

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**ZÁVĚREČNÁ
PRÁCE**

2017

**JAN
NĚMEC**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Němec** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **420504**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Detekce poškození kompozitu pomocí laserového vibrometru

Název bakalářské práce anglicky:

Detection of composite destruction using laser vibrometer

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s principem měření laserovým vibrometrem a metodou experimentální modální analýzy (EMA)
Proveďte rešerši použití EMA pro určení poškození materiálu nebo konstrukce
Navrhněte a realizujte experimentální stanoviště pro měření kompozitových vzorků laserovým vibrometrem
Proveďte a vyhodnoťte experimenty pro stanovení modálních vlastností vzorků před a po poškození
Zhodnoťte použitelnost metody EMA vzhledem k odstupu změny modálních vlastností vlivem poškození od chyby metody

Seznam doporučené literatury:

Miláček, S.: Modální analýza mechanických kmitů, ČVUT v Praze, 1992
Firemní literatura Polytec

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Steinbauer Ph.D., ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **18.08.2017**

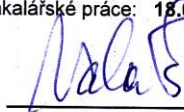
Platnost zadání bakalářské práce: _____



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

25.4.2017

Datum převzetí zadání

Němec

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pouze za vedení vedoucího práce Ing. Pavla Steinbauera Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Steinbauerovi Ph. D. za jeho cenné rady, ochotu a strávený čas. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům Zdeňce a Janu Němcovým za jejich morální a finanční oporu při studiu.

Detekce poškození kompozitu pomocí
laserového vibrometru

Detection of composite destruction using
laser vibrometer

Anotace

Tato práce se zabývá ověřením použitelnosti detekce delaminace vláknových kompozitních materiálů metodou porovnání jejich modálních vlastností před poškozením a poté. Analýza modálních vlastností bude provedena experimentálně pomocí laserového vibrometru. Účelem práce je zjistit, zda lze touto metodou modální vlastnosti měřit s dostatečnou přesností a opakovatelností tak, aby velikost změn modálních parametrů způsobených delaminací materiálu měla dostatečný odstup od velikosti odchylky měření.

Klíčová slova

Modální analýza, modální zkoušky, vláknové kompozitní materiály, delaminace, detekce poškození, laserový vibrometr.

Abstract

The subject of this thesis is the usability assessment of fibre reinforced composite delamination detection using the comparison of its modal properties with and without the damage present. The modal test will be performed using a laser vibrometer. The purpose of the experiment is to evaluate whether by using this method it is possible to measure the modal properties with sufficient accuracy and repeatability, so that the magnitudes of the modal parameters shifts caused by material delamination is sufficiently high compared to measurement deviation.

Keywords

Modal analysis, modal testing, fibre reinforced composite materials, delamination, damage detection, laser vibrometer.

Obsah

1. Teoretická část	8
1.1. Modální analýza.....	8
1.2. Matematický popis modální analýzy	8
1.2.1. Systém s 1° volnosti (SDOF)	8
1.2.1.1. Model s proporcionálním viskózním tlumením.....	8
1.2.1.2. Model s proporcionálním hysterézním tlumením.....	9
1.2.2. Systém s více stupni volnosti (MDOF).....	10
1.2.2.1. Model s proporcionálním hysterézním tlumením.....	11
1.3. Metody měření.....	11
1.3.1. Způsob uložení měřené struktury	12
1.3.2. Způsoby buzení.....	12
1.3.3. Snímače	12
1.4. Zpracování naměřených dat	13
1.4.1. Přístup pomocí SDOF teorie	13
1.4.2. Regrese podle kružnice procházející počátkem	15
1.4.3. Nalezení modální frekvence a tlumení.....	15
2. Rešerše o použití modálních zkoušek k detekování poškození	18
2.1. Použití ve stavebním inženýrství a u velkých konstrukcí.....	18
2.2. Detekce poškození vláknových kompozitů.....	19
3. Základní přehled o kompozitních materiálech.....	20
3.1. Delaminace	21
4. Experimentální část.....	22
4.1. Popis měřicího stanoviště.....	22
4.1.1. Upnutí vzorku	22

4.1.2.	Měřicí přístroje	23
4.1.3.	Destrukční zařízení	23
4.1.4.	Síť bodů	25
4.1.5.	Definice jednoho měřicího cyklu.....	25
4.2.	Měření s válcovým vzorkem z uhlíkového kompozitu	25
4.2.1.	Popis průběhu experimentu.....	25
4.2.2.	Vyhodnocení naměřených dat	28
4.2.3.	Diskuze výsledků	31
4.3.	Měření s rovinným vzorkem ze sklolaminátu.....	35
4.3.1.	Průběh experimentu	35
4.3.2.	Vyhodnocení dat	36
4.3.3.	Výsledky měření	37
4.3.4.	Diskuze výsledků	38
5.	Závěr	43
6.	Použitá literatura.....	44
7.	Přílohy.....	45

1. Teoretická část

Splnění cíle práce je založeno na postupech modální analýzy konstrukcí, která je podrobně popsána v literatuře (např. [3] a [1]).

1.1. Modální analýza

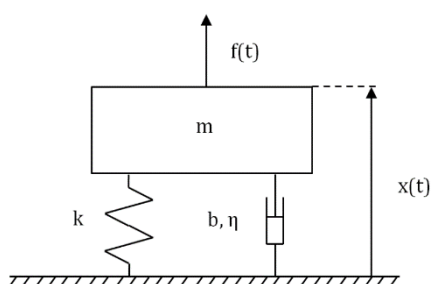
Modální analýza jsou postupy, které zkoumají mechanické struktury za účelem zjištění jejich dynamických charakteristik. Těmi jsou vlastní frekvence kmitání, vlastní tvary kmitů a modální tlumení. Modální analýzu lze provádět jak výpočetně, tak experimentálně, výsledkem je pak matematický popis dynamického chování mechanického systému.

Při experimentální modální zkoušce se zjišťuje odezva systému na určitý druh mechanického buzení. Mechanické buzení může být buď provozní, které je způsobeno chodem zařízení, jehož je zkoumaná mechanická struktura součástí, nebo vynucené, kdy působíme na strukturu kontrolovaně nějakým dalším zařízením. Zpravidla se používá modální kladívko nebo silový budič, který na zkoumaný objekt působí harmonickou silou. Odezvu systému měříme jako kmitání povrchu zkoumaného tělesa např. mechanicky pomocí akcelerometrů, nebo opticky laserovým vibrometrem, jako to bude provedeno v experimentální části této práce.

1.2. Matematický popis modální analýzy

1.2.1. Systém s 1° volnosti (SDOF)

Soustavu s 1° volnosti popíšeme jako hmotu s pružinou a tlumícím prvkem, který může mít charakter viskózního nebo hysterzezního tlumení.



Obr. 1 Model SDOF systému. (Převzato z [3])

m ... hmotnost soustavy

k ... tuhost pružiny

b, η ... tlumení

$x(t)$... výchylka v čase t

$f(t)$... budicí síla v čase t

1.2.1.1. Model s proporcionálním viskózním tlumením

Model se vyznačuje tlumícím účinkem přímo úměrným rychlosti výchylky. Tlumicí sílu lze vyjádřit jako

$$F_b = b \cdot \dot{x} \quad (1)$$

a matematický model vyjádříme pomocí rovnice

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (2)$$

popř. v upraveném tvaru, kde ω_1 je netlumená vlastní frekvence a ξ tlumení.

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_1\dot{x}(t) + \omega_1^2x(t) = \frac{1}{m}f(t) \quad (3)$$

Model s viskózním tlumením má však velmi omezené využití, protože se nehodí při aplikaci na soustavu s více stupni volnosti (při superpozici SDOF modelů). Proto se budeme řídit následujícím modelem.

1.2.1.2. Model s proporcionálním hysterezním tlumením

Model zohledňuje fakt, že reálná struktura a její tlumení se řídí frekvenční závislostí. Tlumičův účinek nepřímo úměrný frekvenci je vyjádřen rovnicí

$$F_b = \frac{\eta k}{\omega} \cdot \dot{x} \quad (4)$$

a matematický model lze napsat v několika tvarech

$$m\ddot{x}(t) + \frac{\eta k}{\omega} \cdot \dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (5)$$

$$\ddot{x}(t) + \eta \frac{\omega_1^2}{\omega} \cdot \dot{x}(t) + \omega_1^2x(t) = \frac{1}{m}f(t) \quad (6)$$

$$m\ddot{x}(t) + (1 + i\eta) \cdot kx(t) = f(t) \quad (7)$$

Užitím Laplaceovy transformace vyjádříme přenosovou funkci pro nulové počáteční podmínky $x(0) = \dot{x}(0) = 0$ jako

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{s^2 + s\eta \frac{\omega_1^2}{\omega} + \omega_1^2} \quad (8)$$

Pro vyjádření frekvenční přenosové funkce položíme $s = i\omega$ a z rovnice 8 dostaneme

$$H(i\omega) = \frac{X(i\omega)}{F(i\omega)} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{-\omega^2 + i\eta\omega_1^2 + \omega_1^2} \quad (9)$$

Frekvenční přenosovou funkci často označujeme zkráceně jako $H(\omega)$ a v upraveném tvaru zapisujeme

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{\omega_1^2(1+i\eta) - \omega^2} \quad (10)$$

Při většině měření dostáváme odezvu ve formě rychlosti $\dot{x}(t)$ nebo zrychlení $\ddot{x}(t)$. Pro další výpočty bude nutné odezvu vyjádřit pomocí parametru polohy. Proto za předpokladu harmonického pohybu odezvy ve tvaru $x(t) = Xe^{i\omega t}$ odvodíme

$$\dot{x}(t) = i\omega Xe^{i\omega t}, \quad \ddot{x}(t) = -\omega^2 Xe^{i\omega t} \quad (11), (12)$$

Frekvenční přenos můžeme tedy vyjádřit v několika základních formách.

- Receptance $H(\omega) = \frac{X}{F} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{\omega_1^2(1+i\eta) - \omega^2} \quad (13)$

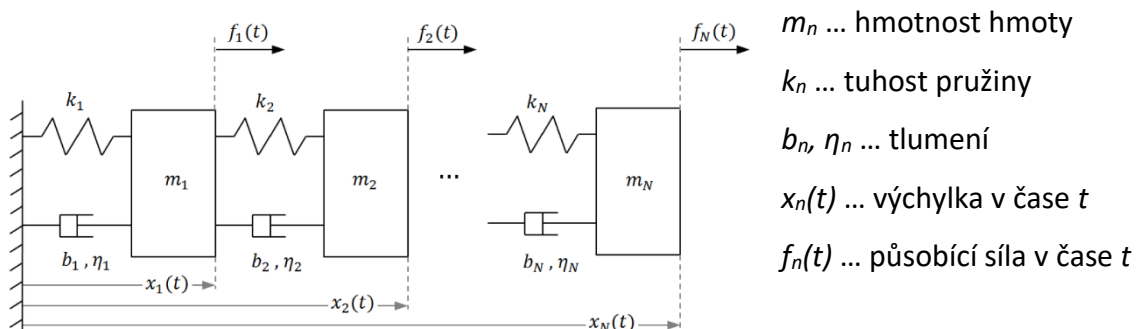
- Mobilita $V(\omega) = \frac{\dot{X}}{F} = \frac{1}{m} \cdot \frac{i\omega}{\omega_1^2(1+i\eta) - \omega^2} \quad (14)$

- Inertance $A(\omega) = \frac{\ddot{X}}{F} = \frac{1}{m} \cdot \frac{-\omega^2}{\omega_1^2(1+i\eta) - \omega^2} \quad (15)$

Pro jejich vzájemný přepočítání platí $A(\omega) = i\omega V(\omega) = -\omega^2 H(\omega) \quad (16)$

1.2.2. Systém s více stupni volnosti (MDOF)

Model s více stupni volnosti vyjádříme jako soustavu více hmot spojených pružinami a tlumicími prvky (viz obrázek 2).



Obr. 2 Model MDOF soustavy (Převzato z [3])

Pro matematickou identifikaci takové soustavy je potřeba systém vzájemně svázaných rovnic. Proto při řešení použijeme maticového zápisu a soustavu popíšeme pomocí systémových matic:

[M] ... Matice hmotnosti

[K] ... Matice tuhosti

[B] nebo [H] ... Matice viskózního nebo hysterezního tlumení

1.2.2.1. Model s proporcionalním hysterezním tlumením

Podle analogie se vztahem (7) zapíšeme pohybové rovnice v maticovém tvaru

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K + iH]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (17)$$

Abychom dostali tvar pro frekvenční přenos, je potřeba provést transformaci rovnic (17) do modálních souřadnic a použít dalších zdlouhavých operací popsaných v [2] str. 45-53. Pro nás je důležitý výsledný matematický tvar této přenosové funkce

$$H(\omega)_{rs} = \sum_{n=1}^N \frac{\Phi_{n_s} \cdot \Phi_{n_r}}{\omega_n^2(1 + i\eta_n) - \omega^2} = \sum_{n=1}^N \frac{A_{n_{rs}}}{\omega_n^2(1 + i\eta_n) - \omega^2} \quad (18)$$

r - index bodu, ve kterém byla soustava buzena

s - index bodu geometrie, pro který daná přenosová funkce platí

n - charakterizuje n -tý mód (n -tý stupeň volnosti)

$\Phi_{n_{s,r}}$ - normované vlastní vektory

$A_{n_{rs}}$ - modální konstanta

ω_n - vlastní frekvence

Srovnáním s SDOF modelem můžeme říct, že přenosová funkce pro MDOF model je v podstatě součet přenosových funkcí více jednohmotových modelů. Při frekvenčním popisu obou soustav se nám ve vztazích objevují hledané modální parametry. Ty spolu vzájemně souvisí. Důležité je, že při vybuzení soustavy vlastní frekvencí ω_n převládá tvar kmitu popsaný vlastním vektorem, popř. normovaným vlastním vektorem Φ_n . Pro určení těchto parametrů musíme zjistit hodnoty frekvenčního přenosu teoreticky v rozsahu $\omega \in (0, \infty)$. Ten při experimentu nahrazujeme konečným rozsahem $\tilde{\omega}$, který volíme většinou v souvislosti s provozními podmínkami dané soustavy.

