebyl zachycen také 5. vlastní tvar z výpočtu [20], který v místě referenčního snímače měl dostatečně velké pořadnice, aby jinak mohl být zachycen.

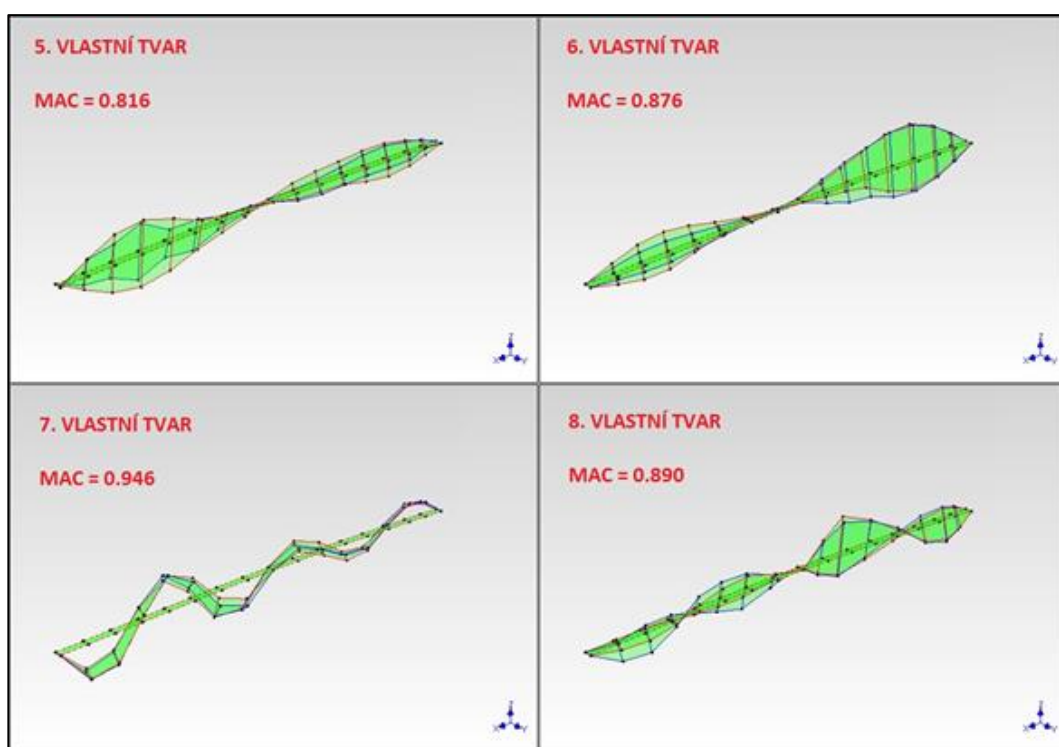
Vypočítané shody vlastních tvarů lze považovat za velmi dobré zejména u svislých ohybových vlastních tvarů. U kroutivých tvarů byla dosažena nižší tvarová shoda s výpočtem, ale u všech 3 případů byla vždy větší než 0,80 (80%).

Sobě odpovídající vlastní frekvence byly podrobeny výpočtu mezní odchylky  $\Delta(j)$  podle vzorce (9) a následně posouzeny podle kritérií pro mezní odchylku stanovených v [6].

Stanovené požadavky na mezní odchylky jednotlivých frekvencí byly splněny a hodnoty jsou přehledně shrnuty v tabulce 3. Na obr. 41 jsou pro ukázkou zobrazeny čtyři nejméně uspokojivé tvarové shody vlastních tvarů z teoretického výpočtu a zkouškou zjištěných tvarů. Číslování tvarů na obr. 41 je vztaženo k pořadí tvarů zjištěných experimentální modální analýzou.

Tabulka 3 Výpočet mezní odchylky vlastních frekvencí

Pořadí	Charakter vlastního tvaru kmitání	Experiment [Hz]	Teoretický výpočet [Hz]	$\Delta_{(j,k)}$ [%]
(1)	1. tvar svislého ohybového kmitání	0.61	0.60	-0.83
(2)	2. tvar svislého ohybového kmitání	1.14	1.13	-0.97
(3)	1. tvar vodorovného kmitání	-	1.52	-
(4)	3. tvar svislého ohybového kmitání	1.58	1.66	4.71
(5)	2. tvar vodorovného kmitání	-	1.72	-
(6)	4. tvar svislého ohybového kmitání	2.06	2.09	1.29
(7)	1. tvar kroutivého kmitání	2.20	2.29	3.63
(8)	2. tvar kroutivého kmitání	2.36	2.49	5.18
(9)	3. tvar kroutivého kmitání	-	3.10	-
(10)	5. tvar svislého ohybového kmitání	3.01	3.11	3.08
(11)	4. tvar kroutivého kmitání	3.25	3.19	-1.82
(12)	6. tvar svislého ohybového kmitání	3.45	3.58	3.47



Obr. 41 Příklad nejméně uspokojivých tvarových shod



## 9.8 Dynamická zatěžovací zkouška

Cílem dynamické zatěžovací zkoušky bylo zjištění odezvy lávky při zatížení chodci a následně posoudit úroveň vibrací podle kritérií komfortu chodců stanovených současnými normami. Měřeny byly zatěžovací stavy stanovené podle [4] a zatěžovací stavy zaměřené na vandalismus.

### 9.8.1 Příprava a průběh zkoušky

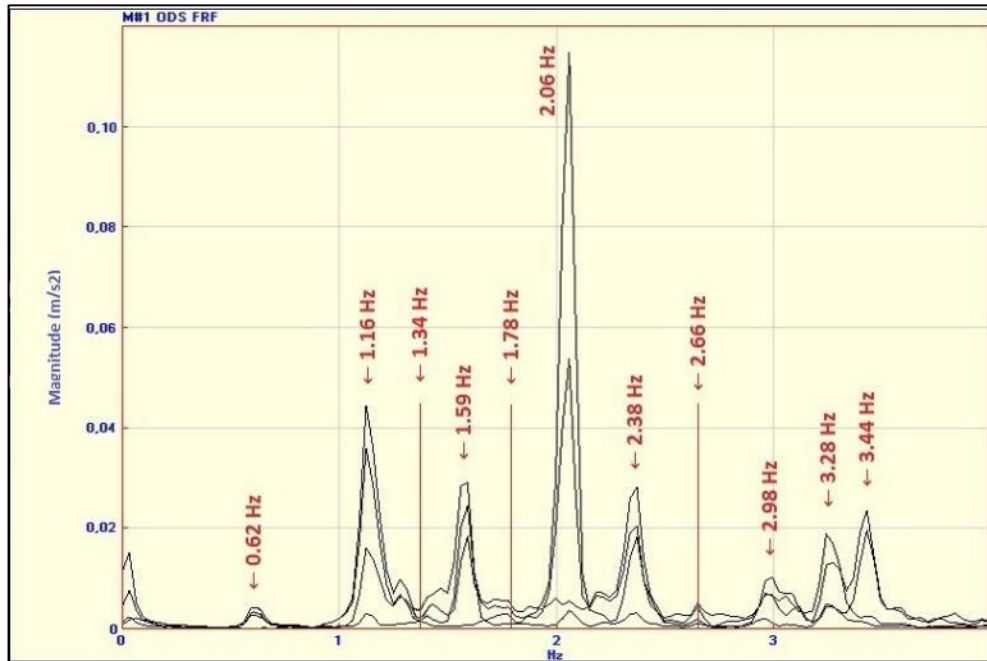
Vzhledem k tomu, že provedenou experimentální modální analýzu nebylo možné vyhodnotit v režimu on-line, nebyly k dispozici žádné údaje o skutečných vlastních frekvencích. Zároveň nebylo vhodné vycházet jen z teoretického výpočtu [20], který nebyl ověřen. Proto byla nejdříve provedena orientační modální analýza konstrukce, která poskytla orientační hodnoty vlastních frekvencí.

#### 9.8.1.1 Orientační experimentální modální analýza

Pro orientační modální analýzu bylo využito sestavy snímačů z předešlé modální analýzy. Referenční snímač zůstal na stejném místě a trojice snímačů se přemístila do řezu 16, kde bylo opět měřeno ve dvou bodech (2x svisle, 1x vodorovně). Pro buzení konstrukce bylo nejprve využito prosté odezvy konstrukce od větru a pohybu osob na lávce, ale výsledky nebyly uspokojivé. Proto se přistoupilo k buzení konstrukce silovými impulzy, stejně jako tomu bylo v již provedené experimentální modální analýze.

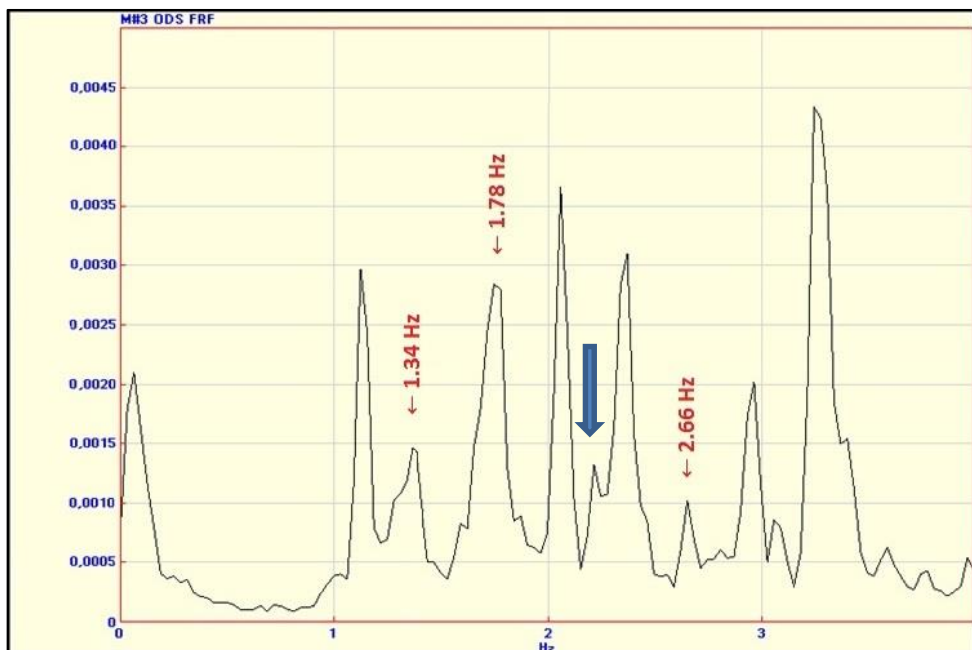
V rámci orientační modální analýzy byl vytvořen zhruba 2 minutový záznam. Aby bylo možné vyhodnotit vlastní frekvence v režimu on-line, musela být zvýšena vzorkovací frekvenci ústředny. Naměřený záznam byl zpracován v režimu on-line programem PULSE (Brüel&Kjaer, Dánsko). Program v režimu on-line vytvořil průměrované frekvenční spektrum, ze kterého byly vyhodnoceny orientační hodnoty vlastních frekvencí.

Spektrum vytvořené online programem PULSE bohužel není k dispozici, a proto byl pro názornost a zpětnou kontrolu záznam po dynamické zatěžovací zkoušce ještě zpracován programem ME'scopeVES. V tomto programu byla jako při podrobné modální analýze (předchozí podkapitola) pro každý kanál vyhodnocena frekvenční přenosová funkce pracovních tvarů kmitání ODS FRF, ze které lze rozpoznat orientační vlastní frekvence, se kterými se při dynamické zatěžovací zkoušce pracovalo. Na obr. 42 jsou znázorněny ODS FRF pro všechny kanály s vyznačenými orientačními vlastními frekvencemi, které byly vyhodnoceny i v režimu on-line.



Obr. 42 Graf ODS FRF pro orientační modální analýzu

Z obr. 42 je vidět, že lokální maxima pro frekvence 1,38 Hz, 1,78 Hz a 2,66 Hz jsou ve společném grafu všech čtyř přenosových funkcí zanedbatelná. Přesto tyto frekvence byly vyhodnoceny jako možné vlastní frekvence. Důvodem byla lokální maxima frekvenční přenosové funkce zaznamenané snímačem, který měřil ve vodorovném směru. Funkce ODS FRF pro signál ze snímače měřícího ve vodorovném směru je zobrazena na obr. 43, na kterém jsou zmíněná lokální maxima přenosové funkce pro tyto frekvence jednoznačně vidět.



Obr. 43 Graf ODS FRF pro vodorovný směr zrychlení

Na grafu ODS FRF funkce pro signál ze snímače měřící ve vodorovném směru (obr. 43) je možné ještě nalézt lokální maximum pro frekvenci 2,20Hz (označeno modrou šipkou). Tato frekvence však nebyla v režimu online z daných frekvenčních spekter vyhodnocena a nebylo s ní počítáno při následné zatěžovací zkoušce. Lze to vysvětlit splynutím lokálních maxim přenosové funkce pro frekvence 2,20 Hz a 2,38 Hz kvůli jejich malé frekvenční vzdálenosti, kvůli které byla frekvence přehlédnuta.

Předpokládaný charakter vlastních tvarů kmitání byl určen na základě hodnot vodorovné a svislé složky kmitání z jednotlivých kanálů. V případě, že byla vodorovná složka přibližně stejná jako složka svislá, byl tvar vyhodnocen jako kroutivý a v případě nejasnosti se počítalo i možností vodorovného tvaru. V případě převahy svislé složky kmitání byl tvar vyhodnocen jako svislý ohybový.

Vlastní frekvence vyhodnocené v režimu on-line programem PULSE a jejich předpokládané vlastní tvary kmitání jsou shrnuty v tabulce 4.

Tabulka 4 Orientační vlastní frekvence a tvary

Pořadí (j)	Orientační vlastní frekvence $f_{(j)}$ [Hz]	Předpokládaný charakter vlastního tvaru kmitání
(1)	<b>0.62</b>	svislý ohybový tvar kmitání
(2)	<b>1.16</b>	svislý ohybový tvar kmitání
(3)	<b>1.34</b>	vodorovný/kroutivý tvar kmitání
(4)	<b>1.59</b>	svislý ohybový tvar kmitání
(5)	<b>1.78</b>	vodorovný/kroutivý tvar kmitání
(6)	<b>2.06</b>	svislý ohybový tvar kmitání
(7)	<b>2.38</b>	kroutivý tvar kmitání
(8)	<b>2.66</b>	kroutivý/vodorovný tvar kmitání
(9)	<b>2.98</b>	svislý ohybový tvar kmitání
(10)	<b>3.28</b>	kroutivý tvar kmitání
(11)	<b>3.44</b>	svislý ohybový tvar kmitání

### 9.8.1.2 Zatěžovací stavy

Při stanovení vhodných zatěžovacích stavů se vycházelo z hodnot orientační modální analýzy, neboť přesnější výsledky z podrobné modální analýzy nebyly v době zkoušky známy. Z tohoto důvodu se použité vlastní frekvence mírně liší od přesnějších hodnot, které byly vyhodnoceny v předchozí kapitole.

Mezi zatěžovací stavy byly zařazeny jednak situace stanovené v [4], tzn. běžný provoz a chůze dvou osob s určitou krokovou frekvencí, a navíc situace, kdy je lávka vystavena

tzv. „vandalismu“ (cílené rozkmitávání konstrukce skupinou osob frekvencí shodnou s některou z vlastních frekvencí).

Dynamická zatěžovací zkouška byla zaměřena hlavně na ověření odezvy od nejběžnějšího intervalu krokové frekvence chůze a běhu 1,7 – 2,7 Hz, ale bylo vhodné prověřit i vyšší frekvence odpovídající rychlému běhu, tzn. přibližně do 3,3 Hz. Frekvence mimo tyto intervaly nejsou v běžném provozu příliš časté, a proto na ně při zkoušce nebylo cíleno.

Pro vybudění svislých vlastních tvarů kmitání je vhodné konstrukci zatěžovat dvojicí osob jdoucí vedle sebe krokovou frekvencí rovnou frekvenci vlastní nebo její polovině. Pro krouživé vlastní tvary platí to samé s rozdílem, že osoby kráčí za sebou. Pro vybudění vodorovných vlastních tvarů kmitání je vhodné konstrukci zatěžovat krokovou frekvencí rovnou dvojnásobku vlastní frekvence.

Podle pravidel řečených v předchozím odstavci byly do tabulky 5 shrnuty všechny možné zatěžovací stavy, které pro jednotlivé vlastní frekvence a jejich předpokládaný charakter tvaru kmitání lze sestavit. Frekvence ležící v zájmovém intervalu jsou vyznačeny zeleně, frekvence ležící mimo tento interval jsou označeny červeně. Proškrtnuté buňky značí krokové frekvence, kterými by daný tvar kmitání vybudit nebylo možné.

Tabulka 5 Možnosti zatěžovacích stavů

Pořadí (j)	Orientační vlastní frekvence $f_{(j)}$ [Hz]	Předpokládaný charakter tvaru kmitání	2 chodci s krokovou frekvencí $f_{(k)} = n \times f_{(j)}$		
			0.5	1	2
(1)	0.62	svislý ohybový	0.31	0.62	-
(2)	1.16	svislý ohybový	0.58	1.16	-
(3)	1.34	vodorovný / krouživý	0.67	1.34	2.68
(4)	1.59	svislý ohybový	0.80	1.59	-
(5)	1.78	vodorovný / krouživý	0.89	1.78	3.56
(6)	2.06	svislý ohybový	1.03	2.06	-
(7)	2.38	krouživý	1.19	2.38	-
(8)	2.66	vodorovný / krouživý	1.33	2.66	5.32
(9)	2.98	svislý ohybový	1.49	2.98	-
(10)	3.28	krouživý	1.64	3.28	-
(11)	3.44	svislý ohybový	1.72	3.44	-

Z uvedených zatěžovacích stavů byly vybrány všechny, kde potřebná kroková frekvence pro vybudění odezvy konstrukce s danou vlastní frekvencí a vlastním tvarem ležela v zájmovém frekvenčním intervalu, tzn. 1,7 – 3,3 Hz.

K uvedeným zatěžovacím stavům byla přidána kroková frekvence 3,56 Hz (dvojnásobek 5. vlastní frekvence pro vodorovný nebo kroutivý tvar kmitání). Pokud by vlastní tvar odpovídající frekvenci 1,78 Hz měl vodorovný charakter, byla by kroková frekvence 3,56 Hz neúčinnějším způsobem jak tento tvar vybudit.

Z důvodu velmi blízkých krokových frekvencí pro vybudění 3. a 8. vlastního tvaru ( $2 \times 1,34 = 2,68$  Hz a 2,66 Hz) byla mezi zatěžovací stavy zařazena pouze chůze dvou osob za sebou při krokové frekvenci 2,66 Hz. Tyto dvě frekvence byly pod hranicí rozlišení metronomu a při chůzi by je nebylo možné rozlišit.

Z časových důvodů a vzhledem k blízkosti k vlastní frekvenci 1,78 Hz byla ze zatěžovacích stavů vyřazena kroková frekvence 1,72 Hz, kterou lze vybudit 11. svislý ohybový tvar s vlastní frekvencí 3,44 Hz.

Jako další zatěžovací stav byl podle [6] vybrán běžný provoz. Pro tento zatěžovací stav bylo příhodné využít pohybu osob, které jdou od vlaku nebo na vlak. Jak bylo již uvedeno v úvodu této kapitoly, lávka slouží jako nejkratší cesta do centra města a je tak zejména brzo ráno a odpoledne značně vytížena.

Pro zatěžovací stavy „vandalismus“ byly vybrány frekvence 2,06 Hz a 2,38 Hz. Pro tyto účely bylo použito skupiny 9 osob, která se snažila vybudit co největší odezvu. Od těchto zatěžovacích stavů byla očekávána největší odezva za hranicí komfortu.

Zvolené zatěžovací stavy, kterým byla lávka při dynamické zkoušce vystavena, jsou shrnuty do tabulky 6 s uvedenými čísly záznamů. Čísla záznamů odpovídají pořadí, ve kterém byly pořízeny.

