



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**ANALÝZA VIBRACÍ POMOCÍ AKCELEROMETRU  
MOBILNÍHO TELEFONU**

VIBRATION ANALYSIS USING A MOBILE PHONE ACCELEROMETER

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Tomáš Robek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Daniel Zuth, Ph.D.**

**BRNO 2021**



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Tomáš Robek</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	<b>Ing. Daniel Zuth, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Analýza vibrací pomocí akcelerometru mobilního telefonu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce se bude zabývat možnostmi využití signálu z akcelerometru mobilního telefonu pro analýzu vibrací. Kromě rešeršní části bude práce obsahovat i praktickou ukázkou zpracování a vyhodnocení naměřených dat. Výsledky budou porovnány s měřicí technikou používanou v praxi.

### **Cíle bakalářské práce:**

Rešerše v oblasti snímačů zrychlení (principy a použití).

Popis snímačů používaných v mobilních telefonech.

Popis dostupného SW pro sběr dat z akcelerometru.

Provést opakované měření.

Vyhodnocení měření.

Porovnání s ostatní měřicí technikou.

Vlastní závěr a doporučení pro praxi.

### **Seznam doporučené literatury:**

BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.

CHUDÝ, Vladimír, Rudolf PALENČÁR, Eva KUREKOVÁ a Martin HALAJ. Meranie technických veličín. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 8022712752.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

V této bakalářské práci se zabývám otázkou, zda lze pro měření vibrací použít mobilní telefon. Z tohoto důvodu jsem provedl experiment k porovnání dat naměřených mobilním telefonem s hodnotami naměřenými profesionální měřicí technikou. Dále jsem se zaměřil na vyhledání nejčastěji používaných akcelerometrů v mobilních telefonech a v neposlední řadě na nalezení a porovnání vhodných aplikací na zaznamenání vibrací mobilním telefonem.

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the question whether or not measurements of vibrations can be taken with a mobile phone. For that purpose I made an experiment to compare data measured with a mobile phone and data measured with professional gauging equipment. I also focused on finding the most commonly used accelerometer in mobile phones as well as on finding and comparing suitable mobile apps for recording vibrations with mobile phones.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vibrace, vibrodiagnostika, akcelerometr, analýza dat

## **KEYWORDS**

Vibration, vibrodiagnostics, accelerometer, data analysis



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ROBEK, Tomáš. *Analýza vibrací pomocí akcelerometru mobilního telefonu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132684>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Daniel Zuth.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, panu Ing. Zuthovi Ph.D., za jeho profesionální a vstřícné vedení při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině za neutuchající podporu při mém studiu.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana Ing. Daniela Zutha Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20. 5. 2021

.....

Tomáš Robek



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>VIBRODIAGNOSTIKA .....</b>	<b>17</b>
2.1	Metody analýzy vibrací v časové oblasti.....	17
2.1.1	Charakteristiky vibračního signálu .....	17
2.1.2	Činitel výkmitu (crest factor).....	19
2.1.3	Celkové vibrace stroje .....	20
2.1.4	Kinematická dráha hřídele .....	20
2.2	Metody analýzy vibrací ve frekvenční oblasti.....	20
2.2.1	Fourierova transformace (DFT, FFT).....	21
<b>3</b>	<b>SNÍMAČE VIBRACÍ .....</b>	<b>25</b>
3.1	Absolutní senzor vibrací .....	25
3.2	Relativní senzor vibrací .....	25
3.3	Snímače výchylky, polohy a posuvu .....	26
3.4	Snímače rychlosti.....	27
3.5	Snímače zrychlení.....	28
3.5.1	Piezoelektrický akcelerometr.....	28
3.5.2	Piezorezistivní akcelerometr.....	29
3.5.3	Kapacitní akcelerometr .....	29
<b>4</b>	<b>AKCELEROMETRY POUŽÍVANÉ V MOBILNÍCH TELEFONECH.....</b>	<b>31</b>
4.1	Bosch Ssortec .....	31
4.1.1	BMA 455 .....	31
4.2	InvenSense.....	31
4.2.1	ICM – 42605 .....	32
4.2.2	ICM –20948.....	32
4.3	STMicroelectronics.....	32
4.3.1	LIS2DH12.....	32
<b>5</b>	<b>APLIKACE PRO ZAZNAMENÁVÁNÍ VIBRACÍ.....</b>	<b>33</b>
5.1	Mobilní aplikace Phyphox .....	33
5.2	Mobilní aplikace iNVH .....	33
5.3	Mobilní aplikace Sensor Logger.....	34
5.4	Mobilní aplikace Matlab.....	34
<b>6</b>	<b>POPIS EXPERIMENTU.....</b>	<b>35</b>
6.1	Použité přístroje .....	35
6.2	Rozdělení měření .....	36
<b>7</b>	<b>NÁVRH ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....</b>	<b>39</b>
8.1	Vyhodnocení dat při měření bez nevývahy .....	39
8.1.1	Měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz.....	39
8.1.2	Měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 32,9 Hz.....	40
8.1.3	Měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 41,1 Hz.....	41
8.2	Vyhodnocení dat při měření s jednou nevývahou .....	42
8.2.1	Vyhodnocení dat při měření s jednou nevývahou s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz .	42
8.2.2	Vyhodnocení dat při měření s jednou nevývahou s otáčkovou frekvencí 33,1 Hz .	43
8.2.3	Vyhodnocení dat při měření s jednou nevývahou s otáčkovou frekvencí 41,3 Hz .	44

8.3	Vyhodnocení dat při měření se dvěma nevývahami .....	45
8.3.1	Vyhodnocení dat při měření se dvěma nevývahami s otáčkovou frekvencí 24,8 Hz .....	45
8.3.2	Vyhodnocení dat při měření se dvěma nevývahami s otáčkovou frekvencí 32,8 Hz .....	46
8.3.3	Vyhodnocení dat při měření se dvěma nevývahami s otáčkovou frekvencí 40,9 Hz .....	47
8.4	Vyhodnocení dat při měření s nevývahou a uvolněnou základnou .....	48
8.4.1	Vyhodnocení dat při měření s nevývahou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 24,4 Hz .....	48
8.4.2	Vyhodnocení dat při měření s nevývahou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 33,2 Hz .....	49
8.4.3	Vyhodnocení dat při měření s nevývahou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 42,1 Hz .....	50
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>51</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>53</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....</b>	<b>55</b>
11.1	Seznam obrázků .....	55
11.2	Seznam tabulek .....	56
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>57</b>

# 1 ÚVOD

Žijeme v době, kdy věda i technika jdou neuvěřitelně rychle kupředu. Nastolené tempo se nevyhýbá ani strojírenskému odvětví. Proto se neustále zvyšují nároky i na jednotlivé firmy. Aby se firmy udržely v konkurenceschopném stavu, musí investovat nemalé peníze do modernizace managementu údržby, a tudíž i do diagnostiky svých výrobních zařízení.

Nedílnou součástí diagnostiky je, mimo jiné, i vibrodiagnostika, která nám napomáhá udržet stroje v provozuschopném stavu a tím eliminovat ztráty vzniklé poruchou a následnou odstávkou stroje z technických důvodů.

Úroveň vibrodiagnostiky roste, nebo naopak klesá v závislosti na používaných snímačích, podmínkách při diagnostice, způsobu zpracování naměřených dat a dalších okolnostech. S ohledem na nutnost vynaložit velké náklady na chod diagnostiky vyplouvá na povrch snaha o minimalizaci nákladů při zachování úrovně diagnostiky.

V této práci se zabývám otázkou, zda lze prostřednictvím klasických mobilních telefonů, které každý z nás denně používá, diagnostikovat propukávající závadu na strojím zařízení, nebo alespoň určit, do jaké míry lze brát tato data v potaz.

V rešeršní části práce jsem se zabýval jednotlivými druhy snímačů vibrací, možnostmi analyzování naměřených dat a také mobilními aplikacemi, které nám dovolují měřit vibrace za pomoci akcelerometrů nacházejících se v mobilních telefonech.

V experimentální části jsem provedl analýzu dat naměřených za pomoci mobilního telefonu a porovnal je s daty zaznamenanými běžnou měřicí technikou používanou v praxi pro diagnostiku vibrací. K tomuto účelu jsem použil vibrodiagnostický přístroj, který má k dispozici ÚVSSR.

V závěru bakalářské práce jsem zhodnotil naměřené výsledky a vyjádřil se k výhodám i nevýhodám, které se týkají měření vibrací pomocí mobilního telefonu.





## 2 VIBRODIAGNOSTIKA

Technická diagnostika je samostatný vědní obor skládající se z několika jednotlivých podoborů. Jedním z těchto podoborů je právě vibrodiagnostika. Vibrodiagnostika se zabývá způsoby měření vibrací, jejich pozdějšímu zpracování a následným vyhodnocením. Za vibrace se považuje dynamický jev, kdy hmotné body, nebo celá tuhá tělesa kmitají kolem své rovnovážné polohy. Jedná se o bezdemontážní a nedestruktivní metodu pro stanovení technického stavu sledovaného strojního zařízení. Vibrodiagnostiku lze aplikovat na převážnou většinu používaných strojích zařízení, jelikož každé strojní zařízení, které pracuje na principu rotačního pohybu, produkuje při svém provozu vibrace.

Jelikož technický stav používaného strojního zařízení přímo ovlivňuje nejen bezpečnost obsluhy, ale také ekonomické a ekologické dopady na provoz, dostala se vibrodiagnostika do popředí zájmu velkých i malých firem. Tento průlom v myšlení nastal převážně v posledních několika letech, kdy se konstruují složitější a cenově nákladnější strojní zařízení. Při správně provedené vibrační analýze, díky které lze určit technický stav objektu nebo včas odhalit vznikající závadu, se lze vyvarovat neplánovaným odstávkám stroje, které stojí firmu nemalé peníze.

### 2.1 Metody analýzy vibrací v časové oblasti

Při aplikaci analýzy naměřeného diagnostického signálu v časové oblasti se zaměřujeme na vyhodnocování parametrů časových průběhů signálů vibračních veličin (zrychlení, rychlosti nebo výchylky). Tato metoda je určena pro analýzu okamžitých, středních nebo efektivních hodnot signálu [4].

Výhodou analýzy v časové oblasti je bezpochyby její rychlost při určení technického stavu sledovaného strojního zařízení. Naměřená data se často porovnávají s předem naměřenými hodnotami, s předem určenými výstražnými hodnotami, nebo se samotnými normami. Na druhou stranu, nejsou některé z těchto metod příliš vhodné k určení konkrétního místa vznikající poruchy, a proto na ně velmi často navazují další diagnostické metody.

#### 2.1.1 Charakteristiky vibračního signálu

Jak již bylo řečeno, za vibrace se považuje dynamický jev, neboli kmitavý pohyb vykonávaný hmotným bodem, případně celým tělesem. Pro potřeby popisu časového signálu vibrací (diagnostického signálu) si jednotlivé veličiny definujeme na harmonickém kmitavém pohybu (obr. 1) i přesto, že diagnostické signály naměřené v praxi bývají mnohokrát složitější. O rozdělení signálů a jejich podrobném členění je pojednáno např. v [1, 4].

Předpis funkce pro okamžitou výchylku:

$$x(t) = x_{max} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = x_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) = x_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

Předpis funkce pro okamžitou rychlost:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \omega \cdot v_{max} \cdot \cos(\omega t) = v_{max} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

Předpis funkce pro okamžité zrychlení:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot x_{max} \cdot \sin(\omega t) = a_{max} \cdot \sin(\omega t + \pi) \quad (3)$$

V technologické praxi se pro popis naměřeného vibračního signálu mnohdy můžeme setkat i s jinými charakteristikami nežli amplitudou. Graficky jsou tyto charakteristiky znázorněny na obr. 1. Jedná se zejména o:

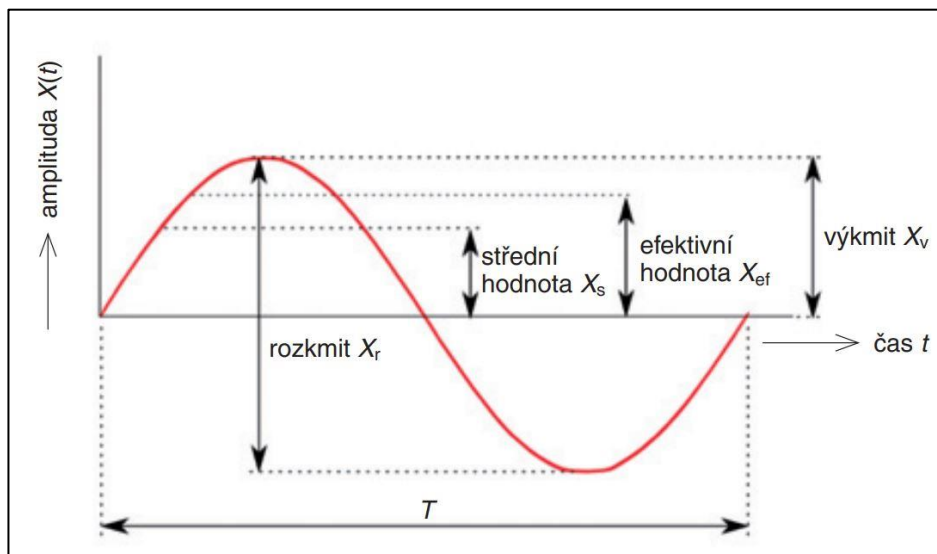
- Výkmit (špičková hodnota)  $X_v$ . Jeho hodnota je rovna maximální vzdálenosti vrcholu vlny od nulové hladiny signálu.
- Rozkmit (špička-špička)  $X_r$  představuje maximální vzdálenost dvou protilehlých vrcholů vlny signálu.
- Střední absolutní hodnota výchylky  $X_s$  představuje průměrnou hodnotu amplitudy měřené veličiny v průběhu půlvlny. Její hodnota se vypočítá dle vztahu:

$$X_s = \frac{1}{T} \int_0^T |X(t)| dt \quad (4)$$

- Efektivní hodnota (střední kvadratická hodnota, RMS)  $X_{ef}$  nebo  $X_{RSM}$  je objektivní hodnota, která nám udává informaci o výkonu kmitání. Tuto hodnotu získáme ze vztahu:

$$X_{ef} = X_{RSM} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |X^2(t)| dt} \quad (5)$$

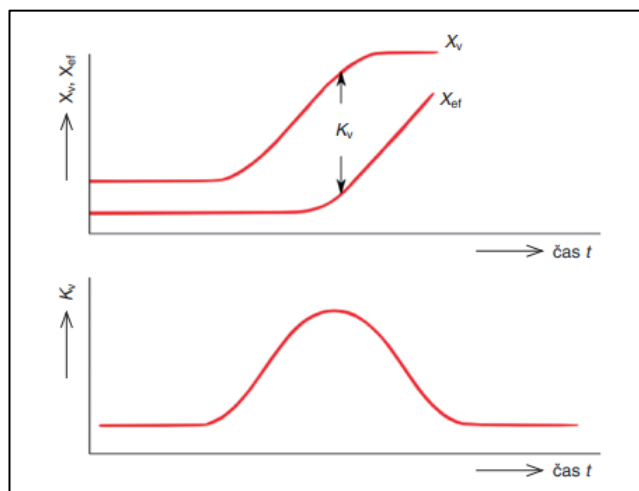
Za neznámou  $X$  v rovnicích (4) a (5) lze dosadit jakoukoliv okamžitou hodnotu měřeného signálu [1,3].



Obr. 1) Hodnotící parametry časového průběhu kmitavého pohybu (signálu) [3]

### 2.1.2 Činitel výkmitu (crest factor)

Pro stanovení technického stavu ložisek existuje poměrně dost metod. Jednou z oblíbenějších metod, je pro svoji rychlost a jednoduchost, i crest factor neboli činitel výkmitu. Jednou z výhod této metody je velmi dobrá citlivost na zachycení poškozování ložiska již v jeho prvopočátku. Naopak její zásadní nevýhodou je snižování číselné hodnoty s rostoucím poškozením sledovaného ložiska, jak lze pozorovat na obrázku 2 [1].



Obr. 2) Průběh hodnot činitele výkmitu v průběhu životnosti ložiska [3]

Při vhodně nastavené alarmové hodnotě, která je většinou v rozmezí 3,5 – 4, lze včas odhalit poškozování ložiska již v samotném zárodku, avšak metoda nám nenabízí možnost získání informací o skutečné míře poškození [3].

Stanovení hodnoty činitele výkmitu je vcelku jednoduché, jedná se o poměr výkmitu k efektivní hodnotě amplitudy.

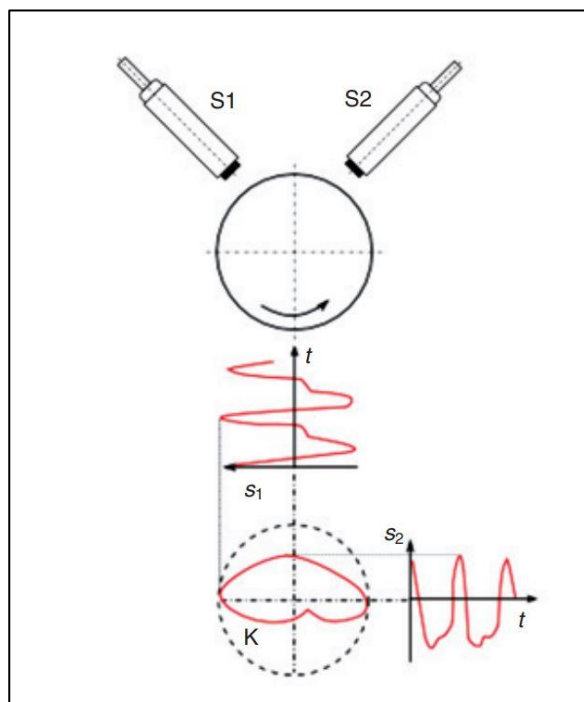
$$K_V = \frac{X_V}{X_{ef}} \quad (6)$$

### 2.1.3 Celkové vibrace stroje

Jedním z dalších způsobů, jak stanovit technický stav strojního zařízení, je metoda založená na měření celkových vibrací. Naměřené celkové vibrace jsou měřítkem celkové energie kmitavého pohybu. Provádí se měření mohutnosti vibrací neboli efektivní hodnoty rychlosti. Získaná hodnota se následně porovná s příslušnou normou nebo údajem, kdy stroj pracoval v bezporuchovém stavu. Výhodami této diagnostické metody jsou její rychlost, nízká časová náročnost a nízké náklady spojené s pořízením prostředků k diagnostice. Nespornou nevýhodou naopak je omezená možnost lokalizace zdroje vibrací stroje, tedy lokalizace vznikající poruchy. Podrobněji je metoda popsána v literatuře [3,4].

