



**ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE**

**Ústav mechaniky, biomechaniky
a mechatroniky**

**Vyhodnocení vlivu poškození nosníku
na modální vlastnosti**

**Evaluation of the effect of beam damage on modal
properties**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

NATÁLIE DOLANOVÁ

Studijní program: Aplikované vědy ve strojním inženýrství

Studijní obor: Aplikovaná mechanika

Vedoucí práce: Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dolanová** Jméno: **Natálie** Osobní číslo: **465390**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Aplikované vědy ve strojním inženýrství**
Specializace: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vyhodnocení vlivu poškození nosníku na modální vlastnosti

Název diplomové práce anglicky:

58 / 5 000 Výsledky překladu Evaluation of the effect of beam damage on modal properties

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s prostředky a metodami experimentální modální analýzy (EMA), modelováním konstrukcí metodou konečných prvků (MKP), nejčastějšími druhy porušení konstrukce
 2. Proveďte rešerši metod pro porovnání modálních vlastností, zejména vlastních tvarů kmitu a jejich využití pro detekci poškození konstrukce
 3. Vytvořte parametrický MKP model sady jednoduchých nosníků, jejich poškození a otestujte vybrané metody porovnání modálních vlastností
 4. Validujte MKP modely vybraných nosníků pomocí EMA
- Ověřte experimentálně, pomocí laserového vibrometru, možnost zjištění poškození nosníku pomocí měření vlastních tvarů kmitu.

Seznam doporučené literatury:

BILOŠOVÁ, Alena, Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Modální zkoušky. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, 2012, 129.
BILOŠOVÁ, ALENA, Experimental modal analysis. VŠB TU Ostrava, 2006.
ŠPANIEL, Miroslav; HORÁK, Zdeněk. Úvod do metody konečných prvků. České vysoké učení technické, 2011.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D. odbor mechaniky a mechatroniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **22.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce:


Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

20.7.2022
Datum převzetí zadání

Dolanová
Podpis studentky

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Vyhodnocení vlivu poškození nosníku na modální vlastnosti vypracovala samostatně pod vedením Ing. Pavla Steinbauera, Ph.D. s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze

Natálie Dolanová

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych velmi ráda poděkovala vedoucímu své diplomové práce Ing. Pavlu Steinbauerovi, Ph.D. za odborný dohled a konzultace, které mi při tvorbě této práce pomohly. Dále bych ráda poděkovala Ing. Vítu Pawlikovi za jeho věcné rady při provádění experimentu. V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině a svým blízkým za podporu při studiu.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Natálie Dolanová	
Název DP:	Vyhodnocení vlivu poškození nosníku na modální vlastnosti	
Anglický název:	Evaluation of the effect of beam damage on modal properties	
Rok:	2022	
Studijní program:	Aplikované vědy ve strojním inženýrství	
Obor studia:	Aplikovaná mechanika	
Ústav:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky	
Vedoucí DP:	Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D.	
Bibliografické údaje:	Počet stran	63
	Počet obrázků	32
	Počet tabulek	10
	Počet příloh	4
Klíčová slova:	modální analýza, laserový vibrometr, modální vlastnosti, vlastní tvary kmitu	
Keywords:	modal analysis, laser vibrometer, modal properties, mode shapes	
Anotace:	Diplomová práce se zabývá vlivem poškození nosníku na modální vlastnosti, konkrétně vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitu. Toto téma je řešeno analyticky i experimentálně.	
Annotation:	This thesis is dealing with the effect of beam damage on modal properties, specifically modal frequencies and mode shapes, analytically and experimentally.	

OBSAH

Prohlášení	3
Poděkování	4
Anotační list	5
Obsah.....	6
1. ÚVOD.....	1
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	1
2.1. Údržba stroje.....	2
2.2. Diagnostika.....	3
2.3. Porušení konstrukce	4
2.4. Vibrační diagnostika.....	4
2.5. Modální analýza	6
2.6. Experimentální modální analýza.....	6
2.7. Teorie modálních zkoušek	7
2.8. Funkce potřebné k analýze systémů	8
2.8.1. Autospektrum.....	9
2.8.2. Křížové spektrum	9
2.8.3. Koherence.....	9
2.8.4. Frekvenční odezвовá funkce	11
2.9. Aspekty měření.....	13
2.10. FRF Curve-fitting	13
2.11. Modální parametry	14
2.12. Modální kritéria	15
2.12.1. MAC kritérium	15
2.12.2. SDI kritérium.....	16
2.12.3. POC (Pseudo Orthogonality Check)	16
2.12.4. Relative error	17
2.12.5. MSDI (Mode shape damage index)	17
2.13. MKP modelování	17
3. PRAKTICKÁ ČÁST	18
3.1. Příprava vzorků.....	19
3.2. Laserový skenovací vibrometr	19
3.2.1. Dopplerův jev.....	20
3.3. Buzení	21
3.3.1. Buzení modálním kladívkem	21
3.4. Software MEScope	22
3.5. EMA modely vzorků	23
3.6. MKP modely vzorků	24
3.7. Měření vzorků a jeho správnost	24
3.8. Vyhodnocování modálních vlastností a použití modálních kritérií.....	25
3.8.1. Porovnání experimentálně zjištěných modálních výchylek se sebou samými.....	25
3.8.2. Hodnoty koherence při experimentu nepoškozených vzorků	26
3.8.3. Validace MKP modelů s experimentálními	27
3.9. Poškození vzorků	32

3.9.1.	Hodnoty koherence při experimentu poškozených vzorků	34
3.9.2.	Validace MKP modelů s experimentálními (poškozených)	35
3.9.3.	Neplánované porušení vzorku 1	39
3.10.	Porovnání poškození	41
3.11.	Analýza vlivu velikosti vrubu na modální vlastnosti	42
3.12.	Změna vlastních frekvencí při poškození u měřených vzorků	45
3.13.	Stanovení velikosti normy poškození pro měřené vzorky	45
4.	Diskuze	46
5.	Závěr	47
	Seznam použité literatury	49

1. ÚVOD

Cílem této práce je seznámit se s experimentální modální analýzou (EMA), modelováním konstrukcí metodou konečných prvků (MKP), provedení rešerše metod pro porovnání modálních vlastností, vlastních tvarů kmitu zejména.

Dalším cílem této práce je vytvořit parametrický MKP model sady jednoduchých nosníků a jejich poškození, tyto modely validovat pomocí EMA a otestovat vybrané metody pro porovnání modálních vlastností.

Práce se věnuje tomuto tématu za účelem diagnostiky poškození, klíčovým tématem pro bezproblémový a efektivní chod stroje i pro osobní bezpečnost.

Některé publikace uvádí, že porovnávání vlastních frekvencí je vhodnou metodou pro detekci poškození - že vliv poškození na vlastních frekvencích je významný (jednotky Hz). Naopak bakalářská práce Jana Němce s názvem Detekce poškození kompozitu pomocí laserového vibrometru svědčí o opaku. Autor sledoval změny modálních parametrů pomocí provedení modální zkoušky na dvojici vzorků z vláknových kompozitů a v experimentální části své práce ukázal, že se změny modálních parametrů projeví až při velkém rozsahu poškození vzorků. Autor zjistil, že pro detekci delaminace kompozitu je vhodnější sledovat módy odpovídající vyšším vlastním frekvencím. [18]

Za zmínku stojí také práce Garteur group on Ground Vibration Testing. Results from the Test of a Single Structure by 12 Laboratories in Europe, která ukazuje, že rozdílnosti naměřených dat stejných vzorků v různých laboratořích se velmi liší a zdůrazňují obtížnost získání požadovaných testovacích podmínek. Je tedy třeba platnost výroků ověřit. [19]

2. TEORETICKÁ ČÁST

V rámci teoretické části je naznačena důležitost údržby stroje, jakožto klíčové téma pro chod stroje. Monitorování stavu stroje se ukázalo být velice podstatnou, stav stroje by se měl sledovat pravidelně, kvůli optimalizaci procesů i obchodnímu rozhodování. Práce tedy stručně seznamuje s procesem údržby a naznačuje některé ze způsobů diagnostiky strojů. Princip je dále rozebírán pouze u diagnostiky vibrační, jakožto cílového tématu této práce. Motivací pro řešení tohoto tématu je celá řada - u strojů a zařízení je třeba řešit otázky provozní bezpečnosti, dostupnosti, životnosti či spolehlivosti. Systémy, které jsou

schopné sledovat stav stroje tedy přispívají k efektivnímu využití stroje, jeho bezproblémovému chodu a v neposlední řadě zvyšují osobní bezpečnost. Ve výrobních procesech je v současné době kladen velký důraz na minimalizaci neplánovaných odstávek strojů a zařízení.

Dalším rozebíraným tématem je oblast modální analýzy, modální zkoušky a modálních parametrů. Jedná se o oblast probíranou a zkoušenou i v rámci praktické části této práce.

Následně jsou popsány funkce potřebné k analýze systému, z nichž se v praktické části využívá funkce koherence. Dále je sledováno téma frekvenční odezvové funkce.

Další část teoretické části je podkladem pro část praktickou a věnuje se zejména modálním kritériím.

2.1. Údržba stroje

Nezbytnou součástí pro bezporuchový provoz mechanismu je jeho údržba. Způsobů údržby je více a u některých je třeba zjišťovat aktuální stav stroje.

Reaktivní údržba - Spočívá pouze v provádění oprav při poruše stroje, následky jsou neplánované odstávky.

Preventivní údržba - Jedná se o průběžné kontroly, kratší časy vyhrazené pro údržbu na strojích, které pozitivně ovlivní počet odstávek provozu. Díky plánování údržby je pak možné ji sladit s potřebami výroby. Je také třeba plánovat vhodné zásobování náhradními díly.

Prediktivní údržba - Stroj je opravován vyžaduje-li to jeho stav. Stav stroje je tedy za provozu monitorován či diagnostikován. Tento přístup dobře předchází neplánovaným odstávkám (díky informacím jsou například objednány nové díly s předstihem). Tato údržba také zvyšuje bezpečnost a prodlužuje životnost stroje.

Proaktivní údržba - Tento typ údržby obsahuje navíc i řešení elementárních příčin zhoršeného stavu. Řeší se tedy symptomy, kvůli kterým k poruchám dochází. [1]

Kromě výše zmíněných také existuje řada moderních metod údržby, například Reliability Centered Maintenance (RCM), která zároveň snižuje náklady na údržbu eliminací nákladově neefektivních operací. [2]

Proces údržby při prediktivní či proaktivní údržbě je možno popsat pěti stádii:

1. Zjištění momentálního stavu - provádí se v bezporuchovém stavu stroje pro zjištění referenčních hodnot, které slouží k porovnávání.
2. Monitorování - definice míst pro pravidelné měření vibrací.
3. Detekce - vyhodnocení naměřených veličin, přičemž pro každou veličinu jsou určeny poplachové meze.
4. Analýza - podrobné měření a různé druhy analýz umožní podrobnější pohled na problém a jeho příčiny.
5. Doporučení - doporučení ekonomicky efektivních nápravných činností. [1]

2.2. Diagnostika

Spojením bodů 2 až 4, tedy monitorování, detekce a analýzy, vznikne diagnostika. Druhů diagnostiky je celá řada, popisují je různé normy ČSN ISO a volí se podle typu analyzovaných parametrů:

Provozní diagnostika: Zabývá se všemi dostupnými parametry hodnotící stav stroje za provozu. Tuto diagnostiku popisuje norma ČSN ISO 17359 nesoucí název Monitorování stavu a diagnostika strojů - Obecné pokyny.

Termodiagnostika: Analýza rozložení teplotního pole. Díky měření povrchové teploty dojde k vytipování míst se zvýšenou teplotou a následně se naleznou příčiny, kterými může být například nadměrné tření v daném místě. Zvýšená teplota může také poukazovat na příliš velký elektrický odpor, díky čemuž se tento typ diagnostiky často využívá u elektrických rozvodů či vedení velmi vysokého napětí.

Elektrodiagnostika: Analýza různých elektrických veličin, které jsou často používány například k diagnostice lidského těla díky aktivním elektrickým vlastnostem. Příkladem může být elektrokardiografie (EKG) - využití vzniku elektrických potenciálů v důsledku činnosti myokardu či elektroencefalografie (EEG) - zkoumání elektrických potenciálů v mozku. Elektrodiagnostika je také využívána pro zjišťování závad elektrických strojů či měření proudů do motorů. [1]

Ultrazvuková diagnostika: Analyzuje možnosti vzniku ultrazvuku a využívá je. Například při netěsnění či elektrických výbojích. I tento druh diagnostiky je hojně využíván v lékařství. [3]

Vibrační diagnostika: Analýza závad na základě informací, které jsou nesené vibracemi. Této diagnostice se věnují normy ČSN ISO 13373-1: Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 1: Obecné postupy a ČSN ISO 13373-2: Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 2: Zpracování, prezentace a analýza vibračních dat. [1]

Existuje i mnoho dalších druhů diagnostik, jako například rentgenová nebo tenzometrická, či specifické metody cílené pro konkrétní stroje.

2.3. Porušení konstrukce

Z pohledu pevnosti a funkčnosti může dojít k různým druhům porušení konstrukce. S tím souvisí pojem mezního stavu, což je stav, kdy konstrukce ztratí funkci, pro kterou byla vytvořena.

Konstrukce může ztratit svou statickou pevnost, dojít k přílišnému plastickému přetvoření či ke ztrátě stability. Dále může dojít k lomu při creepu nebo nežádoucím dynamickým odezvám - vlastní a vynucené kmitání. Mezi další nechtěné jevy patří křehký lom. V neposlední řadě stojí také problém nízkocyklové a vysokocyklové únavy. [4]

2.4. Vibrační diagnostika

Vzhledem k tématu práce bude podrobněji rozebrán pouze tento druh diagnostiky, tedy diagnostika vibrační. Vibrační diagnostika je jeden ze způsobů, jak zajistit provozní bezpečnost, dostupnost, spolehlivost, efektivitu a životnost strojů a zařízení, což jsou v současné době velmi řešená témata.

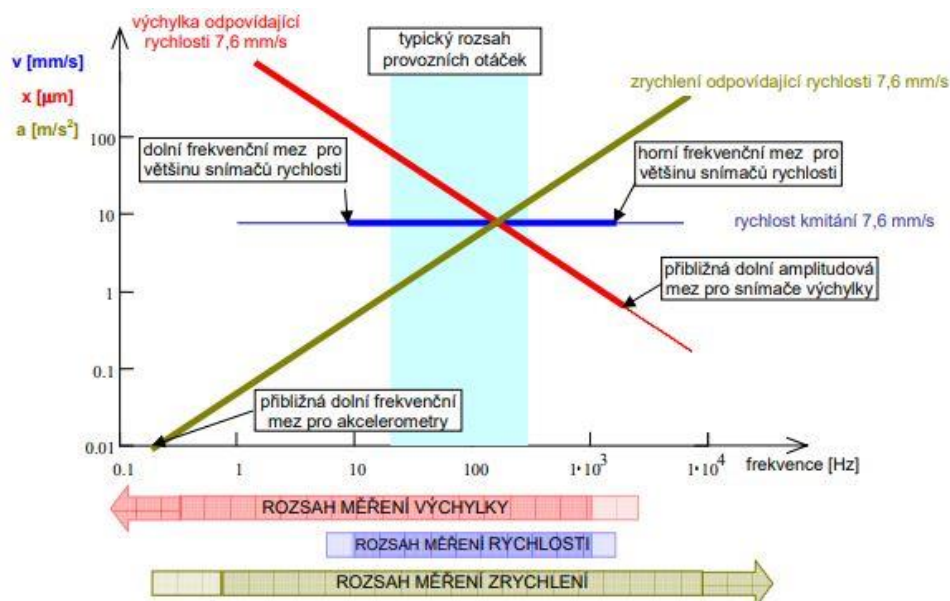
Stroje jsou složitější dynamické zařízení, které budí vibrace. Zdroje buzení vibrací lze potom rozdělit na ty systematické, které nelze ovlivnit, pouze tlumit a optimalizovat konstrukci. A dále na zdroje, které jsou přímo závislé na kvalitě výroby - například nevyváženost rotorů či ohnutý hřídel.

Princip vibrační diagnostiky spočívá v analýze vibrací, které jsou odezvou na budící sílu. Taková síla může být periodická, impulsní či mít náhodný průběh.

Vibrace stroje totiž velmi citlivě ukazují namáhání a technický stav stroje. Tato diagnostika se praktikuje často širokopásmovým měřením celkových úrovní vibrací, může se provádět v definovaném rozsahu podle norem či podle doporučení pro specifické stroje. Analýzou signálu od vibrací potom lze zjistit závadu. Tato metoda je zvláště vhodná pro rotační stroje, protože u nich pokrývá velmi široké spektrum závad.

Tato měření se nejdříve provádí u stroje s bezchybným technickým stavem a dále, jak se postupně negativně mění stav stroje, mění se i charakteristické složky frekvenčního spektra, které mají vztah k jednotlivým částem (může jít například o ozubená kola, ložiska, rotory, setrvačníky atd.). Vznikající poruchu opotřebení tedy lze identifikovat bezdemontážním způsobem.

Měřenými veličinami může být výchylka vibrací, rychlost či zrychlení, jejichž vztahy jsou uvedeny v kapitole 2.8.4. Teoreticky stačí znát jednu z veličin a je možné dopočítat zbývající. Rychlost se zpožďuje o 90° za výchylkou a zrychlení o 90° za rychlostí. V praxi nedochází k měření harmonických signálů, takže přepočítání mezi těmito veličinami lze udělat pouze numericky. Na následujícím obrázku je graficky znázorněno, jakou veličinu je vhodné volit pro měření v závislosti na frekvenci:



Obr. 1 - Volba měřené veličiny [1]

Z obrázku je zřejmé, že při rozsahu frekvencí 10-1000 Hz se jako měřená veličina používá rychlost, pro vyšší frekvence zrychlení a pro nižší frekvence výchylka. Při určité velikosti kmitání se totiž s narůstající frekvencí výchylka při stejných velikostech vibrací zmenšuje a zrychlení zvětšuje. Podle toho je také nutné zvolit vhodné měřicí zařízení - snímače výchylky, velometry či akcelerometry.

Při měření v rámci praktické části této práce bylo využito za pomoci laserového skenovacího vibrometru snímání rychlosti.

Pro hodnocení stavu pro jednotlivé typy strojů na základě změřených vibrací je používána norma ČSN ISO 10816, která hodnotí na základě velikosti vibrací i na změně velikosti vibrací. V této normě jsou definována pásma A-D a jejich mezní hodnoty vibrací. [1]

2.5. Modální analýza

K principu vibrační diagnostiky se pojí téma modální analýzy, jakožto prostředku pro předcházení poruchy stroje či zařízení. Vyzkoušením tohoto prostředku v praxi se věnuje praktická část této práce.

