



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

**Využití laserové vibrometrie při dynamických rázových
experimentech**

Bakalářská práce

Studijní program:

Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor:

Technologie údržby letadel

Vedoucí práce:

Ing. Jan Šleichrt

Ing. Tomáš Fíla, Ph.D.

Vojtěch Kotek

Praha 2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K618..... Ústav mechaniky a materiálů

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Vojtěch Kotek

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – TUL – Technologie údržby letadel

Název tématu (česky): **Využití laserové vibrometrie při dynamických rázových experimentech**

Název tématu (anglicky): Laser Vibrometry in Dynamic Impact Experiments

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Laserová vibrometrie je interferometrická metoda pro měření mechanických vibrací a stanovení odezvy těles na dynamické zatížení. Bakalářská práce bude zaměřena na osvojení si práce s laserovým vibrometrem a na jeho použití v dynamických rázových experimentech.
- V rámci bakalářské práce bude metoda laserové vibrometrie použita pro stanovení mechanické odezvy panelu při rázovém penetračním zatížení pomocí metody dělené Hopkinsonovy tyče. Instrumentovaný penetrační experiment bude vhodně reprezentovat děje srovnatelné např. se srážkou letadla s ptákem nebo náraz ve vysoké rychlosti.
- Cílem práce je využít metody laserové vibrometrie na měření posunutí zadní stěny panelu vystaveného nárazu projektilu v nízkých a středních rychlostech deformace (do dopadové rychlosti přibližně 100 m/s). Výsledky získané pomocí laserového vibrometru budou porovnány s výsledky naměřenými během experimentu ostatními snímači (např. výsledky tenzometrických měření, zpracované obrázky z rychloběžné kamery apod.).



Rozsah grafických prací: není stanoven

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Castellini P., Tomasini E. P., Laser Doppler Vibrometry: A Multimedia Guide to its Features and Usage, Springer, 2020, ISBN 978-3-662-61318-4

De Silva Clarence W., Vibration Monitoring, Testing, and Instrumentation, Taylor & Francis, 2007, ISBN 978-1-420-05319-7

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Šleichrt
Ing. Tomáš Fíla, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce:

27. května 2021

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce:

8. srpna 2022

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu mechaniky a materiálů

doc. Ing. Pavel Hruběš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Vojtěch Kotek
jméno a podpis studenta

V Praze dne27. května 2021



Abstrakt

Tato předkládaná bakalářská práce se zabývá využitím laserové Dopplerovy vibrometrie při dynamických experimentech. V práci jde o osvojení si této technologie. Jsou zde prezentovány experimenty, které demonstrují například srážku ptáka s letadlem, nebo měření spektrální analýzy na 3D tištěném dronu. Pro ověření správnosti měření jsou experimenty porovnány s daty z numerických simulací softwaru Comsol Multiphysic, Ansys, a s ostatními měřicími metodami, například odporovou tenzometrií.

Klíčová slova:

dělená Hopkinsonova tyč, dron, laserová vibrometrie, rezonanční frekvence, spektrální analýza



Abstract

This presented bachelor thesis deals with the use of laser Doppler vibrometry in dynamic experiments. The thesis is about the adoption of this technology with subsequent application in the aerospace industry. Presented experiments that demonstrate, for example, a bird-aircraft collision, or a spectral analysis measurement on a 3D printed drone. To verify the accuracy of the measurements, the experiments are compared with data from numerical simulations of the Comsol Multiphysic software, Ansys, and with other measurement methods such as resistive strain gauging.

Keywords:

split Hopkinson bar, drone, laser vibrometry, resonant frequency, spectral analysis



Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Janu Šleichrtovi a Ing. Tomáši Fílovi, Ph.D. za jejich vedení, odborné rady a připomínky, které mi v průběhu této práce poskytovali. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ladislavu Musilovi, Ph.D. za vypracování modelu v softwaru Comsol Multhiphysic. Děkuji taktéž Ústavu termomechaniky AV ČR, v. v. i, za poskytnutí vybavení použité pro realizaci experimentální části této práce.

Poděkování patří také mé rodině a přátelům, kteří mi byli oporou nejen při psaní této práce, ale i po celou dobu studia.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Využití laserové vibrometrie při dynamických rázových experimentech vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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).

Praze dne 6. srpna 2022

Podpis:



1. Obsah

| | |
|-------------------------------------------------------------|---------------|
| Úvod | - 1 - |
| 2. Teoretická část..... | - 3 - |
| 1.1 Mechanické kmitání | - 3 - |
| 1.1.1 Kmitavý pohyb | - 3 - |
| 1.1.2 Kinematika harmonického pohybu | - 5 - |
| 1.1.3 Dynamika harmonického pohybu..... | - 6 - |
| 1.1.4 Kyvadlo..... | - 8 - |
| 1.1.5 Fáze harmonického pohybu..... | - 11 - |
| 1.1.6 Tlumené kmitání | - 13 - |
| 1.2 Laserová Dopplerova vibrometrie (LDV)..... | - 18 - |
| 1.2.1 Historie vibrometrie | - 18 - |
| 1.2.2 Princip měření | - 18 - |
| 1.2.3 Dopplerův jev..... | - 19 - |
| 1.2.4 Interferometrie | - 20 - |
| 1.2.5 Dopplerův frekvenční posun | - 20 - |
| | - 21 - |
| 1.2.6 Základní princip a optické nastavení vibrometru | - 21 - |
| 1.2.7 Optimalizace nastavení vibrometru..... | - 22 - |
| 1.3 Využití vibrometrie..... | - 23 - |
| 1.3.1 V letectví..... | - 23 - |
| 1.3.2 Lopatky turbíny | - 23 - |
| 1.3.3 Kontrola nýtů | - 24 - |
| 1.3.4 V dopravě | - 24 - |
| 1.3.5 Testování NVH | - 24 - |
| 1.4 Další metody měření | - 25 - |
| 1.4.1 Odporová tenzometrie | - 25 - |
| 1.4.2 Fóliový tenzometr | - 26 - |
| 1.4.3 Měření DIC | - 26 - |
| 3. Experimentální část | - 28 - |
| 3.1 Vybavení použité pro experimenty | - 28 - |
| 3.2 Úvod do experimentální části | - 33 - |



| | | |
|-----------|---------------------------------------------|---------------|
| 3.3 | Měření vibrací na nosníku | - 33 - |
| 3.3.1 | Příprava experimentu..... | - 33 - |
| 3.3.2 | Měření na nosníku | - 35 - |
| 3.3.3 | Vyhodnocení experimentu | - 35 - |
| 3.3.4 | Závěr | - 38 - |
| 3.4 | Penetrační experiment | - 39 - |
| 3.4.1 | Příprava experimentu část 1 | - 39 - |
| 3.4.2 | Měření experimentu část 1 | - 41 - |
| 3.4.3 | Vyhodnocení části 1 | - 42 - |
| 3.4.4 | Měření penetrace panelu | - 44 - |
| 3.4.5 | Příprava experimentu část 2 | - 44 - |
| 3.4.6 | Měření experimentu..... | - 46 - |
| 3.4.7 | Vyhodnocení..... | - 46 - |
| 3.5 | Spektrální analýza 3D tištěného dronu | - 47 - |
| 3.5.1 | Příprava experimentu | - 47 - |
| 3.5.2 | Měření na dronu | - 48 - |
| 3.5.3 | Vyhodnocení..... | - 50 - |
| 3.5.4 | Závěr | - 51 - |
| 4. | Závěr | - 52 - |
| 4.1 | Využití v letecké dopravě | - 54 - |
| 5. | Literatura | - 55 - |



Seznam Obrázků:

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Obrázek 1: Příklady mechanického oscilátoru, převzato z [1] | - 3 - |
| Obrázek 2: Kmit kyvadla, převzato z [2] | - 4 - |
| Obrázek 3: Časový diagram, převzato z [2] | - 4 - |
| Obrázek 4: Kmitavý pohyb znázorněný na kružnici, převzato z [2] | - 5 - |
| Obrázek 5: Mechanický oscilátor, převzato z [2] | - 7 - |
| Obrázek 6: Pohyb kyvadla, převzato z [1] | - 9 - |
| Obrázek 7: Fyzikální kyvadlo, převzato z [1] | - 10 - |
| Obrázek 8: Počáteční fáze kmitu. Horní fáze je kladná, spodní záporná, převzato z [2] .. | - 12 - |
| Obrázek 9: Tlumené kmitání, převzato z [2] | - 13 - |
| Obrázek 10: Časový diagram tlumeného kmitání, převzato z [2] | - 14 - |
| Obrázek 11: Tlumené kmitání při různých hodnotách součinitele tlumení, převzato z [1]. | - 16 - |
| Obrázek 12: Kmitání volně na vzduchu, převzato z [1] | - 16 - |
| Obrázek 13: Kmitání s přidaným odporem, převzato z [1] | - 16 - |
| Obrázek 14: Časový diagram volného kmitání, převzato z [1] | - 17 - |
| Obrázek 15: Časový diagram kmitání s přidaným odporem, převzato z [1] | - 17 - |
| Obrázek 16: Odražené světlo od vibrujícího povrchu, převzato z [5] | - 19 - |
| Obrázek 17: Nastavení laserového interferometru zobrazující laser, převzato z [5] | - 20 - |
| Obrázek: 18 Frekvenční posun, převzato z [5] | - 21 - |
| Obrázek 19: Základní princip měření vibrometrie, převzato z [5] | - 21 - |
| Obrázek 20: Rozložení rozptylu světla na povrchu, převzato z [11] | - 22 - |
| Obrázek 21: Měření vibrací na lopatce, převzato z [12] | - 23 - |



| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Obrázek 22: Měření NVH na dveřích automobilu, převzato z [14] | - 25 - |
| Obrázek 23: Fóliový tenzometr, převzato z [15]..... | - 26 - |
| Obrázek 24: Typické uspořádání pro dvojrozměrnou DIC, převzato z [16] | - 26 - |
| Obrázek 25: Posun podmnožiny na vzorku, převzato z [16] | - 27 - |
| Obrázek 26: Řídící jednotka | - 28 - |
| Obrázek 27: Sensorová hlavice..... | - 28 - |
| Obrázek 28: Vstupní modul CLV.M2000 | - 29 - |
| Obrázek 29: Dekódovací modul CLV-M030..... | - 30 - |
| Obrázek 30: Rozsahy měření..... | - 30 - |
| Obrázek 31: Výstupní modul CKV-M002 | - 31 - |
| Obrázek 32: Mezní frekvence filtru | - 31 - |
| Obrázek 33: Sensorová hlava CLV-700 | - 32 - |
| Obrázek 34: Optické nastavení sensorové hlavy..... | - 32 - |
| Obrázek 35: Princip měření. Nosník použitý při experimentu..... | - 34 - |
| Obrázek 36: Optimální signál pro měření | - 34 - |
| Obrázek 37: Nedostatečný signál pro měření..... | - 34 - |
| Obrázek 38: Naměřené rychlosti kmitání nosníku..... | - 35 - |
| Obrázek 39: Model nosníku vytvořený v Comsol Multiphysic..... | - 36 - |
| Obrázek 40: Porovnání naměřených výsledků z vibrometru s výpočty z Comsolu..... | - 36 - |
| Obrázek 41: Odezvová spektrální analýza | - 37 - |
| Obrázek 42: Model v programu Ansys..... | - 37 - |
| Obrázek 43: Princip dělené Hopkinsonovy tyče..... | - 39 - |



| | |
|------------------------------------------------------------------|--------|
| Obrázek 44: Uchycení senzorových hlav..... | - 40 - |
| Obrázek 45: Princip uchycení senzorové hlavy pod úhlem..... | - 40 - |
| Obrázek 46: Měřené místo na puku..... | - 41 - |
| Obrázek 47: Princip měření..... | - 41 - |
| Obrázek 48: Porovnání rychlostí | - 42 - |
| Obrázek 49: Porovnání rychlostí po rozložení vln..... | - 43 - |
| Obrázek 50: princip měření na volném konci transmisní tyče | - 45 - |
| Obrázek 51: Princip uchycení senzorové hlavy | - 45 - |
| Obrázek 52: Porovnání napětí..... | - 46 - |
| Obrázek 53: Řídící jednotka | - 47 - |
| Obrázek 54: Schéma vibračního členu | - 48 - |
| Obrázek 55: Měřené nosníky..... | - 49 - |
| Obrázek 56: Spektrální analýza dronu..... | - 50 - |
| Obrázek 57: Zničený dron | - 51 - |



Seznam tabulek:

| | |
|-----------------------------------------------------------|--------|
| Tabulka 1: Porovnání rychlostí třech měření | - 38 - |
| Tabulka 2: Porovnání první vlastní frekvence nosníku..... | - 38 - |
| Tabulka 3: Porovnání rychlostí na podpoře vzorku | - 43 - |



Seznam symbolů a zkratek:

BNC – Vysokofrekvenční konektor

CLV - Compact laser vibrometer (Kompaktní laserový vibrometr)

DIC – Digitální korelace obrazu

FEM - Ověření modelu metodou konečných prvků (porovnání měření se simulací)

HeNe - Helium-neonový

HP – High pass filter (filtr horní propusti)

IR - Infračervený

LDV - Laser doppler vibrometer (Dopplerův laserový vibrometr)

LP – Low pass filter (filtr dolní propusti)

RSSI - Indikátor zpětného signálu

SNR - Signal to noise ratio (odstup signálu od šumu)



Úvod

Bakalářská práce pojednává o laserové vibrometrii, což je nedestruktivní a bezkontaktní měřicí metoda mechanických vibrací těles, při dynamickém zatížení.

Cílem této práce je experimentálně studovat účinky dynamického zatížení na zkoušená tělesa, tak abychom mohli tyto poznatky využít v budoucím výzkumu týkající se materiálů a struktur vhodných pro využití v letecké dopravě.

Osnova tohoto projektu je rozdělena do dvou hlavních částí, z nichž jedna je teoretická a druhá praktická. Teoretická část popisuje úvod do problematiky ve 3 kapitolách. První kapitola se zabývá teorií mechanického kmitání, jeho všeobecným shrnutím a popsáním problematiky kmitavého pohybu.

V následující kapitole je popsána problematika laserové Dopplerovy vibrometrie. Od základního principu fungování, přes nastavení vibrometru při experimentech, až po využití v různých odvětvích vědy a průmyslových aplikacích.

Třetí kapitola je věnována dalším měřicím metodám, které jsou využity v experimentech, nebo mohou být využity pro porovnání naměřených výsledků s vibrometrem. Mezi tyto metody, které jsou uvedeny v práci patří, např. odporová tenzometrie, kterou jsem využil u druhého experimentu.

V praktické části jsou popsány 3 experimenty. Prvním experimentem je měření vibrací vetknutého nosníku. Je to velmi jednoduchý experiment, který demonstruje například uchycení lopatek. Tento experiment je na ověření správnosti měření vibrometrem za pomoci porovnání výsledků s modelem vytvořeným v softwaru Comsol Multiphysics a modelem v softwaru Ansys.

Další experiment se zabývá měřením puku, který je vystaven dynamickému zatížení. Při tomto pokusu se stanovuje mechanická odezva panelu, který je penetrován za pomoci metody dělené Hopkinsonovy tyče. Instrumentovaný penetrační experiment reprezentuje srážku ptáka s letadlem.



Poslední experiment v této práci je zaměřen na spektrální analýzu 3D tištěné konstrukce dronu. V tomto pokusu je dron rozkmitán za pomoci elektromagnetického vibračního členu na určitou frekvenci při dané výchylce a je zkoumána odezva konstrukce.

Závěrem bakalářské práce je shrnutí poznatků získaných v průběhu experimentů. Dále je zde nastíněn budoucí směr zkoumání týkající se materiálů a konstrukcí pomocí laserové vibrometrie.

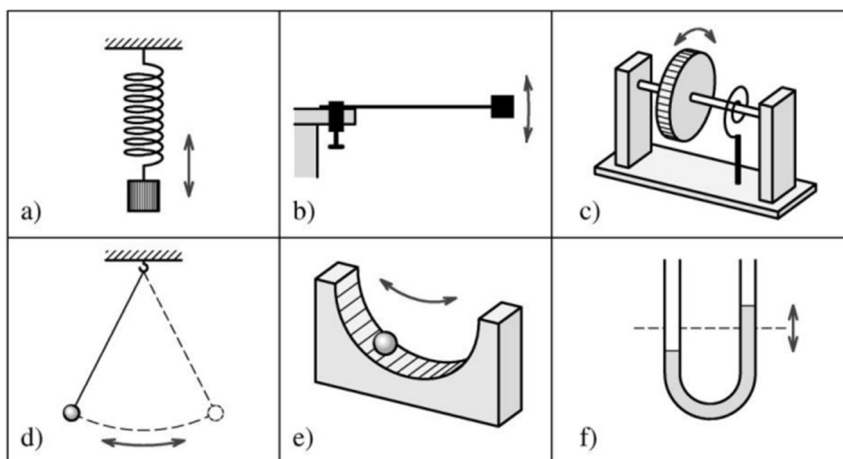
2. Teoretická část

1.1 Mechanické kmitání

Kmitání a vlnění patří k nejrozšířenějším jevům v přírodě i v technické praxi. Pro mechanické kmitání je charakteristickým znakem, že se těleso při pohybu neustále vrací do tzv. rovnovážné polohy. Jestliže těleso tento pohyb koná pravidelně, označujeme ho jako pohyb periodický [1, 2].

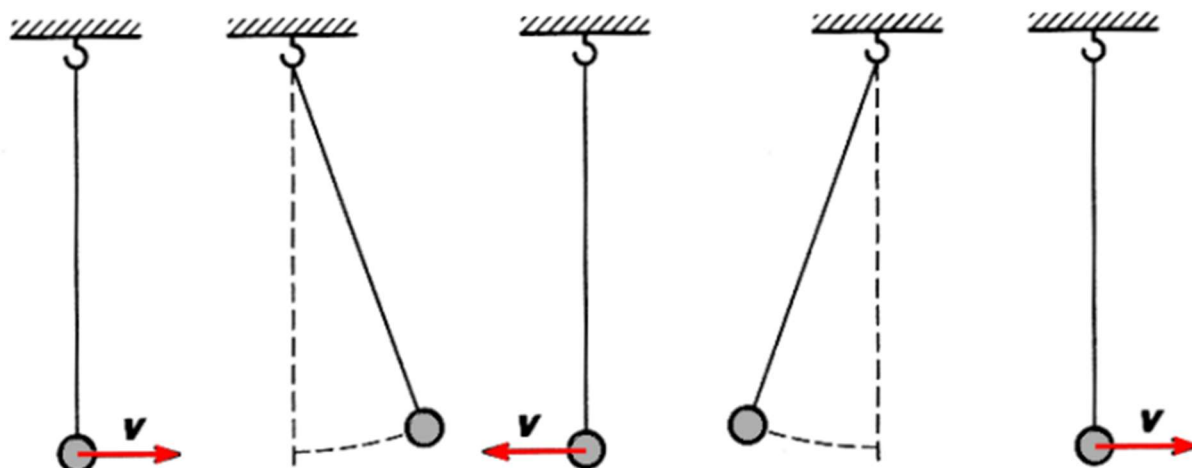
1.1.1 Kmitavý pohyb

Zařízení, které volně kmitá se nazývá mechanický oscilátor. Základní typy mechanických oscilátorů jsou zobrazeny na Obrázku 1. Příkladem mechanického oscilátoru je koule zavěšená na provaze, která představuje kyvadlo. Když je kyvadlo volně zavěšeno, tak se nachází v rovnovážné poloze. Při vychýlení z této rovnovážné polohy působí na kouli výsledná síla, která se skládá ze setrvačné síly, tíhové síly a tahové síly závěsu. [1].