Tabulka 6 Provedené zatěžovací stavy s čísly záznamů

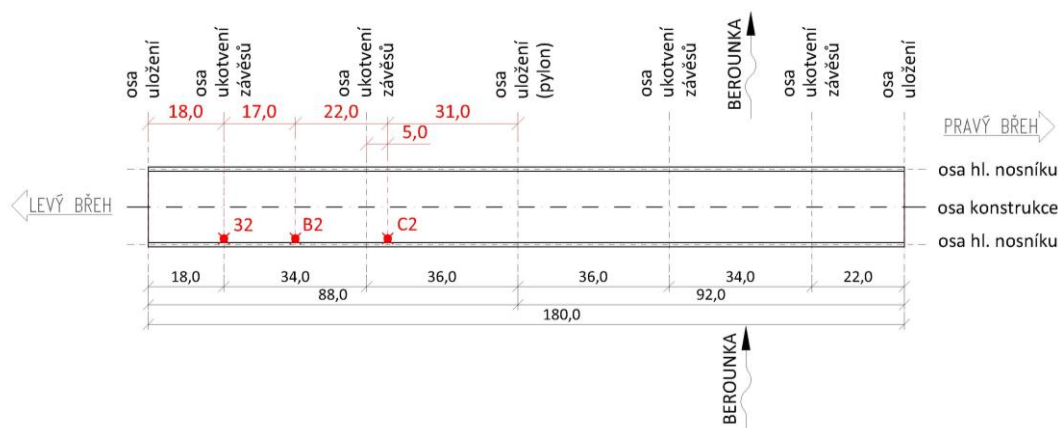
Zatěžovací stav	Čísla záznamů
chůze 2 osob vedle sebe při frekvenci 2.06 Hz	1-5
chůze 2 osob za sebou při frekvenci 1.78 Hz	7-10
chůze 2 osob za sebou při frekvenci $2 \times 1.78$ Hz = 3.56 Hz	11-13; 15
chůze 2 osob za sebou při frekvenci 2.38 Hz	16-18
chůze 2 osob za sebou při frekvenci 2.66 Hz	19-20; 22-23
chůze 2 osob vedle sebe při frekvenci 2.98 Hz	24-26
vandalismus s budící frekvencí 2.06 Hz	27-30
vandalismus s budící frekvencí 2.38 Hz	32-34
běžný provoz	6; 14; 21; 31; 35; 36

Vzhledem k přirozené frekvenci lidského kroku byla nejrizikovější 6. vlastní frekvence 2,06 Hz se svislým ohybovým tvarem. Pro interval přirozeného běhu byla nejrizikovější 7. vlastní frekvence 2,38 Hz s kroutivým vlastním tvarem kmitání.

### 9.8.1.3 Záznam odezvy

Pro dynamickou zatěžovací zkoušku byly na konstrukci zvoleny 4 body, ve kterých probíhalo měření. Při volbě těchto bodů se vycházelo z vlastních tvarů získaných teoretickým výpočtem [20]. Byly zvoleny tak, aby byla naměřená odezva u zvolených zatěžovacích stavů co největší.

Měřené body byly pracovníčně označeny 32, B2 a C2. V bodě 32 a C2 se měřilo pouze ve svislém směru a v bodě B2 se měřilo ve svislém a vodorovném směru. Rozmístění snímačů je znázorněno v situaci na obr. 44.



Obr. 44 Zjednodušená situace s umístěním snímačů

Bylo měřeno čtyřmi snímači zrychlení přichycenými magnetem na ocelová závaží, která byla položena na mostovku do zvolených bodů.

Pro každý zatěžovací stav byly vytvořeny minimálně 3 záznamy, aby byl k dispozici dostatečně velký vzorek pro vyhodnocení. Celkem bylo vytvořeno 36 záznamů. Čísla záznamů uvedená v tabulce 6 odpovídají pořadí, v jakém byly zaznamenány. Vzhledem k tomu, že pro záznam běžného provozu bylo využito lidí jdoucích na vlak, bylo pořadí záznamu těchto zatěžovacích stavů vázáno na časy odjezdů a příjezdů vlaku.

Při každém záznamu byla kroková frekvence seřízena metronomem. Dvojice osob kráčela s krokovou frekvencí od závěru na levém břehu až k pylonu (1. pole), kde se otočila a kráčela nazpět.

V zatěžovacích stavech zaměřených na vandalismus bylo pro buzení konstrukce zvoleno místo u snímače C2. Požadované vlastní tvary měly mít přibližně v tomto bodě podle teoretického výpočtu [20] největší pořadnice, a mělo tak být dosaženo největší odezvy. Konstrukce byla buzena pohupováním v kolenou skupiny devíti lidí.

## 9.8.2 Vyhodnocení a posouzení odezvy na zatížení chodci

Vytvořené záznamy byly zpracovány v programu Material Damping. Na většině záznamů musel být odstraněn počáteční výkmit způsobený frekvenčním filtrem, který byl na záznamy aplikován kvůli odstranění kvazistatické složky.

V rámci analýzy záznamů byly vyhodnoceny maximální hodnoty naměřeného zrychlení a vypočteny hodnoty RMS. U vhodných záznamů byl vyhodnocen logaritmický dekrement útlumu. Tyto hodnoty pak byly posouzeny podle kritérií komfortu chodců stanovených ČSN EN 1990 [12], ČSN 73 6209 [4] a technického předpisu SÉTRA [13].

Vyhodnocení potřebných dat a jejich posouzení bude pro přehlednost a názornost rozdílných požadavků pro každou z těchto norem popsáno zvlášť.

### 9.8.2.1 Posouzení podle ČSN EN 1990 – Zásady navrhování konstrukcí

V [12] jsou doporučená kritéria komfortu chodců pro lávky stanovena v hodnotách okamžitého zrychlení. Hranice komfortu je pro svislé kmitání stanovena na  $0,7 \text{ ms}^{-2}$  a pro vodorovné kmitání na  $0,2 \text{ ms}^{-2}$ . Pro vodorovné kmitání vyvolané výjimečným zatížením je doporučena hodnota  $0,4 \text{ ms}^{-2}$ . Za výjimečné zatížení můžeme v našem případě považovat vandalismus. (viz kapitola 7.2.1)

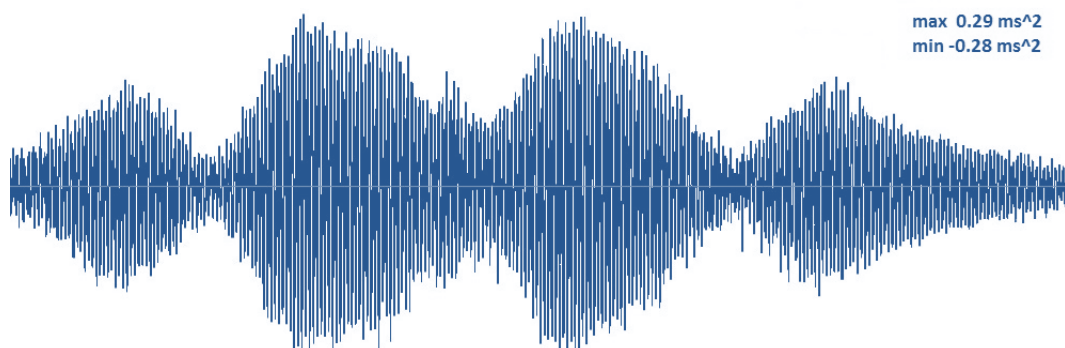
Pomocí programu Material Damping byly v každém záznamu pro každý kanál po odstranění počátečního výkmitu nalezeny extrémní hodnoty zrychlení. Výstupem z každého záznamu byla minimální a maximální hodnota dosaženého zrychlení na každém snímači. Tyto hodnoty jsou shrnuty v tabulce 7 se zvýrazněnými hodnotami, které překračují normou doporučené hodnoty. Tučně jsou psané extrémní hodnoty, které byly v daném zatěžovacím stavu dosaženy.

Tabulka 7 Extrémní hodnoty zrychlení a posouzení podle ČSN EN 1990

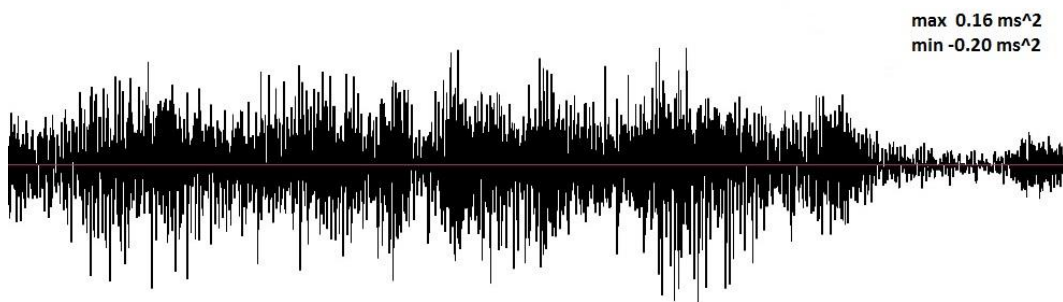
č.	ZATĚŽOVACÍ STAV		ZRYCHLENÍ [ms <sup>-2</sup> ]							
			3Z		BZ		BZ		CZ	
		[Hz]	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
1	2 chodci	2.06 Hz	0.23	-0.23	0.06	-0.07	0.06	-0.05	0.44	-0.45
2	2 chodci	2.06 Hz	0.26	-0.27	0.14	-0.17	0.19	-0.20	0.48	-0.47
3	2 chodci	2.06 Hz	0.24	-0.24	0.11	-0.13	0.17	-0.14	0.45	-0.43
4	2 chodci	2.06 Hz	0.13	-0.12	0.09	-0.10	0.04	-0.03	0.23	-0.24
5	2 chodci	2.06 Hz	0.29	-0.28	0.16	-0.20	0.25	-0.23	0.53	-0.61
7	2 chodci	1.78 Hz	0.18	-0.18	0.14	-0.15	0.04	-0.04	0.19	-0.16
8	2 chodci	1.78 Hz	0.08	-0.08	0.07	-0.07	0.03	-0.03	0.13	-0.13
9	2 chodci	1.78 Hz	0.08	-0.07	0.06	-0.07	0.07	-0.07	0.12	-0.12
10	2 chodci	1.78 Hz	0.15	-0.14	0.16	-0.24	0.19	-0.20	0.23	-0.20
11	2 chodci	3.56 Hz	0.57	-0.56	0.51	-0.50	0.16	-0.13	0.33	-0.32
12	2 chodci	3.56 Hz	0.35	-0.34	0.33	-0.31	0.09	-0.08	0.23	-0.20
13	2 chodci	3.56 Hz	0.35	-0.34	0.27	-0.32	0.23	-0.24	0.23	-0.23
15	2 chodci	3.56 Hz	0.37	-0.36	0.31	-0.29	0.11	-0.10	0.13	-0.15
16	2 chodci	2.38 Hz	0.32	-0.33	0.38	-0.40	0.07	-0.07	0.26	-0.26
17	2 chodci	2.38 Hz	0.31	-0.33	0.41	-0.41	0.08	-0.09	0.25	-0.27
18	2 chodci	2.38 Hz	0.25	-0.23	0.32	-0.30	0.08	-0.13	0.27	-0.26
19	2 chodci	2.66 Hz	0.22	-0.23	0.26	-0.25	0.12	-0.16	0.23	-0.23
20	2 chodci	2.66 Hz	0.19	-0.21	0.25	-0.28	0.08	-0.08	0.24	-0.19
22	2 chodci	2.66 Hz	0.15	-0.15	0.17	-0.18	0.12	-0.10	0.16	-0.13
23	2 chodci	2.66 Hz	0.18	-0.20	0.17	-0.21	0.08	-0.07	0.22	-0.18
24	2 chodci	2.98 Hz	0.40	-0.31	0.29	-0.25	0.08	-0.08	0.32	-0.26
25	2 chodci	2.98 Hz	0.41	-0.39	0.28	-0.27	0.19	-0.18	0.36	-0.40
26	2 chodci	2.98 Hz	0.39	-0.31	0.23	-0.24	0.13	-0.10	0.33	-0.32
27	9 vandalů	2.06 Hz	1.08	-1.05	0.26	-0.23	0.05	-0.06	2.24	-2.18
28	9 vandalů	2.06 Hz	1.27	-1.31	0.32	-0.33	0.07	-0.07	2.42	-2.44
29	9 vandalů	2.06 Hz	0.75	-0.73	0.27	-0.40	0.19	-0.17	1.61	-1.55
30	9 vandalů	2.06 Hz	0.88	-0.92	0.19	-0.18	0.04	-0.04	1.77	-1.79
32	9 vandalů	2.38 Hz	1.18	-1.16	1.52	-1.57	0.37	-0.35	0.89	-0.88
33	9 vandalů	2.38 Hz	1.02	-0.98	1.41	-1.45	0.23	-0.20	0.85	-0.86
34	9 vandalů	2.38 Hz	1.39	-1.40	1.92	-2.01	0.29	-0.26	1.19	-1.22
6	běžný provoz	-	0.17	-0.18	0.15	-0.15	0.14	-0.15	0.29	-0.31
14	běžný provoz	-	0.22	-0.22	0.20	-0.20	0.09	-0.09	0.40	-0.37
21	běžný provoz	-	0.17	-0.16	0.15	-0.15	0.16	-0.17	0.24	-0.29
31	běžný provoz	-	0.11	-0.10	0.08	-0.08	0.03	-0.03	0.19	-0.21
35	běžný provoz	-	0.18	-0.16	0.14	-0.15	0.05	-0.06	0.31	-0.30
36	běžný provoz	-	0.26	-0.24	0.18	-0.18	0.09	-0.07	0.35	-0.35
<b>MAXIMÁLNÍ HODNOTY ZRYCHLENÍ</b>			<b>1.39</b>	<b>-1.40</b>	<b>1.92</b>	<b>-2.01</b>	<b>0.37</b>	<b>-0.35</b>	<b>2.42</b>	<b>-2.44</b>



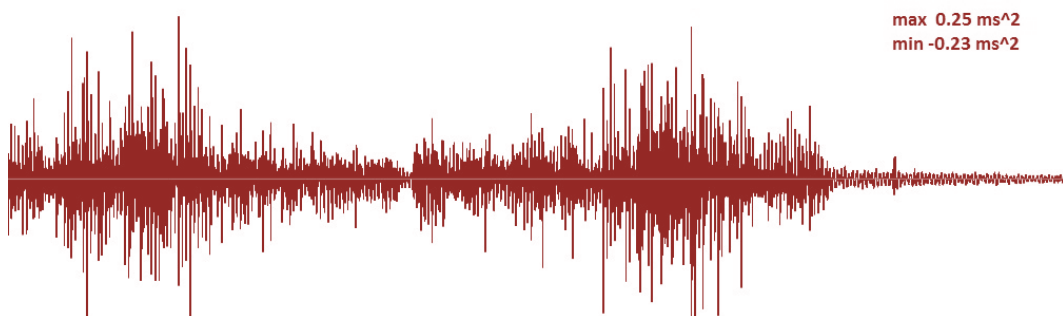
Při prvním zatěžovacím stavu „2 chodci vedle sebe 2,06 Hz“ (záznamy 1-5) bylo dosaženo maximálních hodnot zrychlení u záznamu č. 5 (obr. 45-48). V tomto záznamu bylo dosaženo maximálních hodnot jak ve svislém směru, tak i ve směru vodorovném. Maximální hodnota zrychlení ve svislém směru  $0,61 \text{ ms}^{-2}$  splňuje stanovené kritérium. Maximální hodnota zrychlení  $0,25 \text{ ms}^{-2}$  ve vodorovném směru kritérium  $0,2 \text{ ms}^{-2}$  nesplňuje. Hodnota je dokonce vyšší, než bylo naměřeno při zatěžovacím stavu „vandalismus 2,06 Hz“. Tyto rozporuplné výsledky mohly být způsobeny rozdílnou povahou buzení v jednotlivých stavech. Zatímco při vandalismu se jednalo čistě o svislé působení budících sil, při chůzi jsou vyvozovány na konstrukci i vodorovné síly. Také k tomuto stavu mohl přispět případný náhlý poryv větru, který by konstrukci mohl vodorovně rozkmitat.



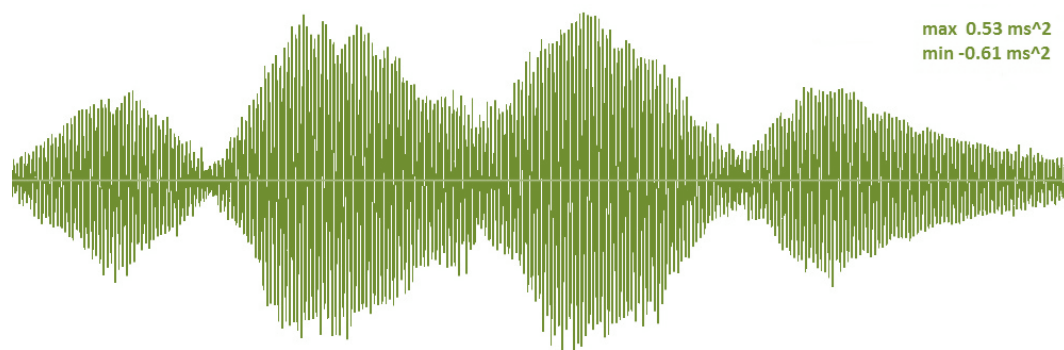
Obr. 45 záznam č. 5 (2 chodci 2,06 Hz) - snímač 32Z



Obr. 46 záznam č. 5 (2 chodci 2,06 Hz) - snímač B2Z

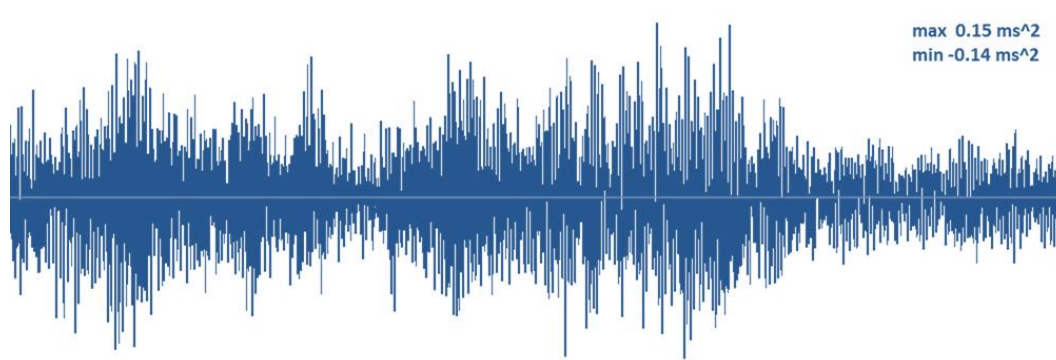


Obr. 47 záznam č. 5 (2 chodci 2,06Hz) - snímač B2Y

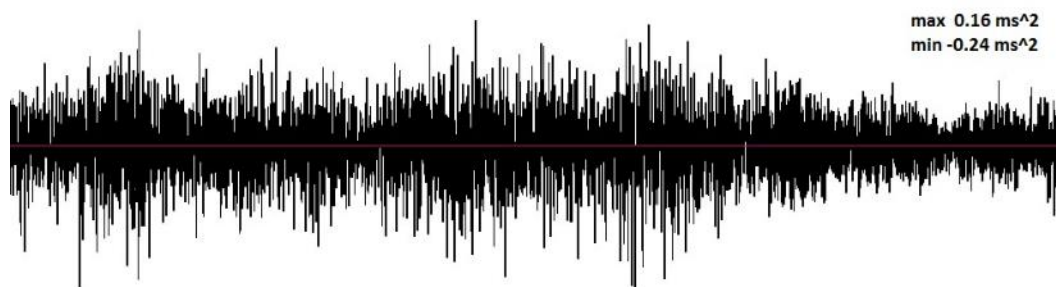


Obr. 48 záznam č. 5 (2 chodci 2,06 Hz) - snímač C2Z

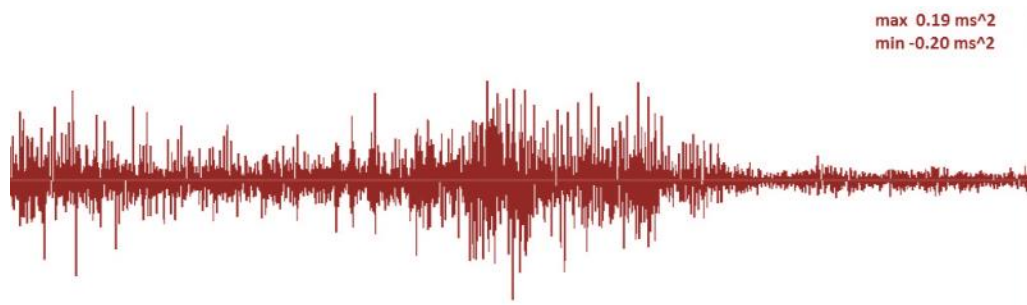
V druhém zatěžovacím stavu „2 chodci za sebou 1,78 Hz“ (záznamy 7-10) bylo dosaženo na většině záznamů pouze nepatrných hodnot zrychlení, které s velkou rezervou kritérium splňují. Pouze na záznamu č. 10 (obr. 49-52) byla zaznamenána výraznější odezva, zejména  $0,20 \text{ ms}^{-2}$  na snímači měřícím ve vodorovném směru. Přesto hodnota kritérium komfortu podle [12] splňuje. Vzhledem k jinak nízkým hodnotám vodorovných a svislých zrychlení u ostatních záznamů pro tento zatěžovací stav lze usuzovat, že se s největší pravděpodobností nejedná o vlastní frekvenci lávky nebo se jedná o vodorovný tvar, který by touto krokovou frekvencí vybudit nešlo. Případně to lze vysvětlovat reakcí konstrukce na jiný podnět, který mohl být způsobený nepřerušným provozem na lávce.