### 2.1.4 Kinematická dráha hřídele

Metoda měření kinematické dráhy je založena na dvou bezdotykových senzorech výchylky umístěných na hřídel takovým způsobem, aby osy senzorů svíraly pravý úhel. Tato metoda je zatížena chybou, která je způsobena chybou kruhovosti hřídele. Tato nepřesnost se dá eliminovat naměřenou kruhovostí hřídele při nízkých otáčkách, kterou následně zkorigujeme výsledek měření [4].



Obr. 3) Stanovení kinematické dráhy rotující hřídele ( $s_1$ ,  $s_2$  – složky výchylky snímačů  $S_1$ ,  $S_2$ ;  $K$  – kinematická dráha hřídele) [3]

## 2.2 Metody analýzy vibrací ve frekvenční oblasti

Frekvenční analýza bývá považována za další stupeň analýzy vibračního signálu a je hojně aplikována ve strojírenském průmyslu pro své různorodé využití. Další výhodou frekvenční analýzy je schopnost lokalizovat propukávající závady na sledovaném strojním zařízení, oproti analýze v časové oblasti, která nám tuto možnost nenabízí. Samozřejmě schopnost lokalizace vady je podmíněna správným aplikováním analýzy.

### 2.2.1 Fourierova transformace (DFT, FFT)

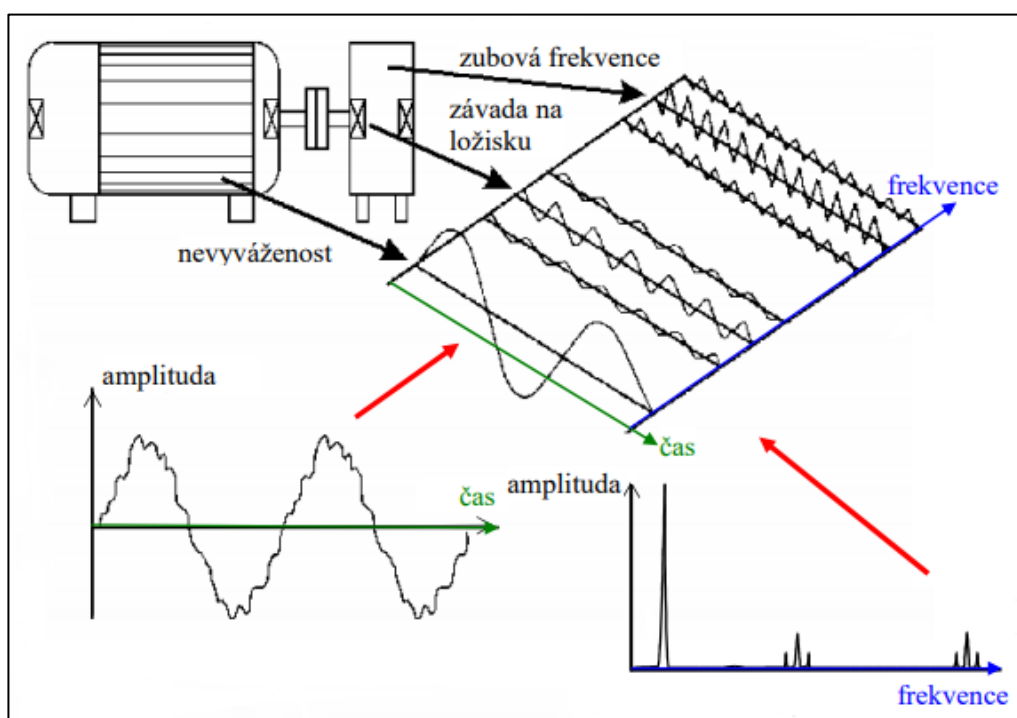
Při frekvenční analýze za pomoci Fourierovy transformace (rozkladu do Fourierovy řady) se vychází ze skutečnosti, že každá naměřená časová vlna je složena z jednotlivých dílčích časových vln, které jsou způsobeny frekvencemi jednotlivých komponentů strojního zařízení, jež vykonávají pohyb. Tento pohyb je brán jako zdroj vibrací. Jednoduchý princip skládání vln je vyobrazen na obr. 4. Podstatou transformace je možnost vyjádřit jakoukoliv periodickou funkci (signál), s periodou T, jako nekonečnou posloupnost.

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)] ; \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (7)$$

Koeficienty  $a_n$  a  $b_n$  se nazývají Fourierovy koeficienty a mohou být vypočteny dle vztahů:

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot \cos(n\omega t) dt ; b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T x(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (8)$$

Jinými slovy se dá říct, že každou periodickou funkci lze zpětně složit z nekonečně mnoha jednotlivých sinusovek, které se liší svou amplitudou. Tyto sinusovky kmitají s frekvencí, která je rovna násobku základní frekvence  $\omega$ .



Obr. 4) Ukázka princip skládání signálu [5]

V průběhu analýzy vibračního signálu v technické praxi, považujeme naměřenou funkci za periodickou v měřeném intervalu T. Ve skutečnosti naměřená funkce periodická není a před dalším zpracováním ji musíme podrobit dalším úpravám, abychom zamezili vzniku chyb, které by zapříčily zkreslení výsledků. Současné přístroje, analyzátoři, nepracují se spojitou časovou vlnou, ale převádějí měřený vibrační signál na posloupnost N diskretních hodnot, které mezi sebou mají pravidelné časové rozestupy, za pomoci A/D (analogově/číslíkového) převodníku. Tento postup nazýváme diskretizací. Diskretizovanou funkci  $x(t)$  definovanou na množině

hodnot  $N$  jednotlivých časových okamžiků  $t_k$ , kdy  $k$  nabývá hodnot od 1 do  $N$ , lze zapsat jako konečnou Fourierovu řadu:

$$x_k(=x(t_k)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} \left[ a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) \right] \quad (9)$$

V praxi se Fourierovy koeficienty častěji zobrazují ve tvaru amplitudy  $c_n$  a fáze  $\varphi_n$ . Můžeme je vypočítat dle vztahů:

$$c_n(=X_n) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad ; \quad \varphi_n = \arctg\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (10)$$

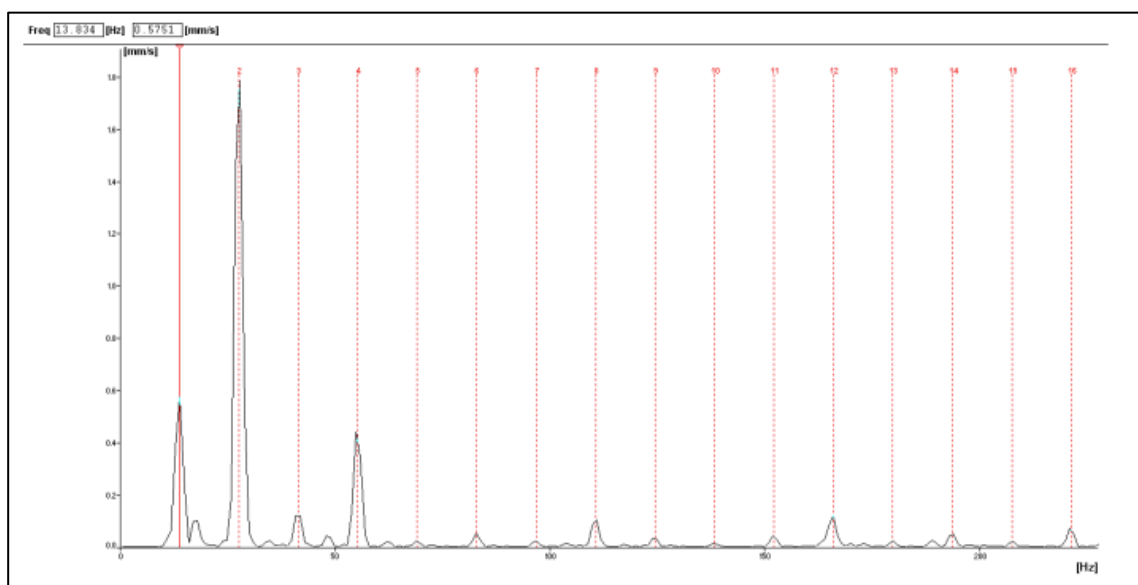
Po dosazení těchto vztahů můžeme Fourierovu řadu zapsat ve tvaru, ve kterém odpovídá předpisu diskrétní Fourierova transformace (DFT).

$$x_k(=x(t_k)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} \left[ c_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t_k}{T} + \varphi_n\right) \right] \quad (11)$$

V současné době se častěji využívají analyzátoři, které provádějí rychlou Fourierovu transformaci (FFT). Při užití FFT je počet diskrétních hodnot  $N$  celočíselnou mocninou čísla 2 při zachování všech náležitostí týkajících se diskrétní transformace [5].

Při aplikaci frekvenční analýzy je nutné dodržet pravidla, která nám zamezí vzniku chyb a následnému zkreslení výsledku. Tato pravidla i veškerou teorii týkající se Fourierovy transformace nalezneme v odborné literatuře, např. [5], [6].

Výstupem Fourierovy transformace je frekvenční spektrum vibrací, ve kterém se každý zdroj vibrací vyobrazí jako spektrální čára (sinusovka odpovídající frekvence zdroje). Z takto vyobrazeného frekvenčního spektra vibrací zkušenější diagnostik odhalí a lokalizuje závadu. Ukázka výsledného frekvenčního spektra vibrací je na obr. 5.



Obr. 5) Frekvenční spektrum rychlosti vibrací čtyřdobého čtyřválcového motoru [1]

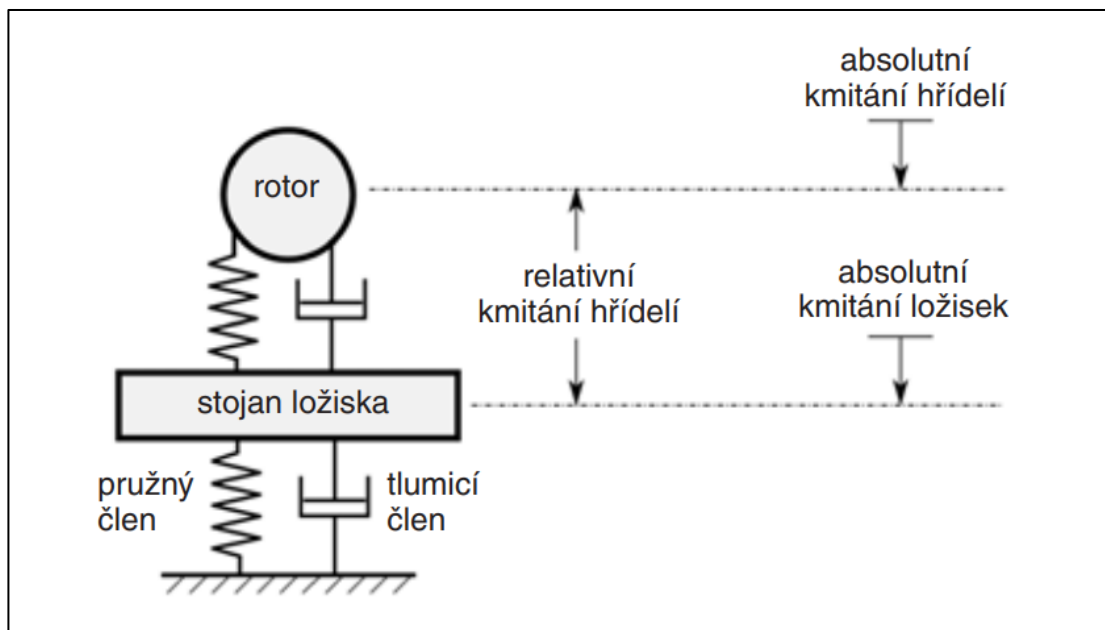
I když motory nepatří do nejčastější skupiny objektů, které podrobujeme frekvenční analýze vibrací, pro ilustraci výsledků frekvenční analýzy to bohatě postačuje. Toto frekvenční spektrum vibrací bylo naměřeno při volnoběžných otáčkách přímo na rámu stroje. Na obr. 5 je krásně vidět výrazný projev spalování paliva, který je majoritním zdrojem vibrací. Jedná se o dvojnásobek otáčkové frekvence, což je u čtyřdobého čtyřválcového motoru zcela typické [1].





## 3 SNÍMAČE VIBRACÍ

Při výběru snímače se řídíme několika kritérii. Prvotní a zcela zásadní je určení, zda se chystáme měřit relativní nebo absolutní vibrace. Naznačení rozlišení vibrací (kmitání) je vyobrazeno na obr. 6. Dle tohoto principu rozdělujeme senzory do dvou skupin, a to na snímače absolutní a snímače relativní. Jako další rozdělení snímačů se nabízí dělení dle měřené veličiny, tedy měření výchylky, rychlosti a zrychlení.



Obr. 6) Relativní a absolutní kmitý [3]

### 3.1 Absolutní senzor vibrací

Tento typ senzoru vibrací měří mechanické vibrace vůči vlastní setrvačné tzv. seismické soustavě, zpravidla vzhledem k Zemi. Z tohoto důvodu jsou někdy označovány jako seismické senzory. Absolutní senzory využíváme při měřeních přímo na konstrukci stroje, např. ložiskové skříně, jedoucí dopravní prostředky apod. Výstupem měření je tedy určení míry absolutních vibrací [4].

### 3.2 Relativní senzor vibrací

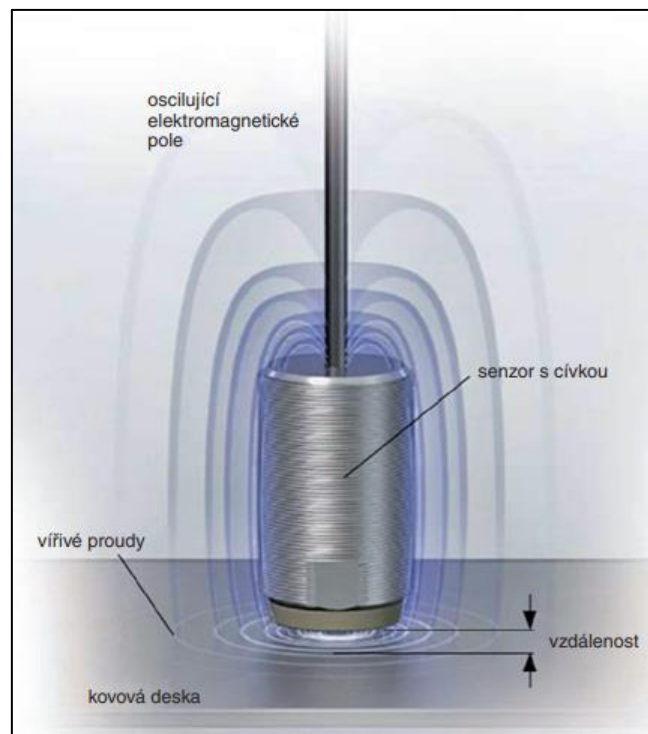
Relativními senzory měříme mechanické vibrace jedné části stroje vůči vhodně zvolené základně. Většinou se jedná o rotující a nerotující část strojního zařízení, například měření vibrací hřídele uložené v kluzných ložiskách vůči rámu stroje nebo víku ložiska. Jedná se o relativní vibrace, protože samotný konstrukční rám může dále kmitat vůči seismické soustavě. V některých případech lze také využít přenosu mechanických vibrací na lépe dostupné místo. Toto místo musí být voleno s určitou dávkou rozvahy, aby nedošlo ke zkreslení měření, a tudíž i degradaci měření. V současné době se při měření relativních vibrací využívají bezdotykové senzory [3,4].

### 3.3 Snímače výchylky, polohy a posuvu

Snímače výchylky, polohy a posuvu mohou pracovat dle několika principů. V historii se nejprve používaly snímače na mechanickém principu. Jednalo se o kontaktní mechanické kluzátko, se kterým se v současné praxi již nesetkáme. V současnosti se konstruuje snímače využívající princip indukční, indukčnostní, kapacitní, magnetický nebo optický. Nejčastěji se dnes ve vibrodiagnostice používají indukčnostní snímače zhotovené do podoby bezdotykové sondy. Tyto sondy nejvíce využívají principu na bázi vířivých neboli Foucaultových proudů [1,4].

Snímače výchylky využívající principu vířivých proudů měří vzdálenost mezi kovovým vodivým povrchem a špičkou snímače. Cívkou snímače prochází vysokofrekvenční střídavý proud, který kolem cívky vygeneruje vysokofrekvenční magnetické pole. Pokud se v tomto magnetickém poli nachází elektricky vodivý materiál, dojde v materiálu ke vzniku vířivých proudů, které generují sekundární magnetické pole. Intenzita magnetického pole vyvolaného vířivými proudy působí, dle Lenzova zákona, proti intenzitě cívky. V závislosti na vzdálenosti cívky od měřeného materiálu (nejčastěji hřídele rotoru) se intenzita magnetického pole cívky změní na výsledné magnetické pole, které je snímáno a dále zpracováváno. V případě správně zvoleného snímače a správného nastavení, je výstupní signál lineární a přímo odpovídá skutečné vzdálenosti [1].

