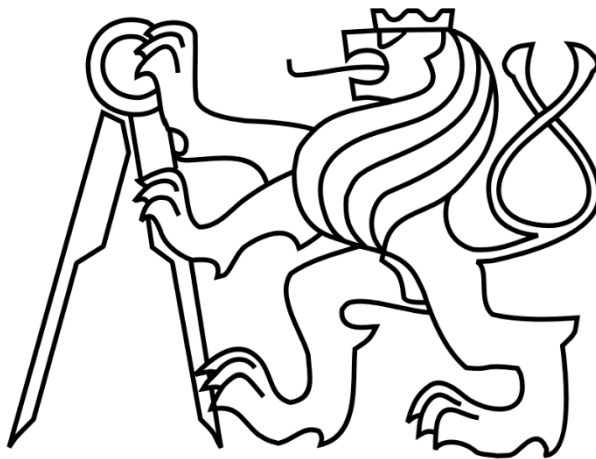


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Vliv způsobu uložení na modální parametry modelové strojní součásti

2022

Šárka Bergrová

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bergrová** Jméno: **Šárka** Osobní číslo: **483200**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv způsobu uložení na modální parametry modelové strojní součásti

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of boundary conditions on modal parameters of model machine part

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Pro tvorbu výpočtových modelů je klíčová jejich experimentální verifikace. Pokud jsou výsledkem výpočtu modální parametry, slouží k verifikaci experimentální modální analýza. Jedním z rozporů mezi výpočtem a experimentem je požadavek na uložení zkoumaného dílce. Zatímco při výpočtu je nejčastěji uvažováno tzv. volné uložení, při experimentu se takovému uložení lze jen přiblížit. Volné uložení je takové uložení, kdy na dílec nepůsobí žádné vnější síly. Při experimentu je tedy nutné pečlivě zvážit způsob uložení měřeného dílce. Cílem práce bude navržení a ověření takového uložení, které se bude blížit volnému uložení. ; Osnova práce: 1) Student provede rešerši problematiky ukládání dílců při modální analýze. 2) Osvojí si experimentální modální analýzu a modální analýzu provedenou pomocí metody konečných prvků (MKP). 3) Provede výběr vhodného dílce tak, aby se co nejvíce blížil reálné strojní součásti. 4) Navrhne uložení zkoumaného dílce tak, aby se toto uložení blížilo volnému uložení. 6) Provede experimentální modální analýzu a modální analýzu pomocí MKP vybraného dílce. 7) Ze získaných výsledků provede vyhodnocení vlivu způsobu uložení na výsledné modální parametry a porovná je s těmi získanými pomocí MKP. ; Rozsah grafické části 0 stran; Rozsah textové části 40 až 60 stran;

Seznam doporučené literatury:

[1] MILÁČEK, Stanislav. Modální analýza mechanických kmitů. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02333-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Miroslav Janota, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Ing. Viktor Kulišek, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání bakalářské práce: **30.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Miroslav Janota, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna 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.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 13.7.2022

.....
podpis

Poděkování

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu práce panu Ing. Miroslavovi Janotovi, Ph.D. za vstřícnost, trpělivost a dobré rady. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a příteli za podporu v těžkých chvílích a také všem, kdo mi s tvorbou práce pomáhali.

Anotace

Autor:	Šárka Bergrová
Název BP:	Vliv způsobu uložení na modální parametry modelové strojní součásti
Rozsah práce:	55 str., 52 obr., 9 tab.
Školní rok vyhotovení:	2022
Škola:	ČVUT v Praze Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Miroslav Janota, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Viktor Kulíšek
Zadavatel:	ČVUT Fakulta Strojní
Využití:	Návrh uložení pro verifikaci analytického modelu strojní součásti pomocí experimentální modální analýzy
Klíčová slova:	experimentální modální analýza, analytická modální analýza, verifikace, okrajové podmínky
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá problematikou uložení při verifikaci analyticky získaných modálních parametrů pomocí experimentální modální analýzy na modelové strojní součásti. Na zvolené součásti je provedena modální analýza pomocí MKP a experimentální modální analýza za různých uložení aproximujících volné okrajové podmínky. Zvolená uložení jsou vyhodnocena a dále upravena.

Annotation

Author:	Šárka Bergrová
Title of bachelor dissertation:	Influence of boundary conditions on modal parameters of model machine part
Extent:	55 p., 52 fig., 9 tab.
Academic year:	2022
University:	CTU in Prague Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Miroslav Janota, Ph.D.
Consultant:	Ing. Viktor Kulíšek
Submitter of the Theme:	CTU Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Support design for verification of an analytical model of model machine part using experimental modal analysis
Key words:	experimental modal analysis, analytical modal analysis, verification, boundary conditions
Annotation:	Batchelors thesis concerns topic of boundary conditions during verification of analytically obtained modal parameters using experimental modal analysis on model machine part. Modal analysis is conducted using FEM analysis and experimental modal analysis on different supports imitating free boundary conditions. Chosen supports are reviewed and further improved.



Obsah

Obsah	7
Seznam zkratk	9
Přehled použitých veličin a jednotek	10
1 Úvod	11
2 Cíl práce	13
3 Stav řešené problematiky	14
3.1 Volné uložení	14
3.2 Aproximace volného uložení	14
3.2.1 Pravidlo 1:10	14
3.2.2 Umístění podpor do uzlových bodů	15
3.2.3 Uložení uváděná v literatuře	16
3.3 Závěr rešerše	18
4 Vlastní řešení	20
4.1 Volba modelové strojní součásti	20
4.2 Popis analytické části	21
4.2.1 Analýza modelu v programu Abaqus	21
4.2.2 Zkouška simulace podpor v programu Abaqus	23
4.2.3 Zpracování dat v Matlabu	25
4.3 Experimentální modální analýza	25
4.4 Popis experimentální části	26
4.4.1 Měřicí aparatura	26
4.4.2 Postup měření	28
4.4.3 Analýza naměřených dat	29



4.5	První sada experimentů	31
4.5.1	Porovnání s výpočtem.....	34
4.6	Druhá sada experimentů.....	38
4.6.1	Přesun podložek do uzlových bodů.....	38
4.6.2	Snížení tuhosti podložek	41
4.7	Porovnání simulace podložek s měřením	44
5	Vyhodnocení vlivu způsobu uložení	47
6	Závěr	48
	Seznamy	49
	Seznam literatury	49
	Seznam použitého softwaru	53
	Seznam obrázků	53
	Seznam tabulek.....	54
	Seznam grafů	54
	Seznam elektronických příloh.....	55



Seznam zkratk

- EMA Experimentální modální analýza
- FFT Rychlá Fourierova transformace
- FRF Funkce frekvenčního přenosu (Frequency Response Function)
- MKP Metoda konečných prvků



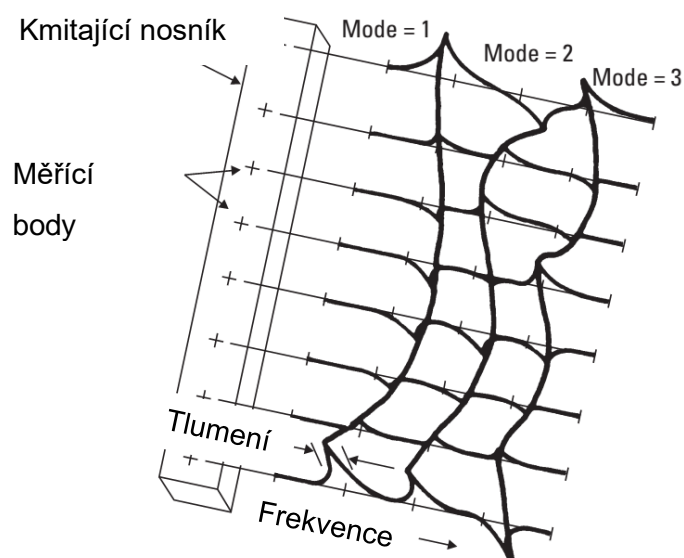
Přehled použitých veličin a jednotek

Značka	Jednotka	Název
a	m s^{-2}	Zrychlení
$A(\omega)$	$\text{m s}^{-2} \text{N}^{-1}$	FRF ve formě akcelerance
E	MPa	Modul pružnosti
f	Hz	Frekvence
f_d	Hz	Vlastní frekvence
$H(\omega)$	m N^{-1}	FRF ve formě dynamické poddajnosti
k	N m	Tuhost
p	s^{-1}	Pól
R	kg^{-1}	Reziduum
S	m^2	Plocha
v	m	Vlastní vektor
V	m	Matice vlastních vektorů
δ	s^{-1}	Konstanta doznívání
ω	s^{-1}	Kruhová frekvence
ω_d	s^{-1}	Vlastní kruhová frekvence
ζ	-	Poměrný útlum
ρ	kg m^{-3}	Hustota

1 Úvod

Do oblasti výrobních strojů zasahuje mimo jiné i problematika vibrací, která se pojí s dynamickými silami, kterým bývají stroje vystavovány. Tyto dynamické síly mohou vybudit strukturu stroje na frekvenci blížící se rezonanční a způsobit jev zvaný rezonance. Tento jev způsobuje problémy s nadměrnými vibracemi, jako je např. zvýšený hluk, snížení přesnosti stroje až po porušení strukturální integrity součástí. Problémy s vibracemi pak představují omezení při návrhu různých strojírenských produktů. [1] [2]

Při navrhování struktur je žádoucí provést srovnání mezi předpovězeným dynamickým chováním struktury a tím, které je v praxi skutečně pozorováno. Pro popis dynamického chování struktury se používají modální parametry. Dynamické chování součásti lze rozložit na jednotlivé vibrační módy, přičemž každému módu náleží jeho modální parametry. Mezi modální parametry patří vlastní frekvence f_d , vlastní tvar kmitu (vlastní vektor) \mathbf{v} a poměrný útlum ζ . Koncept modálních parametrů je znázorněn na obrázku 1.1. Vlastní frekvence a poměrný útlum jsou pro každý mód globálními parametry, ale vlastní tvar kmitu se skládá z vektorů posuvů v každém bodě. Posuvy v jednotlivých bodech jsou tedy lokálními parametry, zatímco celkový vlastní tvar popsáný maticí vlastních vektorů \mathbf{V} je možné považovat za parametr globální. [3] [1] [4]



Obrázek 1.1: Koncept modálních parametrů [4]



Proces získávání modálních parametrů se nazývá modální analýza. Modální analýzu lze provádět jak analyticky, tak experimentálně. Analyticky bývá modální analýza realizována pomocí MKP. V rámci výpočtu je obvykle využito volných okrajových podmínek, především kvůli jejich snadné simulaci. Za volných okrajových podmínek má těleso 6 stupňů volnosti a nepůsobí na něj tedy žádné vnější síly.

Experimentální modální analýza se provádí měřením odezvy na známé buzení. Naměřená data v časové oblasti jsou pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) převedena do frekvenční oblasti a tím vznikají frekvenční odezvové funkce (FRF). Z FRF jsou pak odečítány modální parametry. [3] [2]

Pokud je třeba analyticky získané modální parametry verifikovat pomocí experimentální modální analýzy, nastává problém s ovlivněním modálních parametrů uložením. Volného uložení, které je často využíváno v analytické modální analýze, totiž nelze experimentálně zcela dosáhnout. Proto vzniká snaha aproximovat ho měkkým uložením s co nejmenším vlivem na výsledné modální parametry.

Rešeršní část této práce je zaměřena na různé způsoby realizace volných okrajových podmínek při experimentální modální analýze a na jejich vliv na modální parametry. Na základě rešerše a dostupných možností jsou vybrány varianty uložení vhodné k měření na zvolené strojní součásti.

V praktické části je pro reprezentaci modelové strojní součásti zvoleno smykadlo. Na této součásti je realizována experimentální modální analýza za zvolených variant uložení. Zároveň je provedena analytická modální analýza součásti v programu Abaqus za volných okrajových podmínek. Výsledky obou analýz jsou zpracovány. Naměřená a vypočtená data jsou porovnána a na základě srovnání ovlivnění modálních parametrů jednotlivými uloženími je navržena úprava uložení, která je dalším měřením ověřena. Jako alternativní přístup je prozkoumána varianta přidání tuhosti uložení do výpočtu. Na závěr je vyhodnocen vliv uložení na modální parametry součásti.



2 Cíl práce

Cílem této práce je nalezení vhodné aproximace volných okrajových podmínek pro modelovou strojní součást při měření a také vhodnou aproximaci uložení při MKP výpočtu.

Pro nalezení vhodné aproximace volného uložení je třeba provést rešerši možností realizace volného uložení a jeho vlivu na modální parametry. Náplní vlastního řešení je pak volba modelové strojní součásti, provedení analytické modální analýzy pomocí MKP, volba uložení a provedení experimentální modální analýzy. Pro realizaci vlastního řešení je nutné seznámit se s modální analýzou pomocí MKP v programu Abaqus a naučit se exportovat a zpracovat data. Také je třeba najít vhodný způsob simulace tuhosti uložení v programu Abaqus. V rámci experimentální části je nutné osvojit si experimentální modální analýzu a zvládnout zpracování naměřených dat.

Na základě porovnání naměřených dat bude třeba vyhodnotit vliv uložení na modální parametry. Dále bude zvážena možnost úpravy uložení, která bude měřením ověřena a vyhodnocena.



3 Stav řešené problematiky

Rešerše v rámci této práce byla zaměřena na možnosti aproximace volného uložení uváděné v literatuře a na konkrétní způsoby realizace volného uložení používané při měření. Také byly vyhledány zdroje zabývající se přímo vlivem okrajových podmínek na modální parametry. Literatury zabývající se tímto tématem ovšem není mnoho.