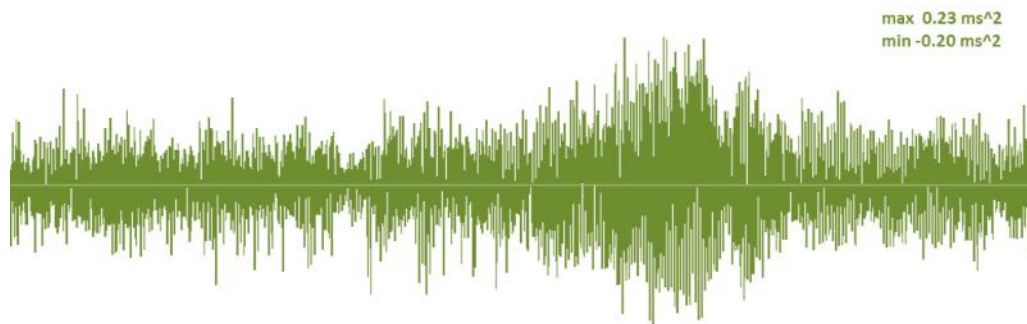
Obr. 49 záznam č. 10 (2 chodci 1,78Hz) - snímač 3Z



Obr. 50 záznam č. 10 (2 chodci 1,78 Hz) - snímač B2Z

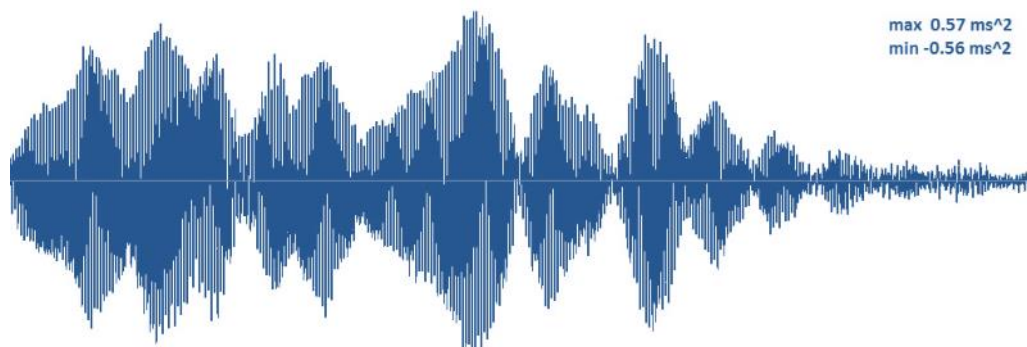


Obr. 51 záznam č. 10 (2 chodci 1,78 Hz) - snímač B2Y

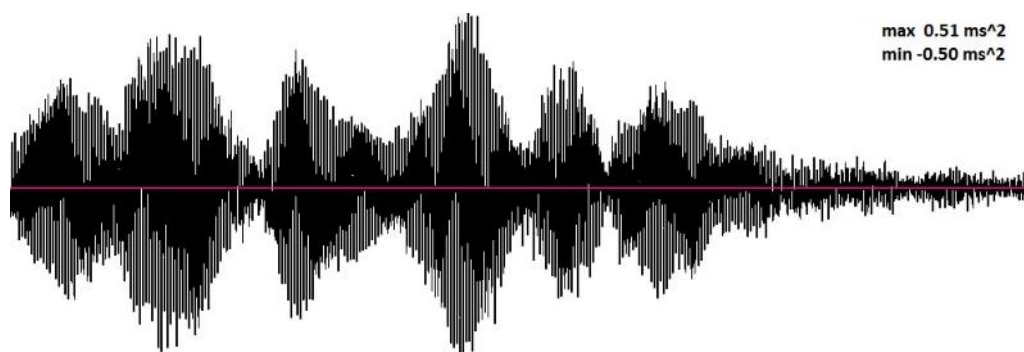


Obr. 52 záznam č. 10 (2 chodci 1,78 Hz) - snímač C2Z

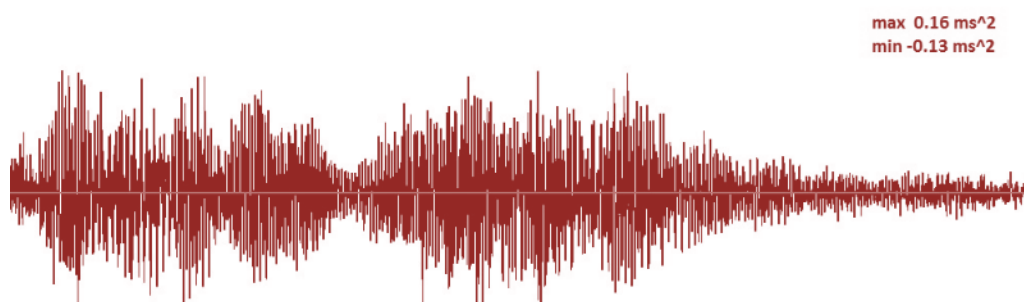
Při třetím zatěžovacím stavu „2 chodci za sebou 3,56 Hz“ (záznamy 11-13 a 15) bylo dosaženo největších zrychlení ve svislém směru při záznamu č. 11 (obr. 53-56), ale naměřené hodnoty kritérium komfortu splňují. Při záznamu č. 13 bylo dosaženo ve vodorovném směru hodnoty zrychlení  $0,24 \text{ ms}^{-2}$ , která překračuje doporučenou limitní hodnotu  $0,2 \text{ ms}^{-2}$  pro vodorovný směr. Hodnoty ve vodorovném směru na tomto záznamu jsou výrazně vyšší než u ostatních záznamů z této skupiny zatěžovacích stavů. Kroková frekvence 3,56 Hz měla vybudit odezvu, pokud by orientačně zjištěná vlastní frekvence 1,78 Hz měla vodorovný tvar kmitání. Z hodnot zrychlení ve vodorovném směru na všech záznamech z tohoto zatěžovacího stavu lze spíše usuzovat, že se nejedná o vlastní frekvenci nebo konstrukce nebyla dostatečně buzena ve vodorovném směru, aby byla vybudena očekávaná odezva. Lze spíše usuzovat, že se nejspíš jednalo o náhlý poryv větru nebo jiný neočekávaný podnět, kterému byla konstrukce vystavena. Záznam č. 13 ze snímače B2Y, na kterém byly zachyceny největší zrychlení ve vodorovném směru je zobrazen na obr. 57.



Obr. 53 záznam č. 11 (2 chodci 3,56 Hz) - snímač 3Z2



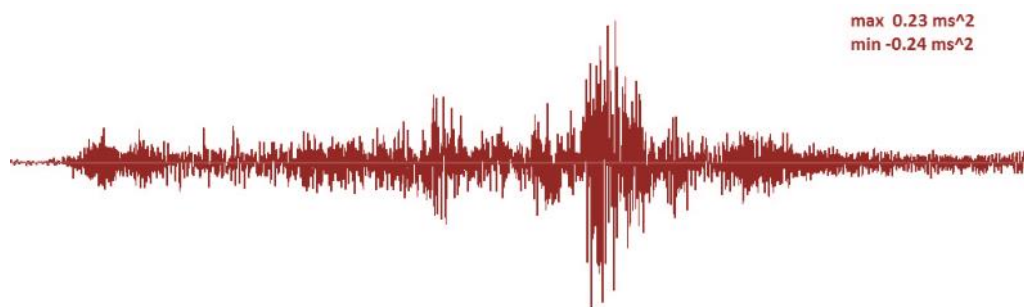
Obr. 54 záznam č. 11 (2 chodci 3,56 Hz) - snímač B2Z



Obr. 55 záznam č. 11 (2 chodci 3,56 Hz) - snímač B2Y

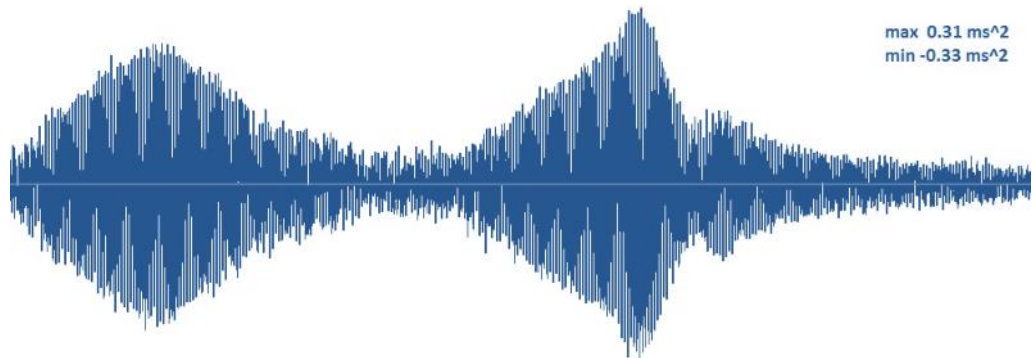


Obr. 56 záznam č. 11 (2 chodci 3,56 Hz) - snímač C2Z

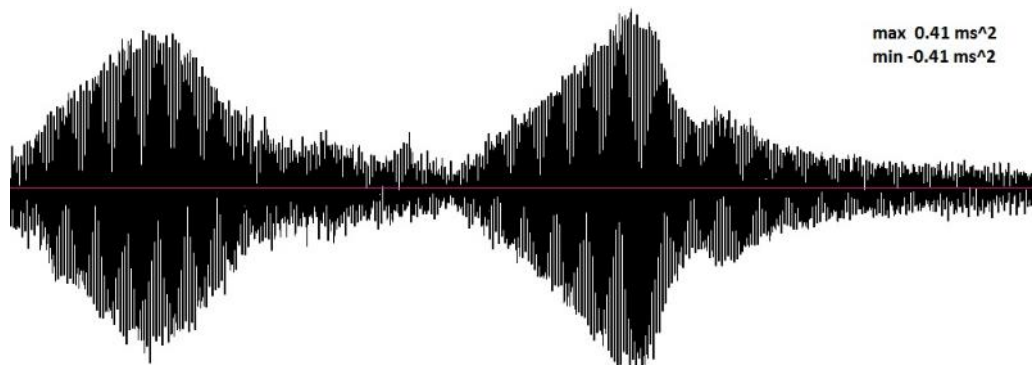


Obr. 57 záznam č. 13 (2 chodci 3,56 Hz) - snímač B2Y

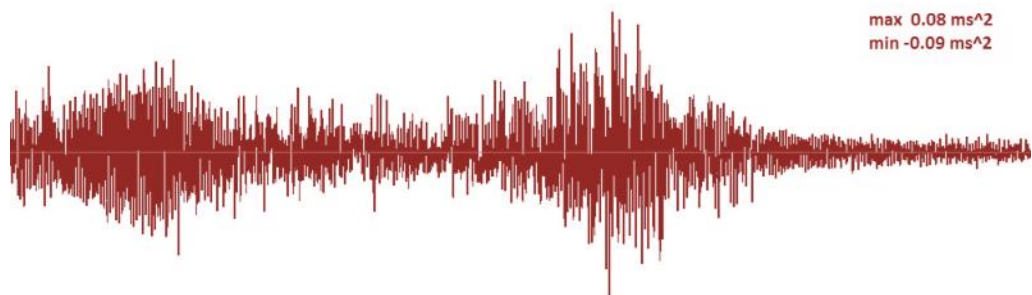
Při zatěžovacím stavu „2 chodci za sebou 2,38 Hz“ (záznamy 16-18) všechny naměřené hodnoty pohodlně splňovaly kritéria doporučená [12]. Největší hodnota zrychlení  $0,41 \text{ ms}^{-2}$  ve svislém směru byla zachycena v záznamu č. 17 (obr. 58-61).



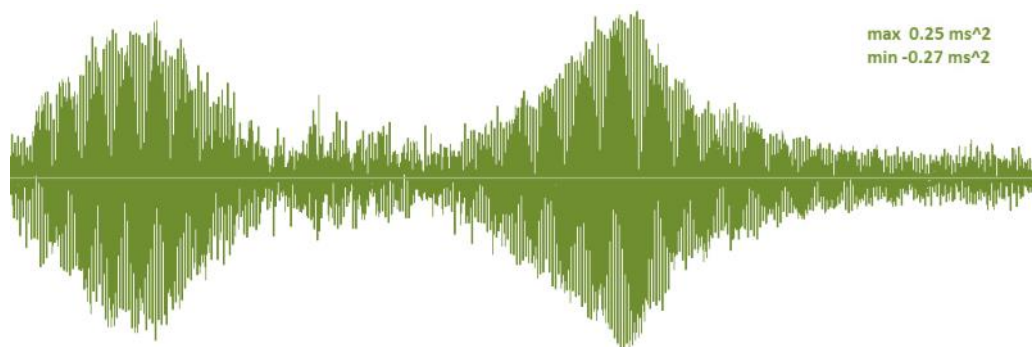
Obr. 58 záznam č. 17 (2 chodci 2,38 Hz) - snímač 32Z



Obr. 59 záznam č. 17 (2 chodci 2,38 Hz) - snímač B2Z

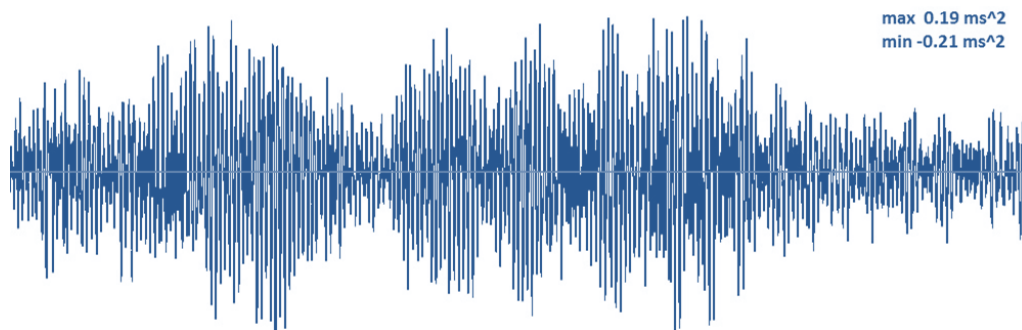


Obr. 60 záznam č. 17 (2 chodci 2,38 Hz) - snímač B2Y

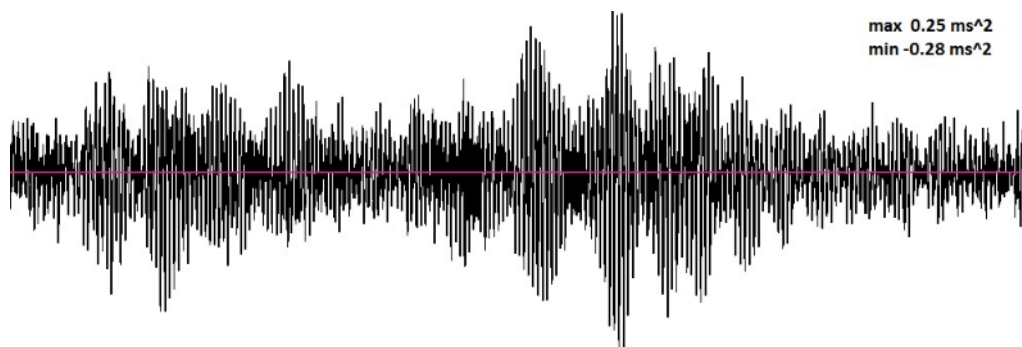


Obr. 61 záznam č. 17 (2 chodci 2,38 Hz) - snímač C2Z

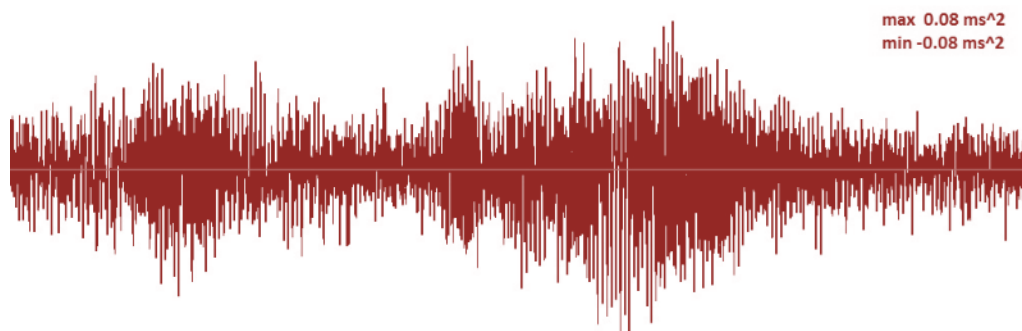
Při zatěžovacím stavu „2 chodci za sebou 2,66 Hz“ (záznamy 19-20 a 22-23) byly dosaženy relativně nízké hodnoty zrychlení ve vodorovném i svislém směru, a tudíž bez problému byla naplněna všechna normou [12] doporučená kritéria. Z naměřených hodnot lze usuzovat, že tato frekvence není vlastní frekvencí lávky, nebo je spjata s vodorovným tvarem kmitání a touto krokovou frekvencí, by ji nebylo možné vybudit. Největších hodnot zrychlení bylo dosaženo v záznamu č. 20 (obr. 62-65).



Obr. 62 záznam č. 20 (2 chodci 2,66 Hz) - snímač 3Z



Obr. 63 záznam č. 20 (2 chodci 2,66 Hz) - snímač B2Z



Obr. 64 záznam č. 20 (2 chodci 2,66 Hz) - snímač B2Y

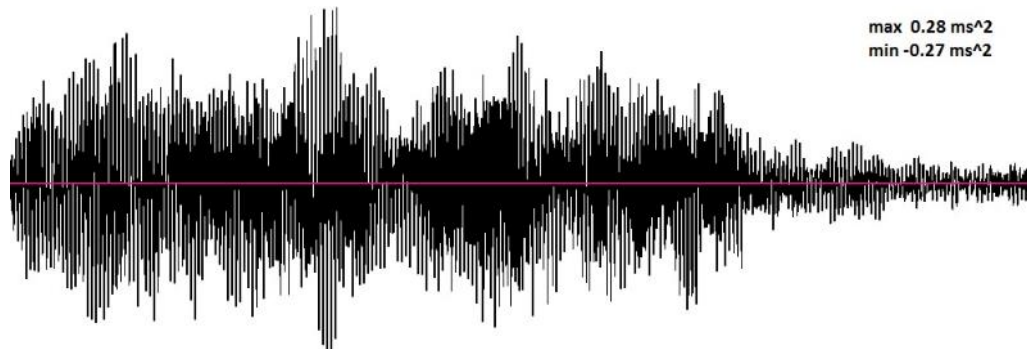


Obr. 65 záznam č. 20 (2 chodci 2,66 Hz) - snímač C2Z

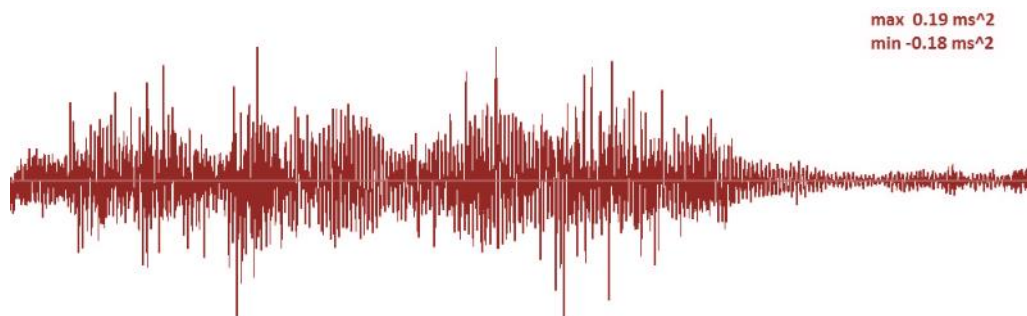
Při zatěžovacím stavu „2 chodci vedle sebe 2,98 Hz“ (záznamy 24-26) všechny naměřené hodnoty splňovaly kritéria doporučená [12]. Největších hodnot zrychlení  $0,41 \text{ ms}^{-2}$  ve svislém směru a  $0,19 \text{ ms}^{-2}$  ve vodorovném bylo dosaženo v záznamu č. 25 (obr. 66-69).