Bezdotykové sondy jsou velice náchylné na parazitní odpory pro svůj vysokofrekvenční charakter. Z tohoto důvodu jsou i kabely vedoucí vysokofrekvenční signál vyráběny v přísné toleranci a jejich případné zkrácení či stínění povede ke znehodnocení měření. Kmitočtový rozsah tohoto snímače se obvykle pohybuje od 0 do 10 000 Hz. S těmito snímači se nejčastěji setkáme u velkých turbosoustrojích, kde se v hojně míře aplikuje orbitální analýza ke zjištění technického stavu těchto turbín nebo při měření kinematické dráhy hřídele [4,5].



Obr. 7) Snímač vzdálenosti na principu vířivých proudů [7]

### 3.4 Snímače rychlosti

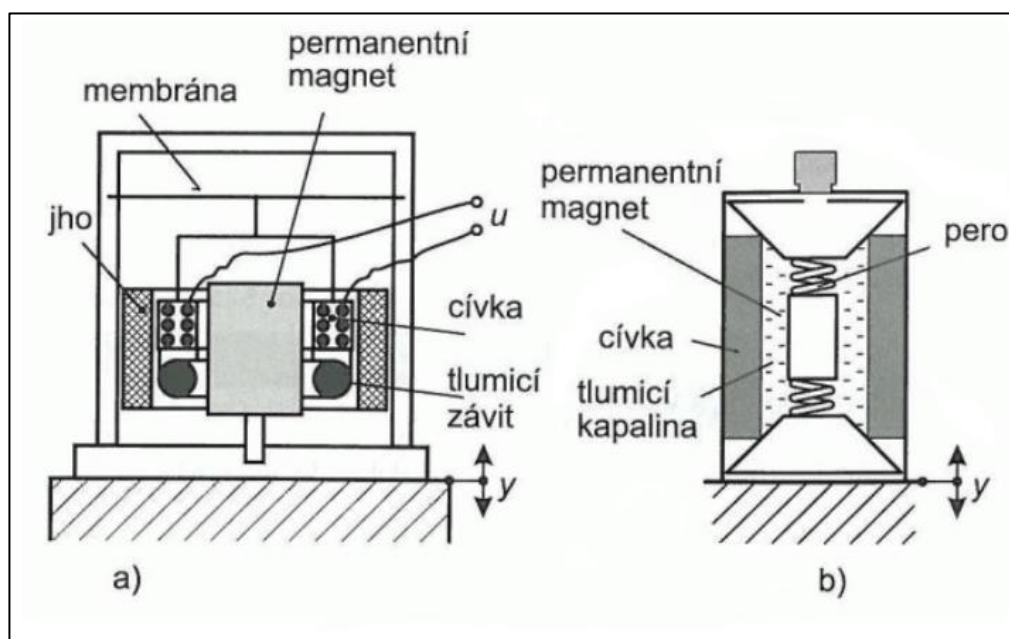
Při potřebě měření rychlosti vibrační můžeme měření realizovat dvěma způsoby. Prvním způsobem je provést měření za pomoci absolutního elektrodynamického senzoru. Dalším způsobem je použití snímače zrychlení, ve kterém hodnoty rychlostí vibrační získáme integrací naměřeného signálu.

Absolutní elektrodynamický senzor je ve své podstatě absolutním snímačem amplitudy vibrační, ale s ohledem na jeho vnitřní uspořádání dochází k měření rychlosti vibrační. Hlavní součásti senzoru tohoto typu jsou permanentní magnet a cívka. V jednoduchosti senzor funguje tak, že výchylky vibrační se přenáší na seismickou hmotu, kterou dle uspořádání může být magnet, ale také cívka, dle volby provedení snímače (obr. 8). Při přenesení vibrační vzniká pohyb mezi permanentním magnetem a cívkou a tím se v cívce indukuje elektromotorické napětí  $U$  dle vztahu:

$$U = B \cdot l \cdot v \quad (12)$$

- Kde:  $B$  - magnetická indukce ve vzduchové mezeře  
 $l$  - délka vodiče cívky  
 $v$  - rychlost kmitání pouzdra snímače

Mezi výhody absolutního elektrodynamického senzoru patří možnost užití senzoru bez externího napájení a jeho malý vnitřní odpor. Dalším kladem je také fakt, že není zapotřebí speciální zesilovač před měřením výstupního napětí. Při vhodně zvoleném nastavení lze s těmito snímači měřit frekvenci již od 1 Hz, na druhou stranu horní hranice použitelnosti se pohybuje kolem hodnoty 3,5 kHz. Mezi další nevýhody se řadí poměrně vysoká citlivost na okolní parazitní magnetická pole a rozměry snímače. Z těchto důvodů se častěji přistupuje k měření za pomoci piezoelektrických akcelerometrů a následné integraci výstupního signálu pro získání rychlosti kmitavého pohybu [3,4].



Obr. 8) Absolutní elektrodynamický senzor rychlosti: a) s pohyblivou cívkou, b) s pohyblivým magnetem [4]

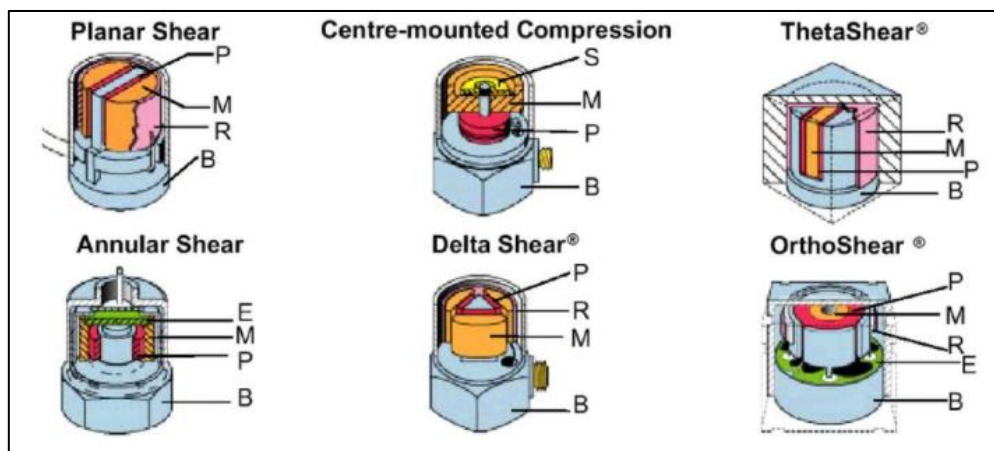
### 3.5 Snímače zrychlení

Snímače zrychlení neboli akcelerometry řadíme v současné době mezi nejpoužívanější snímače v oblasti vibrodiagnostiky. Akcelerometry jsou navrženy pro snímání zrychlení mechanického pohybu (akceleraci), ale v případě potřeby rychlosti nebo výchylky vibrací lze převést integrací získaný signál na potřebnou veličinu. Pro realizaci akcelerometru lze využít celou řadu fyzikálních principů, jako například piezoelektrický jev, piezorezistivní jev, kapacitní princip, princip s elektromechanickou zpětnou vazbou, tepelný princip a mnoho jiných. V současné technologické praxi se nejvíce využívají akcelerometry na principu piezoelektrickém a MEMS akcelerometry konstruované na principu kapacitním a piezorezistivním [4].

#### 3.5.1 Piezoelektrický akcelerometr

Piezoelektrický akcelerometr je v současné strojírenské praxi jedním z nejpoužívanějších absolutních snímačů vibrací. Je založen na přímém piezoelektrickém jevu, při němž deformací určitých krystalických nebo polykrystalických látek působením mechanického namáhání elektrická polarizace. Touto vyvolanou elektrickou polarizací lze na vhodně umístěných elektrodách vyvolat elektrický náboj, který se následně zaznamenává. Pro vyvolání piezoelektrického jevu v dielektriku lze použít mechanického namáhání tahem, tlakem, ohybem nebo krutem, což způsobí deformaci krystalické mřížky piezoelektrického elementu. Z tohoto důvodu se konstruují piezoelektrické snímače smykové, tlakové a ohybové [4]. Za piezoelektrické elementy se nejčastěji volí modifikace křemene ( $\text{SiO}_2$ ), piezokeramiky jako je třeba titanicitan barnatý ( $\text{BaTiO}_3$ ) nebo vinan draselno-sodný označovaný jako Seignettova sůl. Pro použití v prostředí s extrémními teplotami se také využívá lithio niobát ( $\text{LiNbO}_3$ ) nebo některý z piezoelektrických polymerů (PVC, PVDF) [2].

Parametry piezoelektrického akcelerometru jsou ovlivněny nejen způsobem namáhání zvoleného piezoelektrického elementu, ale i hmotností seismické hmoty. Běžně lze s tímto typem akcelerometru pracovat v pásmu od 0,1 Hz až do 40 kHz. Nejčastěji se lze setkat se smykovým piezoelektrickým akcelerometrem, který je oblíbený pro svou odolnost, široké spektrum použití a nízký teplotní vliv. Vyrábí se v několika konstrukčních provedeních, kdy každý typ má mírně odlišné vlastnosti. Na obr. 9 je ukázka nejčastějších provedení smykových piezoelektrických akcelerometrů, které jsou doplněny o centrální tlakový akcelerometr [4].



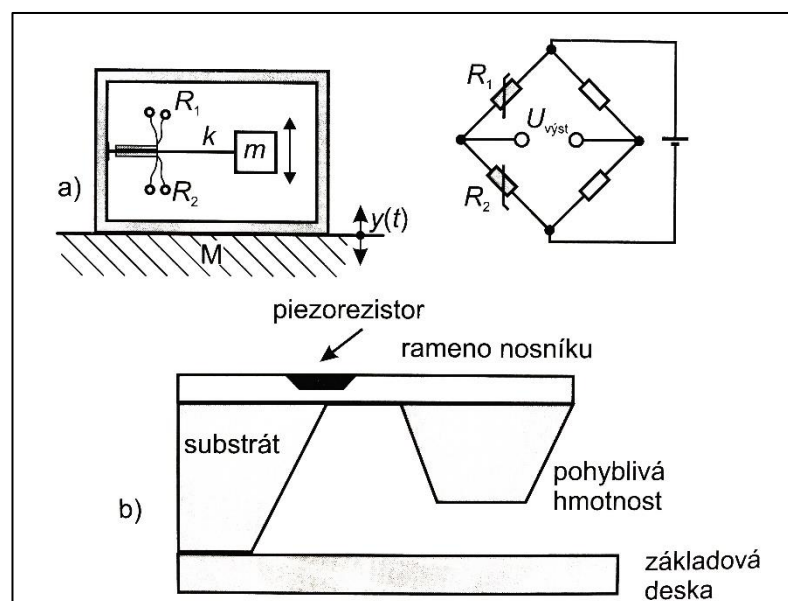
Obr. 9) Ukázka modifikací smykových akcelerometrů a centrálního tlakového akcelerometru [10]

### 3.5.2 Piezorezistivní akcelerometr

Piezorezistivní snímače zrychlení pracují na piezorezistivním principu. To znamená, že pokud vystavíme piezorezistivní materiál, nejčastěji uspořádaný do Wheatstoneova můstku, namáhání ohybem, dojde v něm ke změně rezistivity. Takový druh akcelerometru tedy měří změnu odporu ve zvoleném materiálu. Obvykle se za piezorezistivní materiál volí obohacený polovodič křemíku [4].

Oproti piezoelektrickým akcelerometrům nám piezorezistivní akcelerometry nabízí možnost měření i stálého zrychlení, tedy dovolují měřit již od 0 Hz. Horní hranice frekvenčního rozsahu se obvykle udává okolo 7 kHz. Mezi další hlavní charakteristiky těchto akcelerometrů patří nejvyšší poměr citlivosti vůči hmotnosti a díky stabilní napěťové citlivosti jsou velice vhodné pro dlouhodobé měření. Na druhou stranu nedisponují dobrou teplotní stabilitou, takže jejich aplikace je podmíněna vhodnými okolními podmínkami. Piezorezistivní snímače zrychlení jsou vhodné i pro použití MEMS technologie [4].

MEMS je anglická zkratka pro Micro Electro Mechanical Systems, což jednoduše znamená společnou integraci mechanických a elektronických struktur do miniaturních až mikro-miniaturních rozměrů. Za hraniční rozměry se většinou považuje rozměr kolem 10 nm. Zde přestávají platit klasické fyzikální zákony a systémy musí být řešeny za pomoci pravidel kvantové fyziky [8].



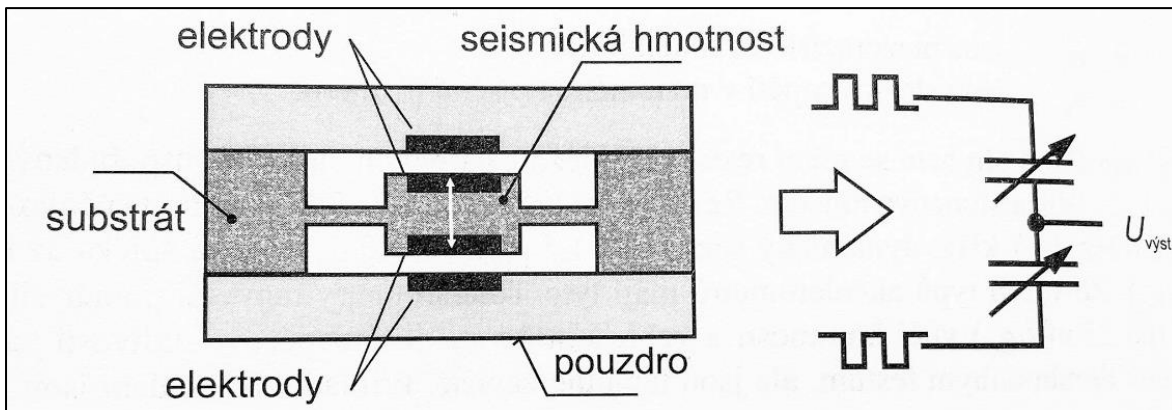
Obr. 10) Uspořádání piezorezistivních akcelerometrů: a) polovodičové tenzometry na vetknutém nosníku, b) princip MEMS technologie [4]

### 3.5.3 Kapacitní akcelerometr

Kapacitní snímače zrychlení pracují na jednom z nejstarších principů, které se používají pro realizaci snímačů. Jak už lze poznat ze samotného názvu, jedná se o kapacitní princip. Nejlépe lze tento princip popsat dle obr. 11. Při zatížení mechanickým kmitáním dojde k vychýlení seismické hmoty mimo její klidovou polohu. V důsledku vychýlení seismické hmoty dojde také k vychýlení pohyblivých elektrod a tím ke změně kapacit. Při vychýlení elektrod se tedy jedna



kapacita zmenšuje a druhá zväčšuje dle vzťahu pro výpočet kapacity kondenzátoru (rovnice 13). Za dílčí výsledek měření se tedy považuje rozdíl hodnot jednotlivých kapacit [2,4].

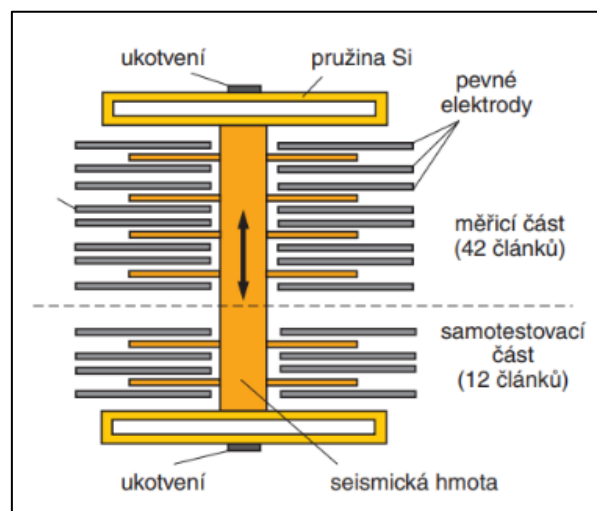


Obr. 11) Uspořádání kapacitního akcelerometru [4]

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (13)$$

- Kde: S - překrývající se plocha elektrod  
d - vzdálenost elektrod (tloušťka dielektrika)  
 $\epsilon_0$  - permeabilita vákua  
 $\epsilon_r$  - relativní permeabilita dielektrika mezi elektrodami

Kapacitní akcelerometry jsou charakteristicky přesné a velmi citlivé, jsou vhodné pro měření dynamického zrychlení ve frekvenčním rozsahu od 0 Hz až do 6 kHz, což nám také umožňuje měřit i konstantní zrychlení. V současné době se při realizaci kapacitních snímačů využívá technologie MEMS. V tomto provedení je použita seismická hmota ve tvaru hřebínku. Každý zub hřebínku je využíván jako střední pohyblivá elektroda mezi dvěma pevnými elektrodami v soustavě diferenčních kapacitních snímačů. Výstupním signálem je napětí, které odpovídá hodnotě akcelerace celého senzoru. Ukázka struktury kapacitního MEMS snímače je na obrázku 12 [4].



Obr. 12) Jednoosý kapacitní akcelerometr s hřebenovým uspořádáním [9]

## 4 AKCELEROMETRY POUŽÍVANÉ V MOBILNÍCH TELEFONECH

Vývoj senzorů používaných v mobilních telefonech jde neustále kupředu a také díky tomuto technickému pokroku lze klást na mobilní telefony větší a větší nároky. Bez senzorů by mobilní telefony sloužily pouze ke komunikaci mezi lidmi, což si v dnešní době již ani neumíme dobře představit.

Při této rešerši jsem se zaměřil pouze na akcelerometry, které jsou využívány v mobilních telefonech. Nevyhledával jsem pouze používané snímače, ale zajímal jsem také o to, které firmy za jejich vývojem a výrobou stojí.

### 4.1 Bosch Sensortec

Bosch Sensortec je jednou z divizí velmi známé společnosti Robert Bosch GmbH. Zabývá se vývojem a výrobou MEMS digitálních senzorů. Akcelerometry distribuované společností Bosch vynikají svými miniaturními rozměry, nízkou spotřebou a disponují programovatelnou funkcí Interrupt, díky které lze tyto akcelerometry používat i jako samostatné obvody bez nutnosti dalších procesorů a řídicích komponentů.

V současné době distribuují na trh produktovou řadu MEMS akcelerometrů, které pracují na kapacitním principu a umožňují měření zrychlení ve třech osách.