3.1 Volné uložení

Volné uložení je takové uložení, kdy těleso nemá žádné vazby s okolím. Na těleso tedy nepůsobí žádné vnější síly a je volně umístěno v prostoru. Při teoretické analýze má takto uložené těleso 6 stupňů volnosti, takže vykazuje 6 módů tuhého tělesa, tedy 3 posuvy ve směru souřadných os a 3 rotace kolem souřadných os. Všechny 6 těchto módů má teoreticky vlastní frekvenci nulovou. [2]

Zatímco je toto uložení s výhodou uvažováno při výpočtové modální analýze, při experimentální modální analýze se mu lze přiblížit, ale ne ho zcela dosáhnout.

3.2 Aproximace volného uložení

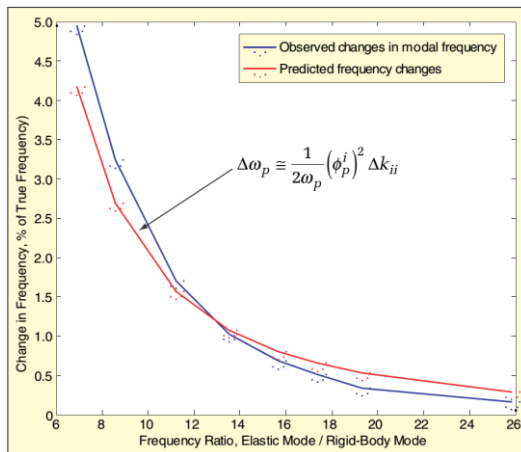
Literatura předkládá různá pravidla a možnosti realizace volného uložení, nicméně ideální způsob uložení měřené struktury neexistuje. Každý případ má svá specifika a možnosti, proto není možné najít takové okrajové podmínky, které by vyhovovaly v každé situaci.

3.2.1 Pravidlo 1:10

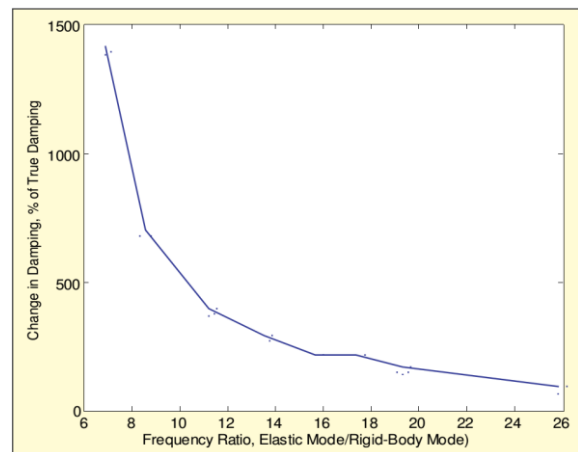
Několik zdrojů uvádí pravidlo pro aproximaci volného uložení 1:10. Toto pravidlo říká, že pokud je nejvyšší vlastní frekvence módů tuhého tělesa menší než 10% hodnoty nejnižší deformační vlastní frekvence měřené struktury, tak je ovlivnění vlastní frekvence uložení zanedbatelné. [2] [5] [6] [4]

Zdroj [5] se zabývá návrhem pravidel pro vytvoření vhodného systému podpor s minimálním vlivem na měřené modální parametry součásti. Je zde ověřena platnost pravidla 1:10 experimentem na hliníkovém nosníku. Pro výchozí měření byl realizován závěs nosníku za jeden konec na velmi dlouhé elastické šňůře.

v této konfiguraci byla nejvyšší vlastní frekvence módu tuhého tělesa velmi nízká oproti vlastní frekvenci prvního ohybového módu, proto byla tato konfigurace vyhodnocena jako ideální pro porovnávání s ostatními výsledky.



Graf 3.1: Pozorované změny vlastní frekvence v závislosti na poměru frekvencí [5]



Graf 3.2: Pozorované změny tlumení v závislosti na poměru frekvencí [5]

Z výsledků experimentu zanesených do grafu 3.1 a 3.2 plyne, že závislost změny mezi měřenou vlastní frekvencí a skutečnou vlastní frekvencí na poměru frekvence prvního elastického módu a frekvence módu tuhého tělesa je velmi podobná u naměřených dat i u teoretického rozboru, ačkoli chyby nižší než 1% dosahuje křivka vycházející z měření až při poměru frekvencí 1:15. Rozdíl skutečného a naměřeného tlumení je však i v případě poměru frekvencí 1:25 90%. Je tedy patrné, že tlumení je velmi citlivé na okrajové podmínky. [5]

3.2.2 Umístění podpor do uzlových bodů

Umístěním podpor do uzlových bodů jednotlivých módů je možné výrazně snížit jejich vliv na modální parametry, zejména na tlumení, které bývá okrajovými podmínkami výrazně ovlivněno. Nevýhodou v tomto případě je nutnost provést jiné měření s přemístěním podpor do uzlových bodů pro každý mód. [2]

Ve zdroji [5] byl testován mimo pravidla 1:10 i vliv uspořádání závěsu lopatky větrné turbíny na její modální parametry. Bylo vyzkoušeno několik uspořádání závěsu a jako nejlepší způsob závěsu lopatky se jeví ten, kdy je lopatka zavěšena v uzlových bodech.



Vlivem okrajových podmínek na experimentálně získané hodnoty tlumení se zabývá i zdroj [7]. Byla zde měřena hliníková deska v několika uspořádáních závěsu. Z výsledků experimentální části je patrné, že tlumení je výrazně ovlivněno změnou okrajových podmínek, zatímco vlastní frekvence jen mírně. Nejnižší hodnoty tlumení byly získány pro zavěšení v uzlových bodech.

Zdroj [8] porovnává vlastní frekvence a vlastní tvary kmitu získané modální analýzou pomocí metody konečných prvků a experimentální modální analýzou na štíhlém ocelovém nosníku. Jako volné uložení byly zvoleny dvě varianty zavěšení: v uzlových bodech a na okrajích nosníku. Z výsledků vyplývá, že je vhodné umístit podpory do uzlových bodů i z hlediska ovlivnění vlastních frekvencí uložení.

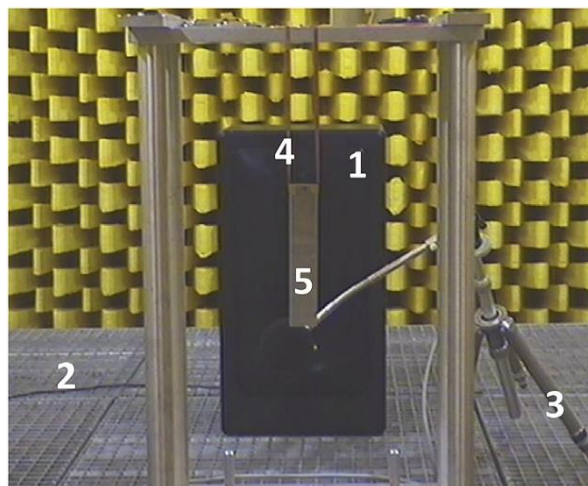
3.2.3 Uložení uváděná v literatuře

Zdroj [9] uvádí jednoduchou demonstraci vlivu uspořádání experimentu na získané FRF zavěšením kovové desky vertikálně a horizontálně na vlasci a následně na gumách. Po porovnání získaných FRF je patrné, že se funkce liší a uspořádání experimentu má vliv na modální parametry.

Nejčastějším způsobem aproximace volného uložení uváděným v literatuře je závěs. Délkou závěsu lze ovlivnit tuhost uložení a lze ho realizovat jak pro malé, tak pro velké součásti. Také je možné ovlivnit tuhost závěsu požitím elastických šňůr nebo zavěšením na pružiny. [5] [7] [10] [11] [12] [13] Ovšem ve zdroji [14] je poznamenáno, že při použití pružných lan se mohou vyskytnout problémy jako je přidané tlumení, tření (objekt se po zatížení nikdy nevrátí do stejné pozice) a také se při testu může změnit rozložení hmotnosti a tím se i trochu změní okrajové podmínky. Na obrázku 3.1 je vidět realizace závěsu betonového pražce na pružinách a na obrázku 3.2 je zobrazena realizace závěsu na malé desce.



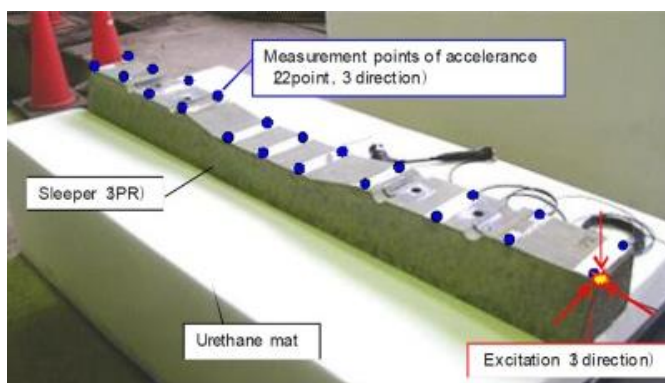
Obrázek 3.1: Závěs betonového pražce na pružinách [11]



Obrázek 3.2: Závěs zkušební desky (5) na elastických šňůrách (4) [12]

Zdroj [11], který realizuje volné uložení formou závěsu na pružinách (obrázek 3.1), porovnává modální parametry železničního pražce získané za volného uložení a při uložení na balastu (v provozním uložení). Nejvyšší rozdíl modálních parametrů mezi volným a provozním uložení se objevil u prvního ohybového módu. V oblasti vyšších frekvencí se rozdíl vlastních frekvencí mezi uloženími snižoval. Tlumení bylo v případě operačních podmínek několikanásobně vyšší než při volných okrajových podmínkách, rozdíl se opět snížil u vyšších frekvencí.

Další možností aproximace volných okrajových podmínek je uložení na měkké podložce. K tomuto účelu je ve zdroji [15] použita tlustá polyuretanová matrace k podepření těžkého železničního pražce (obrázek 3.3) a ve zdroji [16] je použit molitan s vlnitou texturou pro podepření lehké desky (obrázek 3.4).



Obrázek 3.3: Uložení na polyuretanové matraci [15]



Obrázek 3.4: Uložení na vlnitém molitanu [16]



Ve zdroji [6] jsou pro výzkum kontaminace FRF tuhostí podložek použity pružiny s dvěma různými tuhostmi. Je zde uvedeno, že pružiny mohou vytvořit nežádoucí buzení, které bude kontaminovat měřené odezvy a pro tento případ je navržena korekce, která ovšem není přesná a musí být aplikována opatrně. Zdroj [17] na modelu nosníku demonstruje zvýšení měřené vlastní frekvence nosníku přidáním pružin v krajních bodech a další růst vlastní frekvence se zvýšením tuhosti pružin.

Růst vlastních frekvencí se zvyšující se tuhostí podložek uvádí i zdroj [18], kde je zkoumána možnost sledování degradace gumových podložek nosníků mostu pomocí modálních parametrů. Zároveň se po vyhodnocení výsledků zdá být první ohybový mód nejcitlivější na změnu tuhosti podložek.

Mezi některá další uložení, která jsou uváděna v literatuře, patří: podepření pomocí marshmallows, gumových záchodových zvonů, přísavek, obalových materiálů [19], nebo levitace na vzduchovém polštáři. [16]

3.3 Závěr rešerše

Většina zdrojů uvádí pravidlo pro aproximaci volných okrajových podmínek 1:10, tedy pokud je nevyšší měřená vlastní frekvence tuhého tělesa nižší než 10% hodnoty nejnižší deformační vlastní frekvence, pak je ovlivnění vlastní frekvence uložení zanedbatelné. Platnost tohoto pravidla byla ve zdroji [5] ověřena s dobrými výsledky.

Dále je patrné, že tlumení je výrazně ovlivněno podporami i v případě dodržení pravidla 1:10, zejména pokud je tlumení zkoušené části nižší než tlumení podpor. Pro zmírnění vlivu podpor na tlumení je v několika zdrojích navrženo umístit podpory do uzlových bodů módu s nutností přemístění podpor pro měření jednotlivých módů. Efektivitu umístění podpor do uzlových bodů potvrzují i zdroje [5] a [7]. Z výsledků experimentu ve zdroji [8] je patrné, že umístění podpor do uzlových bodů je vhodné i pro přesnější měření vlastní frekvence.



Vliv podpor na modální parametry se dle výsledků experimentu ve zdroji [11] u vyšších frekvencí snižuje. Zvýšení tuhosti podpor posouvá hodnotu vlastních frekvencí výše. [18] [17]

Nejčastějším způsobem uložení pro těžké dílce je pružný závěs, který ovšem může ovlivnit měřené hodnoty tlumení, proto je navrhováno i zavěšení na nepružných lanech. [14] Dalšími uváděnými způsoby uložení vhodnými pro těžké dílce jsou: položení dílce na měkkou tlustou polyuretanovou podložku [15], umístění dílce na gumové zvony [19] nebo na měkké pružiny [2].

Závěrem je, že pravidlo 1:10 a umístění podpor v uzlových bodech daného módu snižuje vliv podpor na modální parametry, ale tlumení je velmi citlivé na okrajové podmínky a musí se s ním pracovat opatrně. Jako nejlepší způsob realizace volného uložení se jeví závěs v uzlových bodech.

4 Vlastní řešení

V rámci vlastního řešení byla pro zkoumání vlivu uložení na modální parametry zvolena modelová strojní součást v podobě modelového smykadla. Proběhla modální analýza modelu této součásti pomocí MKP v programu Abaqus za volných okrajových podmínek. Následně byla provedena experimentální modální analýza této součásti na první sadě uložení zvolených na základě rešerše a dostupných možností.

