

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Možnosti využití a parametry akcelerometrů MEMS**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**Fakulta elektrotechnická**  
**Akademický rok: 2014/2015**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan BLAŽEK**  
Osobní číslo: **E12N0164P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**  
Název tématu: **Možnosti využití a parametry akcelerometrů MEMS**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### **Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

1. Prostudujte vlastnosti a parametry akcelerometrů MEMS.
2. Navrhněte funkční uspořádání měřicího řetězce.
3. Měřicí řetězec realizujte a ověřte jeho parametry.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Hrubý**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

**Abstrakt**

Práce se soustředí na prozkoumání parametrů a různých principů měření MEMS akcelerometrů. V rámci práce bylo vybráno několik zajímavých akcelerometrů, pro které byly navrženy DPS. Snímače byly realizovány. Následně byla zvolena vhodná měřicí metoda a provedeno měření pro ověření parametrů jednotlivých senzorů. Z poznatků získaných během realizace a měření byla vyvozena určitá doporučení pro práci s těmito snímači. V závěru byly pak vyhodnoceny naměřené hodnoty.

**Klíčová slova**

MEMS akcelerometry, Parametry akcelerometrů, Měření zrychlení

## **Abstract**

Blažek, Jan. *Properties and usability of MEMS accelerometers* [*Možnosti využití a parametry akcelerometrů MEMS*]. Pilsen, 2015. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Technologies and Measurement. Supervisor: Jan Hrubý

---

This thesis focuses on exploring the parameters and different measuring principles of MEMS accelerometers. As part of the thesis, several interesting accelerometers were chosen, for which PCBs were designed and sensors were realized. Subsequently, a suitable measuring method was selected and measurements were performed to verify the parameters of each sensor. From the knowledge gained during the implementation and measurement, certain recommendations for working with these sensors were drawn. Finally, the measured values were evaluated.

## **Key words**

MEMS accelerometers, Accelerometer parameters, Acceleration measuring

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 11.5.2015

Jan Blažek

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 MEMS</b> .....	<b>11</b>
1.1 VÝZNAM.....	11
1.2 TECHNOLOGIE VÝROBY .....	11
1.3 MOŽNOSTI.....	11
1.4 VÝHODY .....	12
<b>2 ZRYCHLENÍ</b> .....	<b>12</b>
2.1 TEORIE .....	12
2.2 ZPŮSOBY MĚŘENÍ .....	13
<b>3 MEMS AKCELEROMETRY</b> .....	<b>15</b>
3.1 RŮZNÉ PRINCIPY MĚŘENÍ.....	15
<i>Kapacitní</i> .....	15
<i>Tepelné</i> .....	19
<i>Piezorezistivní</i> .....	20
<i>Piezoelektrické</i> .....	21
3.2 PARAMETRY .....	22
3.3 VÝBĚR VHODNÉHO AKCELEROMETRU .....	24
3.4 MOŽNOSTI VYUŽITÍ .....	25
<i>Spotřební elektronika</i> .....	25
<i>Automotive</i> .....	26
<i>Průmysl</i> .....	26
<b>4 VÝBĚR ZAJÍMAVÝCH AKCELEROMETRŮ</b> .....	<b>27</b>
4.1 ANALOGOVÉ.....	27
<i>ADXL001-70</i> .....	27
<i>ADXL203</i> .....	28
<i>LIS344ALH</i> .....	29

<i>KXD94</i> .....	30
<i>832M1</i> .....	31
<i>3031</i> .....	32
4.2 DIGITÁLNÍ .....	32
<i>ADXL345</i> .....	32
<i>ADXL375</i> .....	33
<i>LIS3DSH</i> .....	34
<i>MMA8451Q</i> .....	35
<i>MXP7205VF</i> .....	36
4.3 NÁVRH DPS .....	37
4.4 REALIZACE MĚŘÍCÍCH PŘÍPRAVKŮ .....	37
<b>5 MĚŘENÍ .....</b>	<b>38</b>
5.1 ZPŮSOB MĚŘENÍ.....	38
5.2 MĚŘENÍ ANALOGOVÝCH AKCELEROMETRŮ .....	40
<i>Citlivost</i> .....	40
<i>Frekvenční charakteristika</i> .....	40
5.3 MĚŘENÍ DIGITÁLNÍCH AKCELEROMETRŮ .....	42
5.4 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY .....	43
<i>Analogové akcelerometry</i> .....	43
<i>Digitální akcelerometry</i> .....	44
<b>6 ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>45</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>46</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>47</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratek

$\vec{a}$ .....	zrychlení [ $m/s^2$ ]
$\vec{a}_\omega$ .....	úhlové zrychlení [ $rad/s^2$ ]
$g$ .....	tíhové zrychlení Země [ $m/s^2$ ]
$g_n$ .....	normální tíhové zrychlení Země (9,80665 $m/s^2$ )
$\vec{v}$ .....	rychlost [ $m/s$ ]
$\vec{\omega}$ .....	úhlová rychlost [ $rad/s$ ]
MEMS.....	Micro-Electro-Mechanical Systems
I <sup>2</sup> C .....	Inter-Integrated Circuit
SPI.....	Serial Peripheral Interface

## Úvod

Jednou z nejdůležitějších součástí systémů pracujících s reálnými fyzikálními veličinami, ať už se jedná o regulátor, informační či bezpečnostní systém, jsou převodníky, konvertující různé veličiny na elektrický signál. Hlavní částí takového převodníku je senzor neelektrické veličiny, který ale často bývá nejslabším článkem celého systému. Zejména v současné době, kdy už dostatečný výpočetní výkon není problém. Velká je poptávka po kvalitních, přesných a malých pokud možno co nejlevnějších senzorech. Z tohoto pohledu jsou zajímavou alternativou ke klasickým, senzory MEMS.

# 1 MEMS

## 1.1 Význam

MEMS je zkratka z anglického „Micro-Electro-Mechanical Systems“ a jedná se o technologii výroby miniaturních mikro-mechanických prvků, umístěných na křemíkové bázi pomocí moderních výrobních metod, používaných u elektrických integrovaných obvodů. Přízvisko mikro v názvu znamená, že rozměry mechanických prvků jsou v řádu mikrometrů. Díky použití stejné křemíkové báze a principiálně stejných výrobních technologií jako při výrobě integrovaných obvodů, je možné na jednu bázi, potažmo do jednoho čipu, umístit mechanickou i elektrickou část systému (tzv. system-on-a-chip). Naskýtá se tak možnost vytvářet SMART systémy, kde mechanická část zajišťuje převod mezi neelektrickou a elektrickou veličinou, elektrický signál je následně analogově upraven (zesílen, filtrován, ...), pak digitalizován a vyhodnocen číslicovou částí. To vše integrované v jednom čipu.

## 1.2 Technologie výroby

Jak již bylo zmíněno, při výrobě MEMS se používají metody vyvinuté pro výrobu integrovaných obvodů. Technologie obecně nazývaná mikro-obrábění zahrnuje různé výrobní postupy. Konkrétní postup záleží především na použitých materiálech. Mezi materiály užívané při výrobě MEMS patří především kovy, polovodiče, keramika a polymery. Na křemíkovou bázi je nanesen požadovaný materiál, nejčastěji metodou tenkých vrstev (naprašování nebo napařování) a následně je pomocí mikro-obrábění vytvořen žádaný motiv (struktura mechanických prvků). Využívá se např. selektivní leptání nebo litografie (LIGA technology).

## 1.3 Možnosti

V současné době se pomocí MEMS technologie vyrábějí různé senzory fyzikálních veličin, jako např. akcelerometry, gyroskopy, mikrofony, barometry a další. Existují také chemické MEMS senzory pro detekci různých látek. MEMS aktuátory se používají v optoelektrických zařízeních. A experimentuje se dokonce i s MEMS generátory energie, které by dokázaly vytvářet elektrickou energii z vibrací a šetřit tak baterie u některých přenosných zařízeních.