Obrázek 1: Příklady mechanického oscilátoru, převzato z [1]

Po vychýlení se hmotný bod vrací zpět do rovnovážné polohy, kde má největší rychlost a pokračuje dál v pohybu, až dosáhne největší výchylky. V tomto místě se koule zastaví a vrací se zpět. Když kyvadlo projde všemi polohami, říkáme, že vykonalo jeden kmit, jak je vidět na Obrázku 2 [2].

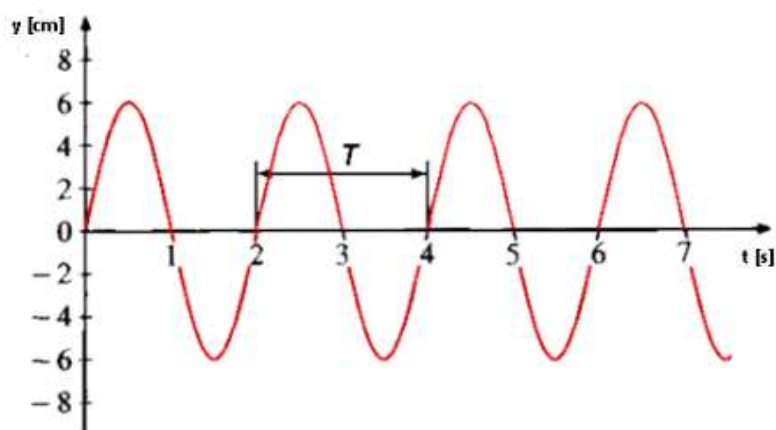


Obrázek 2: Kmit kyvadla, převzato z [2]

Závislost okamžité polohy kmitajícího tělesa na čase zobrazuje časový diagram na Obrázku 3, kde na ose x je čas, a veličina na ose y znázorňuje okamžitou polohu tělesa.

Periodický pohyb má například podobu sinusoidy. Doba, za kterou dojde k opakování téhož pohybového stavu se nazývá perioda T (s), dále počet opakování téhož pohybového stavu za čas je frekvence f (Hz). Frekvence se vypočítá vztahem:

$$f = \frac{1}{T}$$



Obrázek 3: Časový diagram, převzato z [2]

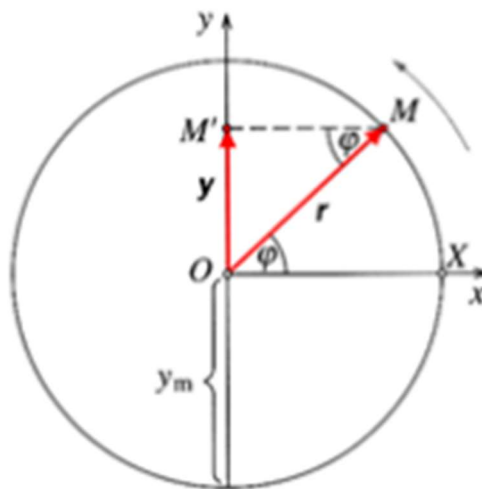
1.1.2 Kinematika harmonického pohybu

Během kmitu se kulička nepohybuje rovnoměrně. Když se kulička přemísťuje z rovnovážné polohy do krajní pozice, je to pohyb zpomalený, ale naopak, když se kulička přemísťuje z krajní polohy do polohy rovnovážné, je tento pohyb zrychlený. V rovnovážné poloze má kulička největší rychlost, a naopak v krajní poloze je rychlost nulová [1].

V každé poloze lze měřit vzdálenost od rovnovážné polohy. Tato vzdálenost se nazývá okamžitá výchylka y . Největší okamžitá výchylka je amplituda y_m . Z časového diagramu je vidět, že okamžitá výchylka se mění s časem [2].

Kmitavý pohyb, který je na diagramu znázorněn jako sinusoida se nazývá harmonické kmitání, nebo harmonický kmitavý pohyb. Je to jeden z nejjednodušších kmitavých pohybů. Vztah pro okamžitou výchylku harmonického pohybu můžeme srovnat s pohybem po kružnici [2].

Když si na kružnici nakreslíme celý kmitavý pohyb, můžeme pomocí geometrických úvah odvodit z Obrázku 4 rovnici pro okamžitou výchylku při harmonickém pohybu. [2].



Obrázek 4: Kmitavý pohyb znázorněný na kružnici, převzato z [2]

$$y = y_m \sin \omega t$$



Úhel ωt nazýváme fáze harmonického pohybu a veličina ω je u rovnoměrného pohybu po kružnici nazývána úhlovou frekvencí, nebo úhlovým kmitočtem. Platí pro ni vztah:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Jako další můžeme také vypočítat rychlost kmitavého pohybu, pro kterou platí tento vztah:

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega y_m \cos \omega t = \omega y_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Vidíme, že rychlost je také periodickou funkcí času měnící se podle funkce kosinus. To znamená, že při největší výchylce je rychlost nejmenší, a naopak při nejmenší výchylce je rychlost největší.

Další veličina, která nám popisuje harmonický pohyb je zrychlení, použijeme pro něj vztah:

$$a = \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 y_m \sin \omega t = -\omega^2 y$$

Zrychlení je přímo úměrné okamžité výchylce, ale v každém okamžiku má opačný směr.

1.1.3 Dynamika harmonického pohybu

Dynamika zkoumá příčiny pohybu. Příčinou kmitání oscilátoru může být například tíhová síla, nebo síla pružiny. Jak již víme, zrychlení harmonického kmitavého pohybu je:

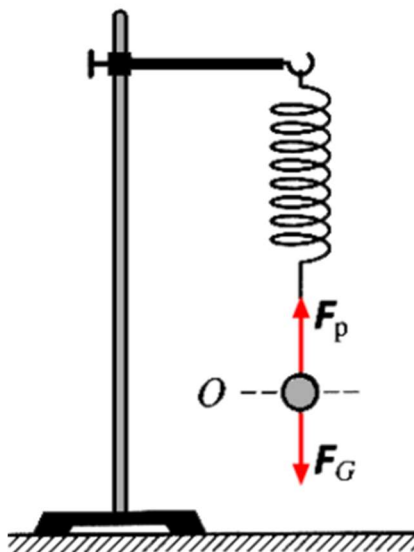
$$a = -\omega^2 y$$

Pomocí druhého Newtonova pohybového zákona můžeme vyjádřit sílu, která způsobuje kmitání:

$$F = -\omega^2 y m$$

Tuto rovnici můžeme nazvat jako pohybovou rovnici harmonického kmitavého pohybu.

Každý mechanický oscilátor musí mít určenou souvislost mezi úhlovou frekvencí kmitání oscilátoru a parametry mechanického oscilátoru. Pro příklad budeme uvažovat těleso zavěšené na pružině, které je na Obrázku 5 [1,2].



Obrázek 5: Mechanický oscilátor, převzato z [2]

Parametry oscilátoru, který vidíme na Obrázku 5 jsou tuhost pružiny k a hmotnost tělesa m . Síly, které působí na těleso jsou F_p (síla kterou působí pružina na těleso, směrem svisle vzhůru) a síla F_G (tíhová síla která působí směrem svisle dolů). Výslednice obou sil F působí do rovnovážné polohy, kde jsou obě síly v rovnováze.

Síla v pružině:

$$F = -ky$$

Setrvačná síla:

$$F_s = -ma$$

Rovnice oscilátoru má tvar:

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + ky = mg$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{k}{m}y = g$$



Po dosazení nám vyplývá vztah pro vlastní úhlovou frekvenci:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Po dosazení za úhlovou frekvenci dostaneme vztahy pro frekvenci a periodu:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

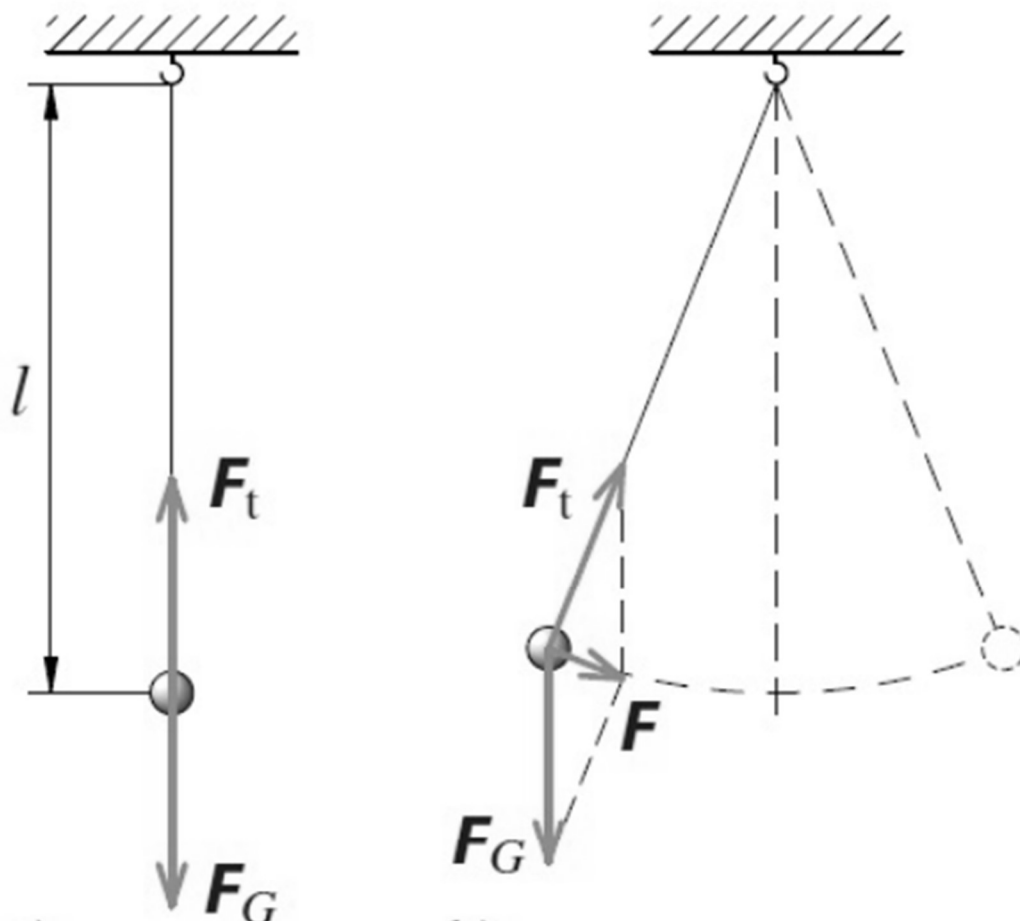
Z těchto vztahů jasně plyne, že perioda a frekvence závisí pouze na hmotnosti tělesa a tuhosti pružiny, nikoli na velikosti tíhového zrychlení [1,2].

1.1.4 Kyvadlo

Kyvadlo může být jakékoliv těleso, které se otáčí kolem vodorovné osy, která je umístěna nad jeho těžištěm. Kmitavý pohyb kyvadel, které mají různý tvar a hmotnost je poměrně složitý. Nejjednodušším modelem kyvadla je matematické kyvadlo. Matematické kyvadlo si můžeme představit jako hmotný bod (těleso) zavěšený na konci pevného vlákna o zanedbatelné hmotnosti [1,3].

Aby bylo harmonické kmitání jako přímočarý pohyb, musí být alespoň z části splněna tato podmínka. Výchylka kyvadla musí být tak malá, že oblouk, po němž se hmotný bod pohybuje můžeme považovat za úsečku. To platí, když je úhel α , který vlákno při pohybu svírá se svislým směrem menší než 5° [1].

Kmitavý pohyb kyvadla je způsoben silou F , která je výslednicí tahové síly F_t a tíhové síly F_g , kterou působí vlákno na hmotný bod, jak je znázorněno na Obrázku 6 [1].



Obrázek 6: Pohyb kyvadla, převzato z [1]

Pro malou výchylku hmotného bodu platí tento vztah:

$$\sin \alpha \approx \alpha = \frac{F}{F_g} = \frac{x}{l}$$

Pohybová rovnice má tvar:

$$F = -m\omega^2 x = -m \frac{g}{l} x$$

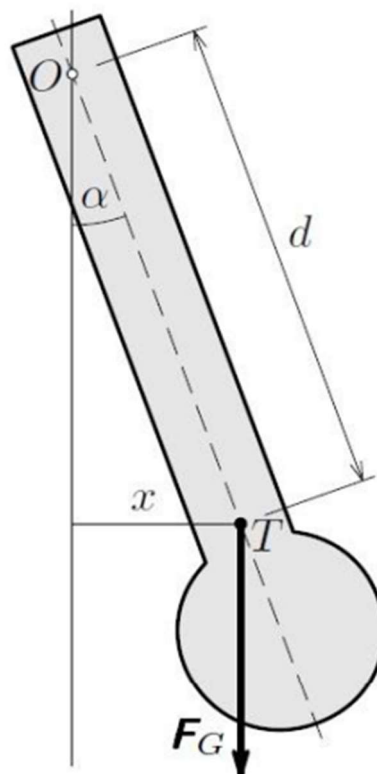
Neboli:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{g}{l}x = 0$$

Z tohoto vztahu odvodíme:

$$\omega^2 = \frac{g}{l} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Matematické kyvadlo je hmotný bod zavěšený na tenkém, nepružném a dokonale ohebném vlákně o zanedbatelné hmotnosti, u kterého se zanedbává odpor prostředí. Skutečná kyvadla jsou vždy tuhá tělesa, která jsou zavěšena tak, aby se těleso volně pohybovalo kolem osy procházející nad těžištěm. Takovéto kyvadlo se nazývá fyzikální kyvadlo, které je vyobrazené na Obrázku 7 [1].



Obrázek 7: Fyzikální kyvadlo, převzato z [1]



Kmitání je zapříčiněno účinky tíhové síly F_g , která působí v těžišti tělesa. Při vychýlení kyvadla o úhel α vzniká působením tíhové síly $F_g = mg$ v těžišti ve vzdálenosti d od osy kyvadla moment síly, který má velikost:

$$M = mgd \sin \alpha$$

Kyvadlo koná rotační pohyb, pro který platí tento vztah:

$$M = J\varepsilon = J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -mgd \sin \alpha$$

V tomto vztahu je J moment setrvačnosti tělesa k ose otáčení a ε je úhlové zrychlení otáčivého pohybu. Pro malé výchylky píšeme rovnici ve tvaru:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{mgd}{J} \alpha = 0$$

Z tohoto vztahu odvodíme:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgd}{J}} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgd}} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgd}{J}}$$

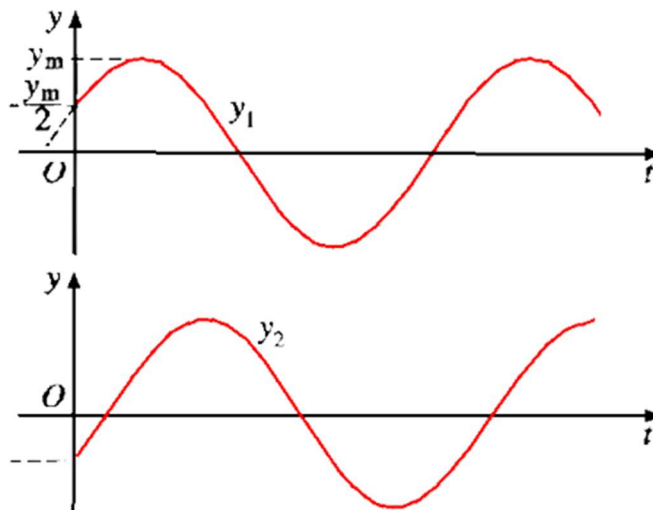
Pro matematické kyvadlo platí $d = l$ a $J = ml^2$. Po dosazení dostaneme stejný vztah, který jsme již odvodili jiným způsobem [1].

1.1.5 Fáze harmonického pohybu

Vztahy pro rychlost, zrychlení a okamžitou výchylku platí pouze, jestliže měříme od okamžiku, kdy kmitající bod prochází rovnovážnou polohou. Často však měříme harmonický pohyb od okamžiku, kdy bod není v rovnovážné poloze. Pro okamžitou výchylku v tomto stavu můžeme vyjádřit vztahem:

$$y = y_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

V tomto vztahu nám fázi harmonického pohybu představuje výraz $(\omega t + \varphi_0)$. Veličinu φ_0 nazýváme počáteční fáze harmonického pohybu. Počáteční fáze může mít kladnou i zápornou hodnotu. Tyto dva typické příklady fází jsou zobrazeny na Obrázku 8 [2,3].



Obrázek 8: Počáteční fáze kmitu. Horní fáze je kladná, spodní záporná, převzato z [2]

Počáteční fáze má zejména význam, když jsou sledovány dva harmonické pohyby najednou. Například při testování motoru sledujeme vzájemný pohyb dvou pístů a určuje se tzv. fázový rozdíl, což je rozdíl počátečních fází jejich pohybů. Pokud jsou okamžité výchylky dvou kmitání:

$$y_1 = y_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) \text{ a } y_2 = y_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2),$$

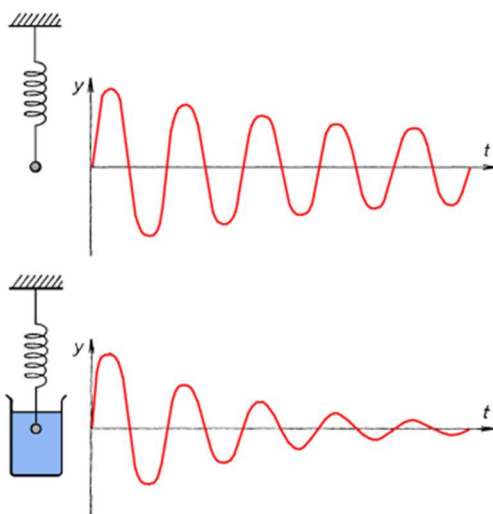
poté je fázový rozdíl jejich kmitání:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1.$$

Zvláštní případ je, když je fázový rozdíl roven nule, nebo má sudý násobek, pak oba harmonické pohyby mají stejnou fázi. Dalším případem je, když je fázový rozdíl v násobku lichém, to pak mají oba pohyby opačnou fázi [1,2].