Po zpracování naměřených a vypočtených dat pomocí skriptů vytvořených v programu Matlab proběhlo porovnání FRF a modálních parametrů získaných měřeními a výpočtem. Na základě vyhodnocení porovnání byly navrženy úpravy podložek pro snížení jejich vlivu na modální parametry. Jednou z navržených úprav bylo snížení tuhosti podpor pomocí změny materiálu, další snížení tuhosti pomocí změny plochy, kterou smykadlo dosedá na podložky. Oba návrhy byly ověřeny měřeními. Alternativním přístupem pak byl pokus o simulaci přidání tuhosti podpor v programu Abaqus.

4.1 Volba modelové strojní součásti

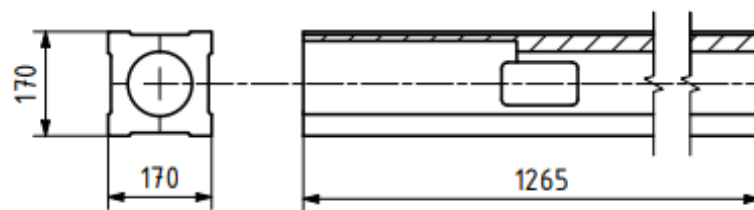
Pro analýzu bylo zvoleno modelové smykadlo na obrázku 4.1. Jedná se o těžký a rozměrný litinový dílec podobající se skutečné strojní součásti. Charakter součásti omezuje možnosti uložení tak, jak tomu bývá i v praxi. Proto byla zvolena tato reprezentativní strojní součást. Vybrané materiálové vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4.1 a vnější rozměry na obrázku 4.2.



Obrázek 4.1: Modelová strojní součást: smykadlo

Tabulka 4.1: Materiálové vlastnosti smykadla

Tvárná litina 42 2305	
Modul pružnosti E	169 GPa
Hustota ρ	7050 kg/m ³
Poissonovo číslo μ	0,27



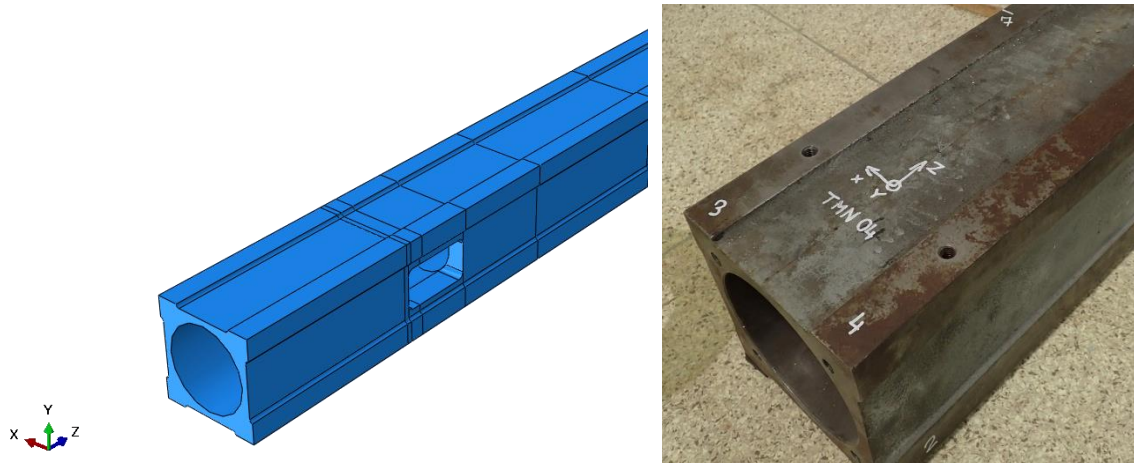
Obrázek 4.2: Vnější rozměry smykadla

4.2 Popis analytické části

Pro získání modálních parametrů výpočtovou cestou je často s výhodou využívána metoda konečných prvků. MKP spočívá v diskretizaci modelu na konečné množství prvků. Samotná modální analýza, tedy získávání modálních parametrů, je pak provedena procesem získávání vlastních hodnot v oblasti lineární dynamiky. Více informací o teorii výpočtu je uvedeno ve zdroji [20]. Analytická část této práce byla realizována v programu Abaqus.

4.2.1 Analýza modelu v programu Abaqus

Nejprve byl v programu Abaqus vytvořen model součásti. Oproti původnímu modelu součásti poskytnutému vedoucím byl v Abaqusu model pro výpočet zjednodušen odstraněním závitových děr pro šrouby. Orientace os byla zvolena tak, aby korespondovala s měřícím modelem, jak je zobrazeno na obrázku 4.3.

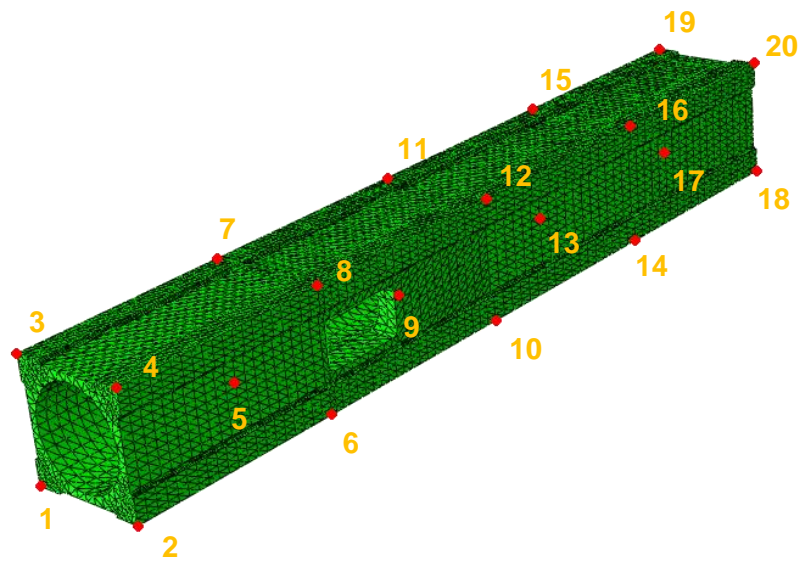


Obrázek 4.3: Model smykadla v programu Abaqus – orientace os

Následně byly definovány materiálové vlastnosti nezbytné pro provedení modální analýzy: hustota, modul pružnosti a Poissonovo číslo. Materiál je elastický.

Za účelem provedení modální analýzy byl v modulu step vytvořen krok Lineární perturbace: Frekvence. Byl zvolen řešič Lanczos, normování vlastních vektorů podle hmotnosti a vyžádány byly módy ve frekvenčním rozmezí 0 až 2000 Hz.

Posledním krokem před provedením výpočtu je vytvoření sítě. Kvůli zaoblením a otvorům byl zvolen čtyřstěnný tvar elementů globální velikosti 15 se zhuštěním v rozích dílce. Pro získání posuvů v požadovaných dvaceti uzlech odpovídajících měřicím bodům byla součást rozdělena po čtvrtinách. Následně byl vytvořen set bodů, který slouží k exportu jejich posuvů pro jednotlivé módy, jak je zobrazeno na obrázku 4.4.



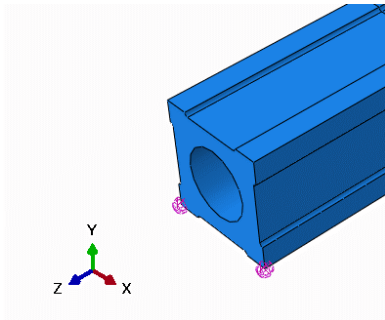
Obrázek 4.4: Set bodů odpovídajících měřícím bodům

4.2.2 Zkouška simulace podpor v programu Abaqus

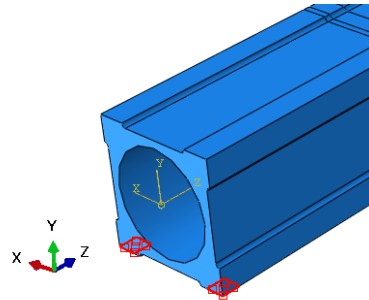
Alternativním přístupem k verifikaci výpočtové modální analýzy pomocí experimentální zkoumaným v této práci je simulace tuhosti podpor v programu Abaqus. Tuhost podpor lze do výpočtového modelu v Abaqusu přidat několika způsoby. Dále jsou rozebrány způsoby pomocí elementu typu spring a foundation.

Foundation (základ) se chová jako pružina připevněná k zemi. Jedná se o jednoduchý způsob zahrnutí tuhosti podložky do výpočtového modelu. Je definován plochou, kterou je dílec podepřen a tuhostí na plochu k/S . Znázornění přidaného základu do modelu je zobrazeno na obrázku 4.6. [20]

Spring (pružina) je pružný element, který propojuje sílu s relativním posunutím ve zvoleném směru. Pružina může sloužit jako propojení zvoleného bodu modelu se zemí s určitou tuhostí. Je definována pomocí tuhosti k . Znázornění přidané pružiny do modelu je zobrazeno na obrázku 4.5. [20]

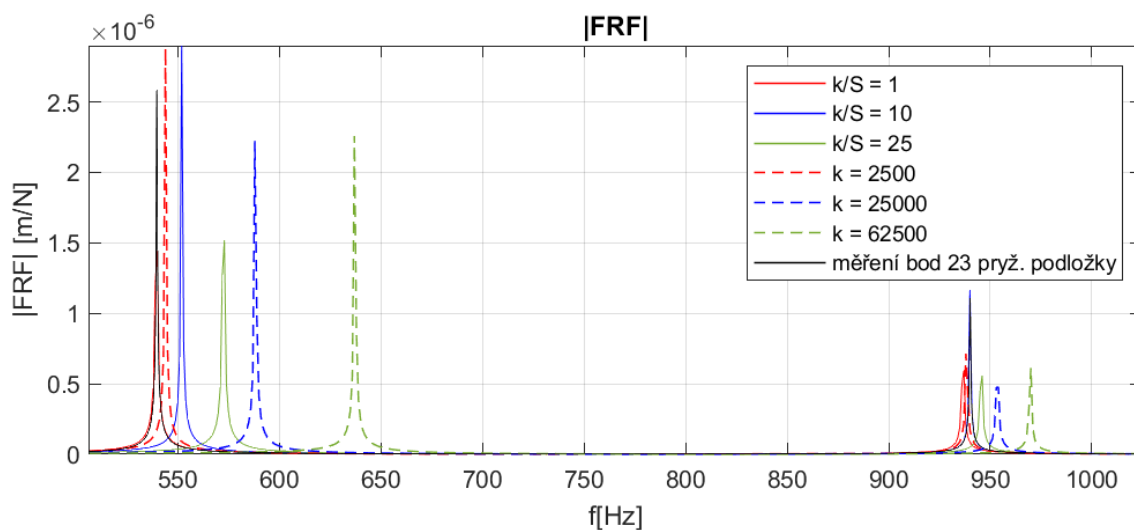


Obrázek 4.5: Spring



Obrázek 4.6: Foundation

Pro porovnání účinků přidání tuhosti podpor do výpočtového modelu ve formě foundation a spring byla provedena analýza při třech různých nastavených tuhostech. V grafu 4.1 jsou vyneseny první dva módy FRF vždy pro tuhost na plochu k/S zadanou pro foundation a tomu odpovídající tuhost k zadanou pro spring. Dále je do grafu 4.1 vynesena FRF získaná měřením na pryžových podložkách. Na první pohled je patrné, že se výsledné FRF u obou způsobů výrazně liší.



Graf 4.1: Porovnání FRF pro Foudation a Spring

Po zvážení obou přístupů byl pro připojení tuhosti podpor k modelu zvolen element typu foundation, protože zahrnuje mimo tuhosti i plochu podložky, a tak se zdá být bližší realitě.



4.2.3 Zpracování dat v Matlabu

Výsledkem analýzy v programu Abaqus jsou exportované vlastní frekvence a posuvy ve vybraných bodech. Tato data sama o sobě tvoří modální parametry. Pro možnost porovnání FRF získaných výpočtem a experimentem byl vytvořen skript v programu Matlab, který z exportovaných dat tvoří FRF. Ukázkou skriptu obsahuje Příloha 1. Převod exportovaných dat na FRF je založen na vztahu 4.1, kde \mathbf{V} je matice obsahující vektory posuvů v jednotlivých bodech a \mathbf{D} je diagonální matice obsahující vlastní frekvence a tlumení dle vztahu 4.2.

$$FRF = \mathbf{V} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^T \quad (4.1)$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}\left(\frac{1}{(j \cdot \omega)^2 - (\delta - j\omega_d)^2}\right) \quad (4.2)$$

Tlumení je do výpočtu dodáno právě až při zpracování v Matlabu. Z výpočtové analýzy totiž nelze tlumení přímo získat. Abaqus nabízí několik možností zavedení tlumení, které ovšem zatěžují výpočtový proces. Proto bylo zvoleno přidání tlumení až při zpracování vypočtených dat. V rámci zpracování dat v Matlabu lze tlumení jednoduše přidat do výpočtu jako odhad poměrného útlumu ζ anebo nahrát přímo konstantu doznívání δ získanou pomocí experimentální modální analýzy. [20] [21]

4.3 Experimentální modální analýza

Experimentální modální analýza spočívá v měření odezvy na známé buzení. Pro zpracování odezvy systému je použita FFT, která signál převádí na frekvenční odezvové funkce. FRF je možno vyjádřit jako podíl výstupu a vstupu závislý na frekvenci. Jedná se o komplexní funkci obsahující údaje o amplitudě a fázi. Dle charakteru odezvového parametru (výchylka, rychlost, zrychlení) jsou rozeznávány 3 typy FRF: dynamická poddajnost, pohyblivost a akcelerační. FRF jsou z měření získávány ve formě akcelerační z důvodu použití snímače zrychlení pro měření odezvy. Podrobnější informace o experimentální modální analýze jsou uvedeny ve zdrojích [2] [1] [3].