Modální analýza je proces, jenž má za úkol určit vlastní frekvence, poměrných tlumení či vlastních tvarů kmitu, tedy modálních vlastností soustav. Typ přístupu může být teoretický, sestavením kompletního matematického popisu soustavy či získáváním parametrů měření, tedy experimentální modální analýza (EMA). K měření modálních parametrů může sloužit například laserový skenovací vibrometr. [6]

2.6. Experimentální modální analýza

Podstata je v rozkmitání soustavy známými budícími účinky, protože při řízení podmínek jsou vyloučeny frekvenční vlastnosti buzení a je získán pouze model soustavy. Cílem modálních zkoušek je tedy získat dostatečně podrobný popis dynamického chování soustavy.

Pro aplikaci modálních zkoušek existuje mnoho důvodů a cílů. Jsou různé nároky na přesnost a liší se také míra vazby na teoretický model. Zjišťování modálních parametrů soustavy může probíhat bez návaznosti na teoretický model například pro zjištění vybuzeného tvaru. Též je možno pracovat s teoretickým modelem, který odpovídá

experimentálně zjištěným datům. Takový způsob je vhodný pro analýzy, kde je potřeba dosáhnout vysoké přesnosti - například při získávání vlastních tvarů či vlastních frekvencí. V některých případech je vhodné využít opravy teoretického modelu, takový proces však často závisí na metodě pokus omyl. Například se zkusí mírně změnit materiálové parametry. Dalším hojně využívaným procesem je korelace experimentálních a teoretických dat, při kterém dochází k porovnávání a zjišťování příčin rozdílností mezi experimentálními a teoretickými daty. Při tom je však požadována velmi vysoká přesnost měření. Modálních zkoušek je také možno využít jednotlivě u součástí patřících do složitější soustavy. [1]

2.7. Teorie modálních zkoušek

V této kapitole jsou popisovány systémy lineární, které disponují lineárními vztahy mezi vstupy a výstupy a platí u nich princip superpozice.

Při vibrační analýze jsou užívány následující tři druhy modelů, které popisují systémové matice:

Model fyzikální - matice hmotnosti [M]

matice tuhosti [K]

matice tlumení [B]

Model modální - spektrální matice s vlastními čísly na diagonále [λ^2]

modální matice, jejíž sloupce tvoří vlastní vektory [Φ]

Model odezvoový - matice frekvenčních odezvoových funkcí [$H(\omega)$]

Teoretická vibrační zkouška postupuje od modelu fyzikálního, který je sestaven na základě pohybových rovnic. Po analýze kmitů a získání modálního modelu následuje analýza kmitání vybuzeného, čímž vzniká model odezvoový.

Při experimentální vibrační zkoušce je postup opačný. Je získán odezvoový model po změření odezvoových frekvenčních funkcí. Ze zpracovaných dat je dále získán model modální. Z modálního modelu je též možno pomocí dalších výpočtů získat model fyzikální.

Frekvenční odezvoová funkce je definována jako podíl:

$$H(\omega) = \frac{\text{výstup}}{\text{vstup}} = \frac{\text{odezva}}{\text{buzení}}, \quad (2.7.1)$$

kde jeden prvek matice odezвовých funkcí je definován jako:

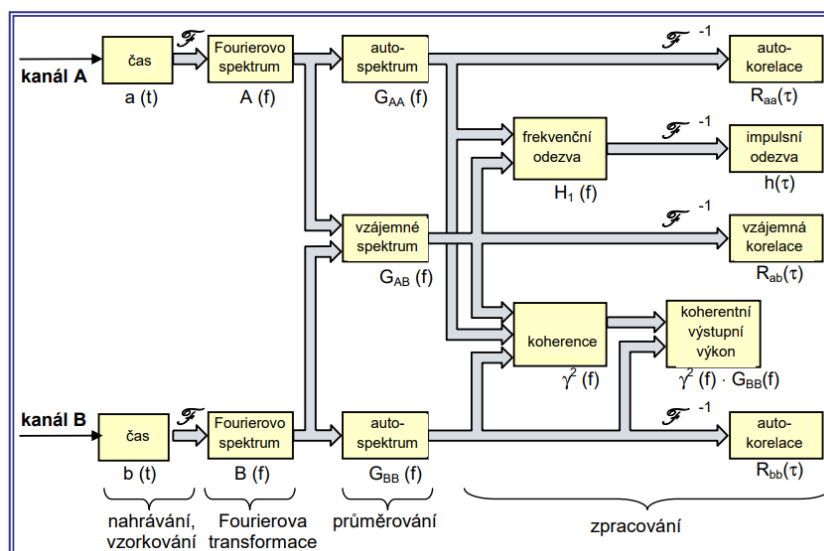
$$\alpha_{jk}(\omega) = \frac{x_j}{F_k} = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_j^r \cdot \Phi_k^r}{\lambda_r^2 - \omega^2}, \quad (2.7.2)$$

kde λ_r je vlastní číslo r-tého módu, ϕ_j^r je r-tý prvek j-tého vektoru vlastních tvarů a N je počet módů. [1]

2.8. Funkce potřebné k analýze systémů

Modální analýza, jakožto prostředek používaný k identifikaci dynamických systémů, využívá kanálových analýz.

Na rozdíl od analýzy signálů, kde se využívají jednocanálová měření, u analýzy systémů je využíváno měření dvoukanálové. Schéma dvoukanálové analýzy je znázorněno na obrázku:



Obr.2 - Schéma dvoukanálové analýzy [1]

Funkce, které jsou znázorněné na obrázku jsou definovány v následujících podkapitolách.

2.8.1. Autospektrum

Definice Fourierova autospektra:

$$S_{AA}(f) = E[|A(f)| * |A^*(f)| * e^{i0}] = E[|A|^2(f)] \quad (2.8.1)$$

2.8.2. Křížové spektrum

Křížové spektrum je vypočteno z Fourierových spekter na obou kanálech:

$$S_{AB}(f) = E[|A(f)| * |B(f)| * e^{i(\phi_B(f) - \phi_A(f))}], \quad (2.8.2)$$

kde A(f) a B(f) jsou Fourierova spektra na jednotlivých kanálech. Takto definované křížové spektrum je spektrum oboustranné. Jednostranné spektrum, závislé na f, je určeno jako:

$$G_{AB} = \begin{cases} 0 & \text{pro } f < 0 \\ S_{AB}(f) & \text{pro } f = 0 \\ 2 * S_{AB}(f) & \text{pro } f > 0 \end{cases} \quad (2.8.3)$$

Všechny ostatní funkce ze schématu (obr. 2) jsou získávány pomocí funkcí autospektra a křížového spektra. [1]

2.8.3. Koherence

Koherence je funkce vyjadřující míru závislosti dvou signálů. Vykazuje hodnotu nula až jedna, kde nulová hodnota koherence je chápána jako neexistující závislost výstupu na vstupu, a jednotková hodnota jako absolutní závislost mezi výstupem a vstupem. Koherence je funkcí frekvence, definována jako:

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{AB}(f)|^2}{G_{AA}(f) * G_{BB}(f)} \quad (2.8.4)$$

Hodnoty koherence se tedy pohybují mezi nulou a jedničkou:

$$0 \leq \gamma^2(f) \leq 1 \quad (2.8.5)$$

Je zřejmé, že funkce koherence má význam pouze v případě dat průměrovaných z více záznamů. Pro jediný vzorek bez průměrování by pro spektra a koherenci platilo:

$$|G_{AB}(f)| = |A(f)|^2 * |B(f)|^2 = G_{AA}(f) * G_{BB}(f) \quad , \quad \gamma^2 = 1 \quad (2.8.6)$$

Pomocí koherence se kontroluje platnost jiných funkcí. Snížená koherence může znamenat ovlivnění šumem nebo přítomnost nelinearit. Může ale také poukazovat na nutnost provedení více průměrů pro relevantní výsledek. Při náročnějším měření může nízká koherence znamenat:

- šum na vstupním/výstupním signálu
- vstupy bez vztahu s měřenými vstupy
- systémové nelinearity
- únik
- časově proměnné systémy

C.O.P. (Coherence Output Power) - udává míru koherence výstupního autospektra s autospektrém vstupního signálu.

$$C.O.P. = \gamma^2(f) * G_{BB}(f) \quad (2.8.7)$$

Tuto funkci lze využít pouze v případě, že šum je na výstupním signálu. Pro jiné případy (šum na vstupním signálu či vznik nelinearit) nemá tato funkce uplatnění.

Dále existuje funkce, která pracuje se šumem na výstupu jako s jediným aspektem ovlivňujícím koherenci. Jedná se o funkci Signal-to-Noise Ratio a je odvozena z funkce koherence:

$$\frac{S}{N} = \frac{\gamma^2}{1 - \gamma^2} \quad (2.8.8)$$

Jedná se o poměr signálu obsaženého na výstupu a šumu vyskytující se na výstupu. [7]

2.8.4. Frekvenční odezvosá funkce

Jak již bylo naznačeno, frekvenční odezvosá funkce (přenosová funkce) je jednou z podstat modální analýzy a je definována jako podíl výstupní a vstupní funkce.

$$H(\omega) = \frac{\text{výstup}}{\text{vstup}} = \frac{\text{odezva}}{\text{buzení}} \quad (2.8.9)$$

Pokud odezvou je výchylka x a buzením síla F , obě tyto veličiny závislé na frekvenci ω , frekvenční odezvosou funkci lze zapsat jako:

$$\alpha(\omega) = \frac{x(\omega)}{F(\omega)}, \quad (2.8.10)$$

odkud je zřejmé, proč se pro tento typ frekvenční odezvosé funkce také používá název Dynamická poddajnost. Tato přenosová funkce, závislá na frekvenci ω , je komplexní, tedy s reálnou i imaginární složkou a společně s jejich absolutní hodnotou popisují vlastnosti systému. Pro popis chování systému je také možno nejen funkcí poddajnosti, ale také funkcí pohyblivosti, definované podílem rychlosti a síly:

$$Y(\omega) = \frac{\dot{x}(\omega)}{F(\omega)} \quad (2.8.11)$$

A dále také funkcí akcelrance, definované podílem zrychlení a síly:

$$A(\omega) = \frac{\ddot{x}(\omega)}{F(\omega)} \quad (2.8.12)$$

Průběh výchylky, závislé na čase, lze definovat jako:

$$x(t) = Xe^{i\omega t} \quad (2.8.13)$$

Derivací tohoto vztahu 2.8.13 vzniká vztah pro rychlost:

$$v(t) = \dot{x}(t) = i\omega Xe^{i\omega t} \quad (2.8.14)$$

Derivací vztahu 2.8.14 vznikne vztah pro zrychlení:

$$a(t) = \ddot{x}(t) = -\omega^2 X e^{i\omega t} \quad (2.8.15)$$

Použitím výše zmíněných vztahů lze zapsat dynamickou poddajnost $\alpha(\omega)$, pohyblivost $Y(\omega)$ a akceleranci $A(\omega)$:

$$\alpha(\omega) = \frac{X}{F} \quad (2.8.16)$$

$$Y(\omega) = \frac{V}{F} = i\omega \frac{X}{F} = i\omega \alpha(\omega) \quad (2.8.17)$$

$$A(\omega) = \frac{A}{F} = -\omega^2 \frac{X}{F} = -\omega^2 \alpha(\omega). \quad (2.8.18)$$

Na frekvenční odezovou funkci může mít vliv šum. Ten je však eliminován lineární aproximací systému. V závislosti na výskytu šumu je vhodné použít jeden ze tří odhadů frekvenční odezové funkce:

$$H_1(f) = \frac{G_{AB}(f)}{G_{AA}(f)} \quad (2.8.19)$$

$$H_2(f) = \frac{G_{BB}(f)}{G_{BA}(f)} \quad (2.8.20)$$

$$H_3(f) = \sqrt{\frac{G_{BB}(f)}{G_{AA}(f)}} * \frac{G_{AB}(f)}{|G_{AB}(f)|} = \sqrt{H_1(f) * H_2(f)} \quad (2.8.21)$$

Tyto odhady jsou definovány pomocí dvou funkcí - spektra a autospektra. Záleží tedy, zda se šum vyskytuje na vstupu či na výstupu. Při odhadu spekter při šumu se využívá průměrování. Měření pak mohou být ovlivněna systematickými a náhodnými chybami. Pokud je analýza uskutečňována s dostatečným rozlišením, systematické chyby se neprojeví. [8]

2.9. Aspekty měření

Pro správný průběh měření a zpracování dat je třeba soustředit se na druh uložení a způsob buzení soustavy, dále na snímání měřených veličin a způsob zpracování signálu.

Uložení soustavy je voleno především podle účelu provádění modální zkoušky. Například volný způsob uložení je vhodné použít za účelem co nejlepší korelace naměřených výsledků s výsledky získanými pomocí MKP modelu. Je to z toho důvodu, že při experimentu nelze nikdy zajistit vetknutí, které by bylo dokonalé. Při použití vetknutí tedy mohou vznikat rozdíly mezi experimentálním a výpočtovým modelem v souvislosti s rozdílnými okrajovými podmínkami, někdy je však nutné použít právě tuto možnost. Dalším způsobem je uložení in situ, neboli na místě, jedná se o provozní podmínky. Tento způsob je využíván v případě potřeby výsledků právě za provozních podmínek, kdy porovnávání s MKP modelem nebude prováděno.

Dále je třeba dbát na způsob buzení. I tento aspekt je ovlivněn především účelem měření a také požadovanou přesností měření. Budit soustavu se dá dynamickým budičem vibrací (harmonickým signálem, náhodným signálem či jiným typem signálu) nebo impulsně (rázovým kladívkem, výchylkou).

Samotné snímání dat potom musí co nejméně ovlivňovat měření. [1]

2.10. FRF Curve-fitting

FRF Curve-fitting nebo také odhad modálních parametrů je proces používaný pro vytvoření parametrického modelu ze změřené frekvenční odezvové funkce. Tento proces byl využit i rámci praktické části této práce, pomocí programu MEScope. Jde o identifikaci parametrů modelu, jako jsou vlastní frekvence, vlastní tvary kmitu a tlumení, z frekvenční odezvové funkce. Parametrický model může mít například tvar:

$$\left[H(\omega) = \sum_{k=1}^{\text{počet módů}} \frac{[R(k)]}{j\omega - p(k)} + \frac{[R^*(k)]}{j\omega - p^*(k)} \right],$$

(2.10.1)

kde ω [rad/s] je kruhová frekvence, $p(k)$ je pól příslušného módu, $\omega(k)$ je vlastní frekvence módu k , $R(k)$ je matice rezidua módu k , $*$ značí transpozici komplexně sdružených prvků, j představuje imaginární jednotku. $p(k)$ je definováno jako:

$$p(k) = -\sigma(k) + j\omega(k), \quad (2.10.2)$$

kde $\sigma(k)$ je tlumení módu k , j je imaginární jednotka a $\omega(k)$ je vlastní frekvence módu k .

Pomocí výše zmíněných veličin je také definováno kritické tlumení příslušného módu $\xi(k)$:

$$\xi(k) = \frac{\sigma(k)}{\sqrt{\omega(k)^2 + \sigma(k)^2}} \quad [\%] \quad (2.10.3)$$

Matici rezidua $R(k)$ lze pomocí modálních tvarů $u(k)$ a škálovací konstanty $A(k)$ při módu k vyjádřit jako:

$$[R(k)] = A(k)\{u(k)\}\{u(k)\}^t, \quad (2.10.4)$$

na základě čehož se pak model 2.13.1 dá pomocí vztahu 2.13.4 přepsat na:

$$[H(\omega)] = \sum_{k=1}^{\text{počet módů}} \frac{A(k)\{u(k)\}\{u(k)\}^t}{j\omega - p(k)} + \frac{A^*(k)\{u^*(k)\}\{u^*(k)\}^t}{j\omega - p^*(k)} \quad [9]. \quad (2.10.5)$$

2.11. Modální parametry

Modální parametry, které byly zmíněny v předchozí kapitole, jsou vlastnosti, o jejichž zjištění modální analýza usiluje.

Protože dynamické chování soustavy lze rozložit na jednotlivé pohyby, tedy módy, existují veličiny, které tyto jednotlivé módy popisují. Superpozicí těchto módů vznikne výsledný tvar kmitání. Tyto veličiny se nazývají modální parametry a patří mezi ně:

Vlastní frekvence - frekvenční hodnota, při které dochází k dokonalé přeměně kinetické energie na potenciální a naopak. Taková hodnota je závislá na hmotnosti, tuhosti nebo uložení tělesa či soustavy. Vlastní frekvence se může stát problematickou, je-li její hodnota shodná s některou z budících frekvencí. Potom nastává nežádoucí jev, známý jako rezonance, při které je stroj při provozu nadměrně namáhán a stává se též často hlučnějším.

Vlastní tvar kmitu - hodnota deformace, které dosáhne prvek při kmitání vlastní frekvencí daného módu. Je veličinou abstraktní, nepozorovatelnou, vyjadřuje deformaci, jakoby příslušný mód kmitání existoval sám o sobě.

Tlumení daného módu - tlumicí síly struktury je nemožné přesně odhadnout. Existují pouze předpoklady o chování tlumení. Při harmonickém buzení je tlumení též harmonické. Jedním z vhodných modelů tlumení je tlumení viskózní, kde je tlumicí účinek přímo úměrný rychlosti. Dalším vhodným modelem je pak tlumení hysteretzní, kde je nepřímo úměrný frekvenci.

Dalšími parametry jsou modální tuhost a hmotnost, což jsou vlastnosti materiálové. [1]

2.12. Modální kritéria

Modální kritéria vyjadřují míru shody dvou vlastních tvarů kmitu. Je vhodné je použít například pro vyjádření podobnosti mezi změřenými hodnotami a hodnotami zjištěnými pomocí MKP modelu nebo pro zjištění změny konstrukce mezi dvěma měřeními či korektností opakované výroby dílu.

2.12.1. MAC kritérium

Kritérium modální věrnosti (Modal Assurance Criterion - MAC kritérium) je bezrozměrná veličina vyjadřující míru podobnosti dvou vektorů. MAC kritérium porovnávající vektor $\{u\}$ s vektorem $\{v\}$ je vyjádřeno jako:

$$MAC = \frac{\|\{u\}^h\{v\}\|^2}{\{u\}^h\{u\}\{v\}^h\{v\}}, \quad (2.12.1)$$

kde $\{u\}^h$ a $\{v\}^h$ představují transponované vektory $\{u\}$ a $\{v\}$.

Je tedy zřejmé, že hodnoty MAC kritéria patří do intervalu $\langle 0,1 \rangle$, kde 0 znamená, že vektory si nejsou podobné a jsou ortogonální. Naopak při podobnosti vektorů může hodnota MAC kritéria dosahovat až čísla 1, což znamená, že porovnávané vektory jsou kolineární, tedy ležící na téže přímce.