#### 4.1.1 BMA 455

Senzor BMA 455 je velmi malý tříosý akcelerometr pracující na kapacitním principu, který je určen pro měření nízkých zrychlení. Jeho rozměry jsou pouze  $2 \times 2 \times 0,65 \text{ mm}^3$ . Senzor disponuje nastavitelným rozsahem měření od  $\pm 2 \text{ g}$  až do  $\pm 16 \text{ g}$ , výstupním 16bitovým digitálním signálem a programovatelnou frekvencí měření od 1,5 do 1600 Hz. Výrobce udává spotřebu  $13 \mu\text{A}$  v úsporném módu a spotřebu  $150 \mu\text{A}$  v plném provozu. Veškerá technická data udávaná výrobcem jsou uvedena v [11].

Senzor BMA 455 není jediný z produktové řady BMA používaný v mobilních telefonech. Od společnosti Bosch Sensortec lze v současné nabídce nalézt i mnoho dalších senzorů jako je senzor BMA 422 [12] nebo senzor BMA 253 [13].

Od společnosti Bosch Sensortec se v mobilních telefonech používají i IMU jednotky (inerciální měřicí jednotka), které v sobě integrují senzory a tzv. „chytré senzory“, které v sobě také skrývají akcelerometry. Jedná se například o BMI 263 [14].

### 4.2 InvenSense

Společnost InvenSense patří mezi velice významné společnosti zabývající se vývojem a výrobou MEMS senzorů, které se hojně používají například v našich mobilních telefonech, dronech a dalších zařízeních. Společnost InvenSense se pyšní několika celosvětovými prvenstvími v oboru, jako je realizace integrovaného devítiosého senzoru již v roce 2012.

Distribuují na trh jak MEMS akcelerometry, tak i MEMS senzory, které v sobě integrují akcelerometry s dalšími senzory. V mobilních telefonech se můžeme nejčastěji setkat s těmito víceúčelovými senzory.

#### **4.2.1 ICM – 42605**

Senzor ICM-42605 v sobě kombinuje tříosý gyroskop s tříosým akcelerometrem společně s teplotním senzorem. Celkový rozměr výrobce udává 2,5 x 3 x 0,91 mm<sup>3</sup>. Senzor dovoluje programovatelný rozsah měření akcelerometru od ±2 g do ±16 g a disponuje také digitálními filtry pro akcelerometr i gyroskop, což se dá v porovnání s konkurencí brát jako standartní výbava. Frekvenční rozsah tohoto akcelerometru je od 1,5 Hz až do 8 kHz [15].

#### **4.2.2 ICM –20948**

Dalším senzorem z dílny InvenSense používaným v mobilních telefonech je devítiosý čip, který v sobě kombinuje tříosý akcelerometr, tříosý gyroskop a tříosý kompas. Tento senzor je plně v souladu s nároky pro nejnovější Android systémy od společnosti Google. Jak už je u společnosti InvenSense zvykem, nechybí v něm ani senzor teploty. To vše je integrované do senzoru o velikosti 3 x 3 x 1 mm<sup>3</sup>. Akcelerometr nacházející se v tomto čipu disponuje frekvenčním rozsahem již od 0,27 Hz do 4,5 kHz v závislosti na nastaveném módu, kterých je k dispozici celkem osm [16].

### **4.3 STMicroelectronics**

Společnost STMicroelectronics je další velice významnou celosvětovou společností v odvětví MEMS senzorů. Výrobní portfolio společnosti je velice obsáhlé a nechybí v něm ani senzory zrychlení používané v mobilních telefonech. Tyto senzory se mohou pyšnit velice nízkou spotřebou energie, digitálním výstupem a nechybí v nich ani zabudovaný teplotní senzor.

#### **4.3.1 LIS2DH12**

Jedná se tříosý MEMS akcelerometr s ultra nízkou spotřebou energie. Výrobce udává spotřebu menší než 2 μA v některých provozních módech. Akcelerometr umožňuje měření zrychlení v rozsahu od 1 Hz až do 5,3 kHz. Tento čip v sobě ukrývá i senzor teploty a disponuje čtyřstupňovým programovatelným rozsahem měření ± 2 až 16 g. Rozměry tohoto senzoru jsou 2x2x1 mm<sup>3</sup> a jeho výstupem je digitální signál [17].

Ze současných produktů od společnosti STMicroelectronics se v mobilních telefonech také používají senzory LIS2DS12 [18] a LIS2DW12 [19].



## 5 APLIKACE PRO ZAZNAMENÁVÁNÍ VIBRACÍ

V současné době, kdy již doslova na vše existuje nespočet mobilních aplikací, mi nezbývá jiná možnost, než představit pouze několik z nich. Svým výběrem jsem se zaměřil na aplikace, které mi snadno a jednoduše umožní zaznamenat a vyexportovat naměřená data z mého mobilního telefonu k pozdějšímu zpracování. Zaměřil jsem se tedy jak na samotný účel, tak i na dojem, který na mě prostředí a ovladatelnost aplikací zanechaly.

### 5.1 Mobilní aplikace Phyphox

Mobilní aplikace Phyphox nabízí svým uživatelům širokou škálu měření, počínaje akcelerací, přes Dopplerův jev až k jednotlivým experimentům. Všechna měření se provádí pouze za využití senzorů nacházejících se v mobilním telefonu. Jednotlivá měření jsou rozdělena do skupin dle oboru měřených veličin.

Phyphox navíc nabízí možnost naprogramování vámi požadovaného experimentu za pomoci editoru, který se nachází na jejich webových stránkách. Pokud by si uživatel nevěděl rady, jsou vývojáři schopni po nastínění požadovaného experimentu sami tuto možnost měření do aplikace přidat.

Aplikace nám také nabízí podrobný výčet všech senzorů nacházejících se v našem telefonu, včetně jejich specifikací. Phyphox nám dále nabízí možnost vzdáleného přístupu k ovládání aplikace v reálném čase. Díky vzdálenému přístupu můžete pohodlně upravovat specifikace měření, nebo si data přímo ukládat do vašeho počítače. Dostupné možnosti ukládání dat jsou ve formátu .xlsx (MS Excel) nebo ve formátu CSV. Při potřebě jiného formátu nám sami vývojáři opět nabízí pomocnou ruku a jsou ochotni přidat do aplikace jakýkoliv formát.

Mobilní aplikace Phyphox, jež byla vyvinuta na RWTH Aachen University, je volně k stáhnutí pro Android i pro iOS [20].

### 5.2 Mobilní aplikace iNVH

Mobilní aplikace iNVH je jednou z mnoha dalších aplikací na měření akcelerace za pomoci senzoru mobilního telefonu. Za vývojem a realizací této aplikace stojí dceřiná společnost světoznámé společnosti Robert Bosch GmbH.

Aplikace bezplatně nabízí pouze měření a případný export dat naměřených hodnot hluku nebo vibrací. Při zakoupení rozšiřujícího balíčku je uživateli umožněno analyzování dat hluku, nikoliv však vibrací. Pro následnou analýzu vibrací je tedy nutné použít jiné aplikace, popřípadě programy.

Přes to, že aplikace uživateli neumožňuje provedení analýzy naměřených hodnot vibrací, je velmi dobře a přehledně zpracovaný nástroj k měření vibrací. Frekvence měření vibrací je samotnou aplikací omezena na hodnotu 100 Hz. Uživatelem naměřená data jsou exportována ve formátu CSV (MS Excel).

Aplikace iNVH je podporována operačními systémy iOS i Android [21].

### 5.3 Mobilní aplikace Sensor Logger

Mobilní aplikace Sensor Logger je jednoduchou a elegantní volbou pro měření základních polohových veličin včetně zrychlení. Tato mobilní aplikace je velice pěkně designově zpracována, ale bohužel jí chybí větší možnost nastavení prováděných měření. Měřené veličiny lze snadno exportovat ve formátu CSV (Microsoft Excel). Za vývojem samotné aplikace stojí jediný člověk, Kelvin Choi, úspěšný absolvent Imperial College London. Velkým kladem je to, že aplikace je volně dostupná jak pro systém Android, tak i pro systém iOS [22].

### 5.4 Mobilní aplikace Matlab

Mobilní aplikace Matlab je přenosnou alternativou pro samotný stejnojmenný počítačový program Matlab. Program Matlab je interaktivní multiplatformové prostředí využívající skriptovací jazyk. Pro popsání všech funkcí nabízených programem Matlab by nestačil rozsah této práce, proto se zaměřím pouze na samotnou aplikaci.

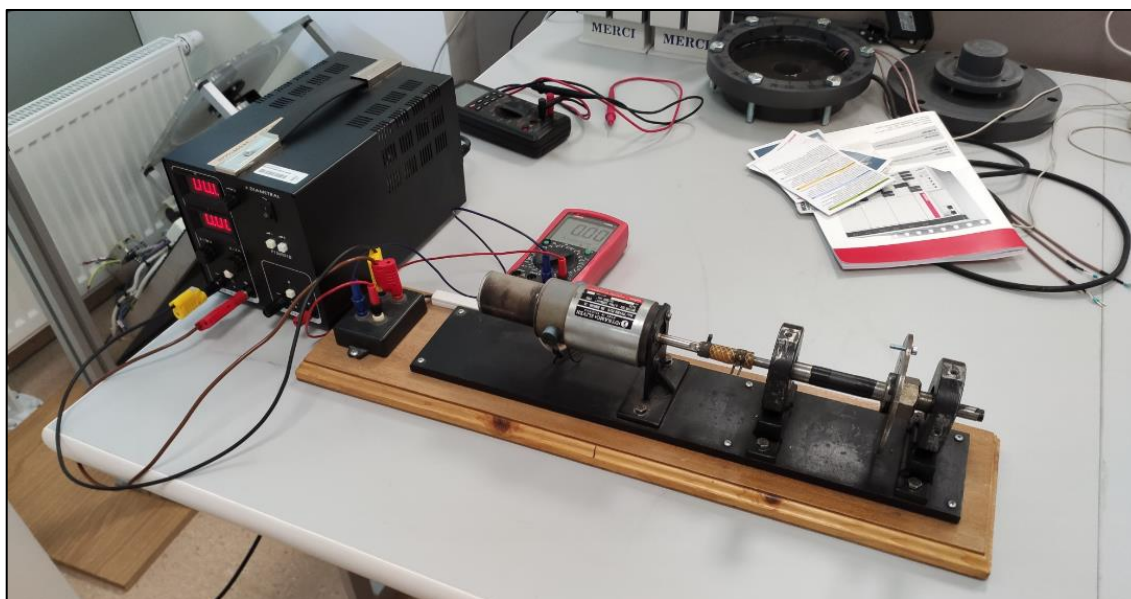
Aplikace Matlab je rozdělena do několika jednotlivých sekcí. Ihned po zapnutí aplikace se uživateli zobrazí příkazový řádek, kde lze za pomoci skriptovacího jazyka zadávat libovolné příkazy. Velmi důležitou částí pro mou rešerši je další sekce aplikace zabírající se využíváním senzorů obsažených v mobilním telefonu. Mezi veličiny měřitelné aplikací patří i akcelerace. Velmi důležitou vlastností aplikace je i to, že lze nastavit frekvenci plánovaného měření. Uživatel může nastavit hodnotu od 0,5 do 100 Hz. Dále má uživatel na výběr mezi exportem naměřených dat do Matlab Drivu nebo přímým nahráváním do programu Matlab. K dispozici je i možnost následného zpracování dat přímo v mobilní aplikaci za využití předpřipravených skriptů nebo si uživatel může skript napsat svépomocí.

Za vývojem a distribucí aplikace stojí společnost MathWorks. Aplikace je podporována operačními systémy Android i iOS. Samotná aplikace je volně ke stažení, avšak nezbytnou podmínkou pro využívání aplikace je vlastnictví licence [23].

## 6 POPIS EXPERIMENTU

Celý experiment byl založen na principu porovnání dat naměřených za pomoci akcelerometru v mobilním telefonu a dat naměřených pomocí techniky používané v praxi.

Veškerá data byla naměřena na modelu vibrací v laboratoři na ÚVSSR. Model vibrací se skládal ze zdroje napětí, DC servomotoru od společnosti Dynamo Sliven a hřídele uložené v kuličkových ložiskách. Na hřídeli byl navařen ocelový kotouč, ve kterém byly vyvrtány díry pro připevnění nevývahy v pravidelných 90stupňových krocích. Na svorkovnici spojující zdroj napětí se servomotorem byl také připojen multimetr pro zaznamenávání napětí dodávaného do servomotoru pro pozdější výpočet otáčkové frekvence. Model vibrací je zachycen na obrázku 13.



Obr. 13) Fotografie modelu vibrací použitého pro experiment

### 6.1 Použité přístroje

Při měření byl použit mobilní telefon značky Xiaomi, přesněji model Mi 9T. Tento telefon má v sobě zabudovaný MEMS senzor ICM-42605 [15] od společnosti InvenSense, který v sobě ukrývá mimo jiné i akcelerometr. Akcelerometr disponuje rozsahem měření až  $\pm 16$  g, frekvenčním rozsahem od 1,5 Hz do 8 kHz a citlivostí až 450 mV/g v závislosti na zvoleném rozsahu měření.

K měření jsem si zvolil mobilní aplikaci Matlab [23], která mi umožnila pevně stanovit vzorkovací frekvenci. Využil jsem maximum, které aplikace nabízí a zvolil vzorkovací frekvenci 100 Hz. Bohužel při pozdějším výpočtu vzorkovací frekvence z časových okamžiků po sobě jdoucích hodnot se ukázalo, že skutečná vzorkovací frekvence činila 111,1 Hz. Z tohoto důvodu jsem otestoval měření pomocí pěti různých telefonů, při stejném nastavení. U většiny telefonů se objevil stejný problém se vzorkovací frekvencí. Reálná příčina této skutečnosti nebyla odhalena, ale pravděpodobně jde o chybu při poslední aktualizaci aplikace. Proto jsem při následné analýze uvažoval skutečnou vzorkovací frekvenci, čili 100 Hz, a nebral jsem zřetel na zaznamenaný čas.

Pro porovnání dat naměřených s technikou používanou v praxi byl použit Microlog Consultant CMAX 48 od společnosti SKF, na který byly napojeny akcelerometry CMSS 2111 [24] také od společnosti SKF. Mezi hlavní vlastnosti akcelerometrů patří rozsah měření  $\pm 50$  g, frekvenční rozsah 0,5 Hz až 10 kHz a citlivostí 100 mV/g. Nutno dodat, že Microlog nebyl použit pro zpracování dat, ale pouze k jejich zaznamenání.

Nedílnou součástí modelu vibrací byl také DC servomotor model PIVTM-6 25/2 [25] o maximálním jmenovitém napětí 20 V a maximálním točivém momentu 0,225 Nm. Pro získání otáčkové frekvence byl použit přepočítání udávaný na štítku, kdy 3 V odpovídají 1000 otáčkám za minutu.

## 6.2 Rozdělení měření

Měření bylo rozloženo do čtyř částí pro oba použité přístroje. Při každé ze čtyř částí měření byla naměřena data pro tři rozdílné hodnoty napětí zdroje, které byly zvoleny 10 V, 12,5 V a 15 V s ohledem na technické možnosti zvoleného servomotoru.

První ze čtyř částí dat byla naměřena na modelu vibrací, který neobsahoval přidané nevyváhy ani nebyla povolena samotná základna modelu.

Při druhé části byla nasimulována nevyváha na ocelovém disku hřídele v podobě umístění šroubu M4x16 s oblou hlavou do předvrtané díry. Hmotnost jednoho šroubu jsou přibližně 2 gramy.

Ve třetí části experimentu byla nasimulována nevyváha v podobě dvou šroubů M4x16 s oblou hlavou umístěných taktéž do předvrtaných děr na disku hřídele.

Při čtvrté a poslední části měření byla ponechána nevyváha v podobě jednoho šroubu M4x16 s oblou hlavou umístěného do díry disku hřídele. Oproti již zmíněným částem měření byly také povoleny šrouby základny pro získání nižší tuhosti celého modelu a docílení nasimulování nedokonalého uchycení základny modelu k pevné podstavě.

Přehledné rozdělení měření i s vypočítanou otáčkovou frekvencí udává tabulka číslo 1.

Tab 1) Přehled měření doplněný o otáčkové frekvence

Napětí na zdroji [V]	Povaha měření	Napětí na multimetru [V]	Otáčková frekvence [Hz]
10	bez nevyváhy	4,51	25,1
	s jednou nevyváhou	4,51	25,1
	se dvěma nevyváhami	4,46	24,8
	uvolněná základna + jedna nevyváha	4,39	24,4
12,5	bez nevyváhy	5,92	32,9
	s jednou nevyváhou	5,95	33,1
	se dvěma nevyváhami	5,91	32,8
	uvolněná základna + jedna nevyváha	5,98	33,2
15	bez nevyváhy	7,39	41,1
	s jednou nevyváhou	7,44	41,3
	se dvěma nevyváhami	7,36	40,9
	uvolněná základna + jedna nevyváha	7,57	42,1

## 7 NÁVRH ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Zpracování naměřených dat jsem provedl v programu Matlab, jelikož naměřená data z mobilního telefonu jsem měl snadno k dispozici z úložného cloudu společnosti Matlab. Naměřená data bylo zapotřebí oříznout na požadovaný časový úsek. V praxi je snaha docílit co největšího počtu naměřených dat za co možná nejmenší časový úsek. Z tohoto důvodu jsem zvolil časový úsek o délce 1 s pro oba způsoby naměření dat. Za tento časový úsek by měl být i mobilní telefon schopen zaznamenat dostatek hodnot pro provedení analýzy.

Nejdříve bylo nutné sjednotit jednotky naměřeného signálu, jelikož mobilní aplikace měřila v jednotkách  $m/s^2$  oproti Micrologu, který měřil v jednotkách g. Z tohoto důvodu jsem zvolil přepočítání udávající dohodnutou střední hodnotu tíhového zrychlení, tedy  $9,80665 m/s^2$ .