Forma buzení se dá rozdělit do dvou hlavních kategorií: rázové buzení a buzení vibrátorem. V experimentální části této práce je použito rázové buzení pomocí modálního kladívka, protože se jedná o jednoduchý a rychlý způsob buzení struktury, který je schopný vybudit zvolenou strojní součást. Modální kladívko se skládá z hlavy, snímače síly, hrotu a rukojeti. Tuhost hrotu a hmotnost hlavy se dá ovlivnit frekvenční rozsah měření a velikost vyvinuté síly. Úderem hrotu kladívka do měřené struktury vznikne silový impuls, který vybudí vibrace ve frekvenčním rozsahu měření. [2]

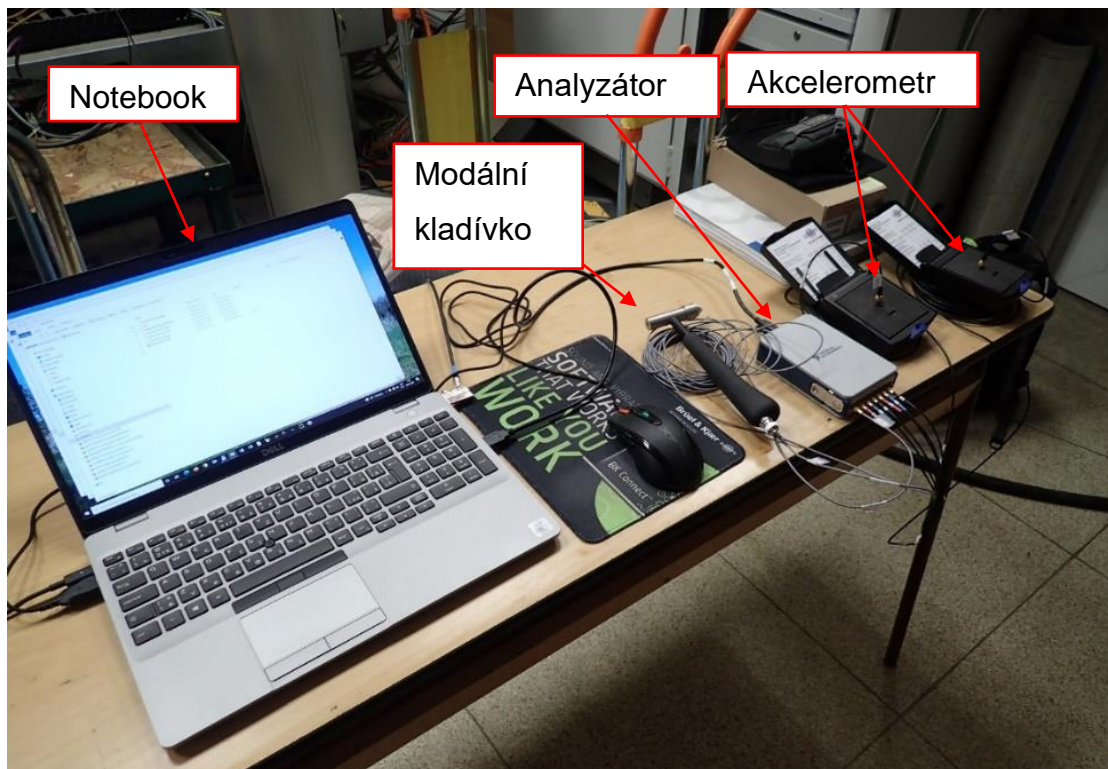
Pro měření odezvy se používají akcelerometry. Akcelerometr se v principu skládá z piezoelektrického elementu, na který je pomocí závaží při jejím zrychlení vyvinuta síla. Tím vzniká elektrický náboj úměrný zrychlení závaží. Akcelerometry je možné k součásti připevnit různými způsoby, mezi které patří např. včelí vosk, závitové spojení nebo magnetické podložky. [22]

4.4 Popis experimentální části

V této podkapitole je objasněn postup měření a zpracování dat. Samotná experimentální část se skládá ze dvou sad měření. První sada měření byla realizována na různých dostupných uloženích za účelem získat představu o vlivu uložení na modální parametry vybrané strojní součásti. V rámci druhé sady měření byly vyzkoušeny navržené možnosti snížení vlivu uložení na modální parametry.

4.4.1 Měřicí aparatura

Na obrázku 4.7 je zachycena měřicí aparatura s vyznačením jednotlivých prvků. Popis těchto prvků je uveden v tabulce 4.2. Akcelerometry sloužící k měření odezvy jsou pomocí magnetu připevněny k součásti. Modálním kladívkem je součást buzena v bodě 4. Signály těchto prvků jsou pomocí kabelů přeneseny do analyzátoru. Z analyzátoru jsou data přenesena do notebooku, kde jsou dále zpracována.



Obrázek 4.7: Měřící aparatura

Tabulka 4.2: Prvky měřící aparatury

Název	Výrobce	Typ
Notebook	DELL	Latitude 5510
Analyzátor NI cDAQ-9171	NI	cDAQ-9171 9231
Modální kladivo	Brüel&Kjaer	8206-003
Kabel: 10-32 UNF → BNC	Brüel&Kjaer	AO 0531-D-100
Tříosý akcelerometr	Brüel&Kjaer	4524 B
Kabel: 1-4 28 UNF → 10-32 UNF	Brüel&Kjaer	AO-0527-D-100
Tříosý akcelerometr	Brüel&Kjaer	4524 B
Kabel: 1-4 28 UNF → 10-32 UNF	Brüel&Kjaer	AO-0527-D-100
Model smykadla	TAJMAC-ZPS	TMN 04

4.4.2 Postup měření

Nejprve byl připraven měřicí model tvořený sítí měřících bodů zvolených na součásti, jak je zobrazeno na obrázku 4.8. Je zvolena orientace, bod a směr buzení.



Obrázek 4.8: Měřicí model

V rámci přípravy experimentu jsou zapojeny a vyzkoušeny všechny prvky. Pak je provedena kalibrace modálního kladívka ťukáním do jednotkové hmoty na provázku a akcelerometrů pomocí vibrátoru.

Samotné měření probíhá připevněním vždy dvou akcelerometrů pomocí magnetu do dvou měřících bodů. Akcelerometry měří zrychlení ve třech směrech odpovídajících zvolené orientaci dílce. V referenčním bodě je proveden úder modálním kladívkem ve zvoleném směru buzení. Úder kladívkem je po doznění předchozího úderu několikrát zopakován. Signály vzniklé jednotlivými údery jsou zprůměrovány. Akcelerometry jsou poté přesunuty do dalších dvou měřících bodů a proces se opakuje.

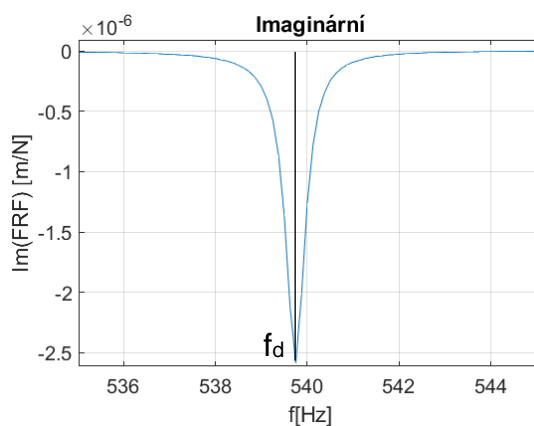
Vybuzené signály jsou přes analyzátor přeneseny do notebooku a převedeny na frekvenční charakteristiky.

4.4.3 Analýza naměřených dat

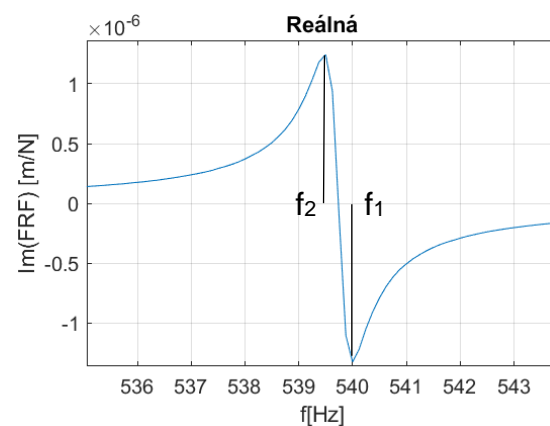
Naměřená data ve formě FRF jsou za účelem získání modální parametrů dále analyzována. Nejprve je FRF ve formě akcelerance převedena na dynamickou poddajnost. Pro převod platí matematický vztah 4.3. [1]

$$H(\omega) = A(\omega) \frac{1}{(j\omega)^2} \quad (4.3)$$

Zobrazením reálné a imaginární složky FRF a přiblížením na první viditelný mód vznikne graf 4.2 a 4.3. V grafech jsou vyznačeny hodnoty odečítané pro odhad modálních parametrů dle vzorců 4.4, 4.5 a 4.6, kde ω_d je vlastní kruhová frekvence a ζ poměrný útlum. [2] Pro odečtení modálních parametrů je vybrán řádek FRF odpovídající měření v referenčním bodě. Jako referenční bod je vybrán bod buzení.



Graf 4.2: Imaginární FRF



Graf 4.3: Reálná FRF

$$\omega = 2\pi f \quad (4.4)$$

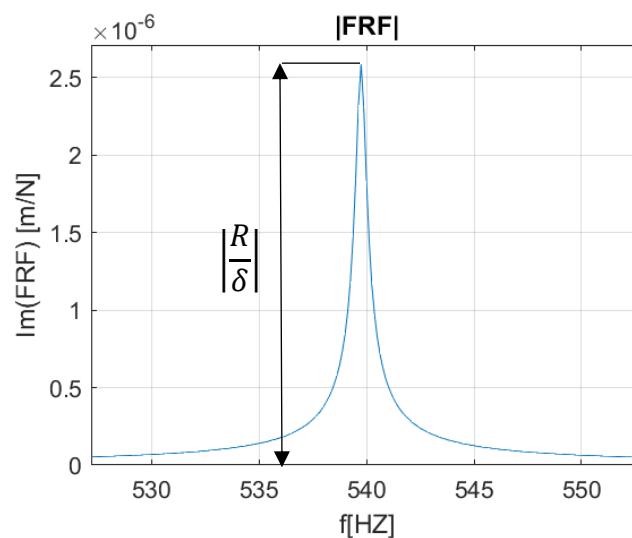
$$\omega_d = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} \quad (4.5)$$

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_d} \quad (4.6)$$

Za účelem ověření odečtených modálních parametrů byla vytvořena vyrovnaná funkce pomocí vzorce 4.7 a 4.8, kde R je reziduum a p je pól. [5] V grafu 4.4 je zobrazena absolutní hodnota FRF s vyznačením rezidua R . [3]

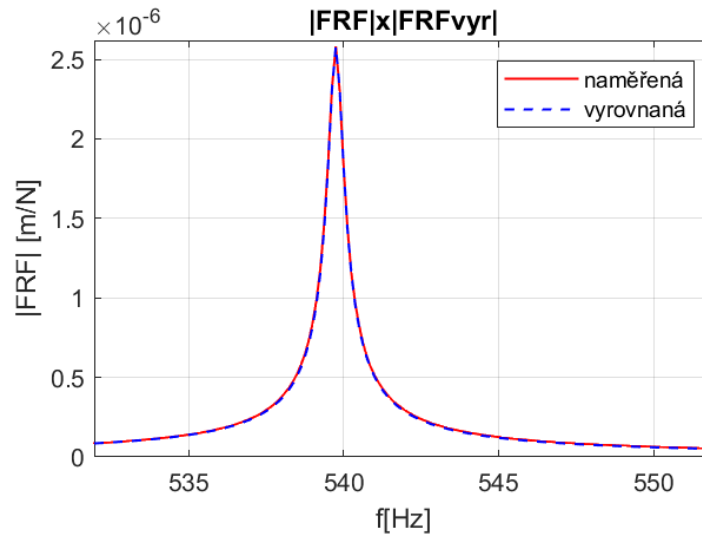
$$H(j\omega) = \frac{R}{(j\omega) - p_i} + \frac{R^*}{(j\omega) - p_i^*} \quad (4.7)$$

$$p = -\delta + j\omega_d \quad (4.8)$$



Graf 4.4: $|FRF|$ vyznačení rezidua

Příklad porovnání prvního módu naměřené a vyrovnané FRF je zobrazen v grafu 4.5. Pokud proběhlo odečtení modálních parametrů správně, naměřená a vyrovnaná funkce by se měly překrývat.



Graf 4.5: Porovnání naměřené a vyrovnané FRF

Pro zpracování naměřených dat byl vytvořen skript v Matlabu, jeho ukázka je uvedena v příloze 2.

4.5 První sada experimentů

V první sadě experimentů byla realizována uložení na obrázcích 4.9 až 4.13. Tato uložení byla zvolena na základě dostupných podložek a možnosti závěsu. Kvůli váze a rozměrům součásti byl k manipulaci použit zvedák, na který byl pomocí popruhu připojen neodymový magnet sloužící k uchycení součásti. Zároveň byla tato konfigurace použita pro měření v závěsu, protože se jednalo o jedinou dostupnou a bezpečnou variantu zavěšení dílce.



Obrázek 4.9: Pryžové podložky



Obrázek 4.10: Pryžové disky



Obrázek 4.11: Dřevěné špalíky



Obrázek 4.12: Pružiny



Obrázek 4.13: Závěs

Pro pryžové podložky a závěs bylo provedeno měření ve všech měřících bodech. Vlastní tvary získané analýzou naměřených dat korespondují s tvary získanými analyticky, jak je znázorněno v tabulce 4.3. Další měření byla provedena pouze v referenčním bodě 4, nebyla tedy získána data o vlastním tvaru kmitu. Porovnáním vlastních frekvencí z měření ve všech bodech a pouze v referenčním bodě byla zjištěna dobrá shoda, viz tabulka 4.4. Vzhledem k dobré shodě dat a nízkému vlivu okrajových podmínek na vlastní tvar byla další měření provedena už jen v referenčním bodě.