Obr. 66 záznam č. 25 (2 chodci 2,98 Hz) - snímač 3Z



Obr. 67 záznam č. 25 (2 chodci 2,98 Hz) - snímač B2Z



Obr. 68 záznam č. 25 (2 chodci 2,98 Hz) - snímač B2Y

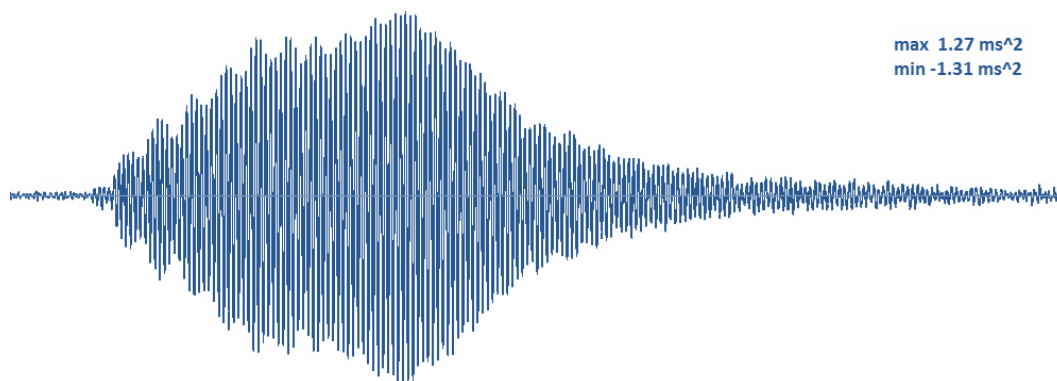


Obr. 69 záznam č. 25 (2 chodci 2,98 Hz) - snímač C2Z

Lze tedy konstatovat, že pro tyto zatěžovací stavy konstrukce více méně kritéria pohody chodců splňovala. Výjimkou byly záznamy č. 5 a 13, na kterých byla dosažena nadlimitní hodnota ve vodorovném směru. V obou případech se jednalo o hodnoty výrazně vyšší než u zbytku záznamů z dané skupiny zatěžovacích stavů.

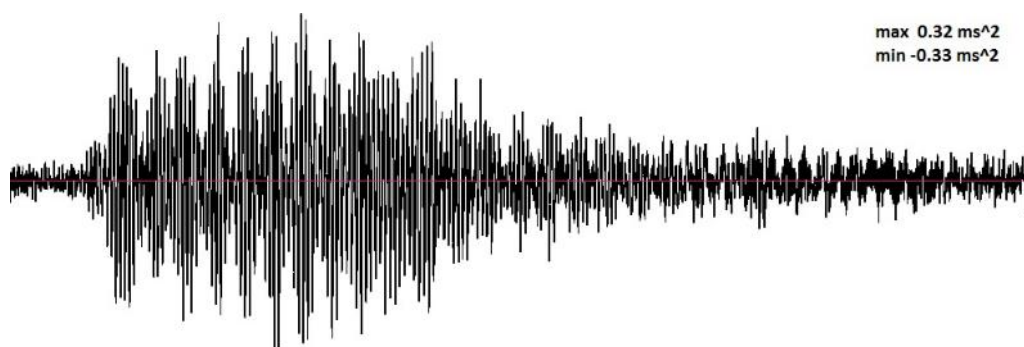
Zajímavějších výsledků bylo dosaženo při zatěžovacích stavech, kdy na konstrukci působila skupina vandalů.

Z naměřených výsledků při prvním ze stavů, kdy byla konstrukce buzena skupinou 9 vandalů s frekvencí 2,06 Hz (záznamy 27-30), je vidět, že vlastní tvar při této frekvenci je skutečně svislý ohybový. Zatímco na snímačích 32Z a C2Z bylo dosaženo relativně velké odezvy, která svými hodnotami značně přesahovala doporučené kritérium, na snímači vodorovného kmitání nebylo kritérium pro výjimečné zatížení  $0,4 \text{ ms}^{-2}$  ani zdaleka ohroženo. V měřeném bodě B2 bylo celkově naměřeno malých hodnot zrychlení a lze z toho usuzovat, že tento bod se nachází blízko uzlového bodu příslušného vlastního tvaru kmitání. Největší hodnoty zrychlení  $2,44 \text{ ms}^{-2}$  bylo dosaženo na záznamu č. 28 (obr. 70-73).

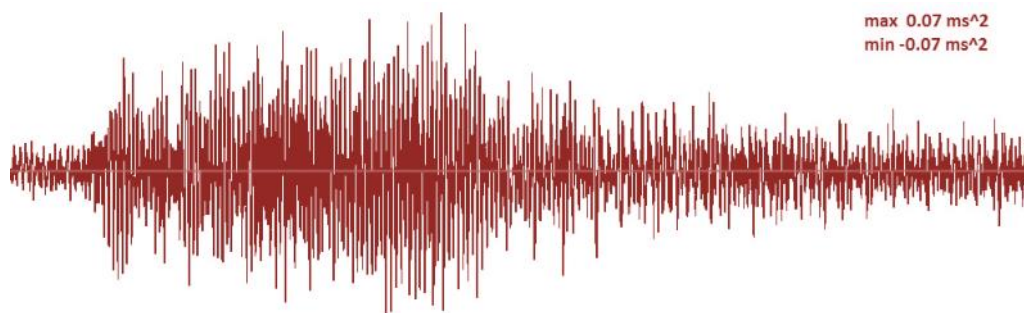


Obr. 70 záznam č. 28 (vandalismus 2,06 Hz) - snímač 32Z

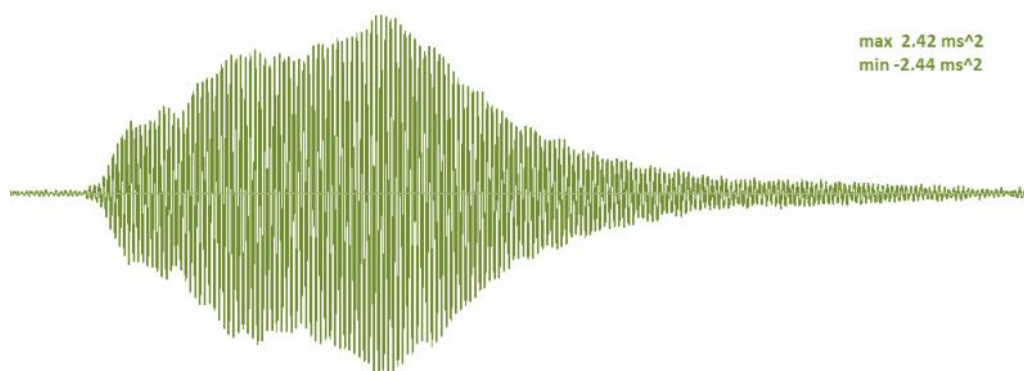




Obr. 71 záznam č. 28 (vandalismus 2,06 Hz) - snímač B2Z

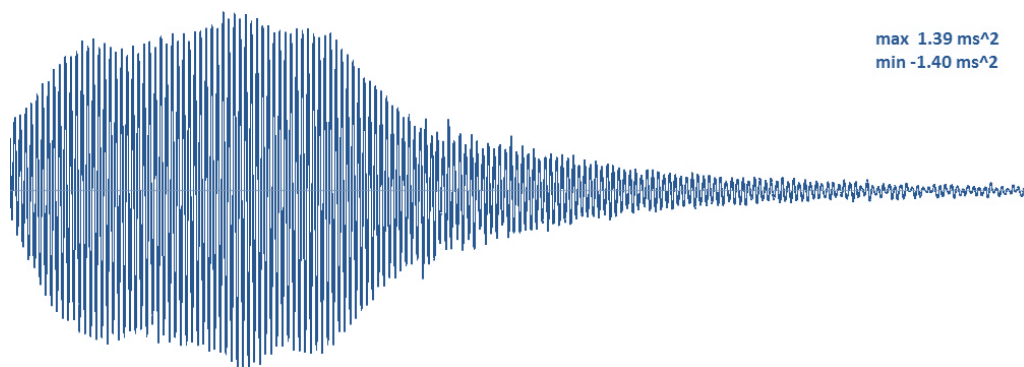


Obr. 72 záznam č. 28 (vandalismus 2,06 Hz) - snímač B2Y

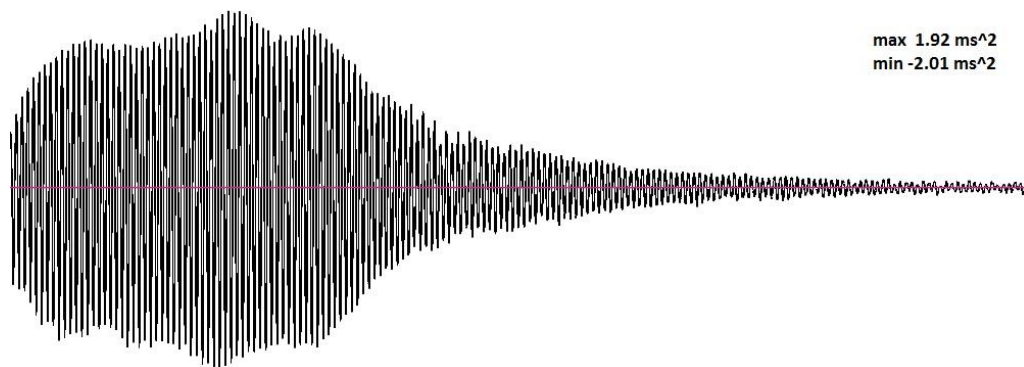


Obr. 73 záznam č. 28 (vandalismus 2,06 Hz) - snímač C2Z

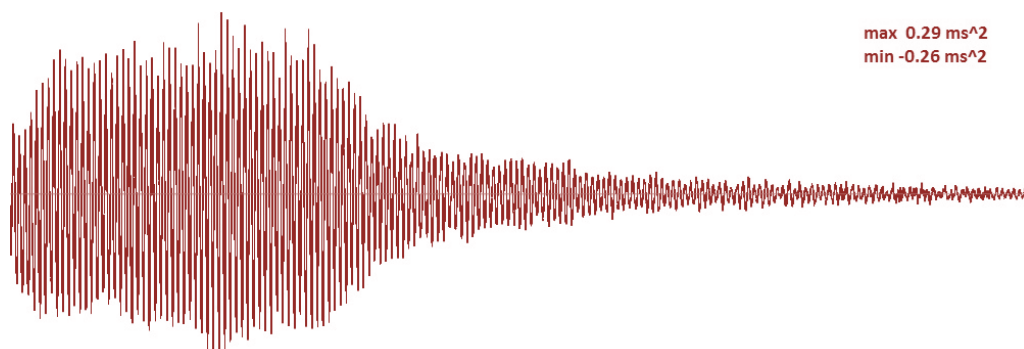
Při druhém zatěžovacím stavu „vandalismus 2,38 Hz“ (záznamy 32-34) byly na všech třech záznamech překročeny doporučené limitní hodnoty pro svislé kmitání. Úroveň vodorovného kmitání ani v jednom z případů nepřekročilo hodnotu  $0,4 \text{ ms}^{-2}$ . Tentokrát bylo dosaženo nejvyšší hodnoty na záznamu č. 34 a to  $2,01 \text{ ms}^{-2}$ . (obr. 74-77)



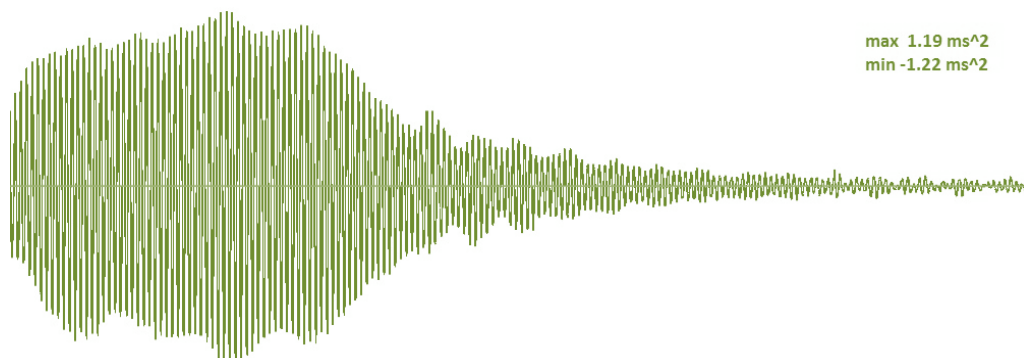
Obr. 74 záznam č. 34 (vandalismus 2,38 Hz) - snímač 32Z



Obr. 75 záznam č. 34 (vandalismus 2,38 Hz) - snímač B2Z



Obr. 76 záznam č. 34 (vandalismus 2,38 Hz) - snímač B2Y

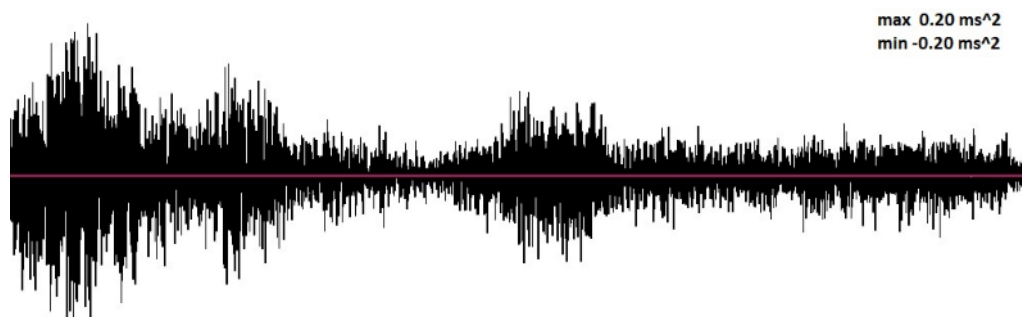


Obr. 77 záznam č. 34 (vandalismus 2,38 Hz) - snímač C2Z

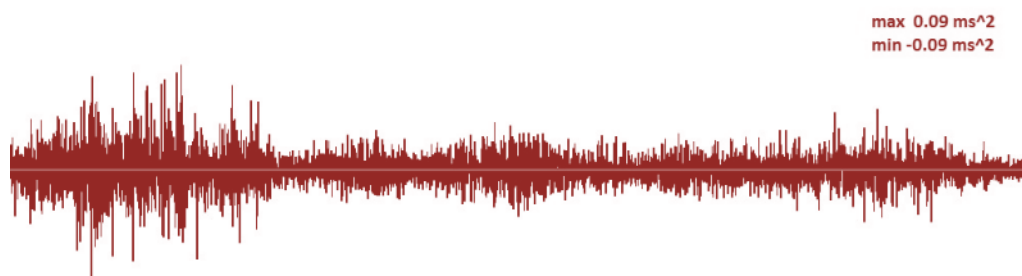
Při běžném provozu (záznamy 6, 14, 21, 31, 35, 36) pak nebyla ani v jednom případě překročena doporučená kritéria. Na všech záznamech byly zachyceny nízké hodnoty zrychlení a jedinou výjimkou byl záznam č. 14 (obr. 78-81), kdy byla na snímači C2Z naměřena hodnota  $0,40 \text{ ms}^{-2}$  ve svislém směru.



Obr. 78 záznam č. 14 (běžný provoz) - snímač 32Z



Obr. 79 záznam č. 14 (běžný provoz) - snímač B2Z



Obr. 80 záznam č. 14 (běžný provoz) - snímač B2Y



Obr. 81 záznam č. 14 (běžný provoz) - snímač C2Z

Podle kritérií pohody chodců, které stanovuje ČSN EN 1990 [12], lávka při běžném provozu i při chůzi dvou osob vyhověla (vysvětlení podrobněji v 9.8.2.5). Odezva při zatěžovacích stavech zaměřených na vandalismus dosahovala ve svislém směru značných hodnot, které požadavky dané normou značně přesahovala.

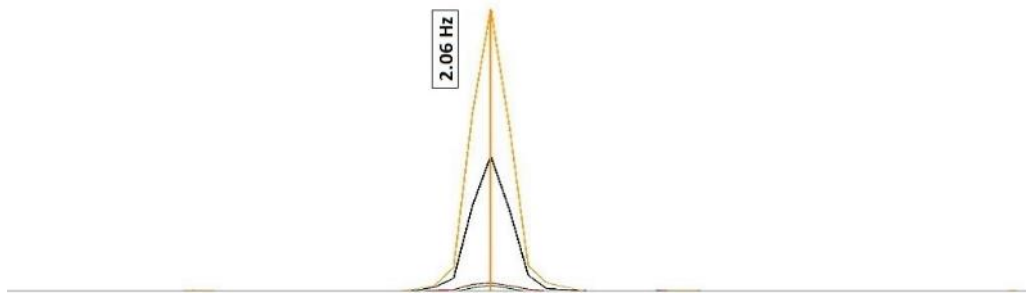
### 9.8.2.2 Posouzení podle ČSN 73 6209 – Zatěžovací zkoušky mostů

V této normě jsou kritéria komfortu chodců stanovena v efektivních hodnotách zrychlení. Hranice snížené pohody chodců, podle které se naměřené hodnoty posuzují, je vyjádřena grafem na obr. (7). Tento graf vyjadřuje hranici komfortu pomocí závislosti hodnot RMS na frekvenci. Při posuzování rozhoduje dominantní frekvence, která byla vybudena. Norma se zabývá pouze svislým kmitáním, proto vodorovné kmitání nebude posouzeno. (viz. kapitola 7.2.2)

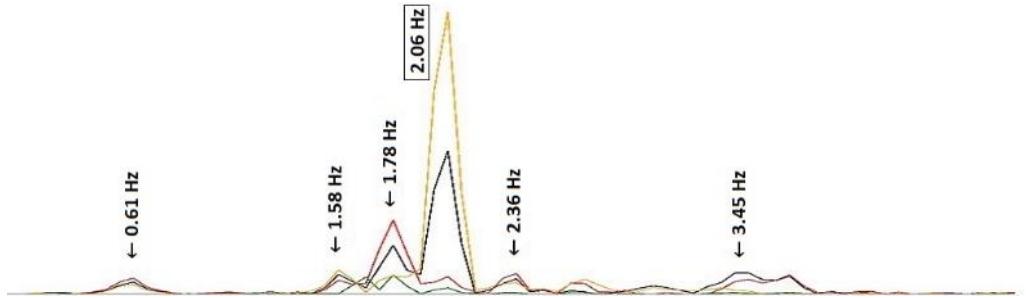
Norma ČSN 73 6209 [4] nestanovuje žádné podmínky, jak RMS určovat. Aby byly získané hodnoty vzájemně porovnatelné, byly všechny hodnoty vyhodnocené z intervalu 10s z oblasti záznamu, kde bylo dosaženo nejvyšších hodnot zrychlení. Aby bylo možné hodnoty posoudit, musela být pro každý záznam zjištěna dominantní frekvence, která byla v daném zatěžovacím stavu vybudena. Proto byla oblast, ze které se zjišťovala hodnota RMS, převedena pomocí FFT z časové oblasti do frekvenční a byla určena dominantní frekvence. Pro záznamy s nejvyšším RMS z dané skupiny zatěžovacích stavů jsou na obr. 82 – 90 zobrazena frekvenční spektra, která byla použita pro posouzení. Hodnoty RMS jsou shrnuty v tabulce 8. Zpracování bylo provedeno v programu Material Damping.