## 1.4 Výhody

Největší výhodou jsou především rozměry výsledného senzoru. Dále pak nízké výrobní náklady, díky využití podobných technologií, jak při výrobě integrovaných obvodů. Vysoký stupeň integrace a odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Pomocí mikro obrábění můžeme vytvářet takové mechanické prvky a struktury, které lze realizovat pouze v mikro světě. Mikro mechanika skýtá do budoucna mnoho možností. Na její výzkum jsou v posledních letech vynakládány nemalé prostředky.

## 2 Zrychlení

### 2.1 Teorie

Zrychlení je fyzikální veličina vyjádřená jako derivace rychlosti podle času. Rychlost je vektorová veličina a zrychlení tedy vzniká při změně velikosti nebo směru rychlosti. Proto např. u rotačního pohybu vzniká zrychlení (nazývané též dostředivé) i při konstantní velikosti rychlosti, jelikož směr rychlosti se neustále mění.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{s}}{dt^2} \quad (2.1)$$

U rotačního pohybu navíc rozlišujeme ještě úhlové zrychlení, které je definované jako derivace úhlové rychlosti podle času.

$$a_\omega = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (2.2)$$

Zrychlení můžeme vypočítat také z Druhého Newtonova zákona, pokud známe hmotnost tělesa a výslednici všech sil, které na něj působí.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (2.3)$$

Pokud budeme znát průběh zrychlení v čase, můžeme zpětně integrováním určit průběh rychlosti.

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \int \vec{a} dt \quad (2.4)$$

Pro aktuální rychlost pak platí:

$$\vec{v}(t_1) = \vec{v}(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \vec{a}(t) dt \quad (2.5)$$

Další integrací ale můžeme rekonstruovat i trajektorii, po které se objekt pohyboval.

$$\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{v}_0 \cdot t + \iint \vec{a} dt^2 \quad (2.6)$$

Pro aktuální polohu v ose x pak platí:

$$x(t_1) = x(t_0) + v_x(t_0) \cdot t + \iint_{t_0}^{t_1} a_x(t) dt^2 \quad (2.7)$$

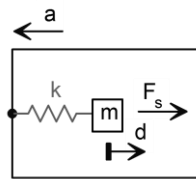
Pro zjištění aktuální polohy v trojrozměrném prostoru pak stačí stejným způsobem integrovat všechny tři složky zrychlení. Toho se využívá v inerciálních navigačních systémech. Vytvořit takový systém je však v praxi dost problematické, protože při integrování nepřesných hodnot chyba s časem neustále narůstá a po určité době je výsledek zcela nepoužitelný. Řešením může být omezení doby integrace tím, že v pravidelných intervalech provedeme kalibraci (zadání nových počátečních podmínek) jiným systémem. Když to není možné, je třeba zajistit co největší přesnost měření. Další chyby jsou ale zapříčiněny gravitačním zrychlením Země, které se musí složitě filtrovat.

I přes všechny problémy však vývoj v této oblasti stále pokračuje a přesnost inerciálních navigačních systémů se stále zvyšuje, především díky příchodu MEMS technologie.

## 2.2 Způsoby měření

Zrychlení se měří pomocí akcelerometrů, pracujících nejčastěji na principu měření setrvačné síly působící na hmotný bod (pohyblivou část snímače) se známou hmotností.

Hmotný bod je umístěn na pružině, jejíž konstantu pružnosti  $k$  známe a měříme výchylku  $d$  hmotného bodu od nulové polohy.



Obr. 2.1 Soustava pružně uchyceného hmotného bodu, na který působí zrychlení.

$$F_s = k \cdot d \quad (2.8)$$

Pro určení zrychlení v jedné ose pak platí:

$$a = \frac{-F_s}{m} = \frac{-k \cdot d}{m} \quad (2.9)$$

Obdobným způsobem můžeme měřit zrychlení ve všech třech osách.