Tabulka 4.3: Porovnání vlastních tvarů

	Zobrazení vlastního tvaru		
	Výpočet	Podložky	Závěs
1. mód			
2. mód			

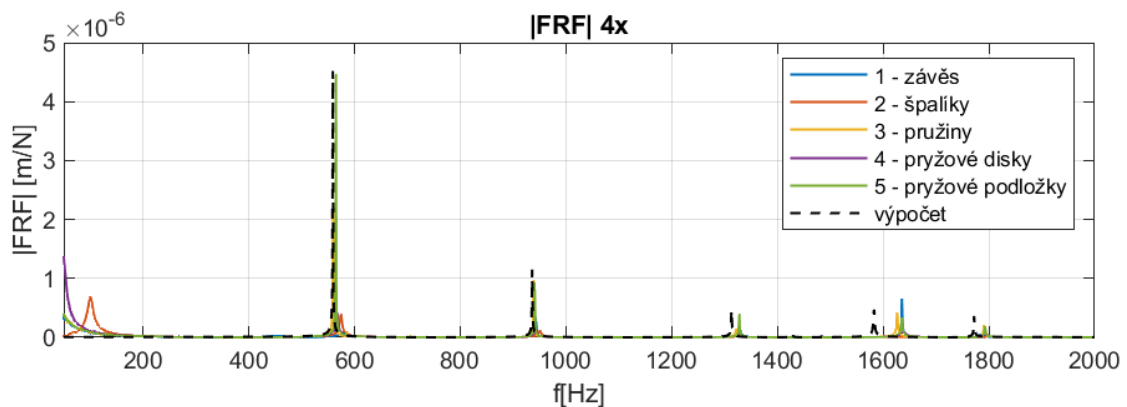
Tabulka 4.4: Porovnání vlastních frekvencí a poměrného útlumu

	Vlastní frekvence [Hz]				Poměrný útlum [%]			
	Podložky		Závěs		Podložky		Závěs	
	ref.	celý	ref.	celý	ref.	celý	ref.	celý
1. mód	539,88	539,75	519,25	519,13	0,0463	0,0463	0,1685	0,1686
2. mód	564,88	564,5	581,00	580,13	0,0332	0,0332	0,0116	0,0114

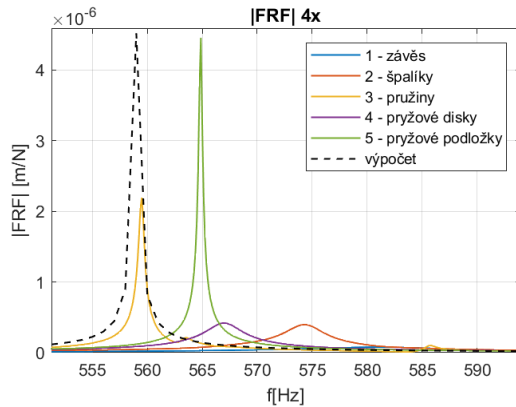
4.5.1 Porovnání s výpočtem

V grafu 4.6 je zobrazena FRF pro měření v referenčním bodě 4 ve směru x. Graf 4.7 a 4.8 pak představuje přiblížení prvního a druhého módu. Stejně tak graf 4.9, 4.10 a 4.11 zobrazuje FRF pro měření v referenčním bodě 4 ve směru y. V grafech jsou vyneseny FRF pro jednotlivá uložení barevně a černě přerušovaně je vynesena FRF získaná z vypočtených dat doplněná o tlumení odečtené z měření na pryžových podložkách, protože toto uložení ovlivnilo tlumení nejméně.

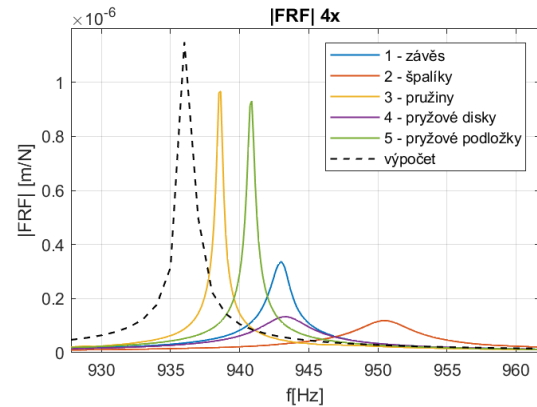
Z grafů je patrné, že pryžové podložky a pružiny jsou vypočtené FRF nejbližší. Ovšem v grafu 4.10 je zřejmá jejich nevýhoda. Pružiny mohou při měření generovat další buzení a tím zapříčinit vybuzení dalších nežádoucích módů. Také je parné, že se zvyšující se tuhostí podložek (podložky – disky – špalíky) roste vlastní frekvence a tlumení.



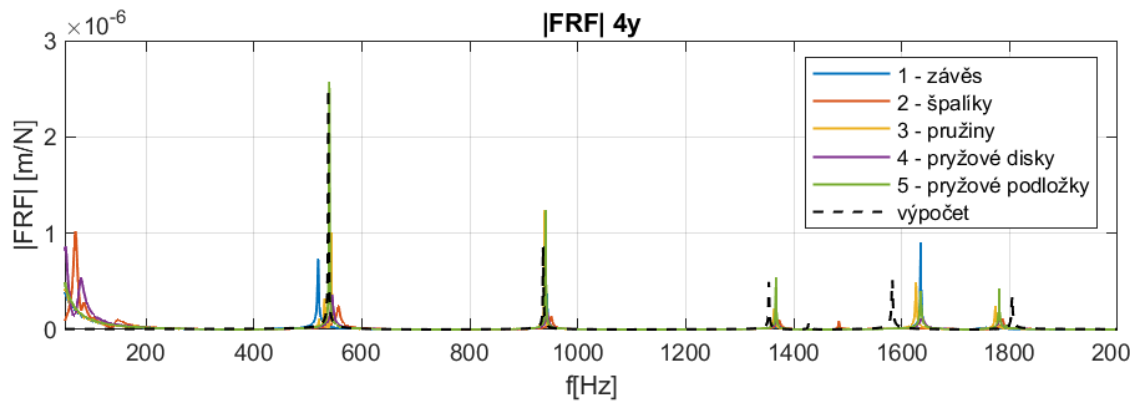
Graf 4.6: Zobrazení |FRF| v bodě 4 ve směru x pro 1. sadu uložení



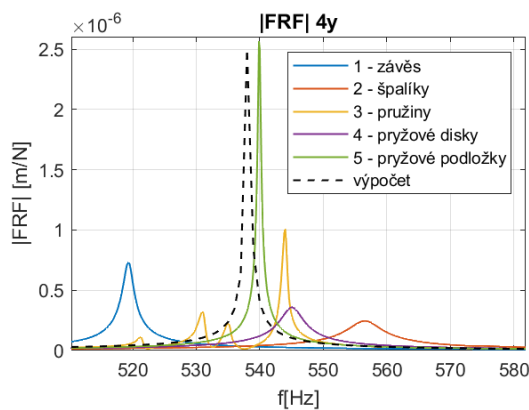
Graf 4.7: Přiblížení 2. módu



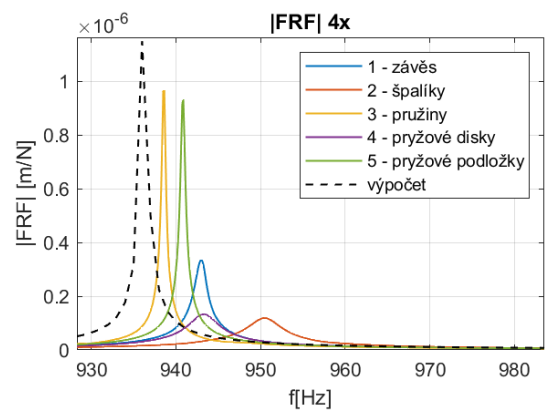
Graf 4.8: Přiblížení 3. módu



Graf 4.9: Zobrazení |FRF| v bodě 4 ve směru y pro 1. sadu uložení



Graf 4.10: Přiblížení 1. módu



Graf 4.11: Přiblížení 3. módu

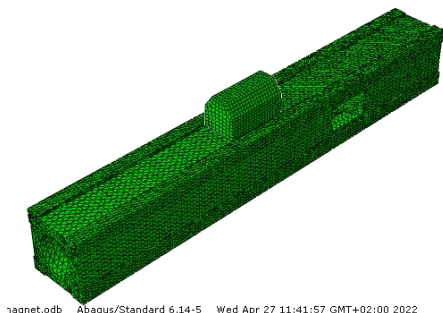
V tabulce 4.5 je uvedeno srovnání vlastních frekvencí a poměrného útlumu pro jednotlivá uložení. Zároveň je zde uveden poměr nejvyšší frekvence módu tuhého tělesa a nejnižší vlastní ohybové frekvence f_{rb}/f_{def} , který by dle pravidla

1:10 neměl být vyšší než 10%. Dále je v tabulce zaznamenán průměrný rozdíl mezi vlastní frekvencí změřenou a vypočtenou. Z hlediska pravidla 1:10 nevyhovují gumové disky a dřevěné špalíky. Tato uložení mají i vysoký rozdíl vlastních frekvencí. Zatímco závěs je z hlediska pravidla 1:10 vyhovující, jeho rozdíl frekvencí je oproti ostatním uložení vysoký. Nejnižší vliv na tlumení mají pryžové podložky, naopak nejvyšší dřevěné špalíky.

Tabulka 4.5: Porovnání získaných modálních parametrů

Uložení	f_{rb} / f_{def}	Vlastní frekvence [Hz]			Poměrný útlum [%]			Průměrný rozdíl vl. frekvencí
		1.mod	2.mod	3.mod	1.mod	2.mod	3.mod	
Pryžové podložky	4%	539,7	564,5	940,1	0,0463	0,0332	0,0332	4,10
Gumové disky	14%	545,1	567,0	943,3	0,3096	0,2976	0,1855	7,34
Dřevěné špalíky	27%	556,5	574,4	950,8	0,4717	0,3047	0,2104	16,09
Závěs	1%	519,3	581,0	943,0	0,1685	1,1618	0,0795	15,90
Pružiny	2%	544,0	559,5	938,6	0,0804	0,0447	0,0266	2,93
Abaqus		538,2	559,0	936,3				

Modální parametry byly v případě závěsu ovlivněny nejenom samotným uložení, ale také hmotou magnetu. Z tohoto důvodu byl v Abaqusu proveden výpočet pro smykadlo společně s připojeným magnetem, jak je zobrazeno na obrázku 4.14 a 4.15.



magnet.odb Abaqus/Standard 6.14-5 Wed Apr 27 11:41:57 GMT+02:00 2022

Obrázek 4.14: Model smykadla s hmotou magnetu

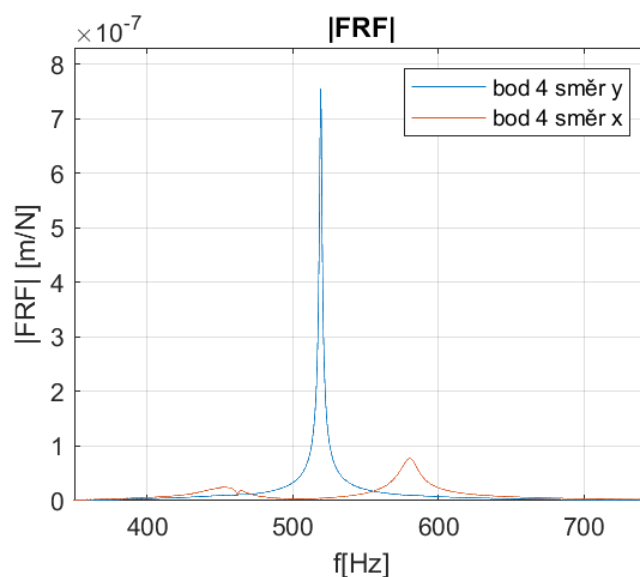


Obrázek 4.15: Smykadlo v závěsu

Tabulka 4.6: Porovnání vlastních frekvencí po úpravě výpočtu

Uložení	Vlastní frekvence [Hz]			
		1. mód	2. mód	3. mód
Závěs	454,0	519,3	581,0	943,0
Abaqus přidána hmota magnetu	-	530,2	543,6	941,2
Abaqus bez magnetu	-	538,2	559,0	936,3

Tabulka 4.6 obsahuje porovnání vlastních frekvencí získaných měřením s těmi získanými výpočtem před úpravou přidáním hmoty magnetu a po jejím přidání. V případě prvního a třetího módu se vlastní frekvence vypočtená přiblížila k té naměřené. Pro případ druhého módu tomu bylo naopak. Po bližším prozkoumání naměřené FRF bylo zjištěno, že se hmota magnetu na smykadle nejspíš zachovala jako dynamický hltič a rozdělila druhý mód. To vysvětluje i vlastní frekvenci 454 Hz zachycenou ve směru x, která neodpovídá výpočtu ani ostatním měřením. Naměřená FRF pro závěs přiblížená na druhý mód je vynesena v grafu 4.12.