Tabulka 8 Efektivní hodnoty zrychlení

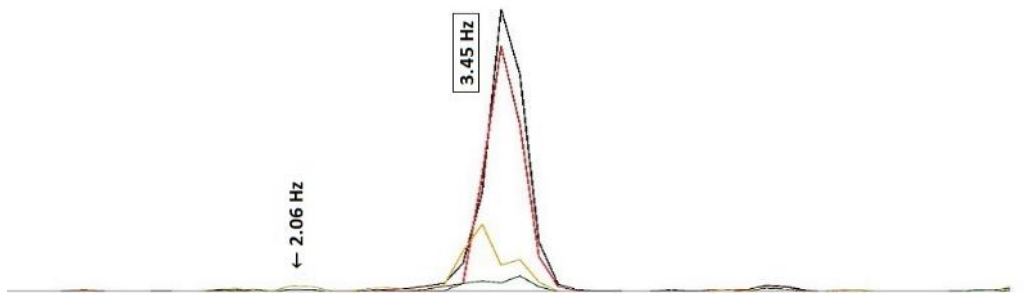
č.	ZATĚŽOVACÍ STAV [Hz]		RMS [ms <sup>-2</sup> ]			
			3Z2	B2Z	B2Y	C2Z
1	2 chodci	2.06	0.140	0.020	0.007	0.272
2	2 chodci	2.06	0.156	0.023	0.016	0.302
3	2 chodci	2.06	0.137	0.021	0.009	0.269
4	2 chodci	2.06	0.074	0.013	0.005	0.144
5	2 chodci	2.06	0.154	0.029	0.028	<b>0.309</b>
7	2 chodci	1.78	0.070	0.049	0.012	0.047
8	2 chodci	1.78	0.032	0.015	0.007	0.057
9	2 chodci	1.78	0.036	0.014	0.006	0.065
10	2 chodci	1.78	0.050	0.038	0.020	<b>0.090</b>
11	2 chodci	3.56	<b>0.266</b>	0.211	0.035	0.095
12	2 chodci	3.56	0.180	0.150	0.015	0.052
13	2 chodci	3.56	0.175	0.134	0.061	0.127
15	2 chodci	3.56	0.138	0.115	0.014	0.035
16	2 chodci	2.38	0.172	0.235	0.024	0.138
17	2 chodci	2.38	0.181	<b>0.249</b>	0.029	0.150
18	2 chodci	2.38	0.127	0.181	0.023	0.127
19	2 chodci	2.66	0.085	0.075	0.022	0.068
20	2 chodci	2.66	0.071	<b>0.093</b>	0.027	0.090
22	2 chodci	2.66	0.058	0.066	0.027	0.056
23	2 chodci	2.66	0.070	0.082	0.020	0.067
24	2 chodci	2.98	0.136	0.069	0.022	0.103
25	2 chodci	2.98	<b>0.148</b>	0.079	0.032	0.123
26	2 chodci	2.98	0.127	0.062	0.019	0.109
27	vandalismus	2.06	0.650	0.084	0.015	1.309
28	vandalismus	2.06	0.813	0.121	0.021	<b>1.542</b>
29	vandalismus	2.06	0.465	0.045	0.016	1.019
30	vandalismus	2.06	0.550	0.063	0.017	1.154
32	vandalismus	2.38	0.785	1.013	0.098	0.540
33	vandalismus	2.38	0.631	0.894	0.093	0.539
34	vandalismus	2.38	0.885	<b>1.248</b>	0.127	0.749
6	běžný provoz	-	0.088	0.024	0.008	0.168
14	běžný provoz	-	0.100	0.037	0.014	<b>0.188</b>
21	běžný provoz	-	0.075	0.027	0.008	0.138
31	běžný provoz	-	0.045	0.019	0.007	0.091
35	běžný provoz	-	0.085	0.019	0.006	0.168
36	běžný provoz	-	0.088	0.036	0.011	0.161
<b>MAXIMÁLNÍ HODNOTY ZRYCHLENÍ</b>			<b>0.89</b>	<b>1.25</b>	<b>0.13</b>	<b>1.54</b>



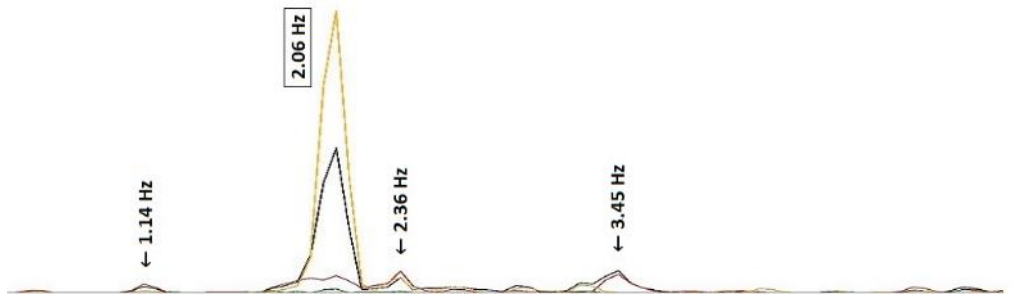
Obr. 82 záznam č. 5 - FFT s dominantní frekvencí 2,06 Hz



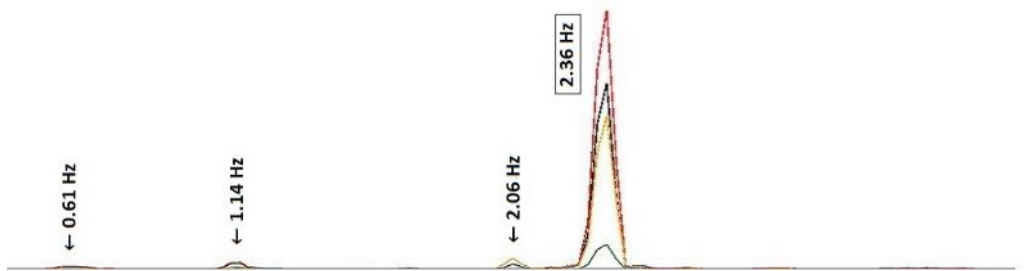
Obr. 83 záznam č. 10 - FFT s dominantní frekvencí 2,06 Hz



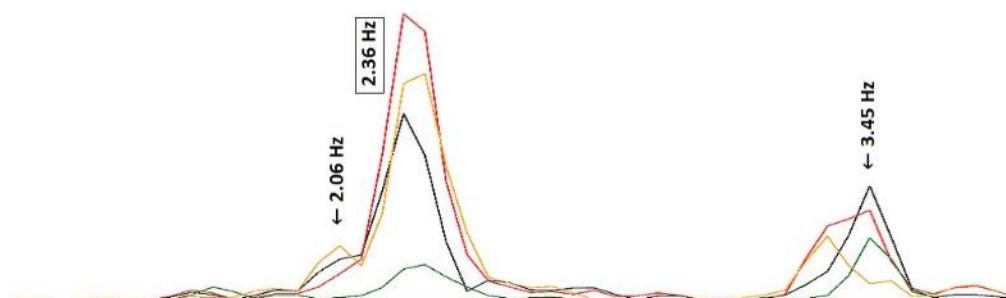
Obr. 84 záznam č. 11 - FFT s dominantní frekvencí 3,45 Hz



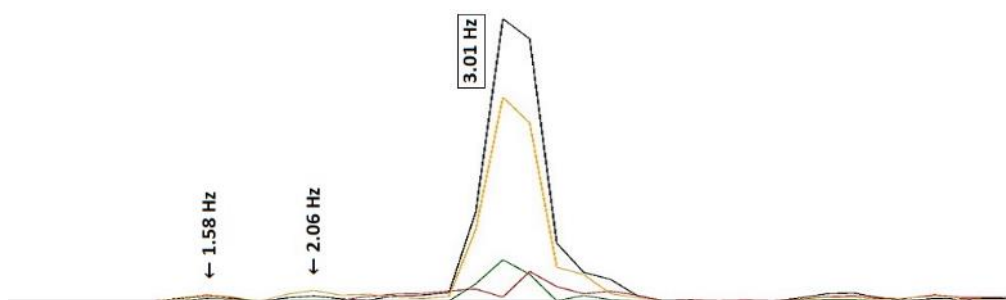
Obr. 85 záznam č. 14 - FFT s dominantní frekvencí 2,06 Hz



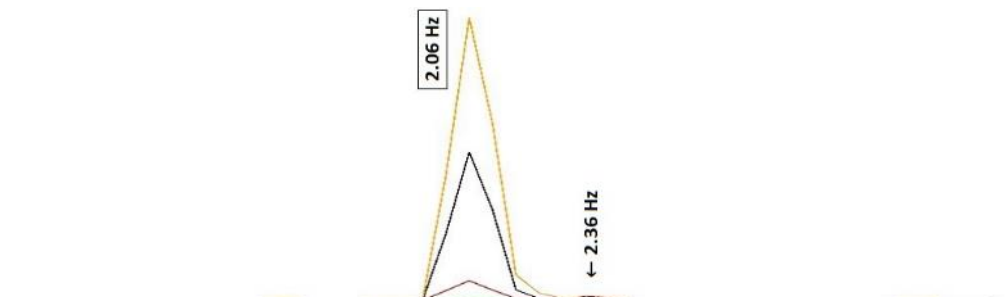
Obr. 86 záznam č. 17 - FFT s dominantní frekvencí 2,36 Hz



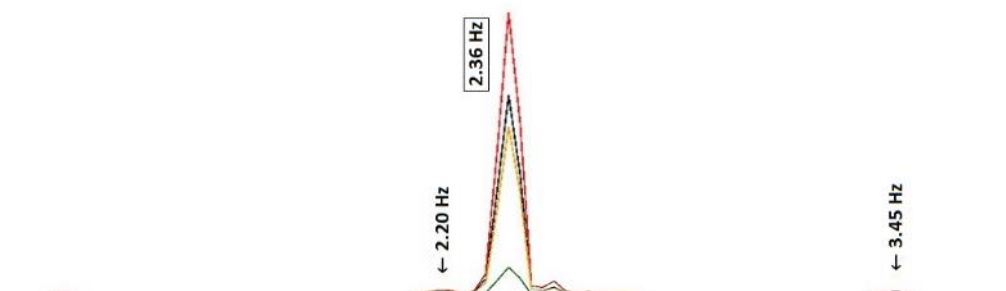
Obr. 87 záznam č. 20 - FFT s dominantní frekvencí 2,36 Hz



Obr. 88 záznam č. 25 - FFT s dominantní frekvencí 3,01 Hz



Obr. 89 záznam č. 28 - FFT s dominantní frekvencí 2,06 Hz



Obr. 90 záznam č. 34 - FFT s dominantní frekvencí 2,36 Hz

Podle uvedených záznamů převedených do frekvenční oblasti lze jednoznačně říct, která frekvence byla při daném zatěžovacím stavu dominantní. Při posouzení tedy budící frekvence nehraje žádnou roli. U všech záznamů ze stejných skupin zatěžovacích stavů vycházely dominantní frekvence shodně, jako je uvedeno na obrázcích 82 až 90, na kterých jsou uvedeny pouze záznamy s nejvyšší zaznamenanou hodnotou RMS.

V prvním zatěžovacím stavu byla konstrukce zatěžována krokovou frekvencí 2,06 Hz a ta byla také ve výsledné odezvě dominantní (obr. 82).

V druhém zatěžovacím stavu byla kroková frekvence 1,78 Hz, ale přesto byla v odezvě dominantní skutečná vlastní frekvence lávky 2,06 Hz (obr. 83). V třetím zatěžovacím stavu byla konstrukce buzena frekvencí 3,56 Hz, což je dvojnásobek předpokládané vlastní frekvence 1,78 Hz. Přesto při tomto stavu byla dominantní vlastní frekvence lávky 3,45 Hz (obr. 84). Z těchto výsledků, lze opět usuzovat, že 1,78 Hz buď není vlastní frekvencí lávky, nebo konstrukce nebyla buzena dostatečně ve vodorovném směru, aby byl při krokové frekvenci 3,56 Hz vybuzen vodorovný tvar kmitání s vlastní frekvencí 1,78 Hz.

Ve čtvrtém zatěžovacím stavu byla konstrukce zatěžována krokovou frekvencí 2,38 Hz a v odezvě byla dominantní odezva při frekvenci 2,36 Hz (obr. 86). Budící frekvence se od skutečné vlastní frekvence liší pouze díky chybě měření při orientační modální analýze.

V pátém zatěžovacím stavu byla konstrukce buzena s krokovou frekvencí 2,66 Hz, ale dominantní frekvencí v odezvě byla 2,36 Hz (obr. 87). Z toho lze usuzovat (stejně jako u frekvence 1,78 Hz), že frekvence 2,66 Hz buď není vlastní frekvencí lávky, nebo je svázána s vodorovným tvarem kmitání, který by krokovou frekvencí 2,66 Hz nebylo možné vybudit.

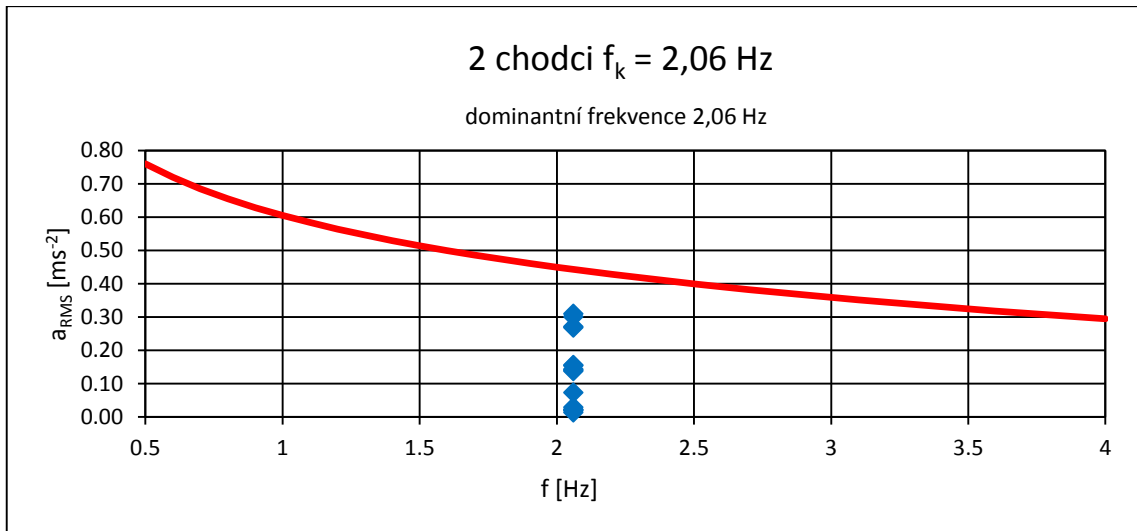
V šestém zatěžovacím stavu byla kroková frekvence 2,98 Hz a dominantní frekvencí odezvy byla skutečná vlastní frekvence lávky 3,01 Hz (obr. 88).

Při stavech zaměřených na vandalismus konstrukce kmitala se stejnou frekvencí, jako byla frekvence budící, tzn. 2,06 Hz a v druhém případě 2,36 Hz (obr. 88 a 89).

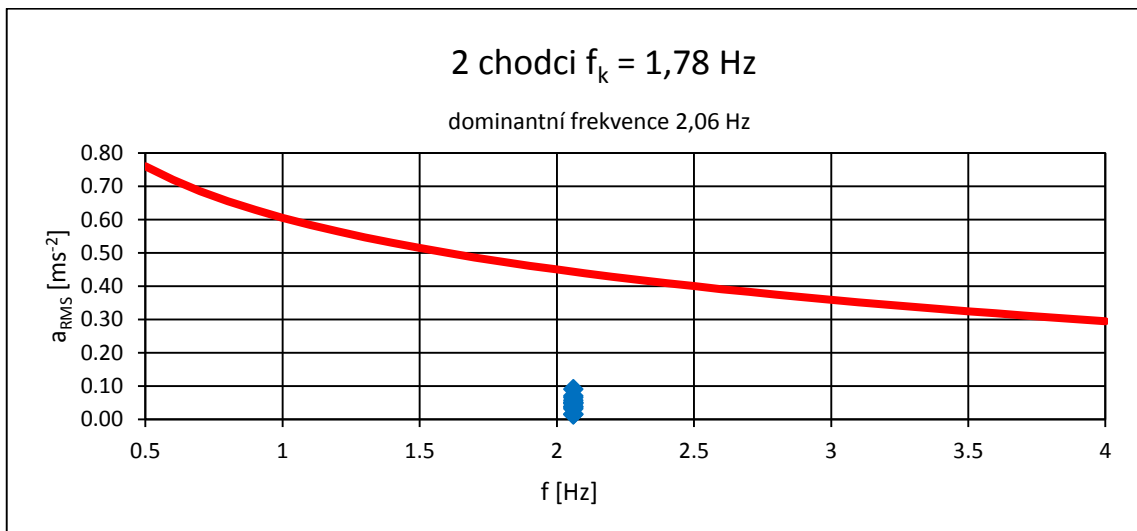
Při běžném provozu byla na všech záznamech v odezvě dominantní frekvence 2,06 Hz (obr. 85).

Posouzení naměřených hodnot RMS bylo provedeno formou grafu, pomocí kterého je v [4] stanovena hranice komfortu chodců (obr. 7). Obě osy tohoto grafu mají logaritmická měřítka, a proto byl tento graf převeden do normálního měřítka, aby bylo možné získat limitní hodnoty. Křivka hranice komfortu byla převedena pouze v zájmovém frekvenčním intervalu 0 – 4 Hz. Posouzení jednotlivých hodnot RMS pro jejich dominantní frekvence je zobrazeno zvlášť pro každou skupinu zatěžovacích stavů na obr. 91 – 99.