Úhlovou rychlost je možné měřit pomocí gyroskopu, který je založen na měření Coriolisovy síly. Ta vzniká při změně vzdálenosti hmotného bodu od osy otáčení v rotující soustavě. Pro Coriolisovo zrychlení platí vztah:

$$\vec{a}_c = -2 \cdot \vec{\omega} \times \vec{v} \quad (2.10)$$

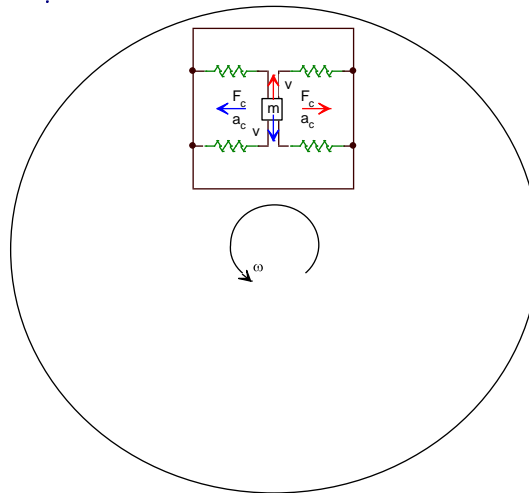
Z toho vyplývá vztah pro Coriolisovu sílu:

$$\vec{F}_c = -2 \cdot m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v} \quad (2.11)$$

Hmotný bod o hmotnosti  $m$  kmitá známou rychlostí a sílu působící na pružiny měříme (znázorněno na Obr. 2.2). Po úpravě rovnice tedy můžeme vypočítat úhlovou rychlost gyroskopu v jedné ose.

$$\vec{\omega} = -\frac{1}{2 \cdot m} \cdot \vec{F}_c \times \vec{v}^{-1} \quad (2.12)$$

Měření ve všech třech osách vyžaduje použití tří takových navzájem kolmých měřících mechanismů, stejně jako u tříosých akcelerometrů. Derivováním úhlové rychlosti v čase je možné získat úhlové zrychlení, ale při popisu rotujících systémů většinou stačí údaj o aktuální úhlové rychlosti.



Obr. 2.2 Znárodnění funkce gyroskopu.

### 3 MEMS Akcelerometry

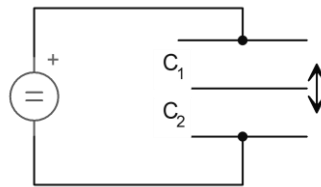
Akcelerometry vyráběné technologií MEMS v posledních letech přispěly k výraznému rozšíření těchto senzorů. Pro měření zrychlení využívají různé principy, přičemž každý je vhodný pro jiné použití. V další části budou popsány principy měření a vlastnosti jednotlivých technologií.

#### 3.1 Různé principy měření

##### Kapacitní

Nejrozšířenější jsou v současné době kapacitní senzory. První generace těchto senzorů pracovala na principu kapacitního děliče napětí. Kapacitní dělič byl tvořen dvěma elektrodami pevně spojenými s křemíkovou bází a pružně uchycenou pohyblivou elektrodou. Na pevné elektrody bylo přivedeno stejnosměrné polarizační napětí, které vytvořilo elektrické pole. Údaj

o zrychlení v tomto směru byl dán napětím naměřeným na pohyblivé elektrodě.

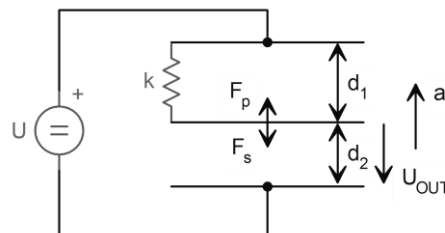


Obr. 3.1 Kapacitní dělič.

Vzorec pro kapacitní dělič napětí.

$$U_{C2} = U \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (3.1)$$

Princip je to velmi jednoduchý, ale když se podrobněji podíváme na vlastnosti takového snímače, zjistíme, že má několik nevýhod.