Graf 4.12: Naměřená FRF pro závěs přiblížení na první dva módy

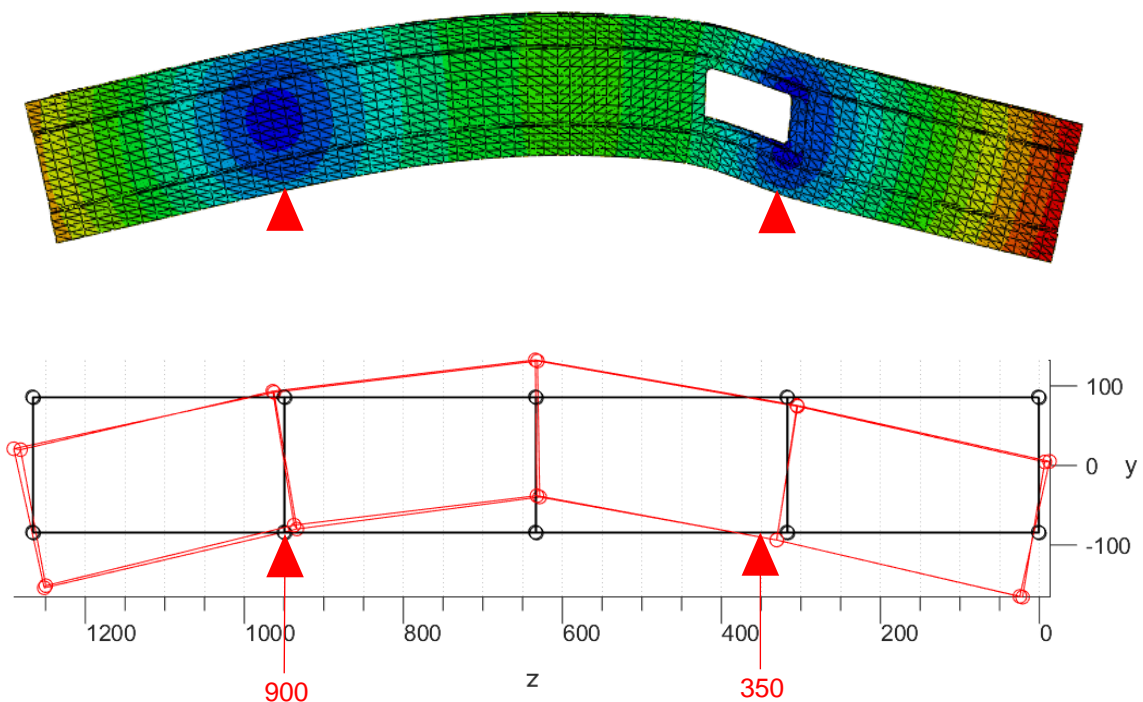
Uložení použitá v rámci prvního měření nejsou ideální. Pružiny generují nežádoucí buzení, rozměry a hmotnost dílce omezují možnosti závěsu a vysoká tuhost podložek ovlivňuje modální parametry. Jako nejlepší z použitých uložení se jeví pryžové podložky, které ovlivnily modální parametry nejméně.

4.6 Druhá sada experimentů

V rámci druhé sady experimentů byly zkoumány možnosti snížení vlivu okrajových podmínek na modální parametry přesunem podložek do uzlových bodů a snížením jejich tuhosti.

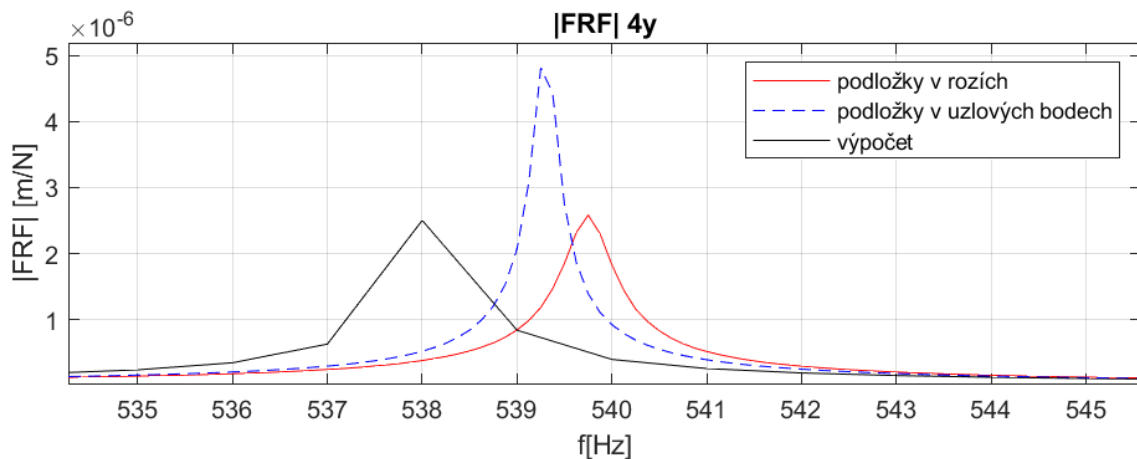
4.6.1 Přesun podložek do uzlových bodů

Jedním ze způsobů snížení vlivu uložení na modální parametry uvedeným v literatuře je umístění podložek do uzlových bodů struktury, jak je naznačeno na obrázku 4.16. Tento způsob uložení byl vyzkoušen na pryžových podložkách, které se po vyhodnocení první sady měření jeví jako nejlepší uložení z vyzkoušených.

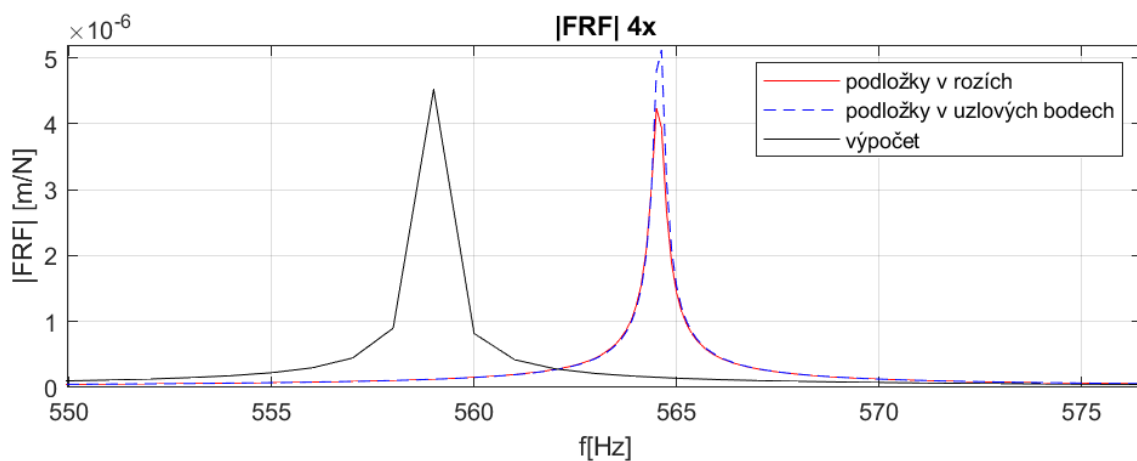


Obrázek 4.16: Umístění podpor do uzlových bodů prvního módu

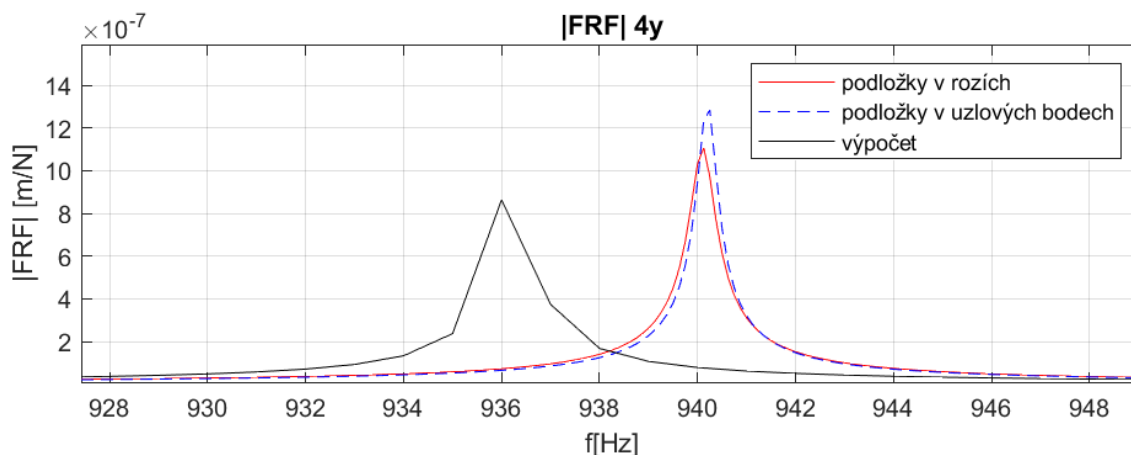
Podložky byly umístěny do uzlových bodů prvního ohybového módu, jejich poloha je zaznačena na obrázku 4.16. Grafy 4.13 až 4.15 zobrazují porovnání naměřené FRF pro umístění pryžových podložek do uzlových bodů a rohů s vypočtenou FRF pro první tři módy. V tabulce 4.7 je uvedeno porovnání modálních parametrů.



Graf 4.13: Porovnání uložení v uzlových bodech 1. mód



Graf 4.14: Porovnání uložení v uzlových bodech 2. mód



Graf 4.15: Porovnání uložení v uzlových bodech 3. mód

Tabulka 4.7: Porovnání modálních parametrů pro přesun do uzlových bodů

Uložení	f_{rb} / f_{def}	Vlastní frekvence [Hz]			Poměrný útlum [%]			Průměrný rozdíl vl. frekvencí
		1.mod	2.mod	3.mod	1.mod	2.mod	3.mod	
Pryžové podložky rohy	4%	539,7	564,5	940,1	0,0463	0,0332	0,0332	4,10
Pryžové podložky uzlové body	2%	539,3	564,6	940,3	0,0232	0,0332	0,0199	3,59
Abaqus		538,2	559,0	936,3				

Z grafů 4.13 až 4.15 a tabulky 4.7 lze soudit, že se vliv uložení na modální parametry umístěním podložek do uzlových bodů snížil. Tlumení se u prvního ohybového módu snížilo na polovinu. Na tlumení druhého ohybového módu neměla změna umístění podpor téměř žádný vliv, ačkoliv jsou uzlové body druhého módu v téměř stejné poloze jako u prvního. To může být zapříčiněno tím, že se tvar druhého módu ohýbá v rovině z-x. Tlumení třetího módu se snížilo o jednu třetinu, navzdory tomu, že podložky nebyly umístěny přímo do uzlového bodu tohoto módu. Třetí mód je torzní a jeho uzlový bod se nachází blízko středu dílce. Podložky tedy byly z rohů přesunuty blíže tomuto uzlovému bodu, což také mělo příznivý vliv na tlumení. Vlastní frekvence byly ovlivněny nepatrně.

4.6.2 Snížení tuhosti podložek

Z rešerše i prvního měření je zřejmá závislost vlivu uložení na modální parametry a tuhosti podložek. V rámci druhé sady měření byla ověřena možnost snížení tuhosti podložek zmenšením plochy, kterou smykadlo dosedá na podložky a také změnou materiálu podpor. Závislost tuhosti na ploše a modulu pružnosti materiálu je zřejmá ze vztahu 4.9.

$$k = \frac{ES}{l} \quad (4.9)$$

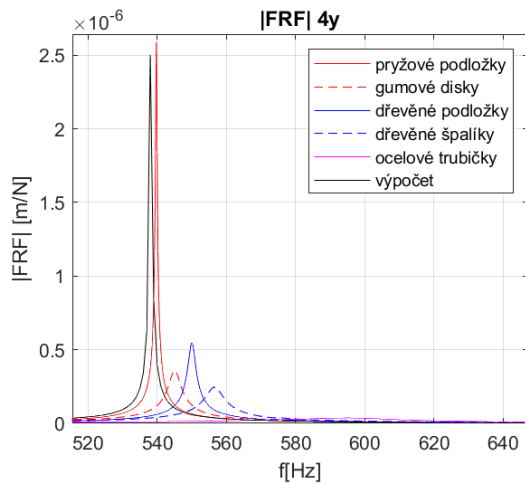
Ověření možnosti snížit vliv podpor na modální parametry zmenšením plochy bylo provedeno porovnáním FRF pro gumové podložky $S = 625\text{mm}^2$ a gumové disky $S = 5000\text{mm}^2$ a FRF pro dřevěné špalíky $S = 1750\text{mm}^2$ a dřevěné podložky $S = 625\text{mm}^2$. Také byly použity ocelové trubičky, která mají sice malou plochu, ale vysoký modul pružnosti oproti dřevu a pryži. Jednotlivá uložení jsou zobrazena na obrázku 4.17.