1.3. Metody měření

Modální zkoušku lze provést více způsoby a dle účelu provedení je třeba vhodně volit uložení zkoušené struktury a způsob měření sledovaných veličin.

1.3.1. Způsob uložení měřené struktury

- Volné uložení – je nejjednodušší a používá se zejména v případech, kdy bude prováděna korelace experimentálního a výpočtového modelu. Technicky se realizuje zavěšením měřené struktury na velmi měkké pružiny.
- Vetknuté uložení – složitější z důvodu nemožnosti realizace dokonale tuhého uložení. Rozdíly mezi experimentálním a výpočtovým modelem pak plynou z velké části z nestejných okrajových podmínek. Používá se pouze tam, kde to povaha experimentální úlohy vyžaduje (např. měření turbínových lopatek).
- „In situ“ – na místě, v provozních podmínkách. Používá se zejména v případě, kdy je třeba zjistit modální parametry v provozních podmínkách, a nebude se provádět korelace s teoretickým modelem.

1.3.2. Způsoby buzení

Způsob buzení je opět dán především účelem, pro který se modální zkouška provádí, požadavky na přesnost, a frekvenčním rozsahem, ve kterém se modální parametry zjišťují. Způsoby jsou v zásadě dva, které lze ještě dále dělit podle typu signálu:

- Buzení dynamickým budičem vibrací
 - Harmonickým signálem
 - Náhodným signálem
 - Jinými druhy signálu (impulzní, rozmítaný sinus, ...)
- Impulzní buzení
 - Rázovým kladívkem
 - Náhlým uvolněním z deformované polohy

1.3.3. Snímače

Snímače použité pro snímání síly i odezvy musí co nejméně ovlivňovat strukturu a jejich účinnost musí odpovídat rozsahu měření a velikostem vychylek. Odezva se nejčastěji snímá ve formě zrychlení a používají se piezoelektrické snímače síly i zrychlení. Odezvu lze snímat též opticky pomocí laseru, což je vhodné například v případech, kdy by hardwarové snímače kvůli své hmotnosti příliš ovlivňovaly kmitání měřené struktury.

1.4. Zpracování naměřených dat

Po naměření frekvenčních přenosů následuje proces zpracování naměřených dat, jehož účelem je identifikace modálních parametrů.

Výsledkem měřicího procesu je získání časového průběhu buzení $x(t_j)_{rs}$ a odezvy $y(t_j)_{rs}$ v každém měřeném bodě. Průběhy těchto funkcí nejsou spojité, protože měření probíhá v určitém vzorkovacím čase t_j . Pro převod naměřených dat z časové do frekvenční oblasti se využívá rychlá Fourierova transformace (FFT). Dostáváme pak vzorkované frekvenční obrazy $X(\omega_j)_{rs}$ a $Y(\omega_j)_{rs}$, s kterými můžeme vyjádřit přenos soustavy ve frekvenční oblasti

$$H(\omega_j)_{rs} = \frac{Y(\omega_j)_{rs}}{X(\omega_j)_{rs}} \quad (19)$$

Přenosová funkce je pak obecně komplexní funkcí ve tvaru

$$H(\omega_j)_{rs} = (x_j + i \cdot y_j)_{rs} \quad (20)$$

Při určování modálních parametrů budeme uvažovat řadu zjednodušujících předpokladů, především proporcionální tlumení soustavy, dostatek naměřených dat s dobrou koherencí v okolí každé vlastní frekvence a dostatečný odstup a identifikovatelnost jednotlivých vlastních frekvencí.

1.4.1. Přístup pomocí SDOF teorie

Protože měříme odezvu soustavy ve více bodech, měli bychom při vyhodnocení postupovat podle MDOF teorie. Za určitých předpokladů lze ale SDOF teorii použít i na MDOF systém.

Srovnáním rovnic pro oba druhy systémů (10) a (18) lze upravit rovnici MDOF systému do tvaru pro „n-tý mód“.

$$H(\omega_j)_{rs} = \frac{A_{n_{rs}}}{\omega_n^2(1 + i\eta_n) - \omega_j^2} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{N-1} \frac{A_{m_{rs}}}{\omega_m^2(1 + i\eta_m) - \omega_j^2} \quad (21)$$

První člen je analogický k rovnici pro SDOF soustavu. Druhý člen pak reprezentuje vliv ostatních módů. Budeme-li uvažovat, že jsou jednotlivé módy dostatečně odděleny, tedy $\omega_1 \ll \omega_2 \ll \omega_3 \ll \dots \omega_N$, pak můžeme druhý člen rovnice (21) zanedbat, protože bude platit pro každé ω_n

$$\frac{A_{nrs}}{\omega_n^2(1 + i\eta_n) - \omega_j^2} \gg \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{N-1} \frac{A_{mrs}}{\omega_m^2(1 + i\eta_m) - \omega_j^2} \quad (22)$$

Pro každý „n-tý mód“ platí při této podmínce zjednodušený přenos, který odpovídá SDOF teorii.

$$H(\omega_j)_{rs} = \frac{A_{nrs}}{\omega_n^2(1 + i\eta_n) - \omega_j^2} \quad (23)$$

Dále se zaměříme na vlastnosti přenosové funkce jednohmotového modelu, které nám umožní určit neznáme modální parametry. Pokud zobrazíme přenosovou funkci SDOF modelu podle rovnice (10), dostaneme třírozměrný graf závislosti reálné a imaginární složky přenosové funkce na frekvenci. V rovině Y-Z (Gaussova rovina, reálná a imaginární část $H(\omega)$ – Nyquistův graf) tvoří přenosová funkce tvar kružnice. Z matematického tvaru přenosové funkce (10) lze dokázat, že v Gaussově rovině opravdu kružnici tvoří (viz odvození [2] str. 85-86), kde souřadnice středu kružnice $[x,y]$ vycházejí ze vztahu pro receptanci $H(\omega)$:

$$(k - m\omega^2)x - \eta y = \frac{1}{2} \quad (24)$$

$$x = 0, \quad y = -\frac{1}{2\eta} \quad (25)$$

Souřadnice středu jsou konstanty, a tudíž nezávislé na ω . Z toho vyplývá, že pro všechny naměřené body $H(\omega_j)$ existuje jediná kružnice, což je velmi důležitá vlastnost, jež budeme v následujících postupech pro identifikaci modálních parametrů využívat.

Toto již neplatí pro přenosovou funkci ve formě mobility nebo inertance, což představuje určitý problém, protože většina měření probíhá pomocí akcelerometrů nebo laserových zařízení založených na Dopplerově jevu, a odezvu u nich tedy dostáváme právě v těchto formách. Naměřená data je proto třeba převést do formy receptance podle vztahů (13), (14), (15).

1.4.2. Regrese podle kružnice procházející počátkem

Využijeme toho, že odezvoivá funkce SDOF modelu tvoří v Gaussově rovině kružnici, která prochází počátkem souřadného systému, a budeme hledat kružnici, která nejlépe aproximuje naměřené body v okolí rezonance.

Vyjádříme naměřená data podle (20) v polárních souřadnicích

$$\{(x_j, y_j); \omega_j\} \rightarrow \{(\rho_j, \varphi_j); \omega_j\}$$
$$\rho_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2}, \quad \varphi_j = \arctg\left(\frac{y_j}{x_j}\right) \quad (26)$$

Jako regresní násadu zvolíme kružnici se středem $[x_0; y_0]$ procházející počátkem:

$$\hat{\rho}(\varphi) = 2(x_0 \cos(\varphi) + y_0 \sin(\varphi)) \quad (27)$$

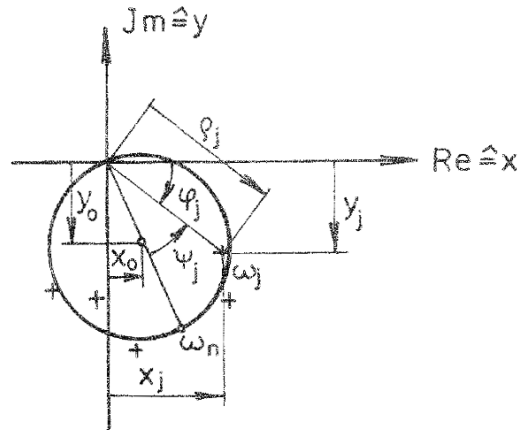
Kriteriální funkce regrese je potom

$$W = \sum_{j=1}^J (\rho_j - \hat{\rho}(\varphi_j))^2 = \min \quad (28)$$

Pomocí $\frac{\partial W}{\partial x_0} = 0, \frac{\partial W}{\partial y_0} = 0$ nalezneme minimum kriteriální funkce, a tedy hodnoty středu $x_0; y_0$ kružnice procházející počátkem souřadného systému, jež nejlépe aproximuje naměřená data.

1.4.3. Nalezení modální frekvence a tlumení

K určení modálních parametrů lze použít více metod, my použijeme metodu regrese podle tangenty. Budeme uvažovat případ regresní kružnice procházející počátkem, a dále že hledaná vlastní frekvence ω_n odpovídá hodnotě parametru ω v bodě o souřadnicích $[2x_0, 2y_0]$, který je od počátku nejvíce vzdálen.



Obr. 3 Regresní kružnice se zavedenými parametry. (Převzato z [1])

Zavedeme úhel ψ_j (viz obr. 3), pro který platí

$$\psi_j = \varphi_j - \operatorname{arctg} \left(\frac{y_0}{x_0} \right) \quad (29)$$

Máme-li množinu naměřených hodnot $\{(\omega_j, \psi_j); j = 1, 2, \dots, J\}$ odpovídajících dvojicím (x_j, y_j) , použijeme pro nalezení hodnot ω_n, a regresní model vycházející z rovnice

$$\omega \equiv \omega(\psi) = a \cdot \operatorname{tg}(\psi) + \omega_n \quad (30)$$

ve tvaru

$$\widehat{\operatorname{tg}}(\psi) = \frac{1}{a} \cdot \omega - \frac{1}{a} \cdot \omega_n \quad (31)$$

Položíme transformaci $\hat{Y} \equiv \hat{Y}(\omega) = \widehat{\operatorname{tg}}(\psi)$ a sestavíme předpis pro kritériální funkci regrese W ve tvaru

$$W = \sum_{j=1}^J (\operatorname{tg}(\psi_j) - \hat{Y}(\omega_j))^2 = \min \quad (32)$$

což pro $\frac{\partial W}{\partial a} = 0, \frac{\partial W}{\partial \omega_n} = 0$ vede na analyticky řešitelnou soustavu rovnic pro nalezení ω_n, a ve tvaru

$$\begin{bmatrix} -\omega_n/a \\ 1/a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum 1 & \sum \omega_j \\ \sum \omega_j & \sum \omega_j^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum \operatorname{tg}(\psi_j) \\ \sum \omega_j \cdot \operatorname{tg}(\psi_j) \end{bmatrix} \quad (33)$$

Zbývá interpretovat vypočtenou konstantu a . Přepíšeme-li (23) do tvaru $x + iy$ a určíme-li $tg(\varphi) = y/x$, vyjde

$$tg(\varphi) = -\eta/(1 - (\omega/\omega_n)^2) \quad (34)$$

Pro model s hysterezním tlumením platí $\varphi + \psi = \pi/2$, tedy

$$tg(\psi) = (1 - (\omega/\omega_n)^2)/\eta \quad (35)$$

Pro body $\psi = \pm\pi/4$ (body poklesu amplitudy při maximální resonanci na hodnotu $\frac{1}{\sqrt{2}} \times$ menší, tedy tzv. -3dB body) platí $tg(\psi) = \pm 1$. Dosadíme-li ± 1 do (35), tedy pro jim odpovídající frekvence $(\omega)_{-3dB}$, dostaneme

$$(\omega)_{-3dB} = \omega_n(1 \pm \eta)^{1/2} \quad (36)$$

Dosadíme-li obrobně ± 1 na levou stranu rovnice (31), dostaneme

$$(\omega)_{-3dB} = \omega_n \pm a \quad (37)$$

Srovnáním (36), (37) dostaneme výsledný vztah pro modální tlumení

$$\eta \equiv \eta_n = \frac{a}{\omega_n} \left(2 + \frac{a}{\omega_n}\right) \quad (38)$$

2. Rešerše o použití modálních zkoušek k detekci poškození

Zjišťování stavu konstrukcí a strojů je klíčové pro zajištění bezpečného a bezporuchového provozu při minimalizaci nákladů na údržbu, případně výměnu zařízení. Modální zkoušky přináší komplexní informace o celé konstrukci, nejen o stavu v jednom zkoušeném místě. Proto je použití těchto metod intenzivně zkoumáno. Má nicméně řadu úskalí, spočívající zejména v potřebné přesnosti měřících a výpočtových metod.

2.1. Použití ve stavebním inženýrství a u velkých konstrukcí

Modální zkoušky pro kontrolu integrity konstrukce se provádějí například u ropných plošin, mostů nebo u velkých budov. [4, str. 74 – 84] V případě ropných plošin či jiných staveb vystavených vlivu mořské vody jsou tyto konstrukce ohroženy zejména korozí, zatímco v případě mostních konstrukcí je to únava materiálu.