1.1.6 Tlumené kmitání

Kmitání, které probíhá neomezeně dlouho bez změny amplitudy, a které není omezeno vnějšími vlivy se nazývá netlumené kmitání. Pokusy nám však ukazují, že amplituda reálného mechanického oscilátoru se postupně zmenšuje až do okamžiku, kdy kmitání zcela zanikne. Příčinou tohoto tlumení je, že se mechanická energie oscilátoru postupně přemění na vnitřní energii oscilátoru a energii prostředí. Těmto ztrátám energie nelze zabránit a vzniká tak tlumené kmitání. Nejčastější příčinou tlumení je odporová síla v látkovém prostředí [2].



Obrázek 9: Tlumené kmitání, převzato z [2]

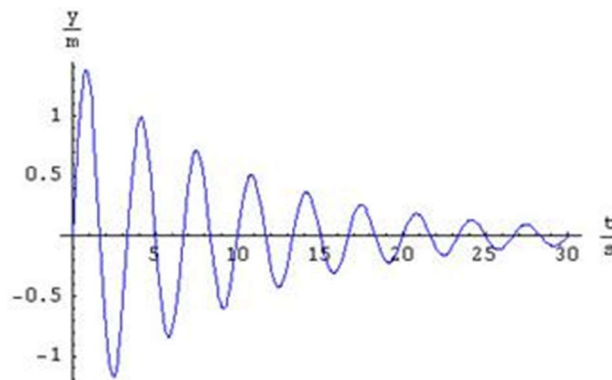
Jak již bylo zmíněno, příčinou tlumení jsou odporové síly, které působí proti pohybu mechanického oscilátoru. Z výše uvedeného principu vyplyne rovnice pro tlumený oscilátor, která má takovýto tvar:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -ky - bv$$

b je konstanta úměrnosti mezi odporovou silou a rychlostí oscilátoru a k je tuhost pružiny. Z tohoto vztahu můžeme vyjádřit diferenciální rovnici tlumeného kmitavého pohybu, která má tvar:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\delta \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = 0$$

V tomto vztahu $\delta = \frac{b}{2m}$ je konstanta tlumení a $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ je úhlová frekvence netlumeného oscilátoru.



Obrázek 10: Časový diagram tlumeného kmitání, převzato z [2]

Pokud si označíme amplitudy tlumeného kmitání, které po sobě jdou postupně y_{m0}, y_{m1}, y_{m2} , tak pro ně platí vztah:

$$\frac{y_{m0}}{y_{m1}} = \frac{y_{m1}}{y_{m2}} = \dots = e^{\delta T} = \lambda$$

V tomto vztahu je λ útlum a její logaritmický dekrement Λ má tvar:

$$\Lambda = \ln e^{\delta T} = \delta T = \delta \frac{2\pi}{\omega}$$

Logaritmický dekrement nám znázorňuje zmenšení amplitudy tlumených kmitů za periodu. Když za označení počtu kmitů zvolíme například N , za které se nám amplituda tlumených kmitů zmenší n -krát, pak vztah pro toto zmenšení bude vypadat takto:

$$\Lambda = \delta T = \frac{1}{N}$$

Oscilátor můžeme charakterizovat jednou veličinou, která je funkcí jak součinitele tlumení δ , tak i úhlovou frekvencí ω . Veličina, kterou můžeme charakterizovat oscilátor je tedy činitel jakosti Q . Pro kterou platí vztah:

$$Q = \frac{F}{F_0} = \frac{\omega}{2\delta} = \frac{\pi}{\delta T} = \frac{\pi}{\Lambda} = \pi N_{max}$$



Činitel jakosti nám může pomoci zjistit, jak rychle zanikne kmitání oscilátoru. Za zaniknutí kmitů v praxi se považuje poklesnutí energie kmitů 10^2 krát a pro tuto skutečnost platí vztah:

$$\frac{y_{m1}}{y_{m2}} = e^{\delta T} = e^{\frac{\pi}{Q}N} = 10$$

Po zlogaritmování dostaneme vztah:

$$N_{max} = \frac{1}{\pi \log e} Q = 0,74Q$$

Tímto způsobem můžeme za pomoci činitele jakosti určit, kolikrát oscilátor kmitne bez vnějšího působení. Pro netlumený oscilátor platí $Q \rightarrow \infty$, tento oscilátor bude nepřetržitě kmitat se stálou amplitudou, ale při $Q \leq 0,5$ nevykoná oscilátor ani jeden kmit [1,2,3].

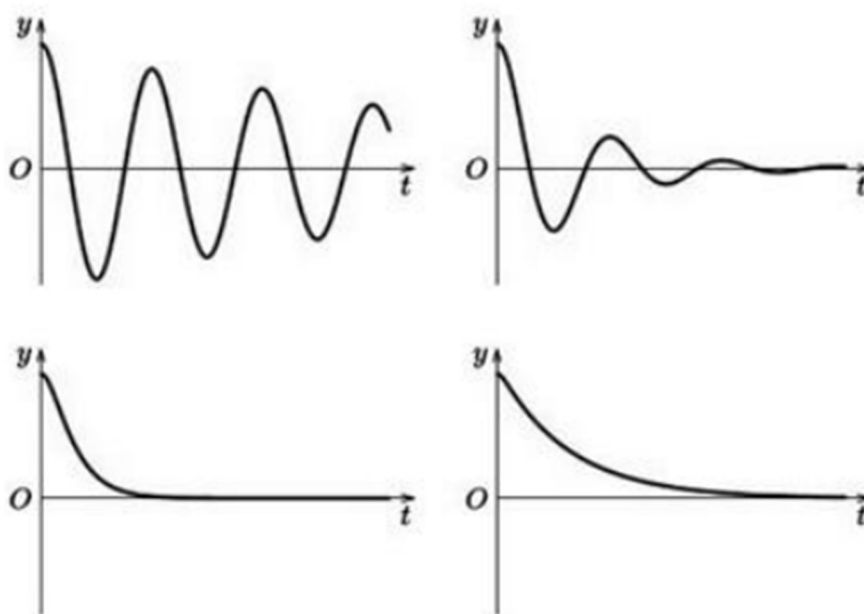
Pro příklad uvedeme hodnoty jakosti některých typů oscilátorů:

- | | |
|---------------------------|------------|
| 1. ocelová struna | $Q = 10^3$ |
| 2. ladička bez rezonátoru | $Q = 10^4$ |
| 3. elektron v atomu | $Q = 10^7$ |

Vlastní kmitání oscilátoru je vždy tlumené, tlumení má však vliv pouze na amplitudu kmitavého pohybu. Tlumený oscilátor volně kmitá s větší periodou, než netlumený oscilátor se stejnými parametry. Podle hodnot úhlové frekvence ω a součinitele tlumení δ rozlišujeme tři druhy tlumení:

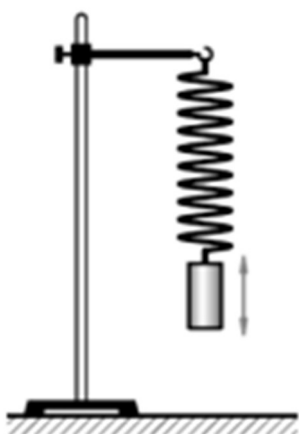
1. $\omega_0^2 > \delta^2$ – tlumené kmitání, amplituda kmitavého pohybu se zmenšuje exponenciálně
2. $\omega_0^2 < \delta^2$ – aperiodický pohyb, oscilátor se vrací do rovnovážné polohy, ale nevznikne kmitání
3. $\omega_0^2 = \delta^2$ – kritické tlumení, oscilátor se vrátí do rovnovážné polohy v co nejkratší době a rovněž nevznikne kmitání

Na Obrázku 11 jsou vidět příklady tlumeného kmitání. Každý příklad kmitání má různou hodnotu součinitele tlumení.

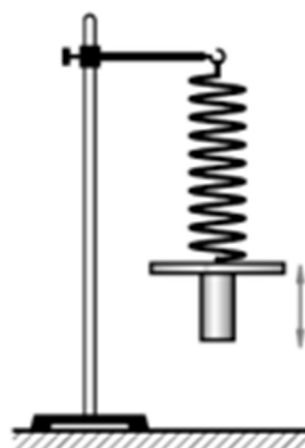


Obrázek 11: Tlumené kmitání při různých hodnotách součinitele tlumení, převzato z [1]

Vliv prostředí na kmitání můžeme sledovat na jednoduchém pokusu. Jeden oscilátor volně kmitá na vzduchu, a na druhém oscilátoru je položený kus papíru, který nám zvětšuje odporovou sílu. Tento pokus vidíme na Obrázku 12 a 13 [1].

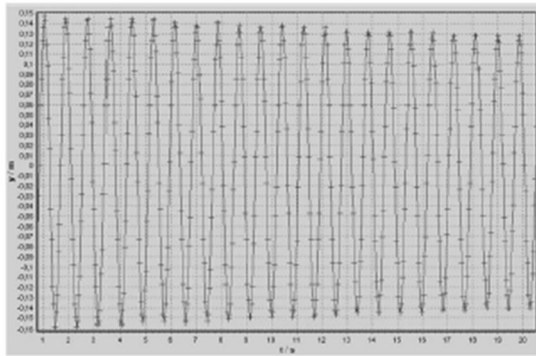


Obrázek 12: Kmitání volně
na vzduchu, převzato z [1]

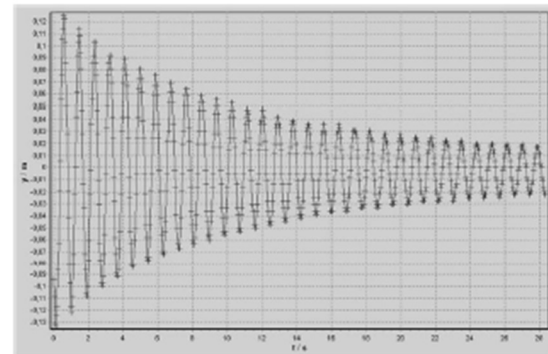


Obrázek 13: Kmitání s přidaným
odporem, převzato z [1]

Průběhy kmitání jsou zobrazeny na časových diagramech na Obrázku 14 a 15.



Obrázek 14: Časový diagram volného kmitání, převzato z [1]



Obrázek 15: Časový diagram kmitání s přidaným odporem, převzato z [1]



1.2 Laserová Dopplerova vibrometrie (LDV)

Laserová Dopplerova vibrometrie (LDV) je v současné době metodou, která je jednou z nejpřesnějších pro měření rychlosti a posunutí vibrujícího objektu. Je využívána v mnoha vědeckých oborech, například ve zdravotnictví, nebo leteckém průmyslu.

1.2.1 Historie vibrometrie

Laserová Dopplerova vibrometrie (LDV) má svůj původ v měření rychlosti kapalin, o kterém informovali Yeh a Cummins na Kolumbijské univerzitě v roce 1964. Jejich článek, popisoval měření Dopplerova posunu Rayleighova rozptýleného světla při rychlostech proudění až 0,007 cm/s [4].

Helium-neonové lasery (HeNe) byly poprvé použity v Bellových telefonních laboratořích, nejprve v infračervené oblasti v roce 1960. Dnes známý Helium-neonový laser, který používali Yeh a Cummins, byl vyvinut v roce 1962 a v komerčních laserových dopplerovských přístrojích převládá i po více než 60 let od prvního experimentu [4].

Měření proudění v kapalinách se v 60. a 70. letech věnovala velká pozornost, ale teprve v druhé polovině tohoto období se Brian Moss s jeho týmem z Atomic Energy Research Establishment v Harwellu ve Velké Británii začali zabývat měřením vibrací na pevných površích pomocí laserové dopplerovské techniky. Graham Bank ve Velké Británii doplnil přístroj v Harwellu o skenovací hlavici, která umožnila trojrozměrný pohled na celý vibrující povrch měřeného tělesa. Koncem 80. let již existovali 4 společnosti, které dodávali tyto přístroje. Například společnost Polytec si vybudovala vynikající pověst díky úspěšnému použití v rozvíjejícím se průmyslu pevných disků. Společnosti Polytec a Ometron již v této době nabízely skenovací varianty. Sortiment společnosti Polytec zahrnoval diferenciální přístroj [4].

1.2.2 Princip měření

Laser Doppler vibrometer (LDV) měří vibrační rychlost na principu interferometru, který pomocí Braggova článku generuje vysokofrekvenční nosný signál. Paprsek helium-neonového laseru je namířen na vibrující objekt a rozptyluje se od něj zpět. Rychlost a amplituda vibrujícího objektu generují frekvenční nebo fázovou modulaci v důsledku Dopplerova jevu. Paprsek laseru je tak vystaven malému frekvenčnímu posunu, který nazýváme Dopplerova frekvence f_D [5].

Braggův článek také generuje optický frekvenční posun f_B v referenčním paprsku (40MHz). Po překrytí objektu a referenčního paprsku se na fotodetektoru generuje elektrický signál s okamžitou frekvencí, který můžeme vyjádřit vztahem:

$$f_c(t) = f_B + f_D(t) = f_B + 2 \cdot \frac{v(t)}{\lambda}$$

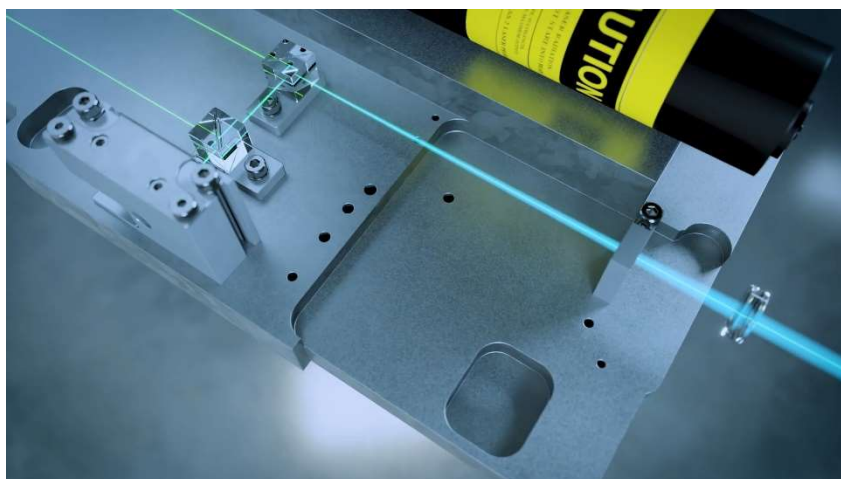
Jedná se o signál s nosnou frekvencí se středovou frekvencí f_B , který je frekvenčně modulován Dopplerovskou frekvencí $f_D(t)$. Prostřednictvím demodulace lze dekodovat rychlostní signál. U compact laser vibrometer (CLV) se výsledný signál dekoduje pomocí demodulace. Přitom se generuje signál napětí, který je přímo úměrný okamžité rychlosti zkoumaného objektu [6, 10].

1.2.3 Dopplerův jev

Pokud je vlna odražena pohybujícím se objektem a je následně detekována přístrojem (LDV), lze naměřený frekvenční posun vlny popsat tímto vztahem:

$$f_D = 2 \cdot \frac{v}{\lambda}$$

kde v tomto vztahu v značí rychlost objektu a λ je vlnová délka emitované vlny. Aby bylo možné určit rychlost objektu, je třeba změnit frekvenční posun při známé vlnové délce. To se provádí v LDV pomocí laserového interferometru [6].



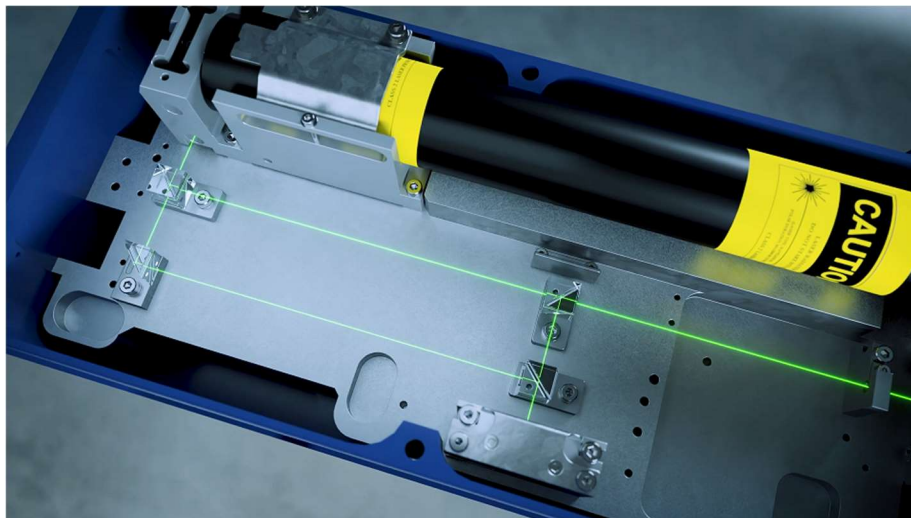
Obrázek 16: Odražené světlo od vibrujícího povrchu, převzato z [5]

1.2.4 Interferometrie

Vibrometr pracuje na bázi optické interferometrie, která je znázorněna na Obrázku 17. Přičemž je zapotřebí, aby se překrývaly v podstatě dva koherentní světelné paprsky s jejich příslušnými světelnými intenzitami I_1 a I_2 . Celková intenzita obou paprsků není jen součtem jednotlivých intenzit, ale je modulována podle vztahu:

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[2\pi(r_1 - r_2)/\lambda]$$

s tzv. interferenčním členem. Tento interferenční člen se vztahuje k rozdílu délky dráhy mezi oběma paprsky. Je-li tento rozdíl celočíselným násobkem vlnové délky světla, je celková intenzita čtyřnásobkem jedné intenzity [6,7].

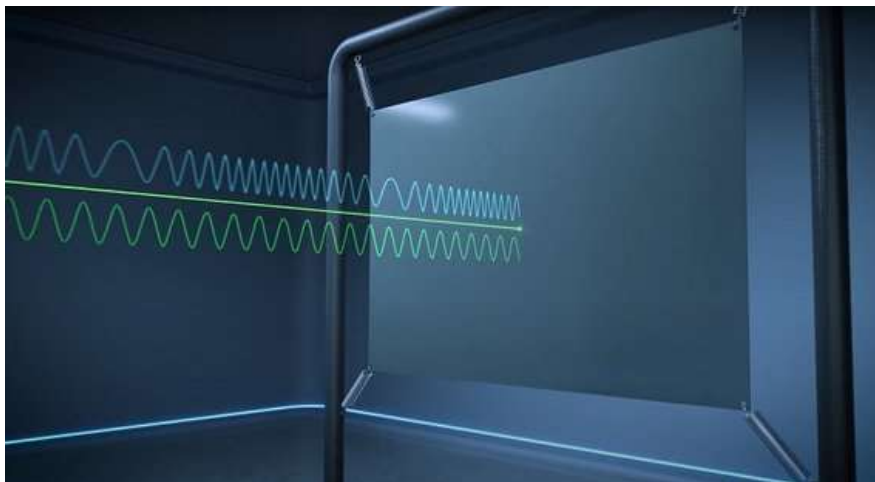


Obrázek 17: Nastavení laserového interferometru zobrazující laser, převzato z [5]

1.2.5 Dopplerův frekvenční posun

Změna délky optické dráhy za jednotku času se projeví jako Dopplerův frekvenční posun měřeného paprsku. V metrologické terminologii to znamená, že modulační frekvence určeného interferometrického obrazce je přímo úměrná rychlosti vzorku. Jelikož pohyb měřeného objektu směrem od interferometru generuje stejný modulační vzor, jako pohyb objektu směrem k interferometru. Toto nastavení nemůže samo o sobě určit směr, jímž se objekt pohybuje. K tomuto účelu slouží akusticko-optický modulátor (Braggova buňka), který posouvá frekvenci světla o 40 MHz a je umístěn v referenčním paprsku. Pokud je objekt v klidu, je tak vytvářena modulační frekvence interferenčního vzoru o 40 MHz. Pokud se poté objekt

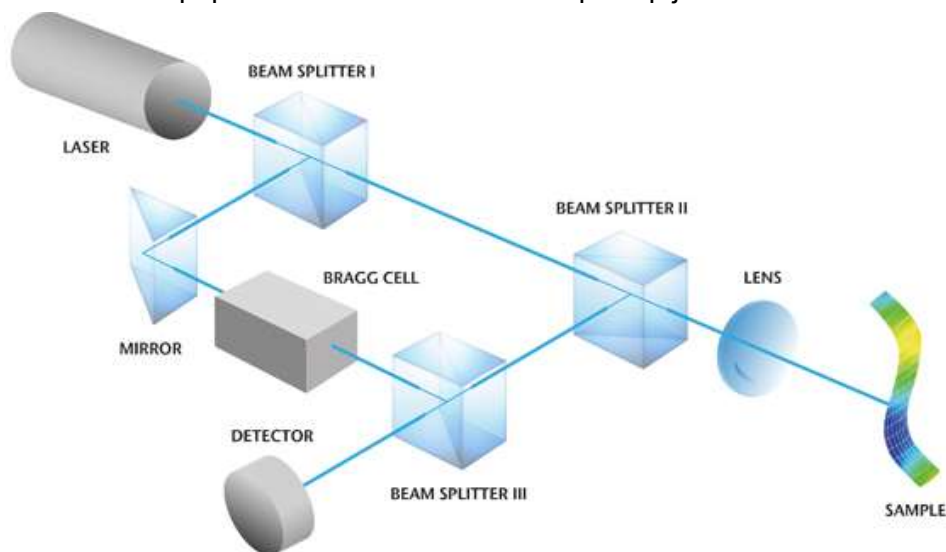
pohybuje směrem k interferometru, tato modulační frekvence se zvýší, a pokud se vzdaluje, tak se přijímaná frekvence snižuje pod hodnotu 40 MHz. Tímto můžeme zjistit délku dráhy, ale i směr pohybu. [5, 6, 8]



Obrázek: 18 Frekvenční posun, převzato z [5]

1.2.6 Základní princip a optické nastavení vibrometru

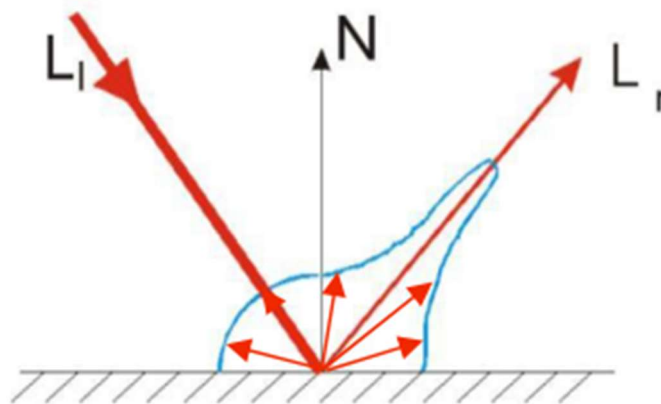
Paprsek laseru je za pomoci rozdělovače paprsku (BEAM SPLITTER 1) rozdělen na referenční paprsek a měřicí paprsek. Po průchodu měřicího paprsku druhým rozdělovačem (BEAM SPLITTER 2) je tento paprsek zaostřen přes čočku na měřený vzorek, který jej odráží. Tento odražený paprsek je vychylován směrem dolů za pomoci BEAM SPLITTER 2, a je následně sloučen s referenčním paprskem na detektoru. Tento princip je vidět na Obrázku 19 [5, 6].



Obrázek 19: Základní princip měření vibrometrie, převzato z [5]

1.2.7 Optimalizace nastavení vibrometru

Kvalita měření a úroveň šumu přímo souvisí s množstvím zpětného světla zachyceného pomocí vibrometru. To neznámá, že při měření s malým množstvím zpětného světla jsou měření neplatná. Přesnost vibrometru není ovlivněna množstvím zpětného světla, pokud není SNR (Signal to noise ratio) nízké. Každý vibrometr je vybaven indikátorem zpětného signálu zvaným RSSI. Při měření je důležité, aby bylo RSSI (Indikátor zpětného signálu) na co nejvyšší hodnotě. Toho lze dosáhnout správným zaostřením paprsku, volbou vhodné vzdálenosti a optimalizace úhlu dopadu [11].



Obrázek 20: Rozložení rozptylu světla na povrchu, převzato z [11]

Obrázek 20 znázorňuje typické rozložení rozptylu světla na povrchu. L_1 je dopadající světelný paprsek a modrý obrys představuje typické rozložení rozptylu světla ve všech úhlech.

Jak vidíme na Obrázku 20 směr odraženého paprsku L_r svírá stejný úhel, jako dopadající paprsek. Pro měření pod úhlem je lepší využít IR vibrometr. Nejlepší SNR poskytuje normální dopad N , pro který je na měření výhodné použít HeNe vibrometr [11].

1.3 Využití vibrometrie

1.3.1 V letectví

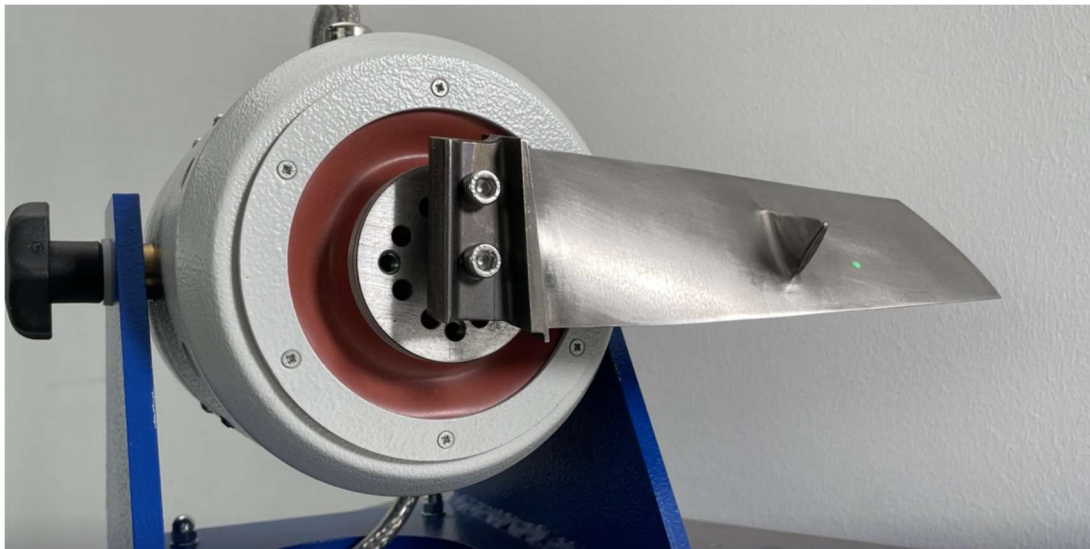
Laserová vibrometrie má v letectví velmi důležitou roli při kontrole kvality nýtových spojů a při kontrole životnosti lopatek v turbínovém motoru.

Jednou z nejdůležitějších částí turbínového motoru jsou lopatky. Lopatky se testují při různých úrovních zatížení a při různých teplotách, které ovlivňují celkové chování pohonné jednotky.

1.3.2 Lopatky turbíny

Jedním ze způsobů, jak určit životnost lopatky, je pomocí metody měření LCF (nizkocyklové únavy), při níž se lopatky zkoumají před a po opakovaném zatížení. Únava způsobená tepelným zatížením se zkoumá pomocí metody TMF (termomechanické únavy) při teplotách až do 1000°C [11, 12].

Laserové Dopplerovy vibrometry nabízí spolehlivý způsob přesného měření provozních vibrací před, během i po zatěžování lopatek, jak je vidět na Obrázku 21. Výsledky naměřených vibračních vlastností lopatek umožňují určit modální parametry a porovnat je s modely. Změny vlastností při různých mírách zatížení umožňují určit životnost lopatek v reálných provozních podmínkách. Výsledky jsou důležité pro stanovení cyklů údržby a možné životnosti lopatek při přetížení [11, 12].



Obrázek 21: Měření vibrací na lopatce, převzato z [12]



1.3.3 Kontrola nýtů

Nýtové spoje tvoří velkou část spojů, které můžeme na letadle nalézt. S tím však přichází velké nároky na kontrolu neporušenosti těchto materiálových spojů. Proto se zvyšuje zájem o využití laserové vibrometrie na kontrolu tohoto spojení [13].

Laserové vibrometry umožňují bezkontaktní, spolehlivou a včasnou detekci uvolněného nebo poškozeného nýtu. Pokud se zkoumaná část letadla, která je spojena nýty rozkmitá v širokém frekvenčním pásmu, tak můžeme pomocí vibrometru zaznamenat a analyzovat kompletní vibrační chování tohoto povrchu. Zmapováním těchto kontrolovaných oblastí v okolí nýtových spojů nám poskytne informace o stavu nýtů [13].

Výrazná odchylka naměřených veličin v úzce lokalizovaném místě ve srovnání se zbytkem povrchu umožňuje posoudit, zda je v těchto místech špatný nýtový spoj, i když není ani vizuálně rozpoznatelný. Velikost výchyly také umožňuje určit, v jaké míře je nýtový spoj poškozený, a zda je nutné ho vyměnit, nebo má spoj ještě dostatečnou pevnost pro další provoz [13].

1.3.4 V dopravě

V automobilovém průmyslu se klade důraz zejména na výběr vhodných materiálů hlavně při přechodu na elektromobilitu, kde se používají lehké konstrukce, které potřebují rozsáhlou analýzu vibrací. V dnešní době jsou součásti automobilu zkoumány numerickými simulacemi, ale stále je potřeba ověřit tyto simulace experimentálním měřením. K těmto měřením se využívá právě laserová vibrometrie kvůli tomu, že je to bezkontaktní měřicí metoda, a tudíž neovlivňuje vibrace součástí automobilu.

1.3.5 Testování NVH

NVH (hluk, vibrace, drsnost) je studie, která se zabývá hlukovými a vibračními charakteristikami osobních vozidel. NVH vozidel se upravuje tak, aby snížila nebo eliminovala nežádoucí zvuk a vibrace, což má vliv na větší pohodlí cestujících. NVH se používá pro design vozidel, design karoserie, interiéru a mnoho dalších částí. Princip měření je znázorněn na Obrázku 22 [14].

Laserové vibrometry jsou vhodné pro lokalizaci zdrojů zvuku a vibrací na konstrukci automobilu. Výsledky, které se získají při měření jsou konzultovány s inženýry, kteří mohou například změnit spojení různých komponentů, nebo mohou pozměnit geometrii, a zvýšit tak tlumení vibrací na vhodných místech [14].



Obrázek 22: Měření NVH na dveřích automobilu, převzato z [14]

1.4 Další metody měření

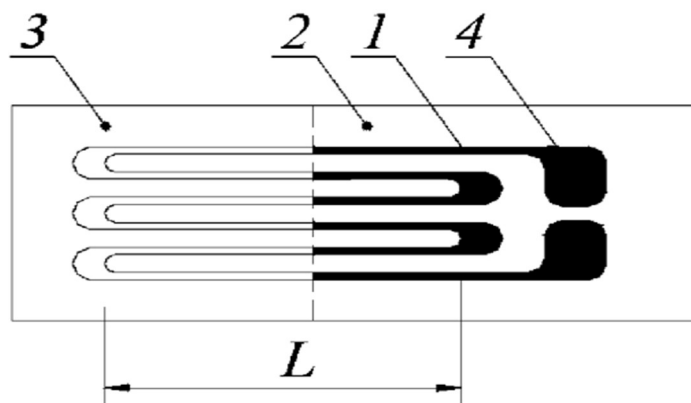
1.4.1 Odporová tenzometrie

Tenzometry využití při experimentech jsou založeny na odporových vlastnostech kovu. Při zatížení materiálu, ke kterému je tenzometrický snímač přilepen, tenzometr snižuje nebo zvyšuje svůj elektrický odpor. Tenzometrická folie, je na materiál přilepena speciálním lepidlem. Díky správnému přilnutí tenzometrické folie na měřený materiál dosáhneme toho, že se bude tenzometr deformovat stejným způsobem jako materiál, který měříme [15].

Tenzometry se používají pouze k měření deformace materiálu. Pro správný výběr vhodného typu tenzometru je třeba určit v jakých podmínkách budeme měřit. Musíme znát typ zatížení, teplotu, měřený materiál a mnoho dalších informací, aby bylo možné provést správné měření tenzometrem. V dnešní době se nejčastěji používají odporové tenzometry, které mají vysokou přesnost měření, dokážou pracovat při vysokých teplotách [15].

1.4.2 Fóliový tenzometr

Fóliový tenzometr na Obrázku 23 je vyroben z kovové fólie. Princip výroby tenzometrické fólie je velmi podobný tisku obvodů na pružné fólie. Díky litografické metodě je možné vyrobit tenzometry s rozměry a tvary, které potřebujeme na měření [15].

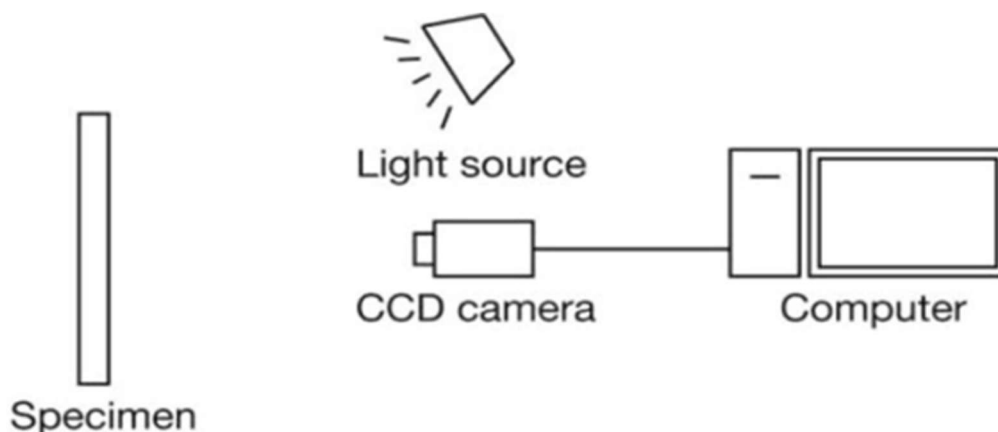


Obrázek 23: Fóliový tenzometr, převzato z [15]

1.4.3 Měření DIC

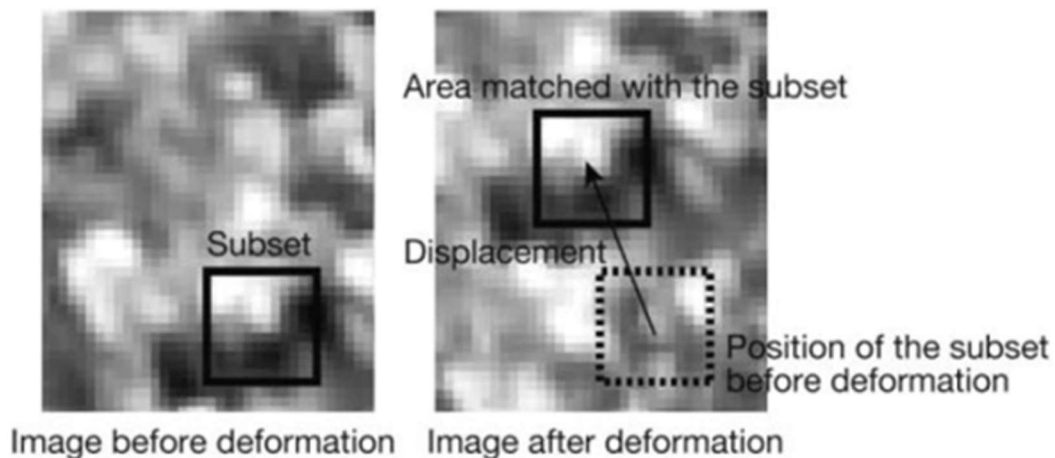
Experimentální techniky v mechanice pevných látek se do značné míry opírají o měření povrchových posunů. Mezi tyto měření patří i technika DIC (digitální obrazová korelace), která dokáže změřit deformaci povrchu porovnáním digitálních obrazů nedeformované a deformované konfigurace [16].

Při dvourozměrné digitální obrazové korelaci se posuny zjišťují přímo z digitálních snímků povrchu měřeného vzorku. Obrázek 24 znázorňuje typický příklad experimentálního uspořádání pro dvourozměrnou digitální obrazovou korelaci [16].



Obrázek 24: Typické uspořádání pro dvojrozměrnou DIC, převzato z [16]

Vzorek je obvykle pozorován kamerou. Poté se snímky povrchu objektu, jeden před a jeden po deformaci zaznamenají a následně se uloží do počítače jako digitální obrazy. Tyto obrazy se porovnávají za účelem zjištění posunutí vyhledáním shodného bodu z jednoho a druhého obrazu. Protože je téměř nemožné najít shodný bod pomocí jednoho pixelu, využívá se více pixelová oblast s různými rozměry pixelů. Oblast, která má uvnitř jedinečné rozložení intenzity světla se nazývá podmnožina. Aby bylo možné přiřadit podmnožinu, musí mít povrch vzorku takovou vlastnost, která to umožní. Pokud to nejde musí se vytvořit vzor, jako například nastříkání barvy na povrch. Na Obrázku 25 jsou snímky před a po deformaci. Posun podmnožiny na snímku před deformací, nalezneme na snímku po deformaci. Jakmile je nalezeno umístění této podmnožiny v deformovaném obraze, lze určit její posunutí. [16].



Obrázek 25: Posun podmnožiny na vzorku, převzato z [16]

3. Experimentální část

3.1 Vybavení použité pro experimenty

Pro všechny experimenty, které jsou uvedeny v této experimentální části bylo použito vybavení od výrobce Polytec. Ten se zaměřuje pouze na výrobu Laserových vibrometrů.

Vibrometr použitý při experimentech byl Polytec Compact Laser Vibrometer-CLV 2000 se senzorovými hlavami CLV 700. Tuto sestavu můžeme vidět na Obrázku 26 a 27.

Řídící jednotka, kterou vidíme na Obrázku 26 se skládá z modulů. Ty nám určují vlastnosti CLV. V tomto případě se jedná o 3 základní moduly.

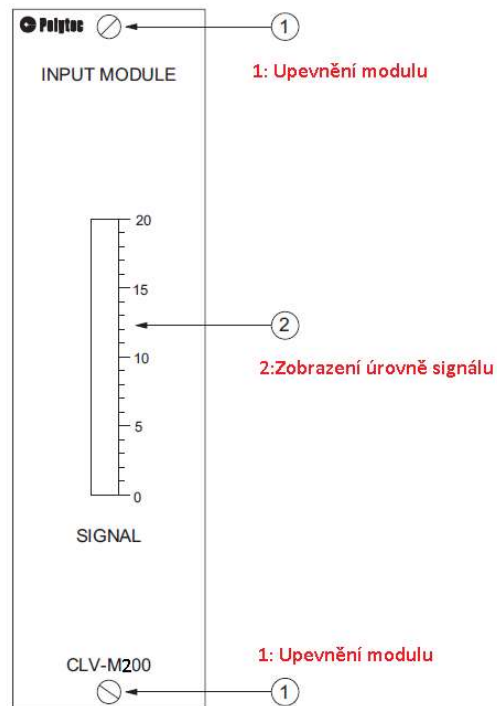


Obrázek 26: Řídící jednotka



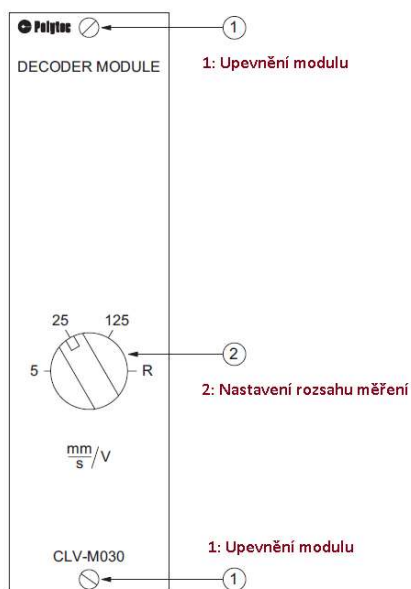
Obrázek 27: Sensorová hlavice

Prvním modulem je INPUT MODULE CLV-M200, který vidíme na Obrázku 28. Vstupní modul, připravuje signál pro následný dekodovací modul. Při tomto procesu se vyfiltruje daný signál a dojde k omezení šířky pásma. Další funkcí, kterou má tento modul je měření síly optického signálu, který následně zobrazuje na sloupcový displej.



Obrázek 28: Vstupní modul CLV.M2000

Dalším modulem je DECODER MODULE CLV-M030. V tomto modulu dochází k dekódování měřeného signálu pomocí demodulace. Tímto způsobem vygeneruje dekódovací modul střídavé napětí, které je přímo úměrné naměřené rychlosti zkoumaného objektu. Jak vidíme na Obrázku 29 dekódovací modul má tři různá nastavení. Každé nastavení je pro jinou rychlost měření. V této práci bylo využito nastavení $125 \frac{mm}{s}/V$ to znamená, že jeden volt se rovná 125 mm/s.

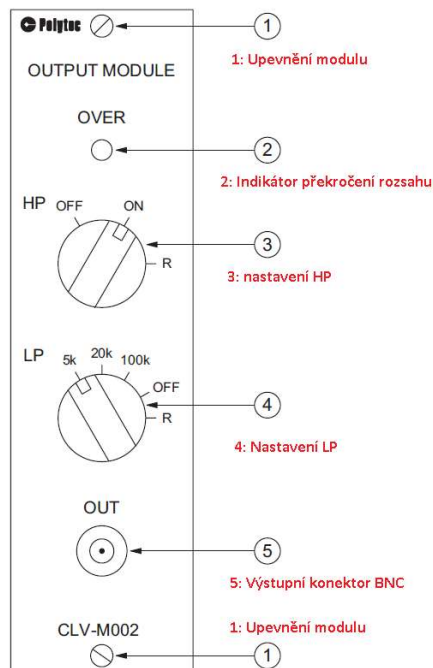


Obrázek 29: Dekódovací modul CLV-M030

| Decoder module | Measurement range (scaling factor) | Full scale (peak) | Maximum frequency | Resolution ¹ | Maximum acceleration | Linearity error ² |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|------------------------------|
| | $\frac{mm}{s}/V$ | mm/s | kHz | $\mu m/s$ | m/s^2 | % of reading |
| CLV-M010 | 1 | 10 | 20 | 0.2 | 1500 | ± 0.5 |
| | 5 | 50 | 50 | 0.5 | 16000 | ± 0.5 |
| CLV-M020 | 5 | 50 | 50 | 0.5 | 16000 | ± 0.5 |
| | 25 | 300 | 50 | 0.8 | 94000 | ± 0.5 |
| CLV-M030 | 5 | 50 | 250 | 0.5 | 80000 | ± 1.0 |
| | 25 | 250 | 250 | 1.5 | 400000 | ± 2.0 |
| | 125 | 1250 | 250 | 2 | 2000000 | ± 1.0 |
| CLV-M080 | 50 | 500 | 250 | 3.0 | 800000 | ± 5.0 |
| | 250 | 2500 | 250 | 4.0 | 4000000 | ± 1.0 |
| CLV-M040 (combi module) | 1 | 10 | 20 | 2 | 1500 | ± 1.0 |
| | 5 | 50 | 20 | 2 | 1500 | ± 1.0 |

Obrázek 30: Rozsahy měření

Posledním modulem je OUTPUT MODULE CLV-M002. V tomto modulu je signál filtrován a za pomoci konektoru BNC vyveden do osciloskopu. Jak je vidět na Obrázku 31, výstupní modul má přepínatelný LP filtr pro potlačení šumu vyšších frekvencí, který byl nastaven na 100 kHz a HP filtr, který jsem měl ve svých experimentech na pozici OFF.



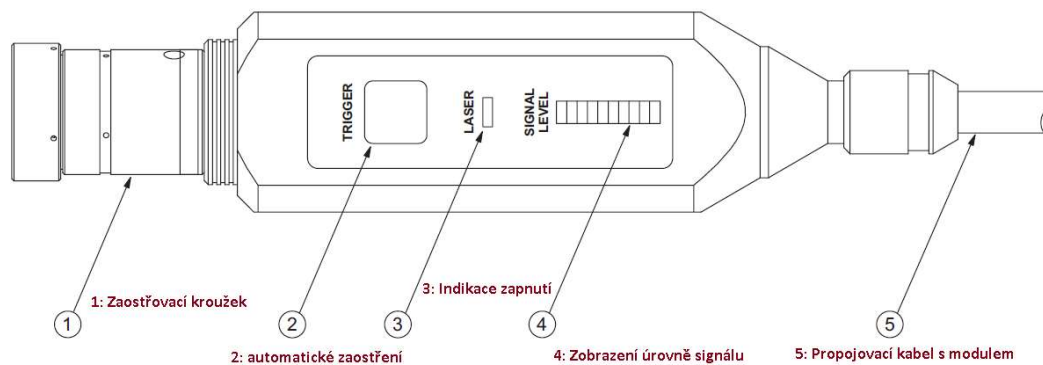
Obrázek 31: Výstupní modul CKV-M002

| Output module | Cutoff frequencies (-3 dB) | |
|---------------|----------------------------|-----------------|
| | low pass kHz | high pass Hz |
| CLV-M001 | 5 / 20 / 50 | - |
| CLV-M002 | 5 / 20 / 100 | 100 |
| CLV-M003 | 5 / 15 / 30 | 10 |
| CLV-M004 | - | - |

Obrázek 32: Mezní frekvence filtru

Další částí vibrometru je sensorová hlava CLV-700 s laserovým modulem CLV-800. Společně tvoří interferometr, jehož princip je popsán v části 1.2.4.

Senzorová hlava, která byla použita při experimentech, je znázorněna na Obrázku 33. Má manuální zaostřování, které bylo potřeba při každém pokusu znovu zkontrolovat, zda je vibrometr správně připraven. V experimentech byla sensorová hlava ve vzdálenosti 30 cm od měřených objektů.



Obrázek 33: Sensorová hlava CLV-700

| | | |
|----------------------------------------------|----|------------------|
| Model | | Fixed focus (ff) |
| Focal length | mm | |
| Stand-off distance ¹ | | (314±50)mm |
| Aperture diameter (1/e ²) (typ.) | mm | 2 |

Obrázek 34: Optické nastavení sensorové hlavy



3.2 Úvod do experimentální části

V experimentální části byly ověřeny znalosti z teoretické části na třech vybraných experimentech, které mají potenciální využití v leteckém průmyslu.

První experiment byl zaměřen na měření vibrací vetknutého nosníku. Tento experiment slouží k osvojení práce s vibrometrem na jednoduchém pokusu s názornou ukázkou chování vibrací.

Druhý experiment měl být zaměřen na měření rychlosti zadní strany panelu, vystaveného penetračnímu zatížení, pomocí metody dělené Hopkinsonovi tyče.

Třetí experiment je věnován měření vlastní frekvence konstrukce 3D tištěného dronu. Drony jsou v dnešní době velmi rozšířenou záležitostí, která má však velké nároky na provedení konstrukce.

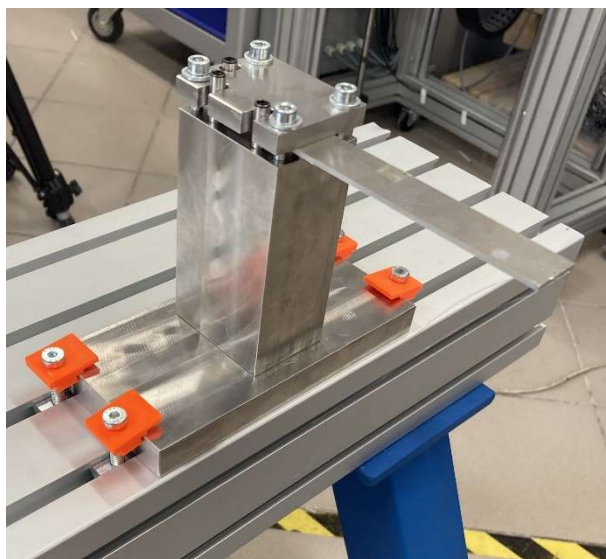
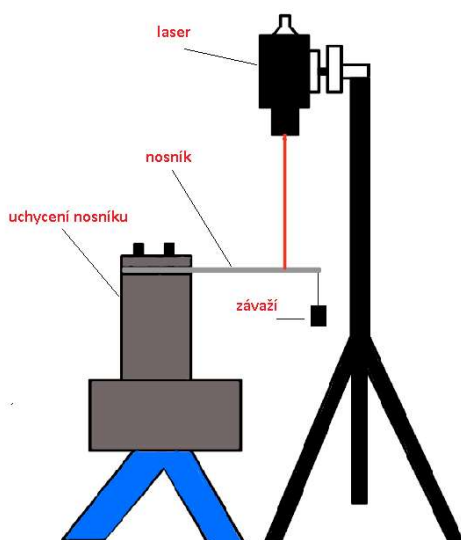
3.3 Měření vibrací na nosníku

Tento experiment sloužil na ověření správnosti měření s vibrometrem CLV 2000 od značky Polytec. Výsledky, které byly naměřeny při experimentu, byly následně porovnány s vyhodnoceným experimentem v simulačním softwaru Comsol Multiphysic a modelem v softwaru Ansys.

Experiment na vetknutém nosníku byl zvolen kvůli jednoduché konstrukci, snadnému výpočtu v softwaru a širokému využití této konstrukce v praxi, jako je například uchycení lopatek turbíny, nebo vrtule.

3.3.1 Příprava experimentu

Pro tento experiment bylo vytvořeno uchycení, do kterého se následně vložil měřený nosník. Do tohoto uchycení se dají vkládat nosníky o různých rozměrech a díky tomuto uchycení dochází k odebrání třech stupňů volnosti, takže vznikne vetknutí. Pro tento experiment byl použit nosník vyrobený z hliníku o rozměrech 102 x 20 x 2 mm. Nosník měl na svém konci vytvořenou díru, na kterou bylo přiděláno závaží pro vynucení kmitavého pohybu.



Obrázek 35: Princip měření. Nosník použitý při experimentu.

Na tento experiment byl použit vibrometr značky Polytec CLV-2000 se senzorem CLV-700. Laser byl připevněn na trojnožku, která byla vysunuta nad měřený nosník. Paprsek laseru byl zaměřen na nosník ve vzdálenosti 30 cm. Tato vzdálenost je optimální pro měření s tímto typem senzoru. Jak bylo zmíněno v kapitole Optimalizace nastavení vibrometru, je velmi důležité zajistit dostatečné množství odraženého světla od povrchu měřeného objektu. Tento problém je znázorněn na Obrázku 36 a 37. V tomto případě byl využit reflexní štítek, který je vidět na Obrázku 35. pro dostatečné odražení světla od povrchu, jelikož materiál samotný nedosahoval takové kvality odraženého světla, která by byla optimální pro měření. Kvalita odraženého světla byla sledována na vstupním modulu umístěném na přední straně jednotky CLV 2000.



Obrázek 36: Optimální signál pro měření



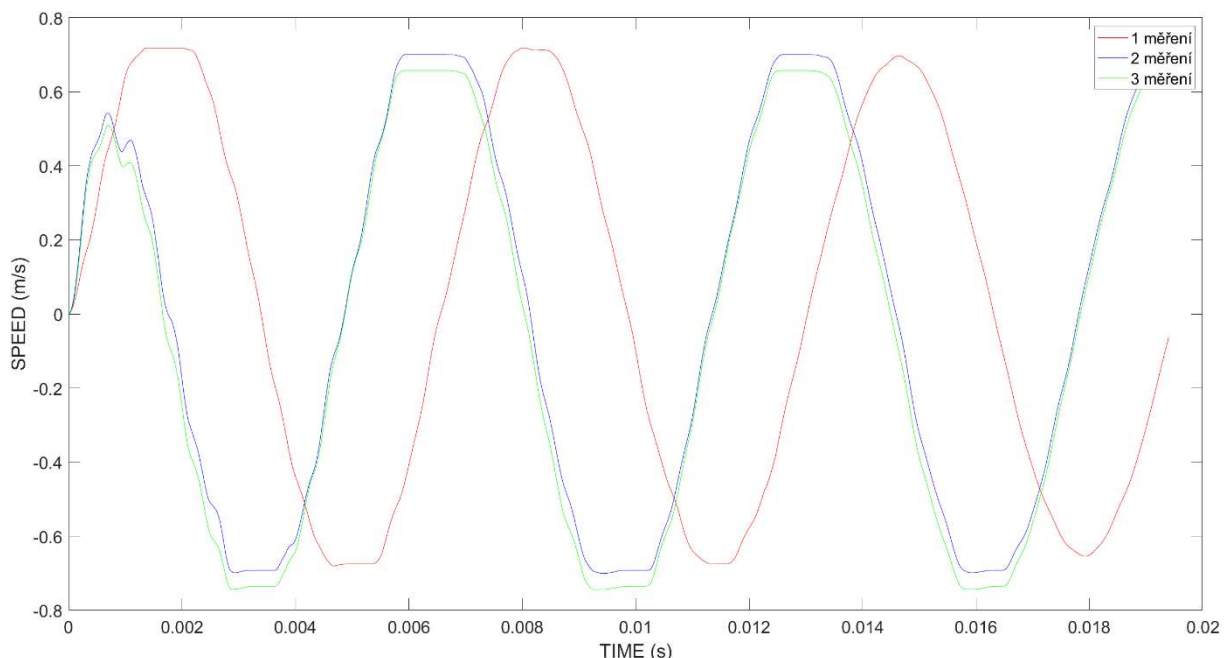
Obrázek 37: Nedostatečný signál pro měření

3.3.2 Měření na nosníku

Při měření byl přivázán na konec nosníku vlasec, na který bylo následně připevněno závaží o hmotnosti 280 g. Když bylo vše připraveno, odstříhlo se závaží a tím se nosník rozkmital. Kmitání bylo snímáno vibrometrem, na který byl připojen osciloskop, díky kterému byl vidět průběh v aplikaci na počítači. Tento pokus byl opakován třikrát, pro zaručení opakovatelnosti experimentu.

3.3.3 Vyhodnocení experimentu

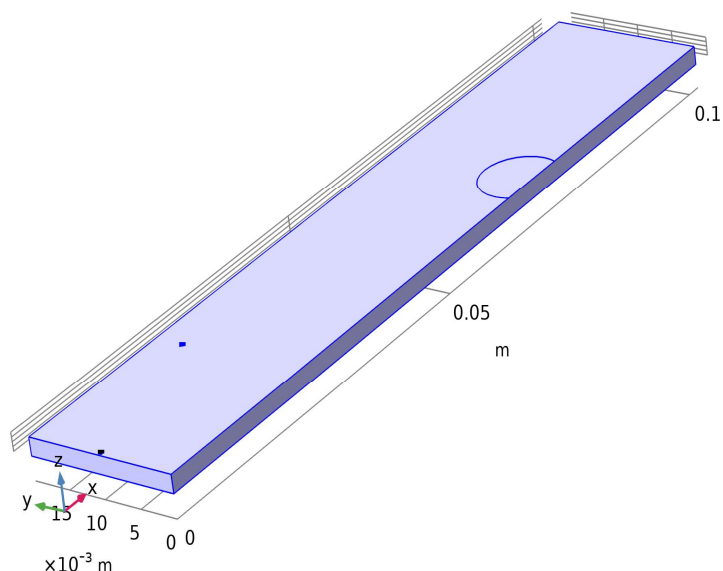
Hodnoty rychlosti na nosníku, které byly naměřeny u všech třech experimentů byly mezi sebou porovnány, jak je vidět na Obrázku 38.



Obrázek 38: Naměřené rychlosti kmitání nosníku

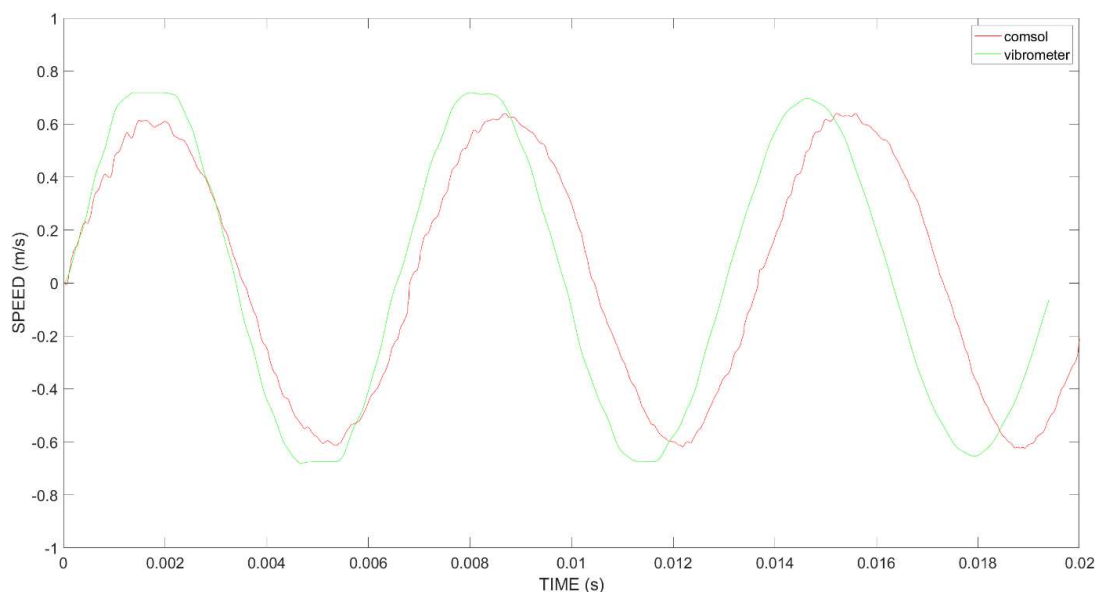
Z tohoto grafu je vidět, že všechna tři měření mají velmi podobný průběh. Maximální hodnoty vypočítané rychlosti jsou téměř totožné ve všech pokusech až na drobné odchylky. Z grafu je vidět, že hodnoty maximální rychlosti jsou ořezané. To je způsobeno špatným nastavením vibrometru. Dále je vidět u měření číslo 1 drobný fázový posun, který je nejspíše způsobený při oddělení závaží od nosníku.

Následně byl experiment porovnán s modelem vytvořeným v Comsol Multiphysic mým kolegou Ing. Ladislavem Musilem, Ph.D. z Ústavu termomechaniky AV ČR. Při vytváření modelu bylo zapotřebí určit okrajové podmínky, zadat materiálové a fyzikální vlastnosti nosníku a v neposlední řadě místo, ve kterém se měřily vibrace pomocí laseru. Tento model můžeme vidět na Obrázku 39.



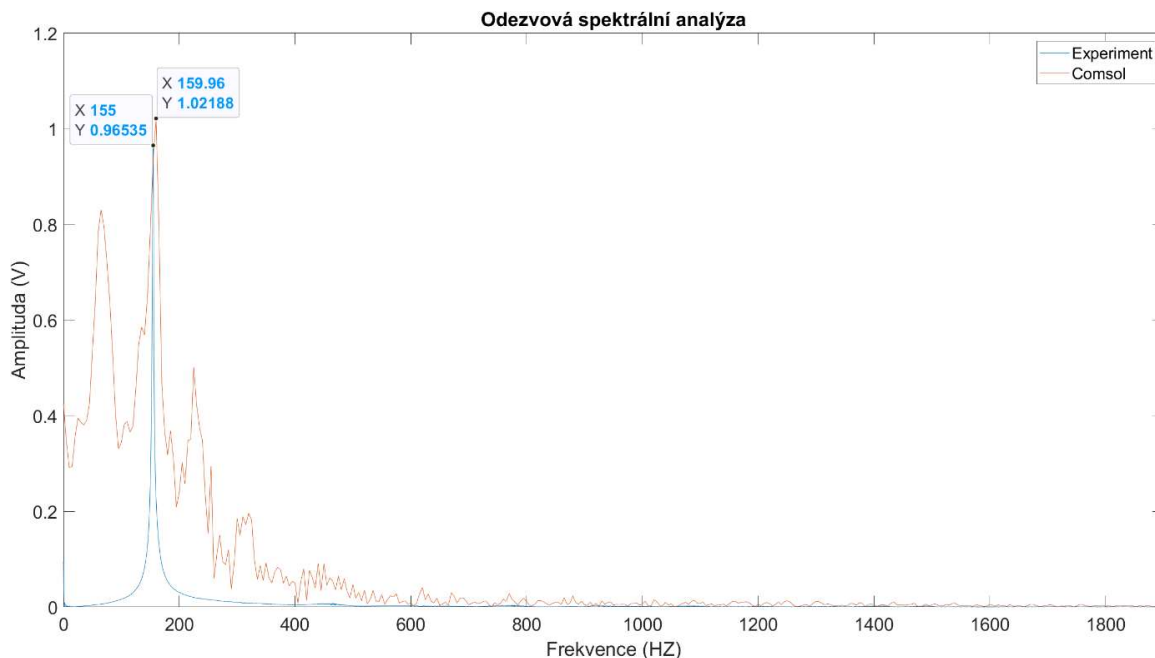
Obrázek 39: Model nosníku vytvořený v Comsol Multiphysic

Na Obrázku 40. je znázorněno porovnání rychlosti z experimentu a modelu. Jak je vidět, model má jinou frekvenci a menší maximální rychlost kmitání. Tyto jevy jsou nejspíše způsobeny nastavením softwaru, ve kterém není zahrnuto tlumení.



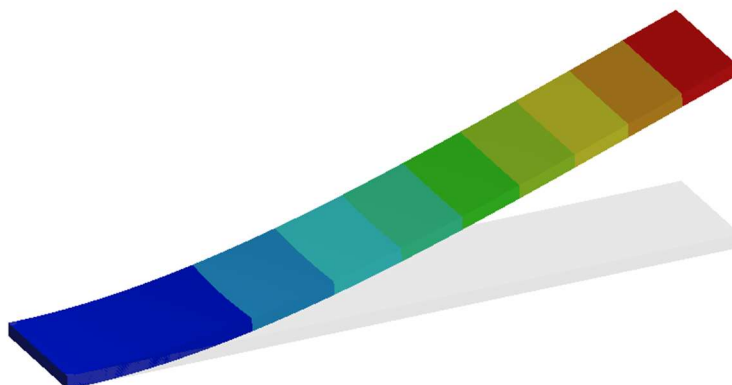
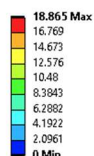
Obrázek 40: Porovnání naměřených výsledků z vibrometru s výpočty z Comsolu

Na Obrázku 41. je znázorněna odezвовá spektrální analýza mezi vibrometrem a modelem v Comsolu. Z tohoto grafu je vidět, že nejvýraznější amplituda je ve 155 Hz. Pro ověření byl využit softwar Ansys, který vypočítal první vlastní mód kmitání pro frekvenci 159.28 Hz, jak je vidět na Obrázku 42.



Obrázek 41: Odezвовá spektrální analýza

A: Modal
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 159.28 Hz
Unit: m
7/29/2022 11:18 AM



Obrázek 42: Model v programu Ansys

| | 1 měření | 2 měření | 3 měření |
|------------------------|----------|----------|----------|
| Rychlost měřeného bodu | 0.7 m/s | 0.7 m/s | 0.66 m/s |

Tabulka 1: Porovnání rychlostí třech měření

| | Experiment | Comsol | Ansys |
|-------------------|------------|-----------|-----------|
| Vlastní frekvence | 155 Hz | 159.96 Hz | 159.28 Hz |

Tabulka 2: Porovnání první vlastní frekvence nosníku

3.3.4 Závěr

Na Obrázku 38 vidíme porovnání třech měření. Jak si můžeme povšimnout maximální hodnoty rychlostí jsou zploštělé. To je zapříčiněno špatným nastavením vibrometru.

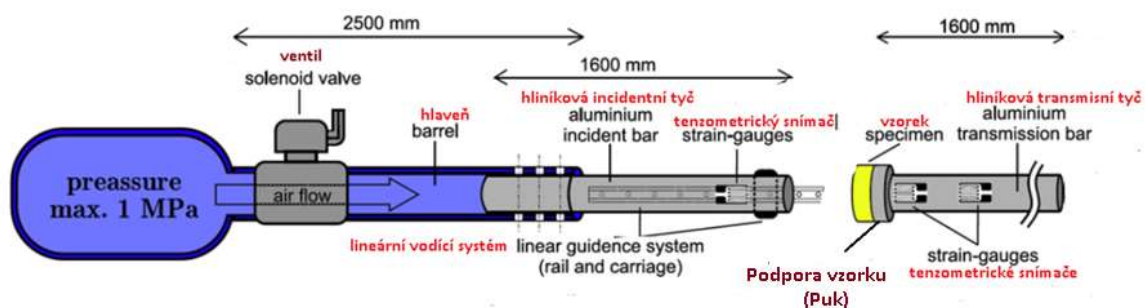
Dále bylo provedeno porovnání naměřené rychlosti s modelem, které vidíme na Obrázku 40. Z tohoto Obrázku vidíme, že naměřená hodnota rychlosti je vyšší než hodnota z modelu. Dále je vidět, že model má jinou frekvenci než měření. Což je pravděpodobně způsobeno nedokonalým vetknutím nosníku.

Na Obrázku 43 je znázorněno spektrální porovnání modelu Comsolu s měřením vibrometru. Nejvýraznější amplituda naměřená vibrometrem je ve 155 Hz a modelu ve 159.96 Hz. Pro ověření bylo využito softwaru Ansys, který vypočítal první vlastní frekvenci nosníku na hodnotě 159.28 Hz.

3.4 Penetrační experiment

Tento experiment je rozdělen do dvou částí. V obou částech se zabývá měřením rychlostí na předem určených určitých místech na Hopkinsonově dělené tyči.

Metoda dělené Hopkinsonovy tyče je určená na měření materiálových vlastností při vysokých rychlostech deformace. Měřicí sestava se skládá ze vzdušného děla, jenž udává rychlost projektilu, který vyvozuje elastický napěťový pulz. Tento pulz se šíří incidentní tyčí do vzorku, kde způsobí deformaci. Následně se pulz přeneše do transmisní tyče, která je umístěna za vzorkem, jak vidíme na Obrázku 43. Tyto pulzy jsou zaznamenány pomocí tenzometrických snímačů umístěných na tyčích, které jsou taktéž znázorněny na Obrázku 43.



Obrázek 43: Princip dělené Hopkinsonovy tyče

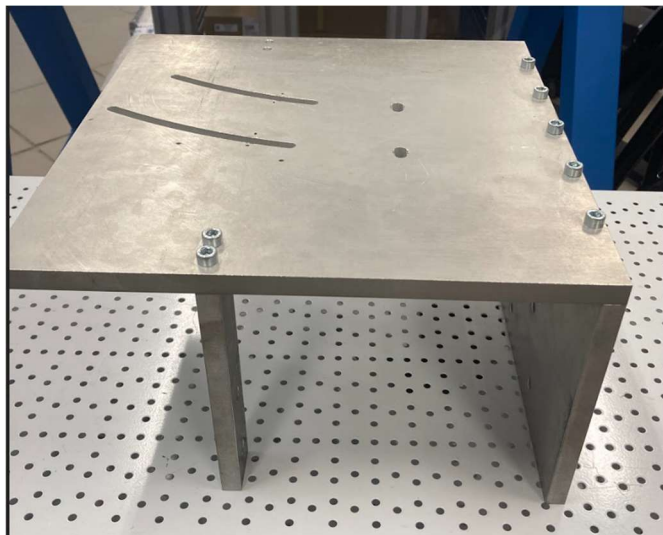
První část se zabývá měřením rychlosti zadní stěny puku, který slouží jako podpora pro měřený vzorek materiálu. Tato část je zaměřena na porovnání naměřené rychlosti pomocí vibrometru s vypočítanou rychlostí z tenzometru. Tyto výsledky jsou mezi sebou porovnávány, aby bylo možné zjistit, jak kvalitní jsou naměřené hodnoty pod úhlem, a jaká je maximální rychlost, kterou dokáže vibrometr naměřit. Tyto poznatky jsou využity při měření penetrace panelu.

Druhá část je zaměřena na měření rychlosti volného konce transmisní tyče s následným vyhodnocením deformace při rychlosti výstřelu 1 m/s.

3.4.1 Příprava experimentu část 1

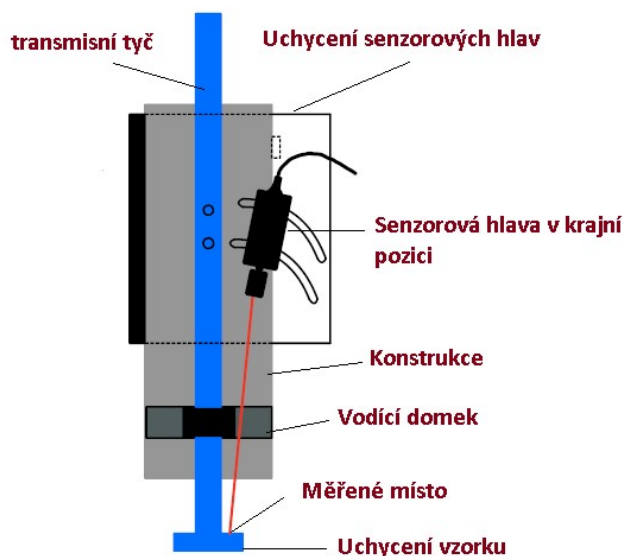
Pro první část experimentu bylo vytvořeno uchycení sensorových hlav znázorněné na Obrázku 44. Uchycení bylo nezbytné pro správné nastavení a pro možnost opětovného měření za stejných podmínek. Toto uchycení bylo vymodelováno v softwaru Autodesk Inventor Professional 2020. Tato sestava měla dvě možnosti uchycení sensorových hlav. První

možností bylo měření v ose tyče a druhou měření pod úhlem. V první části experimentu byla využita sensorová hlava, která byla umístěna pod úhlem. Bylo to z důvodu nedostatečného místa pro laser v ose tyče. Z Obrázku 44 je vidět, že sestava má také boční stěny, které jsou určené k uchycení ke konstrukci děla. Vše bylo navrženo tak, aby měření probíhalo ze vzdálenosti 30 cm. Tato vzdálenost je udávána jako optimální měřicí vzdálenost pro tento typ sensorové hlavy.



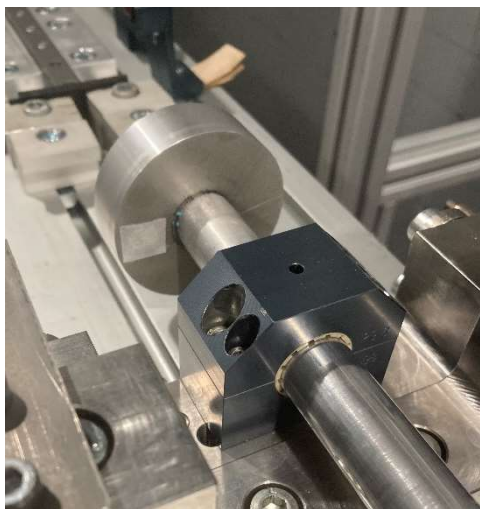
Obrázek 44: Uchycení sensorových hlav

Po nainstalování tohoto uchycení, znázorněného na Obrázku 44 ke konstrukci děla byla připevněna i sensorovou hlavu. Ta byla v tomto případě pod úhlem, jak již bylo zmíněno v předchozí části.



Obrázek 45: Princip uchycení sensorové hlavy pod úhlem

Při tomto nastavení bylo nutné zajistit dostatečné množství odraženého světla od povrchu puku. Toho bylo docíleno použitím reflexního štítku, jak je vidět na Obrázku 46.

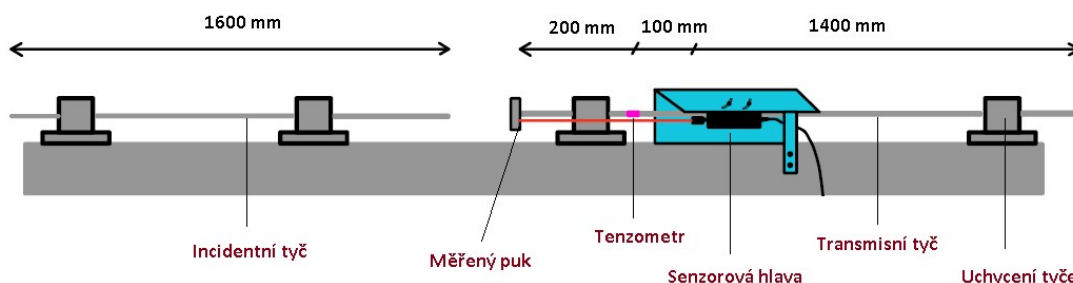


Obrázek 46: Měřené místo na puku

Po dosažení vhodného množství odraženého světla byl vibrometr nastaven na největší možné rozlišení. Následně byl vibrometr propojen s osciloskopem pomocí BNC kabelu a ten s počítačem. Dále bylo potřebné zkontrolovat uchycení a funkčnost tenzometrů.

3.4.2 Měření experimentu část 1

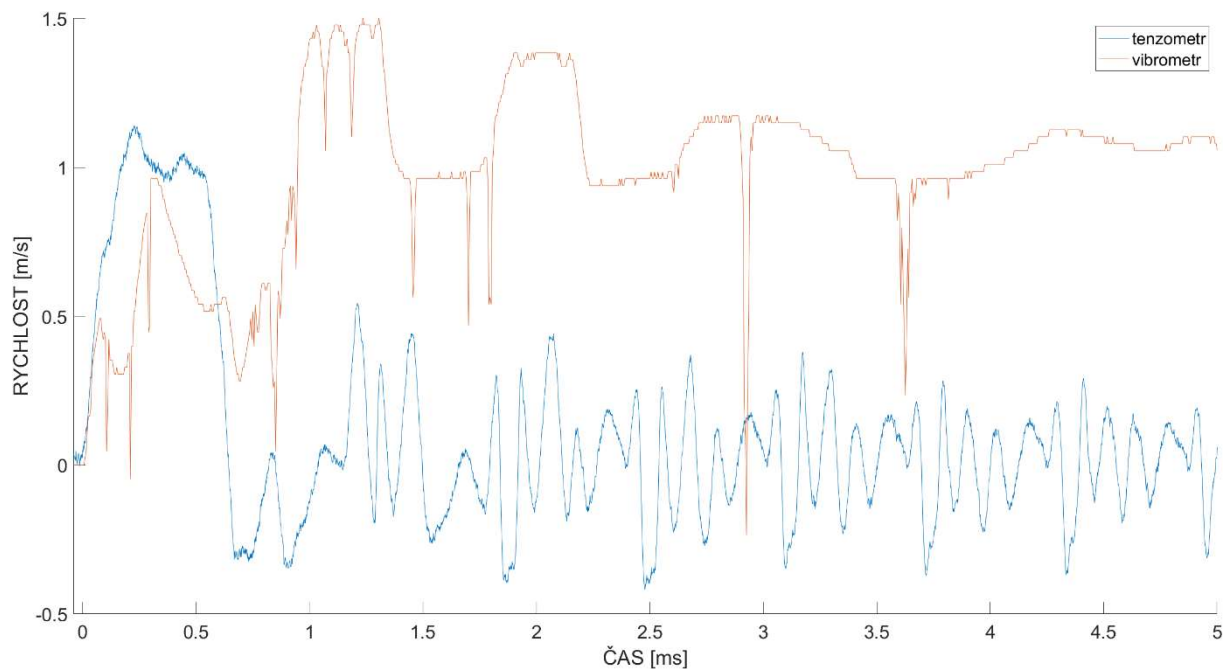
Po přípravě experimentu byla provedena kontrola, zda jsou data z vibrometru a tenzometru nahrávány. Následně byl proveden výstřel ze vzduchového děla. Při dopadu projektilu na incidentní tyč byl generován incidentní pulz, který byl zaznamenán tenzometrem. Poté byl tento pulz přenesen na podporu vzorku, kde byla naměřena rychlost pomocí vibrometru a také prošlý pulz pomocí tenzometru přilepeného 200 mm od podpory vzorku a 1400 mm od volného konce transmisní tyče. Tyto hodnoty byly důležité pro následné vyhodnocení.



Obrázek 47: Princip měření

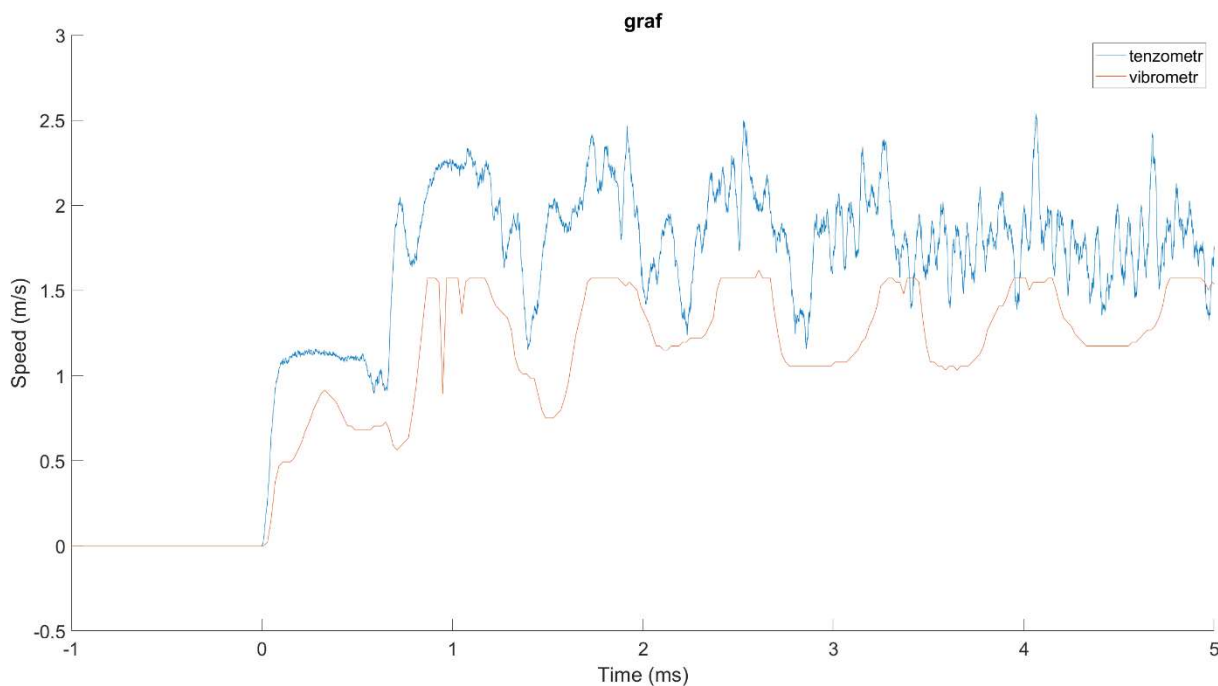
3.4.3 Vyhodnocení části 1

Prvním krokem bylo přenesení dat z tenzometru a vibrometru do softwaru Matlab, kde s nimi bylo dále pracováno. Následně bylo nutné přepočítat napětí naměřené tenzometrem na rychlost, aby bylo možné porovnání s rychlostí naměřenou vibrometrem. Toto porovnání je znázorněno na Obrázku 48.



Obrázek 48: Porovnání rychlostí

Poklesy, které vidíme na křivce tenzometru jsou způsobeny zpětně se šířící vlnou od volného konce transmisní tyče. Proto bylo nutné provést separaci vln. Separace vln je operace, při které se oddělí dopředná a zpětná vlna při znalosti počátečních podmínek. To umožnilo porovnat skutečné rychlosti, které vidíme na Obrázku 49.



Obrázek 49: Porovnání rychlostí po rozložení vln

Jak je vidět, vyhodnocený signál pomocí vlnové separace ukazuje skutečnou rychlost na uchycení. Dále však vidíme, že signál z vibrometru má zploštělé maximální hodnoty. To je způsobeno nedostatečným rozlišením vibrometru, který nezvládl zaznamenat maximální rychlost vlny. Vibrometr zvládne jen velmi malé rychlosti, jak bylo vidět na tomto experimentu. Tyto rychlosti jsou pro naše experimenty nedostačující.

| Čas | 1 ms | 1,8 ms | 2,5 ms | 3,3 ms | 4 ms |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Vibrometr | 1,57 m/s | 1,57 m/s | 1,57 m/s | 1,57 m/s | 1,54 m/s |
| Tenzometr | 2,32 m/s | 2,34 m/s | 2,36 m/s | 2,37 m/s | 2,44 m/s |
| Rozdíl | 0,75 m/s | 0,77 m/s | 0,79 m/s | 0,8 m/s | 0,9 m/s |

Tabulka 3: Porovnání rychlostí na podpoře vzorku



Z této tabulky je očividné, že vibrometr naměřil maximální rychlost pouze 1,57 m/s, což je velmi málo pro tyto experimenty. Ve 4 m/s byl rozdíl oproti vypočítané rychlosti 0,9 m/s. Tento obrovský rozdíl je neakceptovatelný při provádění experimentu na penetraci panelu. Pro tyto experimenty je potřeba využití větších rychlostí, které nejsou možné naměřit pomocí tohoto typu vibrometru.

3.4.4 Měření penetrace panelu

Tento experiment měl demonstrovat srážku ptáka s letadlem. Princip měření měl být stejný jako v předešlé části, kde by se měřila rychlost na zadní stěně panelu, který by byl vystaven nárazu incidentní tyče.

Bohužel při zadávání této práce jsem ještě neměl potřebné informace o parametrech tohoto typu vibrometru, a proto jsem nebyl schopen odhadnout do jakých rychlostí bude možné měřit. Jak se ukázalo, rozlišení vibrometru není vyhovující pro tento typ experimentu. Naměřené rychlosti do 1,5 m/s jsou nevyhovující pro dosažení potřebných výsledků.

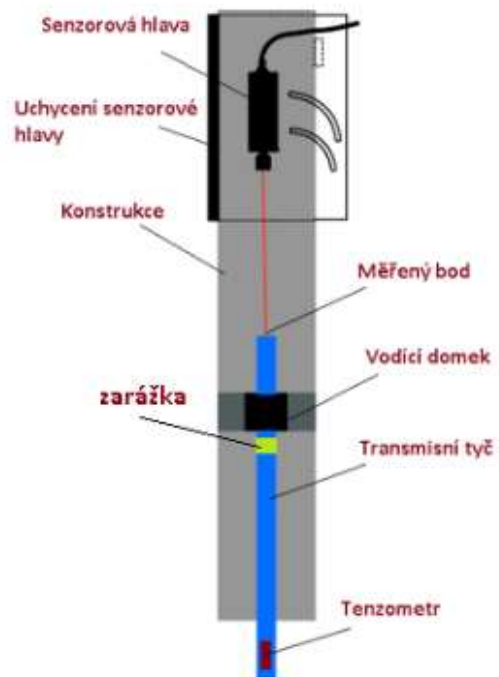
Možným řešením by bylo modifikovat moduly, které udávají vlastnosti CLV. Ale Vzhledem ke stáří daného vibrometru, jsou částky za tyto modifikace stále příliš vysoké a není jisté, zda by i tyto modifikace pomohli při měření ve vyšších rychlostech. Dále je problém s dostupností těchto modulů.

Dalším možným řešením by bylo využít výkonnější vibrometr, který je schopný měřit i velké rychlosti okolo 100 m/s. Tento vibrometr však stojí několik miliónů korun.

Z těchto důvodů jsme usoudil, že měření penetrace panelu nemůže být provedeno z důvodu nedostatečného vybavení, které nedosahuje požadovaných výsledků.

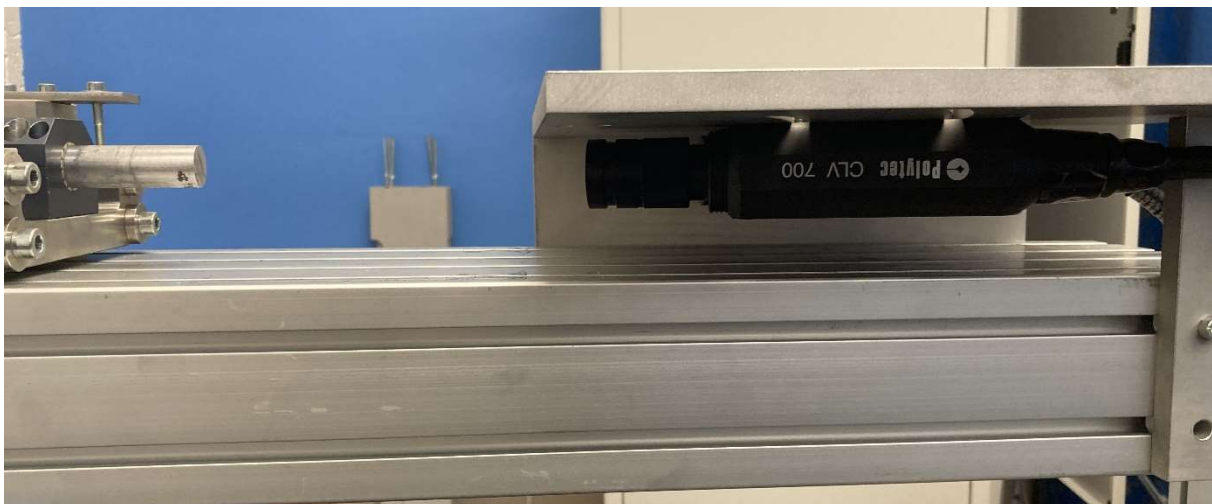
3.4.5 Příprava experimentu část 2

Pro druhou část experimentu bylo využito stejné uchycení sensorových hlav jako v předešlé části. Změnou však bylo umístění přípravku a také jiná poloha sensorové hlavy. Při tomto experimentu byl přípravek umístěn až za transmisní tyč, kde měřil její volný konec. V tomto případě bylo zvoleno umístění hlavy přímo do osy transmisní tyče opět ve vzdálenosti 30 cm. Cílem bylo znovu změřit přenesenou rychlost z incidentní tyče na transmisní. Na Obrázku 50 vidíme princip umístění sensorové hlavy při experimentu.



Obrázek 50: princip měření na volném konci transmisní tyče

V moment, kdy bylo připraveno uchycení laseru, přišla na řadu kontrola tenzometrů, které byli připevněny na tyčích. Dále bylo nezbytné vytvořit zarážku transmisní tyče před posledním vodícím domkem kvůli ochraně senzorové hlavy. Po těchto úkonech byl dekodovací modul znovu nastaven na nejvyšší rozlišení.



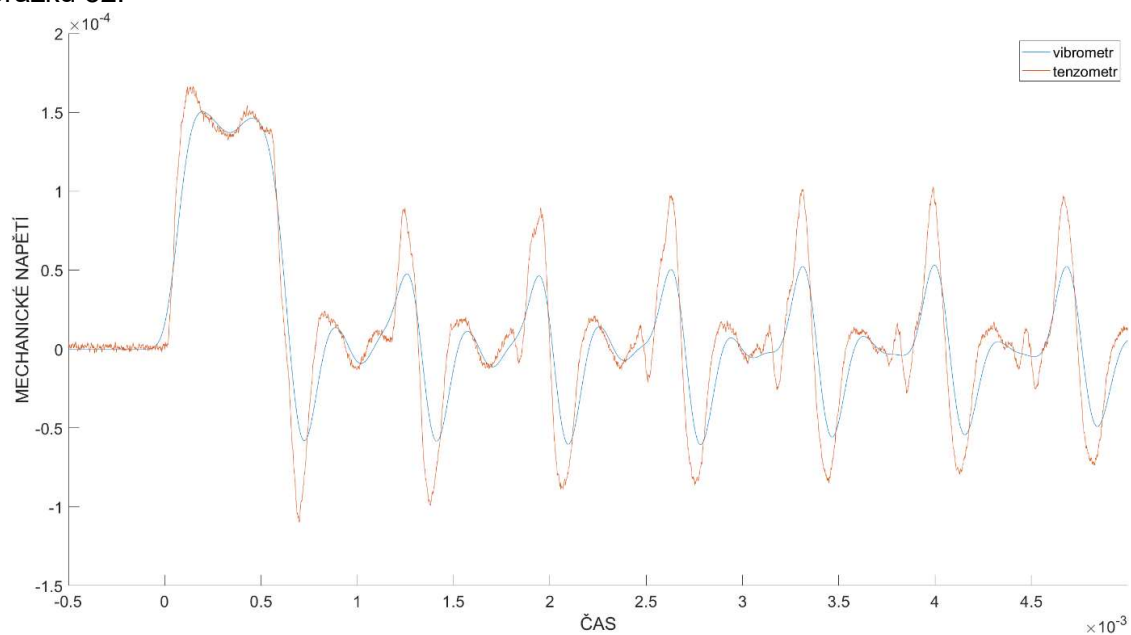
Obrázek 51: Princip uchycení senzorové hlavy

3.4.6 Měření experimentu

Po přípravě proběhla poslední kontrola, zda byl vibrometr správně nastaven. Následně proběhl samotný výstřel ze vzduchového děla, při které byla měřena přenesená rychlost mezi incidentní a transmisní tyčí.

3.4.7 Vyhodnocení

Prvním krokem bylo přenesení dat z osciloskopu do softwaru Matlab, kde byl proveden přepočítání naměřené rychlosti vibrometrem na mechanické napětí. Přepočítání se dělalo z důvodu porovnání s napětím naměřeným pomocí tenzometru. Vyhodnocené výsledky jsou na Obrázku 52.



Obrázek 52: Porovnání napětí

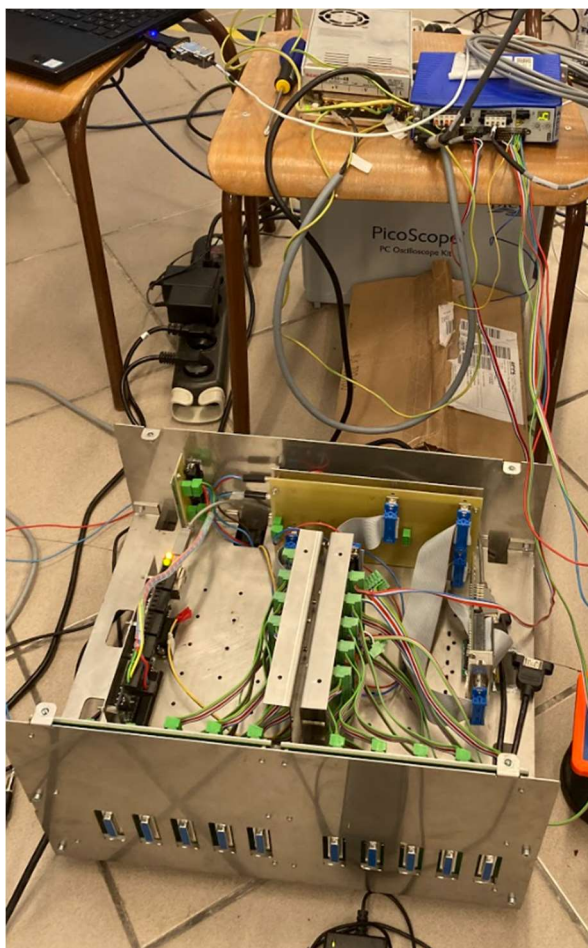
Na Obrázku 52. vidíme graf, na kterém je porovnání napětí naměřené na tenzometru s vypočítaným napětím z vibrometru. Jak si můžeme povšimnout, napětí naměřená pomocí tenzometru má podobnou amplitudu a stejnou frekvenci jako vypočítané napětí z vibrometru. Nicméně vidíme, že naměřené hodnoty pomocí tenzometru jsou přesnější než výpočty provedené z vibrometru. Můžeme to vidět na hranách amplitud, kde má vibrometr zaoblené hrany, což může být způsobeno přepočty, a tenzometr má naopak jasné ostré hrany. Výsledkem tohoto měření je, že tenzometry naměřily o 9,6 % vyšší hodnoty, než byly vypočítány pomocí vibrometru.

3.5 Spektrální analýza 3D tištěného dronu

Tento experiment byl zaměřen na měření rezonanční frekvenci konstrukce 3D tištěného dronu. Znalost rezonanční frekvence jakékoli konstrukce je velmi důležitá. V tomto případě byli měřeny nosníky, na jejichž koncích má být umístěna pohonná jednotka. V případě, že by došlo k rozkmitání konstrukce na rezonanční frekvenci, mohla by se vážně poškodit, nebo v nejhorším případě zničit, což by vedlo k odlomení nosníku, a dron by se tak stal neřiditelným.

3.5.1 Příprava experimentu

Při tomto experimentu bylo zapotřebí rozkmitat vytištěnou konstrukci dronu. K tomu sloužil elektromagnetický vibrační člen, který byl ovládán pomocí řídicí jednotky zobrazené na Obrázku 53, počítače a jednoduchého programu, ve kterém byla možnost nastavovat frekvence a výchylka.



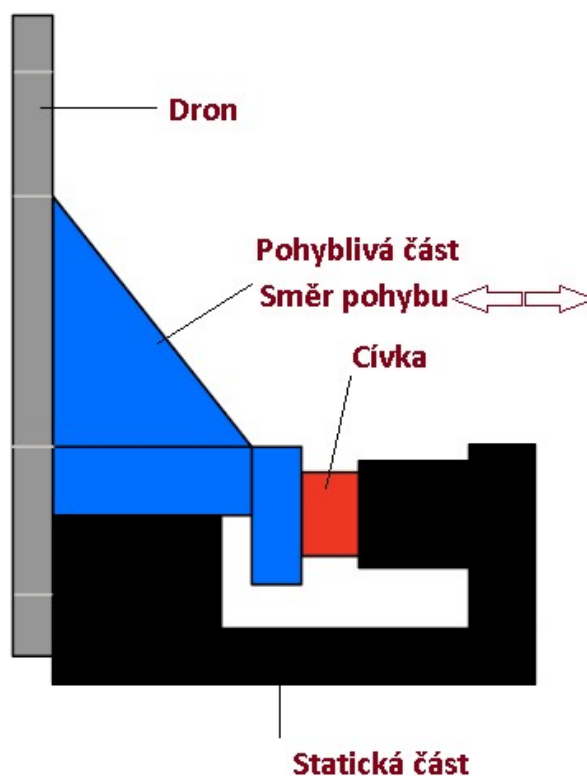
Obrázek 53: Řídicí jednotka

Elektromagnetický vibrační člen byl připevněn k hliníkovému profilu. K samotnému vibračnímu členu byla následně připevněna vytištěná konstrukce dronu. Dále bylo nutné simulovat váhu pohonné jednotky, a k tomuto účelu byl použit šroub se třemi maticemi o hmotnosti 10,6 g.

Pro toto měření byl znovu využit vibrometr značky Polytec se sensorovými hlavami CLV 700, jako tomu bylo v předešlých experimentech. Sensorové hlavy byly usazeny na trojnožky, které byly ve stejné výšce jako měřené body na nosnících dronu znovu ve vzdálenosti 30 cm.

Jelikož materiál, ze kterého byla vyrobena konstrukce dronu, neumožňoval dostatečné odražení paprsku laseru, bylo nutno využít reflexního štítku pro dostatečné odražení světla, které je nezbytné pro přesné měření, jak bylo vyobrazeno v první části penetračního experimentu. Vibrometr byl následně propojen s osciloskopem a ten s počítačem.

3.5.2 Měření na dronu



Obrázek 54: Schéma vibračního členu

Po přípravě všeho vybavení byla provedena zkouška, zda vše funguje. Bohužel byla hned při zkoušce nastavena v programu frekvence, která byla shodná s rezonanční frekvencí konstrukce dronu a došlo k odlomení jednoho nosníku, jak vidíme na Obrázku 55.

V testu bylo pokračováno s touto konstrukcí. Pro začátek experimentu byla zvolena frekvence 1 Hz, která se s každým dalším měřením navyšovala o 1 Hz až do hodnoty 50 Hz. Všechny tyto hodnoty byly nastavovány v počítačovém programu, který následně ovládal elektromagnetický vibrátor.

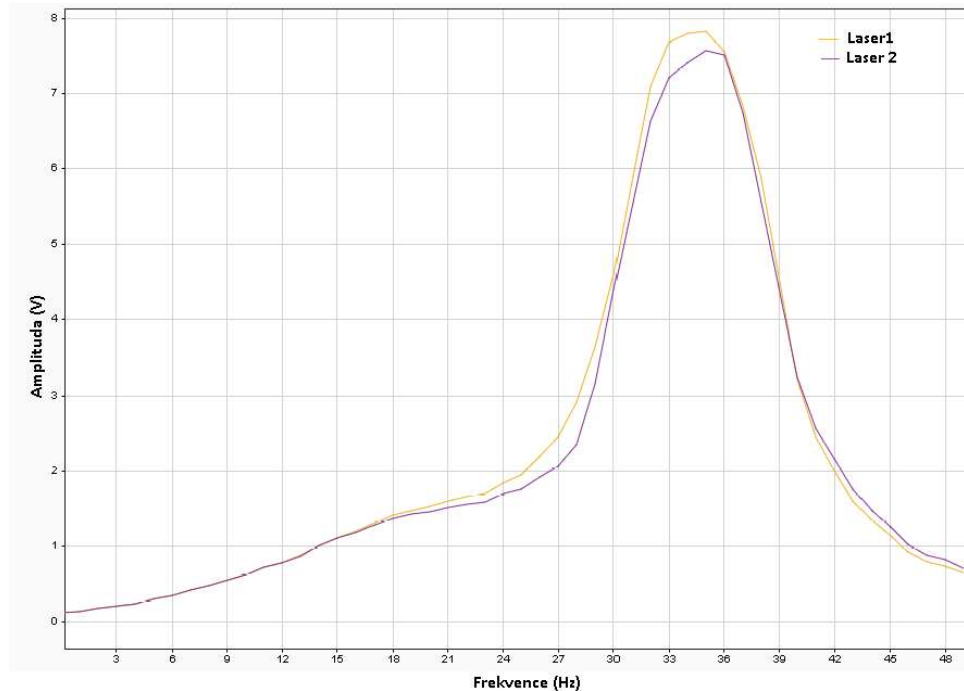


Obrázek 55: Měřené nosníky

Všechny naměřené hodnoty vibrometrem se promítaly do počítačového programu za pomoci osciloskopu, kde byly ukládány k pozdějšímu vyhodnocení.

3.5.3 Vyhodnocení

Naměřené experimenty byly následně vyhodnoceny a provedla se spektrální analýza, kterou vidíte na Obrázku 56.

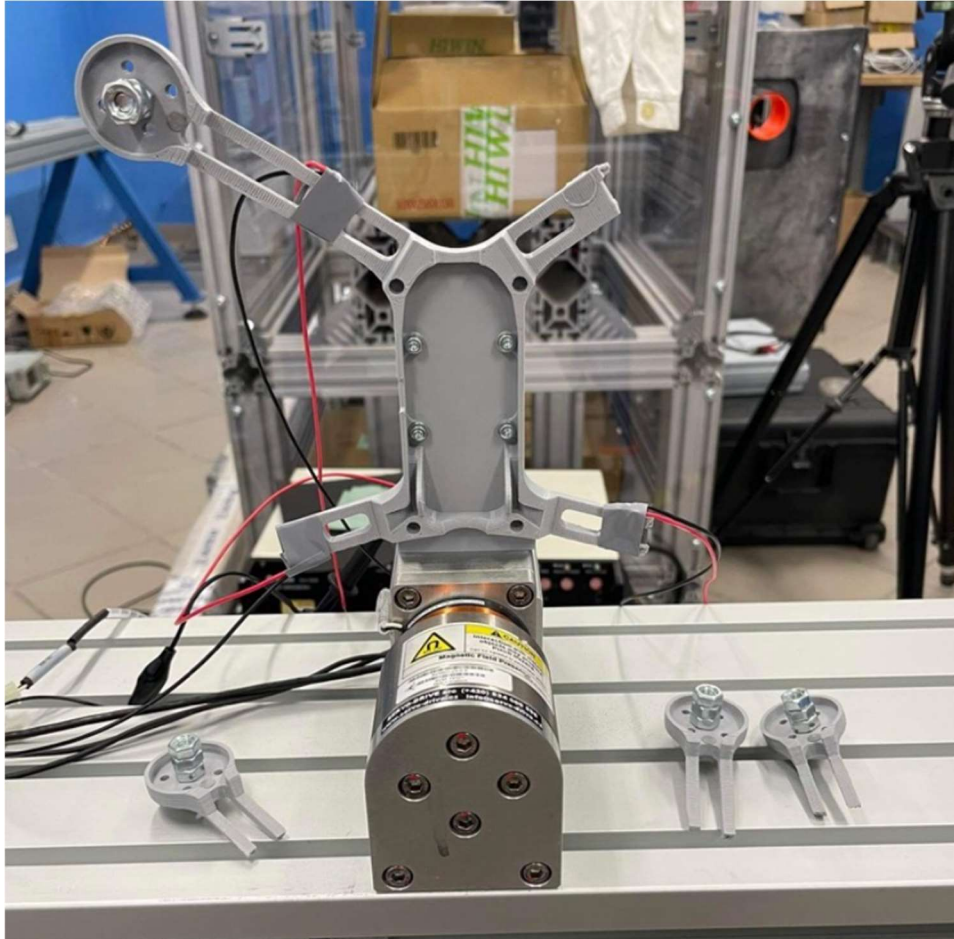


Obrázek 56: Spektrální analýza dronu

Z tohoto grafu můžeme vidět, že rezonanční frekvence nosníků, které nesou pohonnou jednotku, je přibližně okolo 33–36 Hz. Dále si můžeme povšimnout, že v okolí rezonanční frekvence máme odchylky ve výchylce. To může být způsobené 3D tiskem, ve kterém mohlo dojít k drobné chybě, a tím pádem došlo k ovlivnění kvality konstrukce. Experiment byl proveden pouze do hodnoty 50 Hz z důvodu, že poté už vibrátor neumožňoval na požadované frekvenci kmitat s tak velkou výchylkou.

3.5.4 Závěr

Tímto experimentem byla zjištěna rezonanční frekvence konstrukce. Pokud by konstrukce kmitala při této frekvenci, a byla by navýšena amplituda, mohlo by dojít k poškození konstrukce, nebo jejímu zničení, jak vidíme na Obrázku 57.



Obrázek 57: Zničený dron



4. Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na osvojení si práce s laserovým Dopplerovým vibrometrem a následným využitím při dynamických experimentech. Pro tyto účely byly provedeny tři experimenty s následným vyhodnocením.

Jako první experiment v této práci bylo měření vibrací na vetknutém nosníku. Tento experiment byl zvolen kvůli jednoduchému provedení a porovnání s numerickými metodami. Výsledky naměřeny pomocí vibrometru byly následně porovnány s modelem vytvořeným v Comsol Multiphysic a také s modelem ze softwaru Ansys. Při porovnání naměřených hodnot se dospělo k závěru, že výsledky experimentu byly téměř totožné s výsledky z modelů.

V druhém experimentu mělo být cílem měření rychlosti na zadní stěně panelu, vystaveného dynamickému zatížení, za využití metody dělené Hopkinsonovy tyče. Tomuto pokusu předcházelo měření rychlosti zadní stěny podpory vzorku (puku), na kterém byla ověřena metoda měření a bylo provedeno porovnání vyhodnocených dat z vibrometru s tenzometrem.

Při tomto vyhodnocování se vyskytlo několik technických problémů. Prvním problémem bylo umístění vibrometru, který musel být během experimentu pod úhlem, jak je znázorněno na Obrázku 47. Toto řešení bylo zvoleno, kvůli nedostatečnému prostoru na umístění vibrometru do osy penetrace.

Další problém byl při vyhodnocení dat, kdy byly naměřené hodnoty ovlivněny odraženou vlnou od volného konce transmisní tyče. Tento problém se vyřešil pomocí separace vln, která oddělila dopřednou a odraženou vlnu. Díky této separaci byly získány správné hodnoty naměřené rychlosti.

Při vyhodnocování však vyšlo najevo, že daný vibrometr Polytec CLV – 2000 nemá dostatečné rozlišení na to, aby s ním bylo možné měřit experimenty ve vyšších rychlostech, než je 1,5 m/s. Toto zjištění značně ovlivnilo průběh dané práce.

Tento problém by se mohl vyřešit dvěma způsoby. Jedním je použití jiných modulů, které jsou kompatibilní s Vibrometrem CLV-2000. Ale je možné, že ani tyto moduly by nestačily na potřebné měření vysokých rychlostí. Bohužel tyto moduly nejsou v dnešní době dostupné.

Dalším způsobem, kterým by se dal daný problém vyřešit, by bylo využití výkonnějšího vibrometru, přímo určeného k měření vyšších rychlostí. Tyto vibrometry jsou však velmi drahé a jejich ceny se pohybují okolo několika milionů korun.



V tomto experimentu byla však navržena metodika pro měření dynamické odezvy panelu, ale dostupné vybavení nebylo dostačující pro toto měření. Z těchto důvodů nebylo možné provést experimenty na daných panelech.

V návaznosti na bakalářskou práci předpokládáme zapůjčení výkonnějšího laserového vibrometru, který bude mít dostatečný rozsah pro tyto experimenty.

V druhé části byla měřena rychlost volného konce transmisní tyče. Tento experiment byl proveden v nižších rychlostech, než test na puku. Cílem bylo porovnat naměřené napětí na tenzometru s vypočítaným napětím z vibrometru. V tomto případě byl experiment úspěšnější než v první části. Nicméně bylo zjištěno, že naměřené hodnoty pomocí tenzometru jsou přesnější než výpočty z rychlosti. Výsledky však nebyly příliš rozdílné, jak je vidět na Obrázku 49.

Poslední experiment byl zaměřen na zjištění první vlastní frekvence konstrukce 3D tištěného dronu. V tomto pokusu byla rozvibrována konstrukce dronu při předem zvolených frekvencích a na nosnících pohonných jednotek byly měřeny vibrace. Z tohoto měření byla následně provedena spektrální analýza, díky které bylo možné určit rezonanční frekvenci konstrukce.



4.1 Využití v letecké dopravě

Všechny uvedené experimenty lze využít v letecké dopravě, nebo jsou již využívány. Například experiment s vetknutým nosníkem lze využívat při stanovení životnosti lopatky za pomoci metody měření LCF (nizkokycklové únavy), při níž se lopatka zkoumá před i po opakovaném zatížení. Naměřené hodnoty se následně porovnají s modelem. Díky těmto testům můžeme stanovit cykly údržby a životnost lopatek.

Další experiment by při správném řešení a použití vhodného vybavení mohl pomoci s odhadem velikosti poškození způsobeného nárazem ptáka do letadla.

V neposlední řadě jsou zde testy na dronech. Drony jsou v dnešní době velmi rozšířenou záležitostí, která má však velmi vysoké nároky na konstrukci. Tímto experimentem, který jsem provedl, lze zjistit rezonanční frekvenci konstrukce daného dronu. To může být užitečné při vybírání vhodné pohonné jednotky.



5. Literatura

- [1] LEPIL, Oldřich. *Mechanické kmitání a vlnění: studijní modul*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN isbn978-80-244-3295-3.
- [2] KOKTAVÝ, Bohumil. *Mechanické kmitání a vlnění: učební text pro studenty distančního a denního studia*. 2. vyd. Brno: CERM, 1999. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1153-8.
- [3] *Mechanické kmitání a vlnění* [online]. Praha: Encyklopedie fyziky, 2022 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/150-mechanicke-kmitani-a-vlneni>
- [4] ROTHBERG, S.J., M.S. ALLEN, P. CASTELLINI, et al. An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2017, **99**(1), 11-22 [cit. 2022-03-06]. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2016.10.023
- [5] *Laser Doppler vibrometry* [online]. Berlin: Polytec, 2022 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://www.polytec.com/eu/vibrometry/technology/laser-doppler-vibrometry>
- [6] Measurement Principle - Laser Vibrometry. *OptoMET: Measurement Principle - Laser Vibrometry* [online]. Darmstadt: OptoMET, 2022 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://www.optomet.com/technology/measurement-principle/>
- [7] JOHANSMANN, M. a G. WIRTH. Laser Doppler vibrometry for measuring vibration in ultrasonic transducers. In: *Ultrasonic Transducers* [online]. Elsevier, 2012, 2012, s. 277-313 [cit. 2022-07-27]. ISBN 9781845699895. Dostupné z: doi:10.1533/9780857096302.2.2787
- [8] *Laser Doppler vibrometry* [online]. Itálie: Polytechnic University of Marche, 2010 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <http://www.science4heritage.org/COSTG7/booklet/chapters/ldv.htm#3.3.3>
- [9] *Principle of laser Doppler vibrometry* [online]. Německo: Polytec, 2013 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: https://people.ucalgary.ca/~sspiewak/vilca/40_Protected_outreach/70_VISION/60_VIL_Lectures/50_Cranfield_04/10_presentation_html/03_Part_3/Std_65/LDV_principle.pdf
- [10] *User manual: compact laser vibrometer CLV 2000*. Berlin, 2005.



- [11] EICHENBERGER, Jerome a Joerg SAUER. Validating Complex Models Accurately and Without Contact Using Scanning Laser Doppler Vibrometry (SLDV). In: DI MAIO, Dario a Javad BAQERSAD, ed. *Rotating Machinery, Optical Methods & Scanning LDV Methods, Volume 6* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2022, 2022-08-26, s. 113-124 [cit. 2022-07-27]. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. ISBN 978-3-030-76334-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-76335-0_11
- [12] Vibrometry application: Aerospace. *Optomet* [online]. Darmstadt: OptoMET, 2015 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://www.optomet.com/applications/aerospace/>
- [13] Vibrometry application: Loose Rivet Detection. *Optomet* [online]. Darmstadt: OptoMET, 2015 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://www.optomet.com/applications/aerospace/>
- [14] *Polytec vibrometry application: NVH testing* [online]. Berlin: Polytec, 2017 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://www.polytec.com/us/vibrometry/areas-of-application/automotive/nvh-testing>
- [15] *Tenzometrie* [online]. Polsko: Polytechnika Lubelska, 2005 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <http://elektron.pol.lublin.pl/dljlj24/pwn/cw1.pdf>
- [16] *EXPERIMENTAL MECHANICS: Digital Image Correlation* [online]. USA: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 2007 [cit. 2022-07-27]. Dostupné z: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-194-04.pdf>
- [17] *Compact laser vibrometer manual: CLV 2000*. 1. Německo: Polytec, 2005.