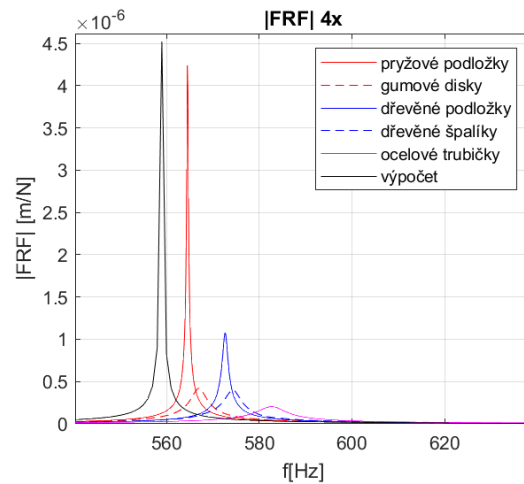
Obrázek 4.17: Uložení – z levého horního rohu: pryžové podložky, gumové disky, dřevěné podložky, dřevěné špalíky, ocelové trubičky

Porovnání FRF pro jednotlivá uložení s různou plochou je zobrazeno v grafech 4.16 až 4.18. V rámci zobrazených prvních tří módů lze pozorovat snížení vlastních frekvencí směrem blíže k výpočtové se snižující se plochou podložek. Zároveň je možné pozorovat snížení tlumení se zmenšením plochy

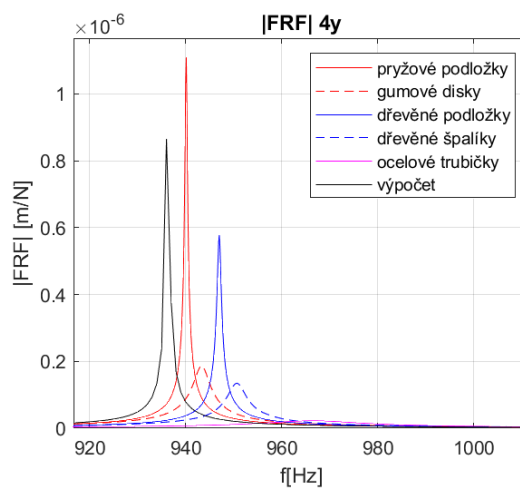
podložek. Ocelové trubičky se ukázaly být nevhodné, navzdory jejich malé ploše byly jejich FRF z použitých uložení nevíce zatlumené a vlastní frekvence byly nejvyšší. Zmenšení plochy podložek má tedy příznivý vliv na modální parametry, ovšem materiál podložek se zdá mít na modální parametry větší vliv.



Graf 4.16: Porovnání 1.mód



Graf 4.17: Porovnání 2.mód



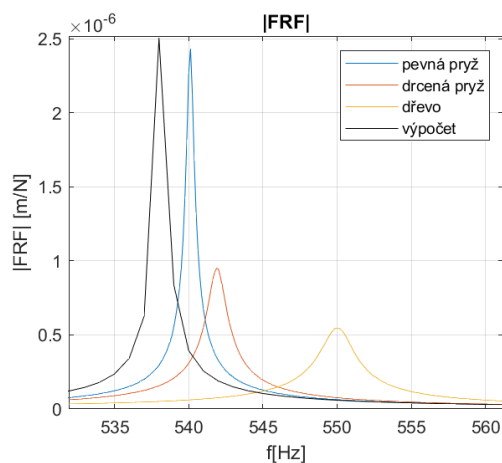
Graf 4.18: Porovnání 3.mód

Vliv změny tuhosti podložek pomocí změny materiálu byl ověřen měřením na stejně velkých podložkách (25x25x15 mm) z drcené pryže, pevné pryže a dřeva. Jednotlivé podložky jsou zobrazeny na obrázku 4.18.

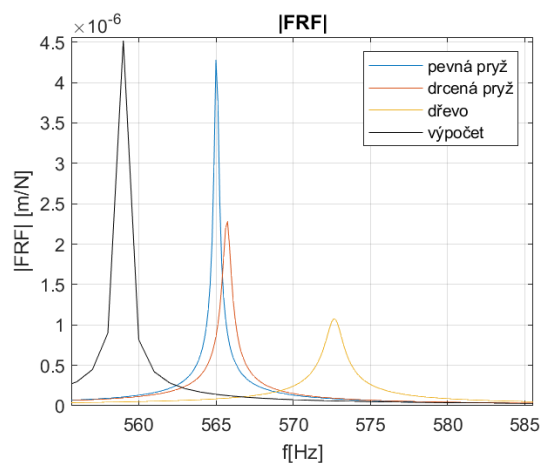


Obrázek 4.18: Podložky – zleva: pevná pryž, drcená pryž, dřevo

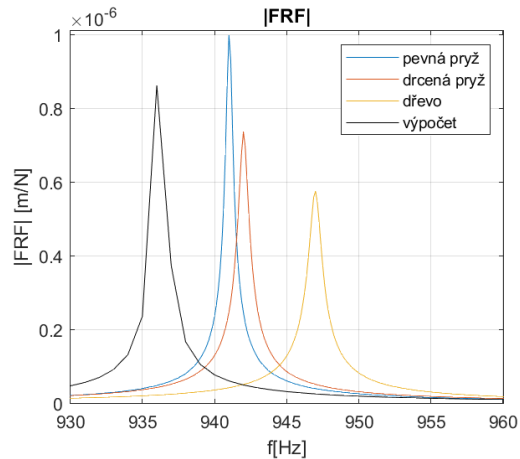
V grafech 4.19 až 4.21 je zobrazeno porovnání FRF pro jednotlivé materiály. Je patrné, že se snižujícím se modulem pružnosti materiálu E se, podobně jako při zmenšování plochy, snižuje i měřená vlastní frekvence směrem k výpočtové. Tlumení také se snižujícím se modulem pružnosti materiálu klesá.



Graf 4.19: Porovnání 1.mód



Graf 4.20: Porovnání 2.mód


Graf 4.21: Porovnání 3.mód

Zmenšením plochy podložek a snížením jejich modulu pružnosti E změnou materiálu lze dosáhnout efektivního snížení tuhosti podložek. Nižší tuhost podložek má pak menší vliv na modální parametry. Samozřejmě tyto možnosti mají své omezení v podobě meze pružnosti materiálu podložek.

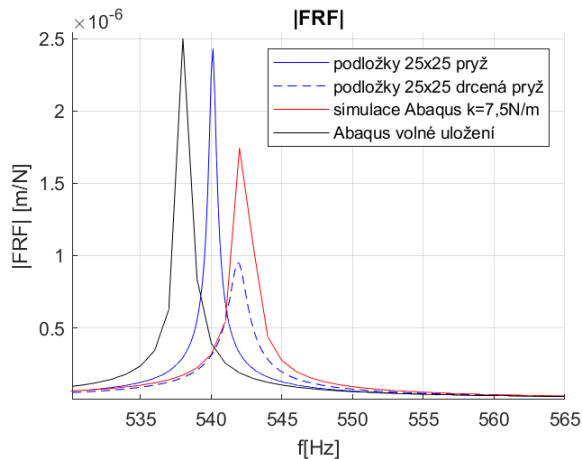
4.7 Porovnání simulace podložek s měřením

V rámci analytické části této práce byla uvedena i možnost simulace podložek v programu Abaqus. Simulace podložek byla provedena pomocí elementu typu foundation. Pro porovnání s měřením na podložkách byla vypočtena tuhost podložek pomocí vztahu 4.9. Modul pružnosti dřeva byl odhadnut na základě informací uvedených ve zdroji [23] a [24] modul pružnosti pryže na základě informací ve zdroji [25]. Modul pružnosti a vypočtená tuhost podložek je uvedena v tabulce 4.8.

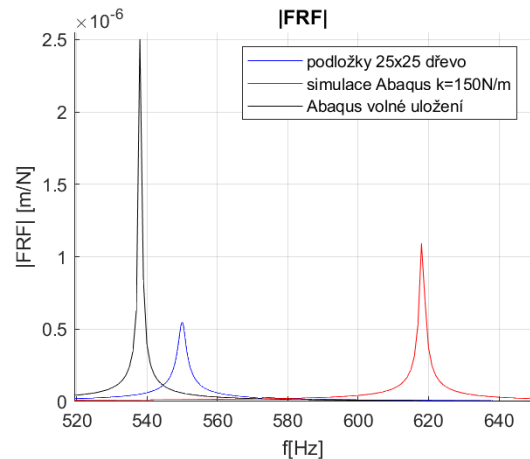
Tabulka 4.8: Modul pružnosti a tuhost podložek

Materiál	Modul pružnosti E [MPa]	Tuhost k [N/m]	Tuhost na plochu k/S [N/mm ³]
Dřevo	900	150	60
Pryž	45	7,5	3

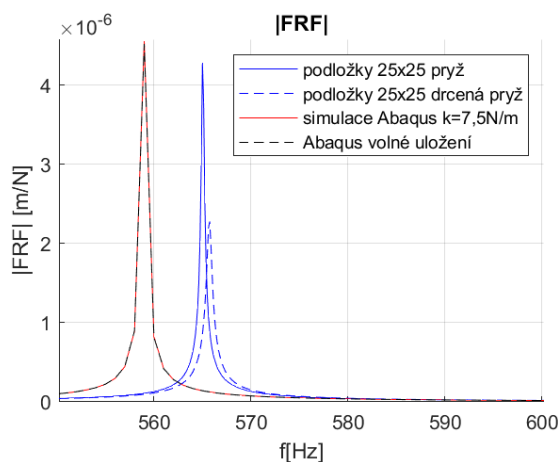
V grafech 4.22 až 4.27 je vynesena FRF vždy pro simulaci uložení o tuhosti odpovídající přibližné tuhosti podložek použitých při měření, FRF z tohoto měření a FRF pro výpočet za volných okrajových podmínek. Je zde patrných hned několik problémů. Zatímco pro simulaci nižší tuhosti podložek je FRF ze simulace podobná té naměřené, FRF pro simulaci vyšší tuhosti už výrazně neodpovídá naměřené FRF. Navíc v rámci simulace je zahrnuta tuhost jen ve svislém směru, což u vyšší zavedené tuhosti znamená prohození prvních dvou módů, jak je patrné z grafů 4.23 a 4.25.



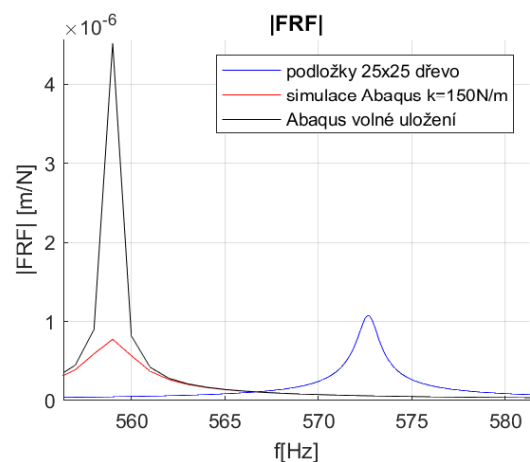
Graf 4.22: Porovnání simulace podložek $k=7,5\text{N/m}$ 1. mód



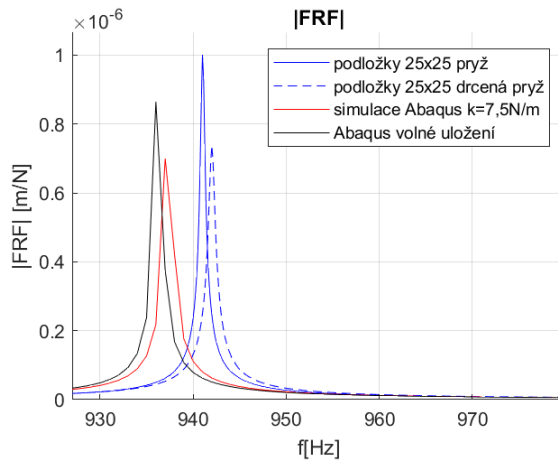
Graf 4.23: Porovnání simulace podložek $k=150\text{N/m}$ 1. mód



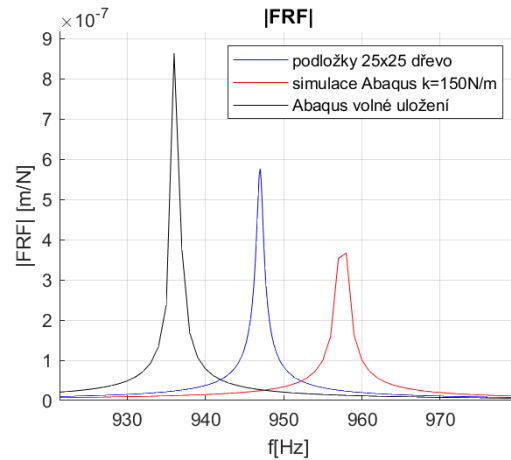
Graf 4.24: Porovnání simulace podložek $k=7,5\text{N/m}$ 2. mód



Graf 4.25: Porovnání simulace podložek $k=150\text{N/m}$ 2. mód



Graf 4.26: Porovnání simulace podložek $k=7,5\text{N/m}$ 3. mód



Graf 4.27: Porovnání simulace podložek $k=150\text{N/m}$ 3. mód

Provádění výpočtové modální analýzy se zahrnutím podpor je náročnější než za volných okrajových podmínek. Je náročné určit tuhost tak, aby odpovídala tuhosti podložek. Také pro vyšší tuhosti podpor (a tím pádem výrazně ovlivněné vlastní frekvence) je znát problém s přidáním tuhosti podpory pouze ve směru y , nejedná se tedy o přesnou simulaci reálné podpory. Pro přesnější simulaci podpor by bylo třeba udělat další výzkum. V rámci rozsahu této práce je tento způsob nevhodný.

5 Vyhodnocení vlivu způsobu uložení

Z porovnání naměřených a vypočtených FRF v rámci této práce je zřejmé, že okrajové podmínky mají vliv na modální parametry zvoleného strojního dílce. Uložení s vyšší tuhostí jako jsou gumové disky a dřevěné špalíky výrazně zvyšují vlastní frekvence a poměrný útlum. Tlumení je ovlivněno změnou okrajových podmínek výrazně. Nejlepším z použitých uložení pro přiblížení se volnému uložení jsou pryžové podložky, jejich přesunem do uzlových bodů je možné ještě snížit jejich vliv na tlumení.

Pro uložení, která se neosvědčila z důvodu své vysoké tuhosti (gumové disky a dřevěné špalíky), byla navržena úprava snížením jejich tuhosti. Snížení tuhosti podložek bylo provedeno zmenšením jejich plochy a změnou materiálu. Podložky upravené oběma způsoby byly v rámci druhé sady měření otestovány. Vlivem snížení tuhosti podložek byl snížen i vliv uložení na modální parametry v obou případech, nicméně změna materiálu se zdá být účinnější. Jedná se o vhodné způsoby úpravy podložek. Zhodnocení realizovaných uložení a jejich vlivu na modální parametry je uvedeno v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Zhodnocení realizovaných uložení

Uložení	Náročnost provedení	Ovlivnění modálních parametrů	Nevýhody	Hodnocení
Gumové disky	●○○	●●○	-	možné
Dřevěné špalíky	●○○	●●●	-	nevhodné
Pružiny	●○○	●○○	Přidané buzení	možné
Závěs	●●○	●●○	Přidaná hmota	nevhodné
Dřevěné podložky	●○○	●●○	-	nevhodné
Pryžové podložky	●○○	●○○	-	vhodné
Ocelové trubičky	●○○	●●●	-	nevhodné
Podložky z drcené pryže	●○○	●○○	-	vhodné

6 Závěr

V rámci této práce byla provedena rešerše možností aproximace volného uložení při verifikaci výpočtového modelu pomocí experimentální modální analýzy. Součástí rešerše jsou i zdroje zabývající se vlivem okrajových podmínek na modální parametry. Zdroje uvádějí různé způsoby realizace volného uložení, mezi nejčastější patří závěs. Obecně je doporučeno použít uložení s nízkou tuhostí tak, aby platilo pravidlo 1:10. Uložení má zejména velký vliv na tlumení, který se dá snížit umístěním podpor do uzlových bodů módu.

V praktické části práce byla pro zkoumání vlivu uložení na modální parametry zvolena modelová strojní součást tak, aby se svými rozměry a vlastnostmi blížila reálné strojní součásti. Na základě tohoto požadavku bylo vybráno litinové smykadlo.

Náplní analytické části práce bylo provedení výpočtové modální analýzy v programu Abaqus s prozkoumáním možnosti přidat tuhost podpor do výpočtu. Možnost přidání tuhosti podložek do výpočtu se ukázala být problematická a pro její zpřesnění by byl třeba další výzkum. V rámci experimentální části pak byla provedena experimentální modální analýza ve dvou sadách. První sada experimentů zahrnuje uložení zvolená na základě dostupných možností a rešerše. Druhá sada experimentů pak obsahuje upravená uložení pro snížení jejich vlivu na modální parametry.

Porovnáním FRF z jednotlivých experimentů a FRF získaných výpočtem byl zhodnocen vliv jednotlivých uložení na modální parametry. Vliv uložení na modální parametry je výrazný. Jako nejvhodnější uložení bylo vyhodnoceno uložení na pryžových podložkách v uzlových bodech. Vhodným způsobem úpravy podložek pro snížení jejich vlivu na modální parametry je snížení tuhosti podložek zmenšením dosedající plochy a změnou materiálu.



Seznamy

Seznam literatury

- [1] DØSSING, Ole. *Structural Testing, Part I: Mechanical Mobility Measurements*. Dánsko: Brüel & Kjær, 1988.
- [2] BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: část Modální zkoušky*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2758-2.
- [3] DØSSING, Ole. *Part II: Modal Analysis and Simulation*. Dánsko: Brüel & Kjær, 1988.
- [4] *The Fundamentals of Modal Testing: Application Note 243 - 3* [online]. U.S.A.: Agilent Technologies, 2000 [cit. 07.02.2022]. 5954-7957E. Dostupné z: <https://www.modalshop.com/techlibrary/Fundamentals%20of%20Modal%20Testing.pdf>
- [5] CARNE, Thomas G., D. Todd GRIFFITH a Miguel E. CASIAS. Support Conditions for Experimental Analysis. *Sound and Vibration* [online]. 2007, 10-16 [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/293128077_Support_conditions_for_experimental_modal_analysis
- [6] MCCONNELL, K.G. The elusive free-free boundary condition. *The Shock and Vibration Digest, vol. 38, no. 6* [online]. 2006 [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: link.gale.com/apps/doc/A152997321/AONE?u=anon~4ed7b4dd&sid=googleScholar&xid=30c860c5
- [7] GEWETH, C.A., S.K. BAYDOUN, F. SAATI, K. SEPAHVAND a S. MARBURG. Effect of boundary conditions in the experimental determination of structural damping. *Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 146* [online]. 2021 [cit. 2021-11-14]. ISSN 08883270. Dostupné z: [doi:10.1016/j.ymssp.2020.107052](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107052)
- [8] BAHARI, A. R., M. A. YUNUS, M. N. Abdul RANI, W. I. I. Wan Iskandar MIRZA a Haizuan A. R. a comparative study of the vibrational effects



- on the boundary conditions of a slender beam. *AIP Conference Proceedings 2059* [online]. AIP Publishing, 2019, s. 020054-1–020054-9 [cit. 2022-01-16]. ISBN 978-0-7354-1787-8. Dostupné z: doi:10.1063/1.5085997
- [9] AVITABILE, Pete. Will the support mechanism have any effect on FRFs?. *Experimental Techniques, vol. 35* [online]. 2011, s. 1-2 [cit. 2022-01-18]. ISSN 07328818. Dostupné z: doi:10.1111/j.1747-1567.2010.00701.x
- [10] SMITH, S., J. C. BILBAO-LUDENA, S. CATALFAMO, M. R. W. BRAKE, P. REUß a C. W. SCHWINGSHACKL. The Effects of Boundary Conditions, Measurement Techniques, and Excitation Type on Measurements of the Properties of Mechanical Joints. *Nonlinear Dynamics, Volume 1* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 415-431 [cit. 2022-01-16]. ISBN 978-3-319-15220-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-15221-9_36
- [11] REMENNIKOV, Alex a Sakdirat KAEWUNRUEN. Investigation of vibration characteristics of prestressed concrete sleepers in free-free and in-situ conditions. *Australian Structural Engineering Conference* [online]. 2005 [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <http://ro.uow.edu.au/engpapers/284>
- [12] LANGER, P., K. SEPAHVAND, C. GUIST, J. BÄR, A. PELOW a S. MARBURG. Matching experimental and three dimensional numerical models for structural vibration problems with uncertainties. *Journal of Sound and Vibration, vol. 417* [online]. 2018, s. 294-305 [cit. 2021-11-14]. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2017.11.042
- [13] GUNDLACH, J a Y GOVERS. Experimental modal analysis of aeroelastic tailored rotor blades in different boundary conditions. *Journal of Physics: Conference Series, vol. 1356* [online]. 2019 [cit. 2022-01-10]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1356/1/012023
- [14] FREDÖ, Claes R. Re: Can soft foam be utilized for free-free support in experimental modal analysis?. In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2022-01-



- 17]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/post/Can-soft-foam-be-utilized-for-free-free-support-in-experimental-modal-analysis>
- [15] ÇEÇEN, Ferhat a Bekir AKTAŞ. Modal and harmonic response analysis of new CFRP laminate reinforced concrete railway sleepers. *Engineering Failure Analysis: Volume 127* [online]. 2021 [cit. 2021-11-14]. ISSN 13506307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2021.105471
- [16] SCHNEIDER, S., T. T. MALLAREDDY, D. J. ALARCÓN, R. KAMENZKY a P. BLASCHKE. Experimental Modal Analysis of Structures with Conventional Versus Contact-Free Suspension. *Special Topics in Structural Dynamics, Volume 5* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 149-156 [cit. 2022-01-09]. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. ISBN 978-3-319-75389-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-75390-4_13
- [17] AVITABILE, Pete. How free does a test need to be? Does it really matter that much?. *SEM Experimental Techniques* [online]. 2012 [cit. 2022-01-17]. Dostupné z: https://www.uml.edu/docs/aug12_tcm18-189914.pdf
- [18] FAYYADH, M.M. a H.A. RAZAK. The effect of support condition on dynamic parameters. *17th International Congress on Sound and Vibration* [online]. Cairo, 2010 [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <http://eprints.um.edu.my/id/eprint/9043>
- [19] DARDENO, Tina, Patrick LOGAN a Peter AVITABILE. Some Non-conventional Boundary Conditions (From Marshmallows to Plungers: Who Would Have Guessed). MAINS, Michael, ed. *Topics in Modal Analysis, Volume 10* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015, s. 67-78 [cit. 2022-01-18]. ISBN 978-3-319-15250-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-15251-6_8
- [20] SIMULIA. *Abaqus 6.14 Documentation*. 2014.
- [21] Modal analysis. In: *AdSimuTec* [online]. 2018 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://adsimutech.com/en/fem-cfd-simulation-engineering-services/structural-mechanics/resonance-frequency-modal-analysis>



- [22] *Measuring Vibration*. Dánsko: Brüel & Kjær, 1982.
- [23] Wood, Panel and Structural Timber Products - Mechanical Properties. In: *Engineering toolbox* [online]. 2011 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/timber-mechanical-properties-d_1789.html
- [24] GREEN, David W., Jerrold E. WINANDY a David E. KRETSCHMANN. Mechanical Properties of Wood. *Wood handbook—Wood as an engineering material*. Forest Products Laboratory, 1999.
- [25] Silicone Rubber. In: *AZO Materials* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=920>
- [26] MILÁČEK, Stanislav. *Modální analýza mechanických kmitů*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02333-8.



Seznam použitého softwaru

Abaqus 6.14

Matlab R2019b

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Koncept modálních parametrů [4].....	11
Obrázek 3.1: Závěs betonového pražce na pružinách [11].....	17
Obrázek 3.2: Závěs zkušební desky (5) na elastických šňůrách (4) [12]	17
Obrázek 3.3: Uložení na polyuretanové matraci [15]	17
Obrázek 3.4: Uložení na vlnitém molitanu [16]	17
Obrázek 4.1: Modelová strojní součást: smykadlo	20
Obrázek 4.2: Vnější rozměry smykadla	21
Obrázek 4.3: Model smykadla v programu Abaqus – orientace os	22
Obrázek 4.4: Set bodů odpovídajících měřicím bodům	23
Obrázek 4.5: Spring	24
Obrázek 4.6: Foundation	24
Obrázek 4.7: Měřicí aparatura	27
Obrázek 4.8: Měřicí model.....	28
Obrázek 4.9: Pryžové podložky	31
Obrázek 4.10: Pryžové disky	31
Obrázek 4.11: Dřevěné špalíky.....	32
Obrázek 4.12: Pružiny	32
Obrázek 4.13: Závěs.....	32
Obrázek 4.14: Model smykadla s hmotou magnetu	36
Obrázek 4.15: Smykadlo v závěsu.....	36
Obrázek 4.16: Umístění podpor do uzlových bodů prvního módu	38
Obrázek 4.17: Uložení – z levého horního rohu: pryžové podložky, gumové disky, dřevěné podložky, dřevěné špalíky, ocelové trubičky	41
Obrázek 4.18: Podložky – zleva: pevná pryž, drcená pryž, dřevo.....	43



Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Materiálové vlastnosti smykadla.....	21
Tabulka 4.2: Prvky měřící aparatury	27
Tabulka 4.3: Porovnání vlastních tvarů.....	33
Tabulka 4.4: Porovnání vlastních frekvencí a poměrného útlumu.....	33
Tabulka 4.5: Porovnání získaných modálních parametrů	36
Tabulka 4.6: Porovnání vlastních frekvencí po úpravě výpočtu	37
Tabulka 4.7: Porovnání modálních parametrů pro přesun do uzlových bodů	40
Tabulka 4.8: Modul pružnosti a tuhost podložek	44
Tabulka 5.1: Zhodnocení realizovaných uložení	47

Seznam grafů

Graf 3.1: Pozorované změny vlastní frekvence v závislosti na poměru frekvencí [5].....	15
Graf 3.2: Pozorované změny tlumení v závislosti na poměru frekvencí [5]..	15
Graf 4.1: Porovnání FRF pro Foudation a Spring	24
Graf 4.2: Imaginární FRF	29
Graf 4.3: Reálná FRF.....	29
Graf 4.4: FRF vyznačení rezidua	30
Graf 4.5: Porovnání naměřené a vyrovnané FRF	31
Graf 4.6: Zobrazení FRF v bodě 4 ve směru x pro 1. sadu uložení	34
Graf 4.7: Přiblížení 2. módu	35
Graf 4.8: Přiblížení 3. módu	35
Graf 4.9: Zobrazení FRF v bodě 4 ve směru y pro 1. sadu uložení	35
Graf 4.10: Přiblížení 1. módu	35
Graf 4.11: Přiblížení 3. módu	35
Graf 4.12: Naměřená FRF pro závěs přiblížení na první dva módy	37
Graf 4.13: Porovnání uložení v uzlových bodech 1. mód.....	39
Graf 4.14: Porovnání uložení v uzlových bodech 2. mód.....	39
Graf 4.15: Porovnání uložení v uzlových bodech 3. mód.....	40



Graf 4.16: Porovnání 1.mód.....	42
Graf 4.17: Porovnání 2.mód.....	42
Graf 4.18: Porovnání 3.mód.....	42
Graf 4.19: Porovnání 1.mód.....	43
Graf 4.20: Porovnání 2.mód.....	43
Graf 4.21: Porovnání 3.mód.....	44
Graf 4.22: Porovnání simulace podložek $k=7,5\text{N/m}$ 1. mód.....	45
Graf 4.23: Porovnání simulace podložek $k=150\text{N/m}$ 1. mód.....	45
Graf 4.24: Porovnání simulace podložek $k=7,5\text{N/m}$ 2. mód.....	45
Graf 4.25: Porovnání simulace podložek $k=150\text{N/m}$ 2. mód.....	45
Graf 4.26: Porovnání simulace podložek $k=7,5\text{N/m}$ 3. mód.....	46
Graf 4.27: Porovnání simulace podložek $k=150\text{N/m}$ 3. mód.....	46

Seznam elektronických příloh

Text práce.pdf

Příloha 1: Skript pro zpracování dat z Abaqusu na FRF.m

Příloha 2: Skript pro zpracování naměřených dat.m