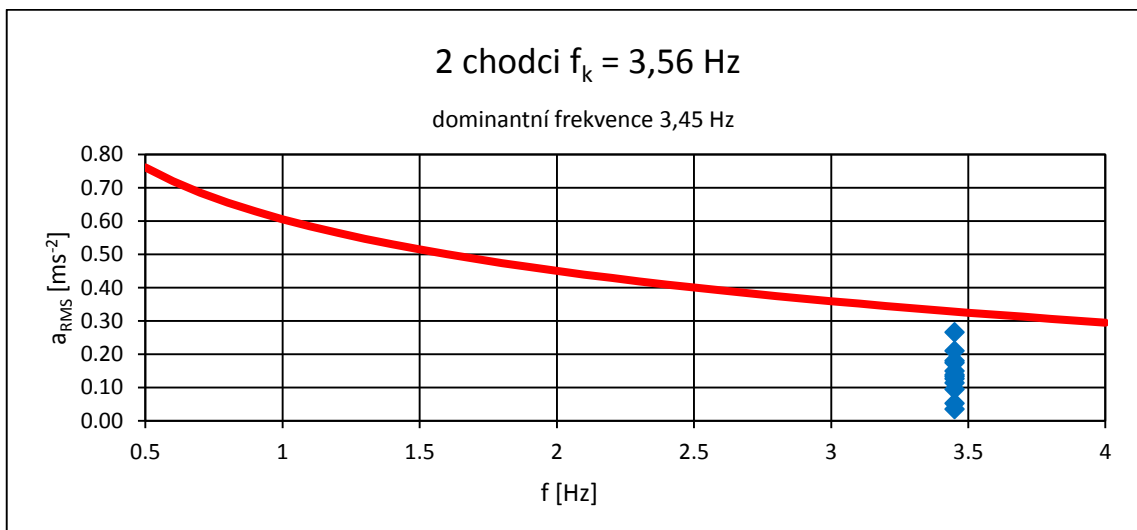




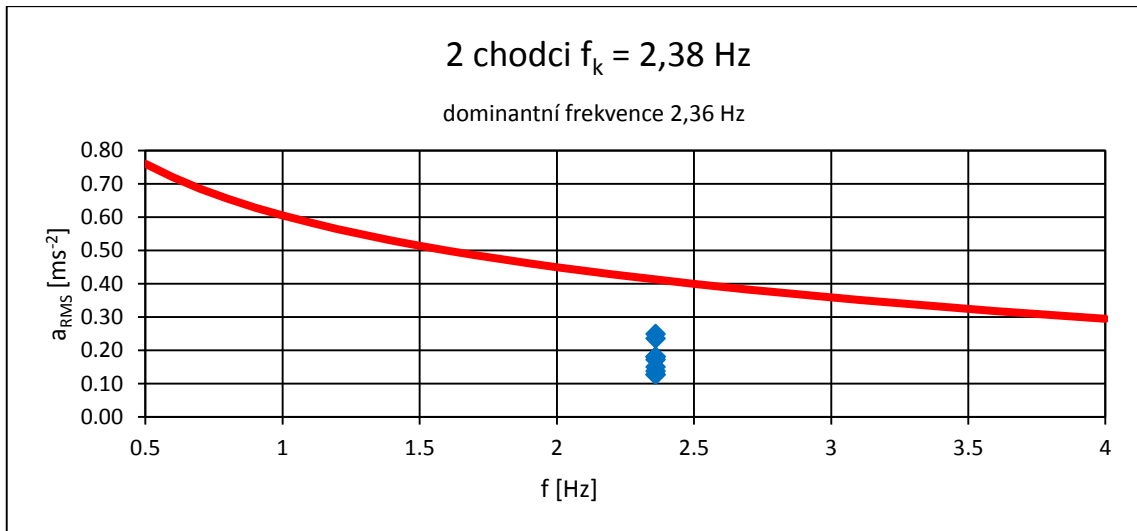
Obr. 91 Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 2,06 Hz



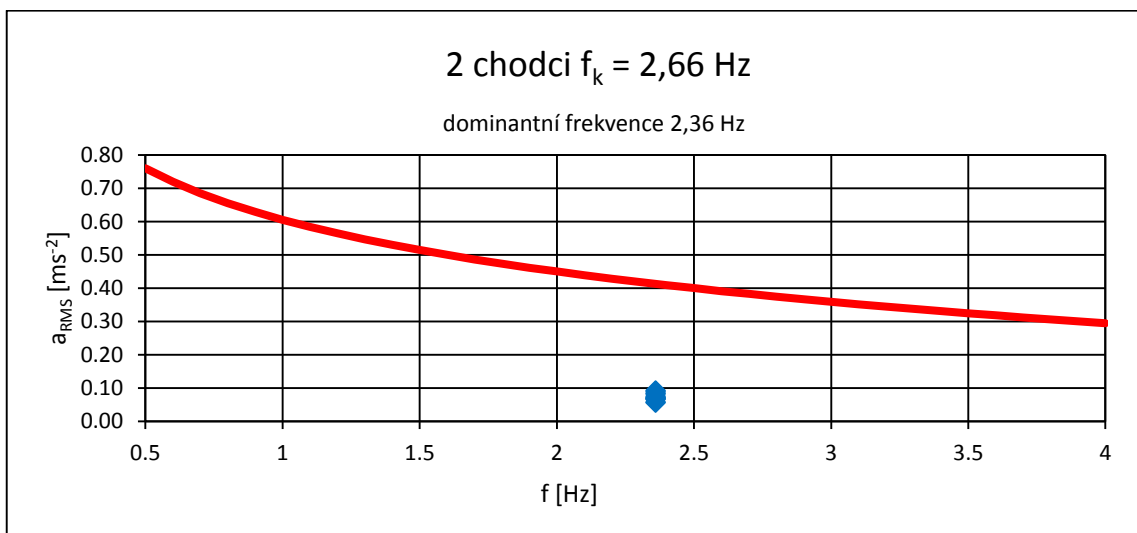
Obr. 92 Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 1,78 Hz



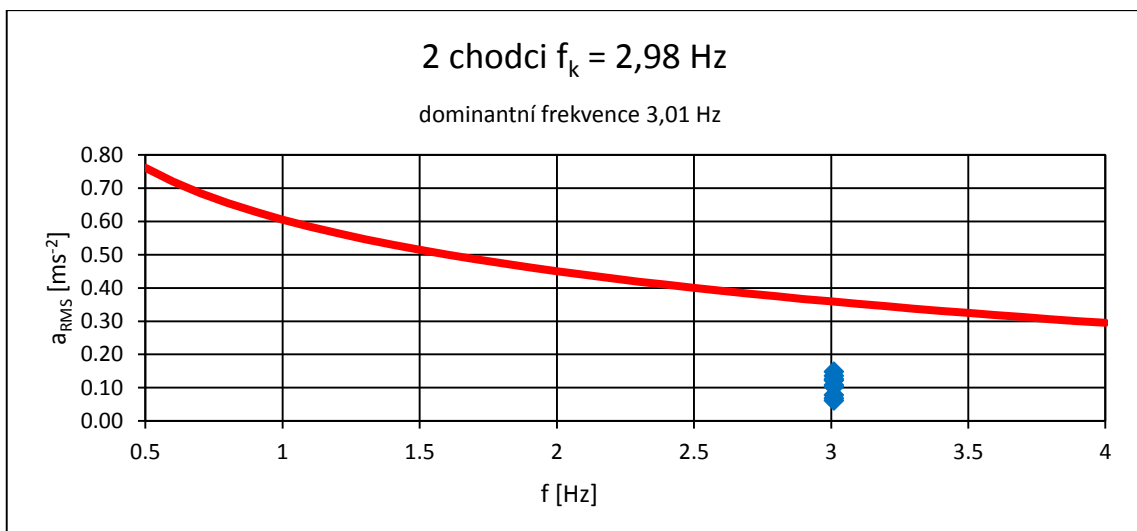
Obr. 93 Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 3,56 Hz



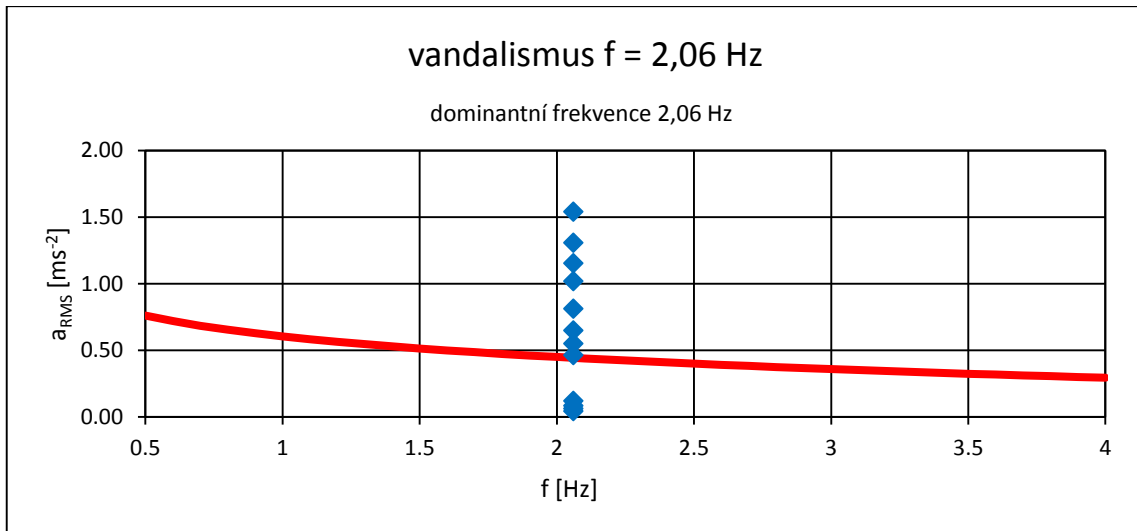
Obr. 94 Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 2,38 Hz



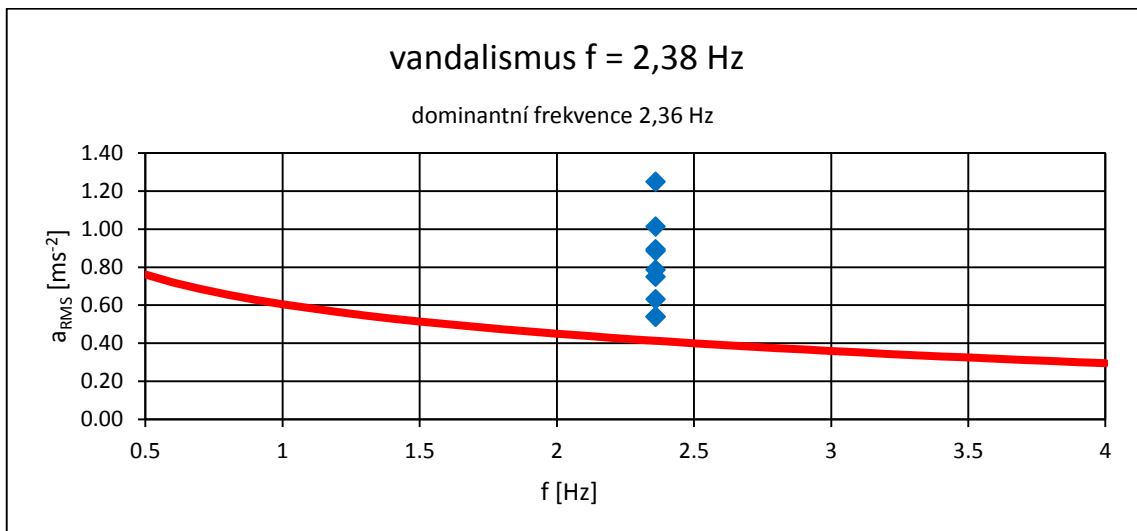
Obr. 95 Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 2,66 Hz



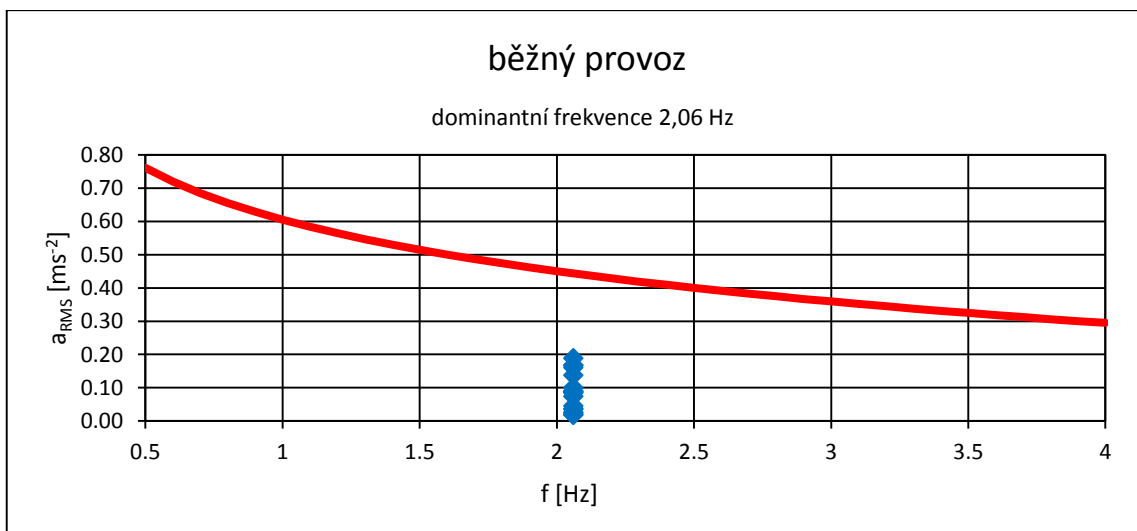
Obr. 96 Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 2,98 Hz



Obr. 97 Posouzení ČSN 73 6209 - vandalismus 2,06 Hz



Obr. 98 Posouzení ČSN 73 6209 - vandalismus 2,37 Hz



Obr. 99 Posouzení ČSN 73 6209 - běžný provoz

Největší efektivní hodnoty zrychlení z celého měření bylo dosaženo u vandalismu, a to u záznamu č. 28 kdy byla konstrukce buzena frekvencí 2,06 Hz. Hodnota  $1,542 \text{ ms}^{-2}$  byla zachycena snímačem v bodě C2, kde byla konstrukce také buzena, a odpovídá to tak předpokladu, že v bodě C2 má daný tvar vlastního kmitání největší pořadnice.

Při ostatních stavech bylo největších efektivních hodnot zrychlení dosaženo při zatěžovacím stavu „2 chodci s krokovou frekvencí 2,06 Hz“, a to v záznamu č. 5. Hodnota RMS  $0,309 \text{ ms}^{-2}$  byla naměřena na snímači v bodě C2, ve kterém i probíhalo buzení. Při záznamu č. 11 bylo dosaženo také relativně vyšší hodnoty RMS  $0,266 \text{ ms}^{-2}$ , ale hranici pohody tato hodnota také neohrozila. Při běžném provozu pak bylo dosaženo nejvyšší hodnoty  $0,188 \text{ ms}^{-2}$ , což při dominantní frekvenci 2,06 Hz pohodlně vyhovuje kritériu.

Jak je vidět z grafů, všechny zatěžovací stavy stanovené normou ČSN 73 6209 [4], tzn. běžný provoz a dvojice chodců, splňují dané kritérium pohody chodců. Pouze zatěžovací stavy vandalismu toto kritérium nespĺňují, ale podle normy ani nemusí. Lávka tedy podle kritéria komfortu chodců stanovených v ČSN 73 6209 [4] vyhověla ve všech normou stanovených situacích.

### 9.8.2.3 Posouzení podle SÉTRA

Tento technický předpis [13] udává stupnici kritérií komfortu v hodnotách okamžitého zrychlení. Jsou stanoveny zvláštní kritéria pro vodorovné a svislé kmitání. Pro oba směry kmitání je stanovena stupnice čtyř stupňů pohody (obr. 8 a 9). Podrobněji byl předpis představen v kapitole 7.2.3. I když je tento předpis spíše určen pro návrh nových lávek, je příhodné posoudit podle těchto kritérií i stávající lávku v Dobřichovicích.

Posouzení je shrnuto v tabulce 9, kde jsou barevně vyznačené jednotlivé stupně komfortu chodců (zelená = maximální, fialová = střední, žlutá = minimální, červená = nepříjemná úroveň kmitání). Hodnoty zrychlení jsou totožné jako v tabulce 7 pro posouzení podle ČSN EN 1990.

Pro svislé kmitání bylo pro většinu zatěžovacích stavů sestavených podle ČSN 73 6209 [4] splněno kritérium pro maximální komfort chodců. Výjimkou je záznam č. 11 a záznam č. 5, na kterých byla přesáhnuta hranice  $0,5 \text{ ms}^{-2}$ , a bylo splněno kritérium pouze pro střední pocit komfortu.

Ve vodorovném směru lávka dopadla hůře. V každém skupině zatěžovacích stavů podle ČSN 73 6209 bylo alespoň na jednom záznamu přesáhnuta doporučená hodnota  $0,15 \text{ ms}^{-2}$  pro maximální pohodlí chodců. Nejvíce byla překročena na záznamu č. 5 a 13, kde hodnoty zrychlení byly dokonce větší než  $0,2 \text{ ms}^{-2}$ .

Doporučené kritérium  $0,1 \text{ ms}^{-2}$  pro vodorovné kmitání z hlediska možnosti vzniku lock-in-efekt nebylo splněno na více než polovině záznamů. Zejména pak při prvním zatěžovacím stavu „2 chodci vedle sebe 2,06 Hz“, kde byla tato hodnota překročena na třech z pěti záznamů.

Při zatěžovacím stavu „vandalismus 2,06 Hz“ byly na snímačích v bodě B2 naměřeny relativně nízké hodnoty splňující kritérium pro maximální pohodlí, ale je to způsobeno tím, že v blízkosti bodu B2 má daný vlastní tvar uzlový bod. Při zatěžovacím stavu „vandalismus 2,37 Hz“ byly na všech snímačích vždy alespoň na jednom záznamu překročeny hodnoty pro střední komfort.

Lávka při posouzení podle technického předpisu SÉTRA [13] při zatěžovacích stavech daných ČSN 73 6209 [4] splňuje ve většině případů kritérium maximálního komfortu pro svislé kmitání a středního komfortu pro vodorovné kmitání. Ve stavech zaměřených na vandalismus bylo ve většině případů dosaženo stavu minimálního komfortu.

Tabulka 9 Posouzení podle kritérií komfortu SÉTRA

č.	ZATĚŽOVACÍ STAV [Hz]		ZRYCHLENÍ [ms <sup>-2</sup> ]							
			3Z		B2Z		B2Y		C2Z	
			MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
1	2 chodci	2.06 Hz	0.23	-0.23	0.06	-0.07	0.06	-0.05	0.44	-0.45
2	2 chodci	2.06 Hz	0.26	-0.27	0.14	-0.17	0.19	-0.20	0.48	-0.47
3	2 chodci	2.06 Hz	0.24	-0.24	0.11	-0.13	0.17	-0.14	0.45	-0.43
4	2 chodci	2.06 Hz	0.13	-0.12	0.09	-0.10	0.04	-0.03	0.23	-0.24
5	2 chodci	2.06 Hz	0.29	-0.28	0.16	-0.20	0.25	-0.23	0.53	-0.61
7	2 chodci	1.78 Hz	0.18	-0.18	0.14	-0.15	0.04	-0.04	0.19	-0.16
8	2 chodci	1.78 Hz	0.08	-0.08	0.07	-0.07	0.03	-0.03	0.13	-0.13
9	2 chodci	1.78 Hz	0.08	-0.07	0.06	-0.07	0.07	-0.07	0.12	-0.12
10	2 chodci	1.78 Hz	0.15	-0.14	0.16	-0.24	0.19	-0.20	0.23	-0.20
11	2 chodci	3.56 Hz	0.57	-0.56	0.51	-0.50	0.16	-0.13	0.33	-0.32
12	2 chodci	3.56 Hz	0.35	-0.34	0.33	-0.31	0.09	-0.08	0.23	-0.20
13	2 chodci	3.56 Hz	0.35	-0.34	0.27	-0.32	0.23	-0.24	0.23	-0.23
15	2 chodci	3.56 Hz	0.37	-0.36	0.31	-0.29	0.11	-0.10	0.13	-0.15
16	2 chodci	2.38 Hz	0.32	-0.33	0.38	-0.43	0.07	-0.07	0.26	-0.26
17	2 chodci	2.38 Hz	0.31	-0.33	0.41	-0.41	0.08	-0.09	0.25	-0.27
18	2 chodci	2.38 Hz	0.25	-0.23	0.32	-0.30	0.08	-0.13	0.27	-0.26
19	2 chodci	2.66 Hz	0.22	-0.23	0.26	-0.25	0.12	-0.16	0.23	-0.23
20	2 chodci	2.66 Hz	0.19	-0.21	0.25	-0.28	0.08	-0.08	0.24	-0.19
22	2 chodci	2.66 Hz	0.15	-0.15	0.17	-0.18	0.12	-0.10	0.16	-0.13
23	2 chodci	2.66 Hz	0.18	-0.20	0.17	-0.21	0.08	-0.07	0.22	-0.18
24	2 chodci	2.97 Hz	0.40	-0.31	0.29	-0.25	0.08	-0.08	0.32	-0.26
25	2 chodci	2.97 Hz	0.41	-0.39	0.28	-0.27	0.19	-0.18	0.36	-0.40
26	2 chodci	2.97 Hz	0.39	-0.31	0.23	-0.24	0.13	-0.10	0.33	-0.32
27	9 vandalů	2.06 Hz	1.08	-1.05	0.26	-0.23	0.05	-0.06	2.24	-2.18
28	9 vandalů	2.06 Hz	1.27	-1.31	0.32	-0.33	0.07	-0.07	2.42	-2.44
29	9 vandalů	2.06 Hz	0.75	-0.73	0.27	-0.40	0.19	-0.17	1.61	-1.55
30	9 vandalů	2.06 Hz	0.88	-0.92	0.19	-0.18	0.04	-0.04	1.77	-1.79
32	9 vandalů	2.38 Hz	1.18	-1.16	1.52	-1.57	0.37	-0.35	0.89	-0.88
33	9 vandalů	2.38 Hz	1.02	-0.98	1.41	-1.45	0.23	-0.20	0.85	-0.86
34	9 vandalů	2.38 Hz	1.39	-1.40	1.92	-2.01	0.29	-0.26	1.19	-1.22
6	běžný provoz	-	0.17	-0.18	0.15	-0.15	0.14	-0.15	0.29	-0.31
14	běžný provoz	-	0.22	-0.22	0.20	-0.20	0.09	-0.09	0.40	-0.37
21	běžný provoz	-	0.17	-0.16	0.15	-0.15	0.16	-0.17	0.24	-0.29
31	běžný provoz	-	0.11	-0.10	0.08	-0.08	0.03	-0.03	0.19	-0.21
35	běžný provoz	-	0.18	-0.16	0.14	-0.15	0.05	-0.06	0.31	-0.30
36	běžný provoz	-	0.26	-0.24	0.18	-0.18	0.09	-0.07	0.35	-0.35
<b>MAXIMÁLNÍ HODNOTY ZRYCHLENÍ</b>			<b>1.39</b>	<b>-1.40</b>	<b>1.92</b>	<b>-2.01</b>	<b>0.37</b>	<b>-0.35</b>	<b>2.42</b>	<b>-2.44</b>

#### 9.8.2.4 Maximální naměřené výchylky

Největších výchylek při zatěžovacích stavech chůze dvou osob bylo dosaženo na záznamu č. 16 při krokové frekvenci 2,38 Hz. V tomto záznamu bylo dosaženo maximální hodnoty výchylky 3,5mm na snímači v bodě B2. Při zatěžovacích stavech běžného provozu bylo dosaženo maximálních výchylky na záznamu č. 14 a 36 s velikostí 2,3mm.