Výhodou kontroly pomocí vibrační zkoušky je zejména to, že pokud je měřicí aparatura součástí monitorovaného díla a měření probíhá soustavně automaticky, pak dokáže tento systém upozornit na vzniklé poškození v okamžiku kdy nastane. V porovnání s kontrolami prováděnými rutinně dle časového harmonogramu (právě u mostů se například kontroly provádějí každé dva roky) tak může kontinuální monitoring modálních vlastností dříve varovat před blížícím se selháním konstrukce.

K vybuzení takto velkých struktur se často používá místo aktivních budících zařízení vliv okolního prostředí, například síla vln, větru, vibrace od projíždějících dopravních prostředků apod.

Po prostudování jednotlivých příkladů v publikaci [4], které zahrnují jednak laboratorní experimenty s detekcí poškození, jednak případové studie použití stacionárních měřících systémů pro monitoring skutečných konstrukcí za provozu, lze konstatovat, že způsob, výsledky i úspěšnost měření a druhy sledovaných modálních parametrů se případ od případu značně různí. Některé studie uvádějí jasně rozlišitelné změny v hodnotách vlastních frekvencí již při méně závažných poškozeních (např. [10]), zatímco jiné (např. [9]) naopak hovoří o změnách v řádu jednotek procent při fatálním poškození nebo o nutnosti měření vlastních frekvencí s přesností na 0,01 Hz, aby bylo možné poškození spolehlivě detekovat [11]. Nutno podotknout, že dosažení takové přesnosti měření je technicky velmi obtížné až nemožné. Zajímavé je, že mnoho studií sice hovoří o malém vlivu poškození na hodnoty vlastních

frekvencí a tlumení, ale přivádí pozornost ke studiu změn vlastních tvarů kmitů, díky kterým by měly být defekty též dobře detekovatelné.

2.2. Detekce poškození vláknových kompozitů

Práce [4, str. 88 – 90] uvádí mnoho laboratorních experimentů zabývajících se vlivem poškození kompozitů na jejich modální vlastnosti.

Autoři Nokes a Cloud [6] pomocí laserového vibrometru zkoumali modální vlastnosti sklolaminátových vzorků (destičky o rozměrech 2,5 x 25 x 135 mm). Jejich měření vedlo ke zjištění závislosti modálního tlumení na poškození vzorku. Uvádějí také možnost lokalizace poškození zkoumáním tvarů torzních kmitů.

Další práce autorů Cawley a Adams [7] též hovoří o úspěšném zjištění závislosti modálních parametrů na poškození vzorků, tentokrát však vzorků z uhlíkových vláken. Důležité je zde zjištění, že opakovatelnost a přesnost měření vyžadovala kontrolovanou teplotu v laboratoři a také krátký čas mezi měřením nepoškozeného a poškozeného vzorku. (Vlastní frekvence vzorku se podle autorů mohou během dlouhé doby měnit.)

Právě vzhledem k rozmanitosti výsledků výzkumných prací na téma detekce poškození mechanických struktur jsme se rozhodli ověřit, zda budeme schopni s dostupným vybavením poškození vzorků detekovat.

3. Základní přehled o kompozitních materiálech

Tato práce se zabývá zkoumáním poškození vláknových kompozitních materiálů. Proto zde uvedeme základní přehled o vlastnostech a stavbě kompozitů tohoto druhu a definujeme některé pojmy, které se k nim vztahují.

Kompozitním materiálem rozumíme materiál skládající se na makroskopické úrovni z více částí. Pro potřeby této práce budeme uvažovat vláknové kompozity, tedy materiály, které se skládají ze dvou nebo více mechanicky a chemicky odlišných fází, které jsou odděleny rozhraním. Jedna nebo více z těchto fází –vlákna, jsou ponořeny do spojitě fáze, jež drží celý materiál pohromadě – matrice. Vlákna jsou obvykle pevnější než matrice a tvoří tzv. vláknovou výztuhu.

Vlastnosti kompozitu jsou dány vlastnostmi a objemovými podíly jeho složek a jejich prostorovým uspořádáním. Vlákna jsou definována jako útvary, jejichž délkový rozměr významně převyšuje velikost rozměrů ostatních. Vlákna se vysokou měrou podílejí na přenosu sil v materiálu, a proto má smysl dělit vláknové kompozity právě dle délky a uspořádání vláken.

Podle počtu vrstev lze vláknové kompozity rozdělit na jednovrstvé a vícevrstvé. Jednovrstvé kompozity jsou tvořeny buď jednou vrstvou, nebo více vrstvami stejné orientace a stejných vlastností. Vlákna mohou být uspořádána v jednom směru a tím je vytvořen tzv. jednosměrný kompozit – lamina. Tyto kompozity se vyrábějí rovnoběžným uložením vláken vedle sebe a jejich zalitím pryskyřicí, jež je drží v této poloze a tvoří matrici. Takový kompozit má vysokou pevnost ve směru vláken, ale ve směru kolmém na vlákna je pevnost velmi nízká. Kompozit s dvousměrně orientovanými vlákny je tvořen např. tkaninou (rohoží), která obsahuje vzájemně kolmá vlákna a pryskyřici. Dvousměrně orientovaná vláknová výztuha zajišťuje vyrovnanější mechanické vlastnosti materiálu.

Dle délky vláken můžeme kompozity dělit na krátkovláknové a dlouhovláknové (popsané v předchozím odstavci). U krátkovláknových kompozitů jsou vlákna orientována většinou nahodile a kompozit se nejčastěji vyrábí tak, že jsou vlákna společně s pryskyřicí vstřikována do formy.

Typickou vlastností vláknových kompozitů je jejich poměr vysoké tuhosti a pevnosti k hmotnosti a možnost vyrobit materiál požadovaných mechanických vlastností v daných směrech. [8]

3.1. Delaminace

Delaminací vláknového kompozitu se rozumí oddělení vláknové výztuhy od matrice nebo oddělení jednotlivých vrstev kompozitu od sebe. K delaminaci dochází při zatížení působícím kolmo na vrstvu nebo příčným smykovým zatížením. Delaminace roste buď únavovým zatížením nebo růstem statického zatížení. [5]

4. Experimentální část

V experimentální části byla provedena vibrační zkouška na vzorku tvaru části trubky vyrobené z uhlíkových vláken. Vzorek byl volně uchycen na gumách a buzen pomocí dynamického budiče vibrací. Odezva systému byla snímána opticky laserovým vibrometrem.

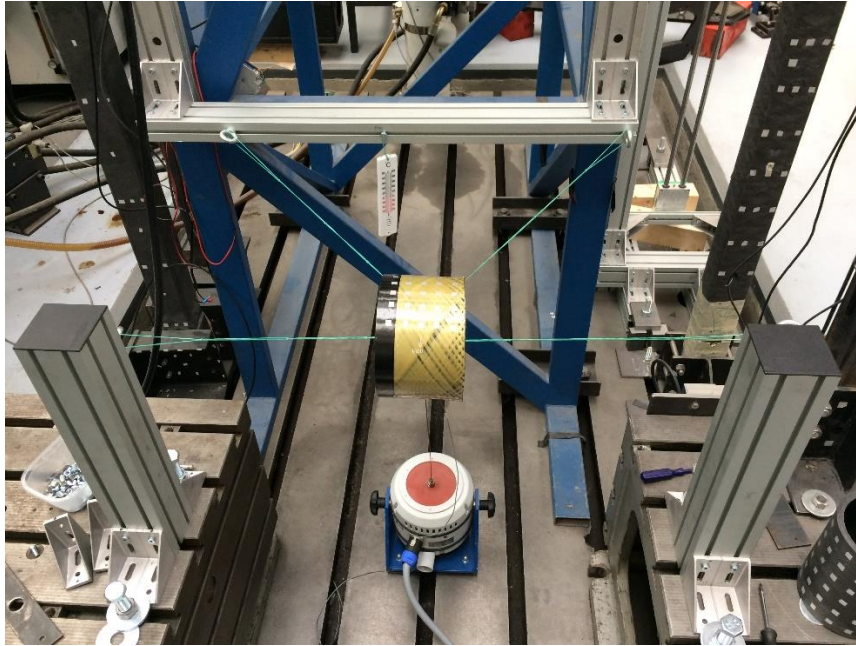
Vibrační zkouška byla provedena nejprve s neporušeným vzorkem. Poté byl vzorek vystaven několika nárazům padající hmoty upevněné na vertikálním vedení. Po každém nárazu byla vibrační zkouška provedena znovu.

Cílem experimentu bylo zjistit, zda je možné detekovat nějakou změnu modálních vlastností způsobenou poškozením vzorku. Dále pak, pokud by taková změna byla při měření zaznamenána, zda je zjištěný rozdíl modálních vlastností způsobený delaminací dostatečně velký v porovnání s odchylkou měření. Experimentální zjišťování modálních parametrů je totiž zatíženo celou řadou faktorů, jež způsobují velkou fluktuaci naměřených dat. Mezi tyto faktory patří např. teplota v laboratoři, vliv upnutí vzorku, nepřesnost měřicí techniky, použité algoritmy při vyhodnocení dat aj. Eliminace těchto faktorů je nelehkou úlohou, což ostatně dokládá i výsledek experimentu, jenž provedla instituce pro výzkum leteckých a kosmických technologií GARTEUR (Group for Aeronautical Research and Technology in Europe). Byl sestaven velmi zjednodušený model letounu sestávající z nosníků a ploch, na kterém 12 zkušených týmů výzkumné instituce nezávisle na sobě provedlo modální zkoušky. Jejich výsledky se lišily o ~4 % v měření vlastních frekvencí a až o ~30 % ve stanovení modálních tlumení. [12] Právě proto, že k takovým fluktuacím výsledků dochází i na prestižních pracovištích, má smysl se monitorováním a optimalizací přesnosti měření velmi podrobně zabývat.

4.1. Popis měřicího stanoviště

4.1.1. Upnutí vzorku

Vzorek byl volně upnut na čtyřech bodech na měkkých gumách. Volné upnutí umožňovalo provést měření tak, aby kmitání zkoušené struktury bylo co možná nejméně ovlivněno okolím. Spojení vzorku s dynamickým budičem vibrací bylo realizováno svářecím drátem. Na místě spojení vzorku s drátem byl umístěn piezoelektrický snímač budicí síly, který byl k povrchu vzorku přilepen dvousložkovým lepidlem na tenzometry.



Obr. 4 Měřicí stand

4.1.2. Měřicí přístroje

- Laserový vibrometr: Polytec PSV 400 D4063
- Zesilovač signálu dynamického budiče: TIRA BAA 1000
- Dynamický budič vibrací: TIRA S51144-M
- Piezoelektrický snímač budící síly: Brüel & Kjær 8230

Citlivost: 118,97mV/N

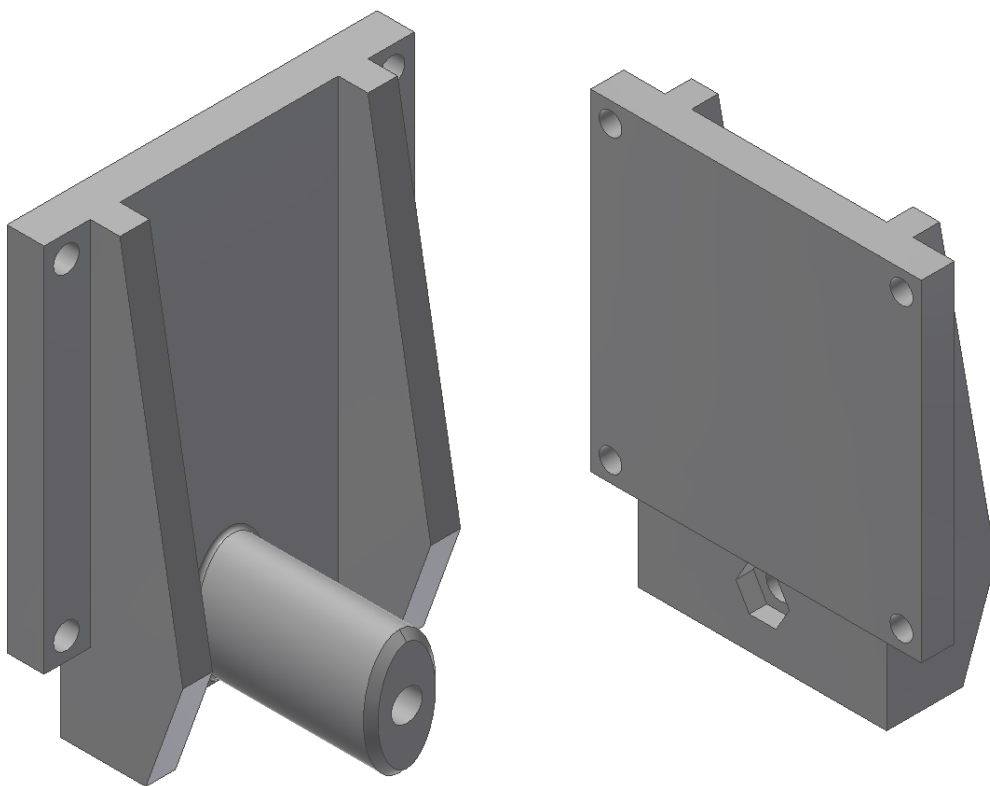
Měřicí rozsah ± 45 N

4.1.3. Destrukční zařízení

K delaminaci vzorku bylo navrženo a zhotoveno zařízení, sestávající z kladiva upnutého na vertikálním vedení, jež umožňovalo jeho kontrolovaný volný pád z definované výšky, a tedy náraz s definovanou energií. Pro upnutí kladiva na vozík byl navržen plastový držák, který byl vytisknut na 3D tiskárně. Celková hmotnost vozíku s plastovým držákem a kladivem byla 2,88 kg. Vzorek byl při rozbíjení uložen na dřevěné podpoře, jež byla tvarově upravena tak, aby na ní stěna vzorku v místě dopadu ležela celou plochou, a nedošlo k jejímu prolomení ohybem.