2.12.2. SDI kritérium

Dalším kritériem je SDI (Shape Difference Indicator), což je bezrozměrná hodnota ukazující rozdíl mezi dvěma vektory. Porovnání vektoru $\{u\}$ s vektorem $\{v\}$ je podle SDI kritéria vyjádřeno jako:

$$SDI = \left(1 - \frac{\|\{u\} - \{v\}\|^2}{\{u\}^h\{u\} + \{v\}^h\{v\}} \right)^2 \quad (2.12.2)$$

nebo také:

$$SDI = \left(\frac{2\text{real}(\{u\}^h\{v\})}{\{u\}^h\{u\} + \{v\}^h\{v\}} \right)^2, \quad (2.12.3)$$

kde $\{u\}^h$ a $\{v\}^h$ představují transponované vektory $\{u\}$ a $\{v\}$. I SDI nabývá hodnot z intervalu $\langle 0,1 \rangle$, kde hodnota 1 znamená identické vektory. [16]

2.12.3. POC (Pseudo Orthogonality Check)

Je standardně využívaná metoda, která ověřuje ortogonalitu vektorů, známá také pod CMG (Cross Generalized Mass). Míra korelace vektorů se potom vyjádří jako:

$$POC = \{u\}^T [M] \{v\}, \quad (2.12.4)$$

kde $\{u\}$ a $\{v\}$ jsou porovnávané vlastní tvary a matice M je matice hmotnosti.

POC nabývá hodnot $\langle 0,1 \rangle$, kde nulová hodnota znamená žádnou korelaci, hodnoty blízké 1 naopak, že vektory korelují.

2.12.4. Relative error

Toto kritérium místo míry korelace vyjadřuje naopak chybu:

$$Rel = \frac{\|\{u\} - \{v\}\|}{\|\{u\}\| + \|\{v\}\|}, \quad (2.12.5)$$

kde $\{u\}$ a $\{v\}$ jsou srovnávané vektory.

Kritérium nabývá hodnot z intervalu $\langle 0,1 \rangle$, ale 0 v tomto případě vyjadřuje identické vektory. Hodnota 1 naopak naprosto různé vektory. Velmi dobrou hodnotu pro porovnávání vektorů vyjadřuje výsledek kritéria pohybující se blízko čísla 0,1. [15]

2.12.5. MSDI (Mode shape damage index)

MSDI je používáno jako indikátor poruchy. Je založena na rozdílných výchylkách elementu porušeného a neporušeného objektu:

$$MSDI_i = \frac{u_i - v_i}{u_i}, \quad (2.12.6)$$

kde u_i je výchylka i elementu nepoškozeného objektu a v_i je výchylka i elementu objektu poškozeného v daném módu. Toto kritérium může mít i funkci lokalizace poruchy. Při bezporuchovosti systému je hodnota MSDI pro každý mód nulová. [13] [14] [15][16]

2.13. MKP modelování

Modelování MKP (Metoda konečných prvků) nebo také FEM (Finite element method) je výpočetní numerická metoda, pomocí které se dá simulovat velká škála veličin jako například napětí, deformace, vlastní frekvence či tepelné proudění, za použití konečného počtu elementů, kterými je diskretizováno spojitě kontinuum. Díky použití

konečného počtu elementů lze tuto metodu využít i u součástí, které jsou kvůli tvarové složitosti běžnými prostředky neřešitelné.

Tato metoda je ve výpočetním odvětví mocným nástrojem, který dokáže pracovat za určitých předpokladů velmi spolehlivě a efektivně.

Při tomto procesu je snaha převést reálné objekty na objekty modelové a zkoumat pak reálný systém prostřednictvím modelu.

V praktické části byl využit program Abaqus. Vstupní soubor Abaqusu obsahuje dvě sady dat, první sada definuje model - prvky, uzly, vlastnosti prvků, vlastnosti materiálů a cokoli, co definuje daný model. Za modelová data se považují data poskytnutá před řádkem Step. Druhá sada definuje, co se s modelem stane. Obsahuje tedy zatížení, odezvy atd.

Síť modelu se skládá z elementů (prvků) a uzlů, kde poloha uzlů definuje tvar modelu. Podle typu součásti existují různé typy prvků - liniové, plošné a objemové. V rámci MKP modelování v praktické části této práce byly pro síťování součástí použity objemové prvky. Ideální prvek z pohledu přesnosti výpočtu je čtverec. Čím větší je protažení elementu v jednom směru, tím větší může být nepřesnost výpočtu. Na zvolené velikosti elementu je závislá přesnost výpočtu a také výpočetní doba. Z toho důvodu je vhodné použít v jedné součásti různé velikosti elementů. [17]

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem této části je praktické seznámení s modální zkouškou - naměření vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitu poškozených a nepoškozených nosníků, validovat experimentální modely s modely MKP a analyzovat, zda má poškození vliv na modální vlastnosti, konkrétně vlastní frekvence a vlastní tvary kmitu a využít modálních kritérií.

V rámci praktické části byl vytvořen EMA a MKP model vetknutých nosníků o průměrech 10, 8 a 6 mm a délce 795 mm. Byly vytvořeny také modely stejných parametrů s vruby. Modální vlastnosti EMA a MKP modelů byly porovnávány mezi sebou a následně porovnány modely poškozené s nepoškozenými.

3.1. Příprava vzorků

Vzorky jsou ocelové tyče o průměrech 10 mm, 8 mm a 6 mm a délce 795 mm. Na všech tyčích byly rozmístěny reflexní pásy určené pro snímání laserovým skenovacím vibrometrem. 16 kusů reflexních pásek bylo rozmístěno od místa „vetknutí“ až po konec tyče v pravidelných intervalech na každém vzorku. 16 bodů bylo zvoleno s ohledem na možný vznik prostorového aliasingu. Při zvolení nedostatečného počtu bodů by mohlo dojít k tomuto nežadoucímú jevu, jehož následkem by bylo zdánlivé zmenšení počtu uzlů u již složitějšího tvaru kmitu. Co největšímu zamezení posuvů bylo dosaženo pevným připevněním tyče k zemi. Vzorek, jeho označení a připevnění k zemi je zaznamenáno na následujícím obrázku:



Obr. 4 - Vzorek a jeho upevnění k zemi

3.2. Laserový skenovací vibrometr

Při experimentech byl pro snímání rychlosti 16 bodů na vzorcích byl použit laserový skenovací vibrometr PS-400 od firmy Polytec, která se zabývá bezkontaktním měřením vibrací, otáček a délek pomocí laserů. Celá měřicí soustava se skládá z:

Snímací hlavice - je vybavena laserovým paprskem, který snímá vibrace ve směru paprsku. Je vybavena vysoce kvalitními a opticky citlivými prvky. Její nastavení se dá ovládat vzdáleně pomocí PC a je schopna se automaticky doostřit.

Vibrometrický kontrolér OFV-5000 - kontrolér pracující na principu interferometrie. Obsahuje analogové i digitální dekodéry s možností měřit ve velkém frekvenčním, výchylkovém i rychlostním rozsahu.

Princip je interferometrický a je tedy třeba, aby se laserový paprsek odrazil od měřeného objektu a vrátil se zpět rozptýlený. Odraz laserového paprsku od vibrujícího vzorku vytvoří díky relativistickému Dopplerově jevu modulovaný paprsek, který je pak zpracován a získány údaje o rychlosti. Skenovací hlava, která byla použita při měření, je vyfocena na následujícím obrázku:



Obr. 5 - PSV-400 od firmy Polytec (Skenovací hlava)

3.2.1. Dopplerův jev

Dopplerův jev popisuje skutečnost, že pohybující se zdroj frekvence svou frekvenci z hlediska pozorovatele mění. Pokud se zdroj k pozorovateli přibližuje, pozorovaná frekvence je vyšší. Naopak při vzdalování objektu od pozorovatele se pozorovaná frekvence snižuje. Změněnou frekvenci f' pak lze vyjádřit jako:

$$f' = f_0 \frac{v \pm v_0}{v \pm v_s}, \quad (3.2.1)$$

kde f_0 je skutečná frekvence, v_s je rychlost zdroje frekvence, v_0 je rychlost pozorovatele a v je rychlost vln v médiu.

Je však třeba brát v úvahu i relativistické vlivy, proto laserový skenovací vibrometr pracuje s relativistickým Dopplerovým jevem, který nezanedbává dilataci času. Změněná frekvence podle Relativistického Dopplerova jevu při rychlosti světla c má potom tvar:

$$f' = f_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} \quad [12]. \quad (3.2.2)$$

3.3. Buzení

V praxi je způsob buzení volen podle účelu modální zkoušky, očekávané přesnosti a chtěný frekvenční rozsah. Buzení shakerem patří do skupiny buzení dynamickým budičem vibrací a buzení modálním kladívkem do skupiny impulsního buzení. V rámci praktické práce bylo vyzkoušeno buzení shakerem u všech vzorků, validace s MKP modely se však nezdařila - konkrétně šlo o velké rozdíly ve vlastních frekvencích. Bylo tedy použito buzení modálním kladívkem.

3.3.1. Buzení modálním kladívkem

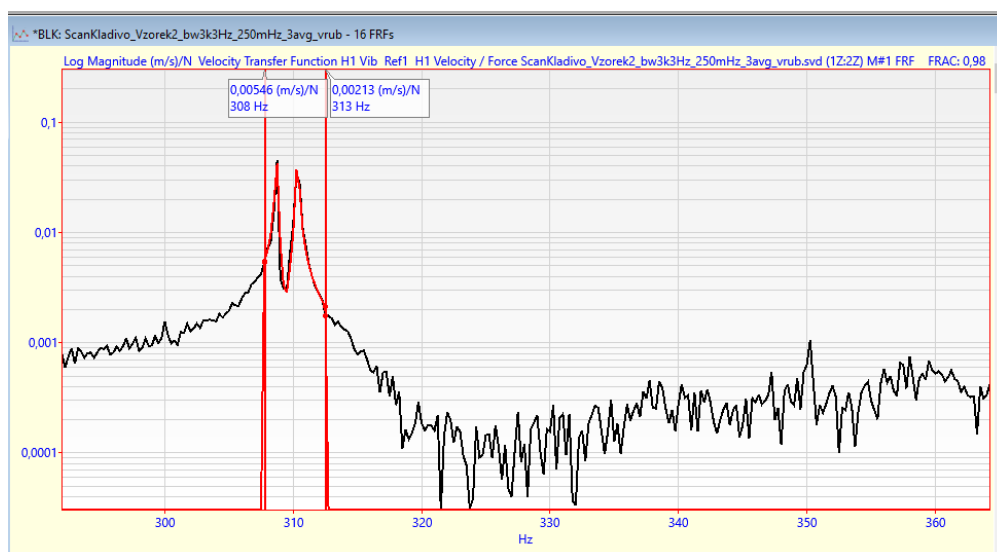
Jedná se o velmi jednoduchý způsob, jak soustavu budit. Velikost úderu závisí na hmotnosti hlavy kladívka a rychlosti, kterou je do soustavy udeřeno. Za hrotem kladívka se nachází snímač síly, frekvenční odezva je teda měřena za pomoci znalosti časového průběhu působící síly. Pro správné použití modálního kladívka je třeba udeřovat co nejpřesněji do referenčního bodu struktury a po úderu rychle oddálit kladívko od soustavy, aby nedošlo k vícenásobnému úderu. Tento způsob buzení byl použit pro měření frekvenčních odezev v rámci této práce. Bylo použito modální kladívko Endevco, model 2302-05, které má citlivost 1.15mV/N. Zmiňované modální kladívko je vyfoceno na následujícím obrázku:



Obr. 6 - Modální kladívko

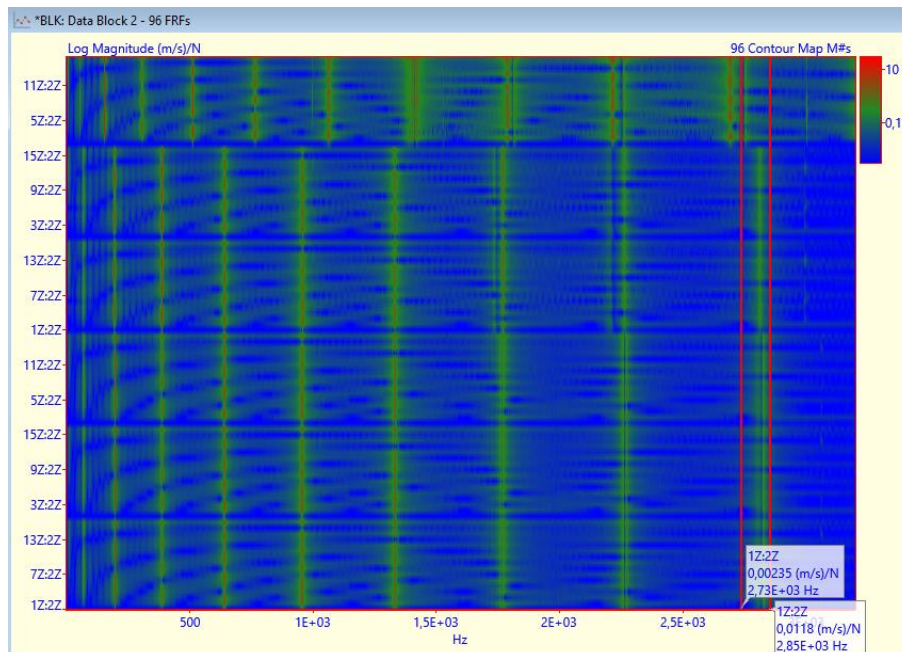
3.4. Software MScope

K získání modálních parametrů z dat naměřených pomocí laserového skenovacího vibrometru byl použit MScope, produkt od firmy Vibrant. Tento program má funkci Curve Fitting, která odhaduje modální parametry z frekvenční odezvy funkce. Při tomto procesu bylo využito metody RFP (Rational fraction polynomial). Pro správné použití funkce Curve Fitting je třeba nejdříve určit počet módů v určeném frekvenčním pásmu měření. Dále je odhadnuta frekvence a tlumení pro módy v tomto pásmu, z čehož jsou určeny i tvary kmitu. Tyto parametry pak lze uložit do tabulky tvarů, kterou lze exportovat do jiných programů v rámci dalšího zpracování dat. V rámci tohoto programu lze také například animovat jednotlivé módy. Princip nacházení módů a vlastností příslušného módu je zaznamenán na následujícím obrázku:



Obr.7 - nacházení módů v MScope

Pomocný prvek pro nacházení módů, Contour mapa, která kontrastně zvýrazňuje oblasti předpokladu módů, díky čemuž je možné se na tyto frekvenční oblasti cíleně zaměřit, je vidět na následujícím obrázku:



Obr. 8 - MEscape Contour map

3.5. EMA modely vzorků

Tyto modely vznikly na základě vyhodnocení uskutečněné modální zkoušky. Modální zkouška byla provedena pro nosníky o průměrech 10 a 8 mm. Tyto nosníky byly připevněny k zemi, jak bylo zmíněno v kapitole 3.1. Laserovým skenovacím vibrometrem byly snímány rychlosti šestnácti bodů umístěných po délce nosníku. Do druhého bodu byl umístěn referenční bod, kde byl nosník buzen modálním kladívkem. Rychlost v každém bodě byla měřena třikrát s vzorkovací frekvencí $f_s = 3200$ Hz. Mezi každým měřením byl nosník ručně utlumen, aby mělo každé měření stejné počáteční podmínky. Stejným způsobem proběhla i modální zkouška stejných vzorků s vruby. Bezprostředně po měření byly naměřené hodnoty kontrolovány pouze vizuálně za využití programu Polytec Scan Viewer. Takto získané frekvenční odezvy byly exportovány do programu MEscape, kde z nich byly získávány modální vlastnosti.

3.6. MKP modely vzorků

V Abaqusu byly vymodelovány tyče o průměrech 6, 8 a 10 mm a délce $l = 795$ mm s Youngovým modulem pružnosti $E=190$ GPa, hustotou 8000 kg/m³ a poissonovým číslem 0,3. Model byl pojat jako poddajné 3D těleso síťované pomocí objemových elementů. U všech tyčí byla zadána okrajová podmínka vetknutí na začátku tyče - je tedy zabráněno posuvům i rotacím ve všech směrech v místě $l=0$ mm. V kroku zadávání typu analýzy byl nastaven step Frequency, kde bylo v rámci řešení vlastních tvarů použita Lanczosova metoda.

V Abaqusu byly zjištěny vlastní tvary kmitu a vlastní frekvence soustavy. Do každého MKP modelu bylo zavedeno 16 bodů, které mají stejnou polohu jako body měření při experimentu. Pro každý mód byla zjištěna modální výchylka v každém bodě.

3.7. Měření vzorků a jeho správnost

Systém byl buzen pomocí modálního kladívka. Všechny vzorky byly buzeny v místě druhého bodu od vetknutí, tedy v délce $l = 106$ mm. Pro všech 16 bodů na všech 3 vzorcích byla provedena 3 měření. Modální vlastnosti vzorků byly naměřeny principem frekvenčních odezev pomocí laserového skenovacího vibrometru a vyhodnoceny v programu MEscape. Laserový skenovací vibrometr snímá pouze rychlosti ve směru paprsku laseru, tudíž výsledné změřené pohyby jsou promítnuty do jednoho směru. Výsledkem exportu z MEscape byly hodnoty vlastních tvarů ve formě amplitudy a fáze pro každý měřený bod vzorku. Tyto veličiny byly převedeny na hodnoty modálních výchylek y v každém bodě:

$$y_i = A_i * \cos(\varphi_i) \tag{3.7.1}$$

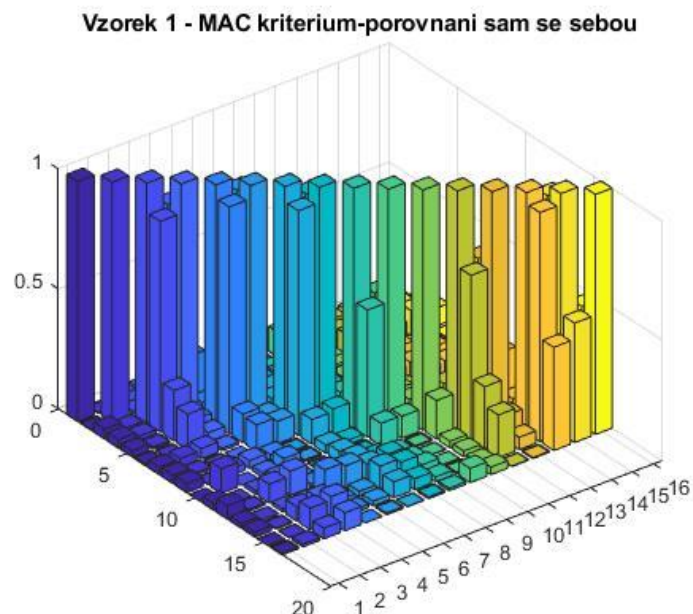
Správnost zjištěných modálních vlastností je ověřena srovnáním výsledných tvarů kmitu takto zjištěných se sebou samými, zjištěním jednotlivých hodnot koherence měření a validací měření s MKP modely. Pro přepočítávání, manipulaci s daty a jejich grafické znázornění byl použit Matlab.