Dalším nutným krokem bylo očištění signálů od statické složky tíhového zrychlení. Poté byly naměřené vibrační signály připraveny k provedení analýzy. Jelikož se jednalo o jednorázové měření, není proto možné sledovat trendy vibrací. Analýzu jsem tedy provedl jak v časové, tak i ve frekvenční oblasti. V časové oblasti šlo především o znázornění průběhu naměřených dat doplněné o vypočítanou efektivní hodnotu a vyznačení dosažených extrémů časové vlny.

Ve frekvenční oblasti jsem zvolil vyhodnocení za použití velmi hojně využívané rychlé Fourierovy transformace. Vyobrazené frekvenční spektrum jsem ohraničil hodnotou 50 Hz. Toto ohraničení frekvenčního spektra jsem zvolil z důvodu skutečné vzorkovací frekvence 100 Hz, kterou byl schopen měřit mobilní telefon. Samozřejmě použitý Microlog má mnohem větší frekvenční oblast, ale pro účely porovnání výsledků s akcelerometrem mobilního telefonu je tato hodnota maximální možná.

Použité skripty z programu Matlab jsou k nalezení v příloze této bakalářské práce.

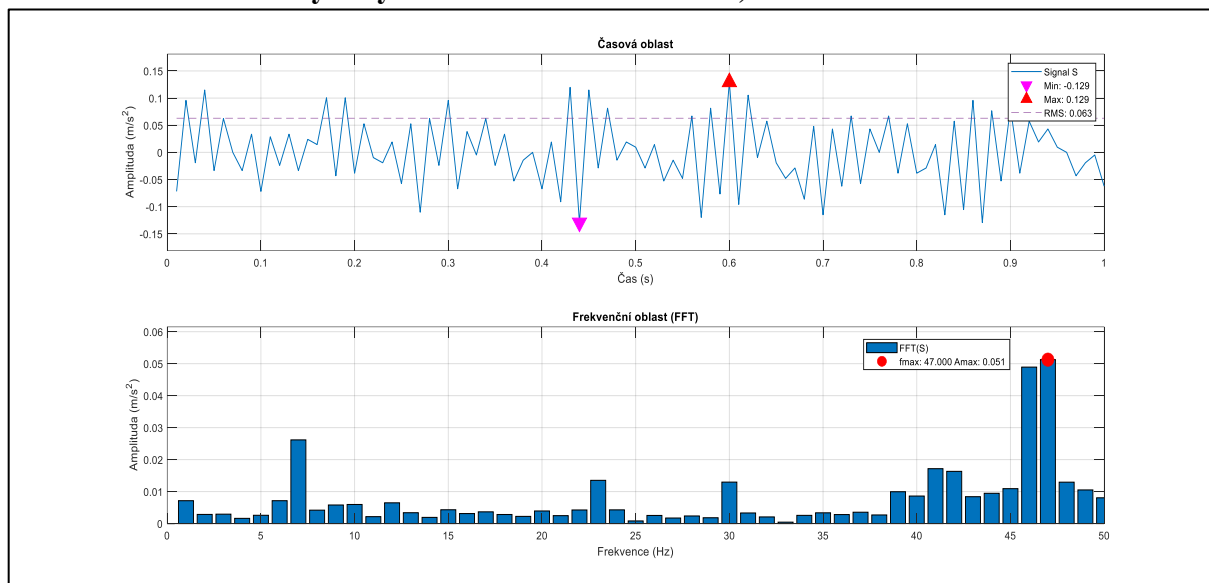


## 8 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

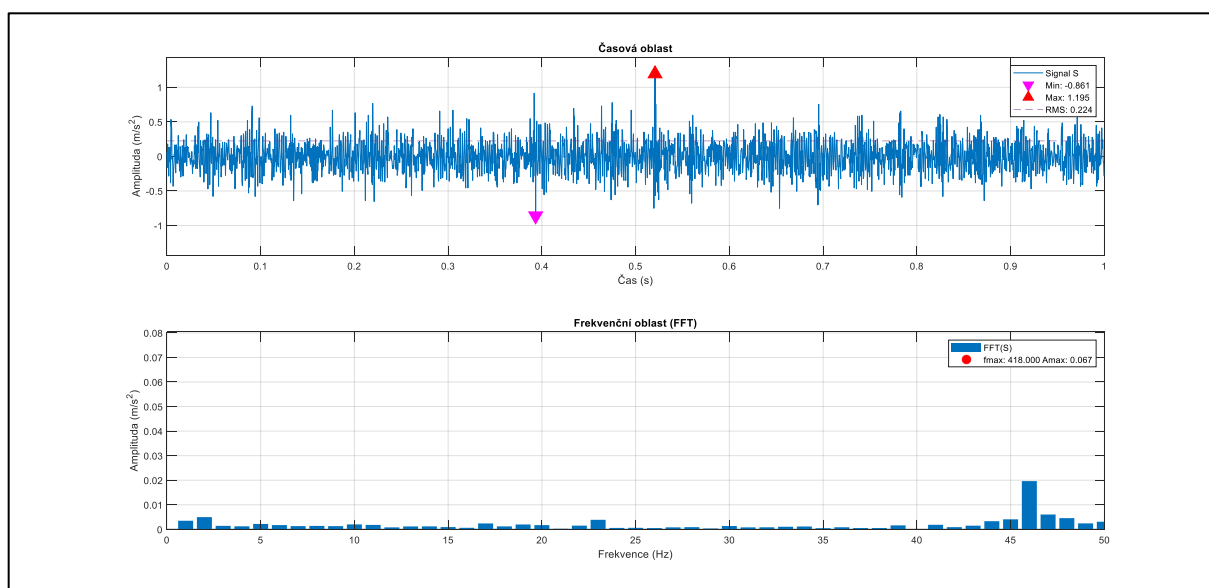
V této kapitole se zabývám pouze interpretací provedených analýz z naměřených hodnot. Celkově jsem provedl 24 analýz, 12 pro každý přístroj. Rozdělení celého experimentu je přehledně vyobrazeno v tabulce č. 1. Z důvodu velkého rozsahu práce jsem se nezabýval porovnáváním jednotlivých částí měření, pouze v závěru této práce jsem provedl sumarizaci provedených analýz a patřičně je okomentoval.

### 8.1 Vyhodnocení dat při měření bez nevývahy

#### 8.1.1 Měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz

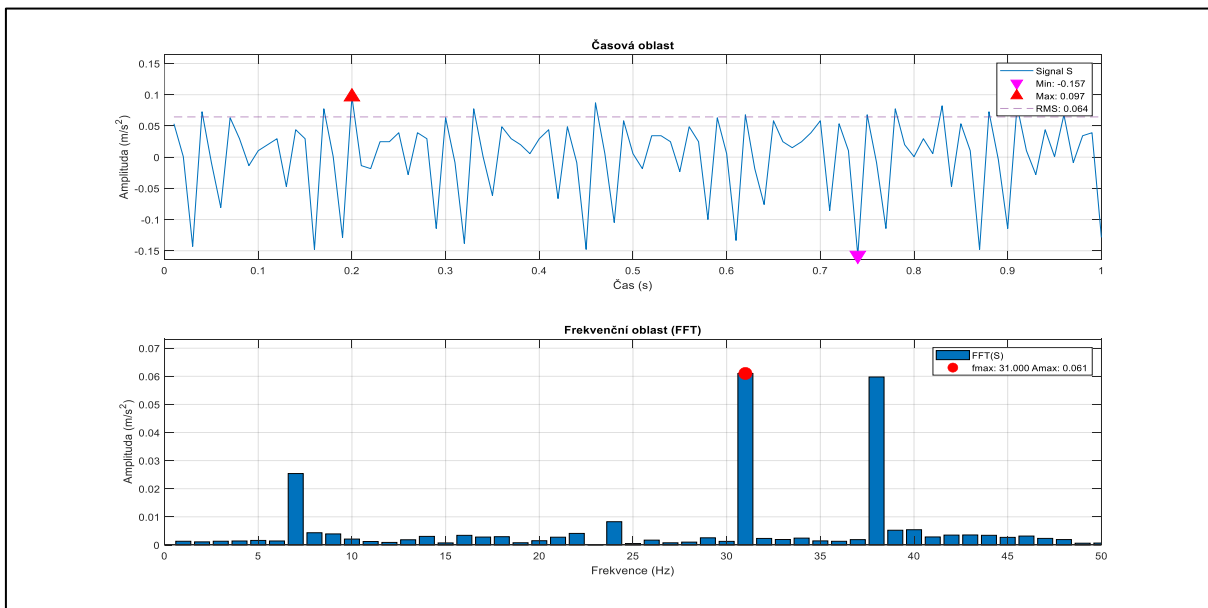


Obr. 14) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz.

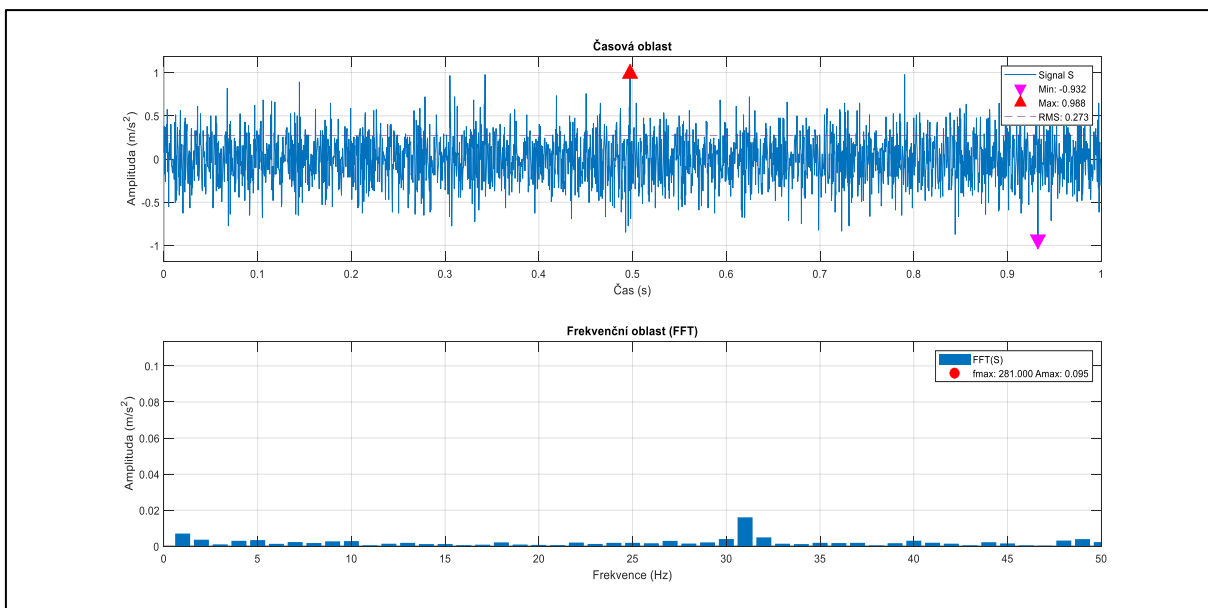


Obr. 15) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz.

## 8.1.2 Měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 32,9 Hz



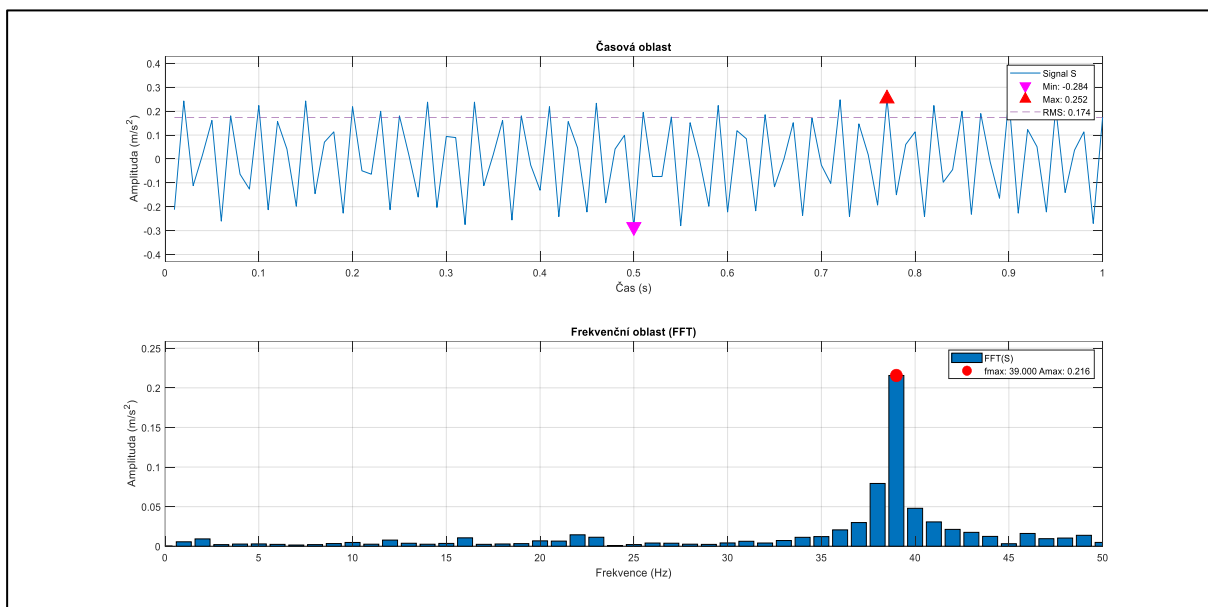
Obr. 16) Časová oblast a frekvencní spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 32,9 Hz.



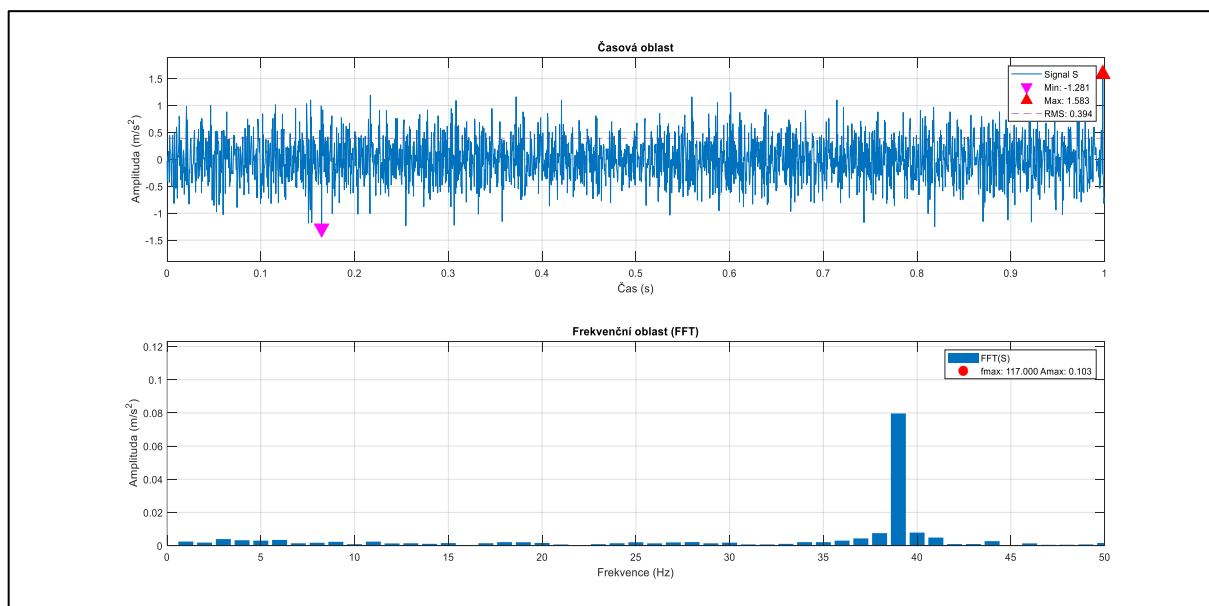
Obr. 17) Časová oblast a frekvencní spektrum dat naměřených Micrologem při měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 32,9 Hz.



### 8.1.3 Měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 41,1 Hz



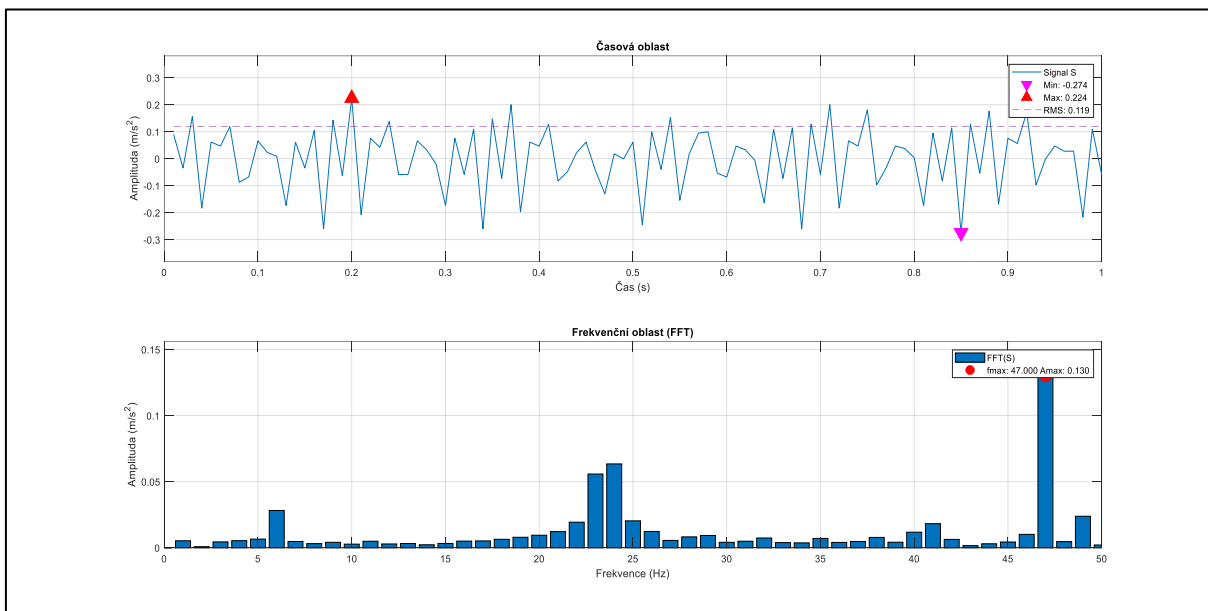
Obr. 18) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 41,1 Hz.