Obr. 5 Destrukční zařízení



Obr. 6 3D model navrženého držáku kladiva

4.1.4. Síť bodů

Pro měření odezvy laserovým vibrometrem byla na povrchu vzorku vytvořena síť 25 bodů uspořádaných rovnoměrně do čtvercového pole s odstupem 30 mm mezi jednotlivými body. Pro zajištění dobrého odrazu laserového paprsku byly body opatřeny reflexními samolepkami.



Obr. 7 Pole 25 bodů s reflexními samolepkami. (Na obrázku je bodů 35, hodní dvě řady se ale při měření nepoužívaly)

4.1.5. Definice jednoho měřicího cyklu

U každého z 25 měřených bodů byl proveden průběh 13 period budícího signálu. Odezva při průběhu každé periody byla zaznamenána zvlášť a výsledkem byl jejich průměr. Takto bylo během jednoho měřicího cyklu nasnímáno všech 25 bodů. K buzení byl použit signál s průběhem rozmítaného sinu v rozsahu frekvencí od 100 do 6400 Hz. Data z každého měřicího cyklu byla vyhodnocena použitím SDOF modelu a regrese pomocí kružnice (popsáno v kapitole 1.4. „Zpracování naměřených dat“).

4.2. Měření s válcovým vzorkem z uhlíkového kompozitu

4.2.1. Popis průběhu experimentu

V první části měření byla pro každý stupeň poškození vzorku provedena sekvence úkonů:

- Změření 2 měřicích cyklů
- Rozebrání sestavy. Rozebráno spojení vzorku s budičem vibrací a odepnutí závěsných gum. Poté vše opět složeno dohromady.
- Změření dalších 2 měřicích cyklů

Postupně takto bylo provedeno:

- Měření 1-4 s neporušeným vzorkem (provedeno pro zjištění přesnosti měření)
- Měření 5-8 s neporušeným vzorkem podruhé (provedeno o 5 dní později společně s následujícími třemi měřeními)
- Měření 9-12 s vzorkem zasaženým nárazem ze 100 mm
- Měření 13–16 s vzorkem zasaženým nárazem z 200 mm
- Měření 17–20 s vzorkem zasaženým nárazem z 500 mm

Důvodem vícenásobného opakování měření se stejným stupněm poškození bylo zjistit, s jakou přesností a opakovatelností lze modální charakteristiky změřit.

Protože se při vyhodnocení dat nepodařilo vysledovat žádný vliv poškození na modální charakteristiky, byla provedena v druhé části experimentu dodatečná měření. Tato měření byla provedena vždy pouze jedním měřicím cyklem s cílem rozbít vzorek tak dlouho, dokud se poškození na modálních parametrech neprojeví.

- Měření 21 - vzorek ve stavu tak, jak zůstal po předchozích měřeních
- Měření 22 - vzorek zasažen nárazem kladivem z výšky 750 mm

Pro zvýšení destruktivního účinku pádového zařízení bylo kladivo opatřeno hlavicí s kulovým zakončením o průměru 20 mm. Tím byla energie nárazu soustředěna na menší plochu a celková hmotnost pohyblivé části „pádostroje“ vzrostla na 3,1 kg.

- Měření 23 – vzorek zasažen kladivem s kulovou hlavicí z výšky 800 mm

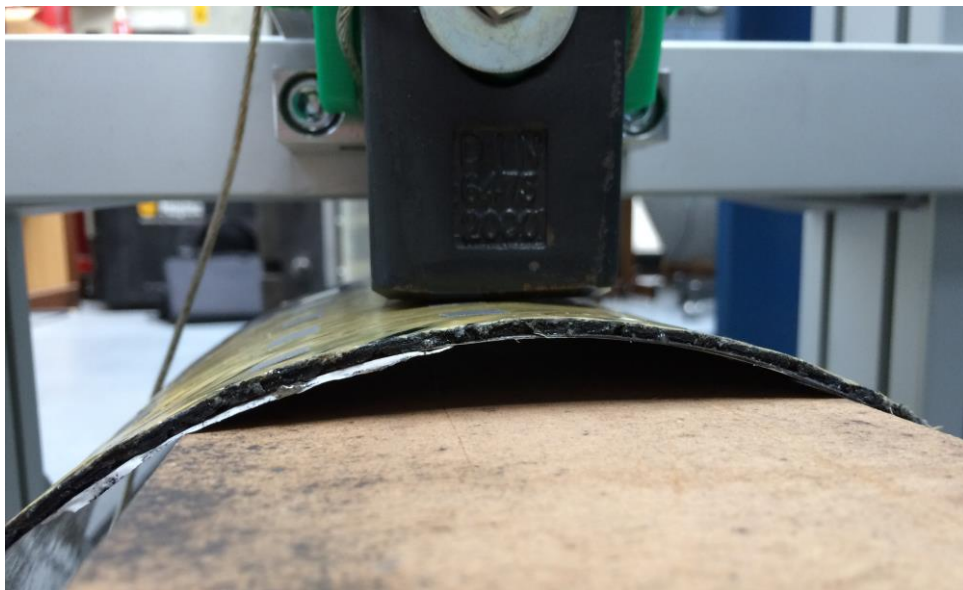
Protože se ani tentokrát nepodařilo zachytit změnu modálních parametrů, bylo upraveno uložení vzorku tak, že jeho válcová stěna již nedoléhala na podporu odpovídající jejímu tvaru, ale na rovnou desku o šířce asi 70 mm. (viz obr. 9)

- Měření 24 – Před měřením neproběhla žádná destrukce, měření jen pro referenci.
- Měření 25 – Náraz kladivem z výšky 500 mm, bez podpory
- Měření 26 – 3x náraz kladivem z výšky 800 mm, bez podpory
- Měření 27 – 5x náraz kladivem z výšky 800 mm, bez podpory
- Měření 28 – 3x náraz kladivem s kulovou hlavou z výšky 800 mm, bez podpory
- Měření 29 – 5x náraz kladivem s kulovou hlavou z výšky 800 mm, bez podpory

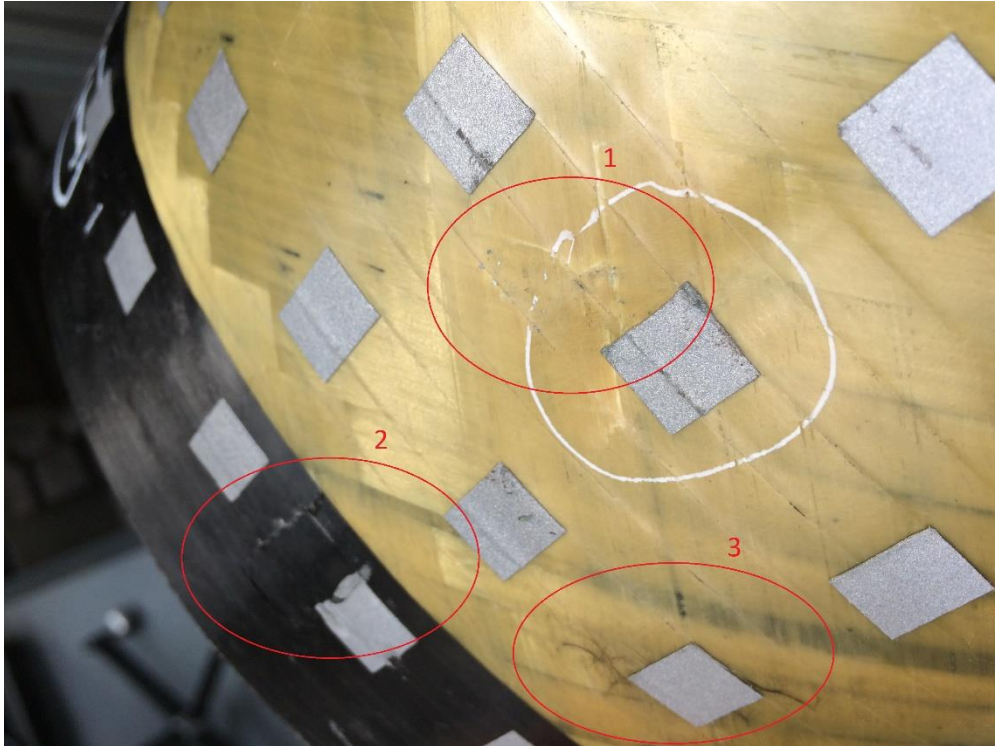
Po nárazu kulovou hlavou před měřením č. 23 byl vzorek poprvé viditelně poškozen, protože impaktor na jeho povrchu zanechal otisk. Po provedení opakovaných nárazů s kulovou hlavou před měřeními 28 a 29 byly na povrchu vzorku patrné praskliny. (Všechna viditelná poškození viz obr. 10.) Právě při měření č. 28 se také poprvé objevily dostatečně velké odchylky modálních parametrů, jak uvidíme v kapitole s výsledky experimentu.



Obr. 8 Kladivo s připevněnou kulovou hlavou



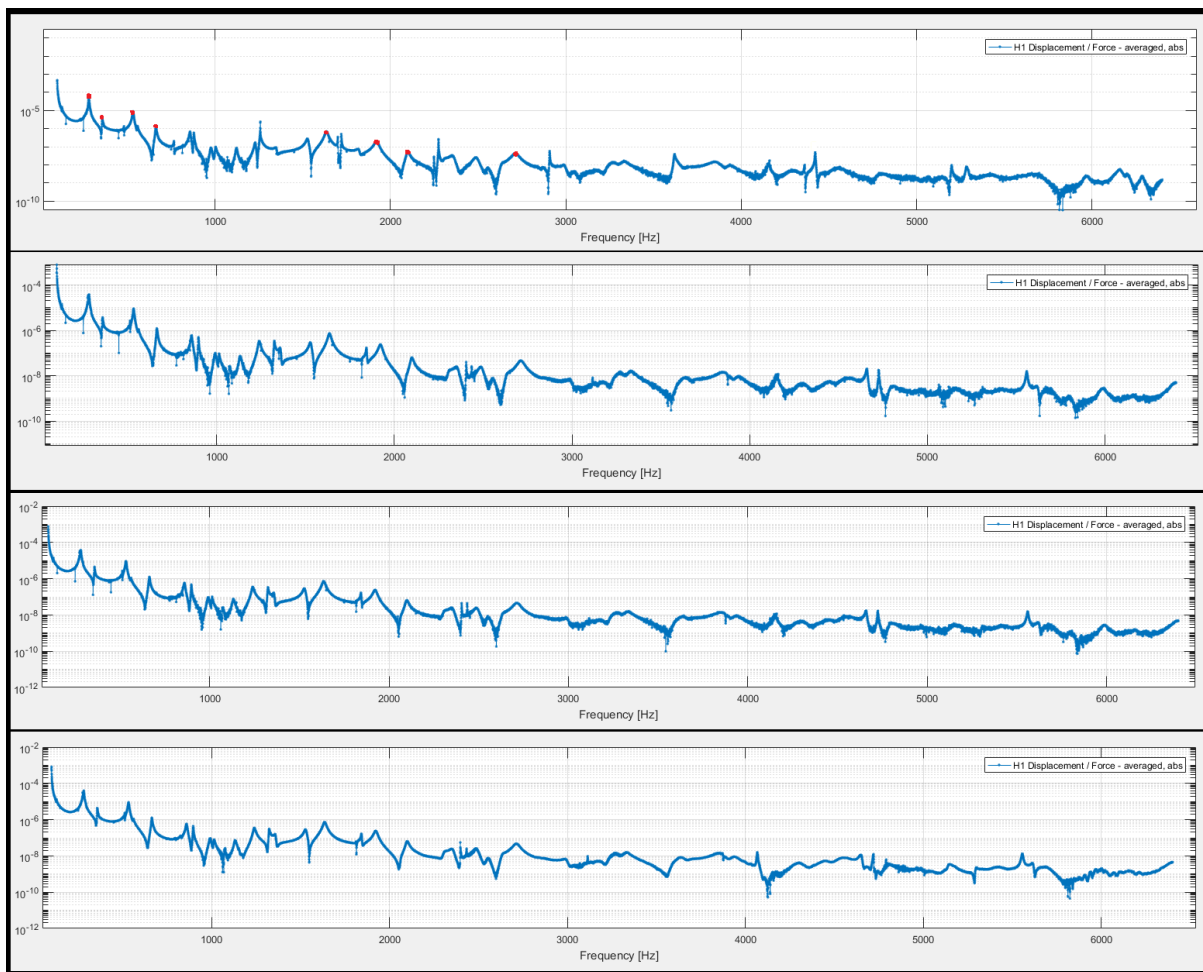
Obr. 9 Detail uložení vzorku na destrukčním zařízení s odebranou tvarovou podporou stěny



Obr. 10 Viditelné poškození vzorku: 1 – prohlubeň po nárazech impaktorem. 2,3 – praskliny vzniklé pravděpodobně ohýbáním stěny vzorku po nárazu na rovnou plochu.

4.2.2. Vyhodnocení naměřených dat

Při vyhodnocování dat bylo třeba nejprve uvážit, jakým způsobem budou jednotlivá měření vzájemně porovnána. První čtveřice měření poskytla určitý náhled, jak moc se zjištěné přenosové funkce budou lišit pouhým zopakováním měřicího cyklu za stejných podmínek nebo pokud bude sestava rozebrána a poté opět složena. Při porovnání prvních čtyřech frekvenčních přenosů byly vytipovány vlastní frekvence, které se při všech měřeních opakovaly, a na základě kterých bylo tedy možné další měření porovnávat. Byly vybrány frekvence 282, 357, 532, 659, 1637, 1920, 2100, 2712 Hz.



Obr. 11 Frekvenční přenosy měření 1-4. U prvního přenosu jsou červeně označeny vybrané špičky pro porovnávání.