3.8. Vyhodnocování modálních vlastností a použití modálních kritérií

Modální vlastnosti poškozených i nepoškozených vzorků zjištěné pomocí EMA i MKP byly porovnávány. Jak bude zaznamenáno níže, vlastní frekvence se u poškozených a nepoškozených vzorků mění jen velmi málo a bude třeba využít k detekci poškození vlastní tvary kmitu.

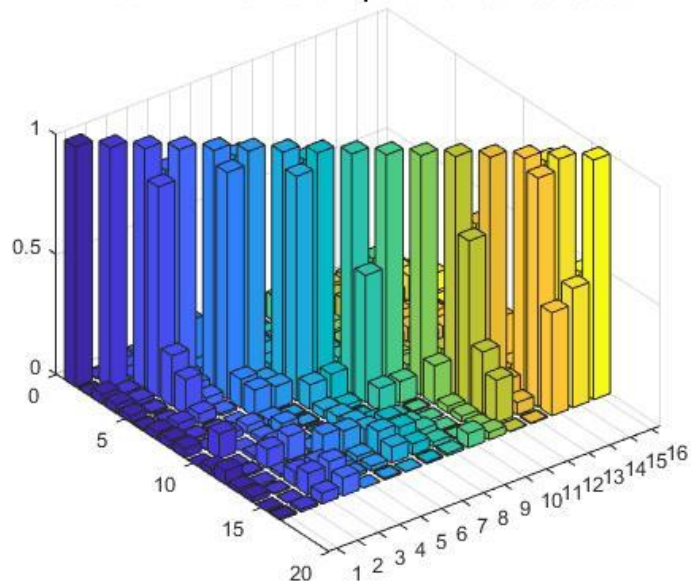
3.8.1. Porovnání experimentálně zjištěných modálních výchylek se sebou samými

Toto porovnání bylo provedeno a znázorněno graficky pomocí MAC kritéria u vzorků s průměry 8 a 10 mm. Jak již bylo uvedeno, kritérium vyjadřuje míru podobnosti vektorů a dosahuje hodnot z intervalu $\langle 0,1 \rangle$. V ideálním případě by tedy tvary byly podobné pouze sami se sebou v nejvyšší možné míře a nebyly by vůbec podobné s tvary jinými. MAC matice by tedy měla podobu jednotkové matice (tedy hodnoty jedna na diagonále s ostatními prvky nulovými). Experimentálně zjištěné tvary prvního a druhého vzorku, porovnané sami se sebou, jsou zaznamenány na následujících grafech:



Obr. 9 - Experimentálně zjištěné tvary 1. vzorku (d=10 mm) porovnané sami se sebou

Vzorek 2 - MAC kritérium-porovnani sam se sebou



Obr. 10 - Experimentálně zjištěné tvary 2. vzorku ($d=8$ mm) porovnané sami se sebou

3.8.2. Hodnoty koherence při experimentu nepoškozených vzorků

Pro ověření správnosti měření byly exportovány hodnoty koherence. Pro každé měření potom existuje 12800 hodnot koherence pro každý ze 16 bodů. Pro každý bod byl vytvořen průměr těchto koherencí, které byly zaznamenány do tabulky:

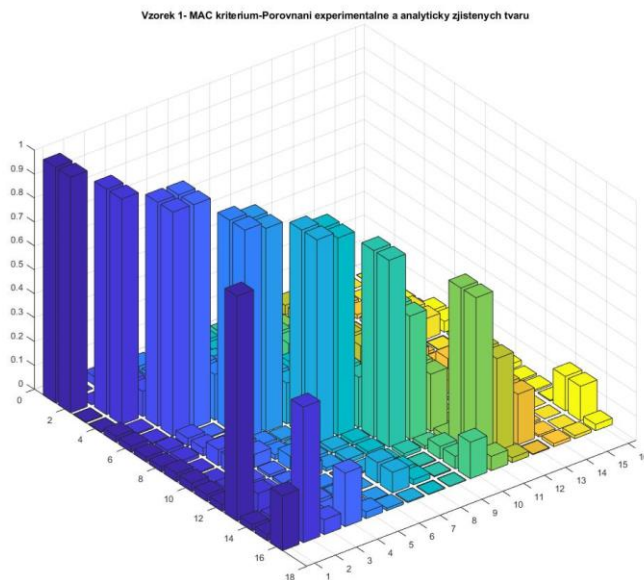
bod	vzorek 1	vzorek2
1	0.922	0.758
2	0.973	0.949
3	0.950	0.976
4	0.963	0.983
5	0.959	0.975
6	0.964	0.971
7	0.978	0.981
8	0.967	0.965
9	0.964	0.980
10	0.976	0.967
11	0.970	0.987
12	0.961	0.978
13	0.981	0.980
14	0.962	0.965
15	0.954	0.990
16	0.984	0.984

Tabulka 1 - Hodnoty koherencí při experimentu - nepoškozené vzorky 1 a 2

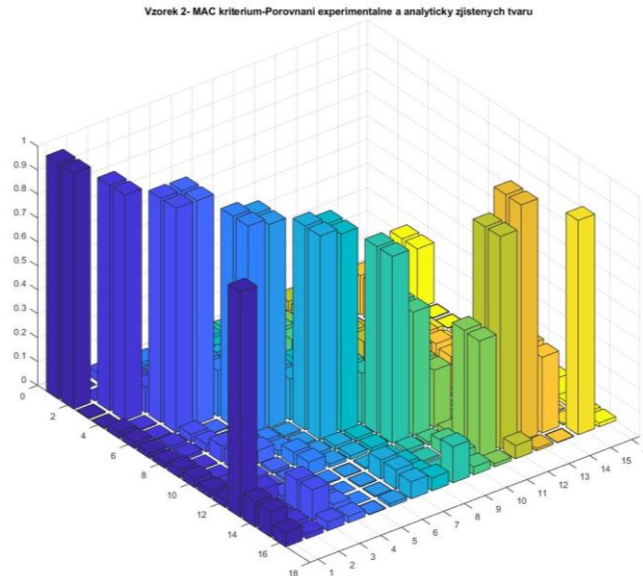
Z tabulky 1 je zřejmé, že hodnoty koherencí jsou zpravidla větší než 0.95, což je velmi uspokojivé.

3.8.3. Validace MKP modelů s experimentálními

Došlo k porovnání experimentálně zjištěných tvarů modálních výchylek prvního a druhého vzorku s tvary zjištěnými za pomoci MKP modelu. Ke srovnání bylo využito MAC kritérium, které bylo graficky znázorněno:



Obr. 11 - Porovnání MKP a experimentálně zjištěných tvarů u vzorku 1 (d=10mm)



Obr. 12 - Porovnání MKP a experimentálně zjištěných tvarů u vzorku 2

Z grafického znázornění porovnání experimentálních a MKP tvarů modálních výchylek vyplývá, že experimentálně zjištěné hodnoty jsou podobné s hodnotami zjištěnými pomocí MKP. Zdvojení hodnot znázorňujících shodné tvary je následek toho, že tvary zjištěné pomocí MKP obsahují dvojice velmi podobných tvarů, které mají ve vlastním tvaru shodný počet uzlů, jejich fáze je však jiná. I při měření může dojít ke zjištění dvou podobných tvarů.

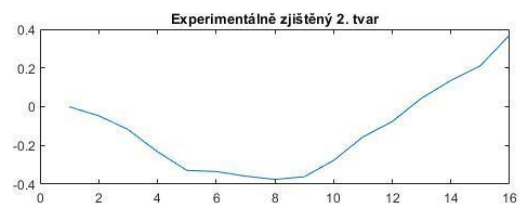
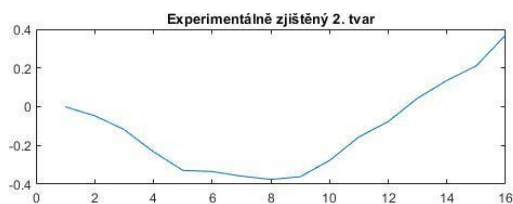
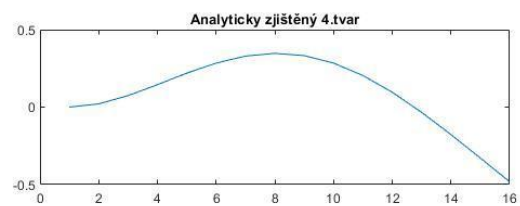
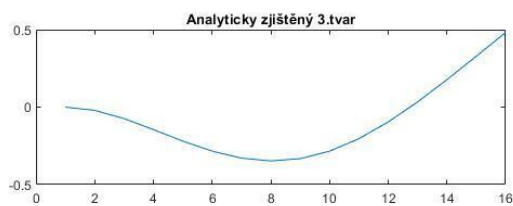
Dále je zřejmé, že 13. tvar zjištěný pomocí MKP je podobný pouze s prvním tvarem zjištěným experimentálně. Jedná se o torzní kmit, který se při měření neuplatní, a jeho podobnost s prvním tvarem je náhodná.

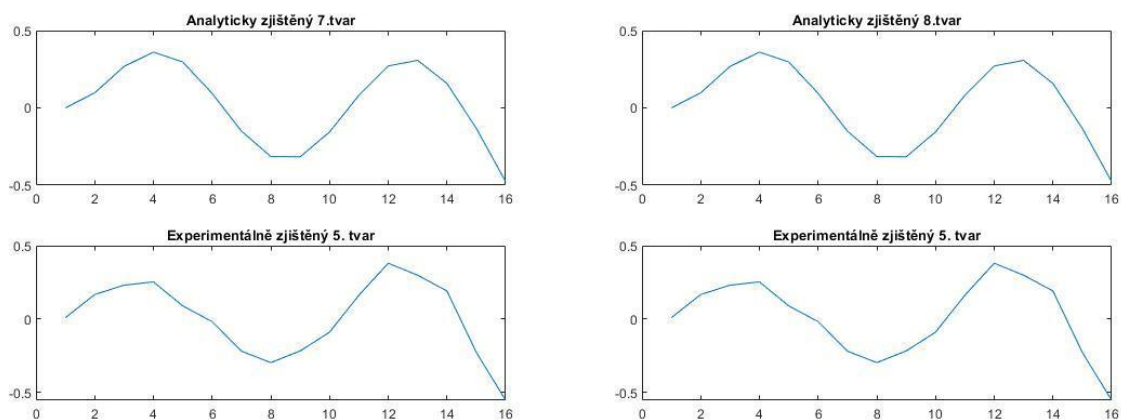
U módů, které byly na základě kritéria vyhodnoceny jako podobné, byly porovnány frekvence. Následující tabulka je přehled tvarů zjištěných pomocí MKP modelu a zjištěných experimentálně, které jsou si podobné. U podobných tvarů byly srovnány hodnoty frekvencí. Původní frekvence zjištěné pomocí Abaqusu jsou frekvence, které odpovídají Youngově modulu $E=190$ GPa, který byl původně zvolen. Nastavení této materiálové konstanty bylo upraveno na $E=215$ GPa, shoda je pak velmi dobrá (tabulka 2). I po změně Youngův modul zůstává v intervalu hodnot pro ocel.

Vzorek 1				
podobné tvary		Frekvence [Hz]		
MKP	Experimentální	Experimentální	MKP	MKP - původní
1	1	11.32	11.30	10.38
2	1	11.32	11.31	10.39
3	2	70.90	70.78	65.04
4	2	70.90	70.82	65.08
5	3	198.26	198.02	181.97
6	3	198.26	198.13	182.07
5	4	198.92	198.02	181.97
6	4	198.92	198.13	182.07
7	5	387.88	387.57	356.15
8	5	387.88	387.77	356.34
7	6	389.36	387.57	356.15
8	6	389.36	387.77	356.34
9	7	639.91	639.66	587.81
10	7	639.91	640.00	588.12
9	8	642.61	639.66	587.81
10	8	642.61	640.00	588.12
11	9	954.16	953.69	876.38
12	9	954.16	954.20	876.84

Tabulka 2 - Přehled podobných tvarů a porovnání jejich frekvencí pro vzorek 1

Tvary, které MAC kritérium označilo za podobné, byly po dvojicích vykresleny. Vykreslené tvary jsou k nahlédnutí v příloze 1) na následujících obrázcích jsou některé z nich:





Obr. 13-14 - Vykreslené některé z podobných tvarů vzorku 1

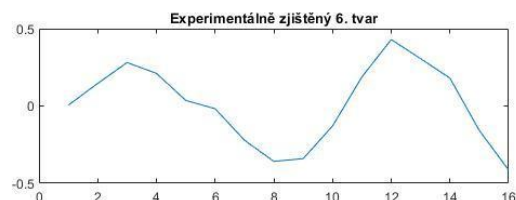
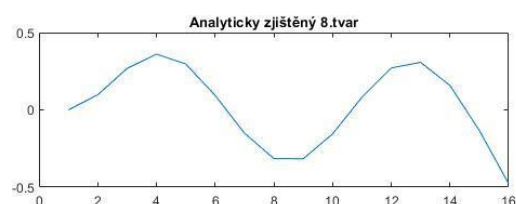
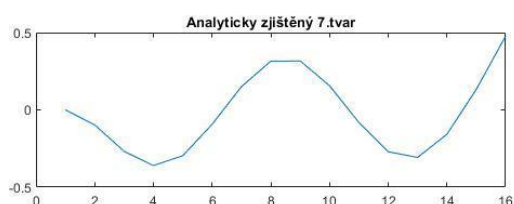
Je vidět, že grafické porovnávání tvarů je obtížné a je tedy nutné využívat k porovnávání matematických kritérií.

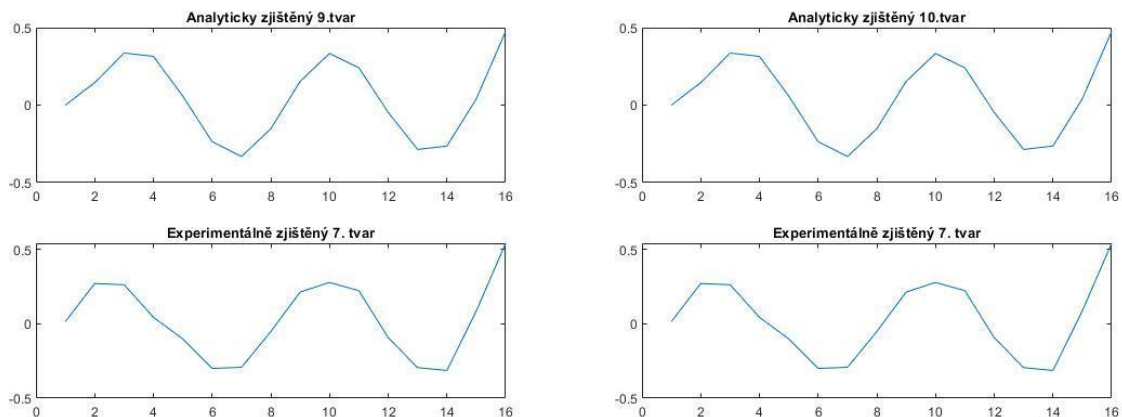
Po zbytek této práce je již u MKP modelů použit upravený modul pružnosti $E=215\text{GPa}$. Následující tabulka porovnává frekvence zjištěné za pomoci MKP a experimentálního modelu u podobných tvarů vzorku 2:

Vzorek 2			
podobné tvary		frekvence	
MKP	Experimentální	MKP	Experimentální
1	1	9.04	9.04
2	1	9.04	9.05
3	2	56.76	56.64
4	2	56.76	56.71
5	3	158.89	158.51
6	3	158.89	158.71
5	4	158.89	158.51
6	4	158.89	158.71
7	5	311.13	310.38
8	5	311.13	310.76
7	6	311.13	310.38
8	6	311.13	310.76
9	7	513.72	512.56
10	7	513.72	513.18
9	8	513.72	512.56
10	8	513.72	513.18
11	9	766.60	764.72
12	9	766.60	765.66

Tabulka 3 - Přehled podobných tvarů a porovnání jejich frekvencí pro vzorek 2

Kompletní vykreslení je obsaženo v příloze 2). Vykreslení některých z podobných tvarů pro vzorek 2 je vidět na následujících obrázcích:

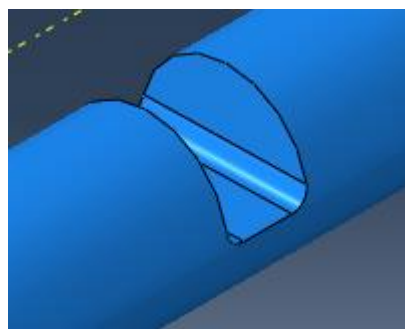




Obr. 15-16 - Některé z podobných tvarů vzorku 2

3.9. Poškození vzorků

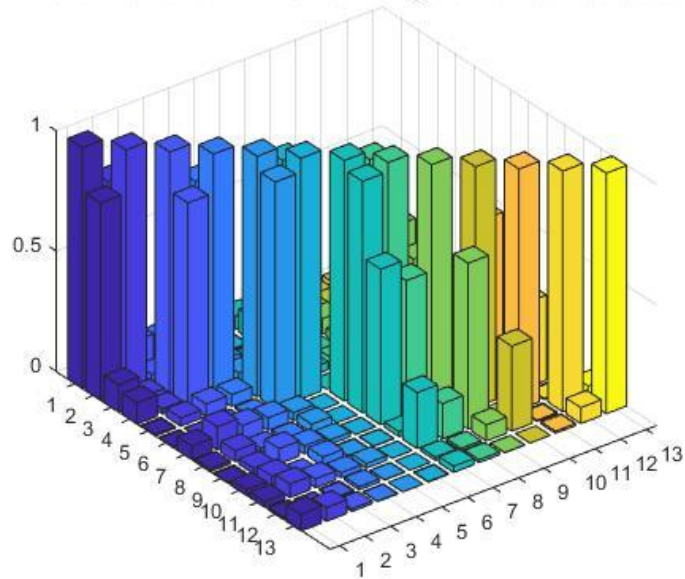
Vzorky byly poškozeny vytvořením vrubu do všech třech vzorků ve vzdálenosti $l=50$ mm. Vrub byl vyfrézován s výškou 3 mm. Hloubka vrubu je v každém vzorku do poloviny průměru tyče (vzorek 1 - průměr 10 mm, hloubka vrubu 5 mm, vzorek 2 - průměr 8 mm, hloubka vrubu 4 mm, vzorek 3 - průměr 6 mm, hloubka vrubu 3 mm). Zaoblení vrubu má poloměr 0,5 mm. Vruby stejných parametrů byly vytvořeny i v MKP modelu. Vzhled vrubu znázorňuje následující obrázek:



Obr.17 - Vrub

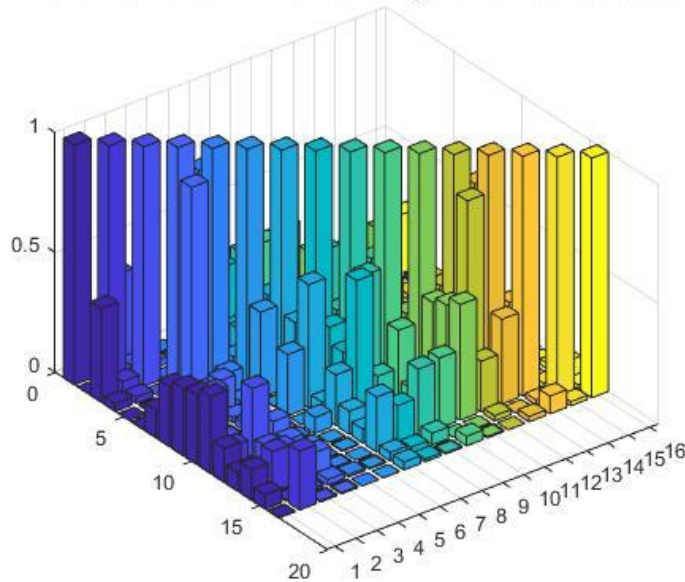
I výsledné modální výchylky vzorků s vruby byly porovnány za pomoci MAC kritéria se sebou samými, což je znázorněno u všech třech vzorků na následujících obrázcích:

Vzorek 1 s vrubem- MAC kriterium-porovnani sam se sebou



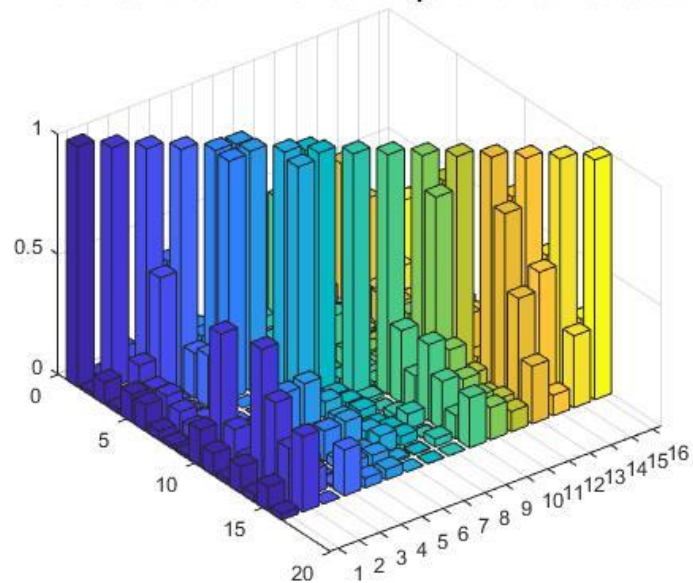
Obr. 18 - Porovnání experimentálně zjištěných tvarů u vzorku 1 s vrubem se sebou samými

Vzorek 2 s vrubem- MAC kriterium-porovnani sam se sebou



Obr. 19 - Porovnání experimentálně zjištěných tvarů u vzorku 2 s vrubem se sebou samými

Vzorek 3 s vrubem - MAC kriterium-porovnani sam se sebou



Obr. 20 - Porovnání experimentálně zjištěných tvarů u vzorku 3 s vrubem se sebou samými

3.9.1. Hodnoty koherence při experimentu poškozených vzorků

Hodnoty koherence byly zjištěny i pro experiment poškozených vzorků. Pro každé měření je zaznamenáno 12800 koherenčních hodnot pro každý z 16 bodů. Průměr hodnot koherencí je zaznamenán v následující tabulce:

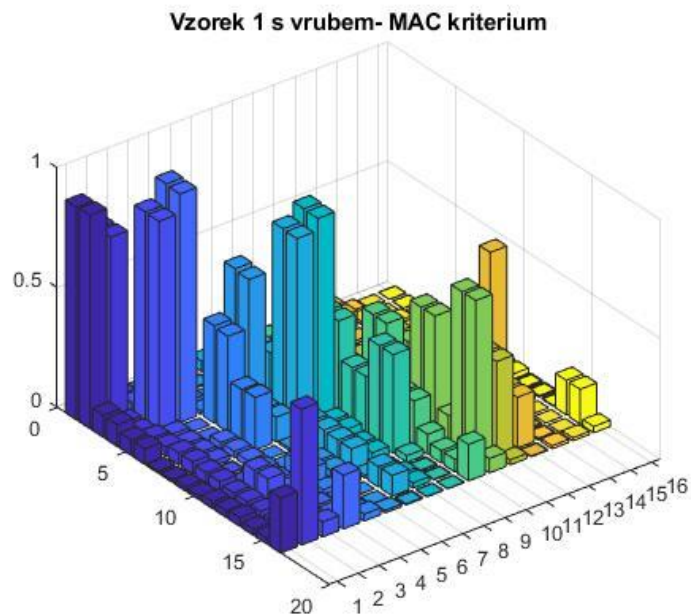
bod	vzorek 1	vzorek 1 (2)	vzorek 2	vzorek 3
1	0.871	0.600	0.522	0.780
2	0.951	0.796	0.809	0.907
3	0.938	0.917	0.769	0.932
4	0.935	0.882	0.849	0.864
5	0.912	0.882	0.862	0.910
6	0.858	0.823	0.870	0.890
7	0.933	0.807	0.862	0.916
8	0.906	0.924	0.922	0.916
9	0.934	0.938	0.887	0.574
10	0.945	0.937	0.911	0.922
11	0.942	0.702	0.932	0.900
12	0.921	0.815	0.900	0.861
13	0.942	0.774	0.906	0.915
14	0.886	0.864	0.901	0.956
15	0.848	0.898	0.877	0.909
16	0.959	0.945	0.967	0.884

Tabulka 4 - hodnoty koherencí při experimentu - poškozené vzorky 1, 2 a 3

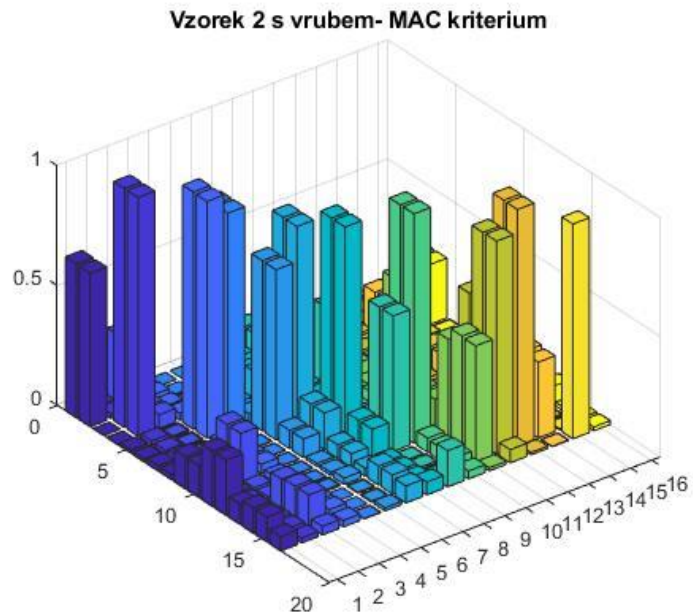
Opakované měření vzorku 1 bude vysvětleno posléze. U většiny bodů se dá mluvit o uspokojivé koherenci. V některých bodech však byla koherence při měření hraniční, což může být jednou z nepřesností měření.

3.9.2. Validace MKP modelů s experimentálními (poškozených)

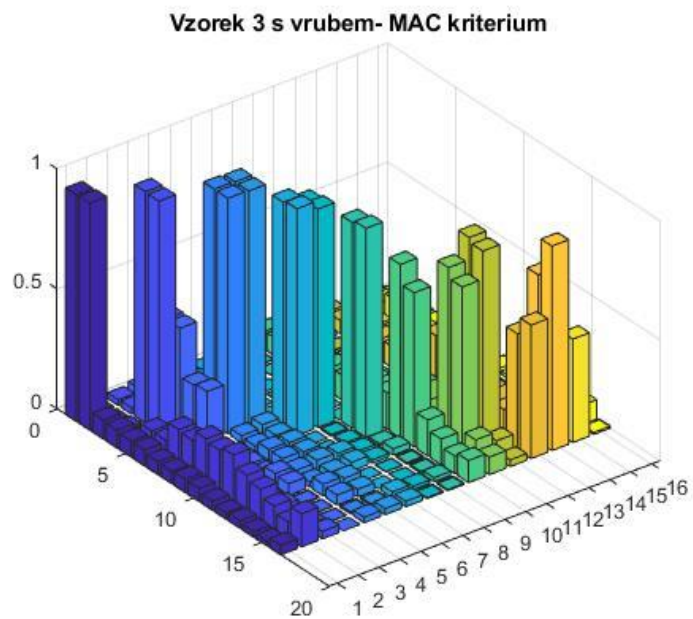
Výsledky tvarů experimentálně změřených modálních výchylek vzorků s vrubem byly dále porovnány s modálními výchylkami zjištěnými pomocí MKP modelu, což je znázorněno pro všechny tři vzorky v následujících grafech:



Obr. 21 - Srovnání experimentálních a MKP hodnot u vzorku 1 s vrubem



Obr. 22 - Srovnání experimentálních a MKP hodnot u vzorku 2 s vrubem



Obr. 23 - Srovnání experimentálních a MKP hodnot u vzorku 3 s vrubem

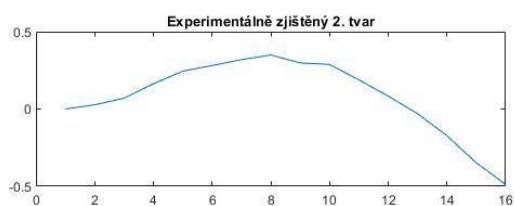
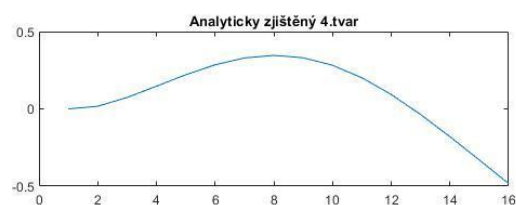
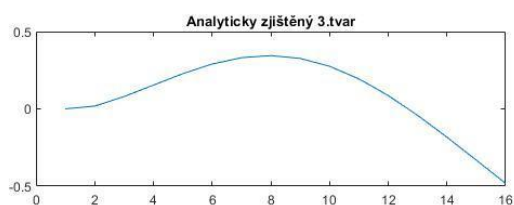
Vzhledem k neplánovanému porušení vzorku 1, který je rozebrán v následující kapitole, byl přehled podobných tvarů se srovnáním frekvencí zhotoven pro vzorky 2 a 3.

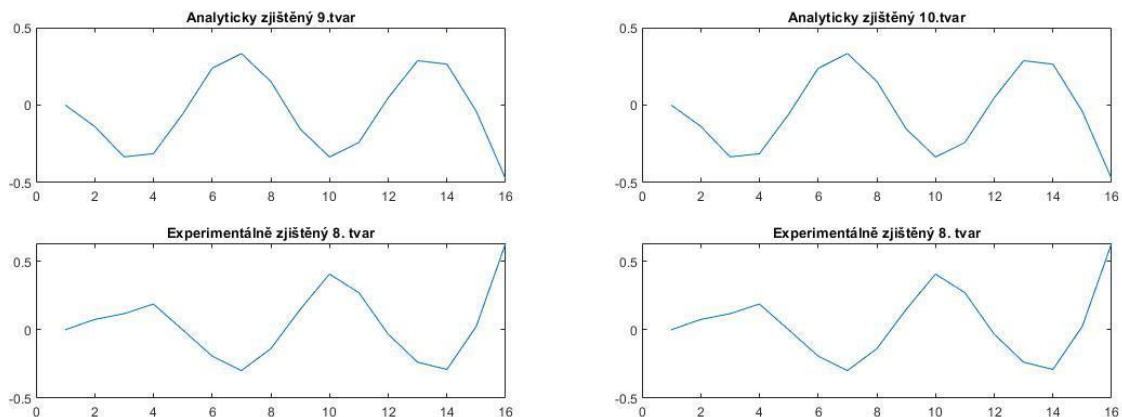
Porovnání frekvencí vzorku 2 zaznamenává následující tabulka:

2.vzorek			
podobné tvary		frekvence	
MKP	experimentální	MKP	experimentální
3	2	54.43	54.51
4	2	56.02	54.51
5	4	155.24	155.77
6	4	157.38	155.77
5	5	155.24	157.99
6	5	157.38	157.99
7	7	307.48	310.34
8	7	308.95	310.34
9	8	510.57	512.14
10	8	510.89	512.14
11	10	762.38	764.36
12	10	762.50	764.36
14	12	1059.81	1062.90
15	12	1063.00	1062.90

Tabulka 5 - Přehled podobných tvarů a porovnání jejich frekvencí pro vzorek 2 (poškozený)

Vykreslení tvarů z tabulky 5 je obsaženo v příloze 3), některé z nich na následujících obrázcích:





Obr. 24-25 - Vykreslené podobné tvary – vzorek 2 (poškozený)

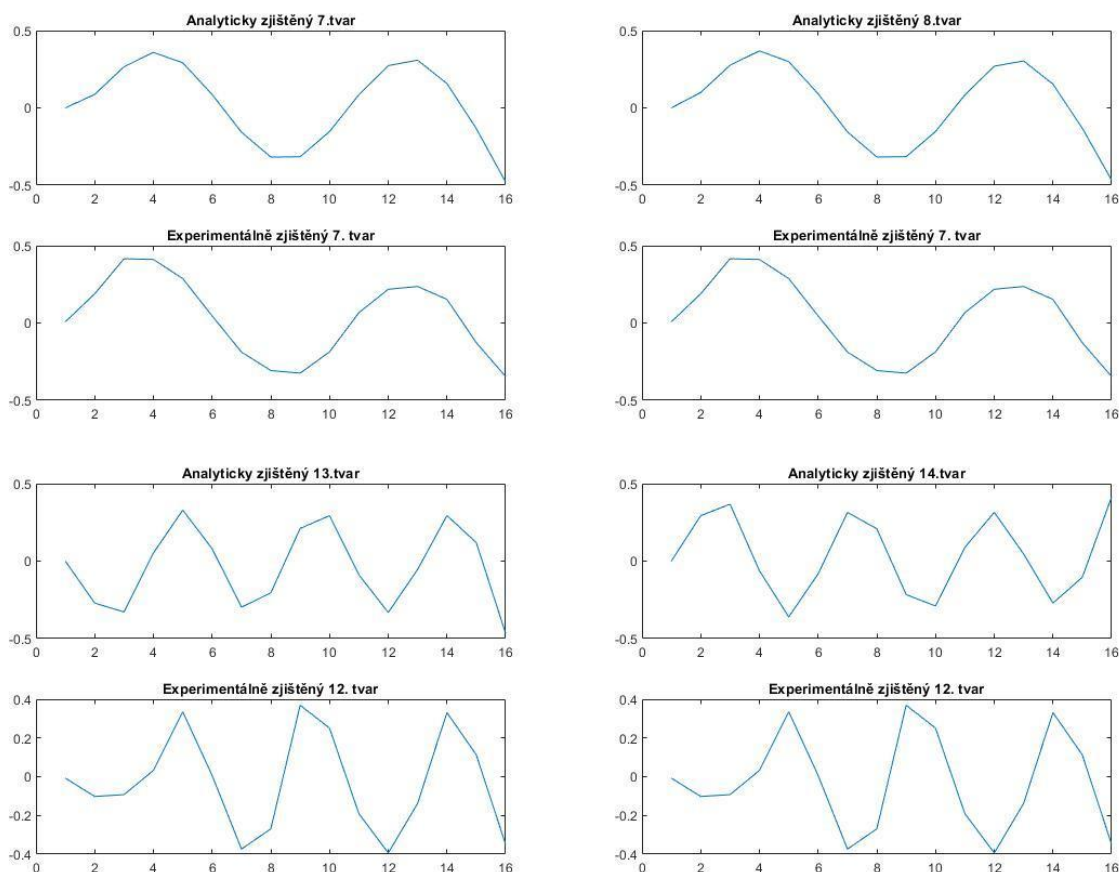
Vlastní frekvence nalezených podobných tvarů u vzorku 3 jsou zaznamenány v následující tabulce:

3.vzorek			
podobné tvary		frekvence	
MKP	experiment	MKP	experiment
1	1	6.36	6.24
2	1	6.68	6.24
3	3	41.02	41.13
4	3	42.07	41.13
5	5	116.72	117.07
6	5	118.15	117.07
5	6	116.72	118.43
6	6	118.15	118.43
7	7	230.94	231.50
8	7	231.93	231.50
7	8	230.94	232.57
8	8	231.93	232.57
9	9	383.41	384.07
10	9	383.63	384.07
13	12	797.20	802.13
14	12	799.23	802.13

Tabulka 6 - Přehled podobných tvarů a porovnání jejich frekvencí pro vzorek 3 (poškozený)

Shoda vlastních frekvencí získaných pomocí experimentu i Abaqusu je i v případě poškozených vzorků velmi dobrá.

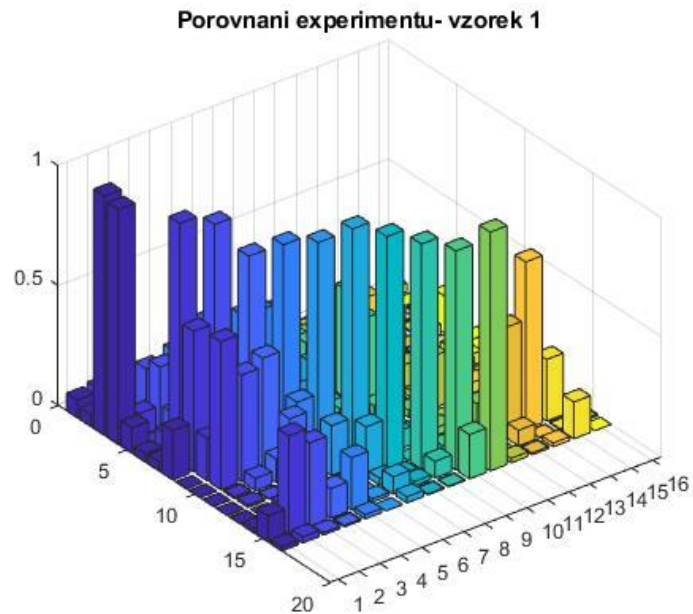
Tvary z tabulky 6 jsou vykresleny v příloze 4), některé z nich jsou na následujících obrázcích:



Obr. 26-27 - Podobné tvary vzorek 3 (poškozený)

3.9.3. Neplánované porušení vzorku 1

Podobnost MKP a experimentálních hodnot u vzorku 1 je nedostatečná. Přitom MKP hodnoty jsou podobné s hodnotami patřícími ke vzorkům jiných průměrů a chyba měření byla vyloučena díky opakovanému měření. Celý proces měření vzorku 1 s vrubem byl kompletně rekonstruován. Hodnoty zjištěné opakovaným měřením byly porovnány s hodnotami původního měření. To je zaznamenáno na následujícím grafu:



Obr. 28 - Porovnání hodnot dvou experimentů

Je zřejmé, že i přes kompletní rekonstrukci měření jsou nově naměřená data velmi podobná původním. Nízká hodnota shody na diagonální pozici mezi prvky vyjadřující vysokou hodnotu shody znamená, že byl z programu MEscape vyexportován šum, který ve skutečnosti není vlastním tvarem. To je také důvod, proč hodnoty shody často nejsou diagonálami matic, ale shoda začíná na jiném prvku, než na předpokládané pozici 1,1.