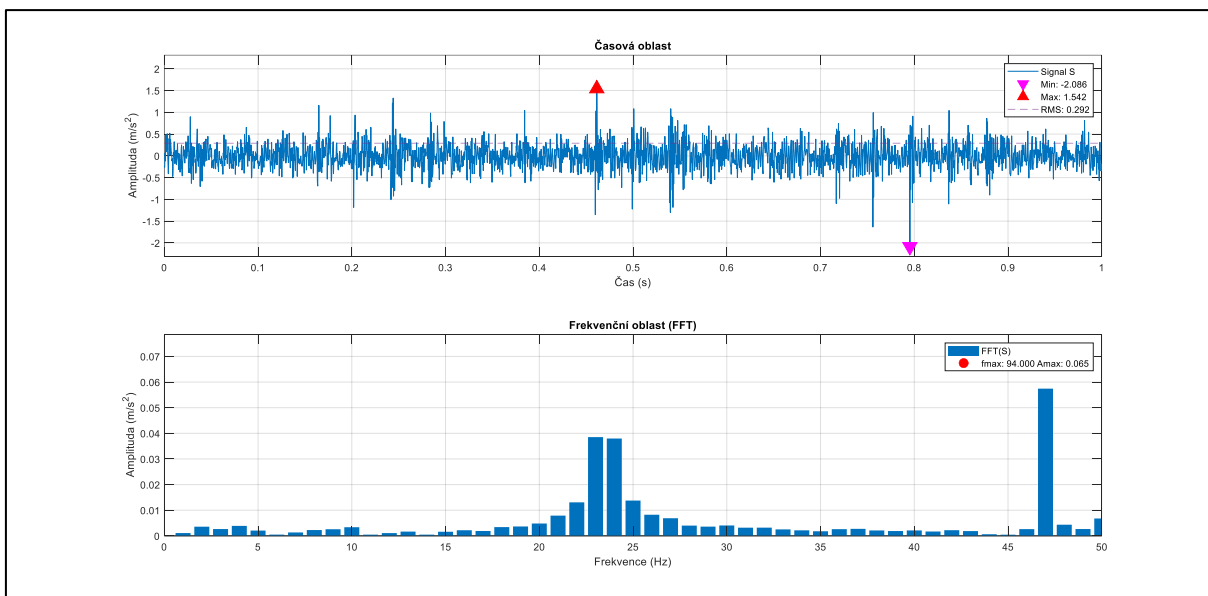
Obr. 19) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření bez nevývahy s otáčkovou frekvencí 41,1 Hz.

## 8.2 Vyhodnocení dat při měření s jednou nevyváhou

### 8.2.1 Vyhodnocení dat při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz

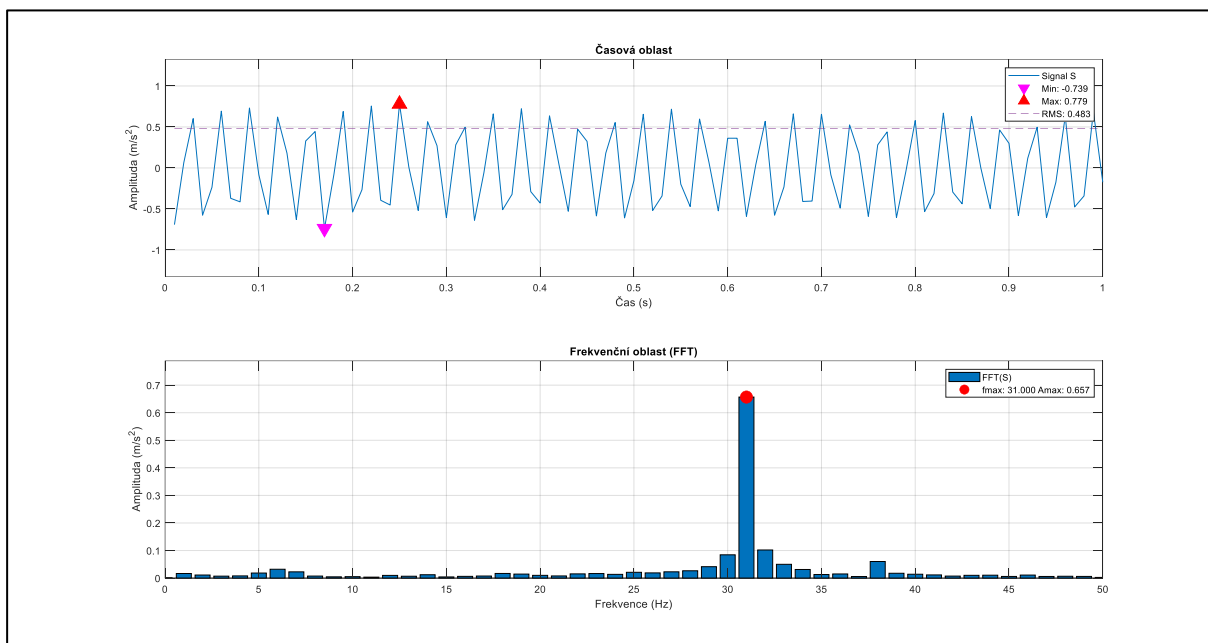


Obr. 20) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz.

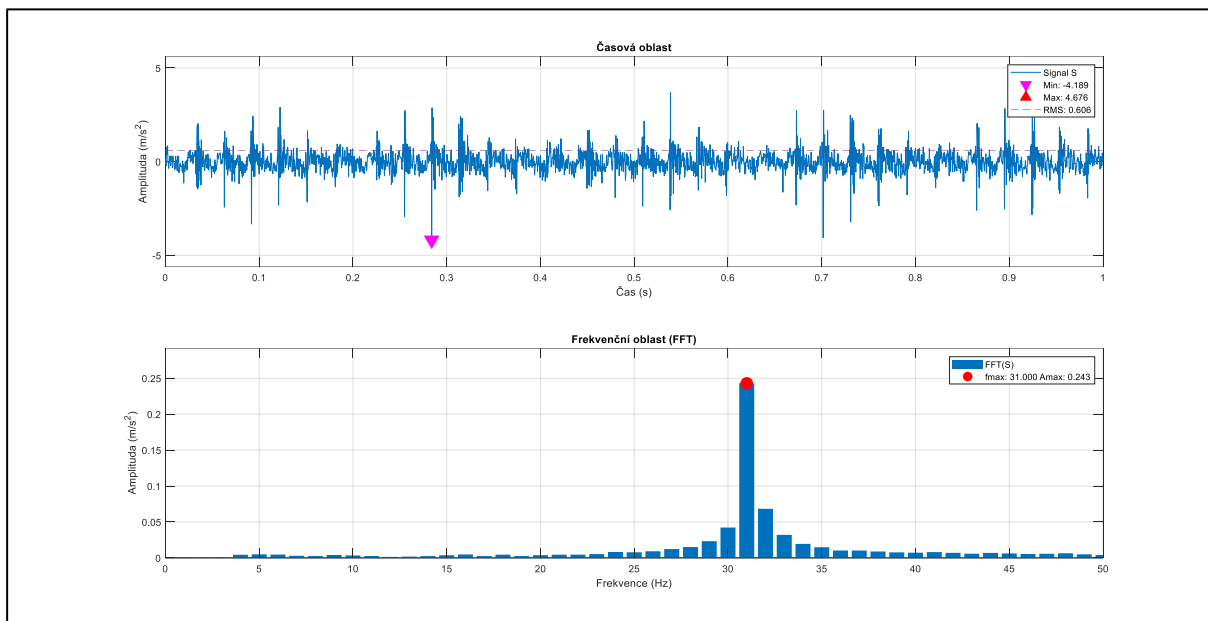


Obr. 21) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz.

## 8.2.2 Vyhodnocení dat při měření s jednou nevývahou s otáčkovou frekvencí 33,1 Hz

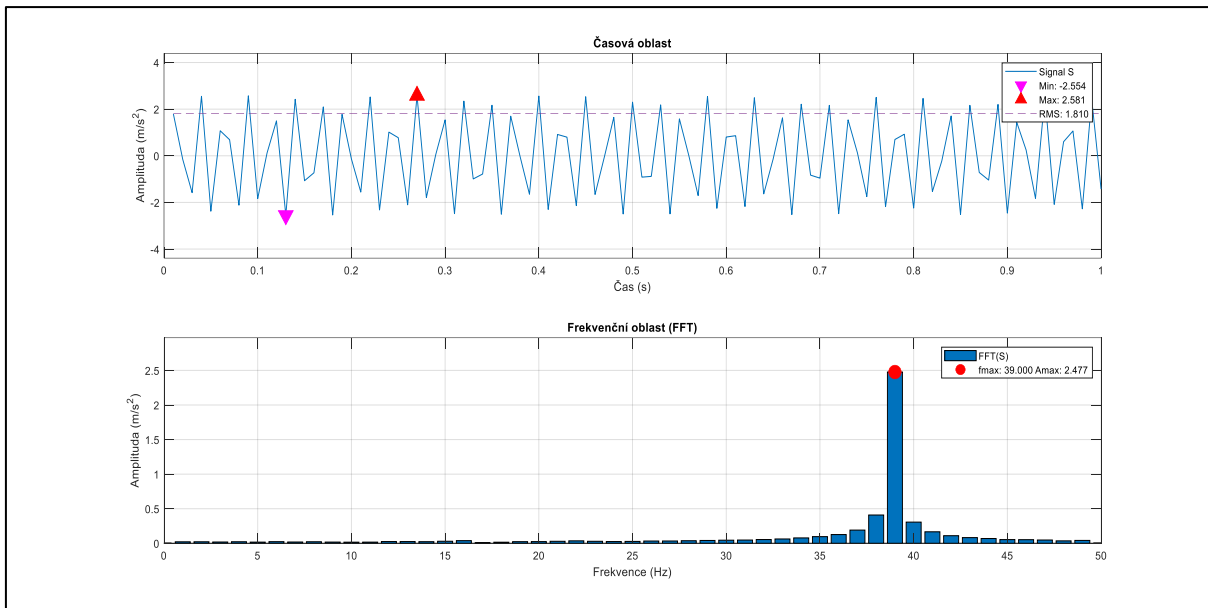


Obr. 22) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevývahou s otáčkovou frekvencí 33,1 Hz.

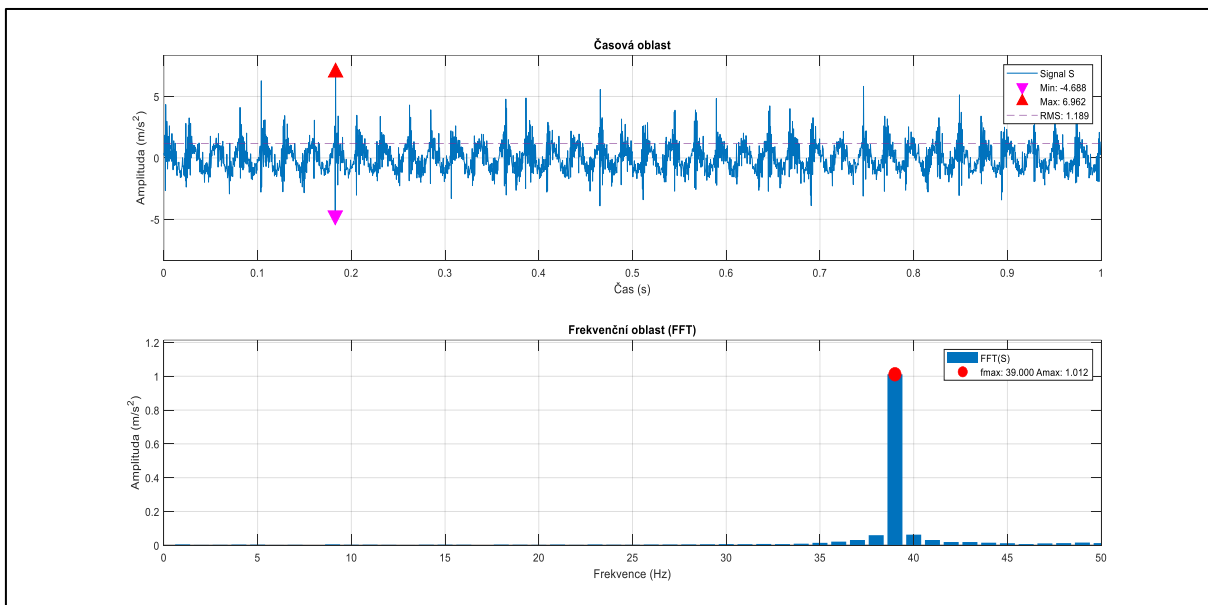


Obr. 23) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevývahou s otáčkovou frekvencí 33,1 Hz.

### 8.2.3 Vyhodnocení dat při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 41,3 Hz



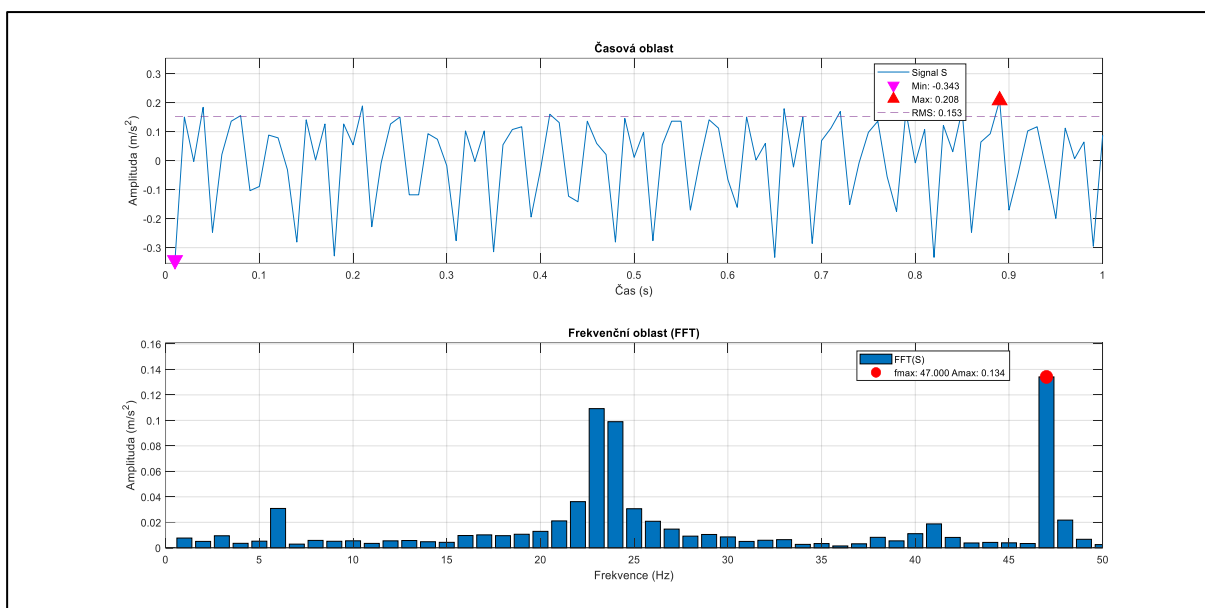
Obr. 24) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 41,3 Hz.



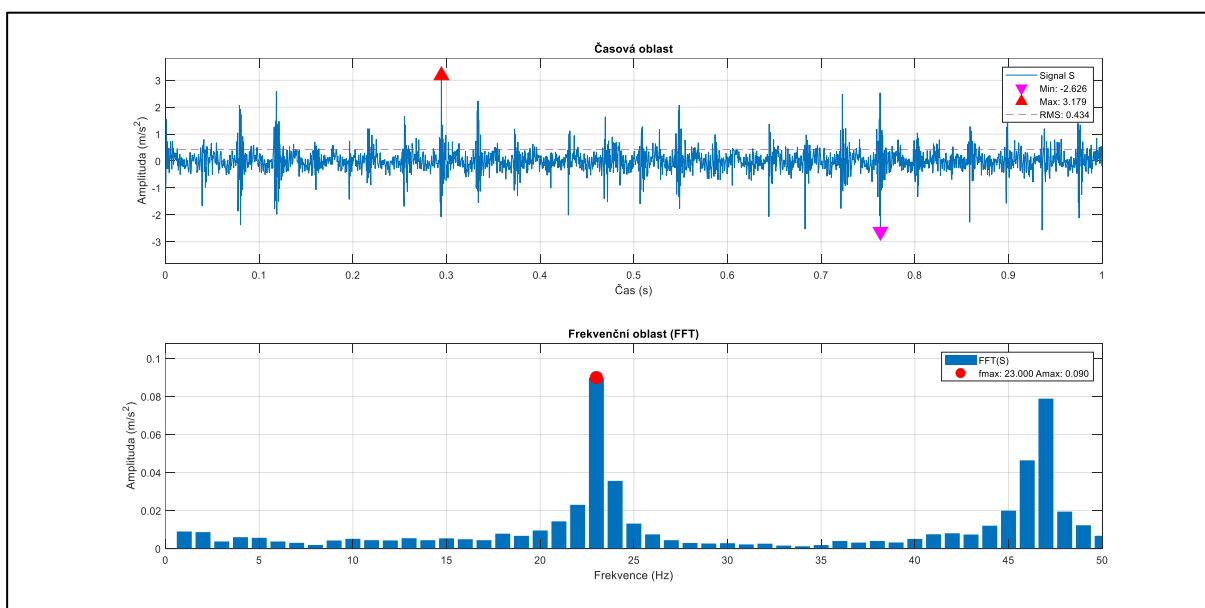
Obr. 25) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 43,1 Hz.