Před provedením regrese u vyhodnocení každého měřicího cyklu byly z grafu frekvenčního přenosu daného měření odečteny přesné hodnoty frekvencí odpovídajících sledovaným módům.

V následující tabulce jsou výsledky měření první části experimentu. Pro každý stupeň poškození byly provedeny čtyři měřicí cykly. Výsledkem pro každý stupeň poškození je průměr těchto čtyř měření a následně je spočtena směrodatná odchylka.

Tab. 1 Výsledky měření v první části experimentu (Měření 1-20). Pořadí hodnot tlumení v řádcích odpovídá pořadí hodnot vlastních frekvencí.

Měření 1-4 referenční		Měření 5-8 bez poškození		Měření 9-12 po nárazu ze 100 mm		Měření 13-16 po nárazu z 200 mm		Měření 17-20 po nárazu z 500 mm	
Vlastní frekvence									
Průměr	Std.Dev.	Průměr	Std.Dev.	Průměr	Std.Dev.	Průměr	Std.Dev.	Průměr	Std.Dev.
280.76	N/A	280.65	0.04	280.28	0.28	280.82	0.34	279.60	0.16
357.06	0.41	357.08	1.53	356.12	0.23	355.38	0.48	355.39	0.52
533.24	0.48	532.81	0.23	532.63	0.43	532.04	0.58	533.49	0.08
662.83	2.50	656.88	1.70	660.06	1.41	660.92	1.59	660.13	2.44
1635.21	0.17	1636.77	0.30	1635.44	1.86	1637.41	2.75	1633.58	1.40
1922.64	0.33	1921.88	0.28	1918.58	0.72	1919.44	0.66	1919.36	0.18
2098.25	0.11	2099.81	0.14	2096.15	5.87	2096.87	1.74	2098.27	0.11
2713.44	0.25	2712.48	1.05	2712.88	0.38	2710.98	2.30	2713.15	0.14
Modální tlumení									
Průměr	Std.Dev.	Průměr	Std.Dev.	Průměr	Std.Dev.	Průměr	Std.Dev.	Průměr	Std.Dev.
1.09%	0.55%	1.15%	0.03%	1.23%	0.14%	1.22%	0.24%	1.40%	0.14%
0.89%	0.14%	1.36%	0.59%	1.07%	0.13%	0.97%	0.23%	0.82%	0.27%
1.16%	0.04%	1.27%	0.08%	1.18%	0.06%	1.24%	0.22%	1.25%	0.02%
1.65%	1.99%	0.52%	0.24%	0.94%	0.10%	0.75%	0.27%	0.93%	0.34%
1.04%	0.01%	1.08%	0.02%	1.01%	0.02%	0.87%	0.11%	1.00%	0.01%
1.16%	0.17%	1.15%	0.11%	1.17%	0.09%	1.10%	0.02%	1.11%	0.04%
0.82%	0.01%	0.80%	0.04%	N/A	N/A	0.79%	0.04%	0.78%	0.02%
1.45%	0.03%	1.25%	0.10%	1.46%	0.06%	1.52%	0.02%	1.51%	0.02%

Během měření 1-20 se nepodařilo zachytit rozdíl modálních parametrů, který by jasně indikoval změnu způsobenou poškozením vzorku. Navíc u některých hodnot modálních tlumení vyšla záporná hodnota nebo velmi vysoká směrodatná odchylka, což ukazuje na chybu měření u příslušného módu. Datové body, které se nepodařilo správně vyhodnotit, byly z výsledků vyřazeny.

Následuje tabulka výsledků z druhé části měření, kdy byl vzorek dále rozbíjen, dokud se nějaká změna modálních parametrů neprojevila. Pro každý stupeň poškození byl proveden pouze jeden měřicí cyklus, neboť vliv opakování experimentu a dosahovaná přesnost měření byly již známy z předchozích měření.

Tab. 2 Výsledky měření v druhé části experimentu. (Měření 21-29). Pořadí hodnot tlumení v řádcích odpovídá pořadí hodnot vlastních frekvencí.

21	22	23	24	25	26	27	28	29
Vlastní frekvence								
280.19	280.23	279.80	280.26	280.50	280.10	280.20	279.08	278.71
356.06	355.45	357.17	356.50	354.15	359.93	356.44	351.19	350.67
534.28	533.60	533.40	533.93	532.03	532.46	532.19	530.55	529.13
654.92	654.37	655.11	659.43	658.05	658.54	661.17	651.63	653.10
1634.75	1633.15	1632.57	1641.03	1634.52	1656.96	1640.87	1632.29	1629.35
1920.26	1922.17	1920.32	1919.98	1915.06	1951.81	1936.30	1931.41	1928.73
2100.78	2098.74	2099.16	2097.43	2098.76	2099.41	2096.61	2074.55	2076.36
2713.73	2713.13	2713.49	N/A	2710.82	2718.30	2714.02	2692.45	2691.12
Modální tlumení								
1.10%	1.06%	1.49%	1.11%	1.15%	0.99%	1.42%	1.16%	1.91%
0.87%	0.98%	1.26%	0.98%	1.37%	1.24%	1.27%	1.14%	1.13%
1.50%	1.24%	1.23%	1.15%	1.26%	1.08%	1.19%	1.20%	1.19%
N/A	3.95%	N/A	0.65%	2.80%	3.48%	0.75%	0.77%	1.61%
1.11%	1.04%	1.09%	0.98%	1.01%	1.35%	1.17%	1.34%	1.32%
1.43%	1.40%	1.29%	1.10%	1.20%	1.21%	1.30%	1.17%	1.18%
0.83%	0.80%	0.80%	0.72%	0.82%	0.86%	0.84%	1.25%	1.29%
1.36%	1.33%	1.37%	N/A	1.37%	1.40%	1.37%	2.17%	2.17%

V druhé části experimentu se podařilo zachytit rozdíly vlastních frekvencí i tlumení u módů 2100 a 2712 Hz, jež nastaly při 28. měření a při 29. měření se opakovaly. Názorně můžeme tyto změny pozorovat na grafech 13, 14, 15 a 16. Vlastní frekvence poklesly o 23 a 22 Hz resp. a modální tlumení narostla o 0,46% a 0,8% resp. Porovnáme-li rozdíly se směrodatnými odchylkami dat odpovídajících stejným módům v první části experimentu, zjistíme, že tyto rozdíly jsou vždy alespoň o jeden řád vyšší. Můžeme je tedy považovat za indikátor poškození vzorku.

Konzistenci naměřených dat bohužel narušují hodnoty tlumení módu 2100 Hz (Graf 14) zjištěné při měření 9-12, které se nepodařilo správně změřit.

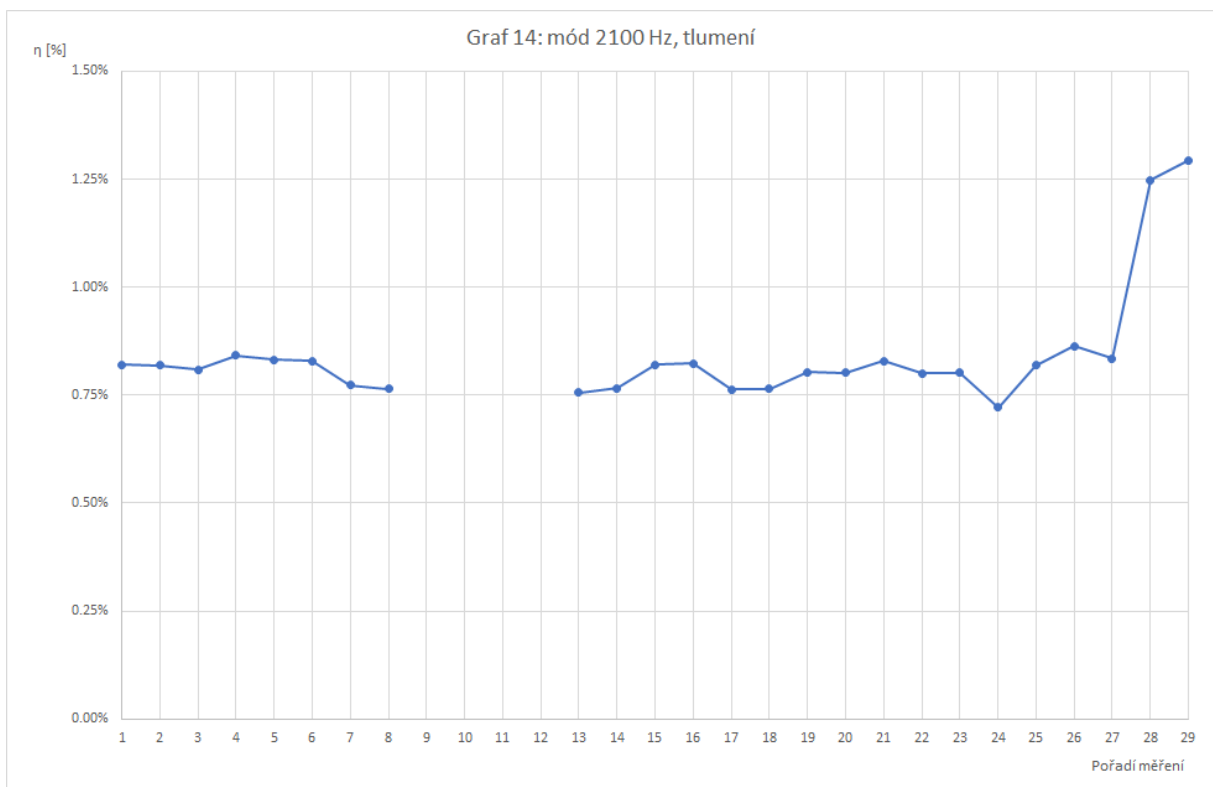
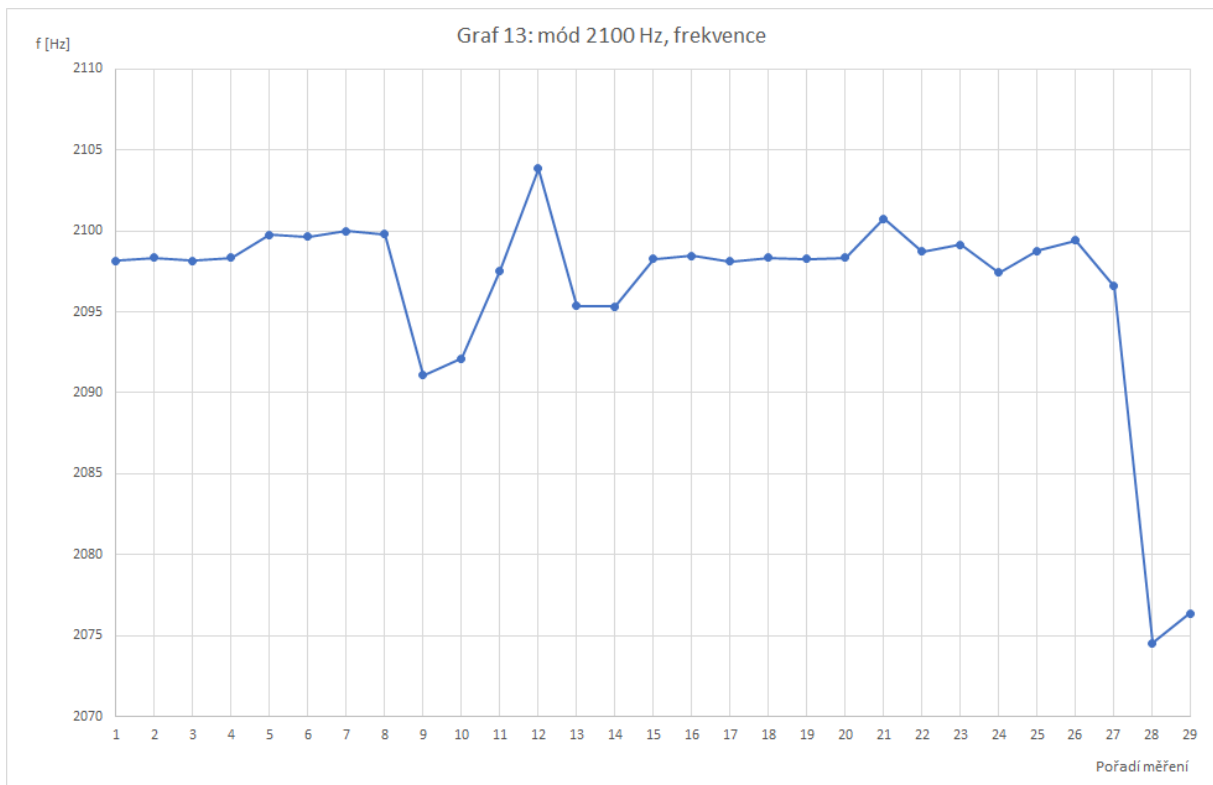
4.2.3. Diskuze výsledků