Nízká shoda výsledků z MKP a experimentálního modelu pravděpodobně poukazuje na poškození vzorku v průběhu zhotovování vrubu. Vzorek by bylo vhodné podrobit defektoskopii. Vzorek byl prohlédnut pouhým okem a jediná odhalená vada vzorku je v místě vetknutí tyče:

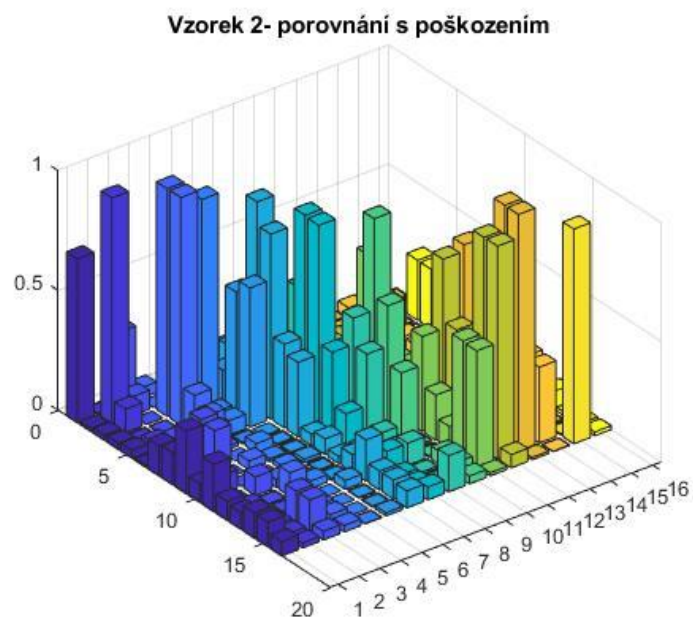


Obr. 29 - Poškození vzorku 1

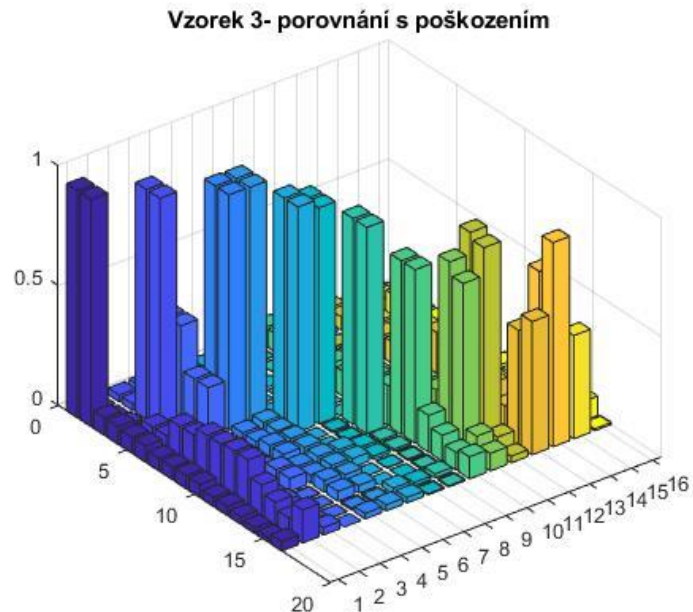
Toto poškození však nemusí být příčinou změny vlastních tvarů vzorku. Dále byly vzorky oťukávány a zkoumán jejich zvuk. Zvuk vzorku 1 je na svém začátku „nakřáplý“, což může též ukazovat na přítomnost poškození. Vzorek byl tedy z dalšího hodnocení vyloučen.

3.10. Porovnání poškození

Experimentálně zjištěné modální výchylky vzorků bez vrubů a s vruby byly porovnány mezi sebou u vzorku 2 a u vzorku 3 byly porovnány modální výchylky nepoškozeného MKP modelu s výchylkami poškozeného experimentálního modelu. To je zaznamenáno na následujících obrázcích:



Obr. 30 - Porovnání poškozených modálních výchylek s nepoškozenými - vzorek 2



Obr.31 - Porovnání poškozených modálních výchylek s nepoškozenými - vzorek 3

3.11. Analýza vlivu velikosti vrubu na modální vlastnosti

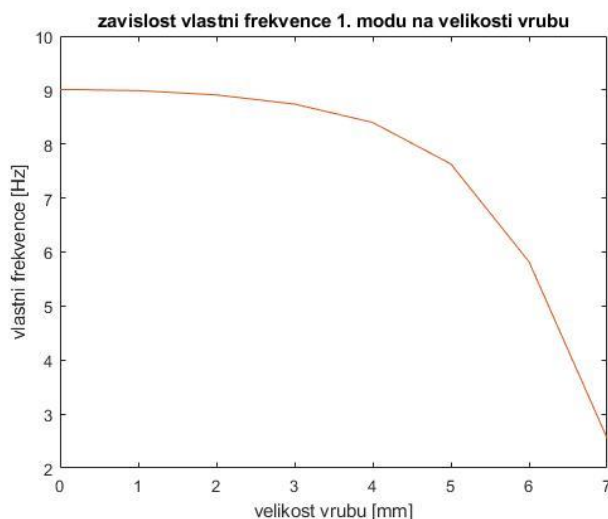
V rámci této kapitoly byl v Abaqusu vymodelován vzorek 2, tedy vetknutá tyč o průměru 8 mm a délce 795 mm. Na tyči byl vytvořen ve vzdálenosti 50mm vrub o výšce 3 mm. U vrubu byla měněna tloušťka a pozorovány změny vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitu.

Následující tabulka obsahuje prvních 20 vlastních frekvencí [Hz] při různých velikostech vrubu v prvních dvaceti módech. Z tabulky je zřejmé, že se frekvence se zvětšováním vrubu mění jen velmi málo a bude nutné použít kritéria k porovnání tvarů kmitu:

mód \ vrub[mm]	0	0.2	0.5	1	2	3	4	5	6	7
1	9.01	9.01	9.00	8.99	8.91	8.74	8.40	7.63	5.82	2.55
2	9.01	9.01	9.01	9.01	9.00	8.96	8.89	8.72	8.30	6.76
3	56.46	56.45	56.43	56.37	56.09	55.53	54.43	52.35	48.87	45.71
4	56.46	56.46	56.46	56.45	56.41	56.28	56.02	55.46	54.13	50.41
5	158.01	158.00	157.96	157.87	157.48	156.70	155.24	152.68	148.89	145.85
6	158.01	158.00	158.00	157.99	157.93	157.75	157.38	156.60	154.80	150.11
7	309.38	309.38	309.35	309.29	309.02	308.48	307.48	305.73	303.20	301.03
8	309.39	309.38	309.38	309.38	309.34	309.22	308.95	308.38	307.00	301.94
9	510.91	510.90	510.90	510.90	510.88	510.78	510.57	510.15	509.39	480.33
10	510.91	510.91	510.91	510.92	510.95	510.95	510.89	510.70	509.90	508.14
11	762.24	762.24	762.25	762.29	762.36	762.40	762.38	762.21	760.31	540.48
12	762.25	762.25	762.26	762.29	762.39	762.47	762.50	762.32	761.63	759.33
13	992.25	992.14	991.93	991.38	989.02	984.04	973.44	947.42	861.23	766.00
14	1063.03	1063.03	1063.02	1062.97	1062.66	1061.80	1059.80	1054.94	1039.89	983.78
15	1063.05	1063.04	1063.07	1063.14	1063.27	1063.28	1062.99	1062.11	1059.59	1052.43
16	1412.85	1412.83	1412.73	1412.43	1410.93	1407.13	1396.81	1356.24	1228.98	1113.06
17	1412.87	1412.85	1412.92	1413.03	1413.14	1412.79	1411.48	1408.09	1398.67	1371.07
18	1600.28	1600.23	1600.03	1599.36	1595.30	1582.76	1548.40	1483.25	1440.77	1420.08
19	1811.21	1811.14	1810.90	1810.17	1806.84	1800.31	1790.88	1783.09	1780.43	1728.09
20	1811.23	1811.22	1811.31	1811.47	1811.49	1810.47	1807.41	1799.98	1781.19	1776.52

Tabulka 7 - Vlastní frekvence při různých velikostech vrubu

Pro první mód byla vykreslena závislost vlastní frekvence na velikosti vrubu. Z následujícího grafu je zřejmé, že se jedná o exponenciální závislost, při malých velikostech vrubu je tedy změna nezaznamatelná a zjišťování poškození na základě změny vlastních frekvencí není vhodnou metodou.



Obr. 32 - Závislost vlastní frekvence na velikosti vrubu prvního módu

Podle dat z tabulky 7 je zřejmé, že vlastní frekvence soustavy se při porušení nemění dostatečně pro pozorování. Vlastní frekvence se změní v dostatečné míře až při naprosto hraničním poškození.

Je tedy na místě vyhodnotit změny vlastních tvarů a použít modální kritéria, která různými způsoby ukazují míru shody nebo naopak míru rozdílností mezi jednotlivými tvary kmitu.

Rozdíly ve vlastních tvarech kmitu jsou vyhodnoceny za pomoci vybraných kritérií, navíc byly zavedeny a otestovány normy těchto kritérií pro souhrnné vyjádření míry změny vlastních tvarů vlivem porušení. Vybrána byla kritéria MAC, MSDI a SDI. Tato kritéria byla počítána podle vzorců 2.14.1, 2.14.2 a 2.14.6. V případě MAC byla norma spočítána jako suma absolutních hodnot rozdílu kritéria nepoškozeného vzorku a vzorku s příslušným poškozením:

$$n_i(MAC) = \sum |MAC_{00} - MAC_{0i}|, \quad (3.11.1)$$

kde i je příslušná velikost vrubu.

Obdobně byla spočítána i norma za pomoci MSDI.

Tyto hodnoty, vyjadřující míru poškození (MAC, MSDI) či míru shody (SDI) prutu s vrubem na základě MKP modelu, byly zaznamenány do následující tabulky:

vrub [mm]	n(MAC)	n(MSDI)	SDI
0	0	0.00	1.000000
0.2	0.646	203.70	1.000000
0.5	0.879	313.69	0.999999
1	0.718	297.99	0.999989
2	0.911	432.36	0.999809
3	0.886	1677.71	0.998561
4	1.343	2001.67	0.990166
5	2.295	1707.83	0.906134
6	5.067	3227.59	0.549655
7	14.559	1364.23	0.187138

Tabulka 8 - Normy hodnotící velikost poškození

Tabulka 8 tedy ukazuje, že zvolená $n(\text{MAC})$ a $n(\text{MSDI})$ jsou na vytvořený vrub dostatečně citlivá, na rozdíl od pouhého hodnocení vlastní frekvence. Ani jedno z kritérií se nechová lineárně, jediné SDI vykazuje vlastnost úměrnosti, má však nejmenší citlivost.

3.12. Změna vlastních frekvencí při poškození u měřených vzorků

U vzorku 2 byly srovnány frekvence stejných módů, tyto data byla zaznamenána do následující tabulky (v tabulce jsou zahrnuty pouze vlastní frekvence těch módů, které byly validovány):

	bez vrubu	s vrubem
1	56.64	54.51
2	158.51	155.77
3	158.71	157.99
4	310.38	310.34
5	512.56	512.14
6	764.72	764.36

Tabulka 9 - Srovnání frekvencí nepoškozeného a poškozeného vzorku 2

Je zřejmé, že ani experimentální cestou diagnostika poškození pomocí porovnání vlastních frekvencí nezafunguje - vlastní frekvence se s poškozením změní jen velmi málo. Naopak některé z norem pro souhrnné vyjádření rozdílností vlastních tvarů kmitu zkoušené na MKP modelu v předchozí podkapitole se zdají být citlivé a v následující kapitole tedy budou využity i pro experimentálně zjištěné vlastní tvary kmitu.

3.13. Stanovení velikosti normy poškození pro měřené vzorky

Stejným způsobem jako v kapitole 3.11 byly zpracovány rozdíly vlastních výchylek získaných experimentální cestou. Jak již bylo zmíněno, vrub každého vzorku sahá do poloviny jeho průměru. Následující tabulka obsahuje normy poškození vzorků s vrubem:

	$n(\text{MAC})$	$n(\text{MSDI})$	SDI
2.vzorek	32.733	606.28	0.843970
3.vzorek	31.110	1064.35	0.995261

Tabulka 10 - Normy poškození vzorků

Tabulka neslouží pro porovnávání norem v rámci jiných vzorků, protože každý vzorek má jiný průměr i jiný vrub. Je zřejmé, že normy získané pomocí MSDI a SDI z experimentu jsou řádově stejné jako stejné normy z MKP porovnávání. Všechny použité vzorky vykazují vlastnost poškození, rozsah poškození však pouze orientačně. U normy získané pomocí MAC kritéria je experimentálně zjištěná norma o řád vyšší, protože rozdíly MAC matic jsou v experimentálním měření vyšší.

4. Diskuze

Hlavním cílem této práce bylo ukázat, že poškození konstrukce se projeví na jejich modálních vlastnostech. Tyto změny jsou změřitelné a vypočitatelné.

Změna vlastních frekvencí však není dostatečným ukazatelem, vlastní tvary kmitu jsou naopak schopny ukázat poškození velice citlivě.

Měření vlastních tvarů kmitu soustavy se tedy dá použít k diagnostice. K takové diagnostice by bylo nutné co nejvíce vymýtit příčiny nepřesností měření, jako jsou například nižší koherence, nepřesně splněné okrajové podmínky (či změny provozních podmínek při měření za chodu) či nepřesnosti způsobené lidským počínáním.

K přesnějšímu mapování poškození je vhodné sledovat co největší počet vlastních tvarů, protože tvary vyšších módů se mění při poškození více - tyto tvary jsou však zřejmě také náchylnější na nepřesnosti měření. S tímto tématem také souvisí volba počtu bodů na konstrukci, obecně bude platit, že pro zjišťování modálních vlastností ve více módech bude také zapotřebí, aby síť snímaných bodů byla hustší.

Vytvoření jednočíselného kritéria na základě podobnosti tvarů má velkou nevýhodu ve své nelinearitě. To vyplývá ze skutečnosti, že při poškození a tedy ztrátě podobnosti příslušných módů, začínají podobnost nabývat zase módy jiné. Stálo by za zvážení vytvoření kritéria, které by mapovalo čistě ty kombinace módů, které by za předpokladu nepoškozené součásti skutečně podobné být měly. Použitá kritéria však řádově odpovídají a skutečně odkazují na poškození součásti.

Mezi nepřesnosti vzniklé v rámci experimentální části této práce může patřit: způsob připevnění nosníku k zemi či náhodné kmitání, projevující se jako šum. Proces, který naopak svou bezkontaktností měření neovlivňoval bylo snímání naměřených veličin pomocí laserového vibrometru.

Ani hodnoty získané pomocí MKP modelu nejsou hodnotami přesnými. Nejedná se o analyticky zjištěné hodnoty, nýbrž o hodnoty získané pomocí numerických metod, opírající se o zkušenosti i názory výpočtáře.

5. Závěr

Cílem práce bylo seznámit se s prostředky a metodami EMA, modelováním MKP a nejčastějšími druhy porušení konstrukce. Téma EMA, MKP a poškození konstrukcí byla otevřena v rámci teoretické části této práce a v rámci praktické části byla EMA i MKP modelování uskutečněno.

Další cíl, provedení rešerše pro porovnání modálních vlastností, je obsažen v teoretické části.

V rámci praktické části byla vytvořen parametrický MKP model jednoduchých nosníků, do kterých bylo uskutečněno poškození formou vrubu, což byl další bod zadání této práce.

Hlavním cílem této práce bylo tyto modely validovat pomocí EMA a zjišťovány možnosti zjištění poškození pomocí měření vlastních tvarů kmitu, což bylo pro vetknuté pruty prokázáno na MKP modelu i experimentálně.

V rámci práce bylo na MKP modelu zjištěno, že při zvětšující se velikosti poškození se vlastní frekvence mění exponenciálně. Pomocí porovnání vlastních frekvencí je zjištěné jen extrémně rozsáhlé poškození (například vrub o velikosti 7 mm v prutu o průměru 8 mm). Pro reálné zjišťování poškození je tedy metoda nevhodná a je třeba hodnotit změny vlastních tvarů kmitu způsobené poškozením. Byla tedy použita vybraná modální kritéria a byly zavedeny a otestovány normy těchto kritérií pro vyjádření změny vlastních tvarů kmitu souhrnně. U norem kritérií MAC a MSDI bylo na MKP modelu zjištěno, že reagují na poškození citlivě, což se prokázalo i pomocí experimentu. Pro

diagnostiku poškození se tedy ukázalo vhodnější zkoumání vlastních tvarů kmitu, používání modálních kritérií a jejich norem, nad porovnáváním vlastních frekvencí.

Jako vzorky byly zvoleny jednoduché vetknuté pruty z důvodu, že bylo díky tomu možno vyloučit mnoho dalších vlivů, pro navazující práce by však bylo vhodné ověřit závěry i pro komplexnější konstrukce, kompozitní sktruktury a jiné druhy poškození.