Vůbec největších výchylek bylo dosaženo při zatěžovacích stavech zaměřených na vandalismus. Na záznamu č. 28, kdy byla lávka buzena devíti osobami frekvencí 2,06 Hz, byla v bodě C2 naměřena hodnota 15,6mm a je to vůbec největší výchylka, kterou se při experimentu podařilo naměřit.

Při vandalismu s budící frekvencí 2,38 Hz byla na záznamu č. 34 naměřena v bodě B2 maximální hodnota 9,1 mm. Při tomto stavu byla konstrukce buzena u bodu C2, protože se předpokládalo, že u tohoto bodu má vlastní tvar největší pořadnice. Podle těchto výsledků měla být konstrukce na tuto frekvenci buzena spíše v oblasti mezi závěsy (naměřené korespondují s výsledky podrobné modální analýzy, kde je maximální pořadnice 6. vlastního tvaru přibližně mezi závěsy). Výsledky u ostatních záznamů jsou shrnuty do tabulky 10.

Tabulka 10 Maximální naměřené hodnoty výchylek

č.	ZATĚŽOVACÍ STAV [Hz]		VÝKMIT VÝCHYLKY[mm]							
			3Z2		B2Z		B2Y		C2Z	
			MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
1	2 chodci	2.06 Hz	1.9	-1.7	0.3	-0.4	0.4	-0.4	2.7	-2.6
2	2 chodci	2.06 Hz	1.6	-1.6	0.8	-0.7	0.4	-0.4	2.9	-2.8
3	2 chodci	2.06 Hz	1.6	-1.6	0.4	-0.4	0.5	-0.5	2.6	-2.5
4	2 chodci	2.06 Hz	1.0	-0.9	0.7	-0.7	0.3	-0.4	1.9	-1.8
5	2 chodci	2.06 Hz	1.7	-2.1	0.8	-0.7	0.4	-0.3	2.9	<b>-3.0</b>
7	2 chodci	1.78 Hz	0.8	-0.8	0.7	-0.7	0.4	-0.5	1.2	-1.0
8	2 chodci	1.78 Hz	0.7	-0.6	0.5	-0.4	0.3	-0.3	0.8	-0.8
9	2 chodci	1.78 Hz	0.8	-0.8	0.9	-0.7	0.2	-0.2	0.8	-0.8
10	2 chodci	1.78 Hz	1.0	-1.2	0.9	-0.9	0.5	-0.4	<b>1.6</b>	-1.4
11	2 chodci	3.56 Hz	1.5	-1.4	1.4	-1.2	0.7	-0.6	1.1	-0.9
12	2 chodci	3.56 Hz	1.5	-1.3	1.2	-1.4	0.5	-0.5	1.4	-1.4
13	2 chodci	3.56 Hz	1.0	-1.1	0.9	-1.0	0.4	-0.4	1.4	-1.4
15	2 chodci	3.56 Hz	0.9	-1.0	0.9	-0.9	0.4	-0.4	1.0	-1.0
16	2 chodci	2.38 Hz	2.8	-2.4	<b>3.5</b>	-3.2	0.4	-0.4	2.0	-2.2
17	2 chodci	2.38 Hz	1.6	-1.8	2.3	-2.2	0.4	-0.5	1.7	-1.7
18	2 chodci	2.38 Hz	1.4	-1.4	1.7	-1.7	0.5	-0.5	1.4	-1.6
19	2 chodci	2.66 Hz	<b>3.1</b>	-2.5	2.9	-2.9	0.4	-0.3	2.3	-2.1
20	2 chodci	2.66 Hz	1.0	-0.8	0.9	-0.9	0.4	-0.3	1.0	-1.1
22	2 chodci	2.66 Hz	0.8	-1.0	0.6	-0.6	0.3	-0.3	0.6	-0.7
23	2 chodci	2.66 Hz	0.9	-0.9	0.8	-1.0	0.3	-0.4	0.9	-1.2
24	2 chodci	2.97 Hz	0.9	-1.0	0.6	-0.6	0.3	-0.3	0.9	-0.8
25	2 chodci	2.97 Hz	1.1	-1.0	0.4	-0.4	0.4	-0.4	0.7	-1.0
26	2 chodci	2.97 Hz	1.0	-1.1	0.7	-0.8	0.3	-0.4	1.1	<b>-1.5</b>
27	9 vandalů	2.06 Hz	6.5	-6.3	1.7	-1.4	0.5	-0.3	13.3	-13.1
28	9 vandalů	2.06 Hz	8.1	-8.4	1.8	-2.1	0.6	-0.4	15.5	<b>-15.6</b>
29	9 vandalů	2.06 Hz	4.7	-4.5	1.4	-1.5	0.5	-0.4	9.5	-9.6
30	9 vandalů	2.06 Hz	5.8	-5.5	0.9	-1.1	0.3	-0.5	10.9	-11.2
32	9 vandalů	2.38 Hz	5.6	-5.5	7.0	-7.0	0.8	-0.8	4.0	-4.2
33	9 vandalů	2.38 Hz	4.5	-4.9	6.9	-6.3	0.7	-0.9	4.9	-3.9
34	9 vandalů	2.38 Hz	6.6	-6.5	8.9	<b>-9.1</b>	1.5	-1.0	5.5	-5.4
6	běžný provoz	-	1.1	-1.0	1.1	-1.0	0.3	-0.3	1.9	-1.9
14	běžný provoz	-	1.6	-1.5	1.5	-1.4	0.5	-0.5	<b>2.3</b>	-2.1
21	běžný provoz	-	1.0	-0.9	0.6	-0.6	0.5	-0.4	1.6	-1.6
31	běžný provoz	-	1.1	-1.1	0.5	-0.4	0.3	-0.3	1.3	-1.3
35	běžný provoz	-	1.8	-1.7	1.6	-1.8	0.3	-0.3	2.0	-2.2
36	běžný provoz	-	1.5	-1.4	1.4	-1.1	0.4	-0.5	2.2	<b>-2.3</b>
<b>MAXIMÁLNÍ HODNOTY VÝCHYLEK</b>			<b>8.1</b>	<b>-8.4</b>	<b>8.9</b>	<b>-9.1</b>	<b>1.5</b>	<b>-1.0</b>	<b>15.5</b>	<b>-15.6</b>



### 9.8.2.5 Shrnutí posouzení

Podle normy ČSN EN 1990 [12] lávka při běžném provozu a chůzi dvou osob (dále jako „běžná úroveň zatížení“) vyhověla kritériím pro svislé kmitání ve všech případech. Největší hodnoty zrychlení ve svislém směru  $0,61 \text{ ms}^{-2}$  pro zatěžovací stav chůze dvou chodců a  $0,40 \text{ ms}^{-2}$  pro běžný provoz byly naměřeny při odezvě konstrukce s frekvencí  $2,06 \text{ Hz}$ . Tato frekvence je tedy pro svislé kmitání z pohledu ČSN EN 1990 [12] nejproblémovější, protože u ní dochází k největším výkmitům zrychlení. Navíc je tato frekvence blízko nejběžnější krokové frekvenci chodců. Přesto kritérii  $0,7 \text{ ms}^{-2}$  pro svislé kmitání lávka vyhověla. Kritérium pro vodorovné kmitání  $0,2 \text{ ms}^{-2}$  pro běžné úrovně zatížení bylo překročeno ve dvou případech a oba tyto případy svojí velikostí vybočovaly z ostatních hodnot. Je tak velmi pravděpodobné, že naměřené hodnoty nebyly způsobeny jen odezvou konstrukce na daný zatěžovací stav, ale mohly být způsobeny například větrem nebo reakcí konstrukce na jiný podnět. Úroveň kmitání při zatěžovacích stavech zaměřených na vandalismus značně překračovala normou stanovené limity pouze pro svislé kmitání. Ve svislém směru bylo dosaženo největšího zrychlení  $2,42 \text{ ms}^{-2}$ . Pokud bude považován vandalismus za extrémní zatížení a hraniční hodnota pro vodorovné kmitání tedy bude  $0,4 \text{ ms}^{-2}$ , z hlediska vodorovného kmitání lávka při vandalismu podle [12] vyhovuje.

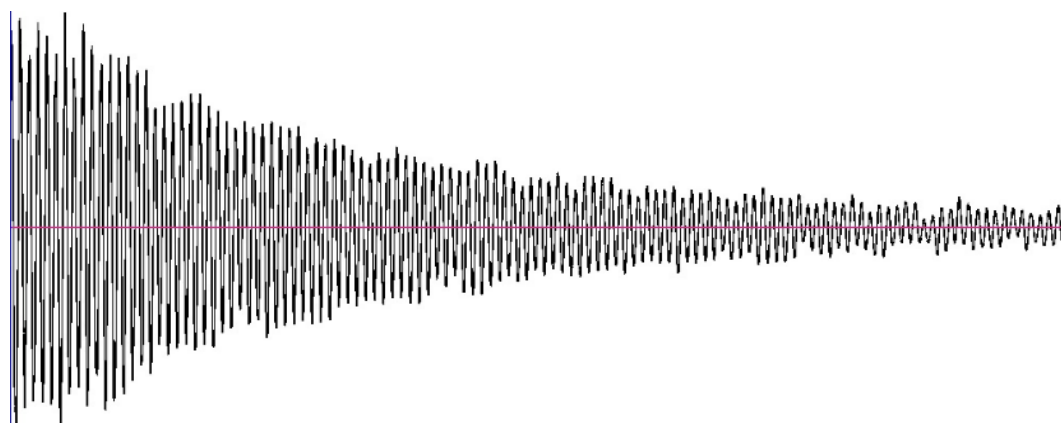
Při posouzení podle ČSN 73 6209 [4] bylo pro běžné úrovně zatížení (běžný provoz a chůze dvou chodců) kritérium komfortu ve všech případech splněno. Zatížení vandaly v této normě není definováno a ani nejsou tak stanoveny požadavky, které by lávka měla splňovat. Lze tedy konstatovat, že podle [4] lávka plně vyhověla ve všech požadavcích.

Poslední posouzení bylo provedeno podle kritérií technického předpisu SÉTRA [13]. Podle kritérií pro svislé kmitání lávka splňuje při běžných úrovních zatížení (běžný provoz, chůze 2 osob) maximální úroveň komfortu. Z hlediska vodorovného kmitání lávka splňuje střední úroveň komfortu. Ve stavech zaměřených na vandalismus bylo ve většině případů dosaženo stavu minimálního komfortu. Celkově lze tak podle tohoto technického předpisu komfort chodců na této lávce klasifikovat jako střední.

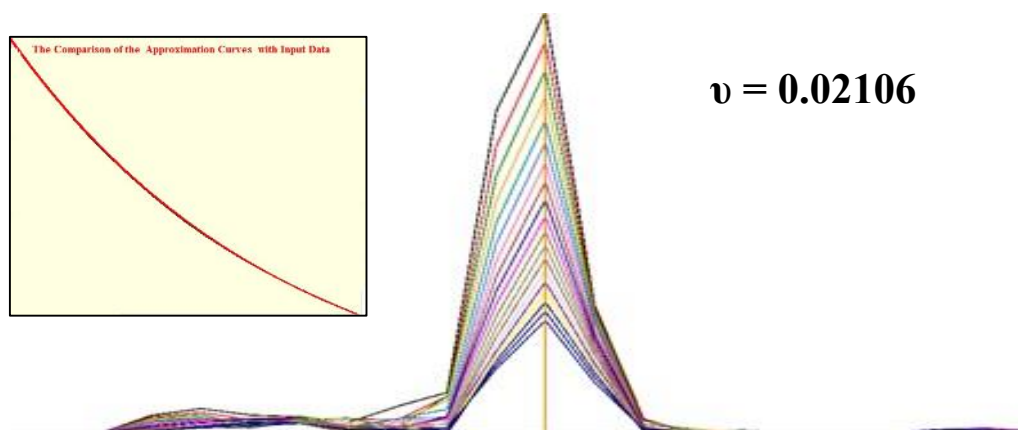
### 9.8.3 Vyhodnocení útlumu pro vybrané záznamy

U vhodných záznamů, kde bylo zachyceno dokmitání konstrukce, byl vyhodnocen logaritmický dekrement útlumu. Byl vyhodnocen v programu Material Damping pomocí FFT Multispekter. Vzhledem k tomu, že při dynamické zkoušce nebyl přerušen provoz, většina záznamů nebyla vhodných pro vyhodnocení útlumu. Dokmitání konstrukce bylo pěkně zachyceno pouze na záznamu č. 12 (2 chodci 3,56 Hz) a na části záznamů vandalismu.

Na záznamu č. 12 byl vyhodnocen logaritmický dekrement  $\nu = 0,02106$  při dominantní frekvenci odezvy 2,45 Hz (obr. 100 a 101).

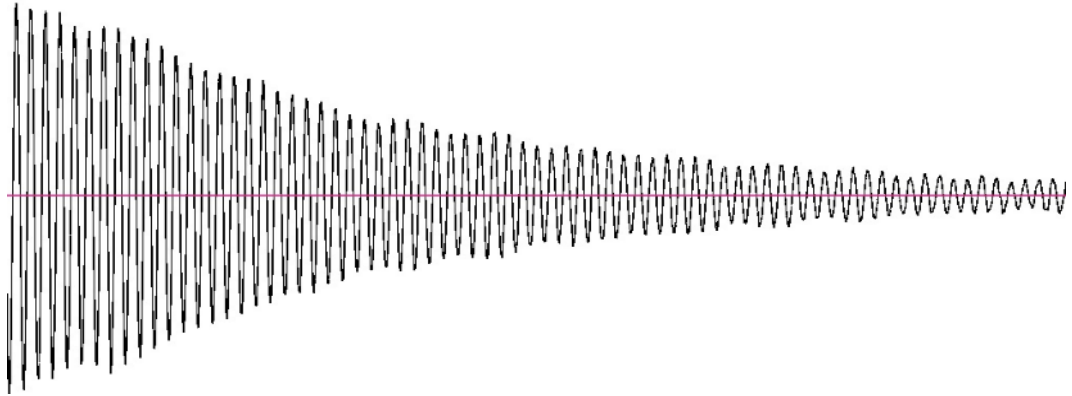


Obr. 100 záznam č. 12 – dokmitání na snímači 32Z

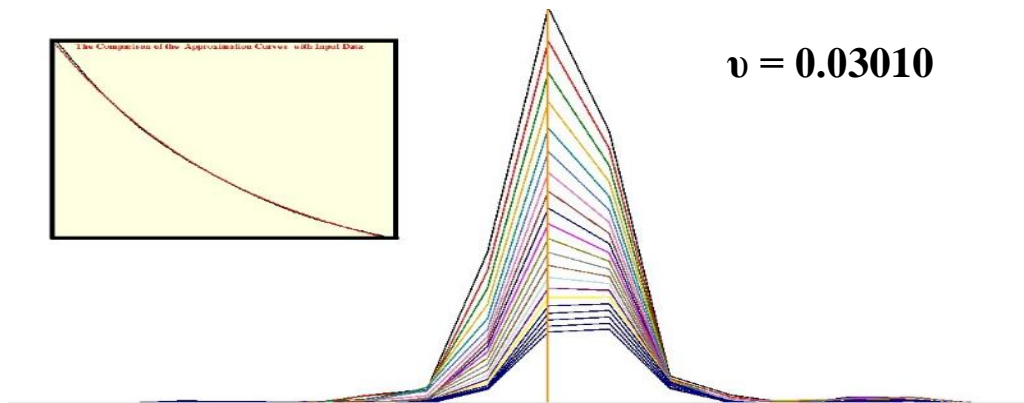


Obr. 101 záznam č. 12 – FFT multispektrum (3,45 Hz)

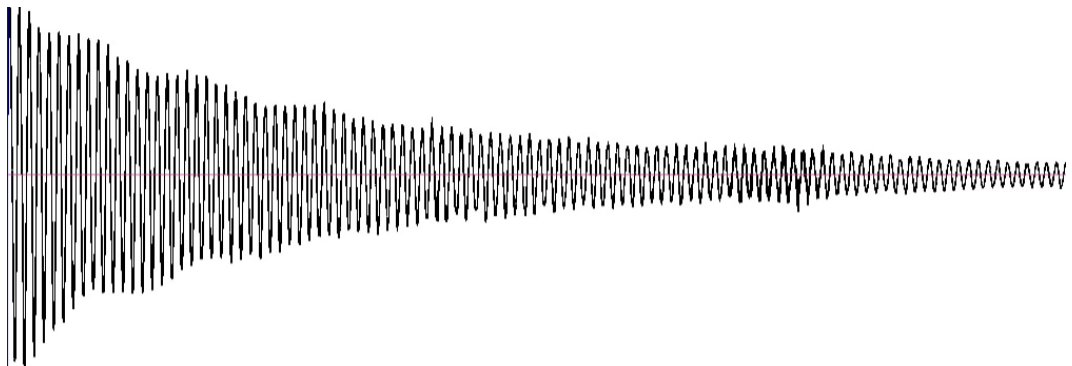
Ze záznamů zaměřených na vandalismus při frekvenci 2,06 Hz byl z hlediska útlumu vyhodnocen pouze záznam č. 28. Pro záznam ze snímače C2Z byl vyhodnocen logaritmický dekrement  $\nu = 0,03010$  (obr. 102 a 103). Ze záznamů vandalismu při frekvenci 2,38 Hz byly vyhodnoceny záznamy č. 32, 33 a 34. Pro záznam č. 32 byl vyhodnocen logaritmický dekrement  $\nu = 0,02307$ , pro záznam č. 33  $\nu = 0,02587$  a pro záznam č. 34  $\nu = 0,02323$  (obr. 104 a 105).



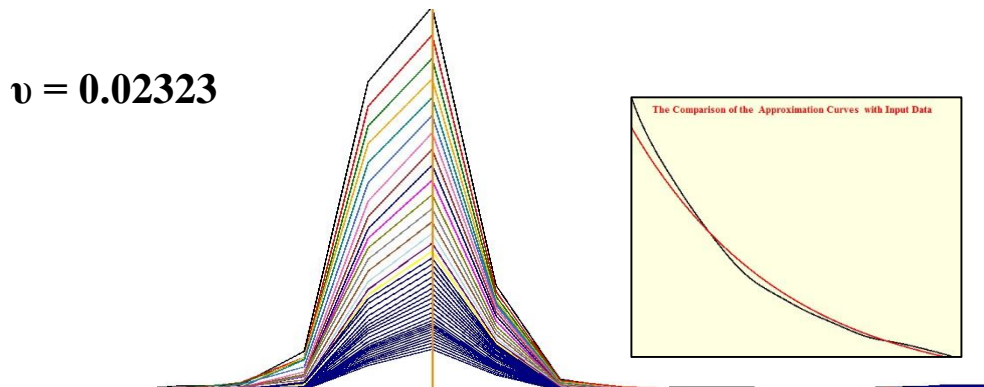
Obr. 102 záznam č. 28 - dokmitání na snímači C2Z



Obr. 103 záznam č. 28 - FFT multispektrum (2,06 Hz)



Obr. 104 záznam č. 34 - dokmitání na snímači B2Z



Obr. 105 záznam č. 34 - FFT multispektrum (2,36 Hz)

## 10 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce byla příprava, realizace a vyhodnocení dynamické zkoušky na lávce v Dobřichovicích. Kromě jiného byly v úvodu práce shrnuty základy experimentální analýzy konstrukcí a pozornost byla věnována také posouzení kmitání lávek z hlediska kritérií komfortu chodců.

Základním kamenem této práce je dynamická zkouška na lávce přes Berounku v Dobřichovicích. Lávka je postavena v příměstské oblasti nedaleko Prahy a denně je využívána stovkami lidí, kteří jdou na vlakové nádraží. K volbě této lávky vedl především důvod, že na této lávce po dobu její existence nebyla provedena žádná dynamická zkouška, která by ověřila její dynamické chování.