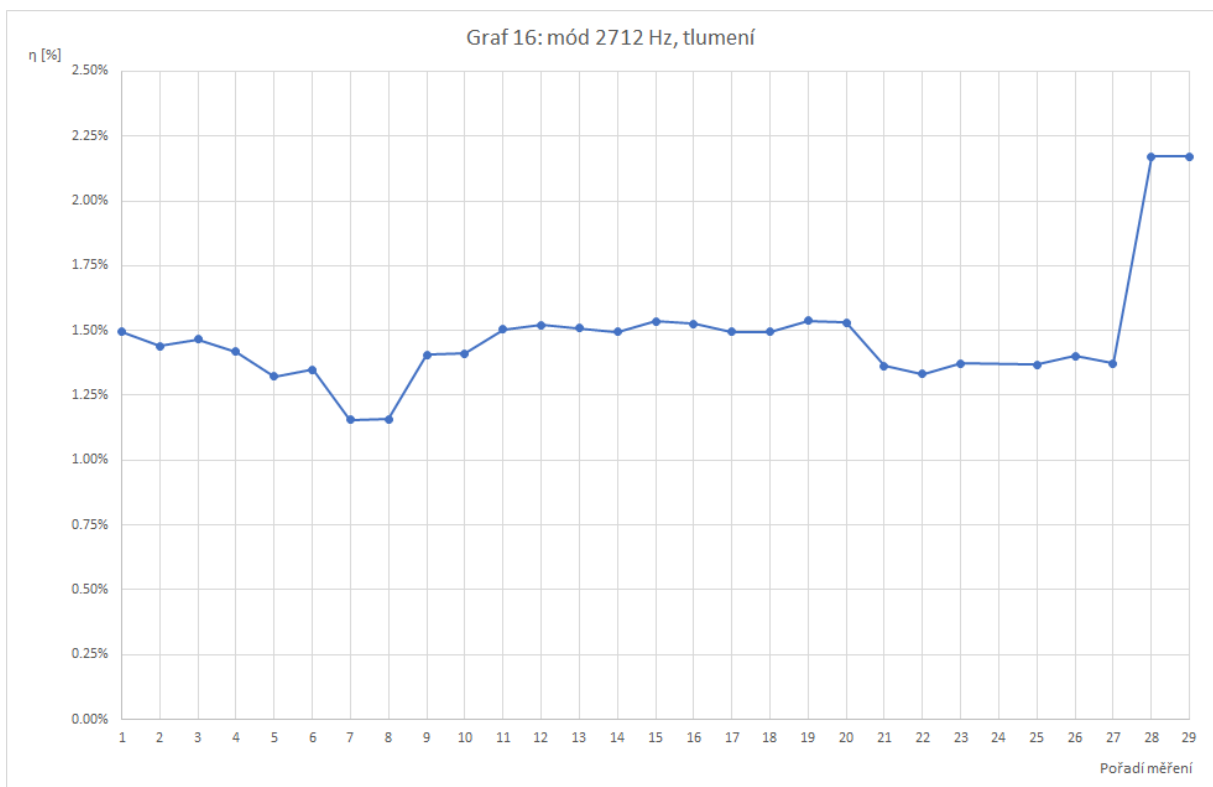
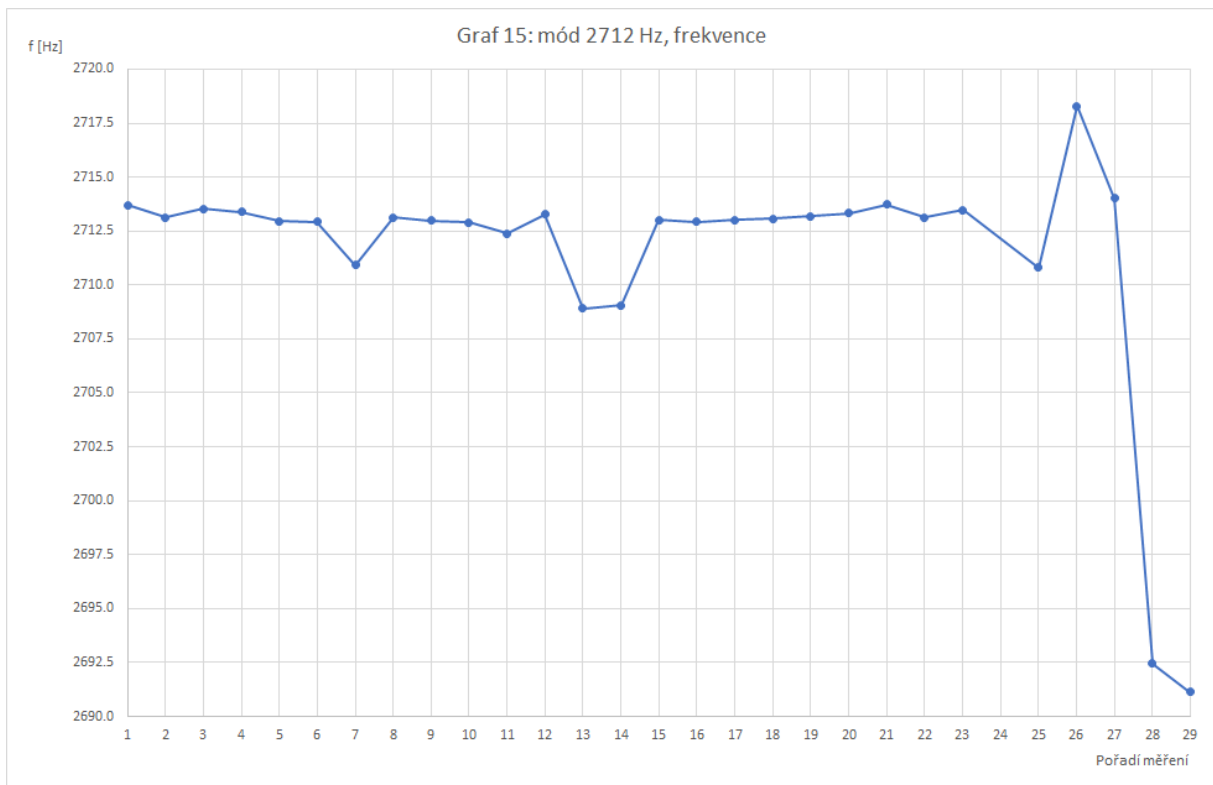
V experimentální části práce byla zjištěna změna modálních charakteristik měřené struktury na frekvencích 2712 a 2100 Hz, která nastala během mechanického poškození vzorku. Zjištěný rozdíl se dostatečně odlišuje od odchylky měření zjištěné v první části experimentu.

Rozdíl modálních charakteristik se objevil až při stadiu experimentu, kdy bylo poškození vzorku patrné už pohledem. Důvodem takové „odolnosti“ kompozitu proti poškození bylo pravděpodobně to, že jeho povrch byl zpevněn skelnými vlákny, která byla při výrobě použita právě za účelem jeho ochrany.

Měření narušují některé zjištěné hodnoty, které se buď významně odchyľují od průměru, nebo jsou fyzikálně nesmyslné (záporné hodnoty modálního tlumení). Důvodem naměření takových hodnot mohla být chyba postupu měření v laboratoři nebo nevhodný postup zpracování naměřených dat. V dalším pokračování bádání by tedy bylo vhodné vyzkoušet vyhodnotit data algoritmy pro MDOF model mechanické struktury.

Z naměřených dat můžeme také nahlédnout, že změna modálních parametrů se projevuje až u módů s vyššími vlastními frekvencemi. Nižší módy jsou tedy pro monitorování stavu vzorku nevhodné.

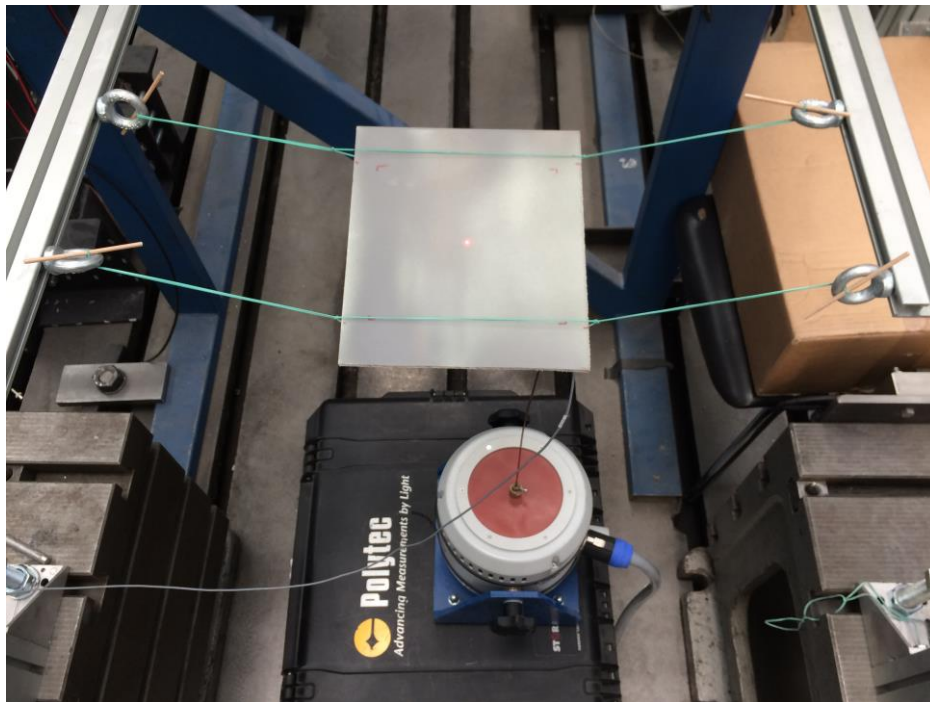




4.3. Měření s rovinným vzorkem ze sklolaminátu

Po zhodnocení výsledků měření s válcovým vzorkem jsme nebyli s výsledky experimentu spokojeni. Důvodem k tomu bylo, že jsme si nemohli být jisti, zda nízká citlivost modálních parametrů na nižší stupně poškození vzorku a některé anomálie v naměřených datech souvisejí s limity použité techniky a vyhodnocovacích metod, nebo zda jsou způsobeny sofistikovanou stavbou materiálu použitého vzorku a jeho tvarem. Rozhodli jsme se proto měření zopakovat se vzorkem ve tvaru desky o rozměrech ca 250 x 300 mm s jednodušší stavbou vyrobeným ze sklolaminátu a měření porovnat.

Vzorek byl opět upnut volně na gumách a k měření byla použita stejná měřicí aparatura (viz kapitola 4.1. Popis měřicího stanoviště).



Obr. 12 Měřicí stanoviště

4.3.1. Průběh experimentu

Bylo provedeno celkem 7 nových měření.

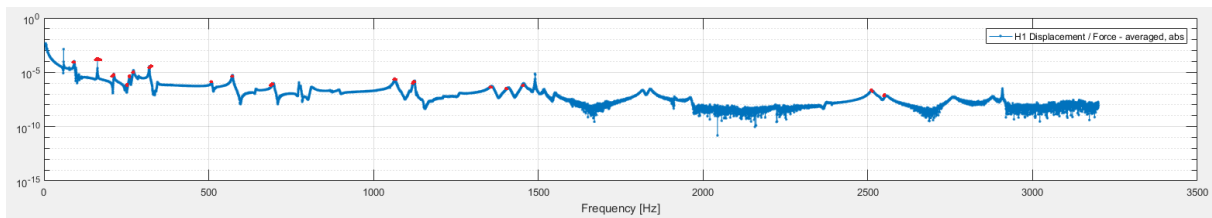
- Měření 1 – bez poškození. Teplota v laboratoři 25°C
- Měření 2 – bez poškození. Teplota v laboratoři 23°C (dále již stejná). Nové upnutí.
- Měření 3 – bez poškození. Nové upnutí vzorku.
- Měření 4 – Náraz kladivem s kulovou hlavou z výšky 150 mm.
- Měření 5 – Náraz kladivem s kulovou hlavou z výšky 300 mm.

- Měření 6 – 3x náraz klavírem s kulovou hlavou z výšky 300 mm. Na vzorku viditelné vyboulení povrchu na rubové straně.
- Měření 7 – Náraz klavírem s kulovou hlavou 3x z 300 mm a 2x z 800 mm. Na vzorku prasklina o délce ca. 20 mm skrz celý povrch.

Při pokusu o další poškození vzorku došlo ke zničení destruktivního zařízení.

4.3.2. Vyhodnocení dat

Ke vzájemnému porovnání jednotlivých měření bylo vybráno 17 módů odpovídajících vlastním frekvencím 92, 162, 212, 248, 260, 271, 319, 510, 570, 696, 1063, 1125, 1358, 1409, 1456, 2512, 2557 Hz. Ke zjištění modálních parametrů byla opět použita regrese podle kružnice a SDOF model.



Obr. 13 FRF vzorku s červeně označenými špičkami vybranými k porovnání měření.



Obr. 14 Detail poškození vzorku při měření č. 7.

4.3.3. Výsledky měření

Tab. 3 Naměřené hodnoty, měření 1-7. Pořadí hodnot tlumení v řádcích odpovídá pořadí hodnot vlastních frekvencí.