## 8.3 Vyhodnocení dat při měření se dvěma nevyváhami

### 8.3.1 Vyhodnocení dat při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 24,8 Hz

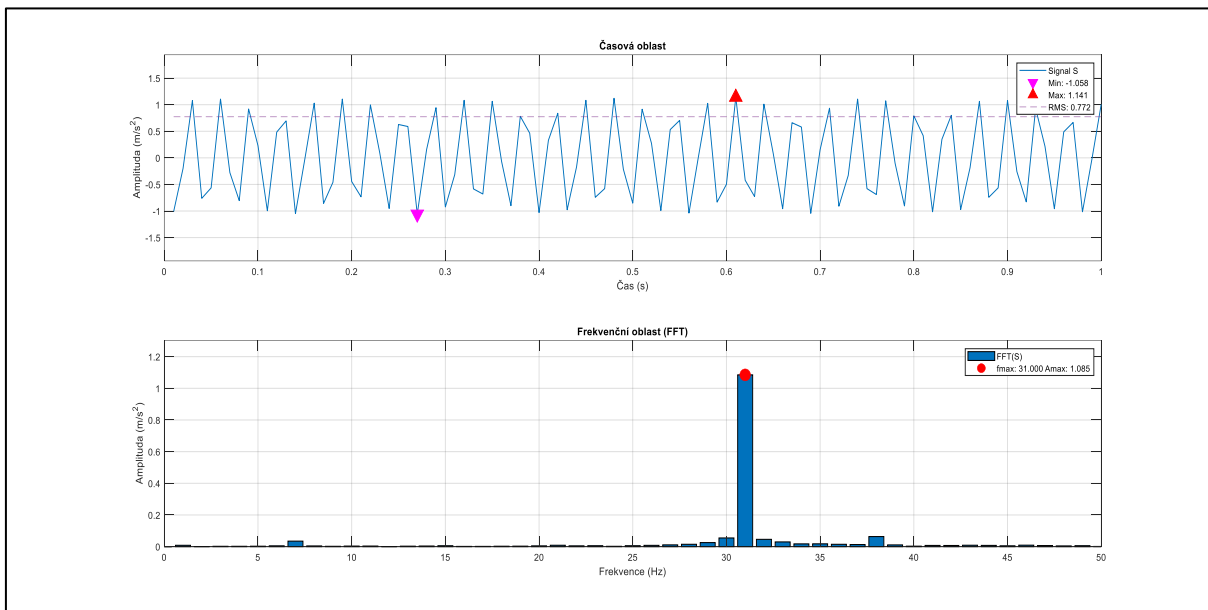


Obr. 26) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 24,8 Hz.

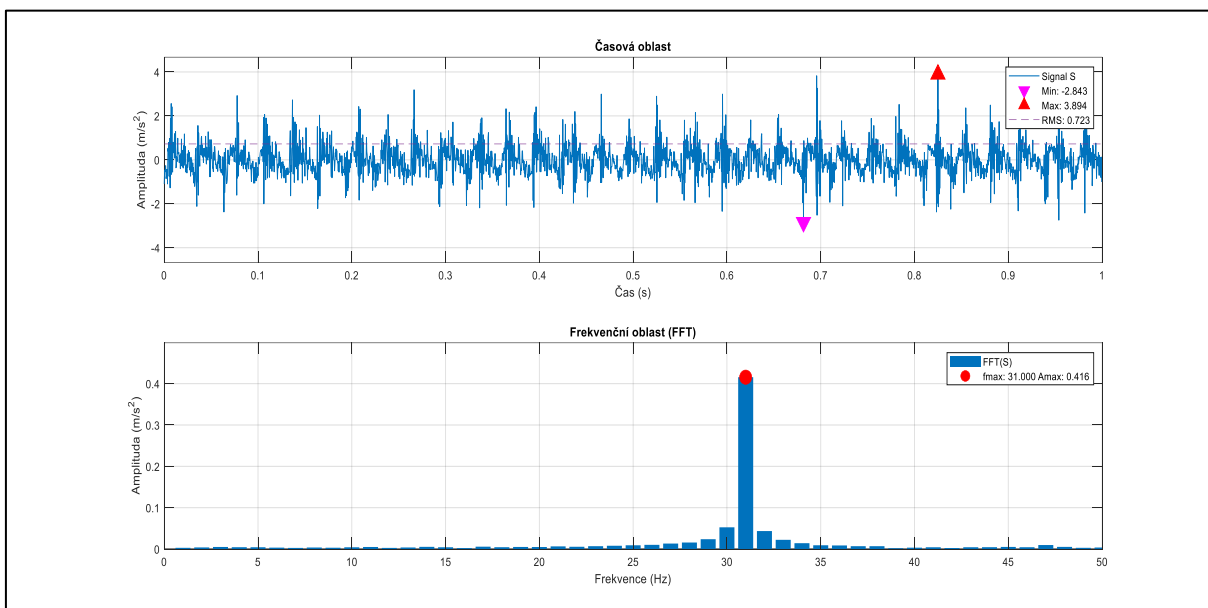


Obr. 27) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 24,8 Hz.

### 8.3.2 Vyhodnocení dat při měření se dvěma nevyvahami s otáčkovou frekvencí 32,8 Hz

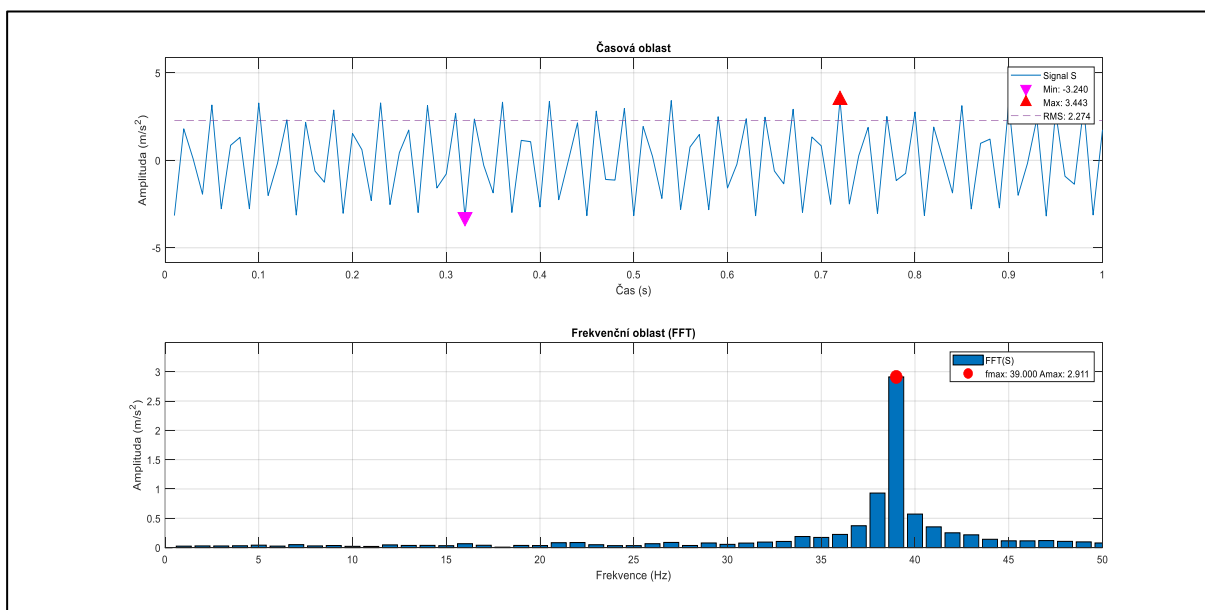


Obr. 28) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření se dvěma nevyvahami s otáčkovou frekvencí 32,8 Hz.

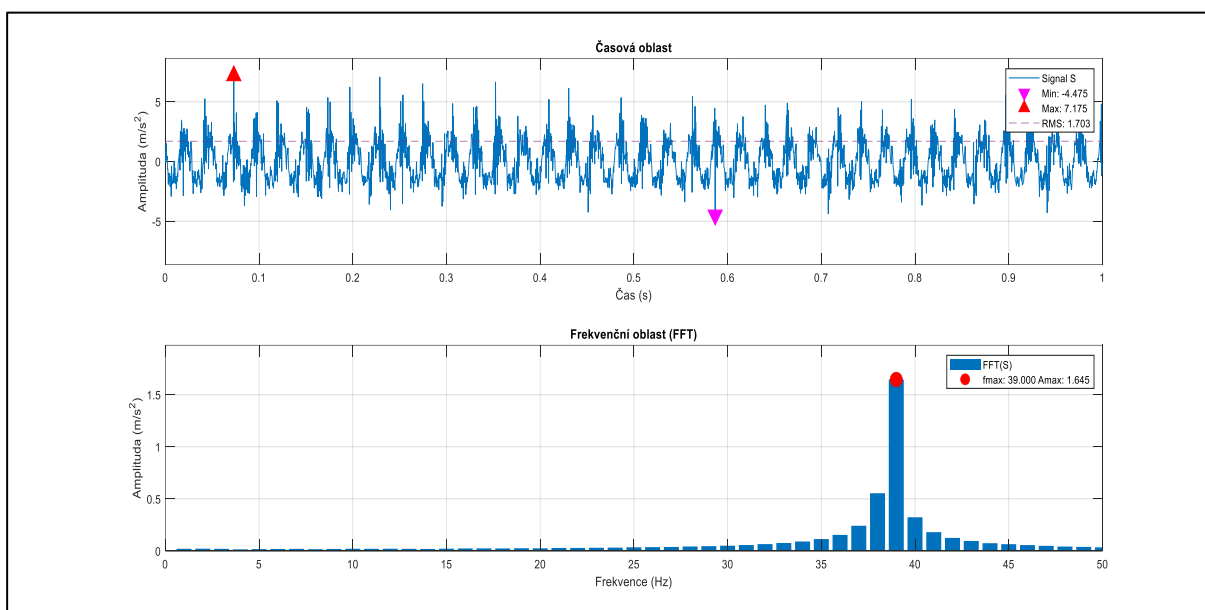


Obr. 29) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření se dvěma nevyvahami s otáčkovou frekvencí 32,8 Hz.

### 8.3.3 Vyhodnocení dat při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 40,9 Hz



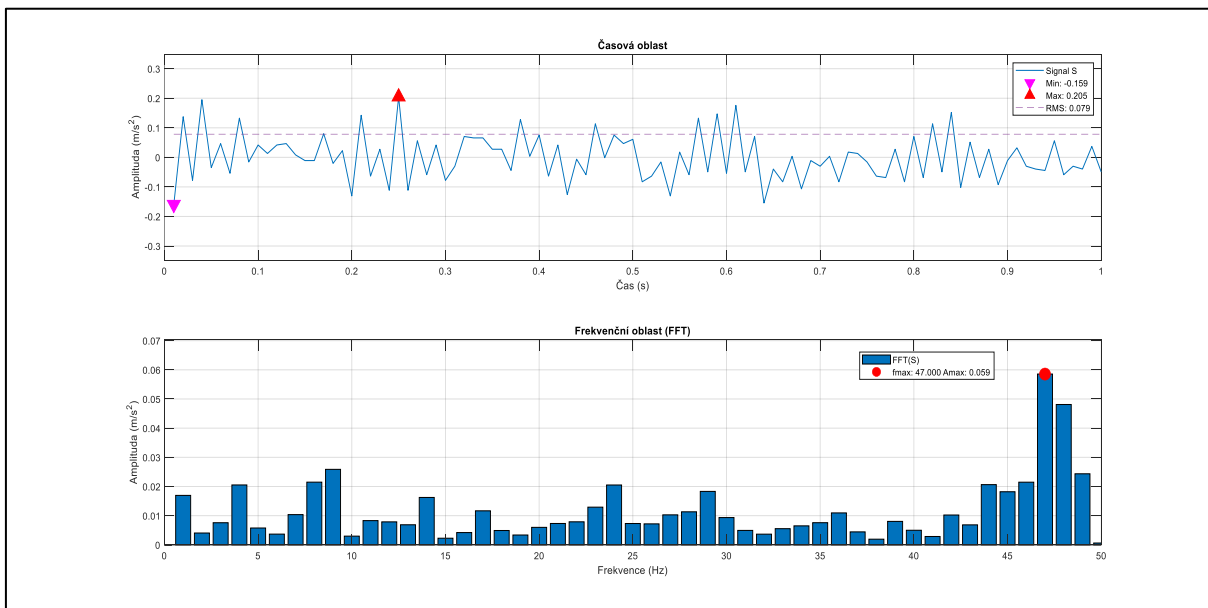
Obr. 30) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 40,9 Hz.



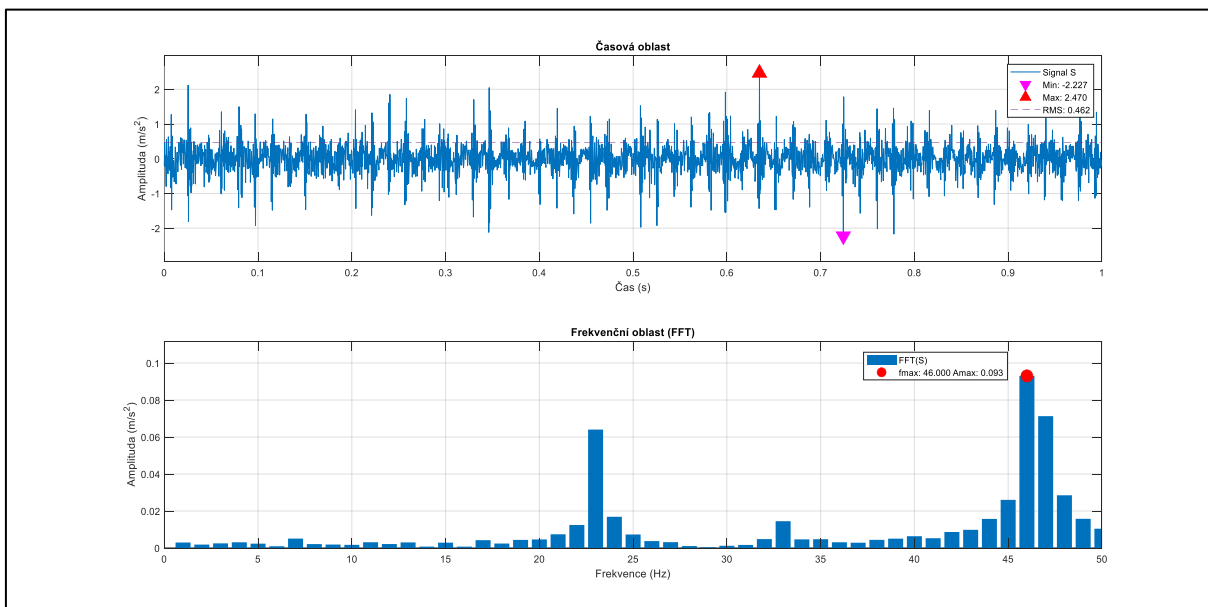
Obr. 31) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 40,9 Hz.

## 8.4 Vyhodnocení dat při měření s nevyváhou a uvolněnou základnou

### 8.4.1 Vyhodnocení dat při měření s nevyváhou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 24,4 Hz



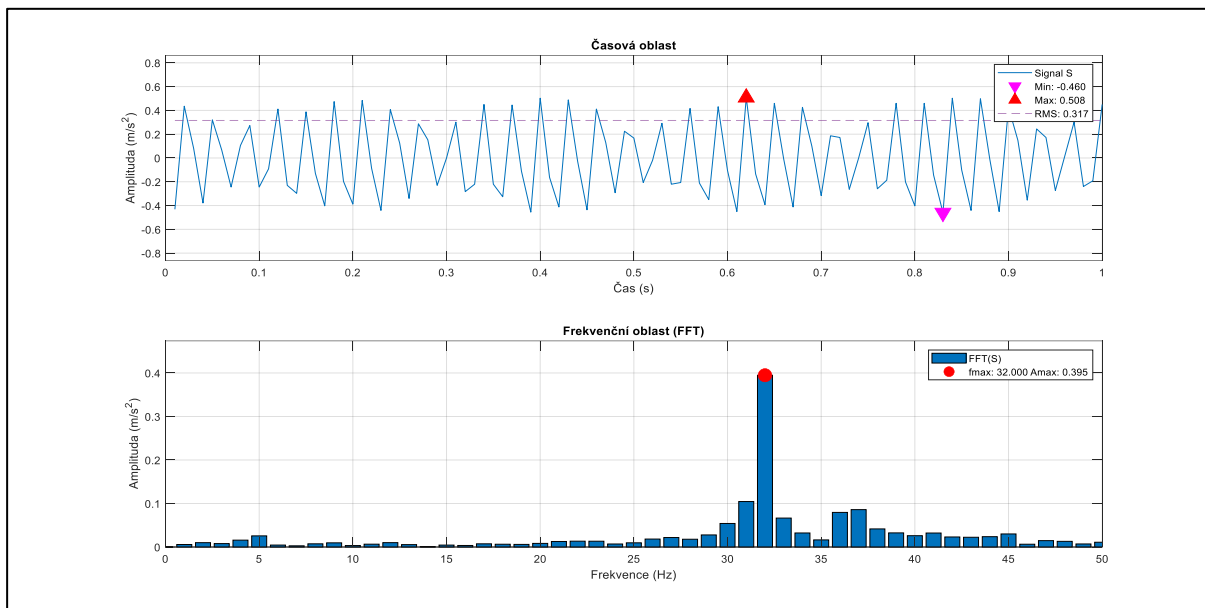
Obr. 32) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevyváhou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 24,4 Hz.