Obr. 3.2 Kapacitní dělič s pružně uchycenou střední elektrodou.

$$\begin{aligned} d &= d_1 + d_2 \\ x &= d_1 - d_2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Úpravou vzorce (kapacitní dělič) získáme.

$$U_{OUT} = U \cdot \frac{d_2}{d} \quad (3.3)$$

V ustáleném stavu je setrvačná síla vzniklá působením zrychlení stejně velká, ale má opačný směr než síla pružiny, která vrací pohyblivou část do klidové polohy. Konstanta  $k$  je tuhost pružiny.

$$F_s = -F_p = -k \cdot x \quad (3.4)$$



Po dosazení za  $x$  ze vzorce pro kapacitní dělič:

$$F_p = k \cdot \left[ \frac{d \cdot (U - U_{OUT})}{U} - \frac{d \cdot U_{OUT}}{U} \right] \quad (3.5)$$

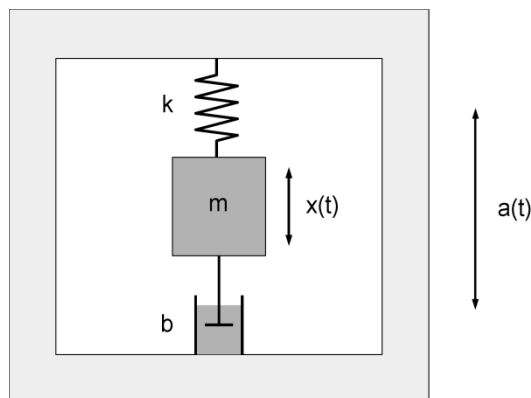
Síla vytvářená pružinou je dána:

$$F_p = k \cdot d \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot U_{OUT}}{U} \right) \quad (3.6)$$

Z ní je možné zpětně spočítat zrychlení působící na celý senzor.

$$a = \frac{F_p}{m} = \frac{k \cdot d}{m} \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot U_{OUT}}{U} \right) \quad (3.7)$$

To vše platí za předpokladu ideálně pružného uchycení pohyblivé části. Reálné pružiny však mají určitou dynamiku a musíme tak uvažovat i časový průběh zrychlení. Výpočet se tím značně komplikuje.



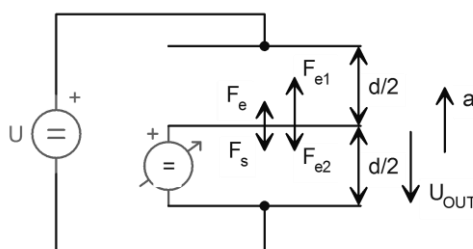
Obr. 3.3 Blokové schéma reálné pružně uchycené soustavy.

$$m \cdot a(t) = m \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \cdot \frac{dx(t)}{dt} + k \cdot x(t) \quad (3.8)$$

První derivace výchylky násobená  $b$  vyjadřuje tlumení ( $b$  je konstanta tlumení), vzniklé např. odporem vzduchu, nedokonalostí uchycení, nebo záměrné tlumení. Druhá derivace krát hmotnost má význam vnitřní setrvačnosti.

Pro zvýšení přesnosti byla snaha o odstranění vlivu mechanických vlastností na výstupní napětí. Proto se u většiny dnes používaných kapacitních senzorů přešlo na zpětnovazební systém.

Stejně jako v předchozím případě je kapacitním děličem měřena výchylka pohyblivé části. Tento signál ovšem neslouží jako výstup, ale je zaveden do zpětnovazebního kompenzačního obvodu, který se snaží pomocí síly působící na elektrody v elektrickém poli vyvažovat setrvačnou sílu vzniklou působením zrychlení na hmotu pohyblivé části. Zpětná vazba se tedy snaží udržet pohyblivou část v nulové poloze (přesně uprostřed). Pokud je systém dobře odladěn, pohyblivá část se téměř nehýbe a výstupem senzoru je napětí potřebné k vytvoření elektrické síly, která kompenzuje setrvačnou sílu. Reálná zpětná vazba samozřejmě také není nekonečně rychlá a má určitou dynamiku, ale ta je výrazně lepší než u mechanických prvků.