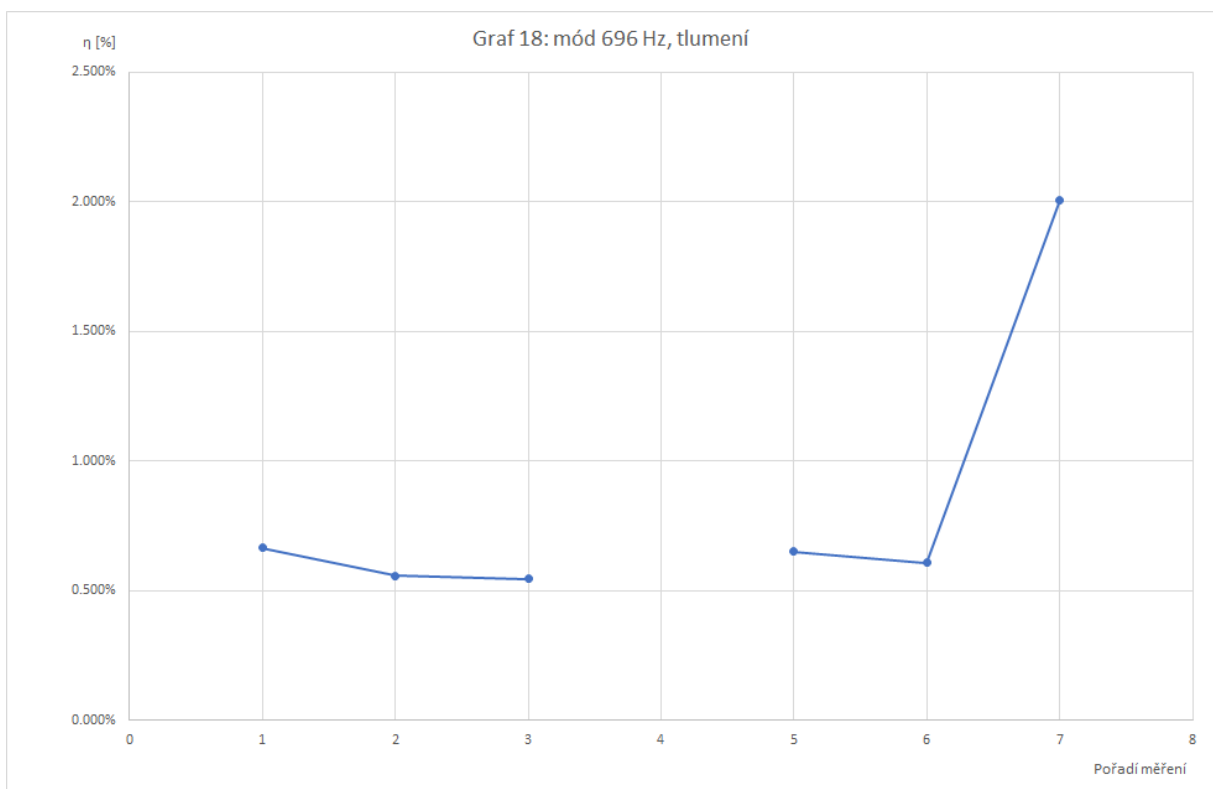
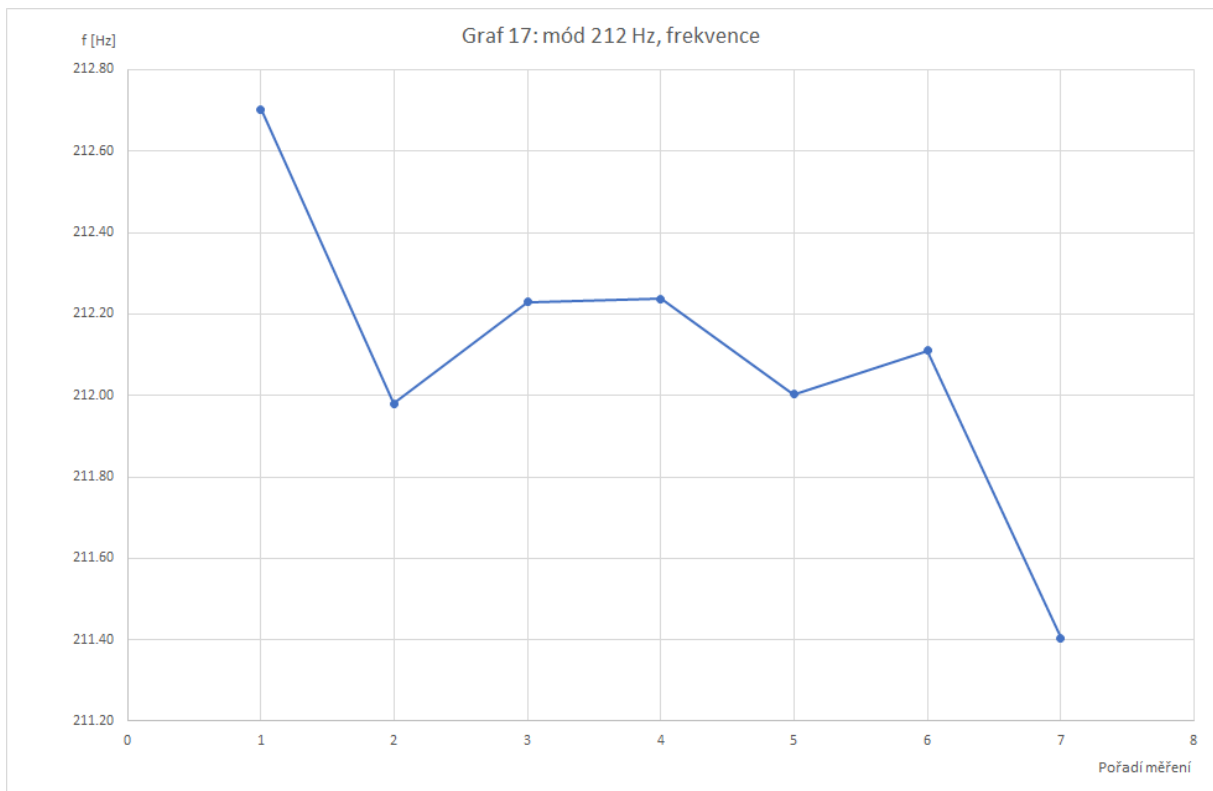
1	2	3	4	5	6	7
Vlastní frekvence						
92.51	92.10	91.97	93.34	91.81	92.27	92.50
167.39	N/A	162.65	162.68	162.40	161.93	163.96
212.70	211.98	212.23	212.24	212.00	212.11	211.40
252.19	N/A	257.89	253.60	250.47	267.37	276.90
261.20	260.21	264.77	260.35	260.48	257.39	260.56
272.61	271.39	272.13	272.04	271.99	272.18	272.65
325.58	349.27	320.41	321.15	320.11	320.38	320.34
521.11	512.01	513.83	513.66	512.70	512.96	525.46
579.13	N/A	N/A	571.81	570.88	571.44	569.97
697.37	696.20	696.04	N/A	695.06	694.67	695.51
1063.67	N/A	1065.81	1065.52	1064.35	1063.84	1061.93
1164.87	1124.79	1128.44	1120.63	N/A	1129.19	1127.56
1356.18	1360.35	1360.30	1359.16	1358.09	1356.47	1352.55
1409.45	1411.09	1416.59	1417.12	1413.69	1417.06	1417.63
1451.12	1454.91	1454.99	1453.82	1449.87	1447.67	1440.56
2509.83	2511.19	2509.60	2509.44	2498.87	2495.58	2498.52
2548.48	2552.54	2551.86	2554.04	2545.62	2545.95	2541.48
Modální tlumení						
2.111%	1.576%	1.915%	2.046%	2.652%	2.589%	1.967%
0.493%	N/A	0.367%	0.283%	0.351%	0.811%	N/A
0.606%	0.575%	0.450%	0.474%	0.707%	0.762%	0.621%
N/A	N/A	24.534%	31.002%	N/A	37.387%	N/A
0.756%	0.866%	N/A	0.742%	0.845%	N/A	0.820%
0.964%	0.954%	0.978%	1.088%	1.184%	1.367%	1.246%
0.561%	N/A	0.387%	1.125%	0.126%	0.565%	0.426%
0.582%	1.619%	0.317%	0.345%	0.422%	0.372%	0.254%
0.268%	N/A	N/A	0.395%	0.438%	0.394%	0.428%
0.665%	0.558%	0.547%	N/A	0.651%	0.609%	2.008%
0.610%	N/A	0.489%	0.630%	0.513%	0.557%	0.524%
N/A	0.107%	N/A	1.690%	N/A	N/A	0.366%
0.896%	0.830%	0.811%	0.793%	0.798%	0.848%	1.955%
2.717%	N/A	3.060%	N/A	4.054%	2.729%	4.535%
0.596%	0.537%	0.568%	0.594%	0.626%	0.622%	0.323%
0.570%	0.466%	0.718%	0.868%	1.167%	N/A	0.492%
0.737%	0.635%	0.595%	1.967%	0.636%	1.226%	0.729%

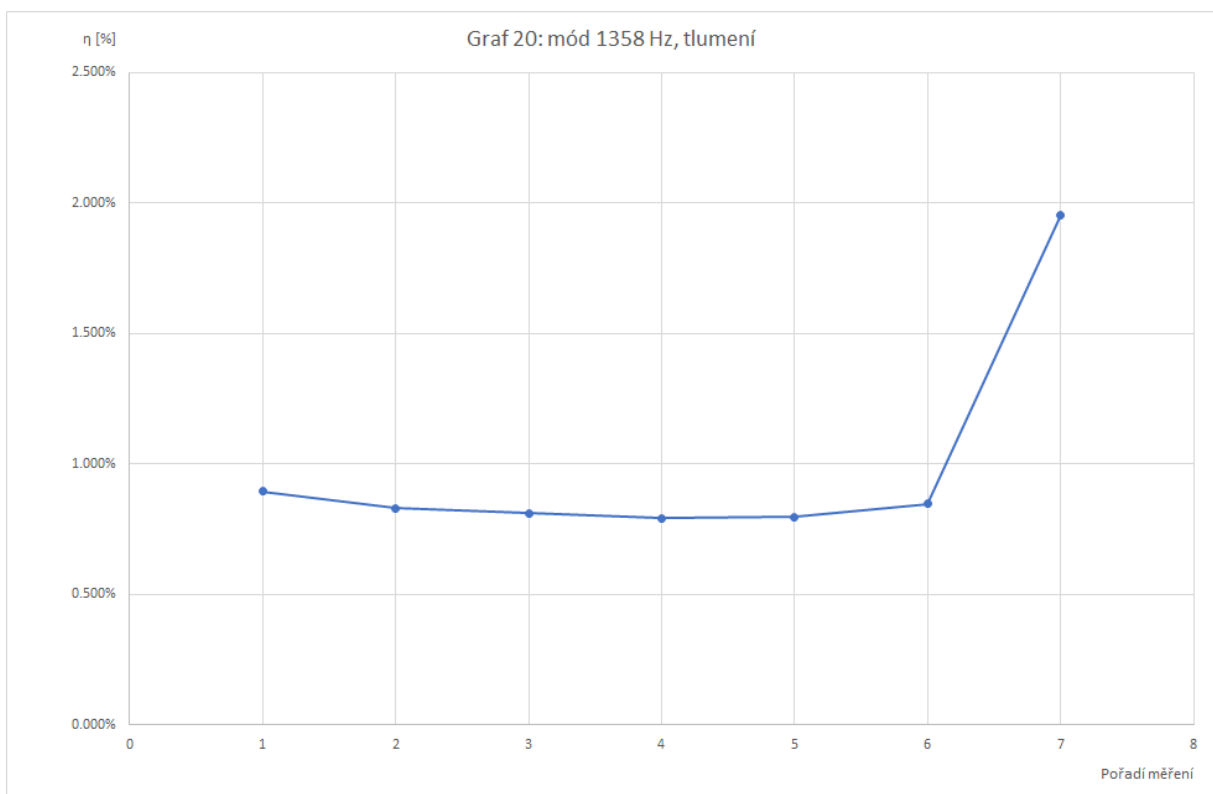
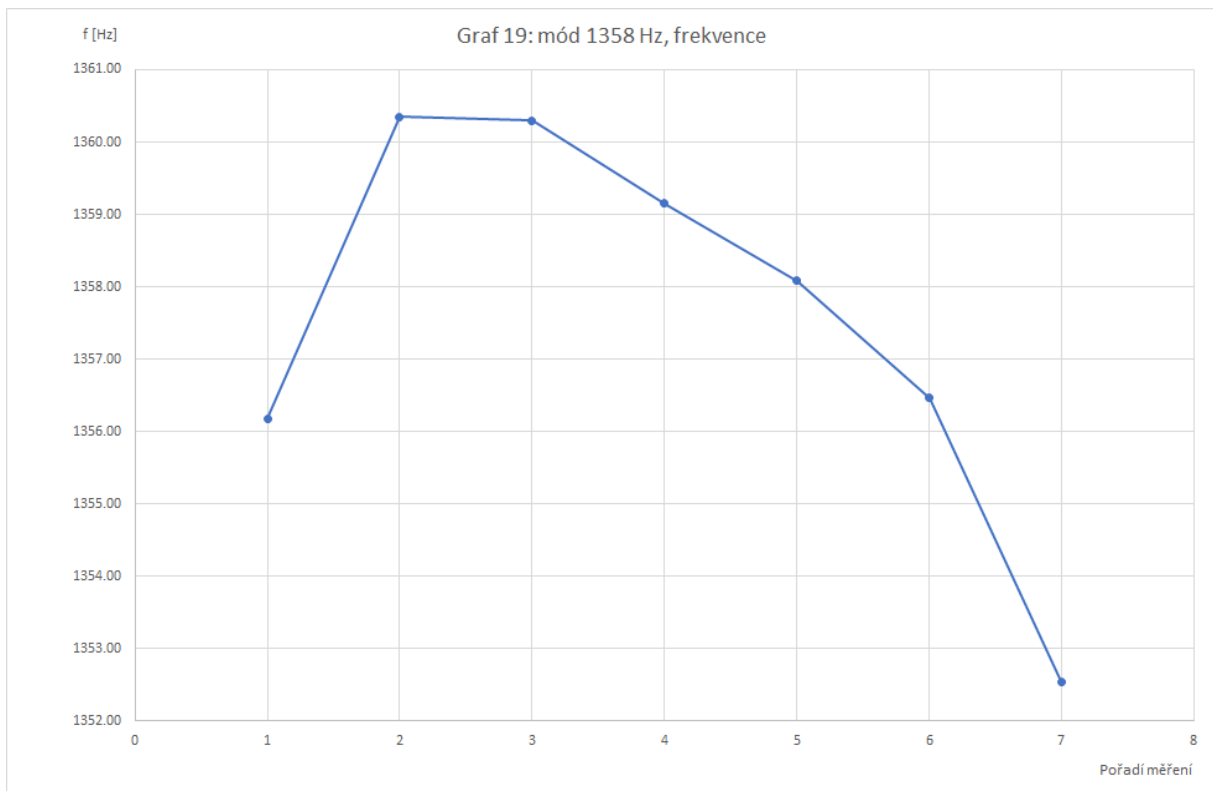
Chybějící místa v tabulce jsou hodnoty, které se pomocí SDOF modelu a regrese pomocí kružnice nepodařilo vyhodnotit. Změny korelující s poškozením vzorku můžeme pozorovat u následujících módů a modálních parametrů:

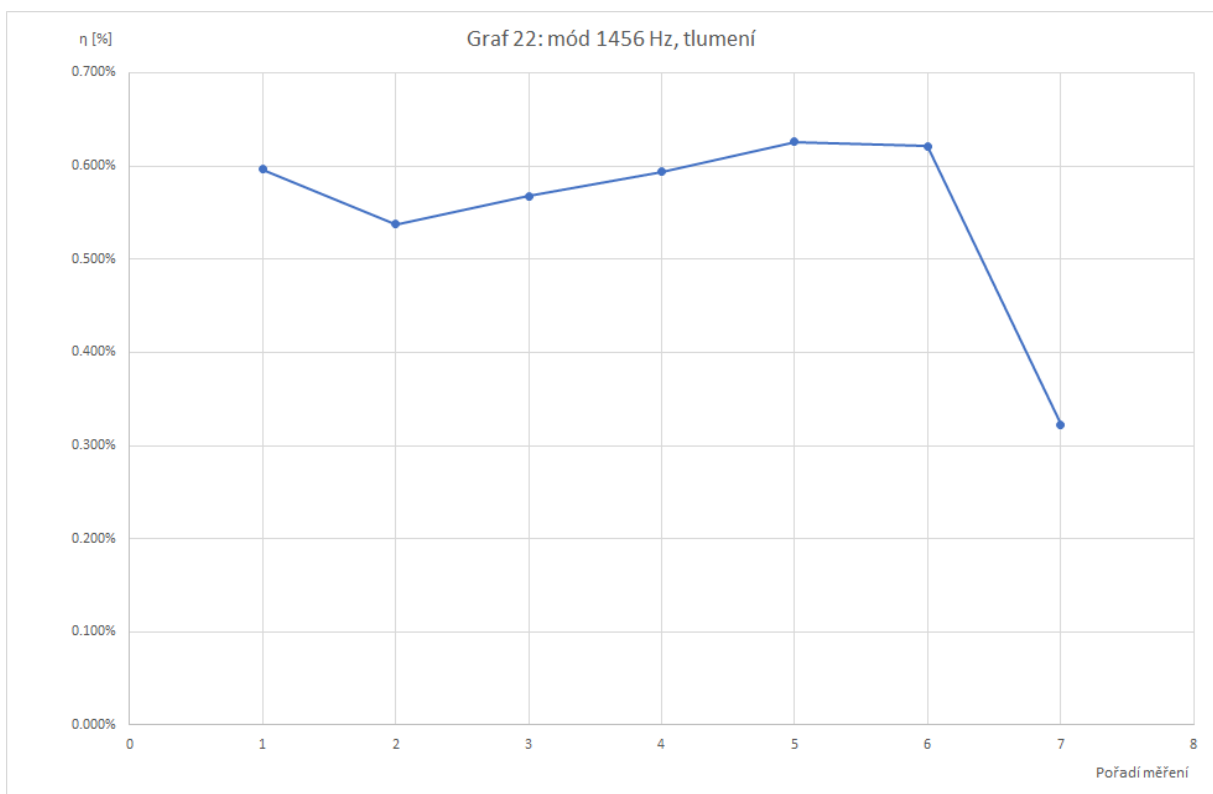
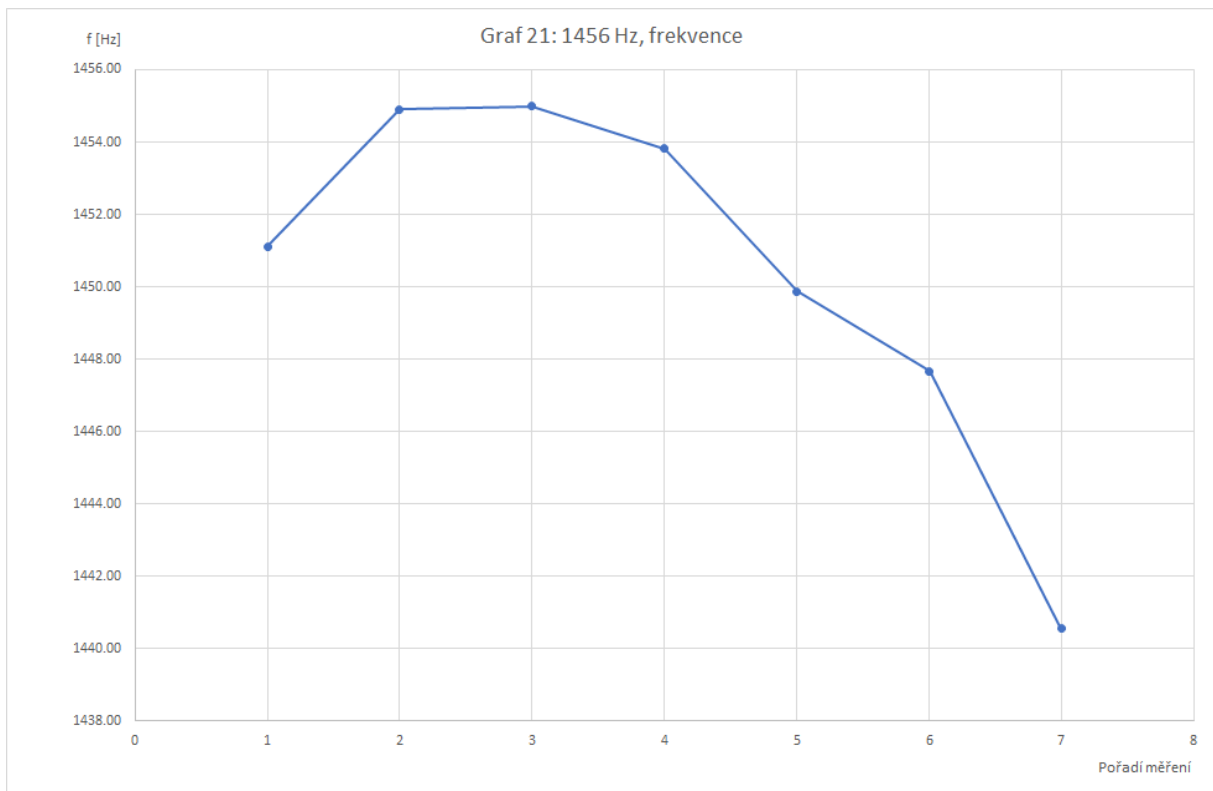
- Múd 212 Hz – vlastní frekvence Graf 17
- Múd 696 Hz – modální tlumení Graf 18
- Múd 1358 Hz – vlastní frekvence Graf 19
- Múd 1358 Hz – modální tlumení Graf 20
- Múd 1456 Hz – vlastní frekvence Graf 21
- Múd 1456 Hz – modální tlumení Graf 22
- Múd 2512 Hz – vlastní frekvence Graf 23

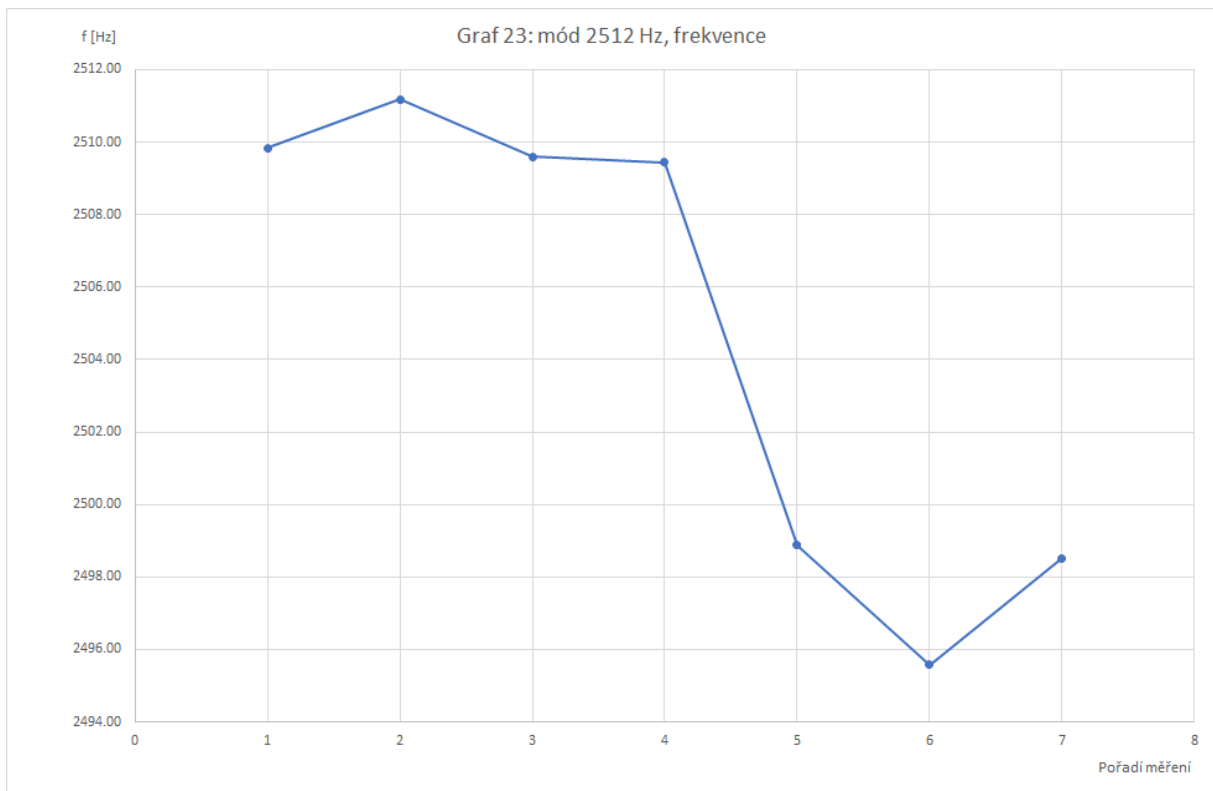
4.3.4. Diskuze výsledků

Ukázalo se, že ačkoliv byl při dodatečném měření použit vzorek rovinného tvaru s jednodušší mechanickou stavbou, nejsou zjištěné výsledky nijak jednoznačnější než u vzorku válcového s více složkami vláknové výztuhy. Změny modálních parametrů se na měření projevily opět až potom, co bylo na vzorku poškození zrakem již patrné. Změny modálních parametrů se neprojevily na všech sledovaných módech a opět tedy vidíme, že k detekci stavu vzorku není vhodné sledovat módy patřící k nejnižším vlastním frekvencím, ale zaměřit se na ty vyšší.









5. Závěr

Byla provedena experimentální modální zkouška pomocí laserového vibrometru na dvojici vzorků z vláknových kompozitů za účelem zjištění detekovatelnosti delaminace těchto materiálů sledováním změn jejich modálních parametrů. Byla provedena rešerše existujících studií na téma použití modálních zkoušek k monitorování stavu mechanických struktur z různých materiálů a rešerše o vláknových kompozitních materiálech a o jejich delaminaci.

V experimentální části práce byly zjištěny změny modálních parametrů odpovídající počátečním hypotézám, které se však projeví až při poměrně vysokém stupni poškození vzorků. Navíc bylo měření zatíženo chybami spojenými s nepřesnostmi měření a s vyhodnocením dat pomocí zvolených matematických modelů. Bylo však zjištěno, že pro detekci delaminace kompozitu je vhodné sledovat módy odpovídající vyšším vlastním frekvencím.

6. Použitá literatura

1. BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část modální zkoušky*. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava 2012
2. MILÁČEK, Stanislav. *Modální analýza mechanických kmitů*. Praha: ČVUT v Praze 2001. ISBN 80-01-02333-8
3. SOBOTKA, Petr. *Implementace algoritmů experimentální modální analýzy*. Praha: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, ČVUT v Praze 2012
4. SCOTT, W. B. et al. *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A literature review*. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, University of California 1996
5. KRYSTEK, Jan. *Pevnostní kritéria pro kompozitní materiály*. [online] Plzeň: Fakulta aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni 2012. [citace 22.7.2017]. Dostupné z: http://seminare.fav.zcu.cz/media/document/krystek_pevnostni-kriteria-pro-kompozitni-materialy.pdf
6. NOKES, J. P. a CLOUD, G. L. *The application of interferometric techniques to the nondestructive inspection of fiber-reinforced materials*. *Experimental Mechanics*, 1993, 33.4: 314-319
7. CAWLEY, P. a ADAMS, R.D. *A Vibration Technique for Non-Destructive Testing of Fibre Composite Structures*. *Journal of Composite Materials*, 1979, 13, 161–175.
8. LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni 2004. ISBN 80-7043-273-X
9. SPYRAKOS, C., et al. *Evaluating structural deterioration using dynamic response characterization*. Elsevier, London, 1990.
10. SAMMAN, Mahmud M.; BISWAS, Mrinmay. *Vibration testing for nondestructive evaluation of bridges. II: Results*. *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120.1: 290-306.
11. TANG, Jhy-Pyng; LEU, Ker-Ming. *Vibration tests and damage detection of P/C bridges*. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 1991, 14.5: 531-536.

12. BALMES, Etienne; WRIGHT, J. R. GARTEUR group on Ground Vibration Testing. *Results from the test of a single structure by 12 laboratories in Europe*. OFFICE NATIONAL D ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES ONERA-PUBLICATIONS-TP, 1997.

7. Přílohy

A: Grafy výsledků měření s válcovým vzorkem z uhlíkového kompozitu

B: CD s touto bakalářskou prací

Příloha A: Grafy výsledků měření s válčovým vzorkem z uhlíkového kompozitu