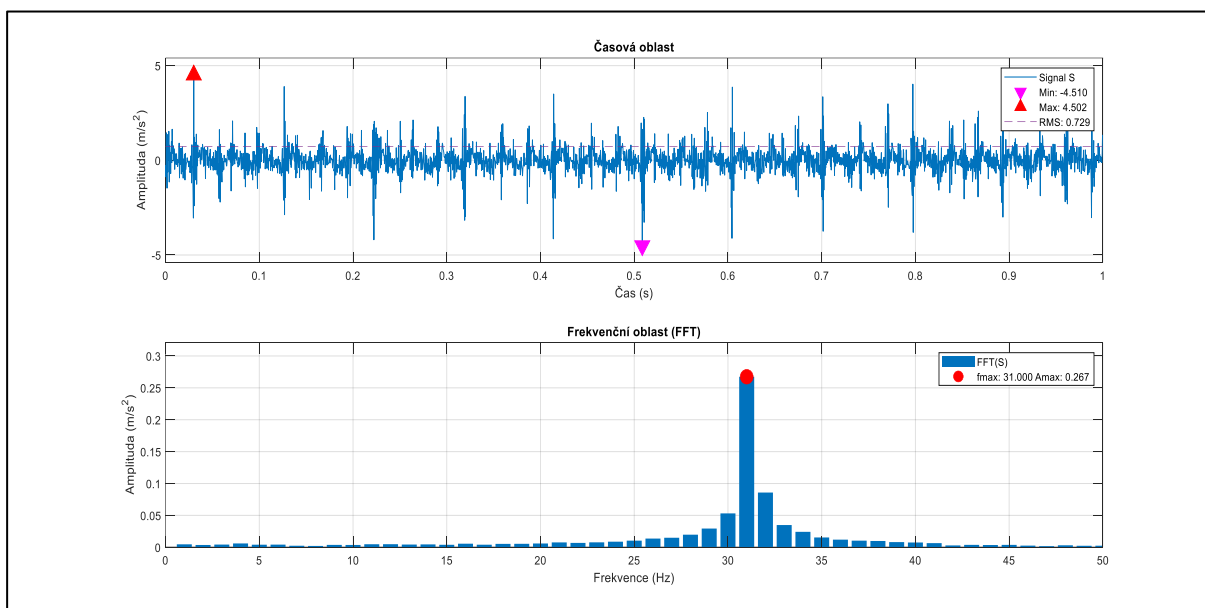
Obr. 33) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevyváhou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 24,4 Hz.



## 8.4.2 Vyhodnocení dat při měření s nevývahou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 33,2 Hz

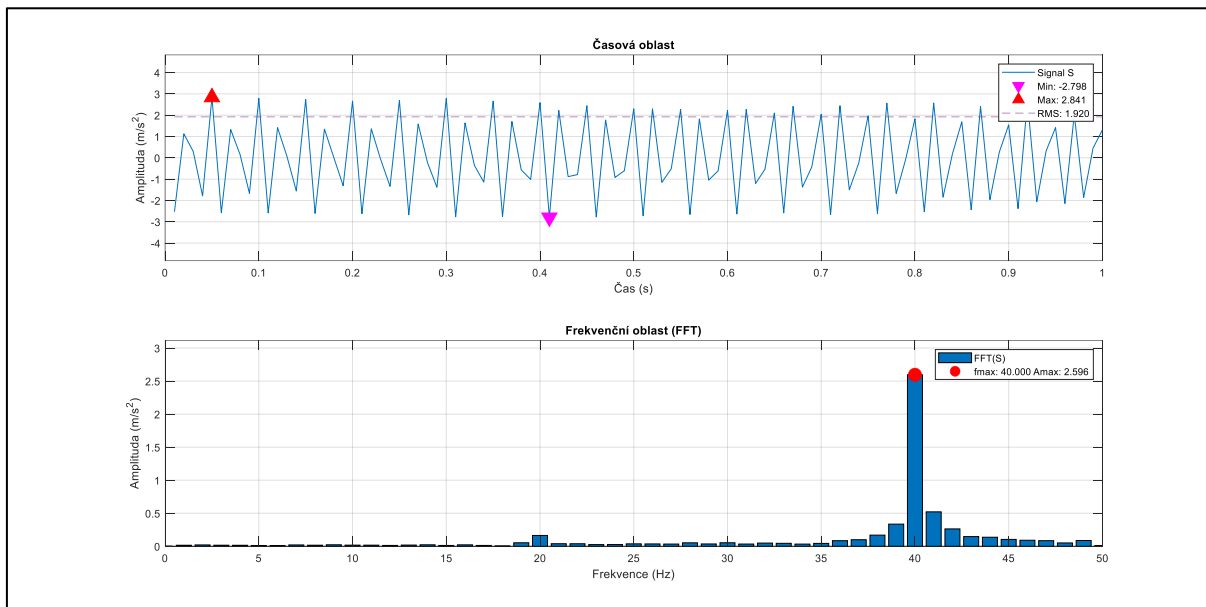


Obr. 34) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevývahou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 33,2 Hz.

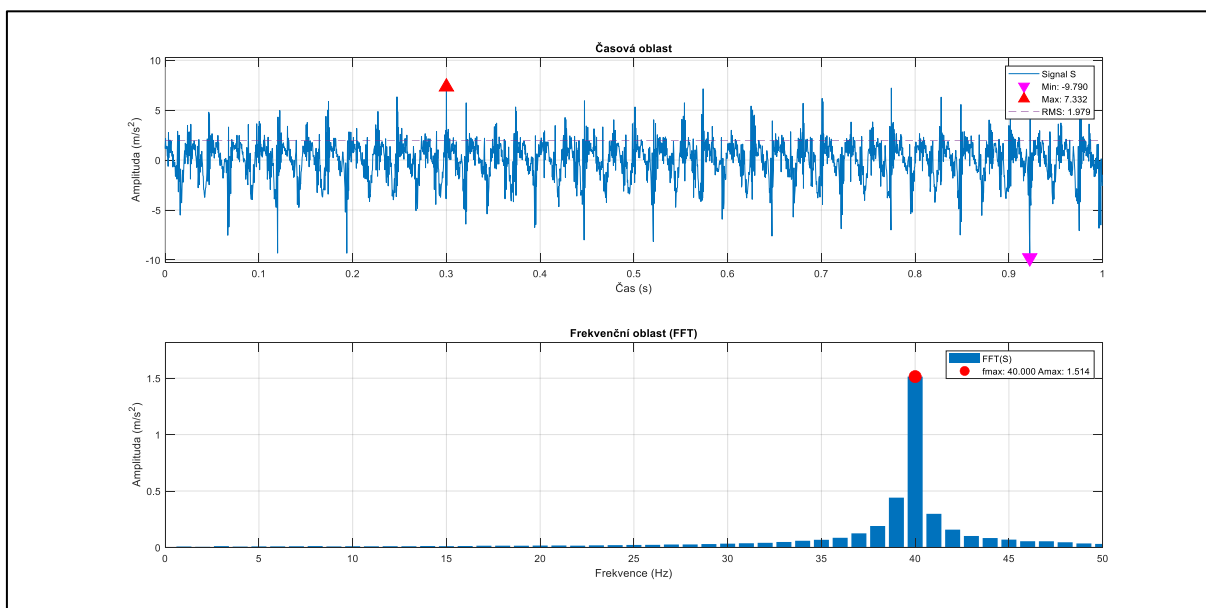


Obr. 35) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevývahou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 33,2 Hz.

### 8.4.3 Vyhodnocení dat při měření s nevývahou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 42,1 Hz



Obr. 36) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevývahou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 42,1 Hz.



Obr. 37) Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevývahou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 42,1 Hz.

## 9 ZÁVĚR

Na závěr této práce bych rád shrnul výsledky analýz a vyjádřil se k nim. Při porovnání provedených analýz dat naměřených pomocí mobilního telefonu a dat naměřených pomocí techniky používané v praxi lze konstatovat, že výrazné frekvence ve frekvenčních spektrech jsou si hodnotově velice blízké až totožné. Musím ale zdůraznit nejednu skutečnost.

Jednotlivé analýzy a následně i porovnání byly provedeny pouze ve frekvenční oblasti od 0 do 50 Hz. Při otáčkových frekvencích, jak tomu bylo u provedeného experimentu, se v této frekvenční oblasti projevuje poměrně velký počet závad. Já jsem v experimentu provedl simulaci bez nevývahy, s nevývahou a poté kombinaci nevývahy s uvolněnou základnou. Tyto simulace se projevily ve frekvenčním spektru dle očekávání, ale při neznámé závadě by byla potřeba mnohem důslednější analýza. Také při otáčkové frekvenci stroje větší nebo blízké se hodnotě 50 Hz, by výsledky analýzy neprokázaly skutečné závady.

Je třeba také zmínit, že měřící místo na stroji musí být na dobře přístupném místě. Důležité také je udržet mobilní telefon v kontaktu s měřícím místem. Z vlastní zkušenosti můžu konstatovat, že není úplně jednoduché udržet hranu telefonu na měřícím místě. Také doporučuji měřit za pomoci os X a Y, jelikož osa Z kapacitních akcelerometrů v mobilním telefonu má vlastnosti odlišné od zbývajících os. Nedá se ale říct, že osa Z má horší vlastnosti, má pouze odlišné vlastnosti. Příčina tohoto faktu spočívá v konstrukci samotného snímače.

Dalším velice důležitým kritériem je bezpečnost obsluhy. Není vůbec žádoucí manipulovat s mobilním telefonem v blízkosti operačního prostředí rotačního stroje. Navíc mají novější stroje řadu bezpečnostních prvků, které se snaží zabránit právě manipulaci v operačním prostředí. Při upuštění telefonu by hrozilo nejen poškození samotného stroje, ale hlavně ohrožení až poranění obsluhy.

Samozřejmě nespornou výhodou je, že chytrý mobilní telefon v dnešní době, troufnu si říct, již vlastní každý z nás. Tím jsem chtěl říct, že mobilní telefon máme každý k dispozici a nemusíme vynaložit žádné peníze navíc. Otázkou ale stále zůstává, jak by častější měření vibrací mobilním telefonem ovlivnilo jeho funkčnost a životnost. Dá se předpokládat, že vystavení častému vlivu vibrací by náš telefon nenesl nejlépe a dříve či později by došlo k jeho zničení.

Z důvodů shrnutých výše je použití mobilního telefonu pro měření vibrací velice omezené a nelze je brát jako adekvátní náhradu běžně používaných diagnostických přístrojů. Doporučil bych tedy výsledek měření vibrací za pomoci mobilního telefonu brát jen jako orientační hodnotu, která by měla být podložena následným měřením za pomoci techniky určené k měření a analýze vibrací stroje.



## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky teorie a praxe* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-12-07]. ISBN 978-80-248-2997-5. Dostupné z: <http://interdiago.vsb.cz/kom/upload/18-MetodyTechnickeDiagnostiky.pdf>
- [2] CHUDÝ, Vladimír. *Meranie technických veličín*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999, 688 s. : il. ISBN 80-227-1275-2.
- [3] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2010, 16(1) [cit. 2020-12-07]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/mereni-vibraci-ve-vibrodiagnostice-2010\\_01\\_40375\\_5744/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/mereni-vibraci-ve-vibrodiagnostice-2010_01_40375_5744/)
- [4] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN, 2006, 406 s. : il. ISBN 80-7300-158-6.
- [5] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část vibrační diagnostika* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2021-02-02]. ISBN 978-80-248-2755-1. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>
- [6] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT* [online]. Praha: Sdělovací technika, 1997 [cit. 2021-02-03]. ISBN 80-901-9361-7. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~tum52/index.php?page=publications>
- [7] MICRO-EPSILON Czech Republic, spol. s r. o. Snímače na principu vířivých proudů – čistá práce ve špinavém prostředí. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2019, 25(2-3), 33-34 [cit. 2021-02-02]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <https://automa.cz/page-flip/casopis/automa/2019/03/index.html#page/1>
- [8] HUSÁK, Miroslav. MEMS a mikrosystémové technologie. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2008, 14(11), 7-11 [cit. 2021-02-10]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <https://automa.cz/page-flip/casopis/automa/2008/11/index.html#page/1>
- [9] HUSÁK, Miroslav. Užití MEMS v průmyslu. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2008, 14(12), 14-18 [cit. 2021-02-11]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <https://automa.cz/page-flip/casopis/automa/2008/12/index.html#page/1>
- [10] Piezoelectric Accelerometers. In: *Brüel & Kjær: an HBK company* [online]. Brüel & Kjær, ©[2021] [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/vibration/piezoelectric-accelerometers>
- [11] Acceleration sensor BMA455. *Bosch: Bosch Sensortec GmbH* [online]. ©[2021] [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1137427/BOSCH/BMA455.html>
- [12] Acceleration sensor BMA422. *Bosch: Bosch Sensortec GmbH* [online]. ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/products/motion-sensors/accelerometers/bma422/>
- [13] Accelerometer BMA253. *Bosch: Bosch Sensortec GmbH* [online]. ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/products/motion-sensors/accelerometers/bma253/>

- [14] IMU:BMA263. *Bosch: Bosch Sensortec GmbH* [online]. ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/products/motion-sensors/imus/bmi263/>
- [15] ICM-42605. *TDK: InvenSense* [online]. ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/icm-42605/>
- [16] ICM-20948. *TDK: InvenSense* [online]. ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/9-axis/icm-20948/>
- [17] Accelerometer LIS2DH12. *STMicroelectronics* [online]. ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis2dh12.html>
- [18] Accelerometer LIS2DS12. *STMicroelectronics* [online]. ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis2ds12.html>
- [19] Accelerometer LIS2DW12. *STMicroelectronics* [online]. ©2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis2dw12.html>
- [20] *Phyphox: physical phone experiments* [online]. Německo: RWTH Aachen University, [2016] [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://phyphox.org/>
- [21] *Bosch: App Center* [online]. Robert Bosch, © 2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://appcenter.bosch.com/applications/3c970d10-b16f-4802-ad1d-869f25df6a60>
- [22] *Sensor Logger* [online]. Kelvin Choi [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.tszheichoi.com/sensorlogger>
- [23] *MathWorks: MATLAB Mobile* [online]. The MathWorks, © 1994-2021 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/products/matlab-mobile.html>
- [24] CMSS 2111: Malý akcelerometr s integrovaným kabelem. *SKF* [online]. Göteborg: SKF Group, ©2018 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: [https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196804926fe-11604\\_16-EN-Vibration-Sensor-Catalogue---OK\\_tcm\\_12-267858.pdf#cid-267858](https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196804926fe-11604_16-EN-Vibration-Sensor-Catalogue---OK_tcm_12-267858.pdf#cid-267858)
- [25] DC Servomotor: PIVTM-6 25/2. *Dynamo Sliven* [online]. Sliven [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://dynamo-bg.com/en/product/dc-servomotors-pivt/>

# 11 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

## 11.1 Seznam obrázků

Obr. 1)	Hodnotící parametry časového průběhu kmitavého pohybu (signálu) [3].....	19
Obr. 2)	Průběh hodnot činitele výkmitu v průběhu životnosti ložiska [3].....	19
Obr. 3)	Stanovení kinematické dráhy rotující hřídele ( $s_1$ , $s_2$ – složky výchylky snímačů $S_1$ , $S_2$ ; $K$ – kinematická dráha hřídele) [3].....	20
Obr. 4)	Ukázka princip skládání signálu [5].....	21
Obr. 5)	Frekvenční spektrum rychlosti vibrací čtyřdobého čtyřválcového motoru [1]	22
Obr. 6)	Relativní a absolutní kmity [3].....	25
Obr. 7)	Snímač vzdálenosti na principu vířivých proudů [7] .....	26
Obr. 8)	Absolutní elektrodynamický senzor rychlosti: a) s pohyblivou cívkou, b) s pohyblivým magnetem [4].....	27
Obr. 9)	Ukázka modifikací smykových akcelerometrů a centrálního tlakového akcelerometru [10] .....	28
Obr. 10)	Uspořádání piezorezistivních akcelerometrů: a) polovodičové tenzometry na vetknutém nosníku, b) princip MEMS technologie [4].....	29
Obr. 11)	Uspořádání kapacitního akcelerometru [4] .....	30
Obr. 12)	Jednoosý kapacitní akcelerometr s hřebenovým uspořádáním [9].....	30
Obr. 13)	Fotografie modelu vibrací použitého pro experiment .....	35
Obr. 14)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření bez nevyváhy s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz.....	39
Obr. 15)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření bez nevyváhy s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz.....	39
Obr. 16)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření bez nevyváhy s otáčkovou frekvencí 32,9 Hz.....	40
Obr. 17)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření bez nevyváhy s otáčkovou frekvencí 32,9 Hz.....	40
Obr. 18)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření bez nevyváhy s otáčkovou frekvencí 41,1 Hz.....	41
Obr. 19)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření bez nevyváhy s otáčkovou frekvencí 41,1 Hz.....	41
Obr. 20)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz.....	42
Obr. 21)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 25,1 Hz.....	42
Obr. 22)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 33,1 Hz.....	43
Obr. 23)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 33,1 Hz.....	43
Obr. 24)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 41,3 Hz.....	44
Obr. 25)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevyváhou s otáčkovou frekvencí 43,1 Hz.....	44

Obr. 26)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 24,8 Hz. ....	45
Obr. 27)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 24,8 Hz. ....	45
Obr. 28)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 32,8 Hz. ....	46
Obr. 29)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 32,8 Hz. ....	46
Obr. 30)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 40,9 Hz. ....	47
Obr. 31)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření se dvěma nevyváhami s otáčkovou frekvencí 40,9 Hz. ....	47
Obr. 32)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevyváhou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 24,4 Hz. ....	48
Obr. 33)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevyváhou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 24,4 Hz. ....	48
Obr. 34)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevyváhou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 33,2 Hz. ....	49
Obr. 35)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevyváhou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 33,2 Hz. ....	49
Obr. 36)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených mobilním telefonem při měření s jednou nevyváhou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 42,1 Hz. ....	50
Obr. 37)	Časová oblast a frekvenční spektrum dat naměřených Micrologem při měření s jednou nevyváhou a uvolněnou základnou s otáčkovou frekvencí 42,1 Hz. ....	50

## 11.2 Seznam tabulek

Tab 1)	Přehled měření doplněný o otáčkové frekvence.....	36
--------	---	----



## 12 SEZNAM PŘÍLOH

### **Elektronická příloha A**

Skript z programu Matlab použitý pro odstranění statické složky tíhového zrychlení naměřených signálů.

### **Elektronická příloha B**

Skript z programu Matlab použitý pro provedení rychlé Fourierovi transformace a jejího následného upravení.

### **Elektronická příloha C**

Skript z programu Matlab použitý pro provedení analýzy naměřených signálů mobilním telefonem.

### **Elektronická příloha D**

Skript z programu Matlab použitý pro provedení analýzy naměřených signálů profesionální měřicí technikou.