Obr. 3.4 Kapacitní dělič se zpětnovazebně stabilizovanou střední elektrodou.

Síla působící na náboj v elektrickém poli:

$$\vec{F}_e = Q \cdot \vec{E} \quad (3.9)$$

Síla působící na pohyblivou elektrodu kapacitního děliče, pokud je zpětnovazebně udržována ve středové poloze.

$$\begin{aligned} F_e = F_{e1} - F_{e2} &= \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot S}{d^2} \cdot [(U - U_{OUT})^2 - U_{OUT}^2] \\ &= \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot S \cdot U}{d^2} \cdot (U - 2 \cdot U_{OUT}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Pokud platí:

$$F_s = -F_e \quad (3.11)$$

pak zrychlení je:

$$a = \frac{F_e}{m} = \frac{4 \cdot C \cdot U}{m \cdot d} \cdot (U - 2 \cdot U_{OUT}) \quad (3.12)$$

Další úpravou získáme vztah pro výstupní napětí.

$$U_{OUT} = \frac{U}{2} - \frac{d \cdot F_e}{8 \cdot C \cdot U} \quad (3.13)$$

	První generace	Druhá generace
Výstupní napětí	$U_{OUT} = \frac{U}{2} - a \cdot m \cdot \frac{U}{2 \cdot k \cdot d}$	$U_{OUT} = \frac{U}{2} - a \cdot m \cdot \frac{d}{8 \cdot C \cdot U}$
Zrychlení	$a = \frac{k \cdot d}{m} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot U_{OUT}}{U}\right)$	$a = \frac{4 \cdot C \cdot U^2}{m \cdot d} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot U_{OUT}}{U}\right)$
Rozsah	$a_{max} = \pm \frac{k \cdot d}{m}$	$a_{max} = \pm \frac{4 \cdot C \cdot U^2}{m \cdot d}$

Tab. 3.1 Porovnání první a druhé generace kapacitních akcelerometrů.

Akcelerometry první generace se stále používají v aplikacích, kde není kladen takový důraz na přesnost a spokojíme se s horšími dynamickými vlastnostmi, jejich výhodou je jednodušší design a s tím spojená nízká cena.

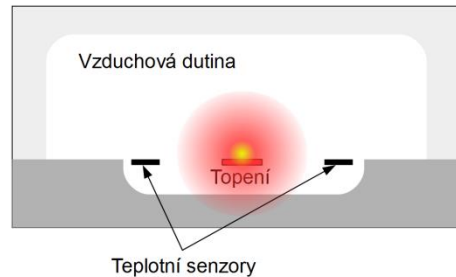
Kapacitní akcelerometry se za poslední roky výrazně posunuly vpřed a jejich rozšiřování napomáhají i nízké výrobní náklady, velký měřicí rozsah a neustále se zvyšující přesnost. Na trhu jsou už k dispozici i akcelerometry s teplotní kompenzací, které minimalizují teplotní drift.

## Tepelné

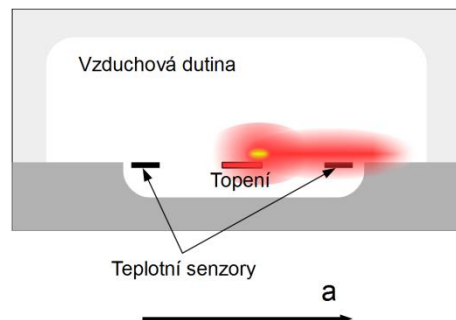
Tepelné akcelerometry jsou založeny na principu konvekce vyhřívaných molekul plynu v uzavřené dutině. Molekuly plynu s vyšší teplotou mají nižší hustotu, než chladnější plyn, tedy nižší hmotnost na stejný objem. Působí na ně menší setrvačná síla, a proto proudí od zdroje tepla ve směru působícího zrychlení. Senzor je tvořen soustavou buněk. Uprostřed každé z nich je umístěn odporový vyhřívací prvek, který ohřívá molekuly plynu, a na okrajích je měřena teplota pomocí termočlánků. Zrychlení je úměrné rozdílu naměřených teplot. Pomocí ortogonálního uspořádání buněk je možné vytvořit i tříosé akcelerometry.