Seznam použité literatury

- [1] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [2] Efektivní strategie pro řízení údržby. *QMprofi* [online]. Verlag Dashöfer, 8.6.2015 [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: https://www.qmprofi.cz/33/efektivni-strategie-pro-rizeni-udrzby-pokracovani-uniqueidgOkE4NvrWuOKaQDKuox_Z04jFCEJCpUgdqzthjjZzY/.
- [3] Ultrazvuková diagnostika. *Masarykova univerzita, Lékařská fakulta* [online], 2013,2013 [cit.2022-06-29]. Dostupné z: <https://www.med.muni.cz/biofyz/zobrazovacimetody/files/Ultrazvuk.pdf>.
- [4] RŮŽIČKA, Milan, Josef JURENKA a Zbyněk HRUBÝ. *Dynamická pevnost a životnost: Přednášky - základy* [online], [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: <http://mechanika.fs.cvut.cz/>. Fakulta Strojní, ČVUT.
- [5] Dow, S. Understanding the Basic Theory Behind Vibration Analysis [online], [cit 2022-06-30]. Dostupný z <http://www.vibrationschool.com/mans/Indexa.htm>.
- [6] SOBOTKA, Petr. Pokročilá modální analýza. In: *FS ČVUT* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/pdf13/2608.pdf>
- [7] Glossary of Basic Terms Relating to FFT Analysis. *ONO SOKKI* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: https://www.onosokki.co.jp/English/hp_e/c_support/tech_term/tech_term2.htm
- [8] BRAUN, Simon, D. J. EWINS a Singiresu S. RAO. *Encyclopedia of vibration*. San Diego: Academic Press, c2002. ISBN 978-0-12-227085-7.
- [9] Getting Started with Modal Curvefitting. *SIEMENS* [online]. 21.9.2020 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/article/getting-started-with-modal-curvefitting>
- [10] VÍTOVEC, Bohumil. 4. díl - Spektrální analýza, Fourierova transformace. *Blue Panther academy* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.blue-panther.cz/4-dil-spektralni-analyza-fourierova-transformace>
- [11] Aliasing. *Scientific Volume Imaging* [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://svi.nl/AliasingArtifacts>

- [12] RUSSEL, Daniel A. *The Doppler Effect and Sonic Booms* [online]. 2014 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/doppler/doppler.html>. The Pennsylvania State University.
- [13] P. Avitabile, F. Pechinsky, THE COORDINATE ORTHOGONALITY CHECK (CORTHOG), *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 12, Issue 3, 1998, Pages 395-414, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1006/mssp.1998.0150>.
- [14] *Sdtools* [online]. 2019 [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: https://www.sdtools.com/help71/ii_mac.html#Options
- [15] RICHARDSON, Shawn, Jason TYLER, Patrick MCHARGUE a Mark RICHARDSON. A New Measure of Shape Difference. *Vibrant Technology* [online]. Scotts Valley, **2014**(3-6), [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <http://papers.vibetech.com/Paper58-ANewMeasureofShapeDifference.pdf>
- [16] Duvnjak, I.; Damjanović, D.; Bartolac, M.; Skender, A. Mode Shape-Based Damage Detection Method (MSDI): Experimental Validation. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 4589. <https://doi.org/10.3390/app11104589>
- [17] ŠPANIEL, Miroslav a Zdeněk HORÁK. *Úvod do metody konečných prvků*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04665-4.
- [18] NĚMEC, Jan. *Detekce poškození kompozitu pomocí laserového vibrometru*. 2017. Bakalářská práce. Fakulta Strojní, ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D.
- [19] Balmes, Etienne, (1997). GARTEUR Group on Ground Vibration Testing. Results from the Test of a Single Structure by 12 Laboratories in Europe.

Seznam obrázků

- Obr. 1 - Volba měřené veličiny zdroj [1]
- Obr.2 - Schéma dvoukanálové analýzy [1]
- Obr. 3 - Aliasing [12]
- Obr. 4 - Vzorek a jeho upevnění k zemi
- Obr. 5 - PSV- 400 od firmy Polytec (Skenovací hlava)
- Obr. 6 - Modální kladívko
- Obr.7 - nacházení módů v MEscape
- Obr. 8 - MEscape Contour map
- Obr. 9 - Experimentálně zjištěné tvary 1. vzorku ($d=10\text{mm}$) porovnané sami se sebou
- Obr. 10 - Experimentálně zjištěné tvary 2. vzorku ($d=8\text{mm}$) porovnané sami se sebou
- Obr. 11 - Porovnání analyticky a experimentálně zjištěných tvarů u vzorku 1 ($d=10\text{mm}$)
- Obr. 12 - Porovnání analyticky a experimentálně zjištěných tvarů u vzorku 2
- Obr. 13-14 - Vykreslené podobné tvary vzorku 1
- Obr. 15-16 - Vykreslené podobné tvary vzorku 2
- Obr. 17 - Vrub
- Obr. 18 - Porovnání experimentálně zjištěných tvarů u vzorku 1 s vrubem se sebou samými
- Obr. 19 - Porovnání experimentálně zjištěných tvarů u vzorku 2 s vrubem se sebou samými
- Obr. 20 - Porovnání experimentálně zjištěných tvarů u vzorku 3 s vrubem se sebou samými
- Obr. 21 - Srovnání experimentálně a analyticky zjištěných hodnot u vzorku 1 s vrubem
- Obr. 22 - Srovnání experimentálně a analyticky zjištěných hodnot u vzorku 2 s vrubem
- Obr. 23 - Srovnání experimentálně a analyticky zjištěných hodnot u vzorku 3 s vrubem
- Obr. 24-25 - Vykreslené podobné tvary – vzorek 2 (poškozený)
- Obr. 26-27 - Podobné tvary vzorek 3 (poškozený)
- Obr. 28 - Porovnání hodnot dvou experimentů
- Obr. 29 - Poškození vzorku 1

Obr. 30 - Porovnání poškozených modálních výchylek s nepoškozenými- vzorek 2

Obr.31 - Porovnání poškozených modálních výchylek s nepoškozenými- vzorek 3

Obr. 32 - Závislost vlastní frekvence na velikosti vrubu prvního módu

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Hodnoty koherencí při experimentu- nepoškozené vzorky 1 a 2

Tabulka 2 - Přehled podobných tvarů a porovnání jejich frekvencí pro vzorek 1

Tabulka 3 - Přehled podobných tvarů a porovnání jejich frekvencí pro vzorek

Tabulka 4 - hodnoty koherencí při experimentu- poškozené vzorky 1, 2 a 3

Tabulka 5 - Přehled podobných tvarů a porovnání jejich frekvencí pro vzorek 2

(poškozený)

Tabulka 6 - Přehled podobných tvarů a porovnání jejich frekvencí pro vzorek 3

(poškozený)

Tabulka 7 - Vlastní frekvence při různých velikostech vrubu

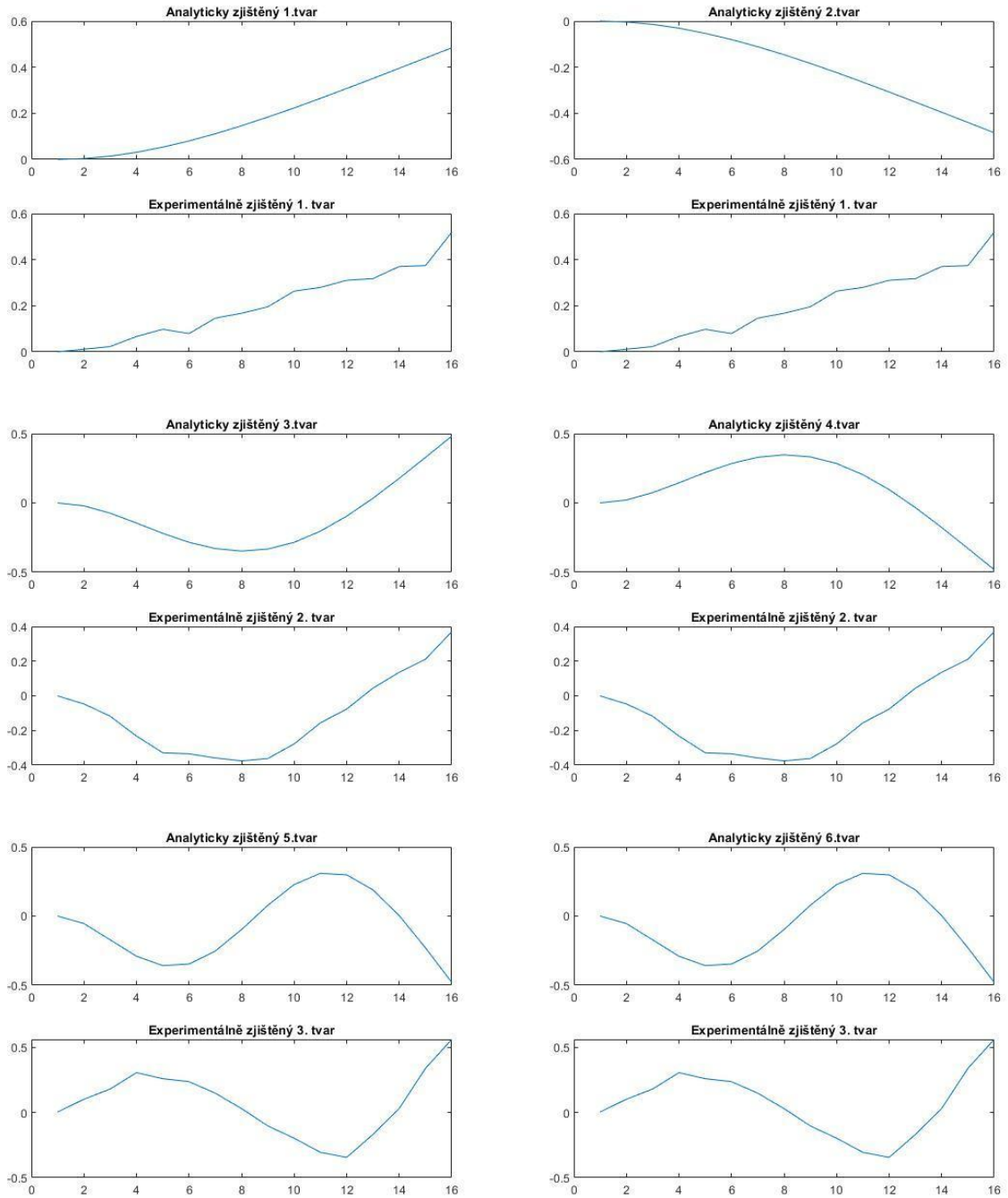
Tabulka 8 - Normy hodnotící velikost poškození

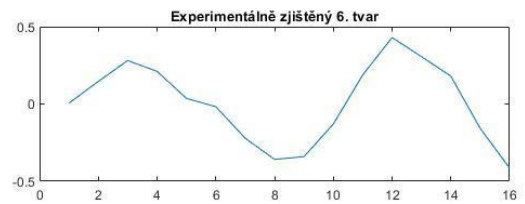
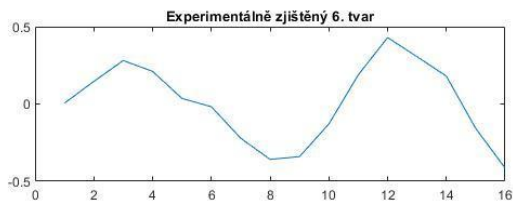
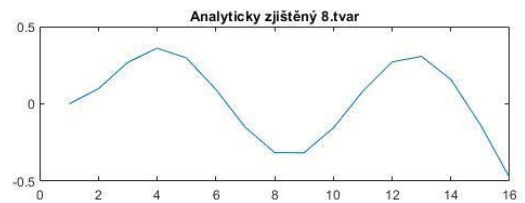
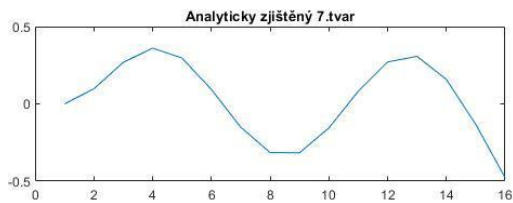
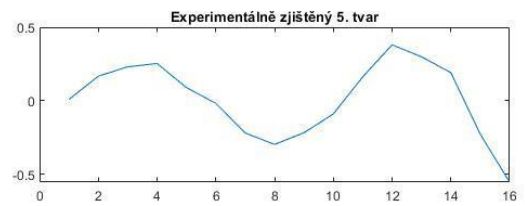
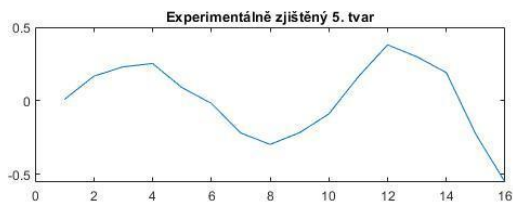
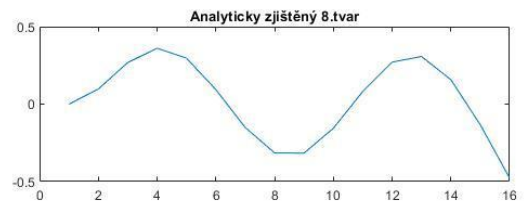
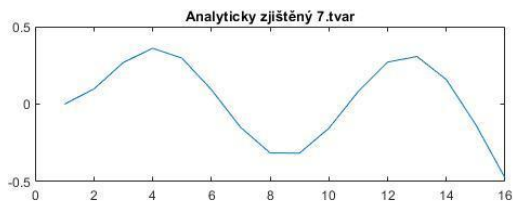
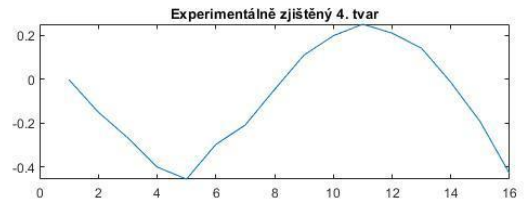
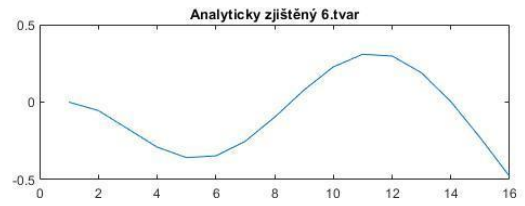
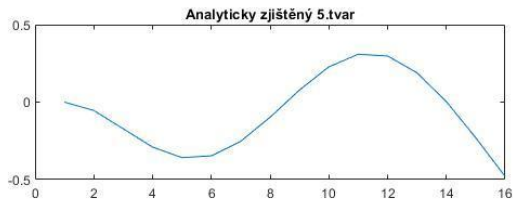
Tabulka 9 - Srovnání frekvencí nepoškozeného a poškozeného vzorku 2

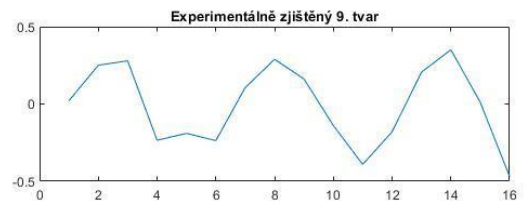
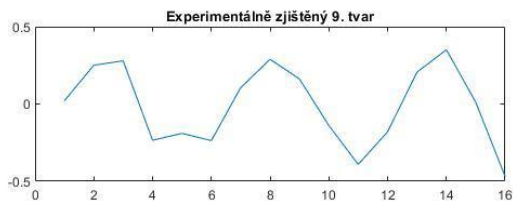
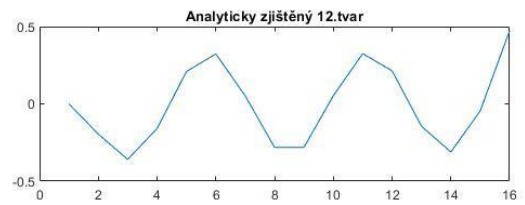
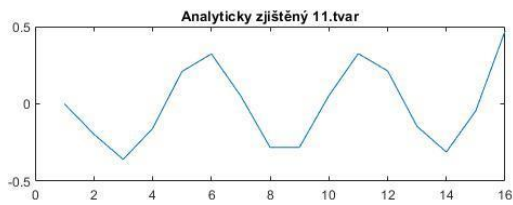
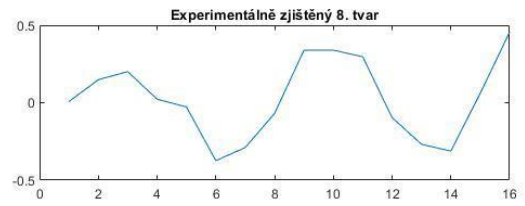
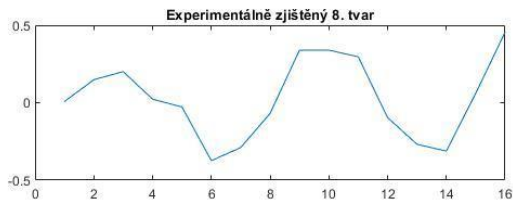
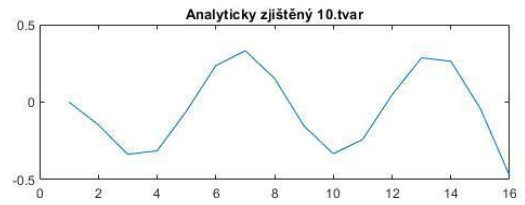
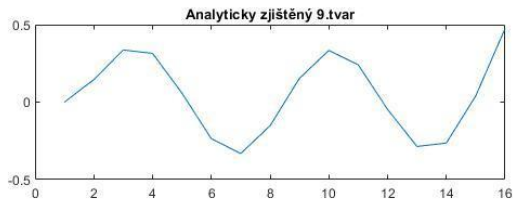
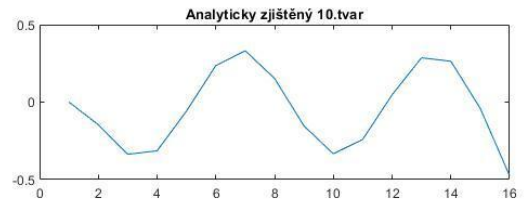
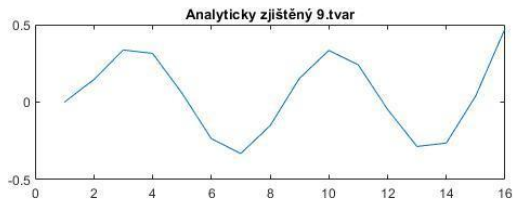
Tabulka 10 - Normy poškození vzorků

Přílohy

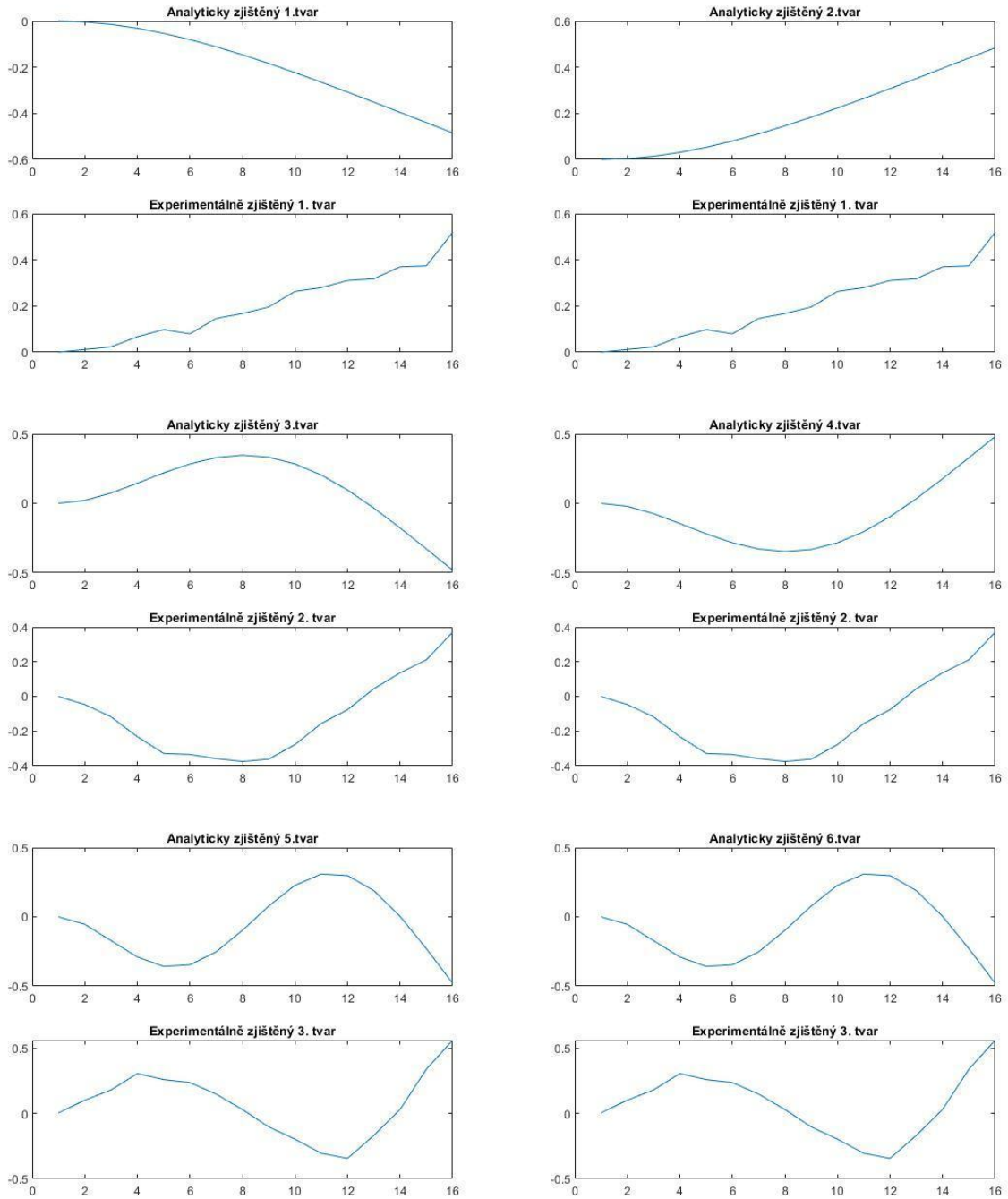
1) Vykreslené podobné tvary vzorku 1:

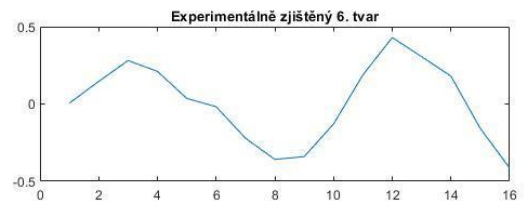
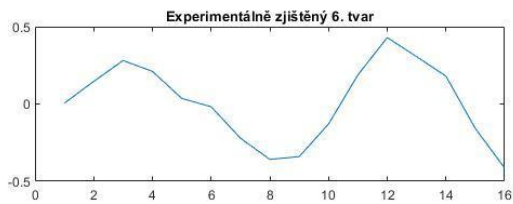
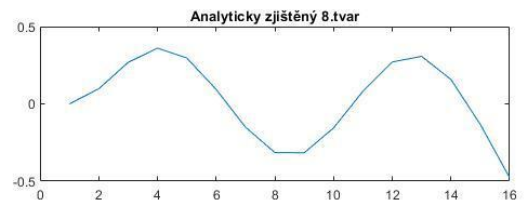
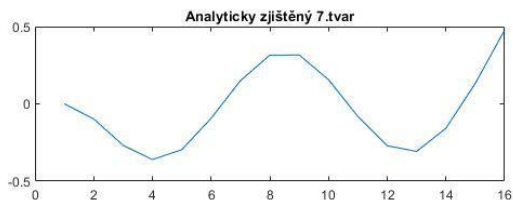
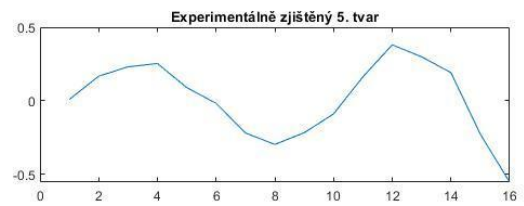
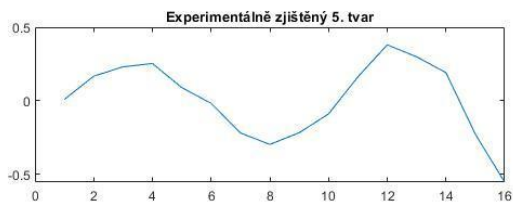
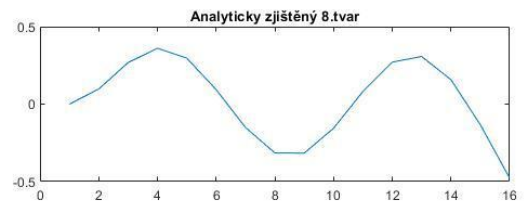
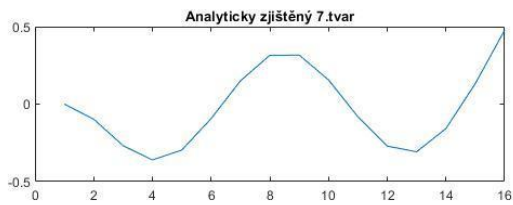
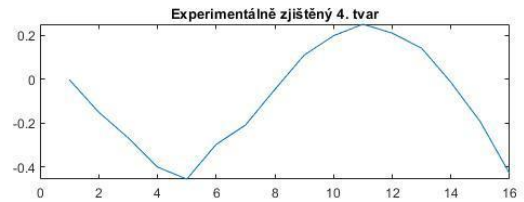
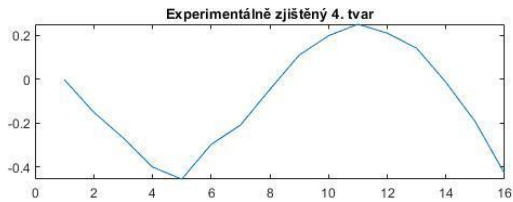
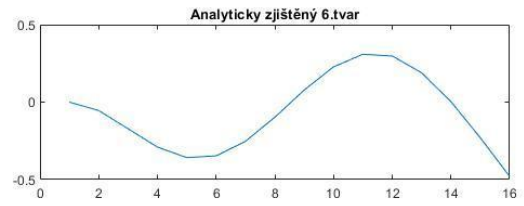
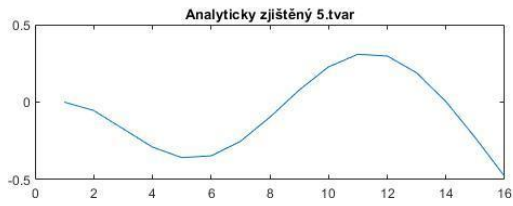


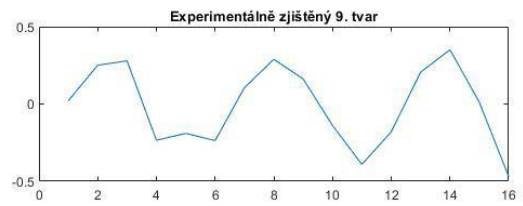
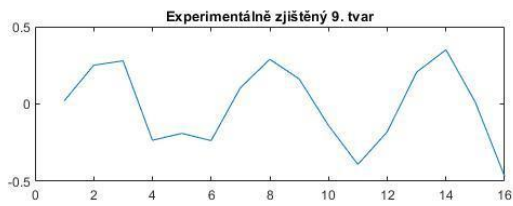
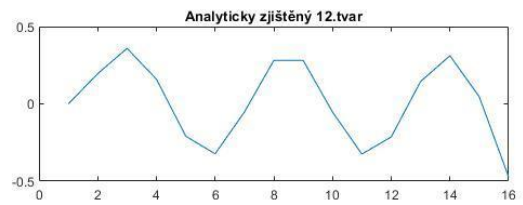
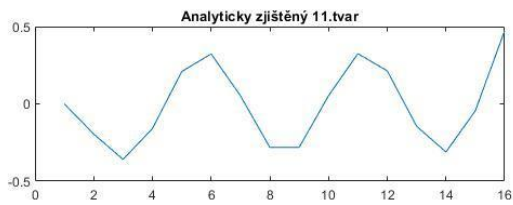
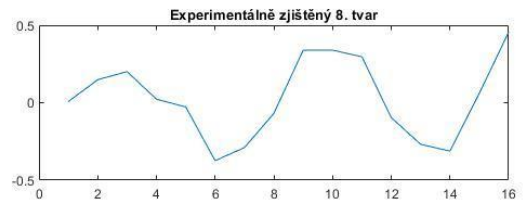
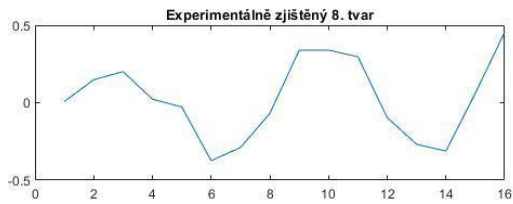
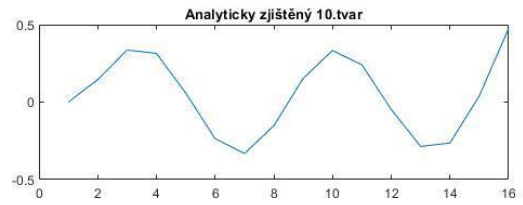
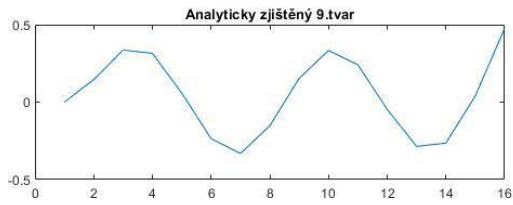
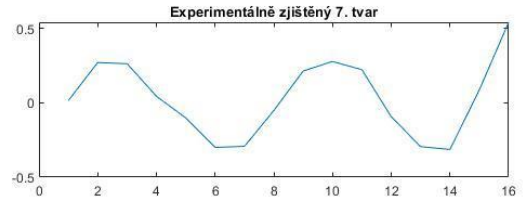
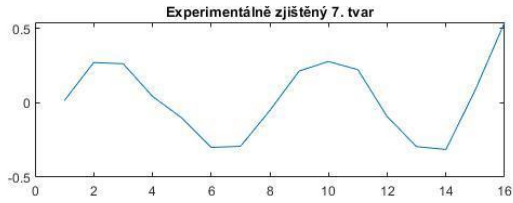
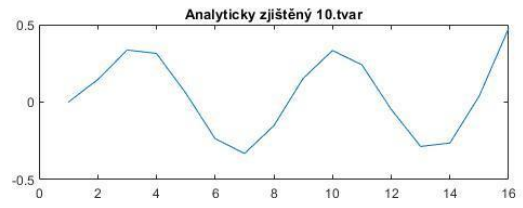
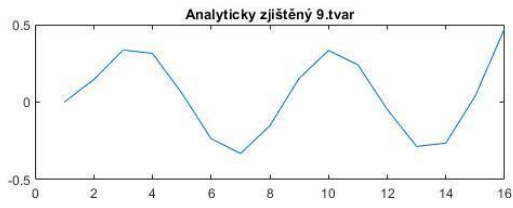




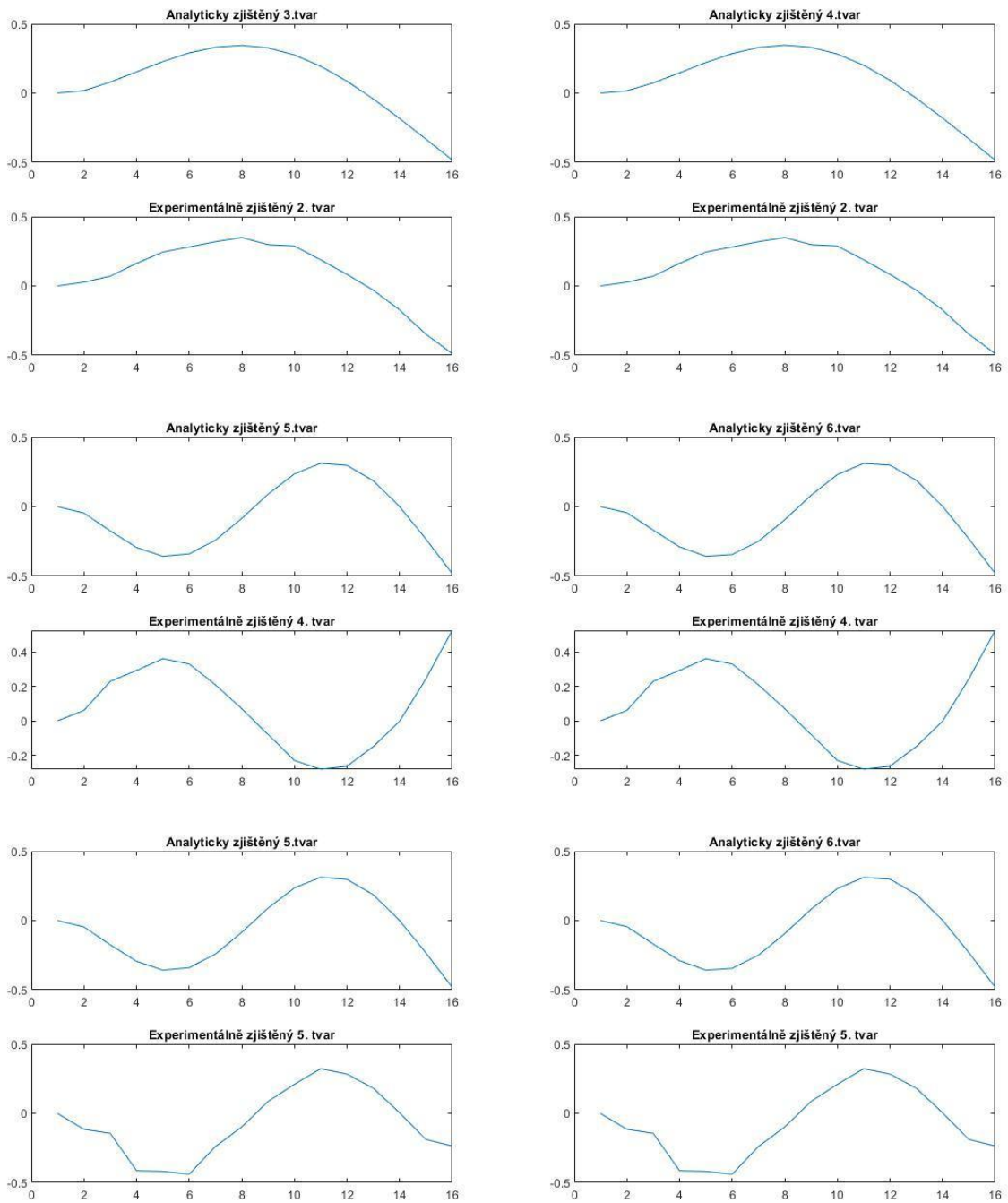
2) Vykreslené podobné tvary vzorku 2:

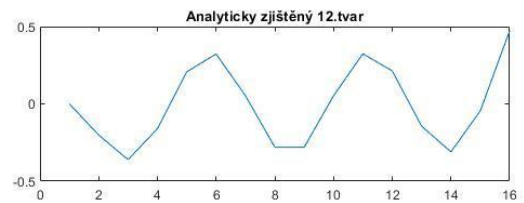
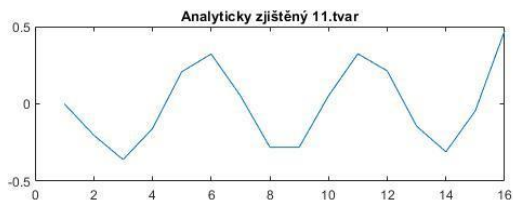
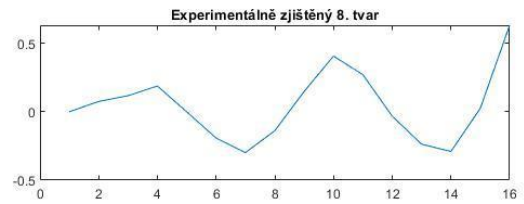
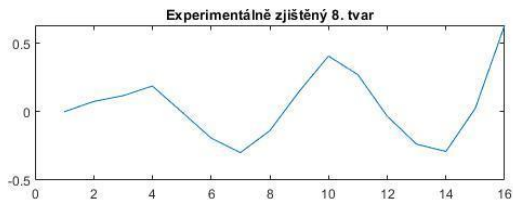
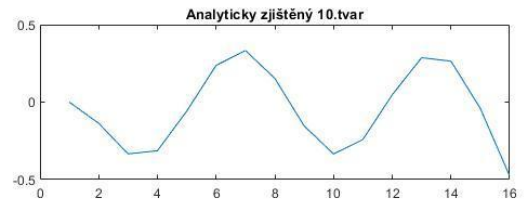
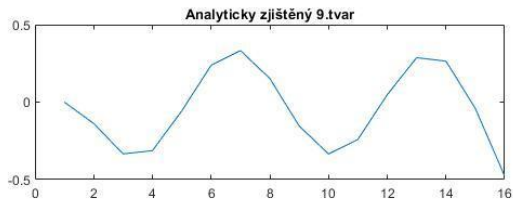
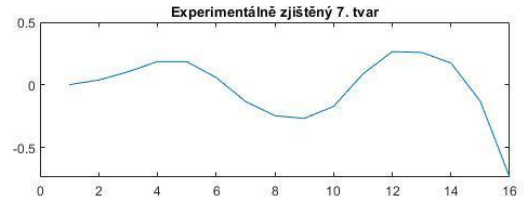
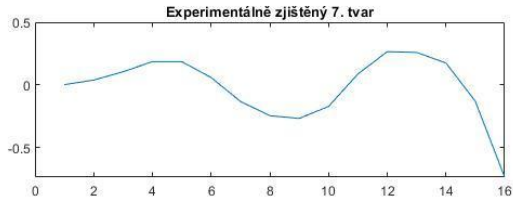
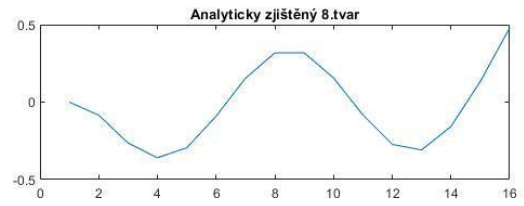
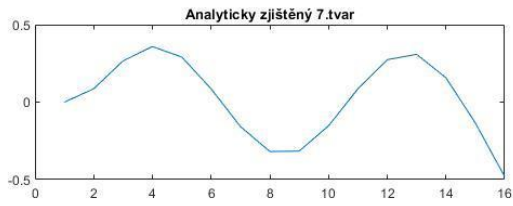


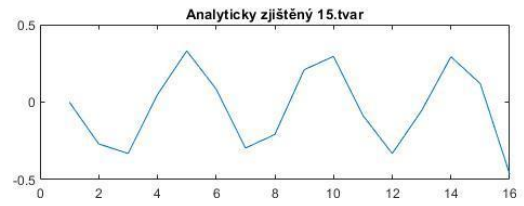




3) Vykreslení podobných tvarů poškozeného vzorku 2:







4) Vykreslení podobných tvarů poškozeného vzorku 3:

