



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## ANALÝZA DYNAMICKÝCH PARAMETRŮ LASEROVÝCH VIBROMETRŮ

ANALYSIS OF DYNAMIC PARAMETERS OF LASER VIBROMETERS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Pavloň

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

BRNO 2017

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Martin Pavloň

**ID:** 154830

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

### **Analýza dynamických parametrů laserových vibrometrů**

#### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

- 1) Zpracujte literární rešerši metod měření vibrací a malých výchylek interferometrickými metodami používanými v laserových dopplerovských vibrometrech. Popište hlavní parazitní vlivy omezující dosažitelné rozlišení při měření s těmito systémy.
- 2) Navrhněte způsoby ověření základních dynamických (šumových) parametrů laserových dopplerovských vibrometrů firmy Polytec. Zaměřte se zejména na měření dosažitelného odstupů signál-šum při různých praktických uspořádáních.
- 3) Realizujte měření vlastního šumu laserových vibrometrů Polytec PDV100 a OFV5000 (případně i CLV-2534). Analyzujte zejména vliv kvality odrazné plochy a zaostření s ohledem na intenzitu přijatého optického signálu a koherenční zrnitost.
- 4) Vyhodnoťte naměřené hodnoty a definujte nejvhodnější uspořádání pro měření při optimálním odrazu a dále při zhoršených odrazných podmínkách (s významnou koherenční zrnitostí, rozostřením, atd.).

#### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] Ellis, J. D. and Society of Photo-optical Instrumentation Engineers. Field Guide to Displacement Measuring Interferometry. SPIE, 2014.
- [2] Johansmann, M., Siegmund, G., Pineda, M. Targeting the limits of laser Doppler vibrometry. In Proceedings of the IDEMA 2005, Tokyo, Japan, 2005, pp. 1–12.
- [3] Rothberg, S. J. et al. An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement. Optics and Lasers in Engineering, 2016, pp. 1–12.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 15.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
*předseda oborové rady*

#### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá teoretickým popisem interferenčních metod měření výchylek a vibrací, rozebírá hlavní parazitní jevy určující dosažitelné rozlišení těmito metodami. V praktické části využívá množství měření k ověření vlivu odraženého paprsku, měřicí vzdálenosti a koherenční zrnitosti na šum. Dále navrhuje praktický experiment pro měření dynamických parametrů a odstupu signál-šum. Z provedeného měření plyne, že vlastní šum je exponenciálně závislý na úrovni odraženého paprsku. Viditelné maximum vibrometru se ve dvou ze třech měření ukázalo jako kritické z hlediska časové stálosti úrovně signálu. Z výsledků dynamického měření vyplynulo, že měření výchylky není znehodnoceno ani výraznou rušivou složkou. Měření koherenčního šumu ukazuje, že nejméně šumu vykazují vysoce reflexní povrchy s nízkou hrubostí.

## **Klíčová slova**

Laserový dopplerovský vibrometr, bezkontaktní měření vibrací, parazitní vlivy, vlastní šum, koherenční zrnitost, dynamické parametry, PDV-100, OFV-505, OFV-5000, CLV-2534.

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the theoretical description of interference methods used to measure vibrations, examines main parasitic effects and analyses its contribution to achievable the resolution. In the practical part, it uses several measurements to verify the effects of the level of reflected beam, stand-off distance and speckle noise. It also proposes a practical experiment for measuring dynamic parameters and signal-noise ratio. Results show that, the noise is exponentially dependent on the level of the reflected beam. The visible maximum of the vibrometer proved to be critical in terms of time stability of the measured signal level in two of the three measurements. Results of the dynamic measurement show that, the measured deviations were not degraded or significantly disturbed by the noise signal. From the measurement of the speckle noise, it emerged that the lowest level of noise is achieved with smooth and highly reflective materials.

## **Keywords**

Laser Doppler vibrometer, non-contact vibration measurement, parasitic effects, self-noise, speckle, dynamic parameters, PDV-100, OFV-505, OFV-5000, CLV-2534.

### **Bibliografická citace:**

PAVLOŇ, M. *Analýza dynamických parametrů laserových vibrometrů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Analýza dynamických parametrů laserových vibrometrů“ jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 12. května 2017

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Miroslavu Uherovi a celému Ústavu automatizace na VUT. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým blízkým za podporu nejen při psaní této práce, ale i v průběhu celého studia.

V Brně dne: 12. května 2017

.....  
podpis autora

# Obsah

Úvod .....	9
<b>1 Interferenční metody měření vibrací .....</b>	<b>11</b>
1.1 Interference a její podmínky .....	11
1.1.1 Koherence světla .....	11
1.1.2 Používané lasery a jejich vlastnosti .....	12
1.2 Typy interferometrů .....	13
1.2.1 Michelsonův interferometr .....	13
1.2.2 Machův-Zehnderův interferometr .....	14
1.2.3 Fabryův-Perotův interferometr .....	15
1.2.4 Sagnacův interferometr .....	15
1.3 Homodynamní metody .....	16
1.4 Heterodynamní metody .....	16
1.5 Princip vibrometrů na bázi Dopplerova jevu .....	17
1.5.1 Analogové dekodéry .....	18
1.5.2 Digitální dekodéry .....	18
1.5.3 Možné přístupy ke konstrukci vibrometru .....	19
<b>2 Parametry ovlivňující měření s laserovými vibrometry .....</b>	<b>21</b>
2.1 Kontrastní poměr interferujících paprsků .....	21
2.1.1 Zaostrění paprsku .....	21
2.2 Koherenční zrnitost .....	22
2.2.1 Segmentace pomocí koeficientu špičatosti .....	24
2.3 Poissonův a tepelný šum .....	25
2.4 Refrakční index .....	25
2.5 Výběr laseru .....	26
2.5.1 Stabilita laserového paprsku .....	27
2.6 Výběr detektoru .....	28
2.7 Filtrace šumu .....	28
<b>3 Teoretická příprava měření .....</b>	<b>30</b>
3.1 Měřicí řetězec .....	30
3.1.1 Kompaktní vibrometr PDV-100 .....	31
3.1.2 Modulární vibrometr OFV-505/5000 .....	31
3.1.3 Kompaktní vibrometr CLV-2534 .....	33
3.1.4 Měřicí karta NI 4462 .....	34
3.1.5 Měřicí karta NI 5922 .....	35
3.1.6 Měřicí aplikace .....	36
3.2 Využití průměrování .....	37
3.3 Navržená měření .....	38
3.3.1 Měření šumových parametrů měřicí karty NI-4462 .....	38

3.3.2	Měření vibrometrů s užitím mechanické stabilizace .....	39
3.3.3	Měření výchylky a poměru signál-šum .....	40
3.3.4	Měření koherenční zrnitosti .....	41
<b>4</b>	<b>Zpracování měření.....</b>	<b>44</b>
4.1	Měřicí karta NI 4462 .....	44
4.2	Vibrometr PDV-100 .....	48
4.3	Vibrometr OFV-505/5000.....	50
4.4	Vibrometr CLV-2534 .....	56
4.4.1	Dynamické měření výchylky .....	59
4.4.2	Koherenční zrnitost.....	62
<b>5</b>	<b>Analýza dosažených výsledků.....</b>	<b>72</b>
	<b>Závěr .....</b>	<b>78</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>80</b>
	<b>Příloha A: Rozsahy vibrometrů.....</b>	<b>I</b>
	<b>Příloha B: Dodatky k měření .....</b>	<b>VII</b>
	<b>Příloha C: Neodtlumené prostředí .....</b>	<b>XI</b>
	<b>Příloha D: Úroveň signálu a jeho korelace s šumem .....</b>	<b>XII</b>
	<b>Příloha E: Koherenční zrnitost.....</b>	<b>XIII</b>



# ÚVOD

Moderní optické metody dovolují měřit širokou škálu fyzikálních veličin, od magnetického a elektrického pole, přes měření proudu, radioaktivního záření, teploty, tlaku a vzdálenosti. Vzhledem k použitým vlnovým délkám se jako nástroj pro nepřímé měření frekvence, nebo fázového posunu paprsku využívají interferometry. Zajímavou aplikací měření rozdílů vzdáleností pomocí interferometrie je detekce gravitačních vln, kdy se rozlišení pohybuje v řádu  $10^{-19}$  m, na rameni dlouhém 4 km [1]. Z časové změny průchodu paprsku lze také odvozovat úhlovou rychlost, čehož využívají laserové gyroskopy jako jsou RLG a FOG [2].

Pro detekci poruch hřidel, ložisek a dalších mechanických zařízení se v průmyslu často využívají MEMS snímače zrychlení. Tyto akcelerometry nabízejí malé rozměry a přiměřenou cenu, avšak nehodí se pro všechny typy aplikací, například nutnost upevnění na měřený předmět představuje problém u rotujících objektů. Dále v případě, že hmotnost snímače je srovnatelná s hmotností měřeného objektu, dochází ke změně parametrů měřeného objektu a tím i ke zkreslení naměřených hodnot. Laserová defektoskopie, kontrola kvality a další aplikace se v průmyslu z těchto důvodů stávají stále více oblíbené [3].

Tato práce se zaměřuje na laserové měření vibrací. Jedná se o bezkontaktní metodu měření, z čehož také plynou hlavní výhody a nevýhody tohoto měření. K výhodám patří především velmi malý vliv na měřené vibrace, kdy na měřený předmět působí pouze světelný paprsek, přičemž tlak absorbujících se a odražených fotonů je zde zanedbatelný. Mezi nevýhody patří nutnost zaostření laseru a vhodnost užití speciální odrazné plochy, a to zejména pokud tím nedojde k výraznému ovlivnění měřeného objektu a požadujeme vysoce přesné měření vibrací. Zatím nepřekonaným problémem stále zůstávají pseudo-vibrace způsobené například koherenční zrnitostí.

Cílem této práce je zkoumat parametry předložených vibrometrů z hlediska vlastního šumu v co nejideálnějších podmínkách, vyhodnotit závislost šumu na úrovni zpětně odraženého paprsku. Dále vyhodnotit vliv měřicí vzdálenosti vibrometru na množství vlastního šumu, a to především mimo viditelná maxima vibrometru. V práci je realizováno měření výchylky na vibrační aparatuře, při kterém je zkoumán vliv plynulé změny měřicí vzdálenosti na úroveň šumu v měřeném signálu. Tato situace nastává v technické praxi například, při měření zrychlení (zpomalení) během rázových zkoušek, kde se měřicí vzdálenost před nárazem výrazně mění. Plynulá změna měřicí vzdálenosti byla realizována pomocí dodatečné modulace budicího signálu, signálem s velmi nízkým kmitočtem na základě kterého vibrační generátor posunoval výchozí polohu odrazné plochy. Z tohoto měření je jednak vyhodnocen vliv rušivé složky na měřenou výchylku a dále vypočten poměr signál-šum. Poslední a největší část měření se zabývá zkoumáním vlivu koherenční zrnitosti na měřené vibrace. Zrealizovaný experiment využil množství různorodých povrchů a uspořádání, tak aby zkoumal koherenční šum z několika hledisek. Z tohoto měření byly vyhodnoceny šumové parametry použitých vzorků, ze kterých vyplynul nejlepší vzorek z hlediska přidaného koherenčního šumu.

Práce je rozdělena na teoretický úvod do interferenčních metod měření vibrací, kde je představen základní koncept se zaměřením především na dopplerovské vibrometry. V kapitolách jsou shrnuty hlavní parametry ovlivňující dosažitelné rozlišení a šumovou hladinu laserových vibrometrů. Jedná se například o kontrastní poměr, koherenční zrnitost, Poissonův šum a další. Následně je popsán měřicí řetězec z hlediska působení rušivých elementů a také jsou představeny použité měřicí přístroje. Dále je představen postup pro jednotlivá měření, včetně schématického uspořádání a použitých výpočtů. Předposlední kapitola se zabývá měřením a zpracováním dat, přičemž jsou rozebrány elementární dosažené výsledky. V poslední kapitole jsou všechna měření shrnuta a dosažené výsledky zhodnoceny.

# 1 INTERFERENČNÍ METODY MĚŘENÍ VIBRACÍ

Tato kapitola se zabývá principy měření výchylek a vibrací interferometrickými metodami. Přibližuje základní principy optiky a zaměřuje se na interferometry využívající Dopplerův jev.

## 1.1 Interference a její podmínky

Interference je skládání více světelných paprsků do jednoho výsledného. Pro interferenci světla je zapotřebí, aby světlo mělo shodnou polarizaci. Obecně rozeznáváme několik polarizací, pro obecný popis světelného paprsku můžeme použít například Jonesův vektor, ten je definován dle vzorce (1) [4]. Tento vzorec popisuje chování elektrické složky vzhledem k osám  $x$  a  $y$ , které jsou obě kolmé na směr šíření. Tento vzorec platí pro homogenní izotropní prostředí bez pohlcování. Magnetická složka se zde neuvádí, neboť je kolmá na složku elektrickou.

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_{01} e^{i(w_1 t \pm \phi_1)} \tilde{x}_i \\ E_{02} e^{i(w_2 t \pm \phi_2)} \tilde{y}_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

Výsledná polarizace poté nemusí být pouze v jedné, nebo v druhé ose, či natočená o  $45^\circ$ , ale použitím tzv.  $\lambda/4$  (čtvrtvlnné) destičky lze dosáhnout komplexního vektoru rotace, přičemž výsledná polarizace je poté dle znaménka buď pravotočivá, nebo levotočivá.

Pokud dva paprsky se stejnou vlnovou délkou interferují, vzniká nová vlna a její intenzitu lze poté popsat vztahem (2). Všimněme si, že výsledek není pouze součet intenzit, ale v případě dvou stejných intenzit  $I_1$  a  $I_2$ , je výsledná intenzita čtyřnásobkem té původní [5].

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi \quad (2)$$

Situace se zkomplikuje, pokud nemají interferující paprsky shodnou vlnovou délku, poté se výsledná intenzita nemění pouze s fázovým rozdílem, ale vzniká zánělová frekvence. Tato frekvence je rovna rozdílu  $f_1$  a  $f_2$ , což lze pozorovat v rovnici (3) [6]. Při zpracování dopplerovskými interferometry se tato frekvence promítne, jako světlé a tmavé pruhy, jež jsou měřeny a zpracovávány.

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (3)$$

### 1.1.1 Koherence světla

Důležitým parametrem světelného zdroje je jeho koherence, tu rozdělujeme na časovou a prostorovou. U časové koherence se jedná o vzdálenost (čas), kterou urazí světelný svazek a zároveň si udrží určitý maximální fázový rozdíl mezi jednotlivými paprsky.

V ideálním případě je koherenční délka rovna nekonečnu. Bohužel ve skutečnosti, neexistuje dokonale monochromatický laser, což způsobuje, že za určitou vzdálenost začne záření z takového zdroje interferovat samo se sebou. To je způsobeno faktem, že svazek obsahuje úzké spektrum vlnových délek, a nikoliv pouze jednu složku. Výpočet koherenční délky je zobrazen v rovnici (4) [7].

$$L = \frac{c}{\Delta f} \quad (4)$$

Kde  $L$  je koherenční délka [m],  $c$  je rychlost světla [m/s],  $\Delta f$  rozpětí frekvencí generovaných laserem [Hz].

Druhým typem je prostorová koherence, jedná se o šířku na stínítku, která ještě nevykazuje interferenci vzhledem ke zdroji. Zde je důvodem fakt, že zdroj není dokonale bodovým, a proto v závislosti na šířce štěrbin laseru a generované vlnové délce lze najít na stínítku interferenční minima. Můžeme si to představit tak, že vzdálenost k jednomu bodu na stínítku se liší právě podle toho, z jakého bodu laseru byl laserový paprsek vygenerován. V dostatečné vzdálenosti, kdy se paprsek z laseru rozptýlí na stínítko pak existuje rozdíl v optických drahách rovný  $\lambda/2$  a vzniká tak destruktivní interference. Výpočet prostorové koherenční šířky je uveden ve vzorci (5) [7].

$$R = l \frac{\lambda}{4r} \quad (5)$$

Kde  $R$  je koherenční šířka [m],  $l$  vzdálenost mezi laserem a stínítkem [m],  $\lambda$  vlnová délka [m],  $r$  rádius laserového okénka [m].

### 1.1.2 Používané lasery a jejich vlastnosti

Laser je zdroj koherentního světla, obvykle se také jedná o monochromatický zdroj, ale pro účely heterodynní interference lze např. konstruovat He-Ne laser oscilující na dvou frekvencích zároveň, s rozdílem frekvencí asi 2 MHz [6]. Laserový paprsek vzniká stimulovanou emisí, jehož výsledkem jsou výše zmíněné vlastnosti. Laserové zdroje lze rozdělit jednak podle konstrukce na plynové, polovodičové a vláknové, a dále dle provozního režimu na kontinuální, jenž dodávají nepřetržitý laserový paprsek, a na pulzní, jenž dokáží vyzářit velké množství energie v krátkém okamžiku [8].

Mezi nejčastěji využívané kontinuální lasery patří například He-Ne laser, běžně na vlnové délce 632,8 nm, ale lze ho konstruovat i na dalších vlnových délkách viditelného spektra, nebo v infračervené oblasti [9]. He-Ne lasery nejsou vhodné pro výkonné lasery, ale díky relativně nízké ceně jsou často využívány. Jako výkonné lasery se používají další typy, například několika wattové argonové lasery, nebo CO<sub>2</sub> lasery pro průmyslové řezání. Z měřicích aplikací bylo zkoumáno využití CO<sub>2</sub> jako lidarů s heterodynní detekcí [10].

Mezi pulzní lasery patří například laser využívající syntetický krystal korundu zvaný rubín, jehož typická šířka pulzu je několik milisekund. Posledním uvedeným laserem je Nd-YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet), ten na rozdíl od laseru

využívající rubín lze provozovat, jak v impulzním, tak v kontinuálním režimu. V tabulce 1.1 lze nalézt přehled výše zmíněných laserů.

*Tabulka 1.1: Typy laserů a jejich základní parametry [6]*

Typ laseru	Vlnová délka [ $\mu\text{m}$ ]	Výstup
He-Ne	3,39 1,15 0,63 0,61 0,54	0,5–25 mW
AR <sup>+</sup>	0,51 0,49 0,35	0,5 W–několik W
Diodový	1,064 0,780 0,660 0,635 0,594 0,532 0,475 0,405	5–50 mW
CO <sub>2</sub>	~10,6 ~9,0	Několik W–kW
Ruby	0,69	0,6–10 J
Nd-YAG	1,06	0,1–0,15 J

## 1.2 Typy interferometrů

Před samotným popisem jednotlivých typů interferometrů je dobré se zamyslet, proč vůbec používáme interferometrii. Jedná se o nepřímé měření parametrů elektromagnetické vlny, porovnáváme jednu vlnu ovlivněnou prostředím s druhou referenční vlnou. Jedním z hlavních důvodů je technologie přímého měření, kdy zatím nejsme schopni realizovat přímé měření fotonů, tak abychom dosáhli, byť jen srovnatelných parametrů s interferometrickými metodami.

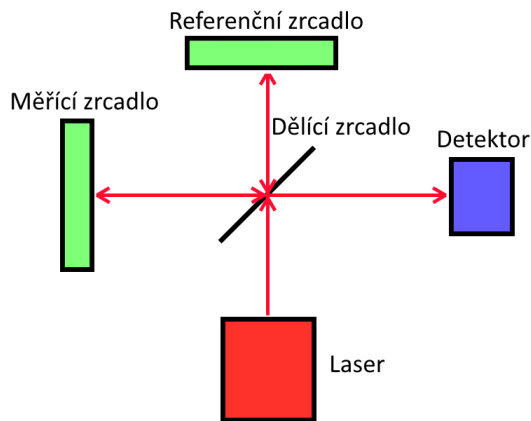
Dále je třeba připomenout, že popsané interferometry nejsou souhrnem všech existujících. Jedná se pouze o ty nejběžnější, kromě interferometrů zmíněných níže existuje ještě Jaminův interferometr, holografické modifikace Mach-Zehnderova a Michelsonova interferometru a případně další typy [7].

### 1.2.1 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr je jedno z nejzákladnějších uspořádání interferometru využívající v principiálním schématu jedno dělicí zrcadlo, jenž rozdělí paprsky z laseru do dvou svazků. První, referenční paprsek, se odrazí od pevného zrcadla zpět, a druhý, měřicí, který prochází prostředím, na jehož konci je také odrazná plocha, tak aby se paprsek mohl vrátit a interferovat s již zmíněným referenčním paprskem [11].

Principiální schéma lze vidět na obrázku 1.1. Tento princip se běžně využívá pro měření změn vzdálenosti. Pokud bychom chtěli měřit absolutní vzdálenost, je zapotřebí úprava, například měření pomocí dvou různých vlnových délek, a poté ze srovnání interference obou vln lze odvodit vzdálenost v mnohem větším rozsahu než jen jedna polovina vlnové délky laseru.

I když se jedná o jeden z nejjednodušších interferometrů, je stále zkoumán, například s využitím CPT (Coherent Population Trapping), pro velmi přesné měření fázového rozdílu [12].

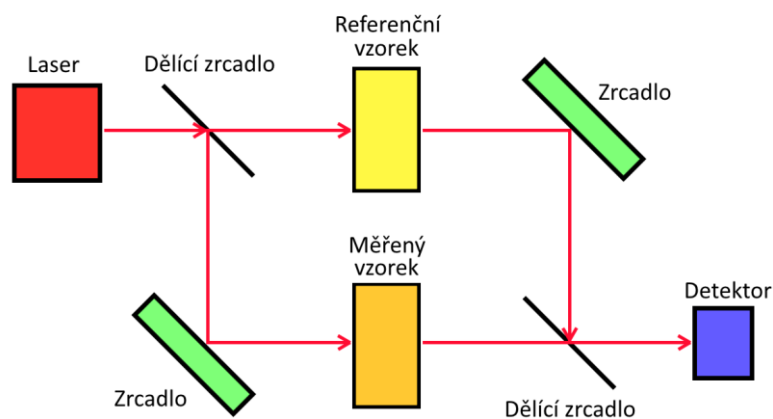


Obrázek 1.1: Michelsonův interferometr

### 1.2.2 Machův-Zehnderův interferometr

Tento typ interferometru dělí vstupní paprsek na dva svazky, jeden paprsek prochází referenčním a druhý měřeným vzorkem. Výsledkem je intenzita na detektoru, jenž je obrazem rozdílu měřeného a referenčního paprsku [7]. Principiální schéma je naznačeno na obrázku 1.2. Oproti Michelsonovu interferometru je konstrukce složitější a náročnější na kvalitní optiku. Tím, že paprsky jsou odděleny a prochází měřeným objektem pouze jednou, je citlivost nižší. Výhoda tohoto uspořádání spočívá v oddělitelnosti referenčního a měřicího paprsku a v možnosti kalibrovat natočením zrcadel paprsky tak, aby interference nastala ve zvolené rovině.

Tyto interferometry jsou například běžné pro měření složení plynů, nebo pro měření indexu lomu. Často se také používají pro kontrolu povrchů transparentních látek. Zajímavou aplikací je pak použití v kvantové fyzice, například pro měření kvantového provázání (Quantum entanglement).



Obrázek 1.2: Machův-Zehnderův interferometr

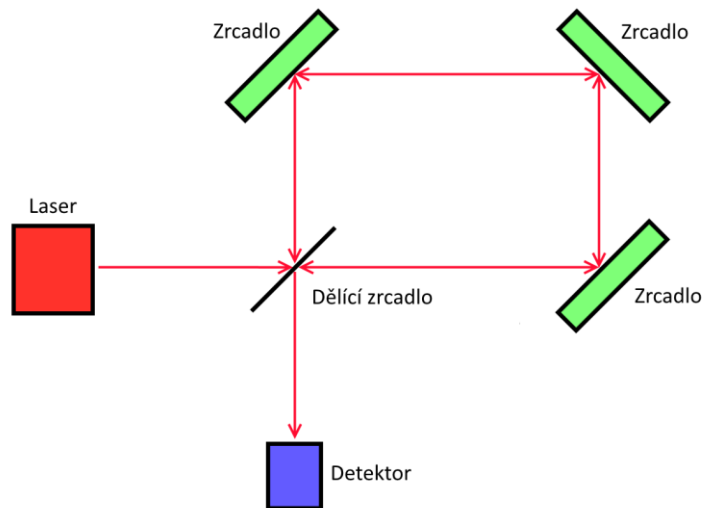
### 1.2.3 Fabryův-Perotův interferometr

Tento interferometr je vlastně modifikací Mach-Zehnderova interferometru. Přidáním rezonátoru z polopropustných zrcadel je výrazně zvýšena citlivost měření. V principu tedy před a za měřený vzorek umístíme polopropustná zrcadla, čímž zajistíme, že paprsek projde měřeným objektem několikrát. Z toho plyne i nevýhoda. Seběmenší změna či nedokonalost je mnohokrát zesílena, což klade ještě vyšší nároky na optiku a stabilitu měřicího prostředí [3].

### 1.2.4 Sagnacův interferometr

Jedná se o interferometr, jenž paprsek na začátku rozdělí na dva, které procházejí stejnou cestou, pouze v opačném směru šíření. Například lze takto konstruovat velmi přesné gyroskopy pro inerciální navigace využívající změnu fáze světla šířícího se optickým kabelem po a proti směru rotace. Na stejném principu s využitím zrcadel pracuje zařízení označované zkratkou RLG (ring laser gyroscope) a díky kompaktnosti se často instaluje do letadel [13].

Hlavní výhodou tohoto interferometru je jeho stabilita, která souvisí s tím, že optická dráha protisměrných paprsků je téměř identická. Pokud je tento interferometr konstruován ze zrcadel, a nikoliv z optických vláken, dochází k odrazu od opticky hustšího prostředí (zrcadla) a fáze je posunuta při každém odrazu [11]. Principiální schéma je ukázáno na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Sagnacův interferometr

### 1.3 Homodynní metody

Z principu se jedná o fázově citlivé metody, výsledná vlna je popsána vztahem (2) a velikost její intenzity je obrazem fázového rozdílu interferujících vln, neboť frekvence je zachována, pouze se změnila její amplituda. Další výhodou je jednodušší konstrukce, díky tomu, že není třeba odvozovat dodatečnou frekvenci z laseru. Pokud měření intenzity probíhá pouze na fotodiodě, je dynamika rychlejší než u CCD pole.

Nevýhodou je, že optická dráha se může změnit, nejen pohybem měřeného předmětu, ale také v důsledku naklonění polopropustného zrcadla, nebo samotného laseru, kdy oba tyto jevy se projeví na měřené intenzitě (případně nestabilita laseru). Z principu jsou tyto metody více náročné na kvalitní kontrastní poměr interferujících paprsků a díky stejnému interferenčnímu obrazu při kladné a záporné změně fáze odraženého paprsku také nerozeznají, zda se předmět přibližuje, či oddaluje [4].

Problém s detekcí směru pohybu lze řešit pomocí fázové kvadrurní demodulace. Jedná se o způsob měření, kdy se využívá fázového posunutí při odrazu od pohybujícího se předmětu a rozdílné polarizace referenčního a měřeného paprsku. Při jeho rozdělení lze pak změřit, zda referenční paprsek předbíhá, či se zpožďuje a z tohoto údaje odvodit směr pohybu.

### 1.4 Heterodynní metody

Tyto metody jsou založeny na interferenci paprsků s různou vlnovou délkou. V takovém případě se intenzita mění nejen s fází, ale také v závislosti na rozdílu frekvencí, jak je ukázáno dříve v rovnici (3). Hlavním rozdílem je, že oproti homodynním metodám se neměří stejnosměrná složka intenzity, ale zánějová frekvence, a to obvykle pomocí CCD snímače.

Mezi hlavní výhody patří vyšší odolnost vůči fluktuaci laserového paprsku. To je způsobeno faktem, že se neměří stejnosměrná složka signálu. Měřený signál je filtrován pásmovou propustí, kdy horní frekvence je dána šířkou pásma detektoru. Heterodynní metody také mají větší optickou účinnost pro měření s více průchody v několika osách [4].

Tento princip je bez modifikace necitlivý na směr pohybu měřeného objektu. Odlišné vlnové délky jsou nejčastěji odvozeny z jednoho monochromatického zdroje světla. Možným řešením je akusticko-optický modulátor, využívající například blok skla, na jehož boku je připevněný piezoelektrický měnič, generující mechanické vlny uvnitř skla. Paprsek dopadající pod Braggovým úhlem se rozdělí s patřičným frekvenčním posunem. Ten je způsoben dopplerovým jevem, jelikož se paprsek odráží od rozhraní, jež se fyzicky pohybuje, právě díky buzení [6].



## 1.5 Princip vibrometrů na bázi Dopplerova jevu

Dopplerův jev byl poprvé popsán Christianem Dopplerem v roce 1842. Kdy vyslovil myšlenku, že zbarvení hvězd může být způsobeno jejich vzdalováním, což by vysvětlovalo posuv jejich vyzařovaného spektra k infračervené oblasti. Tento princip se však nevztahuje pouze na elektromagnetické vlny, ale je běžně pozorovatelný ve fyzice, například posun zvukových vln atd. Jev je popsán rovnicí (6), jenž vyjadřuje, že frekvence při dopadu se mění v poměru rychlosti šíření vlny k rychlosti pohybu zdroje. V případě měření s laserovými vibrometry je posun dvojnásobný, tedy jeden při dopadu a další při odrazu.

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v_0}{v}\right) \quad (6)$$

Kde  $f$  je frekvence pozorovaná [Hz],  $f_0$  frekvence generovaná zdrojem [Hz],  $v$  rychlost šíření vlny v prostředí [m/s],  $v_0$  rychlost pohybu generátoru vzhledem k pozorovateli [m/s] (kladná pro přibližování, záporná pro oddalování)

Prvním případem využití tohoto principu s laserem bylo měření rychlosti proudění kapaliny, které bylo realizováno na Kolumbijské univerzitě v roce 1964. Rychlost se odvozovala od frekvenčního posuvu vznikajícího Rayleighovým rozptylem He-Ne laseru, tento přístroj dovozoval měřit rychlost proudění od 0,07 mm/s [14]. Běžně se vibrometry na tomto principu označují, anglickou zkratkou „LDV“, neboli „Laser Doppler vibrometer“. V zásadě lze realizovat dva typy měření.

Prvním z nich je měření rychlosti pohybu. Využívá se vlastnosti, že generovaný laserový paprsek po odrazu od stojícího odražeče nevykazuje žádné frekvenční posunutí, a proto i intenzita po interferenci je stabilní. Pokud se odrazná plocha při odrazu pohybovala, budou vznikat zánějové frekvence (homodynamní princip). Podle zánějové frekvence nelze rozpoznat, zda se předmět pohybuje směrem k detektoru či naopak. Existují tři základní způsoby, jak se vypořádat s tímto problémem. Prvním řešením je použití filtrů, pomocí kterých lze ze vstupního signálu užitím pásmových propustí získat informaci o tom, jestli je frekvence vyšší nebo nižší než hodnota reference. Tato metoda najde spíše uplatnění s použitím ultrazvuku než laseru [15]. Druhou metodou využívanou právě v laserech je frekvenční modulace referenčního paprsku (heterodynamní princip). Pomocí dvou rozdílných interferenčních obrazců lze již odvodit směr pohybu. Třetí možností je použití kvadrurní detekce, kdy se vstupní signál rozdělí a interferuje s neposunutým a posunutým referenčním signálem o 90°. Z následného porovnání fází signálu interferujícího bez posunutí a s ním, lze určit směr pohybu.

Druhým režimem laserových vibrometrů je měření posuvu. Pokud známe rychlost, můžeme matematicky pouhou integrací získat polohu nebo posuv. Takový přístup by ale vyžadoval velmi kvalitní senzor, neboť i malá stejnosměrná složka by způsobovala zdánlivý posuv s časem rostoucí do nekonečna. Tomuto lze předejít použitím filtru typu horní propust, což ale zároveň znemožní měřit stejnosměrnou složku a zhorší dynamické parametry spolu s přidáním chybové složky do celého řetězce [16].

Přesnější je řešení s využitím interference, kdy se počítají interferenční proužky, konkrétně tedy průchody nulovou intenzitou. S pomocí interpolačních metod lze dosáhnout i rozlišení menší než nanometry [17].

### 1.5.1 Analogové dekodéry

Základní schéma spoléhá na převod frekvence na napětí, které je následně filtrováno filtrem typu dolní propust a zesíleno nastavitelným zesilovačem. Výsledné napětí je poté úměrné rychlosti pohybu. Analogové převodníky najdou uplatnění především při měření vysokých rychlostí, jako například 10 m/s a více. Nebo pro měření na vysokých kmitočtech. Je třeba myslet na to, že díky analogové konstrukci trpí na drift a stárnutí [16].

Pro konstrukci analogového dekodéru výchylky, lze použít integrátor, jenž je z důvodů stability doplněn o filtr typu horní propust, aby se odstranila stejnosměrná složka. To způsobí, že lze měřit pouze relativní výchylku.

### 1.5.2 Digitální dekodéry

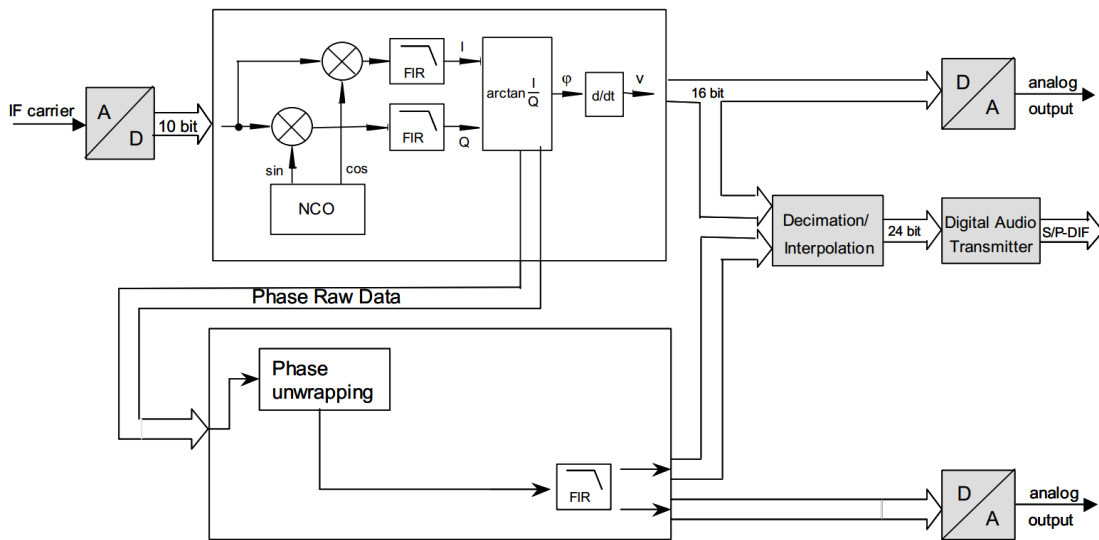
Digitální dekodéry spoléhají na zpracování pomocí DSP, kdy dochází k numerické demodulaci signálu. Zde je klíčová rychlost snímače, která určuje frekvenční pásmo. Oproti analogovým dekodérům je zpoždění na úrovni 10  $\mu$ s, což je hodnota 3 až 4krát vyšší, na druhou stranu je však perfektně stabilní [16].

V nejjednodušším případě lze počítat průchody intenzity nulou a tím získat informaci o rozdílu vzdálenosti, kdy jeden průchod odpovídá vzdálenosti  $\lambda/2$  vlnové délky laseru. Složitější je přístup pomocí rozkladu na I & Q signály, kdy je jeden signál uměle zpožděn. Z této informace lze poté určovat kontinuálně úhel pohybující se mezi  $-\pi/2$  a  $\pi/2$ . Rovnice (7) zobrazuje obecný výpočet i s rozbalením fáze.

$$\varphi(t) = \tan^{-1} \left( \frac{u_Q(t)}{u_I(t)} \right) + m\pi \quad (7)$$

Kde  $\varphi(t)$  je celková rozbalená fáze [°],  $u_Q(t)$  signál modulovaný sinem [V],  $u_I(t)$  signál modulovaný kosinem [V],  $m$  celé číslo získané rozbalením fáze [-].

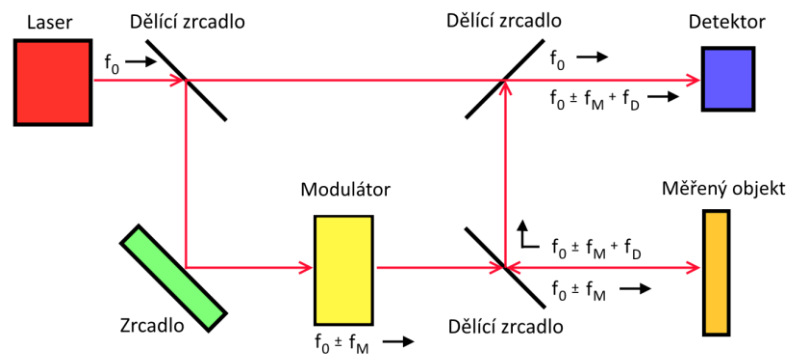
Jeden z možných přístupů ke konstrukci dekodéru je zobrazen na obrázku 1.4. Zpoždění je zde generováno číslicovým generátorem, směřováním a filtrací. Výsledná fáze je poté sledována a rozbalena tím, že se zaznamenává počet průchodů v kladném směru, případně se odečítá ve směru opačném. Jelikož fázi zde počítáme kvůli dekodéru výchylky, je jednodušší použít její derivaci bez rozbalení fáze k určení rychlosti [16].



Obrázek 1.4: Schéma digitálního dekodéru pro výchylku i rychlost [16]

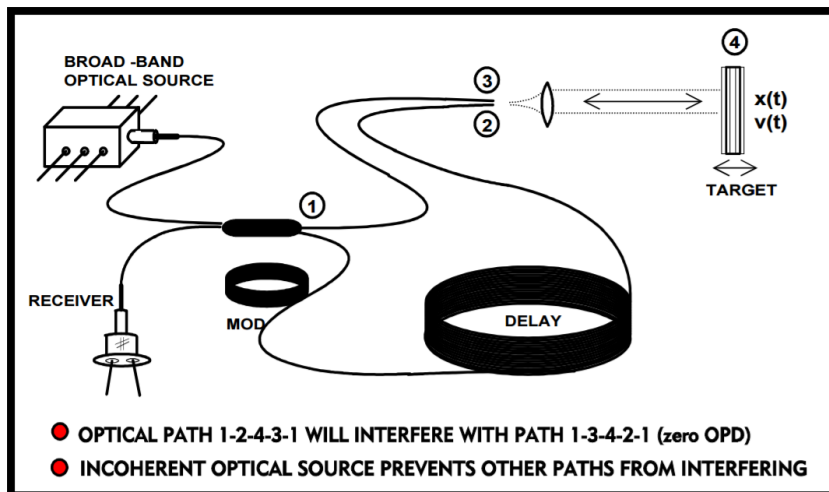
### 1.5.3 Možné přístupy ke konstrukci vibrometru

Pro přiblížení lze modifikovat principiální schéma Mach-Zehnderova interferometru, což ukazuje obrázek 1.5. Monochromatický laser je rozdělen do dvou paprsků, jeden je propagován přímo do detektoru jako referenční. Zatímco druhý prochází modulátorem, který mu posune frekvenci o  $\pm f_M$ . Takto modulovaný svazek je odražen od měřeného objektu, čímž získá informaci o jeho rychlosti. Odražený paprsek je poté sloučen s původním nemodulovaným a na detektoru je vyhodnocena zánějová frekvence.



Obrázek 1.5: Principiální schéma LDV (Mach-Zehnderův interferometr)

Dalším přístupem je použití Sagnacova interferometru viz obrázek 1.6. Kde opticky nekoherentní zdroj světla je rozdělen na dva paprsky, přičemž jeden je fázově modulován a zpožděn. Oba tyto paprsky poté dopadají na měřený předmět a vracejí se do opačného vlákna, čímž uzavírají smyčku. Výstupem je poté intenzita, která je obrazem rychlosti pohybu cíle. Výhodou tohoto schématu je především použití nekoherentního zdroje a také možnost měnit citlivost pomocí proměnného zpoždění [18].



Obrázek 1.6: Principiální schéma LDV (Sagnacův interferometr)[18]

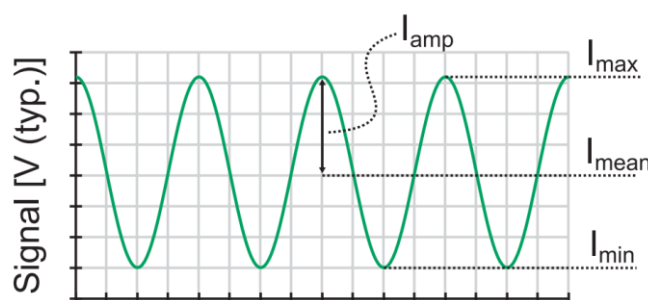
## 2 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ S LASEROVÝMI VIBROMETRY

Parametrů ovlivňujících měření je velké množství a není snadné všechny odhadnout a popsat. Zde budou shrnuty alespoň ty základní. Pro dosažitelné rozlišení je důležitá konstrukce samotného interferometru. Je nutné zajistit kvalitní optiku zajišťující nízký rozptyl laserového paprsku [3].

### 2.1 Kontrastní poměr interferujících paprsků

Kontrastní poměr je parametr důležitý pro rozeznávání interferenčních minim a maxim. Jedná se o poměr amplitudy a střední hodnoty měřené na detektoru, jak ukazuje rovnice (8) a obrázek 2.1. Tento faktor je důležitý pro SNR, v ideálním případě je hodnota  $I_{FC}$  rovna jedné. To nastává v případě, že amplituda je rovna dvojnásobku průměrné intenzity. Jinými slovy  $I_{min}$  by měla být v ideálním případě nulová. Pro samotné zpracování pak signál prochází horní propustí a zesílením, ještě před převodem na číslo. Stejnosečná vazba je důležitá pouze při měření hodnoty kontrastu [4].

$$I_{FC} = \frac{I_{amp}}{I_{mean}} \quad (8)$$



Obrázek 2.1: Kontrastní poměr při interferenci [4]

Hodnota  $I_{FC}$  je výrazně zhoršena, pokud není dosaženo správného geometrického uspořádání paprsků. Například při odrazu od měřeného předmětu, kdy nedosažením kolmého odrazu dojde k bočnímu posunutí interferujících paprsků od ideálního stavu. Tyto rovnoběžné, avšak posunuté paprsky poté snižují kontrastní poměr. Tento efekt se v anglické literatuře označuje jako „Beam Walk-off“ [4].

#### 2.1.1 Zaostrění paprsku

Tento parametr je důležitý pro jakékoliv přesné měření. Zaostrění zvyšuje kontrastní poměr, neboť výrazně posouvá maximum intenzity ve vzorci (8). Navzdory tomu výrobce často neuvádí, jak se šumové parametry vibrometru mění v závislosti na intenzitě odraženého laserového paprsku. Za tímto účelem byla vyhrazena jedna část měření právě

této problematice. Je třeba si uvědomit, že při statickém měření lze manuálně zaostřit laser relativně přesně. A to především pokud je přítomna zpětná vazba přímo z vibrometru, nebo v našem případě z počítačové aplikace, která zobrazuje přímo úroveň signálu zpětně interferujícího paprsku (a to bez omezení, bargraf na použitých dekoderech Polytec například zobrazuje pouze do hodnoty 2,56 V). Na tento jev navazuje ještě hloubka ostrosti, což je vzdálenost od zaostření, jenž se jeví na detektoru jako ještě ostrá.

V případě dynamického měření, kdy se vzdálenost mění v řádů desítek milimetrů, nastává problém. Pevné zaostření způsobuje hned několik problémů. Kromě zmenšení kontrastního poměru se také zhoršuje koherence a roste citlivost na šum způsobený náklonem. Za tuto cenu by se však měl snížit šum způsobený koherenční zrnitostí [19].

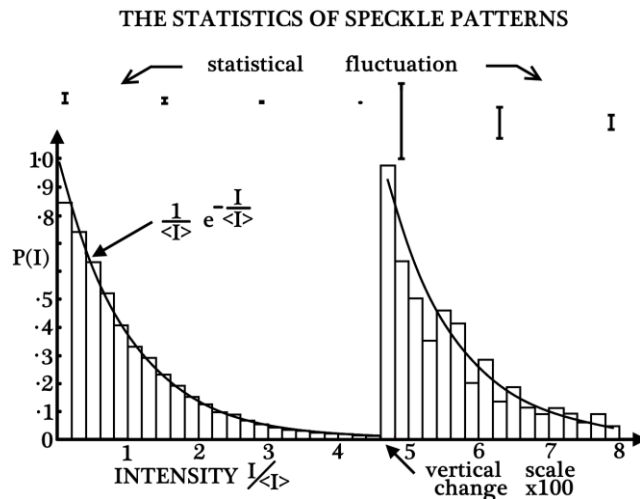
Pokud úroveň signálu klesne pod hraniční úroveň dekodéru, dochází ke zkreslení výstupního signálu vibrometru. To se může projevit jako propady na vrcholech časového průběhu měřené rychlosti.

## 2.2 Koherenční zrnitost

Navzdory 30 letům nepřetržitého vývoje LDV, koherenční zrnitost stále přetrvává a způsobuje problémy (v anglické literatuře se označuje „speckle“). Tento jev vzniká, když koherentní světlo dopadá na opticky hrubý povrch. Jinými slovy, pokud je hrubost povrchu srovnatelná s vlnovou délkou laseru (běžně 633 nm pro He-Ne laser) je koherenční zrnitost výrazná. Bohužel většina běžně používaných povrchů právě vykazuje takovouto nepříznivou hrubost. Jednotlivé odražené složky z takového povrchu poté vykazují nestejnou fázi, a to díky různé optické dráze, kterou musejí vykonat [20]. Z původně jednoho koherentního paprsku vznikne velké množství odvozených složek, kdy každá je uvnitř stále koherentní. Tyto složky však navzájem nesdílejí stejnou fázi, a to právě kvůli zmíněnému rozdílu v optické dráze. Při interferenci poté vytvářejí chaotický šum, kde intenzita je rozprostřena s negativním exponenciálním rozložením viz rovnice (9) a obrázek 2.2, zatímco fáze je rozložena rovnoměrně [21].

$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} e^{-\frac{I}{\langle I \rangle}} \quad (9)$$

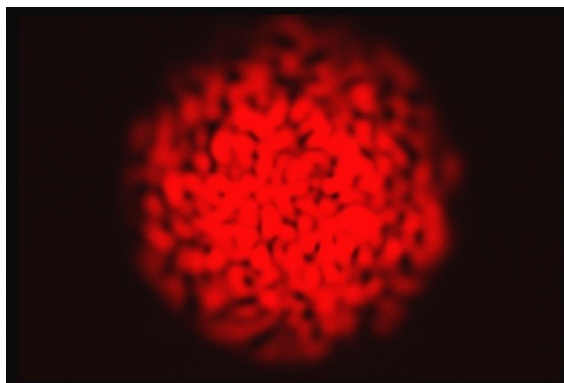
Kde  $p(I)$  je hustota pravděpodobnosti intenzity záření [-],  $I$  intenzita záření [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $\langle I \rangle$  průměrná intenzita záření [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].



Obrázek 2.2: Histogram intenzity koherenční zrnitosti [21]

Fotodetektor vibrometru neměří pouze rychlost pohybu ve směru dopadu paprsku, ale i složku úměrnou velikosti koherenční zrnitosti (jedná se o šum). V případě, že amplituda interferujících paprsků je nízká, vliv tohoto šumu výrazně roste, což v praxi vede ke zhoršení poměru signál-šum [22]. Na obrázku 2.3 je vidět ukázka toho, jak takový šum může vypadat.

Ostrost takového obrazu poté samozřejmě závisí jednak na koherenci laserového paprsku, ale i na pohybu odrazné plochy. Jedna z vlastností je, že obraz bude vždy neostrý, pokud se během měření měřený předmět pohybuje. Tohoto lze využít při hledání poloh uzlů a kmiten rezonátoru, kdy při zobrazení koherenční zrnitosti budou ulzy mnohem ostřeji vyobrazeny, než kmitny [23].



Obrázek 2.3: Ukázka koherenční zrnitosti [3]

Situace se zhoršuje, pokud vibrace jsou periodického charakteru, tedy například měření otáčejícího se disku. Takto generovaný šum má pseudo-náhodné rozdělení, díky čemuž generuje šum na základní frekvenci a jejích násobcích. Tyto frekvence poté způsobují největší problémy, protože je lze snadno zaměnit za skutečné vibrace [24]. Jeden ze způsobů, jak se vypořádat s tímto problémem, je pohybovat s měřeným paprskem do stran, tak aby se podařilo porušit periodicitu generovaného šumu. Tento pohyb způsobí zvýšení šumu v ostatních částech spektra [20].

Jedna z modifikací LDV se nazývá „scanning laser Doppler vibrometer“, neboli SLDV (případně CSLDV, pokud je skenování kontinuální). Tento přístroj slučuje LDV s možností směřovat laserový paprsek, dle nastavitelného zrcadla. Pro komplexní skenování se využívá navíc s přesunem, například pomocí robotického ramene.

Koherenční šum lze potlačovat použitím odrazky, a tedy dosažení vysoké úrovně zpětně odraženého paprsku. Pro konkrétní měření toto není problém, ale pro automatizovanou kontrolu kvality, bychom se tomuto rádi vyhnuli. Vliv hrubosti povrchu na měření byl zkoumán i z hlediska měřicí vzdálenosti, kdy bylo ukázáno, že optimální vzdáleností mezi fotodetektozem a měřenou plochou lze dosáhnout redukce šumu způsobeného koherenční zrnitostí až o 10 dB [3]. Vzhledem k problémům s koherenčním šumem nelze přesně určit vlastní šum vibrometru, bez specifikace odrazného povrchu [24].

Na tento jev navazují pseudo-vibrace, ty jsou způsobeny především náklonem, posunutím nebo rotací odrazné plochy a úzce souvisí s úrovní odraženého paprsku a s množstvím koherenčního šumu, který je zpracováván. Tedy čím rychlejší změna polohy, tím větší pseudo-vibrace jsou detekovány [24].

### 2.2.1 Segmentace pomocí koeficientu špičatosti

Jedná se o metodu použitelnou k vyhledávání a odstraňování segmentů dat obsahující koherenční šum. Tímto způsobem lze z periodicky se opakujícího měření získávat pouze validní data. Pro neperiodické rázové měření není tato metoda použitelná, neboť v takovém případě segmentací extrémů dochází ke znehodnocení měřených výsledků.

Koeficient špičatosti je čtvrtým centrálním momentem ve statistice a vyjadřuje poměr rozložení velmi vysokých a nízkých hodnot. Pro normální rozdělení je roven nule a vypočte se dle vzorce (10).

$$\gamma_2 = \frac{E[(x - \mu_x)^4]}{\sigma_x^4} - 3 \quad (10)$$

Kde  $\gamma_2$  je koeficient špičatosti [-],  $E(X)$  aritmetický průměr,  $x$  měřená data,  $\mu_x$  střední hodnota,  $\sigma_x$  směrodatná odchylka.

Detekce se poté provádí jako poměr špičatostí změřených a segmentovaných dat. Autoři zde předpokládají, že koherenční šum v časové oblasti se projevuje výraznými excesy. Tedy vyřadí ze signálu 5 % nejvyšších a nejnižších hodnot, ze kterých vypočtou koeficient  $\gamma_2(x_s)$  dle rovnice (10). Tento koeficient poté srovnávají se surovými daty, viz rovnice (11). Pokud je hodnota 2 a vícekrát vyšší, vyhodnocují tyto data jako obsahující koherenční šum. Při pozitivní detekci poté dochází k filtrování a segmentaci, pomocí které získají část signálu bez šumu. Hodnoty zvoleného percentilu a vyhodnocovací prahy jsou pouze experimentálně zjištěné, nikoliv odvozené konstanty [3][25].

$$\text{Poměr špičatosti} = \frac{\gamma_2(x)}{\gamma_2(x_s)} \quad (11)$$



## 2.3 Poissonův a tepelný šum

Poissonův šum je způsoben kvantovou povahou světla, a tedy nespojitým rozložením, jinak zjednodušeně spojitých jevů, jako je například světlo. Zvýšení výkonu referenčního paprsku se zdá jako vhodné řešení, je třeba však si uvědomit, že zvýšením výkonu referenčního a měřeného paprsku se nejen zvyšuje stejnosměrný proud, ale také Poissonův šum (shot noise). A to jako součet výkonu referenčního a měřeného paprsku, viz rovnice (12) [16].

$$i_{sh}^2 = 2K \cdot q \cdot B(P_r + P_m) \quad (12)$$

Kde  $i_{sh}$  je Poissonův šum,  $K$  senzitivita detektoru,  $q$  elementární náboj,  $B$  šířka pásma detektoru,  $P_r$  výkon referenčního paprsku,  $P_m$  výkon měřeného paprsku.

Tepelný šum popisuje rovnice (13). Výkon referenčního paprsku je obvykle zvolen, tak aby Poissonův šum převažoval nad tepelným šumem, čím je dosaženo optimálnějšího poměru signál-šum [16].

$$i_{th}^2 = \frac{4k \cdot T \cdot B}{R} \quad (13)$$

Kde  $i_{th}$  je tepelný šum,  $k$  Boltzmannova konstanta,  $T$  absolutní teplota,  $B$  šířka pásma detektoru,  $R$  vlastní odpor detektoru.

## 2.4 Refrakční index

Jednou z úloh měření délky je také nutnost od určité hranice kompenzovat systematickou chybu měření, způsobenou nestejnou rychlostí šíření světla v různorodém prostředí. To lze například provést tak, že změříme průměrnou hodnotu indexu lomu vzduchu a tu poté použijeme pro výpočet skutečné délky, jak je to uvedeno v rovnici (14). Tato rovnice platí pro celkovou dráhu paprsku.

$$l = \frac{t \cdot v_0}{n_x} \quad (14)$$

Kde  $l$  je vzdálenost [m],  $t$  čas putování paprsku [s],  $v_0$  rychlost světla ve vakuu [m/s],  $n_x$  index lomu prostředí [-]

Když toto měření obrátíme a vzdálenost bude konstantní, potom jedinou neznámou bude vlastní index prostředí. Hodnota indexu lomu je však závislá na teplotě, vlhkosti a tlaku. Lorenzův zákon například popisuje zjednodušený vztah mezi indexem lomu a hustotou prostředí, to je vidět ve vzorci (15). Pokud bychom chtěli analyzovat vzduch, museli bychom použít pro každou složku vzduchu tuto rovnici, spolu s korekcí na teplotu.

$$\frac{n - 1}{n + 2} \cdot \frac{1}{\rho} = konst. \quad (15)$$

Kde  $n$  je index lomu [-],  $\rho$  hustota [Kg/m<sup>3</sup>]

Vzhledem k tomu, že zvuk se šíří jako časově proměnná deformace tlakového pole vzduchu, bude i zvuk měnit index lomu prostředí, který se tedy nutně projeví i v měřené dráze, nebo v případě laserového vibrometru, jako měřená rychlost při konstantní vzdálenosti.

S refrakčním indexem ještě souvisí zpětné odrazy od všech ploch, které sdílejí rozhraní s rozdílným indexu lomu, viz rovnice (16). Pro rozhraní sklo, vzduch je hodnota zpětně odraženého paprsku asi 4 %, což není zanedbatelné (odpovídá  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1,5$ ). Řešení spočívá v nanesení antireflexní úpravy, jenž dokáže snížit množství odraženého světla pod 0,25 % [4].

$$R_0 = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2 \quad (16)$$

Kde  $R_0$  je množství odraženého světla [-],  $n_1$  a  $n_2$  indexy lomu prostředí [-].

Absorpce a rozptyl jsou parametry, snižující hodnotu užitečného signálu. Výraznější problém však přináší fakt, že absorbované světlo se přeměňuje na teplo, které poté mění fyzické rozměry optiky a tím i výslednou optickou dráhu. Důsledkem je poté špatná detekce, vyplývající z nesouměrné změny optických vzdáleností referenčního a měřeného paprsku [4]. Tento problém je výrazný především pro homodynní detekci.

Složitější způsob určení absolutní hodnoty indexu lomu vzduchu je výpočtem z rovnice (17), která popisuje závislost indexu na teplotě i tlaku. Jedná se o zjednodušenou formu, vhodnou především k výpočtu indexu lomu vzduchu v okolí teploty 20 °C s nízkou nejistotou [4].

$$n = 1 + \frac{7,86 \cdot 10^{-4} P}{273 + T} - 1,5 \cdot 10^{-11} RH(T^2 + 160) \quad (17)$$

Kde  $n$  je refrakční index [-],  $P$  tlak prostředí [kPa],  $T$  teplota [°C],  $RH$  relativní vlhkost [%].

## 2.5 Výběr laseru

Je několik parametrů, jenž určují kvalitu laseru. Jedná se například o monochromaticnost, koherenční a vlnovou délku. Zvolená vlnová délku laseru rozhoduje o vzdálenosti interferenčních maxim, tedy definuje citlivost interferometru v tomto smyslu. Při výběru vlnové délky, bychom také měli brát v úvahu útlum prostředí. Ten je výrazně proměnný v závislosti na zvolené vlnové délce laseru a měřeném prostředí. Je tedy třeba zvážit do jakých podmínek bude laserový vibrometr nasazen, s ohledem na viditelná okna prostředí.

Vzhledem k volbě laseru je třeba ještě zmínit, že existují multimódové lasery, jež mohou generovat například dvě vlnové délky současně. Z praktického hlediska, pokud laser současně vyzářuje dvě vlnové délky, nastává interference mezi těmito dvěma vlnovými délkami, která způsobuje periodickou změnu měřené intenzity v závislosti na vzdálenosti laseru a fotodetektoru. Tento jev je příčinou, proč jsou velmi často udávána viditelná maxima vibrometrů.

Použitý výkon referenčního a odraženého paprsku ovlivňuje dosažený odstup signál-šum a tím i rozlišení. Jelikož interferometr funguje jako optický zesilovač, zdvojnásobením referenčního výkonu lze zvýšit výslednou amplitudu nosné frekvence o 2 až 3 dB [16]. K tomuto výsledku lze dojít i dosazením hodnot do rovnice (2), přičemž  $I_1 = 2I_2$ ,  $\Phi = 0^\circ$ . Nezapomínejme však že s výkonem roste i tepelný a Poissonův šum.

Když se znovu podíváme na popis interference, jak je popsána v rovnici (3), můžeme si všimnout, že výsledné záznamové frekvence jsou úměrné rozdílu frekvencí interferujících vln. Rozlišení vibrometru udává nejmenší Dopplerův posun, jenž lze detekovat na snímači [3]. Interferenční maxima jsou vzdálena úměrně použité vlnové délce, kde  $\Delta x = \lambda/2$ . Maximální měřená rychlost závisí tedy jednak na elektronice, ale také na heterodynní frekvenci. Při interferenci nesmí záznamová frekvence nabývat nulové frekvence. Modulace například pomocí akustooptického modulátoru (Bragg-cell) tedy musí být v každém okamžiku vyšší než Dopplerův posun, ten byl odvozen z rovnice (6) a lze ho vidět v rovnici (18). Například pro rychlost pohybu 10 m/s je posun 31,6 MHz, proto konvenční přístroje Polytec nejčastěji využívají modulační frekvenci 40 MHz.

$$\Delta f_D = \frac{2\Delta v}{\lambda} \quad (18)$$

Kde  $\Delta f_D$  je Dopplerův posun [Hz] (kladný pro přibližování, záporný pro oddalování),  $\Delta v$  rychlost měřeného objektu vzhledem ke zdroji [m/s],  $\lambda$  vlnová délka použitého laseru [m].

### 2.5.1 Stabilita laserového paprsku

Nejpoužívanějším zdrojem je červený He-Ne laser na vlnové délce 633 nm, což odpovídá frekvenci 473 THz. Jeho stabilita se pohybuje v řádu MHz, dle intervalu, na kterém ji vyhodnocujeme. Běžně se pohybuje od 1 MHz v řádu minut, po asi 3 MHz v osmi hodinách. Tyto hodnoty jsou změřeny pro teplotně ustálený laser, což vyžaduje alespoň hodinový úsek pro ustálení [26].

Pro zjednodušení nyní budeme považovat stabilitu laseru za lineárně se měnící v rámci jedné minuty. Vzhledem ke konstrukci vibrometrů je referenční paprsek obvykle kratší než měřený. Tento fakt způsobuje, že ve výsledku interferují paprsky, jež nebyly vyzářeny ve stejný okamžik a jejich frekvence se pouze považuje za shodnou.

Pro výpočet Dopplerova posuvu byla užita rovnice (18). Dosazením rychlosti pohybu 1 nm/s (na směr nezáleží) se výsledná frekvence změní o 0,0032 Hz a tato hodnota je lineárně závislá na rychlosti pohybu.

Nyní když víme rozlišitelnost, se kterou potřebujeme pracovat, můžeme použít tuto hodnotu a přepočít ji na časový interval, který by odpovídal změně o stejnou hodnotu frekvence v důsledku nestability laseru viz (19). Výpočtem dostaneme hodnotu 189,6 nanosekund. Tento čas nyní použijeme pro výpočet vzdálenosti, jakou urazí paprsek světla ve vakuu, což je hodnota 57 m. Vypočtená hodnota odpovídá rozdílu vzdáleností referenčního a měřeného paprsku, jenž by v tomto uvažovaném experimentu způsobila chybu měření 1 nm/s.

$$\Delta t = \frac{\Delta f}{f_{stab}} \cdot t_{stab} \quad (19)$$

Kde  $\Delta t$  je časový úsek odpovídající změně frekvence [s],  $\Delta f$  změna frekvence [Hz],  $f_{stab}$  hodnota stability laseru [Hz],  $t_{stab}$  časový interval stability [s].

## 2.6 Výběr detektoru

S ohledem na vyšší odstup signál-šum je výhodné použití co největšího detektoru, především ve směru detekovaných interferenčních pruhů, a tedy i pohybu koherenčního šumu (speklí) vznikajícího při měření na detektoru [27]. Samotný CCD snímač by měl dosahovat co nejnižší dolní šumové hladiny. Pro co největší účinnost převodu fotonů na napětí je důležité, aby poměr citlivé plochy ke skutečným rozměrům byl co největší (fill factor). V případě potřeby lze použitím mikro čoček tento parametr vylepšit. Obecně čím větší je plocha jednoho pixelu, tím lepší SNR dosáhneme, za cenu ztráty rozlišení a vyššího šumu při vyčítání [28]. Další šum vzniká při generování elektronů teplem (dark current), kterému se nelze úplně vyhnout.

Dynamika detektoru a signálového procesoru je na druhou stranu určující pro maximální měřenou rychlost. Konkrétně velikost CCD pole určuje maximální rychlost, s jakou lze data vyčítat a zpracovávat. Rozdíly mezi analogovými a digitálními dekodéry se zabývají kapitoly 1.5.1 a 1.5.2.

## 2.7 Filtrace šumu

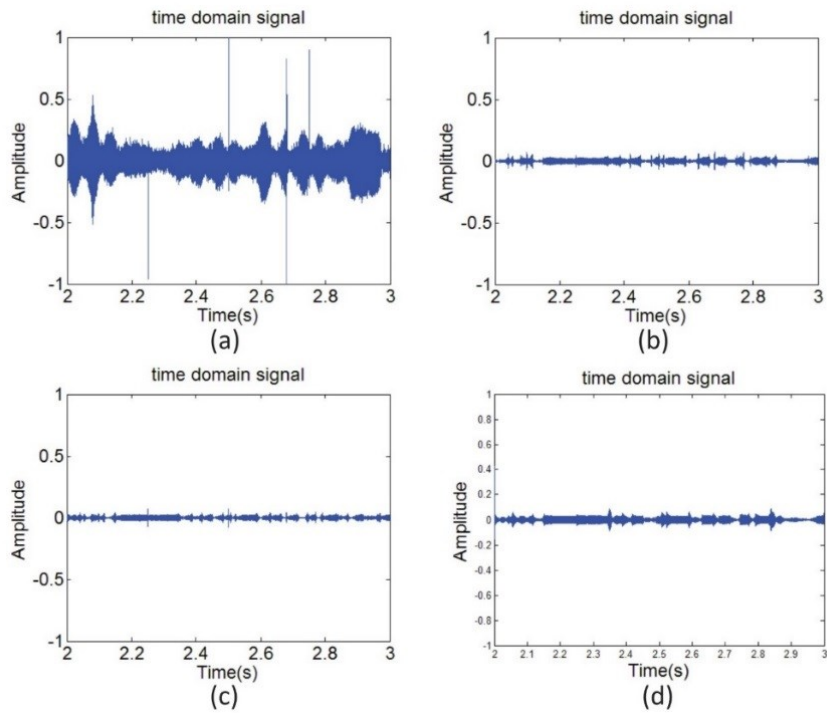
Použitím adaptivního filtru (tracking filter) ještě před demodulací, lze dosáhnout vyššího potlačení šumu než užitím filtrů typu dolní propust. Například PSV-200 (Polytec Scanning Vibrometer) používá k tomuto analýzu aktuální fáze a modelování sinusového průběhu podle měřených dat. Filtraci lze samozřejmě použít i na demodulovaný signál, i když pásmová, nebo dolní propust je častější, a to především díky snazší implementaci a předvídatelnosti [22].

Na obrázku 2.4 můžeme vidět shrnutí výsledků práce zabývající se měřením vodní hladiny za účelem vzdálené detekce zvuku šířícího se ve vodě. Obrázek 2.4(a) ukazuje situaci po odfiltrování složek do 500 Hz [29]. Zde lze vidět, že koherenční šum se opravdu vyskytuje v časové oblasti, a to jako několik špiček s výrazně vysokou amplitudou.

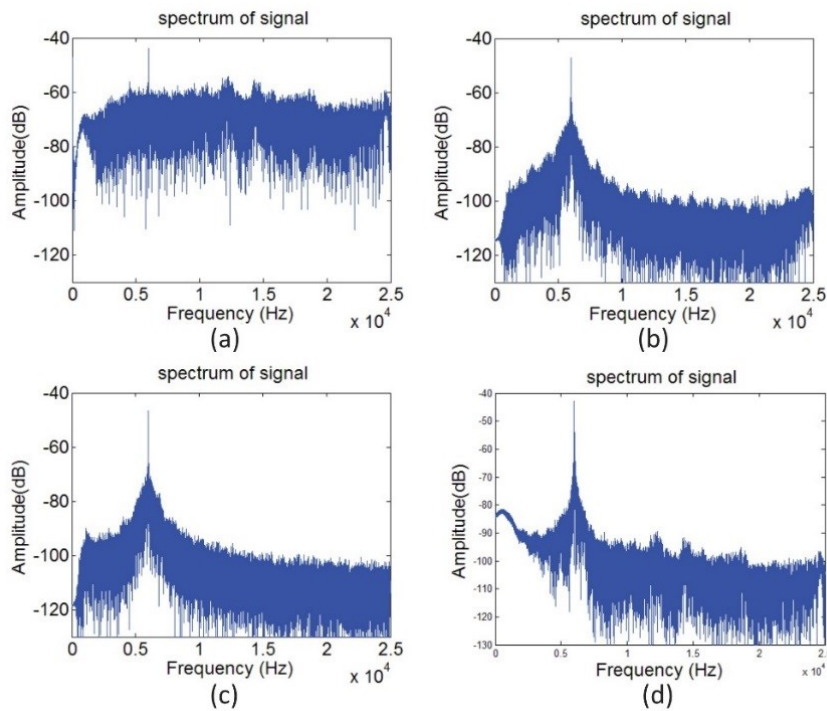
Pro filtraci autoři použili celkem tři typy filtrů. První dva byly LMS (Least Mean Square) a RLS (Recursive Least Squares). Tyto filtry vychází z předpokládaného tvaru signálu, jenž se porovnává se skutečným. Přičemž výsledkem je rozdíl, jenž se použije k modifikaci koeficientů filtru tak, aby dle zvoleného kritéria byla hodnota minimální. Posledním typem je Kalmanův filtr, jenž využívá auto-regresní model systému [29]. Výsledkem je odstranění velké části šumu, který se původně nacházel v celém spektru, což ukazuje obrázek 2.5.

Nevýhodou těchto filtrů je nevhodnost pro širokopásmové měřené signály. To plyne z principu přeladování a hledání harmonického signálu. Například vibrometr Polytec

OFV-5000 může volitelně obsahovat nespecifikovaný adaptivní filtr, jenž dle výrobce dokáže v časové oblasti nezkreslit maximálně třetí harmonickou složku [30].



Obrázek 2.4: Adaptivní filtrace v časové doméně: (a) Původní signál; (b) LMS filtr; (c) RLS filtr; (d) Kalmanův filtr [29]



Obrázek 2.5: Adaptivní filtrace ve frekvenční doméně: (a) Původní signál; (b) LMS filtr; (c) RLS filtr; (d) Kalmanův filtr [29]

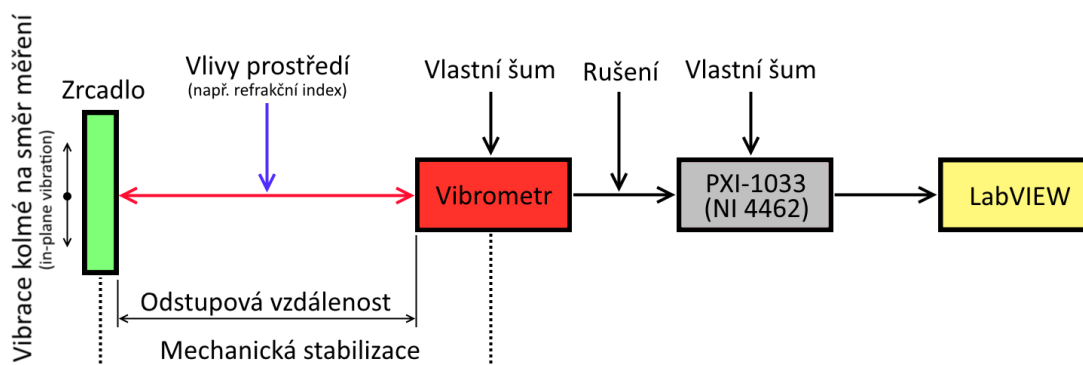
### 3 TEORETICKÁ PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Tato kapitola se věnuje teoretickému popisu měření, samotné měření je realizováno a zhodnoceno v kapitole 4 a 5. Dle zadání je třeba realizovat jednak měření základních šumových parametrů se zaměřením na odstup signál-šum v různých praktických uspořádáních. Dále pak realizovat měření vlastního šumu na vibrometrech Polytec, se zaměřením na úroveň přijatého optického paprsku, rozostření a koherenční zrnitost odlišných povrchů. Katalogový popis měřených rozsahů jednotlivých vibrometrů lze nalézt v příloze A. Dále je zde popsán měřicí řetězec, a jsou rozebrány jednotlivé přístroje použité pro měření, tedy vibrometry a měřicí karta. Je také popsána aplikace využitá pro sběr a předzpracování měřených dat. V samém závěru této kapitoly jsou navržena jednotlivá měření.

#### 3.1 Měřicí řetězec

Pro přehled byl vytvořen model měřicího řetězce, jenž je vidět na obrázku 3.1. Prvním a základním článkem je zrcadlo, či jiný odrazný materiál. Mechanická stabilizace je využita v případě, že se to slučuje s povahou měření, to zajišťuje potlačení všech vibrací, ať se jedná o rovnoběžné, či kolmé na směr měření. Stabilizace plochy je kritická, a to především při měření na rozsahu s vysokou citlivostí. Pokud není tuhost upevnění dostatečně vysoká, hrozí, že odrazná plocha bude rozkmitávána zvukovými vlnami. Dále je nutné minimalizovat celkové otřesy, toho bylo dosaženo pomocí optického stolu s vibračně odizolovanou základnou. Nicméně vzdálenost mezi vibrometrem a odraznou plochou není nikdy konstantní, ale pouze lze minimalizovat její změnu. V dokonale stabilním prostředí lze měřit i kvantové vibrace atomů [1].

Na schématu je naznačena měřicí (odstupová) vzdálenost (stand-off distance), která je důležitým faktorem z hlediska dosažitelných parametrů při měření. Výrobce vibrometrů doporučuje konkrétní měřicí vzdálenosti pro dosažení optimálních měřicích podmínek. Do vlivu prostředí lze kromě mechanických otřesů započít i proměnou hodnotu refrakčního indexu.



Obrázek 3.1: Měřicí řetězec

Další chybu měření způsobuje vlastní šum analogově-digitálního převodníku a napětí indukující se na měřicích kabelech. Pro měření byla využita měřicí ústředna PXI-1033 spolu s kartou NI 4462. Maximální vzorkovací frekvence 204,8 kS/s předurčuje tuto kartu pro měření vibrací, případě zvuku. Z důvodu ověření šumových parametrů PXI karty NI 4462 bylo provedeno měření vlastního šumu této karty. Na samém konci řetězce, je aplikace v LabVIEW, jenž předzpracovává a ukládá naměřená data.

### 3.1.1 Kompaktní vibrometr PDV-100

Jedná se o první měřený vibrometr. Tento model, je určený pro snadnou manipulaci a přenášení (**P**ortable **D**igital **V**ibrometer). Z tohoto důvodu je možno použít bateriové napájení. Frekvenční rozsah je pouze 0 až 22 kHz, dekodér je pevně zabudovaný a obsahuje nastavení pouze tří citlivostí – 5, 25 a 125 mm/s/V. Výstup dekodéru je jak analogový, tak digitální (o řád lepší kalibrační přesnost). Tento přístroj dosahuje nejlepšího typického rozlišení  $0,02 \mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Pro předzpracování lze použít filtr typu horní propust s mezním kmitočtem 100 Hz. Filtr typu dolní propust nelze deaktivovat, ale lze měnit mezní kmitočet v krocích 1, 5 a 22 kHz. Viditelná maxima vibrometru jsou ve vzdálenostech  $(96 + n \cdot 138)$  mm [31].



Obrázek 3.2: Vibrometr Polytec PDV-100 [32]

### 3.1.2 Modulární vibrometr OFV-505/5000

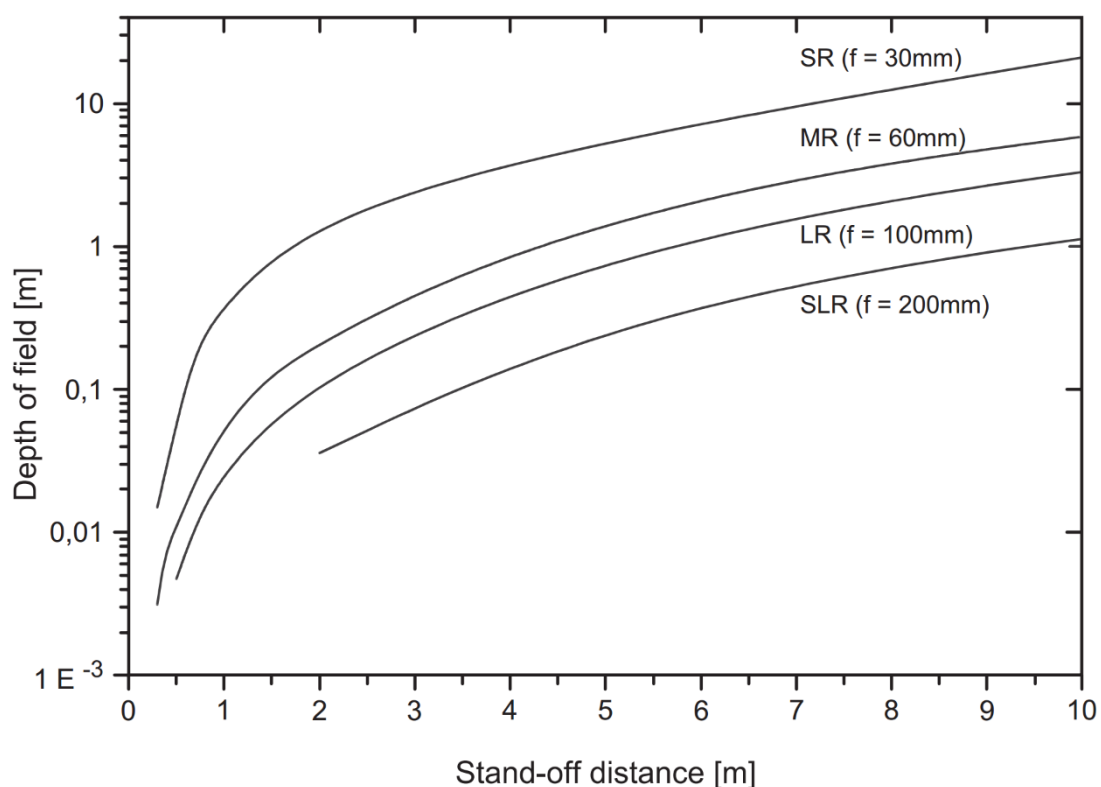
Jedná se o modulární systém, jehož součástí je samostatná hlava OFV-505, která je připojena k jednotce dekodérů OFV-5000. Ta dle výbavy nabízí na výběr z pěti dekodérů rychlosti a čtyřech dekodérů výchylky. Zde použitá jednotka obsahovala dekodéry **VD-02**, **VD-06** a **DD-500**. Oba rychlostní dekodéry (VD-xx) nabízí čtyři rozsahy citlivosti. Hlavní rozdíl spočívá ve frekvenčním rozsahu a maximální měřené rychlosti. Analogový dekodér VD-02 je určen pro frekvence do 1,5 MHz a rychlosti do 10 m/s. Jeho jediná nevýhoda je nejlepší typické rozlišení pouze  $0,15 \mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Oproti tomu digitální dekodér VD-06 je omezen do 350 kHz a rychlosti 0,5 m/s, jeho nejlepší typické rozlišení je však  $0,02 \mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Dekodér výchylky je navázán na digitální dekodér rychlosti VD-06, zde nejlepší rozlišení dosahuje hodnoty 15 pm. Samozřejmostí jsou volitelné filtry, konkrétně jeden typu horní propust s mezní frekvencí 100 Hz a tři filtry typu dolní propust s mezní frekvencí 5, 20 a 100 kHz [33].

Volitelně může jednotka OFV-5000 obsahovat adaptivní filtr pro kmitočty do 20 kHz, pracující maximálně do třetí harmonické složky. Pro vyšší kmitočty dochází k výraznému zkreslení v časové oblasti. Jednotka dostupná pro měření, však touto funkcí nedisponovala. Dle manuálu je vhodné vibrometr vzhledem k viditelným maximům umístit do měřicí (odstupové) vzdálenosti  $(230 + n \cdot 204)$  mm [30].



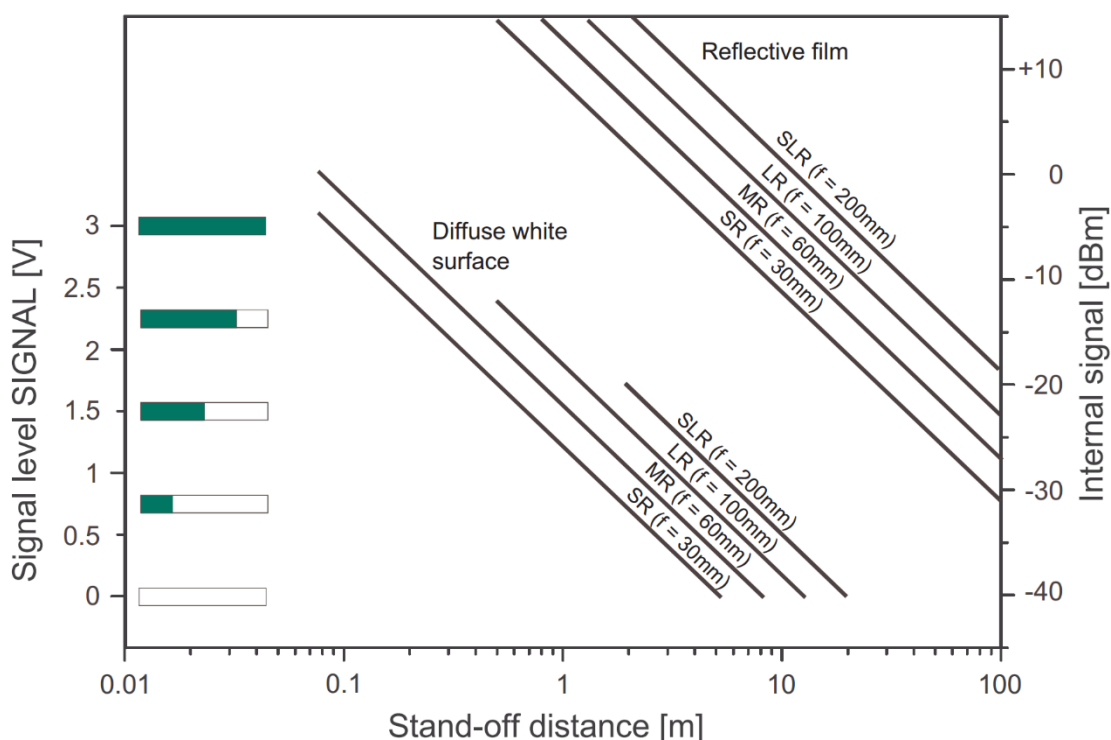
Obrázek 3.3: Vibrometr Polytec OFV-505 s dekodérem OFV-5000 [33]

Pro hlavu vibrometru OFV-505 je v grafu na obrázku 3.4 zobrazena hloubka ostrosti v závislosti na použité čočce a odstupové vzdálenosti. Při měření byla použita čočka OFV-SR (short range). Závislost úrovně signálu na vzdálenosti a čočce lze nalézt v grafu na obrázku 3.5.



Obrázek 3.4: Hloubka ostrosti hlavy vibrometru OFV-505 [34]





Obrázek 3.5: Závislost odstupové vzdálenosti hlavy OFV-505 na úrovni signálu [34]

### 3.1.3 Kompaktní vibrometr CLV-2534

Tento systém se vyznačuje především kompaktní hlavou, která je připojena optickým kabelem k dekodéru. Může také obsahovat integrovanou kameru. Pro měření byl k dispozici model **CLV-2534-4**. Ten obsahuje digitální dekodér pro maximální rychlost 10 m/s a kmitočtové pásmo do 100 kHz. Obsahuje pět rozsahů citlivosti, na nejnižším dosahuje nejlepšího typického rozlišení  $0,02 \mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Z hlediska filtrace lze aktivovat pevný filtr typu horní propust na 100 Hz. Co se týče filtru typu dolních propust, ten lze aktivovat s mezní frekvencí 5, 20 a 100 kHz [35]. Specifikace hloubky ostrosti pro tento vibrometr lze naléznout v tabulce 3.1. Pro měření byla využita standardně dodávaná čočka, jenž je vidět i na obrázku níže.



Obrázek 3.6: Vibrometr s dekodérem CLV-2534 [36]

Tabulka 3.1: Hloubka ostrosti vibrometru CLV-2534 [35]

Characteristics		$n$	$n$							
Stand-off distance <sup>1)</sup>	[mm]	21.7	37.3	200	300	320	500	1000	2000	each m
Laser depth-of-field	[mm]	0.012	0.048	$\pm 2$	$\pm 6$	$\pm 0.08$	$\pm 19$	$\pm 81$	$\pm 339$	–
Spot diameter ( $1/e^2$ )	[ $\mu\text{m}$ ]	1.5	3.0	25	40	15	70	148	302	add 150
Camera field of view	[mm x mm]	0.68	1.36	10	17	3.8	31	64	130	–
		x 0.52	x 1.04	x 8	x 13	x 2.9	x 24	x 49	x 100	

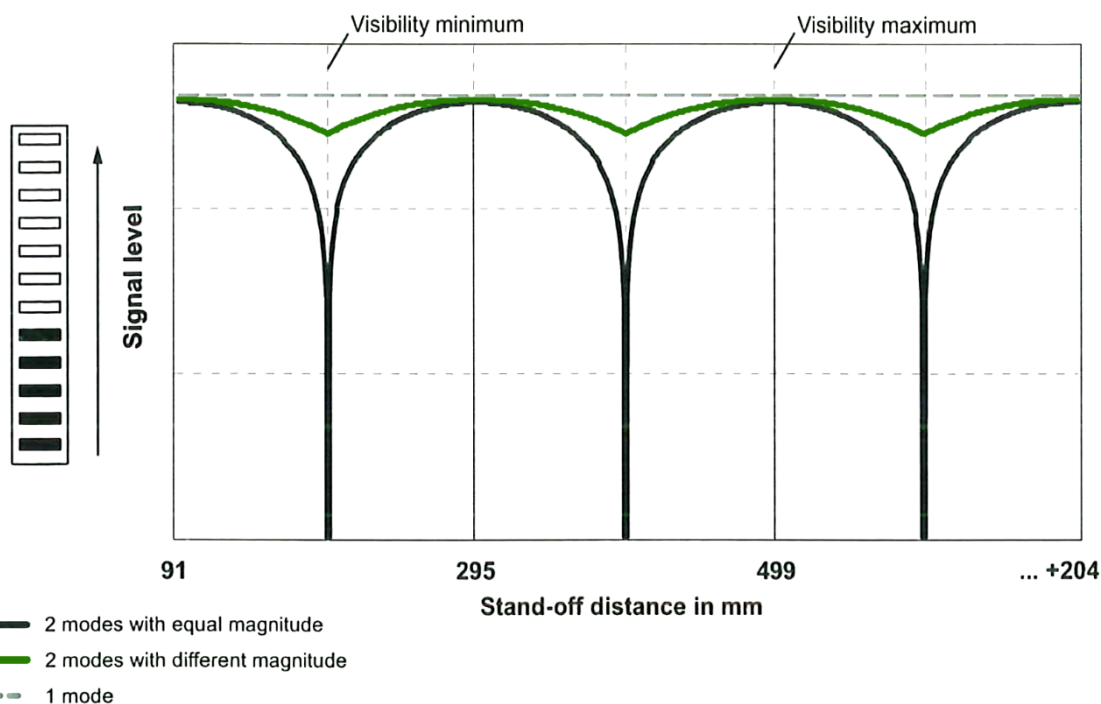
<sup>1)</sup> Measured from the front edge of the sensor head housing

<sup>2)</sup> With VIB-A-20xLENS 20X objective

<sup>3)</sup> With VIB-A-10xLENS 10X objective

<sup>4)</sup> With VIB-A-520 telephoto lens

Pro realizaci přesného a stabilního měření je třeba vibrometr umístit do viditelného maxima, to je zde ve vzdálenosti  $(295 + n \cdot 204)$  mm od měřeného (odrazného) povrchu. Při nedodržení této podmínky dochází k destruktivní interferenci laserového paprsku. Vzhledem k teplotnímu ustalování laseru může docházet ve viditelných minimech ke kolísání úrovně signálu. Na grafu v obrázku 3.7 lze vidět, jak kolísá úroveň signálu se vzdáleností. Obecně bývá použit laser se dvěma módy s různými amplitudami (zeleně vyznačeno) [37].



Obrázek 3.7: Viditelná maxima vibrometru CLV-2534 [37]

### 3.1.4 Měřicí karta NI 4462

Jedná se o PXI kartu od firmy National Instruments se čtveřicí A/D převodníků sigma-delta určenou ke zpracovávání dat z měření zvuku a vibrací. Tomu odpovídá vzorkovací frekvence až 204 800 vzorků za sekundu ve 24 bitovém rozlišení. Tato karta nabízí rozsahy od  $\pm 0,316$  V do  $\pm 42,4$  V. Vstupní kanály jsou konfigurovatelné jako diferenciální případně pseudo-diferenciální [38]. Kvalita této karty z hlediska vlastního

šumu by měla výrazně převyšovat nad očekávaným šumem vibrometrů. Tedy nemělo by docházet k žádnému výraznému ovlivnění měření. V kapitole 4.1 byla změřena charakteristika vlastního šumu pro tuto kartu, přičemž dle výrobce je šum přímo závislý na vzorkovací frekvenci, viz tabulka 3.2.



Obrázek 3.8: Měřicí karta NI 4462 [38]

Tabulka 3.2: Katalogové hodnoty vlastního šumu převodníku NI 4462 [39]

Sample Rate (kS/s)	Idle Channel Noise <sup>*, †</sup>	
	dBV <sub>rms</sub>	μV <sub>rms</sub>
1.0 kS/s ≤ $f_s$ < 51.2 kS/s	-118 dBV <sub>rms</sub>	1.3 μV <sub>rms</sub>
51.2 kS/s ≤ $f_s$ < 102.4 kS/s	-115 dBV <sub>rms</sub>	1.8 μV <sub>rms</sub>
102.4 kS/s ≤ $f_s$ ≤ 204.8 kS/s	-111 dBV <sub>rms</sub>	2.8 μV <sub>rms</sub>
* Source impedance ≤ 50 Ω		
† 30 dB gain		

Poznámka: 30 dB zesílení kanálu odpovídá rozsahu ±0,316 V

### 3.1.5 Měřicí karta NI 5922

Na této kartě nebylo měření provedeno, ale jedná se o jednu s nejlepších měřicích karet, které firma National Instruments nabízí pro sběr analogových signálů v širokém kmitočtovém rozsahu. Oproti kartě NI 4462 se jedná o převodníky použitelné jako osciloskop s vysokým rozlišením. Tato karta znovu obsahuje sigma-delta převodníky, tentokrát pracující s vzorkovacím kmitočtem až do 15 MS/s. Počet bitů se mění podle rychlosti měření, od 16 do 24 bitů (24 bitů do 500 kS/s). Pro srovnání jsou uvedeny hodnoty vlastního šumu v tabulce 3.3. Celková velikost šumu je pro kartu do PXI systému a vzorkovací frekvenci 50 a 100 kS/s ještě nižší, než v případě NI 4462, pro hodnotu 204,8 kS/s zde není hodnota uvedena, další nejbližší hodnota je až pro 1 MS/s. Především je však takto nízkých hodnot vlastního šumu dosaženo na rozsahu ±1 V, což je větší rozsah než v případě karty NI 4462 (±0,316 V) [40].

Tabulka 3.3: Katalogové hodnoty vlastního šumu převodníku NI-5922 [40]

Sample Rate	Range			
	10 V <sub>pk-pk</sub>		2 V <sub>pk-pk</sub>	
	dBFS	μV <sub>RMS</sub>	dBFS	μV <sub>RMS</sub>
50 kS/s	-120	3.4	PXI: -117 PCI: -110	PXI: 1.0 PCI: 2.2
100 kS/s	-118	4.3	PXI: -115 PCI: -110	PXI: 1.2 PCI: 2.2
1 MS/s	-108	13	-104	4.2
5 MS/s	-101	31	-98	8.7
10 MS/s	-91	92	-91	20
15 MS/s	-79	401	-79	80

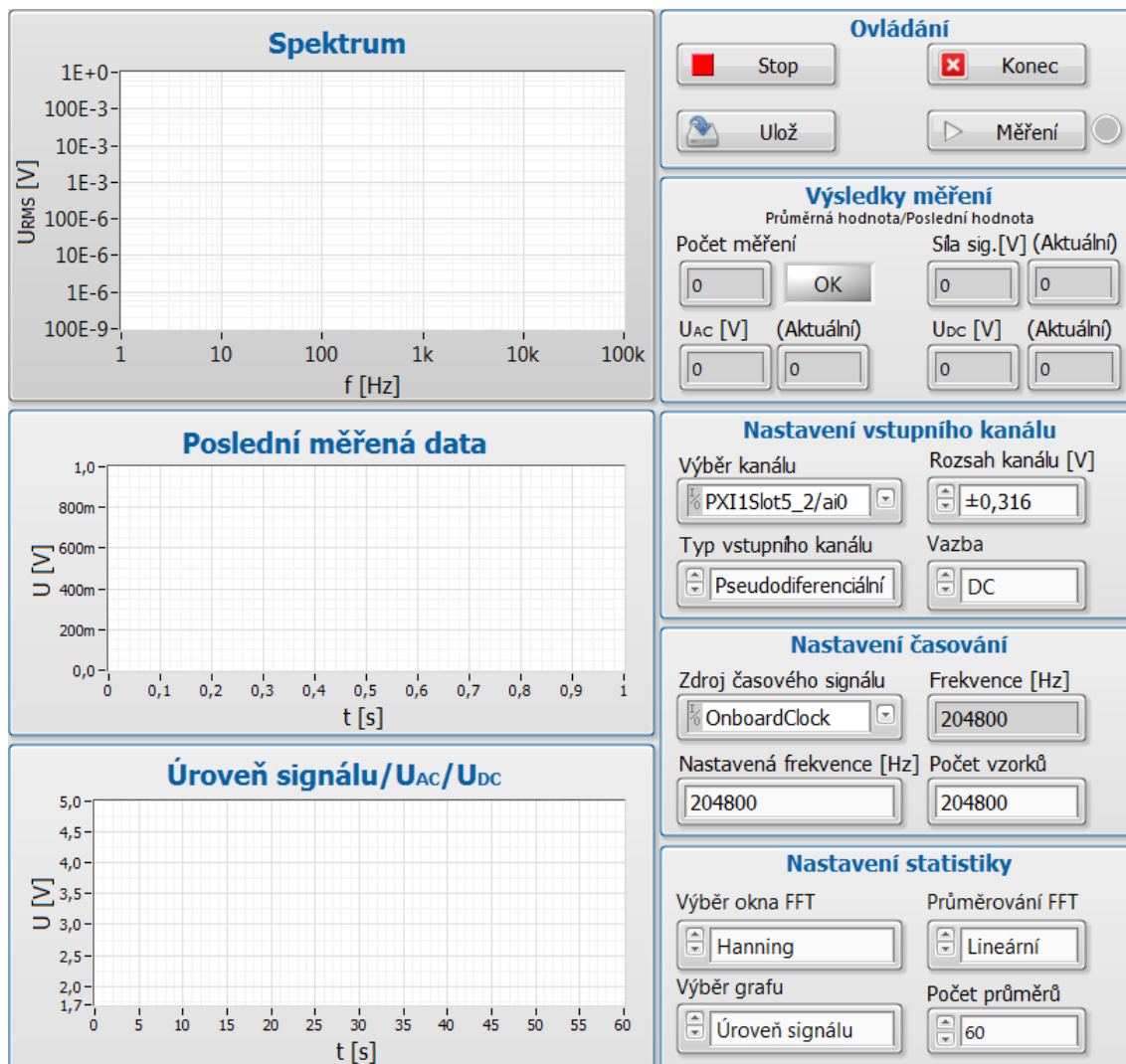
### 3.1.6 Měřicí aplikace

Pro účely měření byla vytvořena aplikace v LabVIEW, jenž provádí sběr a předzpracování naměřených dat. Na obrázku 3.9 je patrné ovládací rozhraní aplikace. To je rozděleno na dvě části, v levé jsou zaznamenaná a zpracovaná data, v pravé části lze ovládat základní parametry A/D převodníku, jako je vazba, vzorkovací frekvence a další.

Aplikace také provádí průměrování naměřených dat, a to z každého měřeného počtu vzorků, až do dosažení žádaného počtu průměrů. Pro tyto účely slouží několik ovládacích prvků v nastavení statistiky a časování. Z důvodů velikosti měřených dat exportovaný soubor neobsahuje všechny změřené vzorky z časové oblasti, ale pouze poslední měřený úsek dat. Pro počet vzorků 204 800, ze kterých je následně počítáno frekvenční spektrum pomocí FFT, je velikost souboru obsahující jedině měření asi 10 MB.

V exportovaných datech lze naléznout:

- Koeficienty frekvenčního spektra získané pomocí FFT
- Vzorky z časové oblasti pro poslední měřený úsek
- *Úroveň signálu* – pro každý měřený úsek i průměrná hodnota ze všech měření (odpovídá stejnosměrné složce kanálu AI<sub>3</sub>)
- $U_{AC}/U_{DC}$  – pro každý měřený úsek i průměrná hodnota ze všech měření
- Nastavení statistiky (způsob průměrování, okno FFT)
- Počet vzorků pro výpočet Fourierovy transformace
- Nastavení vstupní vazby A/D převodníku
- Vzorkovací frekvence A/D převodníku
- Nastavení typu kanálu A/D převodníku
- Měřicí rozsah A/D převodníku
- Počet změřených průměrů
- Čas měření



Obrázek 3.9: Ovládací rozhraní měřicí aplikace v LabVIEW

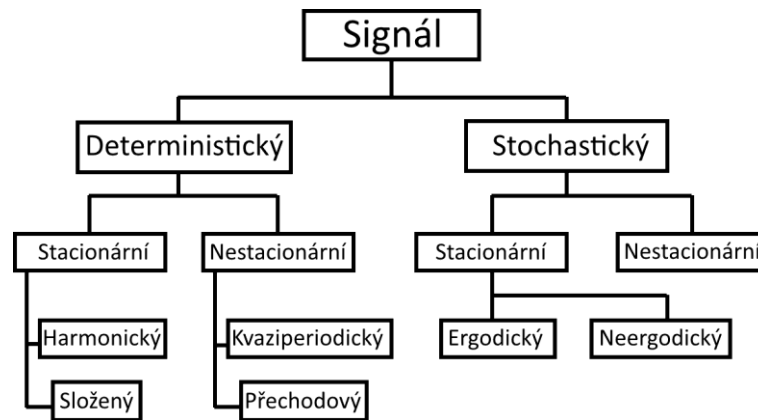
## 3.2 Využití průměrování

Jednorázové měření poskytuje přesnou informaci o dění v čase, hodí se tedy pro děje, které se neopakují, nebo je nelze ovládat. V ostatních případech lze využít opakujícího se měření k potlačení rušivých signálů. Pro upřesnění jsou signály rozděleny na obrázku 3.10.

Průměrováním lze potlačovat měřené neperiodické signály, tedy i signály deterministické a nestacionární, ale pouze do té míry, že jejich hodnota se sníží v poměru výskytů ku poměru opakování měření. Periodické signály lze účinně potlačovat v případě, že se měří integrační metodou a doba integrace je celočíselným násobkem periody rušivého kmitočtu. Integraci lze nahradit sumací vzorků.

Zajímavější jsou případy stochastických signálů, například bílého šumu. Bílý šum je stacionární stochastický signál (ergodický), kdy jeho působení lze eliminovat průměrováním z dostatečného množství měření, neboť jeho střední hodnota je rovna nule. V praxi se však s tímto šumem obvykle nesetkáme.

Průměrování je ovšem přínosné i tehdy, pokud střední hodnota šumu není nulová, ale pouze blízká nule. V této práci je průměrování využito jednak k potlačení náhodného šumu, ale i ke zvýraznění periodických dějů.



Obrázek 3.10: Rozdělení signálů [41]

### 3.3 Navržená měření

#### 3.3.1 Měření šumových parametrů měřicí karty NI-4462

Měření bylo navrženo s charakteristickou impedancí 50  $\Omega$ , 600  $\Omega$  a bez zakončení terminátorem. Protože maximální napěťový výstup všech použitých vibrometrů na libovolném rozsahu je 10 V, bylo měření provedeno pouze do rozsahu karty  $\pm 10$  V. To zaručuje zhodnocení vlastního šumu z hlediska podmínek použitých při měření. Přičemž případ bez zakončení a s terminátorem 600  $\Omega$  je zde užit pro srovnání. Před měřením byla provedena interní kalibrace měřicí karty.

Změřené hodnoty byly vyjádřeny ve spektrální hustotě šumu, neboť je to údaj, jenž National Instruments specifikuje pro tento převodník. Vzorec pro výpočet tohoto parametru je uveden v rovnici (20). Z vlastního šumu lze poté vypočítat efektivní počet bitů, dle rovnice (21). Takto vypočtená hodnota není z oboru přirozených čísel, ale pouze vyjadřuje, počet bitů nesoucích informaci o měřeném signálu. Tedy je možné se na tento údaj dívat, jako na celé číslo zaokrouhlené nahoru.

$$NSD(n) = \frac{F(n)}{\sqrt{\Delta f}} \quad (20)$$

Kde  $NSD$  je spektrální hustota šumu [ $V_{RMS}/\sqrt{Hz}$ ],  $F$  efektivní hodnoty jednotlivých spektrálních složek získané pomocí FFT [ $V_{RMS}$ ],  $n$  index spektrální čáry [-],  $\Delta f$  spektrální rozlišení [Hz].

$$n_{ef} = \log_2 \left( \frac{2 \cdot U_R}{U_{AC}} \right) \quad (21)$$

Kde  $n_{ef}$  je efektivní počet bitů [-],  $U_R$  zvolený rozsah [V],  $U_{AC}$  je šumová hodnota napětí na daném rozsahu [ $V_{RMS}$ ].

### 3.3.2 Měření vibrometrů s užitím mechanické stabilizace

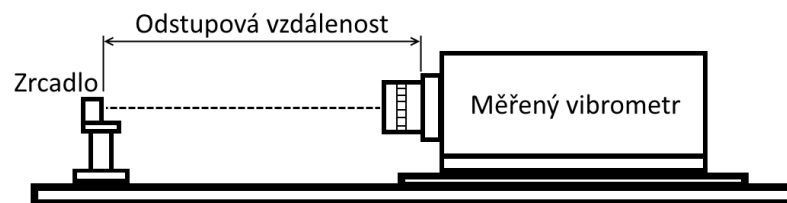
Pro mechanickou stabilizaci byl použit optický stůl s vibračně odizolovanou základnou. Tato stabilizace je obzvláště důležitá pro měření vlastního šumu a byla využita pro měření vibrometr PDV-100 a OFV-505. Pro vibrometr CLV-2534 nebylo využito optického stolu, z důvodů nepraktické manipulace s dekodérem. Stále však bylo provedeno mechanické spojení laseru a odrazky, jež je vidět z obrázku 3.11. Pomocí představené aplikace v LabVIEW byly měřeny koeficienty frekvenčního spektra. Tyto hodnoty byly následně přepočítány na spektrální hustotu šumu. Byla využita modifikace vzorce (20), kdy výsledná efektivní hodnota byla ještě vynásobena nastavenou citlivostí vibrometru. Pro výpočet celkového šumu  $v_{AC/DC}$  bylo užito efektivní hodnoty  $U_{AC\ RMS}$ , jež je měřena z časové oblasti a zaznamenávána představenou aplikací. Přičemž tato hodnota byla znovu vynásobena citlivostí měřeného rozsahu vibrometru, viz rovnice (22). Takto zpracovaná data umožnila srovnání vlastního šumu na různých rozsazích a vibrometrech.

$$v_{AC/DC} = U_{AC/DC} \cdot K_{vib} \quad (22)$$

Kde  $v_{AC/DC}$  je měřený šum odpovídající střídavému, nebo stejnosměrnému napětí [m/s],  $U_{AC/DC}$  měřené střídavé, nebo stejnosměrné napětí [V],  $K_{vib}$  je měřicí rozsah (citlivost) vibrometru [m/s/V].

Následujícím měřeným parametrem byl vliv intenzity zpětně odraženého paprsku na vlastní šum. Hodnota intenzity zpětně odraženého paprsku je dle teorie důležitá pro vysoký kontrastní poměr a tím i SNR, viz kapitola 2.1. Bylo tedy provedeno měření ve viditelném maximu s postupným zmenšováním intenzity odraženého paprsku, kdy pro každé měření byla vyhodnocena úroveň vlastního šumu.

I když výrobce udává viditelná maxima a doporučuje v nich měřit, v manuálech byla nalezena pouze informace svědčící o poklesu úrovně signálu mimo viditelná maxima, nikoliv však konkrétní hodnoty. Z tohoto důvodu bylo navrženo měření, kdy u každého vibrometru byl zvolen krok  $\frac{1}{4}$  z udávané vzdálenosti mezi maximy. Přičemž v každé takto zvolené vzdálenosti byl paprsek co nejlépe doostřen a byla změřena odpovídající hladina šumu. U vibrometru OFV-505/5000 bylo navíc realizováno měření ve třech odstupových vzdálenostech s dobou trvání 15 minut, kdy se sledovala časová stálost úrovně odraženého signálu a velikost šumu. Jedná se o odstupové vzdálenosti pro viditelné maximum, minimum a hodnotu vzdálenosti přesně mezi těmito extrémy.



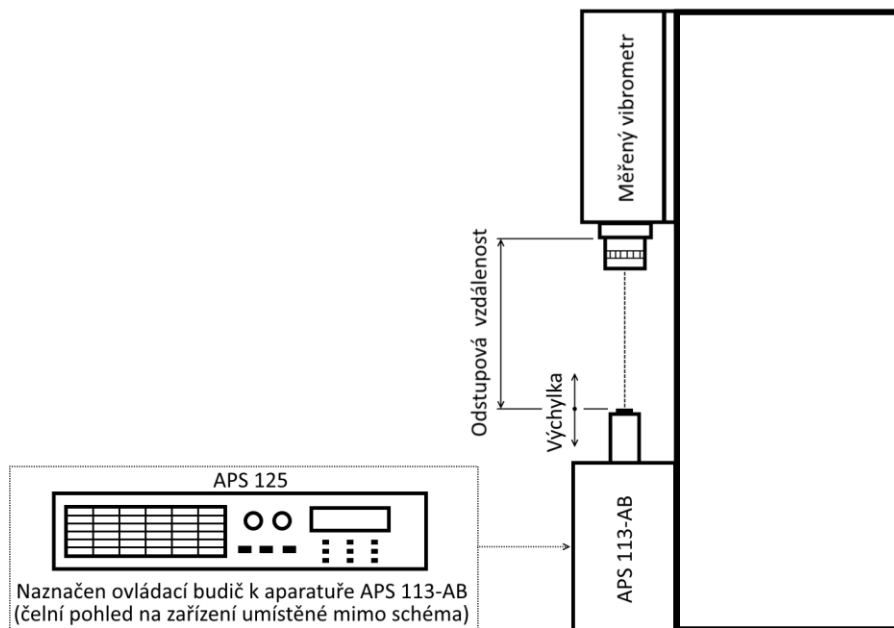
Obrázek 3.11: Schéma měření vlastního šumu, úrovně signálu a viditelných maxim

### 3.3.3 Měření výchylky a poměru signál-šum

Zde se práce zaměřuje na jeden konkrétní případ, kterým je měření velmi malé hodnoty výchylky modulované další výchylkou s řádově vyšší amplitudou a nižší frekvencí. V praxi by se například mohlo jednat o měření krátkého časového úseku polohy objektu těsně před a v průběhu jeho dopadu, kterému předchází poměrně dlouhý časový úsek samotného pádu, např. při rázových zkouškách. Podobným případem je kontinuální laserová defektoskopie vibrujícího objektu.

Byl navržen experiment, při kterém byly pomocí vibračního budiče s dlouhým zdvihem APS 113-AB simulovány tyto podmínky. Bylo využito složení dvou sinusových signálů, jenž byly přivedeny do budiče přes zesilovač APS 125, kdy nosnou frekvencí byla  $f_1 = 0,2$  Hz s amplitudou  $a_1 = 0, 20, 40$  a  $80$  mV. Zatímco měřený signál byl nastavován v krocích  $f_2 = 70, 120$  a  $190$  Hz s amplitudou  $a_2 = 10$  mV. Vstupní signál do budiče byl generován dle vzorce (23). Vibrometr byl upevněn svisle do odstupové vzdálenosti  $499$  mm (druhé viditelné maximum) a to způsobem, jak ukazuje obrázek 3.12.

$$u(t) = a_1 \sin(2\pi f_1 t) + a_2 \sin(2\pi f_2 t) \quad (23)$$



Obrázek 3.12: Schéma dynamického měření výchylky

Z měřených výsledků byla poté vypočtena spektrální hustota výkonu (PSD), dle vzorce (24). Ta byla následně použita pro výpočet výkonu měřené a rušivé složky vibrací, a to výběrem složek z PSD. Vybrané pásmo užitečného signálu se lišilo s ohledem na dobu měření jednoho průměru. Pro 10 s dlouhé měření byl užitečný signál zvolen jako pásmo  $\pm 0,5$  Hz od očekávané frekvence  $70, 120$  a  $190$  Hz (spektrální rozlišení  $0,1$  Hz), přičemž rušivý signál byl odfiltrován od stejnosměrné složky do hodnoty  $1$  Hz. V druhém



případě byla doba měření jednoho průměru 100 ms, čemuž odpovídá spektrální rozlišení 10 Hz, zde byla zvolena šířka pásma užitečného signálu  $\pm 10$  Hz a byl odfiltrován rušivý signál od stejnosměrné složky do hodnoty 10 Hz.

Výpočet SNR byl proveden dle rovnice (25). Při měření bylo využito faktu, že perioda rušivého signálu je přesně 5 s. Tedy i když měření může započít v různém okamžiku, vždy obsahuje dvě celé periody a nebude tedy docházet ke spektrálnímu úniku. Tato podmínka samozřejmě není splněna pro dobu měření jednoho průměru 100 ms.

Díky tomu, že jsou měřeny kratší intervaly, jenž se průměrují, lze snadněji zpracovat výsledky měření, a to především díky nižšímu počtu spektrálních čar. Pro výpočet výchylky z měřené efektivní hodnoty rychlosti pomocí vibrometru, byl využit vzorec (26). Ten vychází ze základního vztahu mezi uhlovou rychlostí, rádiusem a obvodovou rychlostí.

$$PSD(n) = \frac{F(n)^2}{\Delta f} \quad (24)$$

Kde  $PSD$  je výkonová spektrální hustota [ $V^2_{RMS}/Hz$ ],  $F$  efektivní hodnoty jednotlivých spektrálních složek získané pomocí FFT [ $V_{RMS}$ ],  $n$  index spektrální čáry [-],  $\Delta f$  spektrální rozlišení [Hz].

$$SNR = 10 \log \left( \frac{\sum_{i=m-\Delta}^{m+\Delta} PSD(i)}{\sum_{i=r}^N PSD(i) - \sum_{i=m-\Delta}^{m+\Delta} PSD(i)} \right) \quad (25)$$

Kde  $SNR$  je poměr signál-šum [dB],  $PSD$  výkonová spektrální hustota [ $V^2_{RMS}/Hz$ ],  $m$  index měřeného signálu [-],  $\Delta$  počet indexů uvažovaného okolí u měřeného signálu [-],  $r$  počet indexů pro odstranění rušivé a stejnosměrné složky [-],  $N$  celkový počet indexů [-].

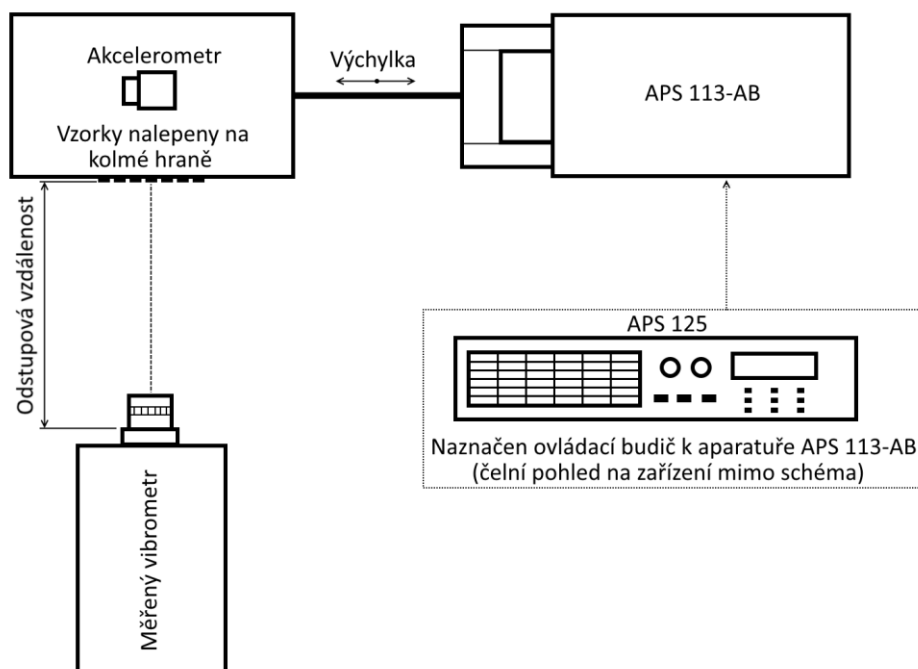
Poznámka: Pro výpočet výkonu  $P$  [ $V^2_{RMS}$ ], z  $PSD$  je zapotřebí vynásobit sumu spektrálním rozlišením.

$$d = \frac{U_{peak} K_{vib} \sqrt{2}}{2\pi f} \quad (26)$$

Kde  $d$  je měřená výchylka [ $m_{pk}$ ],  $U_{peak}$  spektrální čára vyjadřující efektivní hodnotu napětí na zjišťované frekvenci [ $V_{RMS}$ ],  $K_{vib}$  citlivost vibrometru [ $m/s/V$ ],  $f$  frekvence zjišťované výchylky [Hz].

### 3.3.4 Měření koherenční zrnitosti

Pro měření tohoto jevu byl navrhnut experiment, při kterém se výchylka vibrací kolmých na směr měření pohybovala od 1  $\mu m_{pk}$ , do 250  $\mu m_{pk}$ . Přičemž byla zvolena odstupová vzdálenost znovu 499 mm. Schématické uspořádání lze vidět na obrázku 3.13, díky akcelerometru připevněnému k vibrační aparatuře APS 113-AB bylo možné dosáhnout přesného nastavení zmíněné výchylky, a to ve třech uvažovaných frekvencích 5, 30 a 90 Hz. Pro měření bylo vybráno sedm vzorků, ty jsou nalepeny na boční straně aparatury, jenž je pevně spojena s APS 113-AB.



Obrázek 3.13: Schéma měření koherenční zrnitosti (pohled shora)

Pro nastavení žádané frekvence a výchylky na aparatuře APS 113-AB byly vypočteny efektivní hodnoty spektrální čáry měřené akcelerometrem na frekvenci 0, 30 a 90 Hz, jež odpovídají požadované hodnotě vibrací kolmých na směr měření. Tyto hodnoty byly využity k přesnému nastavení požadovaných vibrací. K výpočtu byl užit vzorec (27), jedná se úpravu základního vztahu pro radiální zrychlení na kružnici. Efektivní hodnota je použita pro zjednodušení, neboť měřicí aplikace zobrazuje frekvenční spektrum v efektivní hodnotě. Výsledné hodnoty jsou shrnuty v tabulce 3.4, hodnoty v závorce jsou až příliš vysoké a měření na těchto hodnotách nebyly realizovány.

$$U_a = \frac{(2\pi f)^2 d K_a}{\sqrt{2}} \quad (27)$$

Kde  $U_a$  je efektivní hodnota spektrální čáry pro dosažení žádané výchylky při žádané frekvenci [ $V_{RMS}$ ],  $f$  frekvence žádaných vibrací [Hz],  $d$  žádaná výchylka [ $\mu\text{m}_{pk}$ ],  $K_a$  citlivost akcelerometru [ $V/(m/s^2)$ ].

Tabulka 3.4: Efektivní hodnoty spektrálních čar měřených na dané frekvenci akcelerometrem pro dosažení žádané výchylky

f [Hz]	$U_a$ [mV <sub>RMS</sub> ]			
	d [ $\mu\text{m}_{pk}$ ]			
	1	5	50	250
5	0,14	0,69	6,87	34,4
30	4,95	24,7	247	1 237
90	44,5	223	(2 227)	(11 136)

Poloha laserového paprsku a tím i typ měřeného povrchu byl nastavován pomocí stejnosměrné složky přivedené do zesilovače APS 125. Měření probíhalo vždy nastavením výchylky a frekvence patrné z tabulky 3.4 a to vždy v případě, že vibrometr byl zaměřen na referenční vzorek (č. 3), konkrétně na zrcadlo, jenž bylo umístěno jako středový prvek. Změna výchylky způsobená posuvem mezi jednotlivými vzorky byla zanedbána. Zaostření laserového paprsku bylo provedeno pouze jednou, a to na referenčním vzorku (zrcadle).

Při zpracování bylo jednak využito efektivní napětí vypočtené z časové oblasti pomocí měřicí aplikace. To bylo vynásobeno použitým měřicím rozsahem (citlivostí) vibrometru, jak to ukazuje rovnice (22). Dále pro všechny vzorky byla shrnuta úroveň odraženého signálu spolu s rozptylem tohoto parametru a korelací na celkový šum do jedné tabulky.

Pro zkoumání rozložení koherenčního šumu ve frekvenčním spektru byly provedeny výpočty efektivní hodnoty odpovídající pouze vybraným částem frekvenčního spektra. Pro výpočet byl využit vzorec (28), vzhledem k tomu, že při měření bylo aplikováno Hannovo okno, bylo užito korekčního faktoru  $CF = 0,83333$  [42]. Tento postup byl aplikován jednak pro odfiltrování základní budící frekvence vibrací, tedy 5, 30 a 90 Hz, dále pak bylo vybráno pásmo kmitočtů od 100 Hz a od 1 kHz do hodnoty 102,4 kHz (odpovídá maximální měřené frekvenci). Pro kontrolu výsledků byl proveden také výpočet s odstraněním pouze stejnosměrné složky, tedy spektrálních složek odpovídajících kmitočtům 0 Hz (stejnosemerná složka) a 1 Hz. Složka na kmitočtu 1 Hz byla odstraněna kvůli snížené rozlišovací schopnosti, jenž vzniká použitím Hannova okna. Posledním měřeným případem byl vliv rozostření na množství měřeného koherenčního šumu.

$$U_{RMS} = CF \sqrt{\sum_{n=0}^N F(n)^2} \quad (28)$$

Kde  $U_{RMS}$  je efektivní hodnota získaná výpočtem ze spektra [ $V_{RMS}$ ],  $F$  efektivní hodnoty jednotlivých spektrálních složek získané FFT [ $V_{RMS}$ ],  $N$  počet spektrálních čar [-],  $CF$  korekční faktor [-] (0,83333 pro Hannovo okno).

## 4 ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ

Tato kapitola se zabývá především zpracováním a zhodnocením naměřených dat. Použité principy měření a aplikované vzorce pro jednotlivé výpočty byly podrobně popsány v předchozí kapitole. Všechna data byla změřena navrženou aplikací v LabVIEW, i když její verze se vyvíjela v průběhu jednotlivých měření. Ve výpočtu FFT bylo vždy aplikováno Hannovo okno.

Měření všech vibrometrů probíhalo s použitím karty NI 4462, jejíž charakteristika je změřena v kapitole 4.1. Pro všechna statická měření byly nastaveny společné parametry, jako je vzorkovací frekvence 204,8 kHz, čas sběru dat jedna sekunda, šedesát vzorků pro výpočet průměru efektivního napětí a spektra pomocí Fourierovy transformace. Vypočtená rychlost  $v$  odpovídá hodnotě vypočtené z napětí  $U_{RMS}$ . Tedy všechny uvedené rychlosti v grafech a tabulkách jsou přepočtené z efektivních (RMS) hodnot napětí.

V příloze B lze nalézt fotodokumentaci z měření, podmínky měření a použité přístroje. Příloha C obsahuje grafy spektrální hustoty šumu u vibrometrů PDV-100 a OFV-505/5000, bez použití optického stolu jako stabilizace. Tyto hodnoty byly změřeny v rámci semestrální práce.

### 4.1 Měřicí karta NI 4462

V této části byly postupně změřeny všechny kanály měřicí karty National Instruments NI PXI-4462. Všechny měřené hodnoty odpovídají maximální vzorkovací frekvenci, tedy 204,8 kHz a jsou změřeny pro pseudo-diferenciální vstupní konfiguraci. Před měřením byla provedena interní kalibrace. Rozsahy 31,6 V a 42,4 V nebyly měřeny, neboť nebylo předpokládáno jejich využití, to je třeba brát v úvahu například při výpočtu efektivního počtu bitů.

Hodnoty jsou zaokrouhleny tak, aby poslední platná číslice byla v řádu udávané kvantovací chyby. Například pro rozsah 10 V a 24 bitový převodník je tato hodnota 0,59  $\mu$ V. Hodnoty pro tento rozsah jsou tedy zaokrouhleny na jednotky  $\mu$ V. Pro citlivější rozsahy se zesílením je kvantovací chyba rovna hodnotě 0,18  $\mu$ V, 0,059  $\mu$ V a 0,019  $\mu$ V (sestupně k rozsahu 0,316 V). Z tohoto důvodu je v tabulkách užito většího počtu desetinných míst.

V tabulce 4.1 lze nalézt první sadu dat, odpovídající měření vlastního šumu bez terminátoru. Lze si všimnout především vysoké stejnosměrné složky. Nicméně celkově lze říci, že mezi takto naměřenými hodnotami jsou jen velmi malé rozdíly, co se týče jednotlivých kanálů.

Tabulka 4.1: Vlastní šum karty NI 4462 bez terminátoru

Terminátor [ $\Omega$ ]	Vstupní rozsah [V]	Kanál	$U_{AC\ RMS}$ [ $\mu V$ ]	$U_{DC}$ [mV]
$\infty$	$\pm 10,00$	AI <sub>0</sub>	30	3,29
		AI <sub>1</sub>	29	3,23
		AI <sub>2</sub>	32	3,36
		AI <sub>3</sub>	29	3,41
	$\pm 3,16$	AI <sub>0</sub>	22,4	3,27
		AI <sub>1</sub>	22,1	3,27
		AI <sub>2</sub>	23,6	3,38
		AI <sub>3</sub>	22,2	3,42
	$\pm 1,00$	AI <sub>0</sub>	21,3	3,27
		AI <sub>1</sub>	21,2	3,28
		AI <sub>2</sub>	22,6	3,38
		AI <sub>3</sub>	21,3	3,42
	$\pm 0,316$	AI <sub>0</sub>	21,19	3,35
		AI <sub>1</sub>	21,17	3,28
		AI <sub>2</sub>	22,46	3,38
		AI <sub>3</sub>	21,27	3,42

V následujícím případě bylo měřeno s terminátorem 600  $\Omega$ , výsledky jsou shrnuty v tabulce 4.2. Z ní je patrné, že stejnosměrná složka klesla na úroveň desítek mikrovoltů. Nicméně její hodnota se výrazně mění s volbou kanálu. Střídavá složka je znovu velmi podobná napříč jednotlivými kanály a její hodnota výrazně poklesla oproti případu bez terminátoru.

Nejdůležitější měřený případ je s užitím terminátoru 50  $\Omega$ , neboť měřené vibrometry mají srovnatelnou hodnotu výstupní impedance. Změřené hodnoty lze nalézt v tabulce 4.3. Velikost stejnosměrné složky má tendenci růst, oproti případu s terminátorem 600  $\Omega$ . Stále je však specifická pro každý kanál. Střídavá složka se liší mezi jednotlivými kanály jen minimálně. Pro srovnání naměřené úrovně šumu lze použít katalogový list výrobce, viz tabulka 3.2.

Tabulka 4.2: Vlastní šum karty NI 4462 s terminátorem 600  $\Omega$

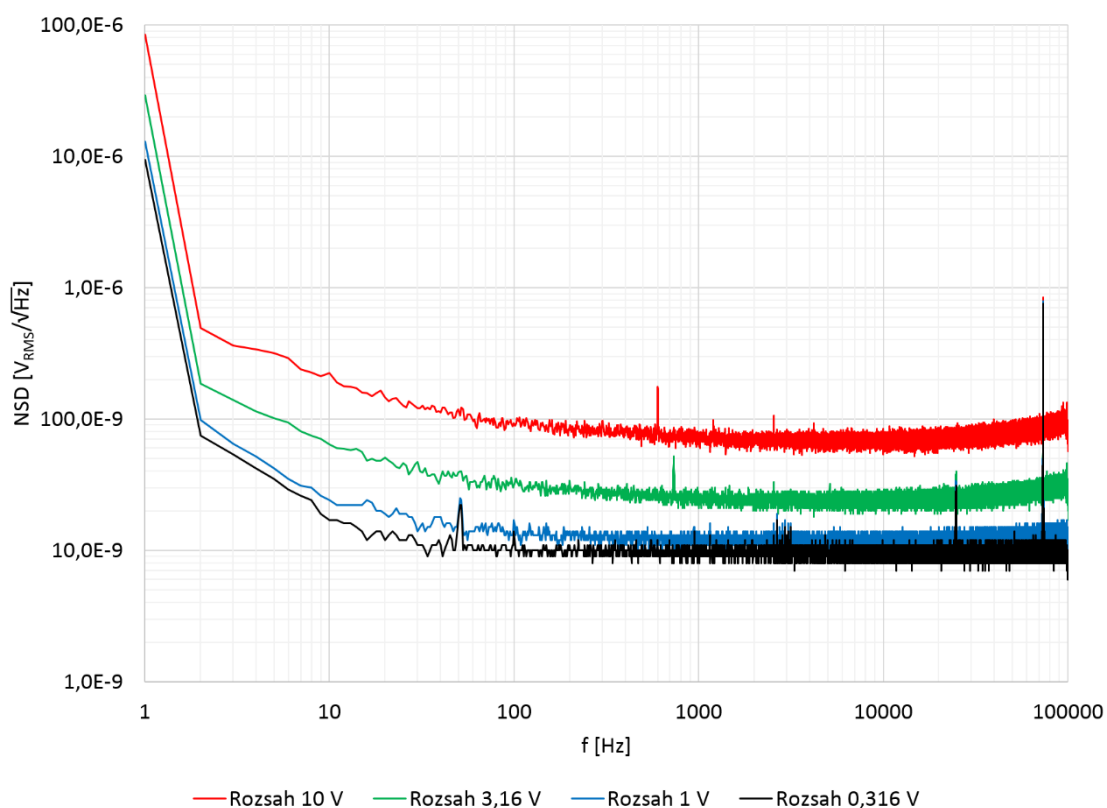
Terminátor [ $\Omega$ ]	Vstupní rozsah [V]	Kanál	$U_{AC\ RMS}$ [ $\mu V$ ]	$U_{DC}$ [ $\mu V$ ]
600	$\pm 10,00$	AI <sub>0</sub>	21	36
		AI <sub>1</sub>	20	-46
		AI <sub>2</sub>	22	3
		AI <sub>3</sub>	21	-48
	$\pm 3,16$	AI <sub>0</sub>	7,5	14,2
		AI <sub>1</sub>	7,2	-5,6
		AI <sub>2</sub>	7,7	6,6
		AI <sub>3</sub>	7,2	-20,5
	$\pm 1,00$	AI <sub>0</sub>	4,0	9,3
		AI <sub>1</sub>	3,9	4,8
		AI <sub>2</sub>	4,1	8,1
		AI <sub>3</sub>	3,7	-14,5
	$\pm 0,316$	AI <sub>0</sub>	3,35	8,95
		AI <sub>1</sub>	3,34	8,90
		AI <sub>2</sub>	3,42	8,24
		AI <sub>3</sub>	3,06	-11,00

Tabulka 4.3: Vlastní šum karty NI 4462 s terminátorem 50  $\Omega$

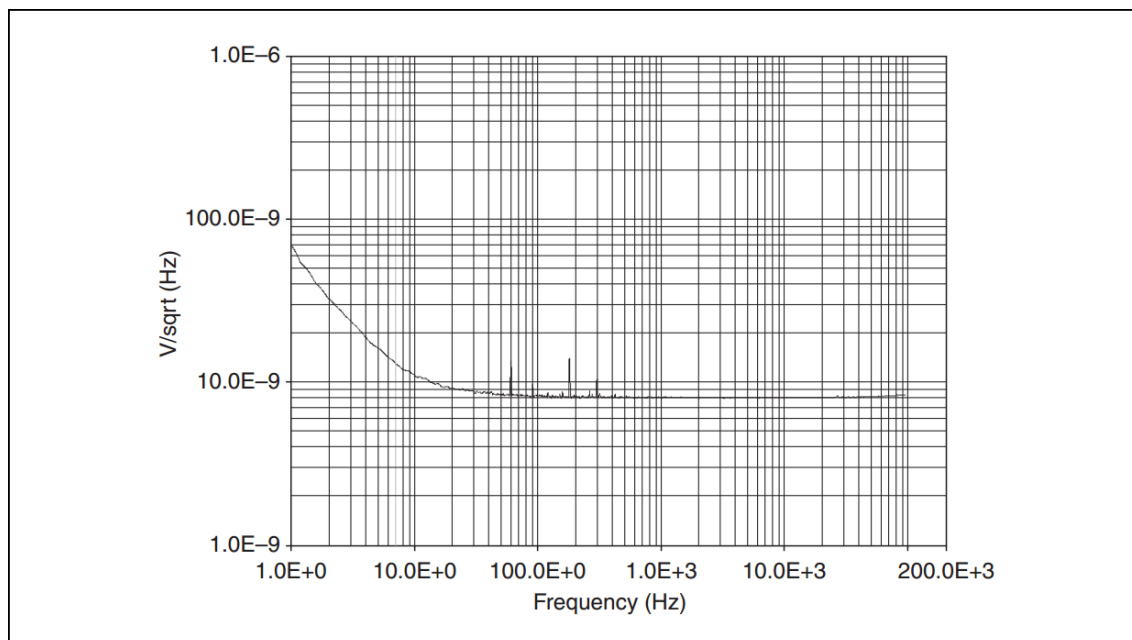
Terminátor [ $\Omega$ ]	Vstupní rozsah [V]	Kanál	$U_{AC\ RMS}$ [ $\mu V$ ]	$U_{DC}$ [ $\mu V$ ]
50	$\pm 10,00$	AI <sub>0</sub>	21	120
		AI <sub>1</sub>	20	-58
		AI <sub>2</sub>	22	13
		AI <sub>3</sub>	20	-58
	$\pm 3,16$	AI <sub>0</sub>	7,3	41,4
		AI <sub>1</sub>	6,9	-8,6
		AI <sub>2</sub>	7,5	12,6
		AI <sub>3</sub>	7,0	-28,5
	$\pm 1,00$	AI <sub>0</sub>	3,5	18,2
		AI <sub>1</sub>	3,4	5,3
		AI <sub>2</sub>	3,5	11,3
		AI <sub>3</sub>	3,3	-20,3
	$\pm 0,316$	AI <sub>0</sub>	2,81	13,21
		AI <sub>1</sub>	2,76	11,14
		AI <sub>2</sub>	2,77	11,77
		AI <sub>3</sub>	2,55	-16,75

Pro všechny rozsahy v tabulkách je změřena i jejich frekvenční charakteristika. Protože se jedná o 48 průběhů, není možné je zde ukázat všechny. Jako reprezentativní vzorek byl vybrán první kanál AI<sub>0</sub> a to i když nedosahuje dle tabulky nejnižších hodnot. Navzdory tomu má však výrazně nejnižší úroveň rušení pronikajícího ze sítě na kmitočtu 50 Hz.

Na obrázku 4.1 jsou zobrazeny spektrální hustoty šumu pro všechny čtyři rozsahy zmíněného kanálu. Nejvýraznější je špička na hodnotě 73,5 kHz, dále 24,7 kHz a 50 Hz.



Obrázek 4.1: Spektrální hustota šumu kanálu  $AI_0$  (terminátor  $50 \Omega$ )



Obrázek 4.2: Šumové spektrum měřicí karty NI 4462 dle katalogu [8]

Pro srovnání lze na obrázku 4.2 vidět katalogovou hodnotu vlastního šumu, jak ji udává výrobce. Od změřené charakteristiky se liší především v hodnotách blízkých počátku (stejnoseměrné složce). Hodnoty šumu měřené s terminátorem 50  $\Omega$  byly dále použity pro výpočet efektivní hodnoty bitového rozlišení karty dle vzorce (9) a zaznamenány do tabulky 4.4.

Tabulka 4.4: Efektivní přepočítání bitů převodníku NI 4462

Terminátor [ $\Omega$ ]	Vstupní rozsah [V]	Kanál	Efektivní počet bitů [-]
50	$\pm 10,00$	AI <sub>0</sub>	19,8
		AI <sub>1</sub>	19,9
		AI <sub>2</sub>	19,8
		AI <sub>3</sub>	19,9
	$\pm 3,16$	AI <sub>0</sub>	19,7
		AI <sub>1</sub>	19,8
		AI <sub>2</sub>	19,6
		AI <sub>3</sub>	19,7
	$\pm 1,00$	AI <sub>0</sub>	18,9
		AI <sub>1</sub>	19,0
		AI <sub>2</sub>	18,9
		AI <sub>3</sub>	19,1
	$\pm 0,316$	AI <sub>0</sub>	17,5
		AI <sub>1</sub>	17,5
		AI <sub>2</sub>	17,5
		AI <sub>3</sub>	17,7

## 4.2 Vibrometr PDV-100

Tento vibrometr obsahuje pouze jeden rychlostní dekodér, nastavitelný ve třech rozsazích s možností výběru dolnofrekvenčního filtru. Jeho hodnota byla nastavena na maximum, tedy 22 kHz. Tabulka 4.5 obsahuje změřené hodnoty vlastního šumu na jednotlivých rozsazích. Lze si všimnout, že hodnoty vlastního šumu rostou se zvětšující se citlivostí (s rostoucím rozsahem měřených rychlostí). Na grafu v obrázku 4.3 je možné vidět spektrum šumu vibrometru na nejcitlivějším rozsahu.

Tabulka 4.5: Vlastní šum rychlostního dekodéru vibrometru PDV-100

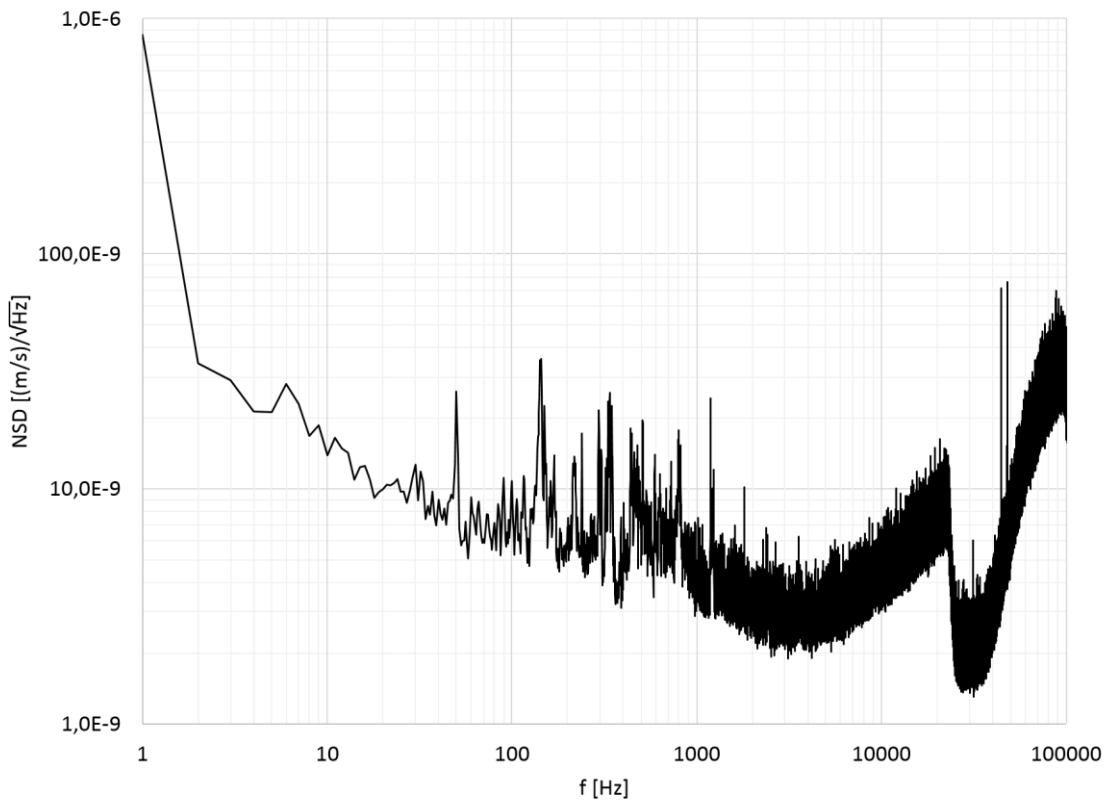
Citlivost [mm/s/V]	v <sub>AC</sub> [ $\mu$ m/s]	v <sub>DC</sub> [ $\mu$ m/s]
5	4,5	1,4
25	22,6	7,2
125	112,9	35,4

Měření vlivu úrovně odraženého signálu probíhalo pomocí vestavěného indikátoru vibrometru, jehož měřítko je v rozsahu 0 až 12 jednotek. Bez použití odrazky zhoršující reflexi zrcadla bylo dosaženo minima 6 jednotek, měření je shrnuto v tabulce 4.6. Překvapivá je hodnota šumu pro indikovanou úroveň signálu 12 jednotek, kdy je dokonce



o 422 % horší než nejlepší dosažený výsledek. Maxima bylo dosaženo jednak přibližným zaostřením dle oka a poté pomocí ostření a sledování vlastního šumu.

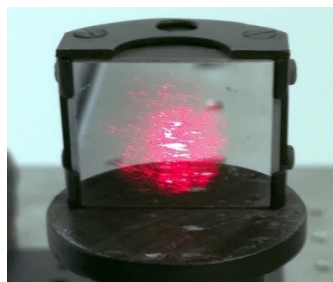
Je třeba si uvědomit, že bargraf indikující úroveň odraženého signálu slouží spíše k orientačnímu zaostření. Pro ilustraci je na obrázku 4.4 zobrazen případ pro zaostření rovnající se přesně hodnotě 12 jednotek.



Obrázek 4.3: Spektrální hustota šumu vibrometru PDV-100 s citlivostí 5 mm/s/V

Tabulka 4.6: Měření vlivu úrovně signálu na šum u vibrometru PDV-100

Citlivost [mm/s/V]	Úroveň signálu [-]	v <sub>AC</sub> [μm/s]	v <sub>DC</sub> [μm/s]
5	Maximum	4,3	1,3
	12	18,2	1,4
	9	29,9	1,3
	6	60,1	1,3
	4	104,3	1,4



Obrázek 4.4: Zaostření při hraniční hodnotě úrovně signálu rovné dvanácti

Při měření viditelných maxim, nebyly u tohoto vibrometru pozorovány rozdíly v šumu související se vzdáleností, což je překvapující. V tabulce 4.7 jsou shrnuty výsledky, viditelná maxima jsou tučně. Během měření nebyly zaznamenány žádné výrazné fluktuace šumu v čase, a to ani v teoreticky nejméně příznivých vzdálenostech.

Tabulka 4.7: Závislost šumu na odstupové vzdálenosti u vibrometru PDV-100

Citlivost [mm/s/V]	Vzdálenost [mm]	$v_{AC}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	$v_{DC}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]
5	<b>372</b>	<b>4,3</b>	<b>1,5</b>
	406	4,3	1,5
	441	4,2	1,5
	475	4,2	1,5
	<b>510</b>	<b>4,2</b>	<b>1,4</b>
	544	4,2	1,5
	579	4,2	1,5
	613	4,3	1,4
	<b>648</b>	<b>4,2</b>	<b>1,5</b>

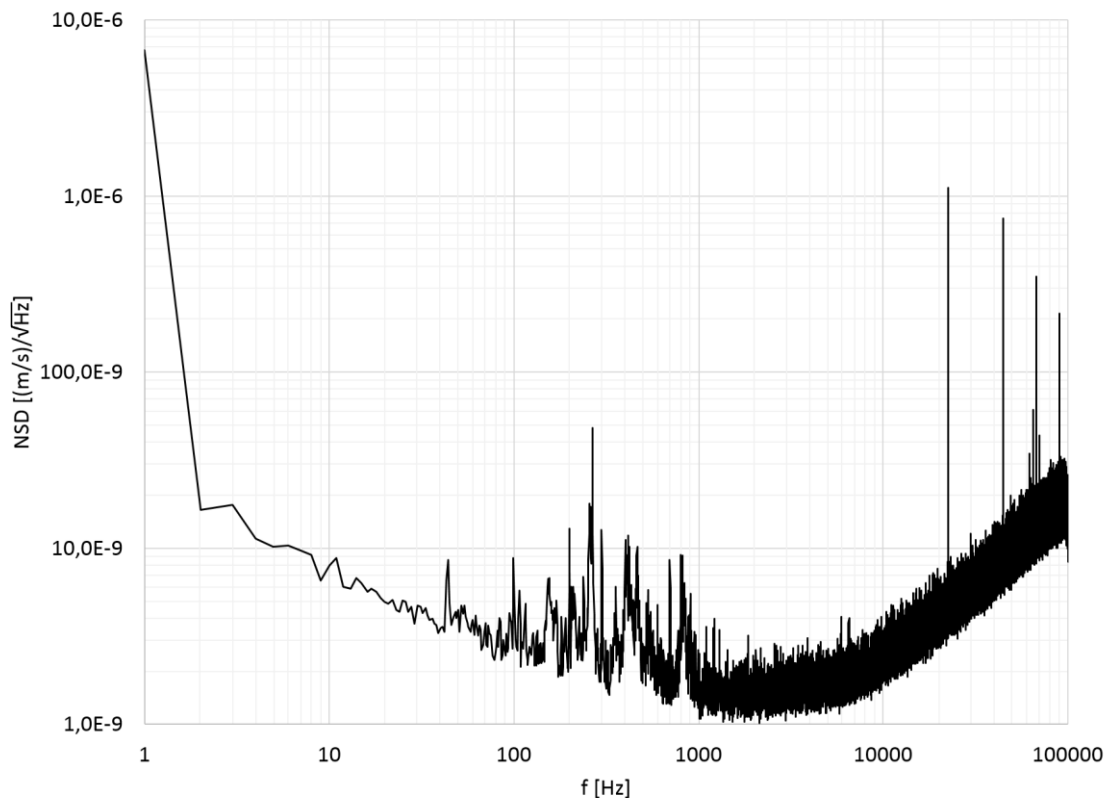
### 4.3 Vibrometr OFV-505/5000

Vibrometr obsahuje dva rychlostní dekodéry a jeden dekodér pro výchylku. Všechny rozsahy byly změřeny a v tabulce 4.8 jsou shrnuty hodnoty vlastního šumu rychlostních dekodérů, měření proběhlo při odstupové vzdálenosti 642 mm. Velikost šumu roste s měřeným rozsahem. Pouze hodnota pro dekodér VD-02 a citlivost 25 mm/s/V vykazuje nečekaně vysokou hodnotu stejnosměrné složky. Jedná se pravděpodobně o chybu měření. V závorkách je u citlivosti vždy uvedena maximální měřitelná frekvence.

Tabulka 4.8: Vlastní šum rychlostních dekodérů vibrometru OFV-505

Dekodér	Citlivost [mm/s/V]	$v_{AC}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	$v_{DC}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]
VD-02	5	11,1	-10,2
	25	16,9	-462,8
	125	77,3	-270,8
	1000	618,7	-2 166,2
VD-06	1 (20 kHz)	1,1	-5,0
	2 (100 kHz)	3,0	-9,6
	2 (350 kHz)	3,1	-9,6
	10 (100 kHz)	3,7	-50,5
	10 (350 kHz)	3,8	-50,1
	50 (100 kHz)	12,1	-251,2
	50 (350 kHz)	12,3	-248,9

Jako nejzajímavější byl vybrán dekodér VD-06 s citlivostí 2 mm/s/V, neboť oproti citlivosti 1 mm/s/V nabízí frekvenční rozsah nikoliv pouze 20 kHz, ale i 350 kHz. Tento případ zobrazuje obrázek 4.5. Překvapující jsou především špičky, jenže se vyskytují na kmitočtech 23, 45, 68 a 90 kHz.



Obrázek 4.5: Spektrální hustota šumu vibrometru OFV-505 s citlivostí 2 mm/s/V

Na digitální dekodér rychlosti VD-06 je navázán dekodér výchylky DD-500, jenž pracuje na rozsazích od 50 nm do 5 mm. Změřené hodnoty jsou zpracovány v tabulce 4.9 a 4.10. V případě měření se střídavou vazbou, je úroveň šumu výrazně nižší, pohybuje se v řádu setin nm. Střídavá vazba byla použita z důvodu odstranění stejnosměrné složky, a tedy možnosti měření na nejcitlivějším rozsahu měřicí karty, který je  $\pm 0,316$  V.

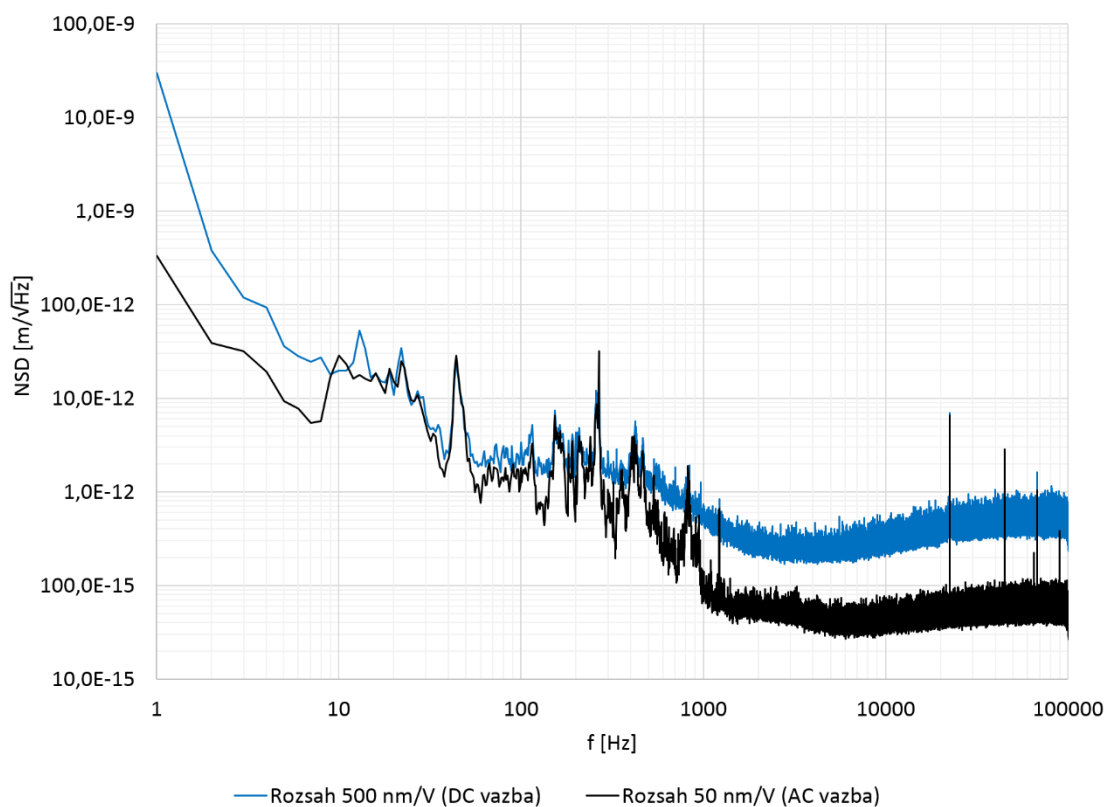
Tabulka 4.9: Vlastní šum dekodéru výchylky DD-500 (DC vazba)

Dekodér	Citlivost [ $\mu\text{m}/\text{V}$ ]	$I_{AC}$ [nm]	$I_{DC}$ [nm]
DD-500	0,05	4,24	-18,11
	0,5	1,80	43,89
	5	2,2	-26,1
	50	12,3	-224,3
	500	118	-2 028
	5 000	1 176	-20 403

Pro měření se stejnosměrnou vazbou byl použit rozsah měřicí karty 3,16 V, zpětně lze zhodnotit toto jako zbytečné, neboť šum karty na rozsahu 3,16 V je maximálně 7,5  $\mu\text{V}$ , což lze přepočítat na hodnotu posuvu 0,35 pm. Lze si všimnout, že na nejcitlivějším rozsahu vibrometru je šum oproti očekávání vyšší, než na rozsahu s citlivostí 500 nm/V. Tento fakt je pravděpodobně způsoben chybou měření, čemuž napovídá i rozdíl mezi měřenou průměrnou hodnotou  $U_{AC\text{ RMS}} = 0,085$  V a hodnotou z poslední měřené sekundy  $U_{AC\text{ RMS}} = 0,010$  V.

Tabulka 4.10: Vlastní šum dekodéru výchylky DD-500 (AC vazba)

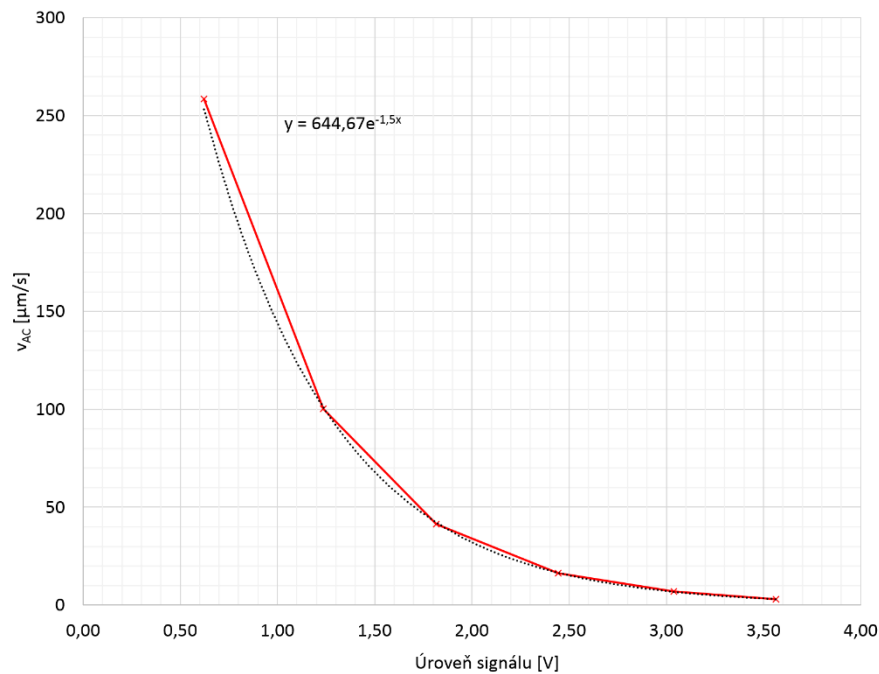
Dekodér	Citlivost [ $\mu\text{m}/\text{V}$ ]	$d_{\text{AC}}$ [nm]	$d_{\text{DC}}$ [nm]
DD-500	0,05	0,17	0,03
	0,1	0,17	0,02
	0,2	0,19	0,07
	0,5	0,27	0,07
	1	0,32	0,06
	2	0,6	0,1
	5	1,3	0,1
	10	2,5	0,2
	20	4,8	0,3
	50	11,9	0,8
	100	23,6	1,6
	200	47	3
	500	117	8
	1 000	235	16
	2 000	470	33
5 000	1 175	85	



Obrázek 4.6: Spektrální hustota šumu DD-500 pro citlivost 50 a 500 nm/V

Z důvodu popsaného výše, byly vybrány dva případy z tabulek, a to pro střídavou vazbu ten nejcitlivější rozsah a 500 nm/V pro vazbu stejnosměrnou, viz obrázek 4.6. Šum se projevuje především do hodnoty 50 Hz a ve špičce na 270 Hz.

Dále byl měřen vliv úrovně signálu odraženého paprsku na vlastní šum. Intenzita (úroveň) odraženého signálu je indikována pomocí elektrického napětí na speciálním výstupu a pohybuje se od 0 V po hodnotu přesahující 3,6 V při maximu, kterého se podařilo dosáhnout. Bargraf na samotném zařízení však indikuje maximální intenzitu (úroveň) odraženého paprsku již při hodnotě napětí 2,56 V. Výsledky měření shrnuje tabulka 4.11, hodnoty napětí se nemusí přesně shodovat s tabulkou 4.8. Zde bylo použito nové měření, tak aby byly zohledněny odlišné podmínky. Z hodnot vyplývá, že výrazně zlepšených šumových vlastností lze dosáhnout, pokud je intenzita zpětně dopadajícího paprsku vysoká (maxima vyznačeny tučně). Závislost šumu (AC složky) a úrovně signálu je exponenciální viz graf na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: Závislost šumu na úrovni signálu pro vibrometr OFV-505 (2 mm/s/V)

Tabulka 4.11: Měření vlivu úrovně signálu na šum u vibrometru OFV-505

Dekodér	Citlivost [mm/s/V]	Úroveň signálu [V]	$v_{AC}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	$v_{DC}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]
VD-02	5	<b>3,56</b>	<b>11,1</b>	<b>-10,2</b>
		3,04	12,8	-9,2
		2,44	19,7	-10,1
		1,82	43,2	-9,1
		1,24	102,1	-10,1
		0,62	263,1	-9,5
VD-06	1 (20 kHz)	<b>3,57</b>	<b>1,1</b>	<b>-5,0</b>
		3,04	1,3	-5,0
		2,45	2,7	-5,0
		1,82	6,6	-4,9
		1,24	16,0	-4,9
		0,63	41,1	-4,9
	2 (350 kHz)	<b>3,56</b>	<b>3,1</b>	<b>-9,4</b>
		3,04	6,9	-9,5
		2,44	16,2	-9,5
		1,82	41,4	-9,6
		1,24	100,3	-10,0
		0,62	258,5	-10,7

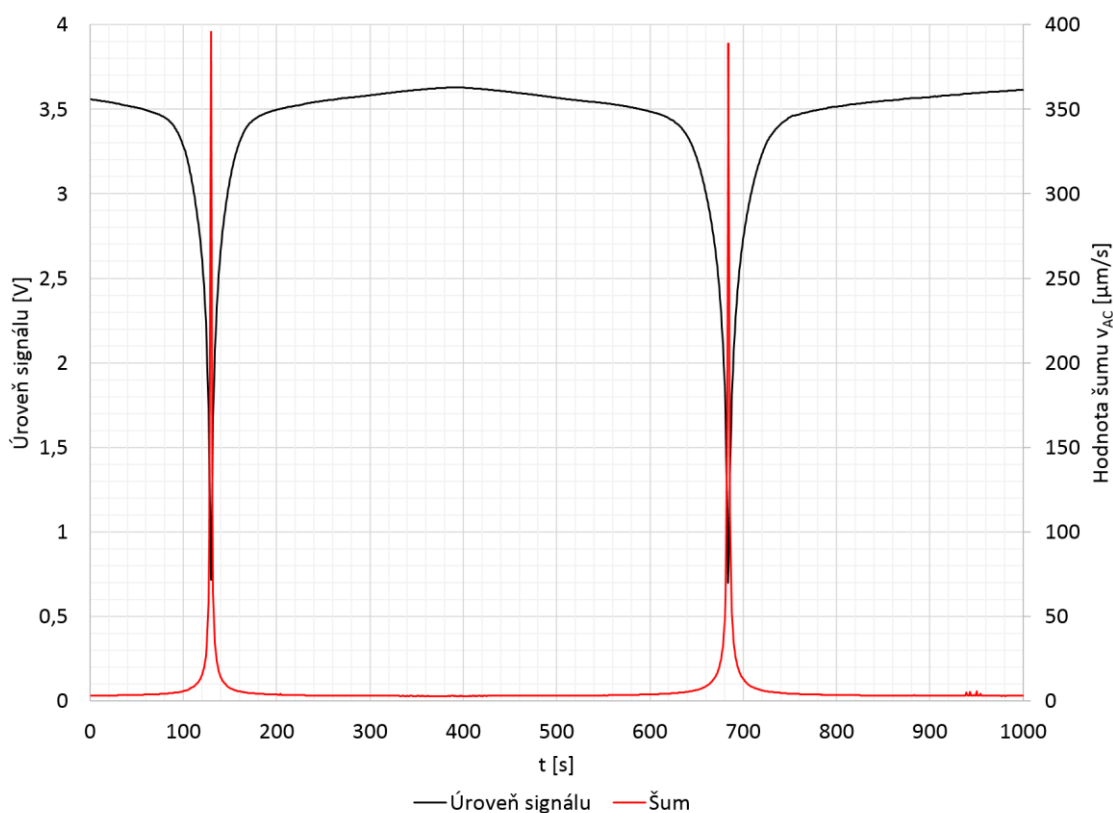
Závislost odstupové vzdálenosti vibrometru a celkového šumu, lze nalézt v tabulce 4.12, kdy tučně jsou vyznačena viditelná maxima udaná výrobcem. Z tabulky vyplývá, že šum vždy koreluje s úrovní signálu. Přičemž maximální úroveň signálu lze získat pouze ve viditelných maximech. Kromě tohoto problému je třeba upozornit na problém, jenž není z tabulky jasně patrný. Je jím časová nestálost úrovně signálu odraženého paprsku při měření mimo viditelná maxima. Při měření s celkovou délkou záznamu pouze jedna minuta však není tento jev pozorovatelný. Z důvodů konzistentního měření nejlepší krátkodobé úrovně šumu na výstupu vibrometru, bylo měření vždy započato při indikované maximální úrovni signálu odraženého paprsku tak, aby projev dynamických změn byl minimalizován.

Pro podrobnější vyhodnocení vlivu zmíněné časové nestálosti bylo provedeno doplňující měření trvající 15 minut, kdy každou sekundu se zaznamenávala úroveň odraženého paprsku a vlastní šum. Měření bylo provedeno pro odstupové vzdálenosti (stand-off distance) 438, 489 a 540 mm, kdy první hodnota odpovídá optimální odstupové vzdálenosti a poslední hodnota nejméně příznivému případu. Mezi úrovní signálu odraženého paprsku a šumem je silná závislost, jenž je dobře patrná z obrázku 4.8, korelační koeficient je roven hodnotě  $-0,72$ . Korelační koeficient však popisuje lineární závislost, přičemž experimentálně zjištěná závislost šumu na úrovni signálu je exponenciální, jak je patrné z grafu na obrázku 4.7 a je tedy tento fakt nutno brát v úvahu. Zvětšená hodnota šumu projevující se v čase okolo 950 sekund (viz obrázek 4.8) je způsobena externě působícími vibracemi na zrcátko, jenž bylo odlišně uchyceno při tomto experimentu. Použité uchycení zrcátka však umožnilo jeho jemné nastavení, tak aby bylo

dosaženo ideálního zpětného odrazu. Způsob jeho uchycení je možné vidět na fotce v příloze B.7.

Tabulka 4.12: Závislost šumu na odstupové vzdálenosti u vibrometru OFV-505/5000

Dekodér	Citlivost [mm/s/V]	Vzdálenost [mm]	Úroveň signálu [V]	v <sub>AC</sub> [μm/s]	v <sub>DC</sub> [μm/s]
VD-06	2 (350 kHz)	336	3,30	6,9	-8,7
		387	3,56	3,0	-8,3
		<b>438</b>	<b>3,62</b>	<b>2,8</b>	<b>-9,5</b>
		489	3,55	3,1	-9,7
		540	3,47	4,0	-9,6
		591	3,56	3,2	-9,5
		<b>642</b>	<b>3,61</b>	<b>2,8</b>	<b>-9,4</b>
		693	3,53	3,4	-9,0
		744	3,37	5,7	-9,2
		795	3,60	3,1	-9,3
		<b>846</b>	<b>3,63</b>	<b>2,9</b>	<b>-9,3</b>



Obrázek 4.8: Časová změna úrovně signálu v nejméně příznivé vzdálenosti

Obrázky pro další odstupové vzdálenosti 438 a 489 mm jsou uvedeny v příloze D. Pokud by byly ukázány kompletní časové průběhy výstupního signálu vibrometru, což by bylo ale vzhledem ke vzorkovací frekvenci a délce záznamu nepraktické, bylo by

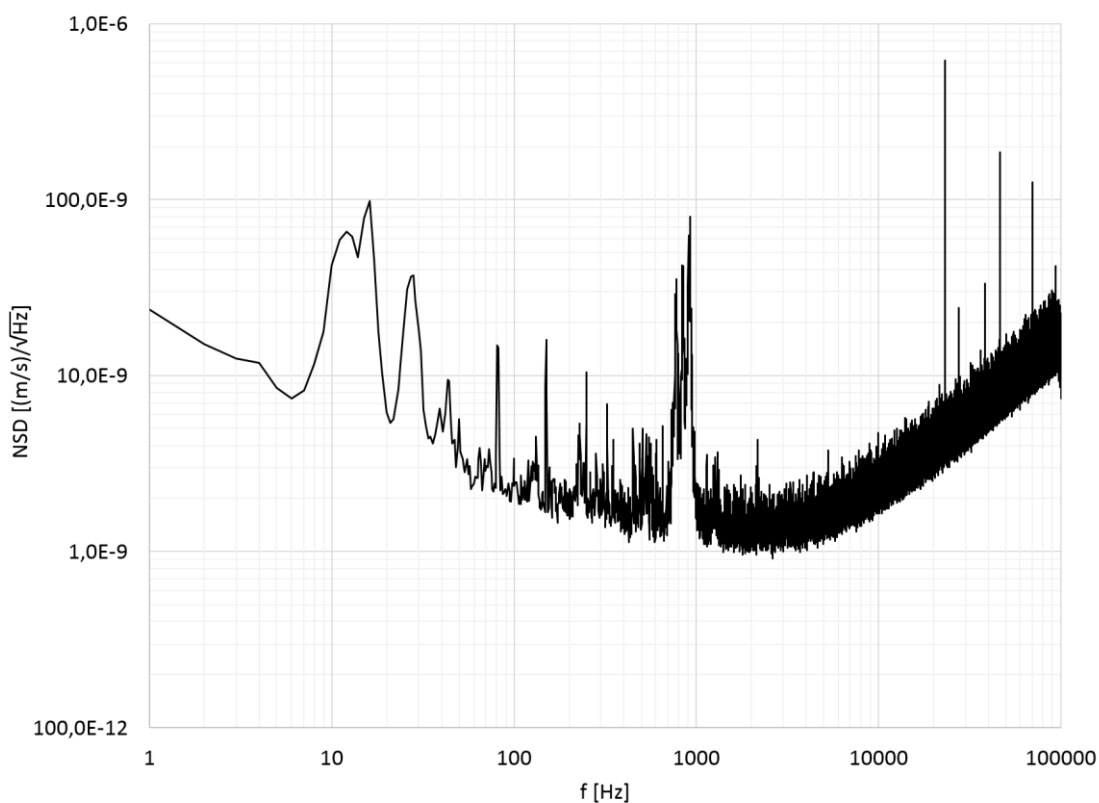
možné si všimnout, že v časovém průběhu se vyskytují občasně špičky. Jejich četnost roste s klesající úrovní odraženého paprsku.

#### 4.4 Vibrometr CLV-2534

Měřený vibrometr zde obsahoval pouze jeden dekodér, prvním měřeným parametrem byl opět vlastní šum. Tabulka 4.13 shrnuje výsledky měření pro všechny dostupné rozsahy vibrometru. Jelikož nejzajímavější je pouze střídavá složka signálu (šum), tentokrát bylo měření provedeno se zapnutou **AC** vazbou. Hodnota vlastního šumu se znovu zvyšuje s citlivostí. Pro srovnání lze použít údaj z měření vibrometru OFV-505 s citlivostí 2 mm/s/V, kdy vlastní šum dosahuje efektivní hodnoty 3,1  $\mu\text{m/s}$ .

Tabulka 4.13: Vlastní šum rychlostního dekodéru vibrometru CLV-2534

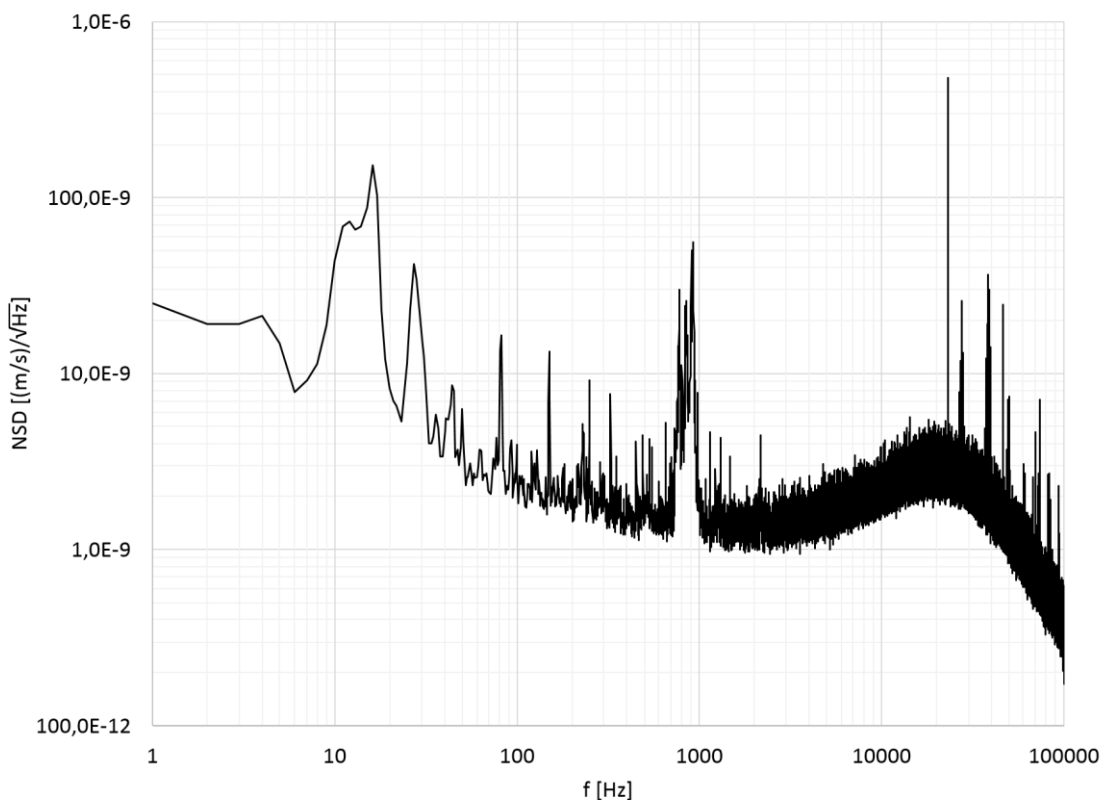
Citlivost [mm/s/V]	$v_{AC}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]		
	Bez filtru	100 kHz	20 kHz
2	2,6	2,2	0,7
5	2,6	2,2	0,8
10	3,2	2,7	1,2
20	5,5	5,0	2,2
50	13,3	11,8	5,3



Obrázek 4.9: Spektrální hustota šumu vibrometru CLV-2534 na rozsahu s citlivostí 2 mm/s/V



Spektrální hustota šumu je zobrazena na obrázcích 4.9 a 4.10. Ze změřených spekter vyplývá, že šum je výrazný zejména v pásmech 10 Hz až 20 Hz a 600 Hz až 1 kHz, jenž lze přisoudit specifickému rušení. Původ tohoto rušení však nebyl identifikován. Z důvodů fyzických rozměrů jednotky dekodéru vibrometru a délky přívodního optického kabelu ke snímací hlavě vibrometru, jej nebylo možné umístit na optický stůl s vibračně odizolovanou základnou. Tento stůl byl použit při předchozích měřeních s vibrometry PDV-100 a OFV-505/5000. Měřicí pracoviště je patrné z fotky B.3 umístěné v příloze B.

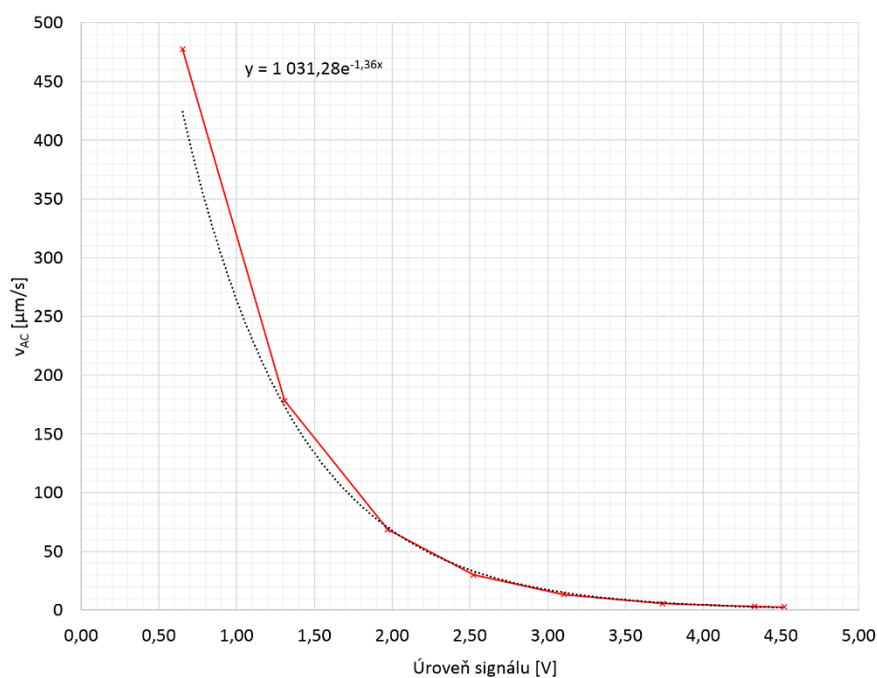


*Obrázek 4.10: Spektrální hustota šumu CLV-2534 na rozsahu s citlivostí 2 mm/s/V (filtr 20 kHz)*

Měření závislosti šumu na úrovni odraženého signálu je zpracováno do tabulky 4.14 a obrázku 4.11. Závislost je znovu exponenciální, rovnice zobrazující aproximaci metodou nejmenších čtverců je však odlišná od vibrometru OFV-505/5000.

Tabulka 4.14: Měření vlivu úrovně odraženého signálu na šum u vibrometru CLV-2534

Citlivost [mm/s/V]	Úroveň signálu [V]	$v_{AC}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]
2	4,52	2,6
	4,33	3,0
	3,74	5,6
	3,10	13,2
	2,52	30,0
	1,97	68,5
	1,31	178,2
	0,65	477,6



Obrázek 4.11: Závislost šumu na úrovni signálu pro vibrometr CLV-2534

Měření úrovně odraženého signálu znovu ukázalo na časovou nestabilitu mimo výrobcem udávaná viditelná maxima. Konkrétně se hodnota úrovně odraženého signálu při vzdálenosti 601 mm (nejhorší možný případ) měnila s časem v rozmezí od 2,4 do 4,2 V. Mezi těmito dvěma extrémy byl časový rozdíl 207 sekund. Aby měření v tabulce bylo co nejvíce konzistentní, bylo vždy započato v čase, při kterém bylo naměřeno maximum úrovně signálu odraženého paprsku. V tomto časovém úseku trvajícím přibližně 10 sekund se úroveň signálu zásadně nemění, než poté začne klesat. Výsledky jsou zpracované v tabulce 4.15, tučně jsou vyznačena viditelná maxima.

Tabulka 4.15: Závislost šumu na odstupové vzdálenosti u vibrometru CLV-2534

Citlivost [mm/s/V]	Vzdálenost [mm]	Úroveň signálu [V]	$v_{AC}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]
2	<b>499</b>	<b>4,52</b>	<b>2,6</b>
	550	4,40	2,9
	601	4,14	3,6
	652	4,51	2,8
	<b>703</b>	<b>4,49</b>	<b>2,8</b>

#### 4.4.1 Dynamické měření výchylky

K měření byl využit vibrační budič APS 113-AB se zesilovačem APS 125. Elektrický budící signál byl vytvořen funkčním generátorem.

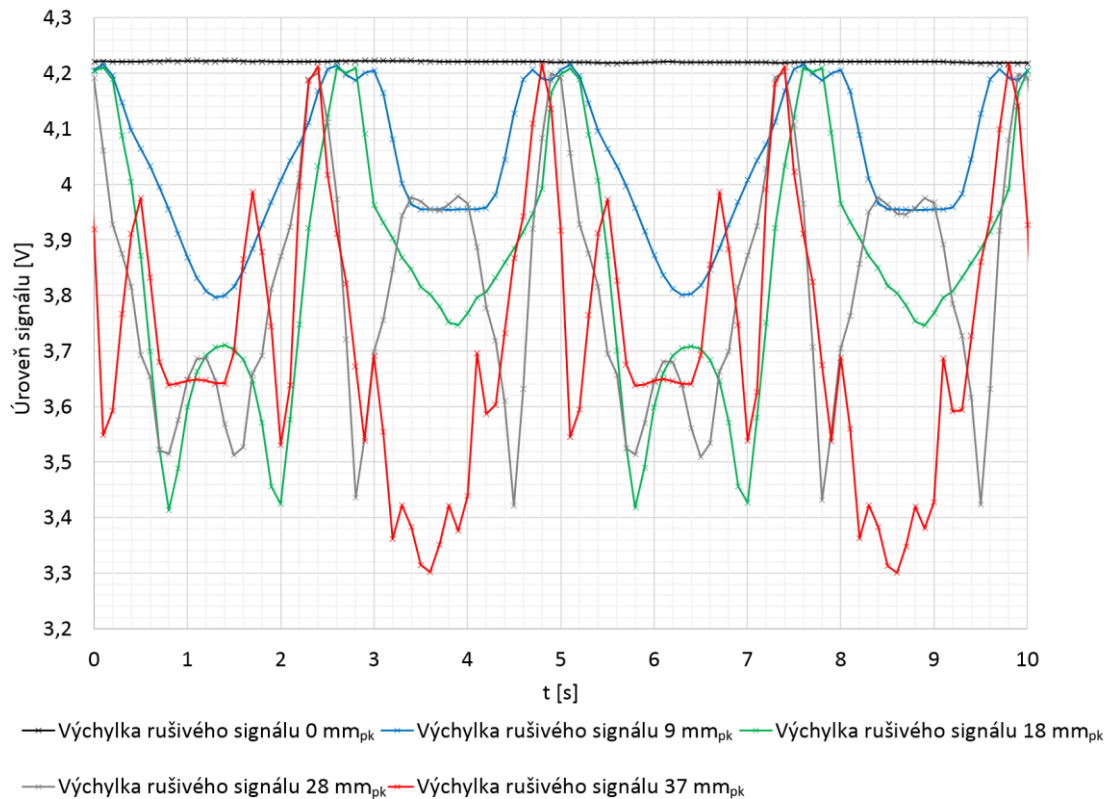
Měření bylo provedeno vždy 2krát, nejdříve s 10 sekundovým intervalem pro získání spektrálního rozlišení 0,1 Hz. Toto měření dobře zachycuje nosnou složku 0,2 Hz. V druhém případě byl zvolen 100 ms interval, jenž dobře zachytí změnu úrovně signálu a šumu v čase. Přičemž ještě dovoluje výsledky použít i pro měření výchylky. V obou případech bylo měřeno 1 minutu, tedy tomu odpovídající počet průměrů. Dosažená úroveň odraženého signálu v klidu se rovnala hodnotě 4,2 V. Vyšší hodnoty se nepodařilo dosáhnout, s ohledem na co nejmenší pokles při maximální rušivé výchylce. Citlivost vibrometru byla nastavena na hodnotu 5 mm/s/V, pouze pro největší měřenou výchylku 37 mm<sub>pk</sub> musela být navýšena na 10 mm/s/V. Změřená data pro první modulovaný kmitočet 70 Hz lze nalézt v tabulce 4.16. Odstup signál-šum byl vypočten, dle popisu v kapitole 3.3.3. Hodnota SNR podle předpokladu klesá, avšak šum v okolí užitečného signálu je minimální. Tomuto faktu odpovídá měřená výchylka, jenž se mění pouze minimálně. Změna úrovně odraženého paprsku při měření roste dle očekávání s výchylkou rušivé složky.

Tabulka 4.16: SNR pro měřený signál 70 Hz

Rušivý signál 0,2 Hz	Měřený signál 70 Hz				$\Delta$ Úroveň signálu [V]
	Spektrální rozlišení 0,1 Hz		Spektrální rozlišení 10 Hz		
	SNR [dB]	d [ $\mu\text{m}_{pk}$ ]	SNR [dB]	d [ $\mu\text{m}_{pk}$ ]	
0,02	5,1	0,35	16,7	0,35	0,01
8,87	1,7	0,37	9,4	0,37	0,42
18,25	1,1	0,38	4,0	0,38	0,80
27,59	0,6	0,38	1,1	0,39	0,78
36,61	1,4	0,38	-1,0	0,38	0,92

Obrázek 4.12, zobrazuje průběh úrovně odraženého paprsku v čase, hodnoty odpovídají měření užitečného signálu 70 Hz. Z měření vyplývá, že úroveň interferujícího paprsku se mění razantněji než při statickém měření, kdy pro okamžitou výchylku 51 mm nastal pokles pouze 0,12 V, viz tabulka 4.15. Tento jev si lze vysvětlit jednak pevným zaostřením, ale také vyosením v kombinaci s pohybem. Výsledkem je, že rušivý sinusový

signál není na průběhu úrovně odraženého signálu dobře pozorovatelný. Navíc úroveň odraženého signálu má tendenci se od určité hranice před dosažením mechanického maxima odrazit od své minimální hodnoty a nečekaně vzrůst (perioda rušení je 5 s).



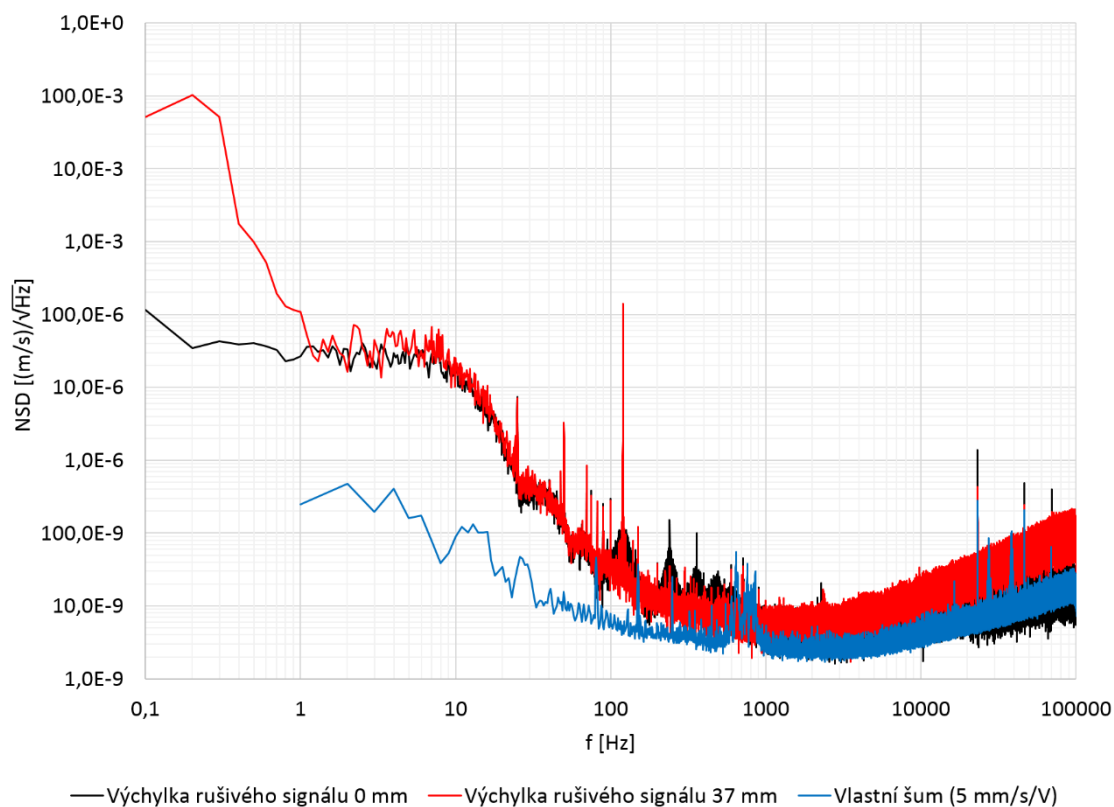
Obrázek 4.12: Časová změna úrovně signálu pro měřené výchylky

Průběhy úrovně odraženého signálu pro modulaci 120 a 190 Hz zobrazují stejnou situaci, a tedy nejsou uvedeny. Tabulky 4.17 a 4.18 shrnují měření pro tyto dvě frekvence. Z měření je znovu patrné, že zatímco odstup signál-šum se zhoršuje, rušivý signál má minimální vliv na měřenou výchylku.

Tabulka 4.17: SNR pro měřený signál 120 Hz

Rušivý signál 0,2 Hz	Měřený signál 120 Hz				$\Delta$ Úrovně signálu [V]
	Spektrální rozlišení 0,1 Hz		Spektrální rozlišení 10 Hz		
	SNR [dB]	d [nm <sub>pk</sub> ]	SNR [dB]	d [nm <sub>pk</sub> ]	
0,01	-4,0	77	8,3	77	0,01
8,90	-6,2	80	0,9	80	0,41
18,25	-7,2	82	-4,9	82	0,81
27,66	-7,3	83	-7,6	83	0,77
36,74	-7,0	83	-9,5	83	0,94

Na obrázku 4.13 bylo provedeno srovnání spekter nulové a maximální výchylky s vlastním šumem měřeným pro citlivost 5 mm/s/V. Ze srovnání je patrné, že i když hodnoty v okolí 0,2 Hz jsou o více než dva řády vyšší, měřená výchylka se liší minimálně. Dle očekávání šum převažuje do 1 Hz, což je velmi blízko rušivému signálu. Měření v oblasti nízkých frekvencí do 100 Hz vykazuje o řád až dva vyšší šumovou hodnotu než při fixním vzdálenosti. Zde je patrné, že měřená vibrační aparatura v tomto měřeném uspořádání nestabilizuje odraznou plochu stejně kvalitně, jako pevné spojení.



Obrázek 4.13: Srovnání spektrálních hustot šumu při měření signálu 120 Hz

Tabulka 4.18: SNR pro měřený signál 190 Hz

Rušivý signál 0,2 Hz	Měřený signál 190 Hz				
	Spektrální rozlišení 0,1 Hz		Spektrální rozlišení 10 Hz		ΔÚrovně signálu [V]
	SNR [dB]	d [nm <sub>pk</sub> ]	SNR [dB]	d [nm <sub>pk</sub> ]	
0,02	-10,3	22	1,1	22	0,00
8,89	-13,8	22	-6,3	22	0,41
18,31	-14,3	23	-12,3	23	0,81
27,66	-14,6	23	-14,4	23	0,74
36,76	-13,8	23	-16,5	24	0,94

K ověření vlivu odrazné plochy na měření, byl místo zrcadla použit také koutový odražeč 2, jenž vystupuje i v měření koherenční zrnitosti, jako vzorek č. 5. Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce 4.19. Měřená výchylka se neliší, avšak poměr signál-šum klesá rychleji než v případě užití zrcadla. To lze přičíst snížené úrovni odraženého paprsku.

Tabulka 4.19: SNR pro měřený signál 120 Hz s použitím koutového odražeče 2

Rušivý signál 0,2 Hz d [mm <sub>pk</sub> ]	Měřený signál 120 Hz				ΔÚrovně signálu [V]
	Spektrální rozlišení 0,1 Hz		Spektrální rozlišení 10 Hz		
	SNR [dB]	d [nm <sub>pk</sub> ]	SNR [dB]	d [nm <sub>pk</sub> ]	
0,01	-3,4	77	7,3	77	0,09
8,90	-6,5	80	0,0	80	1,34
18,25	-11,7	83	-12,0	82	3,09
27,66	-9,6	83	-9,8	83	2,08
36,74	-14,9	83	-13,1	87	2,21

#### 4.4.2 Koherenční zrnitost

Měření bylo provedeno na jiné vibrační aparatuře APS 129, umístěné tentokrát horizontálně, viz příloha B.5 a obrázek 3.13. Pro měření bylo využito sedmi různých povrchů, které jsou zachyceny na obrázku 4.14. Jedná se o lesklou fólii, dural, 3M Scotchlite, zrcadlo, dva koutové odražeče a textilní pásku (popsáno zleva doprava).



Obrázek 4.14: Měřené vzorky a místa měření z hlediska koherenční zrnitosti

Popis postupu měření lze nalézt v kapitole 3.3.4. Dosažená úroveň odraženého paprsku od zrcadla se pochybovala od 4,45 do 4,47 V, dle nastavené výchylky. Vzhledem k tomu, že měřený šum je silně závislý na úrovni signálu, jak ukázaly kapitoly 4.2, 4.3 a 4.4, byly v tabulkách 4.20 a 4.21 shrnuty hodnoty tohoto parametru pro každý vzorek. Dle očekávání největší korelaci s šumem vykazují vzorky s nízkou střední hodnotou úrovně signálu. Tento jev byl již měřen u vibrometru OFV-505/5000. Měřená rychlost znovu vychází z měřeného napětí  $U_{AC\ RMS}$  a je přepočtena přes citlivost vibrometru. Tučně jsou zvýrazněny případy, kdy došlo ke snížení šumu, oproti předchozí výchylce a to, aniž by se na tom mohla podílet úroveň odraženého paprsku.

Tabulka 4.20: Statistické parametry měřených vzorků z hlediska koherenční zrnitosti

Vzorek [-]	Úroveň signálu [V]		
	Střední hodnota [V]	Směrodatná odchylka [V]	Korelace na šum [-]
0 – Lesklá fólie	3,61	0,18	-0,02
1 – Dural	1,38	0,24	-0,45
2 – 3M Scotchlite	3,17	0,52	-0,26
3 – Zrcadlo	4,46	0,02	0,05
4 – Koutový odražeč 1	2,76	0,12	0,10
5 – Koutový odražeč 2	2,30	0,58	-0,11
6 – Textilní páska	0,78	0,13	-0,60

Tabulka 4.21: Hodnoty úrovně odraženého paprsku při měření koherenční zrnitosti

Vzorek [-]	Úroveň signálu [V]										
	Bez buzení	f = 5 Hz				f = 30 Hz				f = 90 Hz	
	d [ $\mu\text{m}_{\text{pk}}$ ]										
	0	1	5	50	250	1	5	50	250	1	5
0	3,17	3,65	3,51	3,52	3,49	3,84	3,77	3,78	3,55	3,76	3,73
1	1,01	1,13	1,39	1,34	1,38	1,28	1,39	1,44	1,18	1,80	1,82
2	3,68	3,44	3,58	3,26	3,52	3,31	2,92	3,30	3,49	1,84	2,53
3	4,41	4,46	4,46	4,47	4,45	4,47	4,47	4,47	4,46	4,46	4,47
4	2,91	2,46	2,73	2,74	2,81	2,75	2,81	2,65	2,82	2,77	2,89
5	3,74	2,36	1,48	1,97	2,81	2,22	2,14	1,87	2,71	1,82	2,14
6	1,08	0,89	0,88	0,64	0,65	0,70	0,73	0,63	0,74	0,83	0,83

V tabulkách jsou měření shrnuta a vždy popisují celkový šum bez stejnosměrné složky. Pro frekvenci 90 Hz byly měřeny pouze dvě výchylky. Všechny hodnoty znovu odpovídají průměrování ze 60 vzorků, po 1 sekundě, přičemž vzorkovací frekvence byla 204,8 kS/s. Prvním měřeným materiálem, byla lesklá fólie, hodnoty celkového šumu lze vidět z tabulky 4.22. Z ní je patrné, že materiál překvapivě dosahuje nižší šumové hodnoty při vibracích než v klidovém stavu. Zde je vysvětlení v úrovni odraženého signálu, ta byla v klidovém stavu o 0,48 V nižší. Zajímavé jsou dále hodnoty pro 90 Hz, kdy šum dokonce klesl při zvětšení výchylky, zde se úroveň signálu výrazně nezměnila.

Tabulka 4.22: Koherenční zrnitost pro lesklou fólii (vzorek č. 0)

v [ $\mu\text{m/s}$ ]				
f [Hz]	d [ $\mu\text{m}_{\text{pk}}$ ]			
	1	5	50	250
Bez buzení	19,13			
5	8,7	9,3	11,0	14,6
30	16,6	30,5	205,2	715,9
90	17,0	<b>12,6</b>		

Následujícím měřeným povrchem byl dural, celkový šum lze nalézt v tabulce 4.23. Tento povrch společně s posledním vzorkem č. 6 patří mezi nejméně reflexní, čemuž odpovídá i průměrná hodnota úrovně signálu, viz tabulka 4.20. Hodnota šumu kolísá, což je právě důsledek nestálé úrovně signálu, mezi měřením bez buzení a při výchylce 5  $\mu\text{m}$  na 90 Hz, je nárůst v úrovni signálu 80 %. Nejzajímavější, je hodnota pro výchylku 5  $\mu\text{m}$  na 90 Hz. Zde byl zaznamenán pokles šumu oproti výchylce 1  $\mu\text{m}$  na 90 Hz (úroveň signálu je mezi těmito dvěma měřeními srovnatelná).

*Tabulka 4.23: Koherenční zrnitost pro dural (vzorek č. 1)*

v [ $\mu\text{m/s}$ ]				
f [Hz]	d [ $\mu\text{m}_{\text{pk}}$ ]			
	1	5	50	250
Bez buzení	233,9			
5	319,6	180,7	183,8	228,4
30	157,0	139,6	296,7	1 084,0
90	76,1	<b>73,6</b>		

Dalším měřeným vzorkem byla reflexní fólie 3M Scotchlite, jenž v klidu dosahovala druhé nejnižší hodnoty šumu, viz tabulka 4.24. S rostoucí výchylkou se však dostavuje očekávané zhoršení. Znovu až na jednu výjimku, při výchylce 5  $\mu\text{m}$  na 90 Hz. Zde však vzrostla úroveň odraženého paprsku o 38 %, oproti výchylce 1  $\mu\text{m}$  na 90 Hz.

*Tabulka 4.24: Koherenční zrnitost pro 3M Scotchlite (vzorek č. 2)*

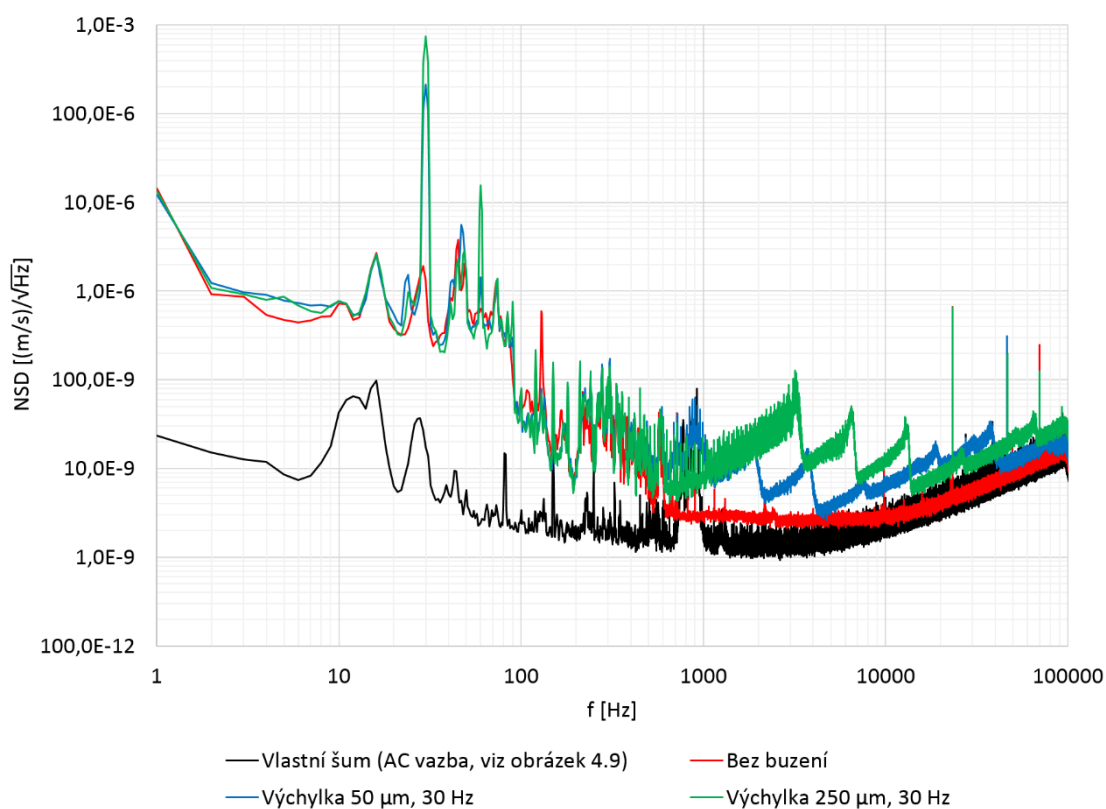
v [ $\mu\text{m/s}$ ]				
f [Hz]	d [ $\mu\text{m}_{\text{pk}}$ ]			
	1	5	50	250
Bez buzení	12,0			
5	14,1	16,2	20,6	46,5
30	18,4	39,7	220,6	750,3
90	398,8	141,1		



Měření zrcadla je zpracováno do tabulky 4.25. U tohoto vzorku byl naměřen nejnižší klidový šum, i když se stále jedná o hodnotu třikrát vyšší než změřenou v kapitole 4.4. Ze spektrální hustoty šumu na obrázku 4.15 lze srovnat množství generovaného šumu s hodnotou vlastního šumu (2,6  $\mu\text{m}$  – černá). Dále lze pozorovat případy pro šum 214,2 a 739,7  $\mu\text{m/s}$  z tabulky níže. Z měření vyplývá, že šum je téměř identický pro stav v klidu, výchylku 5  $\mu\text{m}$  na 5 Hz a 1  $\mu\text{m}$  na 90 Hz. Tyto případy se výrazně neliší ani ve spektrální hustotě šumu.

Tabulka 4.25: Koherenční zrnitost pro zrcadlo (vzorek č. 3)

v [ $\mu\text{m/s}$ ]				
f [Hz]	d [ $\mu\text{m}_{\text{pk}}$ ]			
	1	5	50	250
Vlastní šum (viz tabulka 4.13)	2,6			
Bez buzení	7,5			
5	15,4	<b>7,8</b>	17,1	18,1
30	10,7	30,9	214,2	739,7
90	7,1	18,0		



Obrázek 4.15: Spektrální hustota šumu zrcadla při měření v klidu a v pohybu (vzorek č. 3)

V měření figurovaly dva koutové odražeče, jako vzorky č. 4 a 5. Tyto materiály se výrazně liší v odrazivosti. Při měření v klidu je hodnota úrovně signálu u vzorku č. 4 jen 2,9 V, zatímco vzorek č. 5 dosahuje hodnoty vyšší o 0,83 V. Těmto hodnotám odpovídá i šum v tabulkách 4.26 a 4.27. Přes vyšší klidovou úroveň odraženého paprsku je však vzorek č. 5 náchylnější na její pokles. Například při výchylce 5  $\mu\text{m}$  na 5 Hz klesne u vzorku č. 5 úroveň signálu na 1,48 V a razantně tím vzroste šum. Tomuto propadu odpovídá i vysoká směrodatná odchylka úrovně signálu v tabulce 4.20. Z těchto dvou vzorků tedy jako lepší z hlediska koherenční zrnitosti vychází koutový odražeč 1 (vzorek č. 4).

Tabulka 4.26: Koherenční zrnitost pro koutový odražeč 1 (vzorek č. 4)

v [ $\mu\text{m/s}$ ]				
f [Hz]	d [ $\mu\text{m}_{\text{pk}}$ ]			
	1	5	50	250
Bez buzení	22,8			
5	31,5	25,6	26,5	56,7
30	23,7	34,3	220,0	752,2
90	20,2	20,2		

Tabulka 4.27: Koherenční zrnitost pro koutový odražeč 2 (vzorek č. 5)

v [ $\mu\text{m/s}$ ]				
f [Hz]	d [ $\mu\text{m}_{\text{pk}}$ ]			
	1	5	50	250
Bez buzení	17,8			
5	40,6	422,2	69,6	46,2
30	41,8	57,1	247,2	769,9
90	75,8	54,6		

Poslední vzorek byl vybrán z důvodů vysoké hrubosti. Není však nijak uzpůsoben pro reflexi, čemuž odpovídá i nejnižší střední hodnota úrovně signálu 0,78 V, jenž se pohybuje na hranici umožňující měření. Z tohoto důvodu je šum značně vysoký již pro měření v klidu, což ukazuje i tabulka 4.28. Při měření výchylky 5  $\mu\text{m}$  na 90 Hz se znovu vyskytuje téměř shodná hodnota šumu, jako při měření výchylky 1  $\mu\text{m}$  na 90 Hz. Hodnoty úrovně signálu jsou v tomto případě také shodné.

Tabulka 4.28: Koherenční zrnitost pro textilní pásku (vzorek č. 6)

v [ $\mu\text{m/s}$ ]				
f [Hz]	d [ $\mu\text{m}_{\text{pk}}$ ]			
	1	5	50	250
Bez buzení	210,6			
5	280,5	285,8	536,9	888,4
30	399,3	361,4	545,1	1 055,7
90	303,2	303,3		

Z výše zpracovaných měření je dobře vidět zvýšený celkový šum při vibracích kolmých na směr měření. Avšak tyto tabulky dobře nepostihují rozložení šumu ve frekvenční oblasti. Z grafu na obrázku 4.15 je dobře pozorovatelný jev, kdy velká část šumu na zrcadle je generována na budící frekvenci 30 Hz.

Proto byl realizován výpočet efektivní hodnoty při odfiltrování různých částí spektra, jednak tedy zmíněné frekvence buzení tedy 5, 30, nebo 90 Hz. Dále pak bylo filtrováno pásmo nízkých kmitočtů do 100 Hz a 1 kHz. Výsledky pro případ výchylky 250  $\mu\text{m}$  na 30 Hz shrnuje tabulka 4.29. První řádek odpovídá hodnotám z tabulek 4.22–4.28, jež zobrazují celkový šum získaný výpočtem z časové oblasti. Následující řádky se liší dle pásma kmitočtů, jenž bylo užito k výpočtu efektivní hodnoty ze spektra.

Z porovnání vyplývá, že zrcadlo (vzorek č. 3) generuje nejméně koherenčního šumu. U vzorků č. 4 a 5, tedy koutových odražečů je celkový šum v tomto případě srovnatelný se zrcadlem, avšak na rozdíl od zrcadla není soustředěn do oblasti 30 Hz. Čemuž i odpovídají mnohonásobně vyšší hodnoty šumu pro poslední dva řádky v tabulce 4.29. Vzhledem k rozsahu dat jsou všechny takto vypočtené hodnoty umístěny v příloze E.

Tabulka 4.29: Hodnoty koherenčního šumu při odfiltrování daných pásem a výchylce 250  $\mu\text{m}$  při buzení frekvencí 30 Hz

Vybrané pásmo	Vzorek [-]						
	0	1	2	3	4	5	6
Z časové oblasti [ $\mu\text{m/s}$ ]	715,9	1 084,0	750,3	739,7	752,2	769,9	1 055,7
$v_{\text{FFT}}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	731	1 110	766	755	755	786	1 079
$v_{\text{FFT-30 Hz}}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	46	849	102	18	210	216	798
$v_{100 \text{ Hz}}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	32	849	99	6	208	213	797
$v_{1 \text{ kHz}}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	30	843	64	6	188	184	793

Poznámka: Šumové hodnoty odpovídají efektivním hodnotám získaných z frekvenčního spektra viz rovnice (28)

$v_{\text{FFT}}$  – Celkový šum po odstranění stejnosměrné složky

$v_{\text{FFT-30 Hz}}$  – Šum po odfiltrování složky budící frekvence 30 Hz

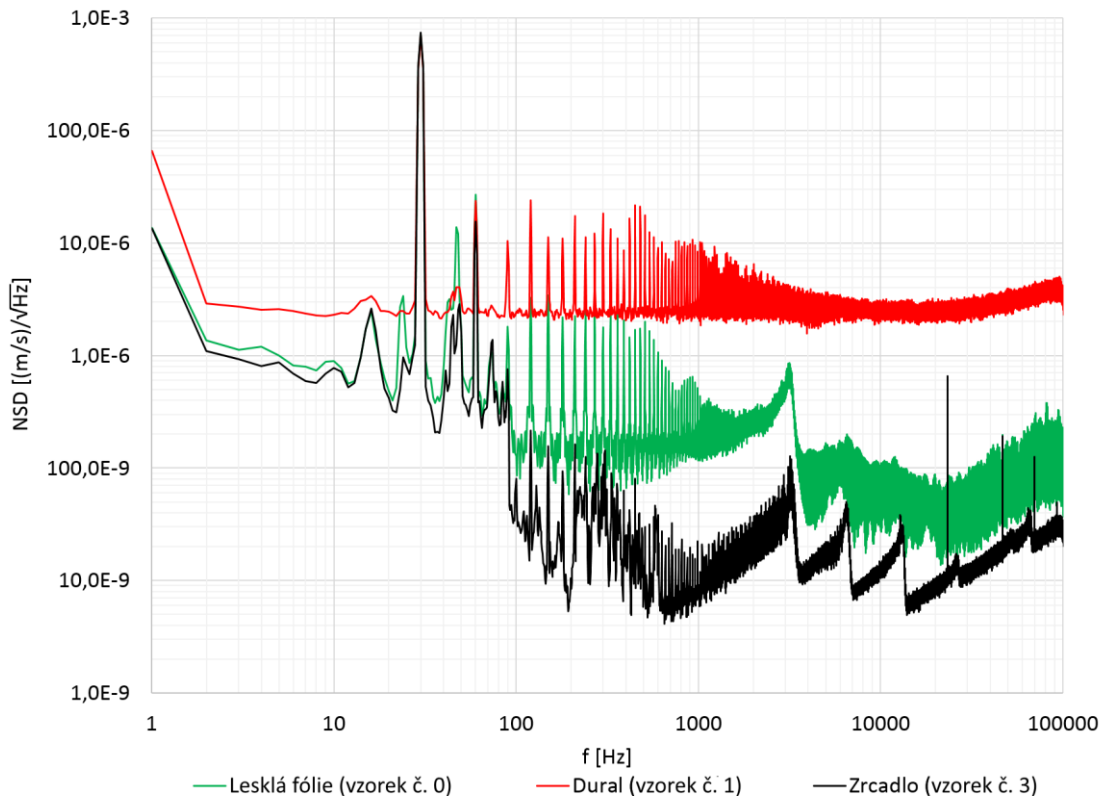
$v_{100 \text{ Hz}}$  – Šum po odfiltrování složek do 100 Hz

$v_{1 \text{ kHz}}$  – Šum po odfiltrování složek do 1 kHz

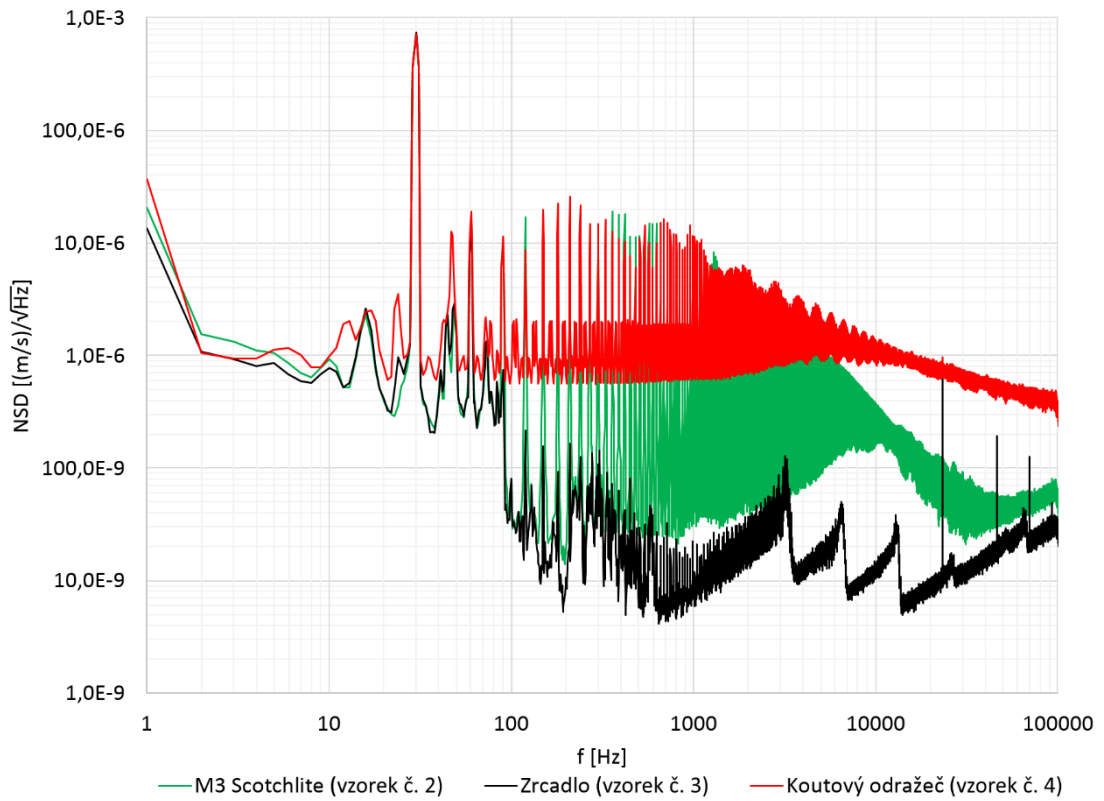
Popis vzorků: 0 – lesklá fólie, 1 – dural, 2 – 3M Scotchlite, 3 – zrcadlo, 4 – koutový odražeč 1, 5 – koutový odražeč 2, 6 – textilní páska

Jako nejlepší vzorek z hlediska koherenčního šumu bylo určeno zrcadlo. Na grafech v obrázcích 4.16, 4.17 a 4.18 lze vidět srovnání tohoto vzorku s ostatními z hlediska spektrální hustoty šumu generované koherenční zrnitostí. A to v případě, že budící frekvence vibrací kolmých na směr měření je 30 Hz.

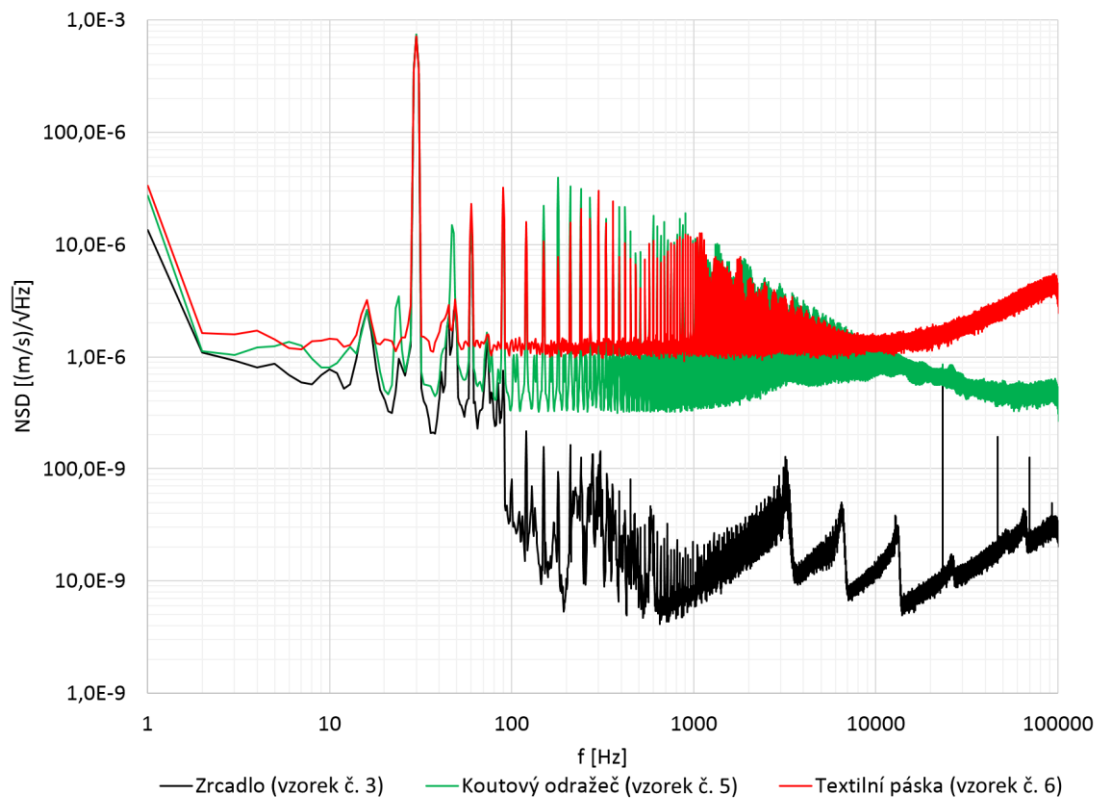
Ze srovnání si lze všimnout, že právě na frekvenci 30 Hz je u všech vzorků měřena téměř stejná hodnota výchylky 5  $\mu\text{m}$ . Nelze s jistotou prohlásit, zda se jedná o skutečné pseudo-vibrace nebo při měření byla narušena kolmost. Avšak při stejné výchylce rušivých vibrací byla na frekvenci 5 Hz měřena výchylka pouze 0,5  $\mu\text{m}$ . Vzhledem k tomuto faktu, že na frekvenci 5 Hz a 30 Hz nebyla měřena shodná velikost těchto vibrací, a to i přesto že rušivé vibrace kolmé na směr měření byly v tomto případě shodné. Byl tento jev přisouzen pseudo-vibracím, a nikoliv nedokonalé kolmosti. Měření na frekvenci 5 Hz také probíhalo časově později, tedy případný externí zásah do měření, jenž však nebyl během měření pozorován by musel mít pozitivní vliv na kolmost, což nebylo vyhodnoceno jako pravděpodobné.



Obrázek 4.16: Srovnání koherenčního šumu při buzení 30 Hz a výchylce 250  $\mu\text{m}$  – 1/3



Obrázek 4.17: Srovnání koherenčního šumu při buzení 30 Hz a výchylce 250  $\mu m$  – 2/3



Obrázek 4.18: Srovnání koherenčního šumu při buzení 30 Hz a výchylce 250  $\mu m$  – 3/3

Jelikož koherenční zrnitost závisí na hrubosti povrchu, teoretické rozostření paprsku by mělo zprůměrovat tento statistický jev za cenu zhoršení koherence zpětně odraženého paprsku a větších ztrát při odrazu. Bylo tedy provedeno měření s rozostřením o půl a jednu otáčku ostřicí optiky měřicí hlavy vibrometru. Naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulce 4.30. Toto měření bylo realizováno na rozdíl od předcházejících měření při buzení na frekvenci 5 Hz. Výsledky ukazují, že některé vzorky nezvládly rozostření a nebylo možné je dále měřit. Takové případy jsou označeny v tabulkách jako „X“. Lze si povšimnout zajímavé situace u vzorku č. 2 (3M Scotchlite), kdy při rozostření o jednu otáčku je šum v klidu 3,29krát vyšší než při výchylce 250  $\mu\text{m}$  na 5 Hz. To je znovu způsobeno nedostatečným odrazem od povrchu v klidovém stavu. Úroveň signálu je v klidu rovna hodnotě 0,80 V, oproti 2,22 V při buzení.

Tabulka 4.30: Koherenční zrnitost při rozostření laseru pro frekvenci 5 Hz

		v [ $\mu\text{m/s}$ ]						
d [ $\mu\text{m}_{\text{pk}}$ ]	f [Hz]	Vzorek [-]						
		0	1	2	3	4	5	6
0	Bez buzení	19,1	233,9	12,0	7,5	22,8	17,8	210,6
	Bez buzení (1 otáčka)	123,2	X	323,1	21,3	53,7	56,4	X
250	5	14,6	228,4	46,5	18,1	56,7	46,2	888,4
	5 (1/2 otáčky)	204,0	1289,2	45,8	18,6	95,2	67,1	X
	5 (1 otáčka)	267,9	X	98,3	24,8	99,4	102,4	X

Nejzajímavější situace je u zrcadla, tedy vzorku č. 3. Zde se šum v klidu zvýší na úroveň obvyklou při ideálním zaostření a výchylce 250  $\mu\text{m}$  na 5 Hz. V případě vibrací kolmých na směr měření již na zrcadle nedochází k výraznému zhoršení šumové hladiny. Po rozostření o půl otáčky je šum jen o 2,8 % vyšší, pro celou otáčku pak o 16 %, toto jsou hodnoty vztažené k ideálního případu zaostření a hodnotě výchylky 250  $\mu\text{m}$ . Pokud bychom srovnali navýšení šumu v důsledku vibrací kolmých na směr měření v případě ideálního zaostření, jenž zobrazuje tabulka 4.25, zjistili bychom, že hodnota šumu v tomto porovnání vzrostla o 141 %.

Je třeba nezapomínat na to, že úroveň odraženého signálu se zhoršuje s rozostřením a tím vzniká přídavný šum, viz tabulka 4.14. Díky tomu, že při rozostření klesne indikovaná úroveň odraženého signálu z 4,45 V na 2,84 V, bude generován přídavný šum. Dosazením do vypočtené exponenciální rovnice z obrázku 4.11, lze odhadnout jeho hodnotu na 21,7  $\mu\text{m/s}$ . To je i hodnota velmi blízká zde měřenému klidovému šumu 21,3  $\mu\text{m/s}$ . Na obrázku 4.19 je srovnání šumu v klidu při zaostření a rozostření, kdy modrá závislost odpovídá hodnotě odraženého signálu 2,52 V a představuje tak nejbližší měřenou spektrální charakteristiku pro tuto úroveň signálu. Z porovnání je patrné, že velká část šumu se projevuje na vyšších frekvencích, což je důsledek snížené úrovně odraženého signálu. Situace se nemění při srovnání efektivních hodnot vypočtených z frekvenční oblasti. Například při odfiltrování frekvence 5 Hz je dobře vidět z tabulky 4.31, že šum roste především v oblasti nad 100 Hz.

Tabulka 4.31: Srovnání šumu zrcadla ve frekvenčních pásmech při rozostření

		v [ $\mu\text{m/s}$ ]			
d [ $\mu\text{m}$ ]	f [Hz]	Zrcadlo (vzorek 3)			
		$v_{\text{FFT}}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	$v_{\text{FFT}-5\text{ Hz}}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	$v_{100\text{ Hz}}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]	$v_{1\text{ kHz}}$ [ $\mu\text{m/s}$ ]
0	Bez buzení	8	(-)	3	3
	Bez buzení (1 otáčka)	22	(-)	18	18
250	5	18	16	3	3
	5 (1/2 otáčky)	19	17	9	9
	5 (1 otáčka)	25	24	19	19

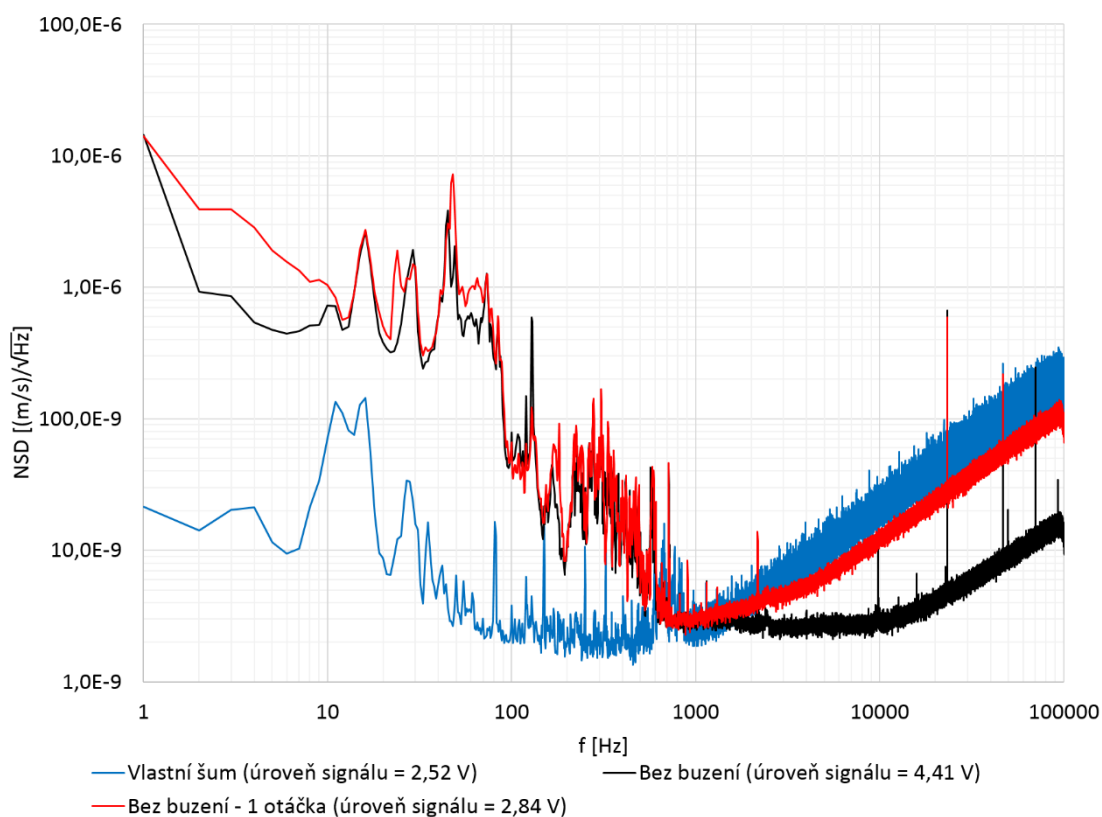
Poznámka: Šumové hodnoty odpovídají efektivním hodnotám získaných z frekvenčního spektra viz rovnice (28)

$v_{\text{FFT}}$  – Celkový šum po odstranění stejnosměrné složky

$v_{\text{FFT}-5\text{ Hz}}$  – Šum po odfiltrování složky buzení frekvence 5 Hz

$v_{100\text{ Hz}}$  – Šum po odfiltrování složek do 100 Hz

$v_{1\text{ kHz}}$  – Šum po odfiltrování složek do 1 kHz



Obrázek 4.19: Spektrální hustota šumu zrcadla pro zaostřený a rozostřený paprsek bez buzení

## 5 ANALÝZA DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Vlastní šum digitalizační karty NI 4462, by dle specifikací měl dosahovat hodnoty  $2,8 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$  na rozsahu  $0,316 \text{ V}$  ( $30 \text{ dB}$  zesílení kanálu, terminátor  $50 \Omega$ ). Naměřené hodnoty jsou po odfiltrování stejnosměrné složky v rozmezí  $2,55$  až  $2,81 \mu\text{V}_{\text{AC RMS}}$ , tyto hodnoty jsou shrnuty v tabulce 4.3. Pro větší nastavené vstupní rozsahy napětí šum dle očekávání roste. Na rozsahu  $10 \text{ V}$  se již pohybuje mezi  $20$  a  $22 \mu\text{V}_{\text{AC RMS}}$ . To jsou však stále nízké hodnoty v porovnání s měřeným napětím z vibrometrů, kdy například pro vibrometr PDV-100 na nejnižším rozsahu je měřené šumové napětí  $0,90 \text{ mV}_{\text{AC RMS}}$ . Celkově lze zhodnotit měření jako úspěšné, neboť hodnoty odpovídají specifikacím. Překročení hodnoty o  $0,01 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$  lze přisoudit elektromagnetickému rušení okolí.

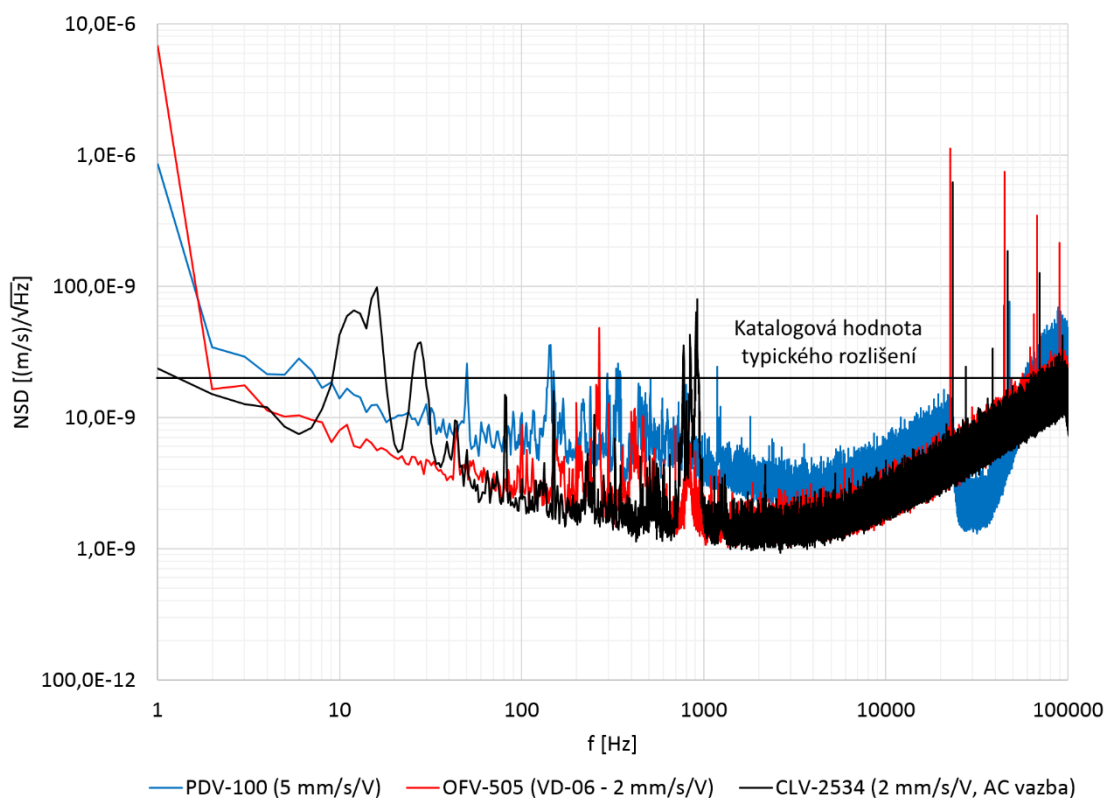
Prvním měřeným vibrometrem byl Polytec PDV-100. Jedná se o přenosný vibrometr s nejlepším typickým rozlišením  $0,02 \mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ , což je i hranice na které se pohybuje měřený šum, viz spektrální hustota šumu na obrázku 5.1 (všechny grafy zobrazující rychlost či výchylku v této práci odpovídají výpočtu z **efektivních** hodnot). Změřený vlastní šum je přehledně uveden v tabulce 4.5. Dále byla změřena silná závislost šumu na zaostření. U tohoto vibrometru však nebyla úroveň signálu měřena, ale pouze odečítána z bargrafu. To způsobuje velký rozdíl mezi tím, kdy tato stupnice ukazuje maximum a kdy je dosaženo optimálního odrazu. Tato situace je patrná v tabulce 4.6, kdy se šum liší 4,2krát, právě pro rozdíl mezi indikovaným maximem a nejlepším dosažitelným výsledkem. Při měření viditelných maxim nebyly překvapivě zaznamenány výrazně zhoršené šumové parametry. V měření se neprokázaly zhoršené šumové parametry související s odstupovou (měřicí) vzdáleností nebo časem. Tato skutečnost by si zasloužila větší pozornost a analýzu, proč právě zde nebyly tyto jevy pozorovány, či změřeny. Jedno z možných vysvětlení je, že tento parametr byl měřen na vibrometru jako poslední a ten již byl teplotně ustálen. Proto již nedocházelo k výrazné časové změně úrovně signálu, a tedy i šumu. Tento předpoklad však nevysvětluje nepřítomnost zvýšeného šumu mimo viditelná maxima, jak udává i manuál.

Následující měřený vibrometr Polytec OFV-505 s jednotkou dekodérů OFV-5000 znovu dosahuje nejlepšího typického rozlišení  $0,02 \mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Změřené hodnoty vlastního šumu jsou pro digitální dekodér VD-06 jsou v tabulce 4.8 a jsou dle očekávání nižší. Šum tohoto vibrometru se pohybuje na výrobcem udávané hodnotě, viz obrázek 5.1. Ze spektrální charakteristiky je vidět, že hodnota šumu je nižší, než v případě vibrometru PDV-100. Vibrometr OFV-5000 dále obsahuje dekodér výchylky navázaný na digitální dekodér VD-06, ten definuje dosažitelné rozlišení nad  $10 \text{ Hz}$  viz příloha A.2. Zde je katalogová hodnota rozlišení až  $15 \text{ pm}$ . Toto měření shrnují tabulky 4.9 a 4.10. Celkové hodnoty jsou však výrazně vyšší než udávané rozlišení, vzhledem k navázání lze předpokládat podobné frekvenční omezení jako u rychlostního dekodéru VD-06. Spektrální hustotu šumu pro tento dekodér výchylky lze pozorovat na obrázku 4.6, měřený šum je nad  $10 \text{ Hz}$  menší než  $50 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ , přičemž klesá na  $1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$  při frekvenci  $1 \text{ kHz}$ . Měřená úroveň signálu je shrnuta pro tři citlivosti a oba dekodéry do tabulky 4.11. Při měření digitálního dekodéru VD-06 na rozsahu s citlivostí  $2 \text{ mm/s/V}$  je rozdíl mezi



nejlepším a nejhorším případem 2 řády. Z grafu na obrázku 4.7 je patrné, že závislost mezi úrovní signálu a šumem je exponenciální. Měření úrovně signálu také ukázalo na silnou časovou nestabilitu, kdy se šum výrazně měnil, a to periodicky s časem. Graf na obrázku 4.8 zobrazuje tuto situaci a je z něj patrné, že propady se opakují s periodou 554 s. Z teorie by se mělo jednat o tepelné ustalování dvou módů použitého laseru. Statistická analýza ukazuje na silnou korelaci mezi šumem a úrovní odraženého paprsku, jejíž hodnota je rovna  $-0,72$ , kdy dle očekávání se korelace snižuje umístěním do viditelného maxima, konkrétně na hodnotu  $-0,10$ . Naměřená data a výsledky pro tento případ lze nalézt v příloze D.

Poslední a časově nejnáročnější částí bylo měření parametrů vibrometru CLV-2534. Ten dosahuje stejné katalogové specifikace pro nejlepší typické rozlišení jako předchozí vibrometry, tedy  $0,02 \mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Oproti ostatním vibrometrům byl šum v kapitole 4.4 měřený přímo s AC vazbou, jelikož střídavá složka signálu byla vyhodnocena jako nejzajímavější s ohledem na analýzu šumových parametrů. Změřené hodnoty pro vlastní šum jsou ještě o  $0,5 \mu\text{m/s}$  nižší než u vibrometru OFV-505/5000, viz tabulka 4.13. Nižší hodnota, avšak může souviset i s použitou AC vazbou, jenž má zlomový kmitočet  $3,4 \text{ Hz}$ , zatímco u ostatních měření byla matematicky odstraněna pouze stejnosměrná složka. Zpětně se jeví volba této vazby, jako zbytečně problematická. Ze spektrální hustoty šumu na obrázku 5.1 je patrné, že rozložení šumu je podobné s vibrometrem OFV-505/5000. Pouze v pásmech  $10$  až  $20 \text{ Hz}$  a  $700$  až  $900 \text{ Hz}$  se u tohoto vibrometru vyskytují oblasti vyššího šumu, jenž jsou pravděpodobně důsledkem vnějších vlivů.



Obrázek 5.1: Srovnání spektrální hustoty vlastního šumu všech vibrometrů

Vzhledem k nepraktické manipulaci totiž nebyl tento jediný vibrometr měřen na optickém stole s odtlumenou základnou. Dále hodnoty špiček nad 10 kHz jsou v případě použití tohoto vibrometru nižší. Přesně specifikovanou hodnotu rozlišení pro všechny vibrometry lze naléznout v příloze A.

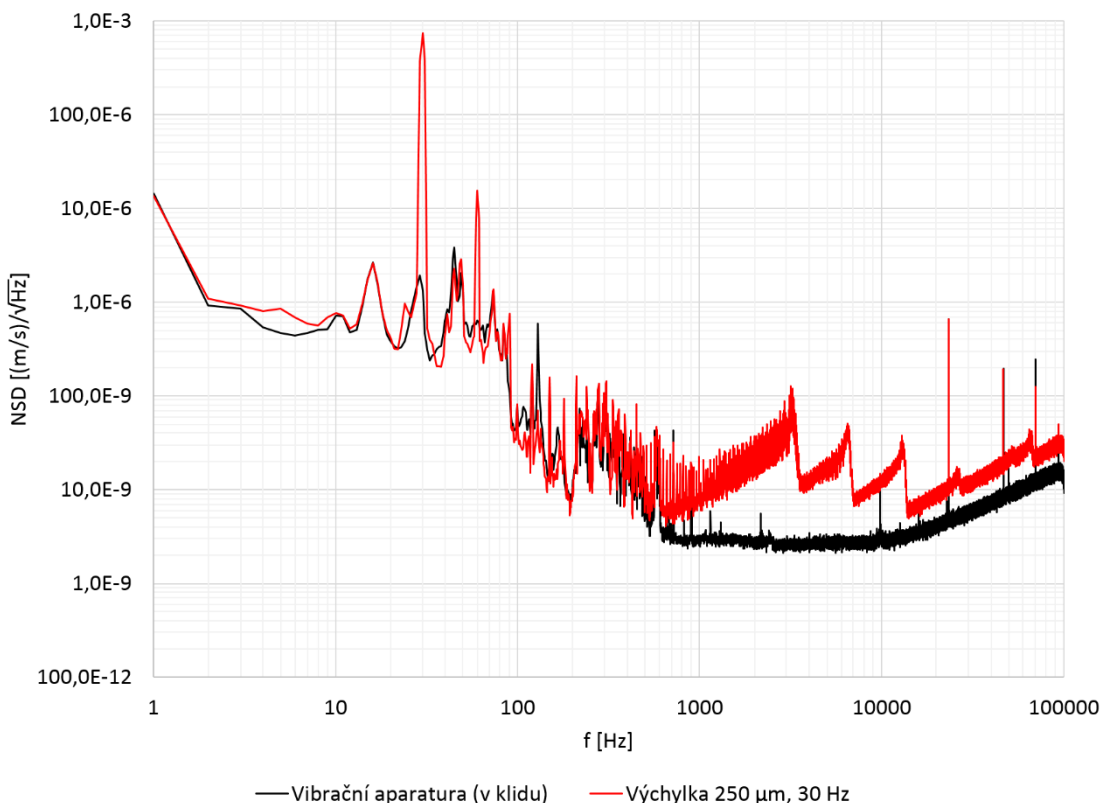
Závislost šumu na úrovni odraženého paprsku je znovu exponenciální, změnily se však koeficienty regresní rovnice, jež lze vidět na grafu v obrázku 4.11. Toto měření, ač je kapitola zařazena v práci dále, než vibrometr OFV-505, probíhalo dříve a nebyl měřen detailní průběh úrovně signálu a šumu v čase. Až na základě změřené hodnoty úrovně signálu ve viditelném minimu pro vibrometr CLV-2534 (601 mm) bylo inicializováno detailnější měření, nakonec však realizované na vibrometru OFV-505/5000. Měření viditelných maxim vibrometru CLV-2534 bylo zpracováno do tabulky 4.15. Vzhledem k nestabilitě bylo vždy měření započato v maximu. Pro odstupovou vzdálenost 601 mm, tedy nejhorší možný případ, se hodnoty úrovně signálu pohybovaly mezi 2,4 a 4,2 V, přičemž doba mezi extrémy byla 207 s.

Dále bylo provedeno dynamické měření na vibrační aparatuře. Výsledky jsou shrnuty v tabulkách 4.16, 4.17 a 4.18 postupně pro frekvenci měřeného signálu 70, 120 a 190 Hz. Z provedeného měření plyne, že poměr signál-šum je poměrně nízký, za což může převážně volba nízké amplitudy použité pro buzení. Konkrétně při měření na 70 Hz se hodnota odstupu signál-šum pohybovala mezi 1,4 a 5,1 dB dle rušivé výchylky. Měřená výchylka je menší, než  $1 \mu\text{m}_{\text{pk}}$ , a přesto není výrazně ovlivněna rušivou složkou o hodnotě až  $37 \text{ mm}_{\text{pk}}$ . Přičemž vibrometr by měl dosahovat hloubky ostrosti pro použitou odstupovou vzdálenost pouze  $\pm 19 \text{ mm}$ . Změřená spektra jsou zaznamenána na obrázku 4.13, kdy největší rozdíly se vyskytují do hodnoty 1 Hz. Pro srovnání stabilizace, které bylo dosaženo na vibrační aparatuře, je do grafu také přidána charakteristika šumu při pevném uložení zrcadla. Spektrální šumové hustoty se liší od vlastního šumu vibrometru především na nízkých kmitočtech do 100 Hz. K tomuto měření byl navíc zpracován záznam z úrovně signálu po 100 ms, ten lze vidět na obrázku 4.12. Z grafu vyplývá, že pro jednu měřenou periodu (5 s) je průběh i indikovaná hodnota úrovně signálu odlišná pro případ, že je aparatura nejbližší, respektive nejdále od vibrometru. Zajímavější je však fakt, že hodnota úrovně signálu má tendenci se od určité hranice propadu odrazit, přičemž se nejedná o maximální, nebo minimální hodnotu odstupové vzdálenosti. Tento jev naznačuje, že vibrometr obsahuje dynamiku, a s ní se mění úroveň signálu. Tento jev by si proto zasloužil více pozornosti.

Posledním měřením byla koherenční zrnitost, znovu realizována na vibrometru CLV-2534. Pro toto měření bylo vybráno 7 vzorků, popsanych na obrázku 4.14. Prvním srovnávaným parametrem byla úroveň zpětně odraženého paprsku a jeho statistický rozptyl pro všechna měření. Tyto hodnoty jsou shrnuty v tabulce 4.20. Nejlépe z tohoto porovnání vyšlo zrcadlo, s nejvyšší úrovní signálu a s nejnižším rozptylem v průběhu celého měření. Dále pak v pořadí lesklá fólie, 3M Scotchlite, následována koutovými odražeči. Naopak nejhůře dopadla textilní páska a holý povrch duralového stolu vibračního budiče. Při měření také docházelo k situacím, kdy šum klesal s rostoucí výchylkou, případně ve srovnání s klidovou hodnotou. Některé z takto nalezených

anomálií, lze přisoudit nárůstu úrovně odraženého paprsku. Přičemž nejvýraznější změny v úrovni odraženého paprsku dosahoval duralový povrch, viz tabulka 4.21.

Vibrometr byl zaměřen pro středový prvek, tedy zrcadlo, nicméně i na něm byl pozorován snížený šum s rostoucí výchylkou. Tento jev je zvýrazněn tučně v tabulce 4.25. Jedná se o případ, kdy šum při frekvenci 5 Hz a výchylce 1  $\mu\text{m}$  klesne z 15,4  $\mu\text{m/s}$  na pouhých 7,8  $\mu\text{m/s}$  a to v důsledku zvýšení výchylky na 5  $\mu\text{m}$  na kmitočtu 5 Hz. Z obrázku 5.2 je možné vyhodnotit vliv koherenční zrnitosti na měřený šum zrcadla při výchylce 250  $\mu\text{m}$  na 30 Hz. Na kmitočtu 30 Hz se vyskytuje měřený signál o velikosti výchylky 5  $\mu\text{m}$ , která byla po úvaze přisouzena pseudo-vibracím. V pásmu frekvencí mezi 100 Hz a 1 kHz lze dobře pozorovat špičky na dalších harmonických frekvencích. Na frekvencích od 1 kHz vznikají oblasti nárůstu a náhlého poklesu šumu, tj. vliv koherenční zrnitosti. Jednotlivé vrcholy pro případ výchylky 250  $\mu\text{m}$  na 5 Hz odpovídají vždy přibližně dvojnásobku. Jde konkrétně o frekvence 3,2 kHz, 6,5 kHz 13,2 kHz a 26,5 kHz. V grafech na obrázcích 4.16, 4.17 a 4.18 jsou zobrazeny srovnání všech vzorků se zrcadlem, jenž bylo zvoleno jako referenční pro svůj nízký celkový i koherenční šum. Z tohoto porovnání je zřejmé, že kromě lesklé fólie další vzorky nevykazují tento pilovitý průběh, avšak jejich pseudo-vibrace na vyšších harmonických frekvencích jsou výraznější.

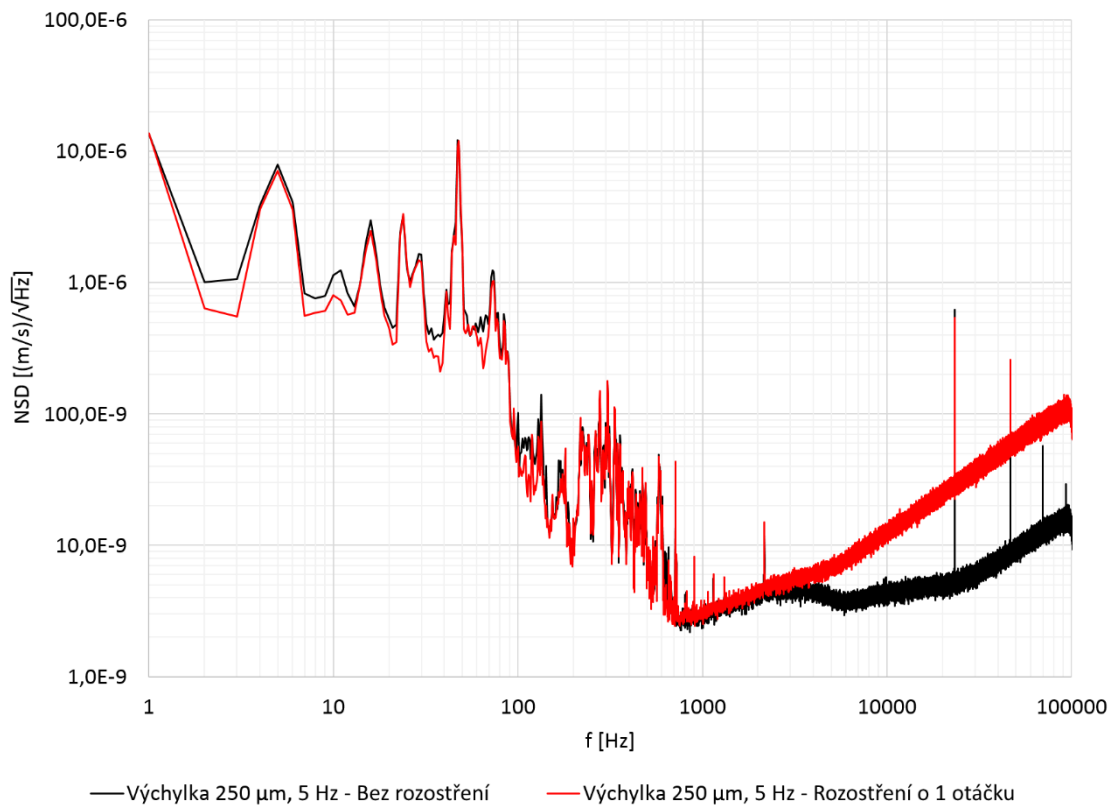


Obrázek 5.2: Srovnání spektrální hustoty šumu zrcadla v klidu a při vibracích (in-plane)

Podrobnému popisu jednotlivých vzorků se věnuje kapitola 4.4.2. Lze však říci, že kromě pozorovaného trendu, kdy šum roste s výchylkou, byly změřeny i případy, kdy se šum snížil a nelze to vysvětlit pouhou změnou úrovně odraženého paprsku.

Pro kompenzaci koherenčního šumu byl proveden pokus na základě teorie, kdy byla očekávána snížená hodnota koherenčního šumu při rozostření paprsku. V principu se jedná o dosažení zprůměrování nerovného povrchu na větší ploše za cenu zhoršené koherence a úrovně signálu. Tento předpoklad byl změřen pro výchylku 250  $\mu\text{m}$  na kmitočtu 5 Hz a zpracován do tabulky 4.30. Výsledkem je, že základní šumová hladina bez buzení vzrostla v důsledku snížené úrovně signálu. Podrobnější analýza s využitím získané regresní rovnice pro výpočet šumu z úrovně signálu ukázala, že měřený šum bez buzení je o 0,4  $\mu\text{m/s}$  nižší než očekávaná hodnota. Z obrázku 5.3 lze vypozorovat, že vliv koherenční zrnitosti mírně klesl, avšak celkový šum vzrostl oproti ideálnímu zaostření, a to především vlivem přítomnosti vyšších frekvencí ve spektru (vliv nízké úrovně signálu). Například při rozostření o půl otáčky, výchylce 250  $\mu\text{m}$  a frekvenci 5 Hz se šum zhoršil od ideálního zaostření o 2,8 %, pro případ rozostření o celou otáčku pak o 16 %.

Měřená závislost koherenční zrnitosti je značně komplexní, což je vidět z provedeného a zpracovaného měření. Obecně však lze doporučit nejprve užití co nejreflexnějšího povrchu, kdy dosažení vysoké úrovně odraženého signálu je základ pro nízký celkový šum, a dále pak vybrat materiál s nízkou hrubostí povrchu, jenž zajistí, že šumová hladina bude zachována i při vibracích kolmých na směr měření. Nejvhodnější z hlediska šumu se ukázalo zrcadlo (vzorek č. 3), a to jak při ideálních podmínkách, tak i při rozostření, nebo zmíněných vibracích kolmých na směr měření. Dále nízký šum vykazovala lesklá fólie a reflexní fólie s označením 3M Scotchlite.



*Obrázek 5.3: Srovnání koherenčního šumu při rozostření*

# ZÁVĚR

Práce se zabývala především měřením dynamických parametrů laserových vibrometrů. Za tímto účelem byla provedena řada měření, jež zkoumaly parametry dle zadání. Byly představeny teoretické základy pro měření interferometrickými metodami. Dále se práce zabývá parametry, jež ovlivňují dosažitelné rozlišení. Z těchto parametrů lze při měření výrazně ovlivnit především kontrastní poměr a koherenční zrnitost.

Vibrometr PDV-100 vykazuje nejvyšší hodnoty vlastního šumu z měřených vibrometrů. Jedná se o  $4,3 \mu\text{m/s}$  na rozsahu s nejvyšší citlivostí, přesto vyhověl specifikaci udané výrobcem. Dále se vlastní šum liší pro případ maximální detekované úrovně bargrafem a nejlepší dosažitelnou hodnotu o  $14,4 \mu\text{m/s}$ . Při měření viditelných maxim u tohoto vibrometru nebyly pozorovány zhoršené šumové parametry. Nebylo objasněno, zda se jedná o systematickou či jinou chybu měření, neboť dle manuálu by měly být viditelné maxima pro tento vibrometr relevantní.

Měřený vibrometr OFV-505 vykazuje na rozsahu s citlivostí  $1 \text{ mm/s/V}$  nejnižší měřenou hodnotu šumu, konkrétně  $1,1 \mu\text{m/s}$ . Tomu napomáhá fakt, že je tento rozsah omezen pouze do frekvence  $20 \text{ kHz}$ , oproti  $100$  nebo  $350 \text{ kHz}$  u dalších rozsahů. Šum dle očekávání roste se zvětšujícím se zvoleným rozsahem, a to ať se jedná o analogový, digitální, či dekodér výchylky. Znovu však nepřekračuje výrobcem stanovenou hodnotu. Z měření vlivu zpětně odražené úrovně paprsku vyplývá, že mezi měřenou úrovní signálu a šumem je exponenciální závislost. Šum měřený na tomto vibrometru také vykazuje závislost na odstupové vzdálenosti hlavy vibrometru od měřené plochy, tedy na viditelných maximech. Z měření dále plyne, že umístění vibrometru do nejméně příznivé odstupové vzdálenosti způsobí časově proměnou úroveň signálu.

Vlastní šum vibrometru CLV-2534 pro rozsah s nejvyšší citlivostí  $2 \text{ mm/s/V}$  dosahuje hodnoty  $2,6 \mu\text{m/s}$ . Celkové šumové parametry jsou srovnatelné s modulárním vibrometrem OFV-505/5000 s instalovanými dekodéry. Vlastní šum je znovu exponenciálně závislý na úrovni odraženého paprsku a měření viditelných maxim ukazuje na sníženou úroveň signálu a časovou nestabilitu mimo výrobcem udávaná viditelná maxima.

Z realizovaného dynamického měření vyplývá, že vibrometr je schopen detekovat i velmi malou výchylku, konkrétně menší než  $100 \text{ nm}_{\text{pk}}$ , a to i v případě modulování rušivou složkou o hodnotě výchylky až  $37 \text{ mm}_{\text{pk}}$ . Rozdíl v takto měřené výchylce je přitom minimální oproti případu bez rušení. Z měření vyplývá, že detekovaná úroveň odraženého paprsku na vibrometru CLV-2534 při buzení harmonickým signálem je od výchylky větší než  $9 \text{ mm}_{\text{pk}}$  oproti očekávání silně nelineární. Pro tyto případy se měřená úroveň signálu odráží od minima dříve, než ho bylo fyzicky dosaženo na vibrační aparatuře. Tento fakt naznačuje existenci vnitřní dynamiky určující úroveň signálu.

Měření koherenční zrnitosti ukazuje, že šumová hladina roste ve většině případů s vibracemi kolmými na směr měření. Avšak vhodnou volbou frekvence a velikosti výchylky těchto vibrací, lze dosáhnout i opačného efektu, tedy naopak snížení šumu vznikajícího koherenční zrnitosti. Nebyla však nalezena obecná závislost mezi tímto

snížením a velikostí výchylky či frekvencí. Hledání minima tedy spoléhá na experimentální měření.

Při rozostření měřeného paprsku bylo dosaženo mírného snížení vlivu koherenční zrnitosti, avšak snížením úrovně zpětně odraženého paprsku výsledný šum vzrostl. Při výchylce 250  $\mu\text{m}$  a frekvenci 5 Hz pouze o 2,8 % (rozostření o půl otáčky). Tedy rozostření není obecně vhodné pro kompenzaci koherenčního šumu, i když lze dosáhnout určitého poklesu šumu, to však pouze v úzkých částech frekvenčního spektra.

Z hlediska koherenční zrnitosti lze doporučit zrcadlo, jako nejvhodnější odrazný materiál, jako další vhodný materiál se ukázala lesklá fólie. Vzorek materiálu 3M Scotchlite vykazoval relativně nízký klidový šum, jenž však výrazně rostl s vibracemi kolmými na směr měření. Obecně lze tedy doporučit vysoce reflexní materiál s nízkou hrubostí.

Práce splnila zadání, z provedených měření plyne že, úroveň indikovaného signálu exponenciálně souvisí s velikostí šumu. Měření dynamických parametrů ukázalo, že měřená výchylka na vibrometru CLV-2534 není znehodnocena ani výraznou rušivou výchylkou. Nejlepší odrazivý materiál, z provedených měření bylo zrcadlo, a to v ideálních i zhoršených podmínkách. V práci nebyl zkoumán vliv nedokonalé kolmosti na měřené vibrace, tento faktor by mohl naopak hovořit proti vysoce hladkým povrchům. V této oblasti by bylo vhodné provést další měření.

# LITERATURA

- [1] *The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* [online]. Pasadena, CA 91125: California Institute of Technology, 2015 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <https://www.ligo.caltech.edu/page/look-deeper>
- [2] JENG-NAN, Juang a R RADHARAMANAN. *Evaluation of Ring Laser and Fiber Optic Gyroscope Technology*. School of Engineering, Mercer University, Macon, GA 31207 USA.
- [3] *Avoidance of speckle noise in laser vibrometry by the use of kurtosis ratio: Application to mechanical fault diagnostics* [online]. Elsevier, 2008, **22**(3) [cit. 2017-03-31]. ISSN 0888-3270. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327007001549>
- [4] *Field Guide to Displacement Measuring Interferometry* [online]. Bellingham, Washington USA: SPIE, c2014 [cit. 2017-03-31]. ISBN 9780819497994. Dostupné z: <http://ebooks.spiedigitallibrary.org/book.aspx?bookid=840>
- [5] FUKA, Josef; HAVELKA, Bedřich. *Optika a atomová fyzika, I. Optika: fyzikální kompendium pro vysoké školy*. díl IV. Praha: SPN, 1961. 845 s.
- [6] HARIHARAN, P. *Basics of interferometry*. 2nd ed. Boston: Elsevier Academic Press, c2007. ISBN 978-012-3735-898.
- [7] *Vizualizační a optické měřicí metody*. In: VUT [online]. Brno: Pavelek, 2007 [cit. 2016-10-27]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika>
- [8] *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. ISBN 978-3-642-08739-4.
- [9] *How does a Helium Neon laser work?* [online]. Columbia university [cit. 2016-10-20]. Dostupné z: [http://www.phys.columbia.edu/~w3081/exp\\_files/melles\\_griot\\_1.pdf](http://www.phys.columbia.edu/~w3081/exp_files/melles_griot_1.pdf)
- [10] HEAPS, Wm. S. Broadband lidar technique for precision CO. In: *Proceedings of SPIE* [online]. SPIE, 2008, s. 711102-711102-9 [cit. 2017-05-09]. DOI: 10.1117/12.802624. Dostupné z: <http://link.aip.org/link/PSISDG/v7111/i1/p711102/s1&Agg=doi>
- [11] HARIHARAN. *Optical Interferometry*. Second Edition. Sydney: University of Sydney, 2003. ISBN 0-12-311630-9.
- [12] CHATELLUS, H. Guillet de a J.-P. PIQUE.  $\Lambda/2$  fringe-spacing interferometer. *Optics Letters* [online]. 2009, **34**(6), 755- [cit. 2017-04-01]. DOI: 10.1364/OL.34.000755. ISSN 01469592. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ol-34-6-755>



- [13] How Things Work: Ring Laser Gyros. *Air & Space* [online]. Washington: Linda Shiner, 2002 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.airspacemag.com/flight-today/how-things-work-ring-laser-gyros-32371541/>
- [14] YEH, Y. a H. Z. CUMMINS. LOCALIZED FLUID FLOW MEASUREMENTS WITH AN He–Ne LASER SPECTROMETER. *Applied Physics Letters*. 1964, (5), 176-178. DOI: 10.1063/1.1753925. ISBN 10.1063/1.1753925. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1753925>
- [15] Doppler Measurement. *Sensor Systems* [online]. 2002 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.acfr.usyd.edu.au/pdfs/training/sensorSystems/14%20Doppler%20Measurement.pdf>
- [16] JOHANSMANN, M, G SIEGMUND a M PINEDA. Targeting the Limits of Laser Doppler Vibrometry. *Proceedings of the IDEMA* [online]. Japan, 2005, , 1-12.
- [17] *Basic Principles of Vibrometry*. Polytec [online]. Waldbronn: Polytec GmbH, 2016 [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: <http://www.polytec.com/us/solutions/vibration-measurement/basic-principles-of-vibrometry/>
- [18] DAVIS, Pepe a Jeff BUSH. *Non-contact fiber optic vibrometer* [online]. CA 91406, 1999 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: [http://www.optiphase.com/techpdf/sagnac\\_vibrometer.pdf](http://www.optiphase.com/techpdf/sagnac_vibrometer.pdf)
- [19] *Global noise characteristics of a laser Doppler vibrometer—I. Theory* [online]. Lexington: Elsevier, 1999, **30**(2) [cit. 2017-03-31]. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816698000141>
- [20] *Optics and Lasers in Engineering* [online]. Elsevier, 2016, (11) [cit. 2017-03-31]. ISSN 0143-8166. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816616303724>
- [21] *Progress in optics XIV: The statistic of speckle patterns*. 1976.
- [22] *The influence of operating conditions on the accuracy of in-plane laser Doppler velocimetry measurements* [online]. Elsevier, 1991, **26**(3) [cit. 2017-03-31]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026322419900041X>
- [23] *Laser Speckle and Related Phenomena*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975. ISBN 978-366-2432-051.
- [24] *Laser vibrometry: Pseudo-vibrations* [online]. 1989, **135**(3) [cit. 2017-03-31]. ISSN 0022-460X. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022460X89907050?via%3Dihub>

- [25] CRISTALLI, Cristina, Barbara TORCIANTI a Jiri VASS. *A new method for filtering speckle noise in vibration signals measured by laser Doppler vibrometry for on-line quality control* [online]. [cit. 2017-03-31]. DOI: 10.1117/12.693104. ISBN 10.1117/12.693104. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.693104>
- [26] *Stabilized Red HeNe Laser* [online]. Newton, New Jersey: Thorlabs, c2017 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_ID=5281](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=5281)
- [27] ROTHBERG, Steve. Numerical simulation of speckle noise in laser vibrometry. *Applied Optics IP* [online]. 2006, (7), 4523-4533 [cit. 2017-03-31]. DOI: 10.1364/AO.45.004523. ISBN 10.1364/AO.45.004523. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-45-19-4523>
- [28] Pixel size & sensitivity (v. 0710). *PCO* [online]. Kelheim, Germany [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: [https://www.pco.de/fileadmin/user\\_upload/db/download/kb\\_pixel\\_size\\_sensitivity\\_20100721.pdf](https://www.pco.de/fileadmin/user_upload/db/download/kb_pixel_size_sensitivity_20100721.pdf)
- [29] Adaptive filter design for suppressing the moving surface interferences in optic-acoustic remote sensing. In: *2013 OCEANS - San Diego* [online]. San Diego: IEEE, 2013, s. 1-6 [cit. 2017-04-08]. DOI: 10.23919/OCEANS.2013.6741152. ISBN 978-0-933957-40-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6741152/>
- [30] *User Manual for Vibrometer Controller OFV-5000*. Austin, Texas, USA, 2004.
- [31] *User Manual Portable Digital Vibrometer PDV 100*. D-76337 Waldbronn, 2004.
- [32] *PDV-100 - Truly Portable Vibration Sensor* [online]. D-76337 Waldbronn: GmbH, c2017.
- [33] OFV-5000 Vibrometer Controller. In: *Polytec* [online]. Waldbronn: GmbH, c2017 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.polytec.com/eu/products/vibration-sensors/single-point-vibrometers/modular-systems/ofv-5000-vibrometer-controller/>
- [34] *User Manual Vibrometer Single Point Sensor Head OFV-505/-503*. D-76337 Waldbronn, 2004.
- [35] *Datasheet CLV-2534 Compact Laser Vibrometer*. D-76337 Waldbronn, c2017. Dostupné také z: [http://www.polytec.com/fileadmin/user\\_uploads/Products/Vibrometers/CLV-2534/Documents/OM\\_DS\\_CLV-2534\\_2014\\_02\\_1000\\_E.pdf](http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Vibrometers/CLV-2534/Documents/OM_DS_CLV-2534_2014_02_1000_E.pdf)
- [36] CLV-2534 Compact Laser Vibrometer. In: *Polytec* [online]. Waldbronn: GmbH, c2017 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.polytec.com/eu/products/vibration-sensors/single-point-vibrometers/clv-2534-compact-laser-vibrometer/>

- [37] User Manual Vibrometer CLV-2434-4. D-76337 Waldbronn, 2004.
- [38] PXI-4462. In: *National Instruments* [online]. c2017 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.pxi-4462.html>
- [39] *NI 446x Specifications*. Austin, Texas, USA, 2008. Dostupné také z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373770j.pdf>
- [40] NI PXI/PCI-5922. Austin, Texas, USA, 2008. Dostupné také z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.pxi-5922.html>
- [41] Experimentální metody Virtuální laboratoř. *Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství* [online]. Brno: VUT, 2003 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/daq/Ka04-02.htm>
- [42] Making RMS Measurements Correctly. *SIGNALYSIS* [online]. Cincinnati, OH, c2015 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://signalysis.com/knowledge-base/making-rms-measurements-correctly/>

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Michelsonův interferometr .....	14
Obrázek 1.2: Machův-Zehnderův interferometr .....	14
Obrázek 1.3: Sagnacův interferometr .....	15
Obrázek 1.4: Schéma digitálního dekodéru pro výchylku i rychlost [16] .....	19
Obrázek 1.5: Principiální schéma LDV (Mach-Zehnderův interferometr) .....	19
Obrázek 1.6: Principiální schéma LDV (Sagnacův interferometr)[18] .....	20
Obrázek 2.1: Kontrastní poměr při interferenci [4] .....	21
Obrázek 2.2: Histogram intenzity koherenční zrnitosti [21] .....	23
Obrázek 2.3: Ukázka koherenční zrnitosti [3] .....	23
Obrázek 2.4: Adaptivní filtrace v časové doméně: (a) Původní signál; (b) LMS filtr; (c) RLS filtr; (d) Kalmanův filtr [29] .....	29
Obrázek 2.5: Adaptivní filtrace ve frekvenční doméně: (a) Původní signál; (b) LMS filtr; (c) RLS filtr; (d) Kalmanův filtr [29] .....	29
Obrázek 3.1: Měřicí řetězec .....	30
Obrázek 3.2: Vibrometr Polytec PDV-100 [32] .....	31
Obrázek 3.3: Vibrometr Polytec OFV-505 s dekodérem OFV-5000 [33] .....	32
Obrázek 3.4: Hloubka ostrosti hlavy vibrometru OFV-505 [34] .....	32
Obrázek 3.5: Závislost odstupové vzdálenosti hlavy OFV-505 na úrovni signálu [34].	33
Obrázek 3.6: Vibrometr s dekodérem CLV-2534 [36] .....	33
Obrázek 3.7: Viditelná maxima vibrometru CLV-2534 [37] .....	34
Obrázek 3.8: Měřicí karta NI 4462 [38] .....	35
Obrázek 3.9: Ovládací rozhraní měřicí aplikace v LabVIEW .....	37
Obrázek 3.10: Rozdělení signálů [41] .....	38
Obrázek 3.11: Schéma měření vlastního šumu, úrovně signálu a viditelných maxim ...	39
Obrázek 3.12: Schéma dynamického měření výchylky .....	40
Obrázek 3.13: Schéma měření koherenční zrnitosti (pohled shora) .....	42
Obrázek 4.1: Spektrální hustota šumu kanálu AI <sub>0</sub> (terminátor 50 Ω) .....	47
Obrázek 4.2: Šumové spektrum měřicí karty NI 4462 dle katalogu [8] .....	47
Obrázek 4.3: Spektrální hustota šumu vibrometru PDV-100 s citlivostí 5 mm/s/V .....	49
Obrázek 4.4: Zaostření při hraniční hodnotě úrovně signálu rovné dvanácti .....	49
Obrázek 4.5: Spektrální hustota šumu vibrometru OFV-505 s citlivostí 2 mm/s/V .....	51
Obrázek 4.6: Spektrální hustota šumu DD-500 pro citlivost 50 a 500 nm/V .....	52
Obrázek 4.7: Závislost šumu na úrovni signálu pro vibrometr OFV-505 (2 mm/s/V) ...	53
Obrázek 4.8: Časová změna úrovně signálu v nejméně příznivé vzdálenosti .....	55
Obrázek 4.9: Spektrální hustota šumu vibrometru CLV-2534 na rozsahu s citlivostí 2 mm/s/V .....	56
Obrázek 4.10: Spektrální hustota šumu CLV-2534 na rozsahu s citlivostí 2 mm/s/V (filtr 20 kHz) .....	57
Obrázek 4.11: Závislost šumu na úrovni signálu pro vibrometr CLV-2534 .....	58
Obrázek 4.12: Časová změna úrovně signálu pro měřené výchylky .....	60

Obrázek 4.13: Srovnání spektrálních hustot šumu při měření signálu 120 Hz.....	61
Obrázek 4.14: Měřené vzorky a místa měření z hlediska koherenční zrnitosti.....	62
Obrázek 4.15: Spektrální hustota šumu zrcadla při měření v klidu a v pohybu (vzorek č. 3).....	65
Obrázek 4.16: Srovnání koherenčního šumu při buzení 30 Hz a výchylce 250 $\mu\text{m}$ – 1/3.....	68
Obrázek 4.17: Srovnání koherenčního šumu při buzení 30 Hz a výchylce 250 $\mu\text{m}$ – 2/3.....	69
Obrázek 4.18: Srovnání koherenčního šumu při buzení 30 Hz a výchylce 250 $\mu\text{m}$ – 3/3.....	69
Obrázek 4.19: Spektrální hustota šumu zrcadla pro zaostřený a rozostřený paprsek bez buzení.....	71
Obrázek 5.1: Srovnání spektrální hustoty vlastního šumu všech vibrometrů.....	73
Obrázek 5.2: Srovnání spektrální hustoty šumu zrcadla v klidu a při vibracích (in-plane).....	75
Obrázek 5.3: Srovnání koherenčního šumu při rozostření.....	77
Obrázek B.1: Měření vlastního šumu vibrometru PDV-100.....	VII
Obrázek B.2: Měření vlastního šumu vibrometru OFV-505/5000.....	VII
Obrázek B.3: Měření vlastního šumu vibrometru CLV-2534.....	VII
Obrázek B.4: Záznam dat, v pozadí dekodér OFV-5000 a PXI-1033.....	VIII
Obrázek B.5: Měření koherenčního šumu pomocí vibrometru CLV-2534.....	VIII
Obrázek B.6: Dynamické měření výchylky pomocí vibrometru CLV-2534.....	IX
Obrázek B.7: Odrazka pro měření závislosti šumu a úrovně odraženého paprsku v čase.....	IX
Obrázek C.1: Spektrální hustota šumu vibrometru PDV-100 na citlivosti 5 mm/s/V, bez užití optického stolu.....	XI
Obrázek C.2: Spektrální hustota šumu vibrometru OFV-505/5000 s dekodérem VD-06 na citlivosti 2 mm/s/V, bez užití optického stolu.....	XI
Obrázek D.1: Časová změna úrovně odraženého signálu a jeho korelace s šumem pro vzdálenost 489 mm, korelační koeficient roven hodnotě $-0,39$ .....	XII
Obrázek D.2: Časová změna úrovně odraženého signálu a jeho korelace s šumem pro vzdálenost 438 mm (viditelné maximum), korelační koeficient roven hodnotě $-0,10$ .....	XII

## Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Typy laserů a jejich základní parametry [6] .....	13
Tabulka 3.1: Hloubka ostrosti vibrometru CLV-2534 [35] .....	34
Tabulka 3.2: Katalogové hodnoty vlastního šumu převodníku NI 4462 [39] .....	35
Tabulka 3.3: Katalogové hodnoty vlastního šumu převodníku NI-5922 [40] .....	36
Tabulka 3.4: Efektivní hodnoty spektrálních čar měřených na dané frekvenci akcelerometrem pro dosažení žádané výchylky .....	42
Tabulka 4.1: Vlastní šum karty NI 4462 bez terminátoru .....	45
Tabulka 4.2: Vlastní šum karty NI 4462 s terminátorem 600 $\Omega$ .....	46
Tabulka 4.3: Vlastní šum karty NI 4462 s terminátorem 50 $\Omega$ .....	46
Tabulka 4.4: Efektivní přepočet bitů převodníku NI 4462 .....	48
Tabulka 4.5: Vlastní šum rychlostního dekodéru vibrometru PDV-100 .....	48
Tabulka 4.6: Měření vlivu úrovně signálu na šum u vibrometru PDV-100 .....	49
Tabulka 4.7: Závislost šumu na odstupové vzdálenosti u vibrometru PDV-100 .....	50
Tabulka 4.8: Vlastní šum rychlostních dekodérů vibrometru OFV-505 .....	50
Tabulka 4.9: Vlastní šum dekodéru výchylky DD-500 (DC vazba) .....	51
Tabulka 4.10: Vlastní šum dekodéru výchylky DD-500 (AC vazba) .....	52
Tabulka 4.11: Měření vlivu úrovně signálu na šum u vibrometru OFV-505 .....	54
Tabulka 4.12: Závislost šumu na odstupové vzdálenosti u vibrometru OFV-505/5000 .....	55
Tabulka 4.13: Vlastní šum rychlostního dekodéru vibrometru CLV-2534 .....	56
Tabulka 4.14: Měření vlivu úrovně odraženého signálu na šum u vibrometru CLV-2534 .....	58
Tabulka 4.15: Závislost šumu na odstupové vzdálenosti u vibrometru CLV-2534 .....	59
Tabulka 4.16: SNR pro měřený signál 70 Hz .....	59
Tabulka 4.17: SNR pro měřený signál 120 Hz .....	60
Tabulka 4.18: SNR pro měřený signál 190 Hz .....	61
Tabulka 4.19: SNR pro měřený signál 120 Hz s použitím koutového odražeče 2 .....	62
Tabulka 4.20: Statistické parametry měřených vzorků z hlediska koherenční zrnitosti .....	63
Tabulka 4.21: Hodnoty úrovně odraženého paprsku při měření koherenční zrnitosti .....	63
Tabulka 4.22: Koherenční zrnitost pro lesklou fólii (vzorek č. 0) .....	63
Tabulka 4.23: Koherenční zrnitost pro dural (vzorek č. 1) .....	64
Tabulka 4.24: Koherenční zrnitost pro 3M Scotchlite (vzorek č. 2) .....	64
Tabulka 4.25: Koherenční zrnitost pro zrcadlo (vzorek č. 3) .....	65
Tabulka 4.26: Koherenční zrnitost pro koutový odražeč 1 (vzorek č. 4) .....	66
Tabulka 4.27: Koherenční zrnitost pro koutový odražeč 2 (vzorek č. 5) .....	66
Tabulka 4.28: Koherenční zrnitost pro textilní pásku (vzorek č. 6) .....	67
Tabulka 4.29: Hodnoty koherenčního šumu při odfiltrování daných pásem a výchylce 250 $\mu\text{m}$ při buzení frekvencí 30 Hz .....	67
Tabulka 4.30: Koherenční zrnitost při rozostření laseru pro frekvenci 5 Hz .....	70
Tabulka 4.31: Srovnání šumu zrcadla ve frekvenčních pásmech při rozostření .....	71
Tabulka A.1: Rozsahy analogového rychlostního dekodéru VD-02 (OFV-5000) .....	I

Tabulka A.2: Rozsahy digitálního rychlostního dekodéru VD-06 (OFV-5000) – 1/2 ....	II
Tabulka A.3: Rozsahy digitálního rychlostního dekodéru VD-06 (OFV-5000) – 2/2 ...	III
Tabulka A.4: Rozsahy digitálního dekodéru posunutí DD-500 (OFV-5000) .....	IV
Tabulka A.5: Rozsahy vibrometru PDV-100 .....	IV
Tabulka A.6: Rozsahy vibrometru CLV-2534-4 – 1/2 .....	V
Tabulka A.7: Rozsahy vibrometru CLV-2534-4 – 2/2 .....	VI
Tabulka B.1: Podmínky měření .....	X
Tabulka B.2: Seznam použitých přístrojů .....	X
Tabulka E.1: Koherenční zrnitost vypočtená z frekvenčního spektra – 1/3 .....	XIII
Tabulka E.2: Koherenční zrnitost vypočtená z frekvenčního spektra – 2/3 .....	XIV
Tabulka E.3: Koherenční zrnitost vypočtená z frekvenčního spektra – 3/3 .....	XV

## Seznam použitých zkratk a symbolů

<b>AR</b>	Autoregressive (Auto-regresivní)
<b>CCD</b>	Charge-coupled device (Nábojově vázaná struktura)
<b>CPT</b>	Coherent population trapping
<b>CSLDV</b>	Continuous scanning laser Doppler vibrometer (Kontinuálně skenující laserový Dopplerův vibrometr)
<b>DSP</b>	Digital signal processor (Digitální signálový procesor)
<b>FOG</b>	Fibre optic gyroscope (Optický vláknový gyroskop)
<b>LDV</b>	Laser Doppler vibrometer (Laserový Dopplerův vibrometr)
<b>LMS</b>	Least mean square (Metoda nejmenších čtverců)
<b>MEMS</b>	Microelectromechanical systems (Mikro-elektronické mechanické systémy)
<b>NSD</b>	Noise spectral density (Spektrální hustota šumu)
<b>PSD</b>	Power spectral density (Spektrální hustota výkonu)
<b>RLG</b>	Ring laser gyroscope (Prstencový laserový gyroskop)
<b>RLS</b>	Recursive least square (Rekurzivní metoda nejmenších čtverců)
<b>RMS</b>	Root mean square (Střední kvadratická hodnota)
<b>SLDV</b>	Scanning laser Doppler vibrometer (Skenující laserový Dopplerův vibrometr)
<b>SNR</b>	Signal to noise ratio (Poměr signál-šum)

## Seznam příloh

- Příloha A: Rozsahy vibrometrů
- Příloha B: Dodatky k měření
- Příloha C: Neodtlumené prostředí
- Příloha D: Úroveň signálu a jeho korelace s šumem
- Příloha E: Koherenční zrnitost
- Příloha F: DVD



# PŘÍLOHA A: ROZSAHY VIBROMETRŮ

Measurement range	<b>5</b>	<b>25</b>	<b>125</b>	<b>1000</b>	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}/\text{V}$
Full scale (peak)	0,05	0,25	1,25	10	m/s
Frequency range					
$f_{\text{min}}$	0,5	0,5	0,5	0,5	Hz
$f_{\text{max}}$	250	1500	1500	1500	kHz
Max. acceleration	8000	240000	1200000	9600000	g
Frequency response <sup>1</sup>					
0.5Hz...20Hz	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	dB
20Hz...100kHz	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	dB
100kHz...250kHz	+0.2/-1	±0,1	±0,1	±0,1	dB
250kHz...1.5MHz	-	+0.5/-2	+0.5/-2	+0.5/-2	dB
Resolution <sup>2</sup>					
frequency-dependent <sup>3</sup>	0.05...0.2	0.1...1	0.3...3	2...5	$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{Hz}}$
typically <sup>4</sup>	0,1	0,5	0,6	2,5	$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{Hz}}$
Frequency-dependent phase shift $p_D$ (typ.)	-2,19	-0,45	-0,42	-0,36	°/kHz
Signal delay $t_D$ (typ.)	6,08	1,25	1,17	1,01	μs
Calibration error <sup>5</sup>					
$T_a = (25 \pm 3)^\circ\text{C}$ ( $T_a = (77 \pm 5)^\circ\text{F}$ )	±1	±1	±1	±1	%
$T_a = +5^\circ\text{C} \dots +40^\circ\text{C}$ ( $T_a = 41^\circ\text{F} \dots 104^\circ\text{F}$ )	±1,5	±2	±2,5	±2,5	%
Linearity error <sup>6</sup>	1	1,5	1	1	%
Harmonic distortions	< -52	< -46	< -50	< -50	dBc
Spurious signals (non-harmonic) <sup>7</sup>	< -86	< -86	< -86	< -86	dBFS

<sup>1</sup> The frequency response defines the frequency-dependent amplitude error, referred to the reference frequency of 1 kHz.

<sup>2</sup> The noise-limited resolution is defined as the signal amplitude (rms) at which the signal-to-noise ratio is 0 dB with 1 Hz spectral resolution, measured on 3M Scotchlite Tape® (reflective film).

<sup>3</sup> The attainable resolution is frequency-dependent and is specified for frequencies above 10 Hz.

<sup>4</sup> The typical value refers to the center of the operating frequency range.

<sup>5</sup> Conditions: sinusoidal vibration,  $f = 1 \text{ kHz}$ , amplitude 70% of full scale range, load resistance  $\geq 1 \text{ M}\Omega$

<sup>6</sup> The linearity error is defined as the amplitude-dependent, relative deviation of the scaling factor, referred to the scaling factor under calibration conditions (refer to footnote<sup>5</sup>).

<sup>7</sup> The maximum amplitude of the distortion refers to the full scale. An exception of which is a single peak, generated by the optical sensor, in the frequency region 20...25 kHz, whose amplitude depends on the stand-off distance.

Tabulka A.1: Rozsahy analogového rychlostního dekodéru VD-02 (OFV-5000)

Measurement range	1	2 (LP)	2	$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{V}}$
Full scale (peak)	0,01	0,02	0,02	m/s
Frequency range				
$f_{\text{min}}$	0	0	0	Hz
$f_{\text{max}}$	20	100	350	kHz
Max. acceleration	128	1280	4500	g
Frequency response <sup>1</sup>				
0.05 Hz ... 14 kHz	±0,05	-	-	dB
14 kHz ... 20 kHz	+0.05/-1	-	-	dB
0.05 Hz ... 50 kHz	-	±0,05	-	dB
50 kHz ... 100 kHz	-	+0.05/-1	-	dB
0.05 Hz ... 250 kHz	-	-	±0,05	dB
250 kHz ... 300 kHz	-	-	+0.05/-0.4	dB
300 kHz ... 350 kHz	-	-	+0.05/-1.5	dB
Resolution <sup>2</sup>				
frequency-dependent <sup>3</sup>	<0,02	0.01 ... 0.04	0.01 ... 0.1	$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{Hz}}$
typically <sup>4</sup>	0,01	0,02	0,05	$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{Hz}}$
Frequency-dependent phase shift $p_D$ (typ.)	-45,8	-3,96		°/kHz
Signal delay $t_D$ (typ.)	127	11,0		μs
Calibration error <sup>5</sup>				
$T_a = +5^\circ\text{C} \dots +40^\circ\text{C}$ ( $T_a = 41^\circ\text{F} \dots 104^\circ\text{F}$ )	±1	±1		%
Linearity error <sup>6</sup>	< 0.1	< 0.1		%
Harmonic distortions	< -50	< -54		dBc
Spurious signals (non-harmonic) <sup>7</sup>	< -80	< -86		dBFS

<sup>1</sup> The frequency response defines the frequency-dependent amplitude error, referred to the reference frequency of 1 kHz.

<sup>2</sup> The noise-limited resolution is defined as the signal amplitude (rms) at which the signal-to-noise ratio is 0 dB with 1 Hz spectral resolution, measured on 3M Scotchlite Tape® (reflective film).

<sup>3</sup> The attainable resolution is frequency-dependent and is specified for frequencies above 10 Hz.

<sup>4</sup> The typical value refers to the center of the operating frequency range.

<sup>5</sup> Conditions: sinusoidal vibration,  $f = 1$  kHz, amplitude 70% of full scale range, load resistance  $\geq 1$  MΩ

<sup>6</sup> The linearity error is defined as the amplitude-dependent, relative deviation of the scaling factor, referred to the scaling factor under calibration conditions (refer to footnote<sup>5</sup>).

<sup>7</sup> The maximum amplitude of the distortion refers to the full scale. An exception of which is a single peak, generated by the optical sensor, in the frequency region 20 ... 25 kHz, whose amplitude depends on the stand-off distance.

*Tabulka A.2: Rozsahy digitálního rychlostního dekodéru VD-06 (OFV-5000) – 1/2*

Measurement range	10 (LP)	10	50 (LP)	50	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}/\text{V}$
Full scale (peak)	0,1	0,1	0,5	0,5	m/s
Frequency range					
$f_{\min}$	0	0	0	0	Hz
$f_{\max}$	100	350	100	350	kHz
Max. acceleration	6400	22000	32000	110000	g
Frequency response <sup>1</sup>					
0.05 Hz ... 14 kHz	-	-	-	-	dB
14 kHz ... 20 kHz	-	-	-	-	dB
0.05 Hz ... 50 kHz	$\pm 0,05$	-	$\pm 0,05$	-	dB
50 kHz ... 100 kHz	+0.05/-1	-	+0.05/-1	-	dB
0.05 Hz ... 250 kHz	-	$\pm 0,05$	-	$\pm 0,05$	dB
250 kHz ... 300 kHz	-	+0.05/-0.3	-	+0.05/-0.1	dB
300 kHz ... 350 kHz	-	+0.05/-1	-	+0.05/-1	dB
Resolution <sup>2</sup>					
frequency-dependent <sup>3</sup>	0.01 ... 0.04	0.01 ... 0.1	0.04 ... 0.2	0.04 ... 0.2	$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{Hz}}$
typically <sup>4</sup>	0,02	0,05	0,05	0,06	$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{Hz}}$
Frequency-dependent phase shift $p_D$ (typ.)	-3,96		-3,96		°/kHz
Signal delay $t_D$ (typ.)	11,0		11,0		$\mu\text{s}$
Calibration error <sup>5</sup>					
$T_a = +5^\circ\text{C} \dots +40^\circ\text{C}$ ( $T_a = 41^\circ\text{F} \dots 104^\circ\text{F}$ )	$\pm 1$		$\pm 1$		%
Linearity error <sup>6</sup>	< 0.1		< 0.1		%
Harmonic distortions	< -54		< -54		dBc
Spurious signals (non-harmonic) <sup>7</sup>	< -90		< -90		dBFS

<sup>1</sup> The frequency response defines the frequency-dependent amplitude error, referred to the reference frequency of 1 kHz.

<sup>2</sup> The noise-limited resolution is defined as the signal amplitude (rms) at which the signal-to-noise ratio is 0 dB with 1 Hz spectral resolution, measured on 3M Scotchlite Tape® (reflective film).

<sup>3</sup> The attainable resolution is frequency-dependent and is specified for frequencies above 10 Hz.

<sup>4</sup> The typical value refers to the center of the operating frequency range.

<sup>5</sup> Conditions: sinusoidal vibration,  $f = 1 \text{ kHz}$ , amplitude 70% of full scale range, load resistance  $\geq 1 \text{ M}\Omega$

<sup>6</sup> The linearity error is defined as the amplitude-dependent, relative deviation of the scaling factor, referred to the scaling factor under calibration conditions (refer to footnote<sup>5</sup>).

<sup>7</sup> The maximum amplitude of the distortion refers to the full scale. An exception of which is a single peak, generated by the optical sensor, in the frequency region 20 ... 25 kHz, whose amplitude depends on the stand-off distance.

*Tabulka A.3: Rozsahy digitálneho rýchlostného dekodéru VD-06 (OFV-5000) – 2/2*

Measurement range $\mu\text{m}/\text{V}$	Full scale <sup>1</sup> (peak-to-peak) $\mu\text{m}$	Resolution <sup>2</sup> (rounded) nm	Frequency range <sup>3</sup> kHz
0,05	1	0,015	0 ... 350
0,1	2	0,03	0 ... 350
0,2	4	0,06	0 ... 350
0,5	10	0,15	0 ... 350
1	20	0,3	0 ... 350
2	40	0,6	0 ... 350
5	100	1,5	0 ... 350
10	200	3	0 ... 350
20	400	6	0 ... 350
50	1000	15	0 ... 350
100	2000	30	0 ... 350
200	4000	60	0 ... 350
500	10000	150	0 ... 350
1000	20000	300	0 ... 350
2000	40000	600	0 ... 350
5000	100000	1500	0 ... 350

<sup>1</sup> The full scale values correspond to  $\pm 10$  V (peak-to-peak) maximum output voltage.

<sup>2</sup> The resolution corresponds to the quantization step of approx. 0.4 mV at the analog output.

<sup>3</sup> When a suitable measurement range has been selected for the digital velocity decoder

*Tabulka A.4: Rozsahy digitálneho dekodéru posunutí DD-500 (OFV-5000)*

measurement range <sup>1</sup> full scale (peak) mm/s	Scaling factor (analog output) $\frac{\text{mm}}{\text{s}}/\text{V}$	Resolution <sup>2</sup> $\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/(\sqrt{\text{Hz}})$	Maximum acceleration m/s <sup>2</sup>
20	5	< 0.02	2760
100	25	< 0.02	13800
500	125	< 0.1	69000

<sup>1</sup> adjustable via the display

<sup>2</sup> The resolution is defined as the signal amplitude (rms) at which the signal-to-noise ratio is 0dB in a 1 Hz spectral bandwidth (RBW), measured on 3M Scotchlite Tape® (reflective film).

*Tabulka A.5: Rozsahy vibrometru PDV-100*

Measurement range	2	5	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}/\text{V}$
Full scale (peak)	20	50	mm/s
Frequency range			
$f_{\text{min}}$	0	0	Hz
$f_{\text{max}}$	100	100	kHz
Max. acceleration	1280	3200	g
Frequency response <sup>1</sup>			
0.05 Hz... 50 kHz	±0.1		dB
50 kHz... 100 kHz	+0.1/-1		dB
Resolution <sup>2</sup>			
frequency-dependent <sup>3</sup>	0.01 ... 0.05		$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{Hz}}$
typically <sup>4</sup>	0.02		$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{Hz}}$
Frequency-dependent phase shift $p_D$ (typ.)	-4		°/kHz
Delay time $t_D$ (typ.)	11		μs
Calibration error <sup>5</sup>			
$T_a = 5^\circ\text{C} \dots 40^\circ\text{C}$ ( $T_a = 41^\circ\text{F} \dots 104^\circ\text{F}$ )	±1		%
Linearity error <sup>6</sup>	< 0.1		%
Harmonic distortions <sup>7</sup>	< -54	< -44	dBc
Spurious signals (non-harmonic)	< -86		dBFS

<sup>1</sup> The frequency response defines the frequency-dependent amplitude error, referred to the reference frequency of 1 kHz.

<sup>2</sup> The noise-limited resolution is defined as the signal amplitude (rms) at which the signal-to-noise ratio is 0 dB with 1 Hz spectral resolution, measured on 3M Scotchlite® Tape (reflective film).

<sup>3</sup> The attainable resolution is frequency-dependent and is specified for frequencies from 10 Hz.

<sup>4</sup> The typical value refers to the center of the operating frequency range.

<sup>5</sup> Conditions: sinusoidal vibration,  $f = 1$  kHz, amplitude 70% of full scale range, load resistance  $\geq 1 \text{ M}\Omega$

<sup>6</sup> The linearity error is defined as the amplitude-dependent, relative deviation of the scaling factor, referred to the scaling factor under calibration conditions (refer to footnote<sup>2</sup>).

<sup>7</sup> The maximum amplitude of the distortion refers to the full scale. An exception of which is a single peak, generated by optical sensor, in the frequency region 20...25 kHz, whose amplitude depends on the stand-off distance.

Tabulka A.6: Rozsahy vibrometru CLV-2534-4 – 1/2

Measurement range	10	20	50	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}/\text{V}$
Full scale (peak)	100	200	500	mm/s
Frequency range				
$f_{\min}$	0	0	0	Hz
$f_{\max}$	100	100	100	kHz
Max. acceleration	6400	12800	32000	g
Frequency response <sup>1</sup>				
0.05 Hz... 50 kHz	$\pm 0.1$			
50 kHz... 100 kHz	$+0.1/-1$			dB
Resolution <sup>2</sup>				
frequency-dependent <sup>3</sup>	0.01... 0.1	0.02... 0.1	0.04... 0.2	$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{Hz}}$
typically <sup>4</sup>	0.05	0.06	0.06	$\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}/\sqrt{\text{Hz}}$
Frequency-dependent phase shift $p_D$ (typ.)	-4			$^\circ/\text{kHz}$
Delay time $t_D$ (typ.)	11			$\mu\text{s}$
Calibration error <sup>5</sup>				
$T_a = 5^\circ\text{C} \dots 40^\circ\text{C}$ ( $T_a = 41^\circ\text{F} \dots 104^\circ\text{F}$ )	$\pm 1$			%
Linearity error <sup>6</sup>	< 0.1			%
Harmonic distortions <sup>7</sup>	< -54			dBc
Spurious signals (non-harmonic)	< -90			dBFS

<sup>1</sup> The frequency response defines the frequency-dependent amplitude error, referred to the reference frequency of 1 kHz.

<sup>2</sup> The noise-limited resolution is defined as the signal amplitude (rms) at which the signal-to-noise ratio is 0 dB with 1 Hz spectral resolution, measured on 3M Scotchlite® Tape (reflective film).

<sup>3</sup> The attainable resolution is frequency-dependent and is specified for frequencies from 10 Hz.

<sup>4</sup> The typical value refers to the center of the operating frequency range.

<sup>5</sup> Conditions: sinusoidal vibration,  $f = 1 \text{ kHz}$ , amplitude 70% of full scale range, load resistance  $\geq 1 \text{ M}\Omega$

<sup>6</sup> The linearity error is defined as the amplitude-dependent, relative deviation of the scaling factor, referred to the scaling factor under calibration conditions (refer to footnote<sup>2</sup>).

<sup>7</sup> The maximum amplitude of the distortion refers to the full scale. An exception of which is a single peak, generated by optical sensor, in the frequency region 20...25 kHz, whose amplitude depends on the stand-off distance.

Tabulka A.7: Rozsahy vibrometru CLV-2534-4 – 2/2

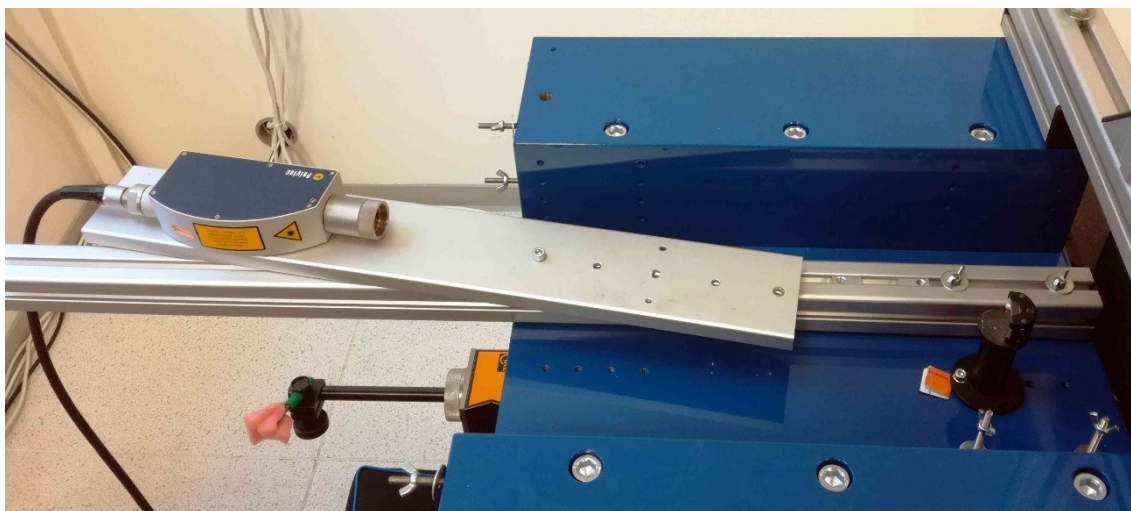
## PŘÍLOHA B: DODATKY K MĚŘENÍ



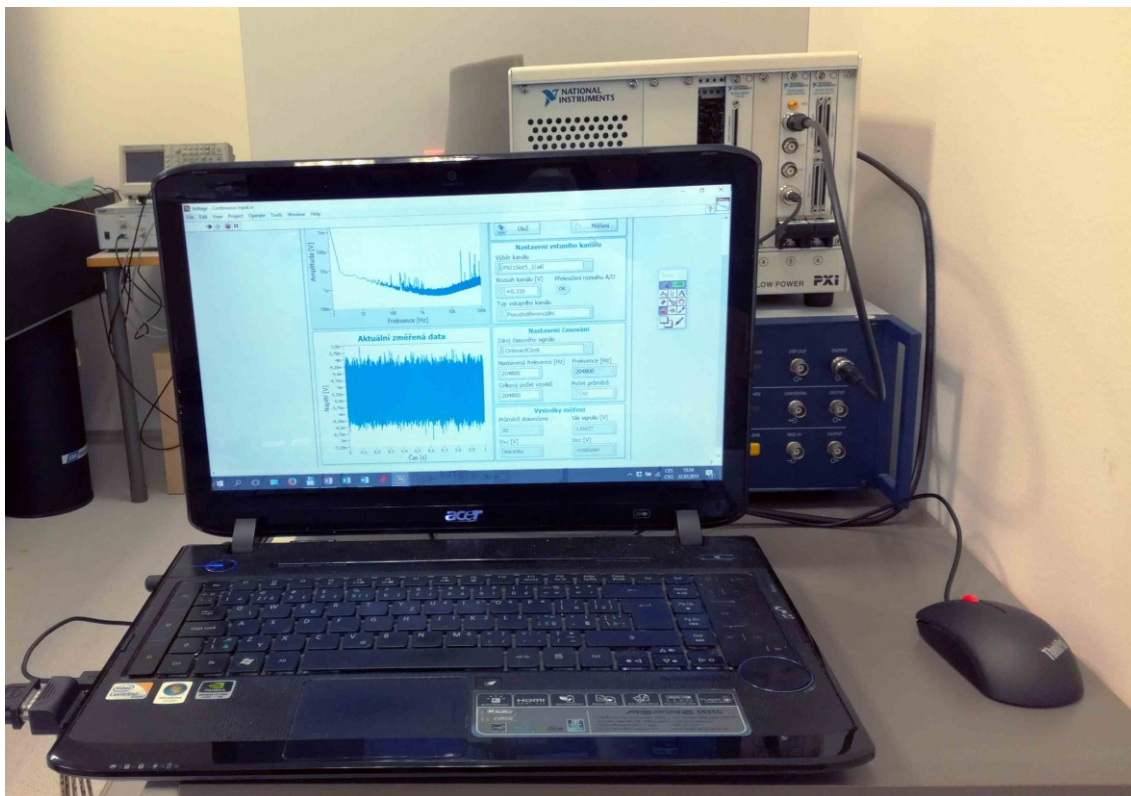
*Obrázek B.1: Měření vlastního šumu vibrometru PDV-100*



*Obrázek B.2: Měření vlastního šumu vibrometru OFV-505/5000*



*Obrázek B.3: Měření vlastního šumu vibrometru CLV-2534*

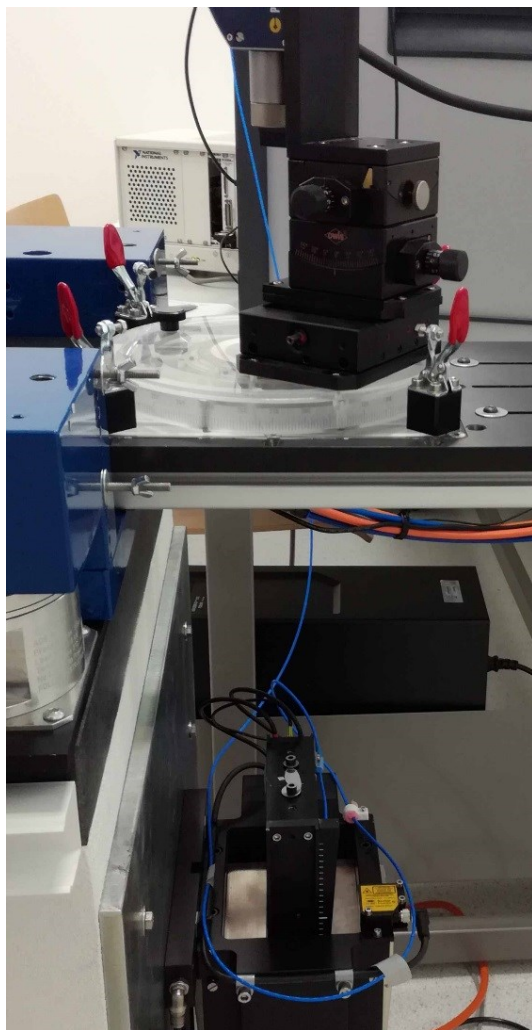


*Obrázek B.4: Záznam dat, v pozadí dekodér OFV-5000 a PXI-1033.*

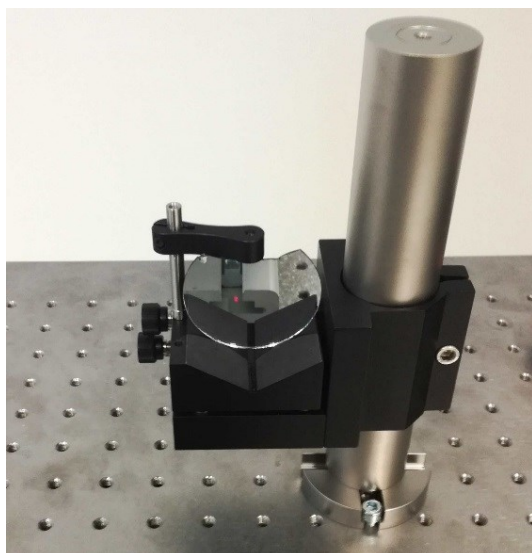


*Obrázek B.5: Měření koherenčního šumu pomocí vibrometru CLV-2534*





*Obrázek B.6: Dynamické měření výchylky pomocí vibrometru CLV-2534*



*Obrázek B.7: Odrazka pro měření závislosti šumu a úrovně odraženého paprsku v čase*

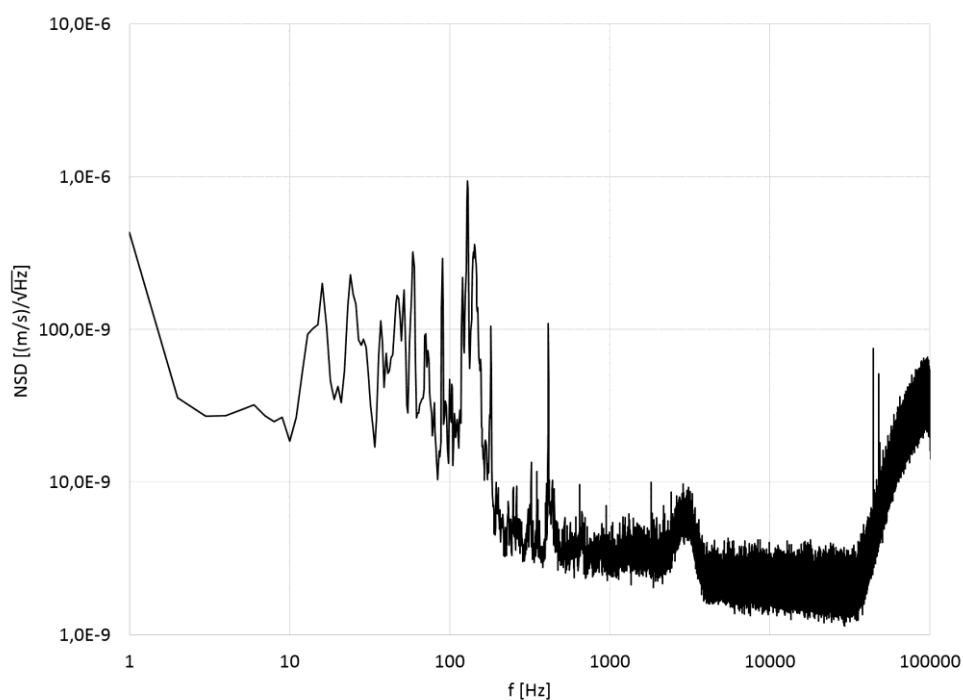
*Tabulka B.1: Podmínky měření*

Datum	Teplota [°C]	Vlhkost [%]	Tlak [hPa]	Popis
22.2.2017	22,5	30,5	1013,2	NI 4462: Měření všech rozsahů
1.3.2017	23,0	30,3	998,6	OFV-505/5000: Měření vlastního šumu, viditelných maxim, úrovně odraženého signálu
2.3.2017	23,3	29,9	1001,8	PDV-100: Měření vlastního šumu, viditelných maxim, úrovně odraženého signálu
8.3.2017	24,5	29,2	1016,0	CLV-2534: Měření vlastního šumu, viditelných maxim, úrovně odraženého signálu
16.3.2017	24,2	27,5	1024,9	OFV-505/5000: Měření časové změny úrovně odraženého paprsku a jeho korelace s šumem
11.4.2017	23,6	28,1	1019,5	CLV-2534: Dynamické měření (SNR), měření koherenčního šumu
12.4.2017	22,8	31,5	1019,0	CLV-2534: Dokončení měření koherenčního šumu

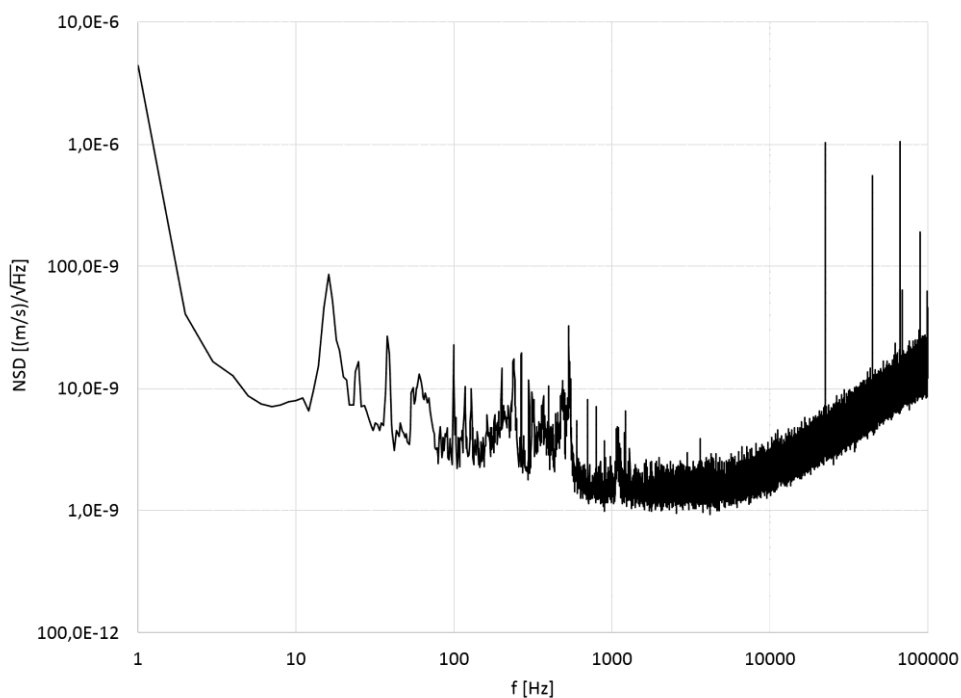
*Tabulka B.2: Seznam použitých přístrojů*

Přístroj	Sériové číslo
Vibrometr CLV-2534-FG4	165759
Vibrometr OFV-505	101999
Dekodér OFV-5000	0101998
Vibrometr PDV-100	0173415
Měřicí ústředna PXI-1033	13617EB
Funkční generátor TGP3100	419938

## PŘÍLOHA C: NEODTLUMENÉ PROSTŘEDÍ

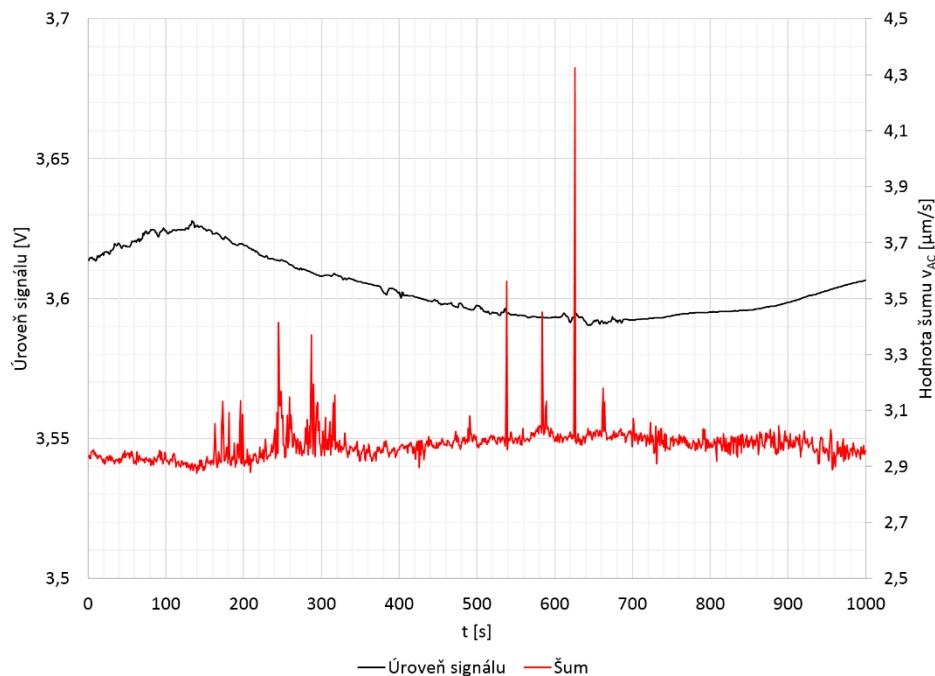


Obrázek C.1: Spektrální hustota šumu vibrometru PDV-100 na citlivosti 5 mm/s/V, bez užití optického stolu

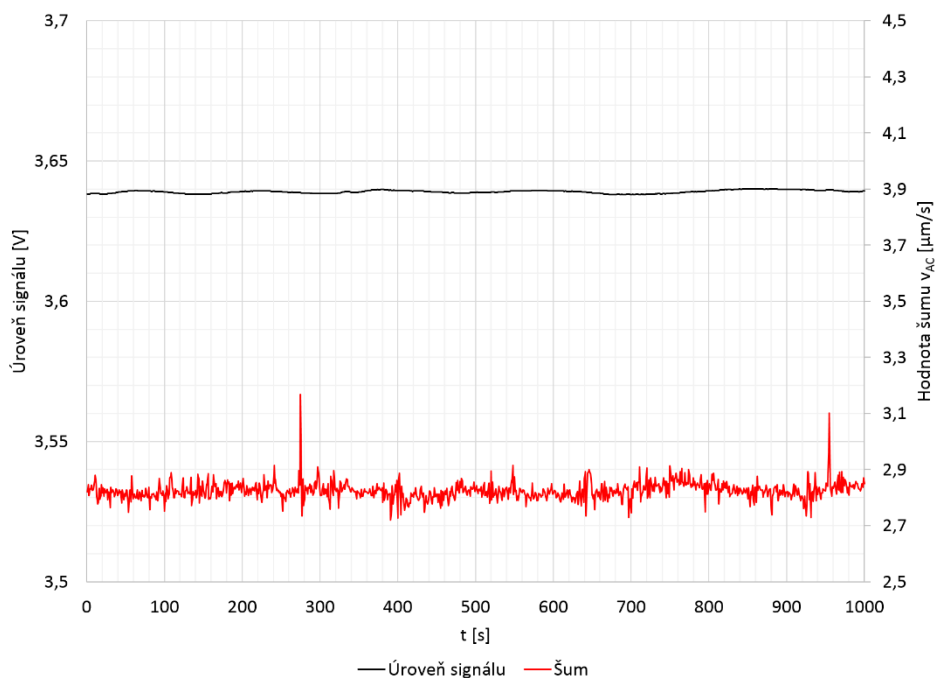


Obrázek C.2: Spektrální hustota šumu vibrometru OFV-505/5000 s dekodérem VD-06 na citlivosti 2 mm/s/V, bez užití optického stolu

## PŘÍLOHA D: ÚROVEŇ SIGNÁLU A JEHO KORELACE S ŠUMEM



Obrázek D.1: Časová změna úrovně odraženého signálu a jeho korelace s šumem pro vzdálenost 489 mm, korelační koeficient roven hodnotě  $-0,39$



Obrázek D.2: Časová změna úrovně odraženého signálu a jeho korelace s šumem pro vzdálenost 438 mm (viditelné maximum), korelační koeficient roven hodnotě  $-0,10$

# PŘÍLOHA E: KOHERENČNÍ ZRNITOST

Tabulka E.1: Koherenční zrnitost vypočtená z frekvenčního spektra – 1/3

f = 0 Hz			
Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]
0	20	10	10
1	239	238	238
2			
3	8	3	3
4	23	16	16
5	18	5	5
6	215	215	215

f = 5 Hz									
Výchylka = 1 μm					Výchylka = 5 μm				
Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-5 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]	Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-5 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]
0	9	9	6	6	0	10	10	7	7
1					1	232	232	232	232
2	13	13	10	10	2	17	16	6	6
3	16	16	3	3	3	8	8	3	3
4	34	34	33	33	4	26	26	21	21
5	45	45	45	45	5				
6	291	291	291	291	6	293	293	293	293

Výchylka = 50 μm					Výchylka = 250 μm				
Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-5 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]	Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-5 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]
0	12	11	7	7	0	15	11	7	7
1	189	189	188	188	1	235	235	234	233
2	21	21	19	19	2	48	47	43	38
3	17	17	3	3	3	18	16	3	3
4	29	29	28	28	4	60	59	58	53
5	71	71	71	71	5	47	42	39	36
6	548	548	548	548	6	920	919	919	919

Poznámka: Šumové hodnoty odpovídají efektivním hodnotám získaných z frekvenčního spektra viz rovnice (28)

V<sub>FFT</sub> – Celkový šum po odstranění stejnosměrné složky

V<sub>FFT-x Hz</sub> – Šum po odfiltrování složky budící frekvence x Hz

V<sub>100 Hz</sub> – Šum po odfiltrování složek do 100 Hz

V<sub>1 kHz</sub> – Šum po odfiltrování složek do 1 kHz

Popis vzorků: 0 – lesklá fólie, 1 – dural, 2 – 3M Scotchlite, 3 – zrcadlo, 4 – koutový odražeč 1, 5 – koutový odražeč 2, 6 – textilní páska

Tabulka E.2: Koherenční zrnitost vypočtená z frekvenčního spektra – 2/3

f = 30 Hz									
Výchylka = 1 μm					Výchylka = 5 μm				
Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-30 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]	Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-30 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]
0	17	16	5	5	0	31	17	5	5
1	161	161	160	160	1	144	141	141	141
2	20	19	9	9	2	49	40	37	37
3	11	10	3	3	3	32	16	3	3
4	24	24	19	19	4	35	22	18	17
5	43	42	42	42	5	59	52	51	51
6	435	435	435	435	6	372	371	371	371
Výchylka = 50 μm					Výchylka = 250 μm				
Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-30 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]	Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-30 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]
0	209	10	7	6	0	731	46	32	30
1	304	219	218	217	1	1 110	849	849	843
2	225	34	28	15	2	766	102	99	64
3	219	10	4	4	3	755	18	6	6
4	224	64	62	56	4	768	210	208	188
5	253	99	97	94	5	786	216	213	184
6	556	504	504	504	6	1 079	798	797	793
f = 90 Hz									
Výchylka = 1 μm					Výchylka = 5 μm				
Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-90 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]	Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-90 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]
0	17	17	5	5	0	13	9	5	5
1	77	77	76	76	1	75	75	74	74
2	435	435	434	433	2	161	160	159	154
3	7	7	3	3	3	18	17	3	3
4	20	20	19	19	4	21	19	16	16
5	78	78	77	77	5	56	54	51	51
6	310	310	309	309	6	310	310	309	309

Poznámka: Šumové hodnoty odpovídají efektivním hodnotám získaných z frekvenčního spektra viz rovnice (28)

V<sub>FFT</sub> – Celkový šum po odstranění stejnosměrné složky

V<sub>FFT-x Hz</sub> – Šum po odfiltrování složky budící frekvence x Hz

V<sub>100 Hz</sub> – Šum po odfiltrování složek do 100 Hz

V<sub>1 kHz</sub> – Šum po odfiltrování složek do 1 kHz

Popis vzorků: 0 – lesklá fólie, 1 – dural, 2 – 3M Scotchlite, 3 – zrcadlo, 4 – koutový odražeč 1, 5 – koutový odražeč 2, 6 – textilní páska

Tabulka E.3: Koherenční zrnitost vypočtená z frekvenčního spektra – 3/3

f = 0 Hz, rozostřené o celou otáčku			
Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]
0	126	125	125
1	X	X	X
2	330	330	330
3	22	18	18
4	55	53	53
5	58	55	55
6	X	X	X

f = 5 Hz									
Výchylka = 250 μm, rozostřené o celou otáčku					Výchylka = 250 μm, rozostřené o půl otáčky				
Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-5 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]	Vzorek [-]	V <sub>FFT</sub> [μm/s]	V <sub>FFT-5 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>100 Hz</sub> [μm/s]	V <sub>1 kHz</sub> [μm/s]
0	283	283	282	282	0	209	209	208	208
1	X	X	X	X	1	526	526	526	526
2	100	100	97	92	2	47	46	41	34
3	25	24	19	19	3	19	17	9	9
4	101	101	100	98	4	99	98	96	91
5	105	104	102	99	5	69	68	65	62
6	X	X	X	X	6	X	X	X	X

Poznámka: Šumové hodnoty odpovídají efektivním hodnotám získaných z frekvenčního spektra viz rovnice (28)

V<sub>FFT</sub> – Celkový šum po odstranění stejnosměrné složky

V<sub>FFT-x Hz</sub> – Šum po odfiltrování složky budící frekvence x Hz

V<sub>100 Hz</sub> – Šum po odfiltrování složek do 100 Hz

V<sub>1 kHz</sub> – Šum po odfiltrování složek do 1 kHz

Popis vzorků: 0 – lesklá fólie, 1 – dural, 2 – 3M Scotchlite, 3 – zrcadlo, 4 – koutový odražeč 1, 5 – koutový odražeč 2, 6 – textilní páska