V rámci dynamické zkoušky byla provedena experimentální modální analýza metodou Ambient Vibration Testing, která poskytla informace o současných modálních charakteristikách lávky. Byl vyhodnocen soubor devíti vlastních tvarů, z toho 6 tvarů je svislých ohybových a 3 tvary jsou kroutivé. Vodorovné tvary kmitání se při experimentu zachytit nepovedlo. Několik vyhodnocených vlastních frekvencí leželo v intervalu 1,7 Hz až 2,4 Hz, který je pro lávky pro pěší nejméně vhodný, a bylo tak vhodné lávku prověřit z hlediska vynuceného kmitání.

Dynamická zatěžovací zkouška byla provedena podle ČSN 73 6209 [4]. Pro účely této zkoušky bylo pro simulaci provozu na lávce použito běžného provozu a synchronizované chůze dvou osob. Kromě toho bylo simulováno zatížení tzv. vandalismem. Na základě orientační modální analýzy, která byla provedena před dynamickou zatěžovací zkouškou, byly stanoveny zatěžovací stavy, které měly vyvolat potencionálně největší odezvu.

Naměřené hodnoty kmitání lávky způsobeného chodci byly posouzeny podle ČSN EN 1990 [12], ČSN 736209 [4] a technického předpisu SÉTRA [13]. V rámci běžného provozu a synchronizované chůze dvou osob bylo pouze ve 2 záznamech lehce překročeno kritérium pro vodorovné kmitání stanovené v [12]. Vzhledem k takto malému počtu výsledků s nepatrným překročením doporučené hodnoty, lze konstatovat, že lávka vyhověla podle všech tří norem.

Citlivost lidského organismu je složitá záležitost, na kterou lze jen velmi těžko vytvořit objektivní měřítko. Každá ze zmíněných norem pohlíží na kritérium komfortu chodců trochu z jiného pohledu a doporučuje rozdílná kritéria. Porovnání nároků jednotlivých norem je proto velmi zajímavou záležitostí. Podle autora této bakalářské práce jsou nejvíce benevolentní kritéria stanovená technickým předpisem SÉTRA [13]. Tento předpis je určen pro návrh nových lávek. Přesto když uvážíme minimální stupeň pohodlí (definovaný hranicí

2,5 ms<sup>-2</sup> pro svislé kmitání a pro vodorovné kmitání 0,8 ms<sup>-2</sup>) jako kritérium, při kterém lávka ještě vyhoví, potom by vyhovělo mnoho lávek, které by při posouzení podle [4] a [12] v žádném případě nevyhověly. Lávka, která by byla navržena na tento stupeň komfortu, by pak při běžném provozu mohla svisle kmitat se zrychlením až 2,5 ms<sup>-2</sup> a takový stav je pro běžný provoz nepřijatelný. Autor by v případě tohoto předpisu doporučil snížit hodnoty kritérií, zejména v případě svislého kmitání, aby nedocházelo k návrhu lávek podle takto benevolentních kritérií.

Pocit nepohodlí způsobený vibracemi je spojený s dobou, po jakou je člověk vibracím vystaven. Chvilkové výkmity chodec v běžném provozu pocítí jen velmi těžko. Podle autora je proto nejnázornějším ukazatelem míry komfortu chodců efektivní hodnota veličin charakterizující kmitání. Efektivní hodnota je svázána s délkou intervalu, na jakém výpočet provádíme, a výstižněji tak popisuje úroveň kmitání, které jsou chodci po delší dobu vystaveni. Efektivních hodnot zrychlení je použito pro posouzení komfortu chodců v [4]. V případě vyhodnocení dynamické zkoušky v Dobřichovicích lávka ve všech případech běžných zatěžovacích stavů vyhověla. Byly tak potlačeny i dvě extrémní naměřené hodnoty ve vodorovném směru, které nevyhovovaly kritériu z [12]. Při pohledu na tyto dva záznamy je vidět, že časový interval, kde je odezva větší než 0,2 ms<sup>-2</sup>, je velmi krátký a chodec se během této chvíle nemůže začít cítit nepříjemně. Právě z těchto výsledků autor usuzuje, že pro popis komfortu chodců je efektivní hodnota zrychlení výstižnější než hodnoty okamžité.

Důležitým parametrem při výpočtu efektivní hodnoty je délka časového intervalu a oblast záznamu, ze které je hodnota vypočtena. Při výběru oblasti záznamu, kde konstrukce kmitá minimálně, budou hodnoty jednoznačně nižší, než když bude hodnota vypočtena z úseku záznamu, kde konstrukce kmitá nejvíce. Bylo by vhodné, aby byly do normy [4] stanoveny nebo doporučeny podmínky výpočtu efektivní hodnoty zrychlení, čímž by se vyhodnocování zkoušek stalo více jednoznačné a závěry jednotlivých zkoušek by bylo možné relevantně porovnávat.

Problematika vandalismu není výslovně zmíněna v žádné z použitých norem. Pokud bychom ale brali v potaz kritéria z [4] a [12], která platí pro běžný provoz, ani v jednom případě by lávka nevyhověla. Z výsledků je jasné, že skupina většího počtu vandalů dokáže poměrně jednoduše lávku nepříjemně rozkmitat až do takové úrovně, že chůze po lávce je pro chodce velmi nepříjemná. V situaci, kdy byl simulován vandalismus, bylo vidět na kolemjdoucích, že jim je tento stav velice nepříjemný, přestože naměřené hodnoty nedosahovaly tak extrémních hodnot. Podle autora by bylo vhodné v určité míře zahrnout problematiku vandalismu do norem zabývajících se lávkami pro pěší.

## 11 SEZNAM LITERATURY

- [1] MÁČA, Jiří. přednášky *Dynamika stavebních konstrukcí 1*. Praha: ČVUT, 2017 [online]. [2017-04-10]. Dostupné z WWW: <<https://mech.fsv.cvut.cz/student/>>
- [2] TP 215. *Využití modální analýzy pro návrh, posouzení, opravy, kontrolu a monitorování mostů pozemních komunikací*. Praha: Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, 2009 [online]. [2017-05-01]. Dostupné z WWW: <[www.pjpk.cz/viewFile.asp?file=1673](http://www.pjpk.cz/viewFile.asp?file=1673)>
- [3] ČSN 73 2044. *Dynamické zkoušky stavebních konstrukcí*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1983
- [4] ČSN 73 6209. *Zatěžovací zkoušky mostů*. Praha: Český normalizační institut, 1996
- [5] ČSN 73 6209 Změna Z1. *Zatěžovací zkoušky mostů*. Praha: Český normalizační institut, 2005
- [6] Wikipedia: the free encyclopedia: *Fourier transform* [online]. c2017 [2017-05-26]. Anglická verze. Dostupný z WWW: <[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fourier\\_transform&oldid=782664773](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fourier_transform&oldid=782664773)>
- [7] TUKEY, J. W., Cooley J.W, An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comp.* 1965, 19, 2, s. 297–301.
- [8] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Rychlá Fourierova transformace* [online]. c2015 [2017-05-26]. Dostupný z WWW: <[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Rychlá\\_Fourierova\\_transformace&oldid=12615885](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Rychlá_Fourierova_transformace&oldid=12615885)>
- [9] <http://www.nti-audio.com/en/news/let%E2%80%99s-clear-up-some-things-about-fft%E2%80%A6.aspx>

- [10] SCHWARZ, B.J. and RICHARDSON, M.H. *Experimental Modal Analysis*. Proceedings of the CSI Reliability Week, Orlando, FL, 1999. [online]. [2017-0421]. Anglická verze. Dostupné z WWW: <[http://www.maintenance.org/fileSendAction/fcType/0/fcOid/399590942963653618/filePointer/399590942964787702/fodoid/399590942964787700/28-\\_Experimental\\_Modal\\_Analysis.pdf](http://www.maintenance.org/fileSendAction/fcType/0/fcOid/399590942963653618/filePointer/399590942964787702/fodoid/399590942964787700/28-_Experimental_Modal_Analysis.pdf)>
- [11] PIRNER, Miroš a Ondřej FISCHER. *Dynamika ve stavební praxi*. Praha: ČKAIT, 2010. ISBN 978-80-87438-18-3.
- [12] ČSN EN 1990 ed. 2, Eurokód. *Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011
- [13] SETRA, Footbridges, Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading, Technical guide SETRA, Paris, France 2006. [online]. [2017-04-20]. Dostupné z WWW: <[http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/US\\_0644A\\_Footbridges.pdf](http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/US_0644A_Footbridges.pdf)>
- [14] JANÍČEK, Přemysl. *Technický experiment*. Praha: VN MON, 1989.
- [15] ŠTĚTINA, Josef, Michal JAROŠ a Pavel RAMÍK. *Virtuální laboratoř – měření*. Brno: VUT, 2003 [online]. [2017-04-01]. Dostupné z WWW: <<http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/>>
- [16] Laboratoř měřících systémů: *Měřící ústředna*. Praha: CVUT, 2013 [online]. [2017-04-09]. Dostupné z WWW: <[http://pck338-242.feld.cvut.cz/tacr/merici\\_ustredna-dokumentace.pdf](http://pck338-242.feld.cvut.cz/tacr/merici_ustredna-dokumentace.pdf)>
- [17] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *A/D převodník* [online]. [2017-04-05]. Dostupný z WWW: <[https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=A/D\\_p%C5%99evodn%C3%ADk&olidid=14299278](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk&olidid=14299278)>

- [18] přednášky *Základy zpracování signálu*. Brno : VUT, 2010 [online]. [2017-05-10].  
Dostupné z WWW: <<http://www.umt.fme.vutbr.cz/~ruja/vyuka/ZZS/zzs.html>>
- [19] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Aliasing [online]. [2017-05-09]. Dostupný z  
WWW: <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Aliasing&oldid=12772862>>
- [20] BERKOVÁ, Karolína. *Dynamická analýza lávky pro pěší v Dobřichovicích*.  
*Praha: ČVUT, fakulta stavební, 2017*
- [21] STUDNIČKOVÁ, Marie. *Kmitání lávek pro chodce*. Stavební obzor, Praha:  
ČVUT, 12(4). 2003, 112-115. ISSN 1210-4027
- [22] Výkresová dokumentace pro lávku přes řeku Berounku v Dobřichovicích,  
TopCON servis s. r. o.



## 12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Princip Fourierovy transformace .....	16
Obr. 2	Aplikace váhového okna a jeho vliv na výsledné frekvenční spektrum .....	17
Obr. 3	Typické uspořádání měřicí linky pro AVT .....	19
Obr. 4	Typické uspořádání měřicí linky pro FVT .....	21
Obr. 5	Lokální extrémů přenosové funkce .....	22
Obr. 6	Mezní odchylky vlastních frekvencí .....	24
Obr. 7	Hranice snížené pohody chodců pro svislé vibrace lávek .....	26
Obr. 8	Kritéria komfortu chodců pro svislé kmitání lávek .....	27
Obr. 9	Kritéria komfortu chodců pro vodorovné kmitání lávek .....	27
Obr. 10	Lávka v Dobřichovicích .....	34
Obr. 11	Letecký pohled na lávku v Dobřichovicích .....	35
Obr. 12	Spodní pohled na nosnou konstrukci .....	37
Obr. 13	Boční pohled na lávku .....	37
Obr. 14	Navýšení hlavních nosníků v oblasti ukotvení závěsů .....	38
Obr. 15	Pohled na 1. pole .....	38
Obr. 16	Upevnění snímače na ocelové závaží .....	39
Obr. 17	Upevnění snímačů na ocelové závaží .....	39
Obr. 18	Graf průběhu teplot během dynamické zkoušky .....	40
Obr. 19	Zjednodušená situace s vyznačením sítě měřených bodů .....	41
Obr. 20	Poloha referenčního snímače .....	42
Obr. 21	Graf ODS FRF s vyznačenými vlastními frekvencemi .....	43
Obr. 22	Graf CMIF s vyznačenými vlastními frekvencemi .....	43
Obr. 23	1. vlastní tvar .....	46
Obr. 24	1. vlastní tvar detailně v axonometrii .....	46
Obr. 25	2. vlastní tvar .....	47
Obr. 26	2. vlastní tvar detailně v axonometrii .....	47
Obr. 27	3. vlastní tvar .....	48
Obr. 28	3. vlastní tvar detailně v axonometrii .....	48
Obr. 29	4. vlastní tvar .....	49
Obr. 30	4. vlastní tvar detailně v axonometrii .....	49
Obr. 31	5. vlastní tvar .....	50
Obr. 32	5. vlastní tvar detailně v axonometrii .....	50
Obr. 33	6. vlastní tvar .....	51

Obr. 34	6. vlastní tvar detailně v axonometrii.....	51
Obr. 35	7. vlastní tvar.....	52
Obr. 36	7. vlastní tvar detailně v axonometrii.....	52
Obr. 37	8. vlastní tvar.....	53
Obr. 38	8. vlastní tvar detailně v axonometrii.....	53
Obr. 39	9. vlastní tvar.....	54
Obr. 40	9. vlastní tvar detailně v axonometrii.....	54
Obr. 41	Příklad nejméně uspokojivých tvarových shod .....	56
Obr. 42	Graf ODS FRF pro orientační modální analýzu .....	58
Obr. 43	Graf ODS FRF pro vodorovný směr zrychlení.....	58
Obr. 44	Zjednodušená situace s umístěním snímačů .....	62
Obr. 45	záznam č. 5 (2 chodci 2,06 Hz) - snímač 32Z.....	65
Obr. 46	záznam č. 5 (2 chodci 2,06 Hz) - snímač B2Z.....	65
Obr. 47	záznam č. 5 (2 chodci 2,06Hz) - snímač B2Y .....	65
Obr. 48	záznam č. 5 (2 chodci 2,06 Hz) - snímač C2Z.....	66
Obr. 49	záznam č. 10 (2 chodci 1,78Hz) - snímač 32Z.....	66
Obr. 50	záznam č. 10 (2 chodci 1,78 Hz) - snímač B2Z.....	66
Obr. 51	záznam č. 10 (2 chodci 1,78 Hz ) - snímač B2Y .....	67
Obr. 52	záznam č. 10 (2 chodci 1,78 Hz) - snímač C2Z.....	67
Obr. 53	záznam č. 11 (2 chodci 3,56 Hz) - snímač 32Z.....	67
Obr. 54	záznam č. 11 (2 chodci 3,56 Hz) - snímač B2Z.....	68
Obr. 55	záznam č. 11 (2 chodci 3,56 Hz) - snímač B2Y .....	68
Obr. 56	záznam č. 11 (2 chodci 3,56 Hz) - snímač C2Z.....	68
Obr. 57	záznam č. 13 (2 chodci 3,56 Hz) - snímač B2Y .....	68
Obr. 58	záznam č. 17 (2 chodci 2,38 Hz) - snímač 32Z.....	69
Obr. 59	záznam č. 17 (2 chodci 2,38 Hz) - snímač B2Z.....	69
Obr. 60	záznam č. 17 (2 chodci 2,38 Hz) - snímač B2Y .....	69
Obr. 61	záznam č. 17 (2 chodci 2,38 Hz) - snímač C2Z.....	69
Obr. 62	záznam č. 20 (2 chodci 2,66 Hz) - snímač 32Z.....	70
Obr. 63	záznam č. 20 (2 chodci 2,66 Hz) - snímač B2Z.....	70
Obr. 64	záznam č. 20 (2 chodci 2,66 Hz) - snímač B2Y .....	70
Obr. 65	záznam č. 20 (2 chodci 2,66 Hz) - snímač C2Z.....	71
Obr. 66	záznam č. 25 (2 chodci 2,98 Hz) - snímač 32Z.....	71
Obr. 67	záznam č. 25 (2 chodci 2,98 Hz) - snímač B2Z.....	71

Obr. 68	záznam č. 25 (2 chodci 2,98 Hz) - snímač B2Y .....	71
Obr. 69	záznam č. 25 (2 chodci 2,98 Hz) - snímač C2Z.....	72
Obr. 70	záznam č. 28 (vandalismus 2,06 Hz) - snímač 32Z .....	72
Obr. 71	záznam č. 28 (vandalismus 2,06 Hz) - snímač B2Z.....	73
Obr. 72	záznam č. 28 (vandalismus 2,06 Hz) - snímač B2Y .....	73
Obr. 73	záznam č. 28 (vandalismus 2,06 Hz) - snímač C2Z.....	73
Obr. 74	záznam č. 34 (vandalismus 2,38 Hz) - snímač 32Z .....	73
Obr. 75	záznam č. 34 (vandalismus 2,38 Hz) - snímač B2Z.....	74
Obr. 76	záznam č. 34 (vandalismus 2,38 Hz) - snímač B2Y .....	74
Obr. 77	záznam č. 34 (vandalismus 2,38 Hz) - snímač C2Z.....	74
Obr. 78	záznam č. 14 (běžný provoz) - snímač 32Z .....	74
Obr. 79	záznam č. 14 (běžný provoz) - snímač B2Z.....	75
Obr. 80	záznam č. 14 (běžný provoz) - snímač B2Y .....	75
Obr. 81	záznam č. 14 (běžný provoz) - snímač C2Z.....	75
Obr. 82	záznam č. 5 - FFT s dominantní frekvencí 2,06 Hz.....	78
Obr. 83	záznam č. 10 - FFT s dominantní frekvencí 2,06 Hz.....	78
Obr. 84	záznam č. 11 - FFT s dominantní frekvencí 3,45 Hz.....	78
Obr. 85	záznam č. 14 - FFT s dominantní frekvencí 2,06 Hz.....	78
Obr. 86	záznam č. 17 - FFT s dominantní frekvencí 2,36 Hz.....	78
Obr. 87	záznam č. 20 - FFT s dominantní frekvencí 2,36 Hz.....	79
Obr. 88	záznam č. 25 - FFT s dominantní frekvencí 3,01 Hz.....	79
Obr. 89	záznam č. 28 - FFT s dominantní frekvencí 2,06 Hz.....	79
Obr. 90	záznam č. 34 - FFT s dominantní frekvencí 2,36 Hz.....	79
Obr. 91	Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 2,06 Hz.....	81
Obr. 92	Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 1,78 Hz.....	81
Obr. 93	Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 3,56 Hz.....	81
Obr. 94	Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 2,38 Hz.....	82
Obr. 95	Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 2,66 Hz.....	82
Obr. 96	Posouzení ČSN 73 6209 - 2 chodci 2,98 Hz.....	82
Obr. 97	Posouzení ČSN 73 6209 - vandalismus 2,06 Hz .....	83
Obr. 98	Posouzení ČSN 73 6209 - vandalismus 2,37 Hz .....	83
Obr. 99	Posouzení ČSN 73 6209 - běžný provoz .....	83
Obr. 100	záznam č. 12 – dokmitání na snímači 32Z.....	90
Obr. 101	záznam č. 12 – FFT multispektrum (3,45 Hz) .....	90

Obr. 102	záznam č. 28 - dokmitání na snímači C2Z.....	91
<i>Obr. 103</i>	<i>záznam č. 28 – FFT multispektrum (2,06 Hz).....</i>	<i>91</i>
Obr. 104	záznam č. 34 - dokmitání na snímači B2Z.....	91
Obr. 105	záznam č. 34 - FFT multispektrum (2,36 Hz).....	91

## 13 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Vlastní frekvence a tvary .....	44
Tabulka 2	MAC koeficient.....	55
Tabulka 3	Výpočet mezní odchylky vlastních frekvencí .....	56
Tabulka 4	Orientační vlastní frekvence a tvary .....	59
Tabulka 5	Možnosti zatěžovacích stavů.....	60
Tabulka 6	Provedené zatěžovací stavy s čísly záznamů .....	61
Tabulka 7	Extrémní hodnoty zrychlení a posouzení podle ČSN EN 1990.....	64
Tabulka 8	Efektivní hodnoty zrychlení .....	77
Tabulka 9	Posouzení podle kritérií komfortu SÉTRA .....	86
Tabulka 10	Maximální naměřené hodnoty výchylek .....	88

## **14 POUŽITÝ SOFTWARE**

- Vibrant Technology: ME'scopeVES
- Brüel&Kjaer: PULSE
- AutoDesk: AutoCAD 2015
- Microsoft: MS Office 2016 – Word  
MS Office 2016 – Excel
- prof. Ing. Michal Polák, CSc. Material Damping