Výhodou tepelných akcelerometrů je absence mechanických pohyblivých částí. Pohybují se pouze molekuly plynu. Díky tomu jsou velmi odolné proti šokovému zrychlení (výrobce uvádí až 50 000 g). Mezi další výhody patří časová a teplotní stálost offsetu, žádná rezonanční frekvence, vysoká přesnost, odolnost vůči elektromagnetickým polím a nízký šum.

Nevýhodou je malý frekvenční rozsah (od 0 do jednotek až desítek Hz) a s tím spojená pomalejší odezva při rychlé změně zrychlení, relativně malý měřicí rozsah (jednotky až desítky g) a vyšší spotřeba energie oproti kapacitním.



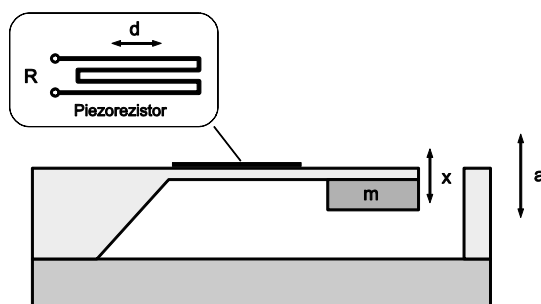
Obr. 3.5 Buňka tepelného akcelerometru při nulovém zrychlení.



Obr. 3.6 Buňka tepelného akcelerometru při působení zrychlení.

### Piezorezistivní

Někdy se nazývají též tenzometrické, protože pracují na podobném principu. Tenzometrický snímač není deformován vnějším tlakem, ale setrvačnou silou působící na pružně uchycenou hmotu vystavenou zrychlení. Odporová dráha tvořená piezorezistivním materiálem tedy mění svoje rozměry (zkracuje se nebo prodlužuje) v závislosti na působení zrychlení a tím se mění její ohmický odpor. Jelikož piezorezistivní materiál má velkou teplotní závislost, používá se většinou můstkové zapojení několika snímačů.



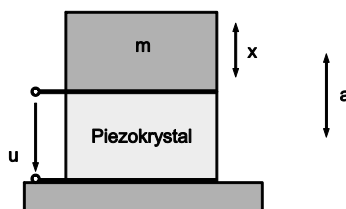
Obr. 3.7 Blokové schéma piezorezistivního akcelerometru.

Mezi jejich největší výhody patří velký měřicí rozsah, podle tuhosti pružného elementu může být jednotky g ale klidně i tisíce g. Na měřicím rozsahu závisí také frekvenční, pro nízké je 0 až stovky Hz, pro vysoké 0 až jednotky kHz.

Nevýhodou je velká teplotní závislost a vysoká cena (v porovnání s tepelnými a kapacitními).

### Piezelektrické

Seismická hmota je připevněna na piezokrystalu, při působení zrychlení na seismickou hmotu působí setrvačná síla, která deformuje krystal, tím se na stranách krystalu vytváří elektrický náboj (piezoelektrické napětí), který můžeme měřit. Velikost náboje je úměrná změně rozměrů krystalu. Z toho vyplývá, že těmito akcelerometry není možné měřit statické zrychlení, protože při něm je síla stále stejná a rozměry krystalu se nemění.



Obr. 3.8 Blokové schéma piezoelektrického akcelerometru.

Piezoelektrické akcelerometry mají největší frekvenční rozsah (jednotky Hz až desítky kHz). Měřicí rozsah je stejně velký jako u piezorezistivních (až tisíce g), ale při stejném rozsahu mají vyšší citlivost.

## 3.2 Parametry

### Měřicí rozsah

Udává maximální zrychlení, jaké senzor dokáže změřit. Uvádí se v násobcích tíhového zrychlení, jelikož však tíhové zrychlení není na všech místech na Zemi stejné, uvažujeme tzv. „normální tíhové zrychlení“, to má hodnotu  $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$  (odpovídá tíhovému zrychlení na  $45^\circ$  zeměpisné šířky u hladiny moře). U většiny akcelerometrů je měřicí rozsah symetrický (např.  $\pm 10 \text{ g}$ ), ale existují i speciální modely s nesymetrickým rozsahem.

### Maximální zrychlení

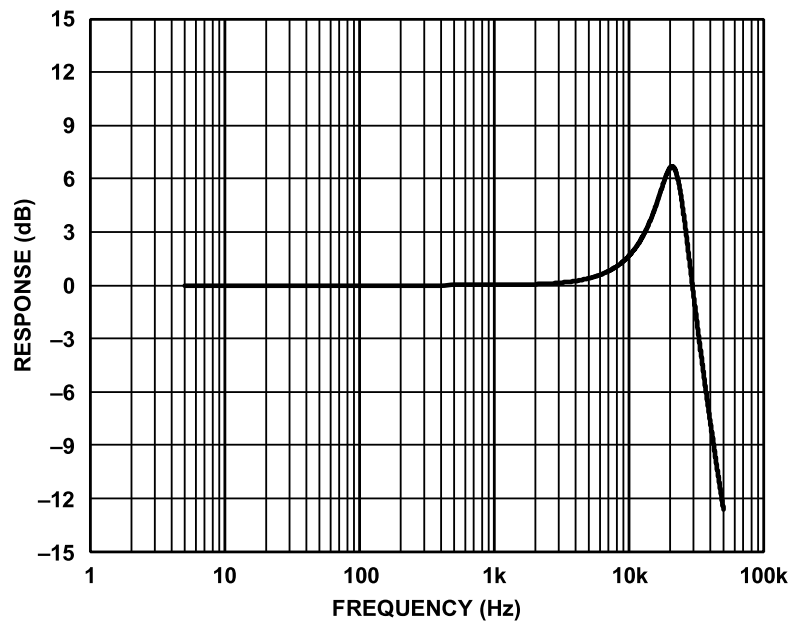
Šokové (rázové) zrychlení, jde o největší hodnotu zrychlení, při které ještě nedojde k mechanickému poškození senzoru. Většinou je omezena doba, po kterou může působit. Záleží na typu akcelerometru a pohybuje se od tisíců až do desítek tisíc g.

### Frekvenční rozsah

Stejně jako např. u mikrofonů, určuje frekvenční rozsah pracovní oblast akcelerometru, ve které citlivost neklesá pod určitou mez. Většinou se tím myslí pokles o 3 dB, ale někteří výrobci uvádějí frekvenční rozsah pro jiný pokles. Takové dva údaje pak nelze mezi sebou přímo srovnávat, jelikož k poklesu citlivosti dochází především na okrajích frekvenčního pásma. Rozsah s poklesem o 6 dB je zpravidla širší, než s poklesem o 3 dB.

### Rezonanční frekvence

Každá mechanická kmitající soustava má svoji rezonanční frekvenci danou rozměry kmitajících částí a použitým pružným uchycením. Rezonanční frekvence citlivých prvků určuje použitelnou oblast frekvenčního pásma snímače. Účinky rezonanční frekvence jsou dobře vidět na *Obr. 3.9*.



Obr. 3.9 Příklad frekvenční charakteristiky akcelerometru (ADXL001-70 dle výrobce).

### Citlivost

Udává, jak velkou změnu výstupu senzoru vyvolá změna zrychlení. U analogových akcelerometrů je uváděna v [mV/g]. U analogových s PWM výstupem je uváděna změna střídy v závislosti na zrychlení v [%/g]. U digitálních akcelerometrů výrobci většinou uvádí počet bitů na g [LSB/g], nebo obrácenou hodnotu v [mg/LSB]. Většina digitálních akcelerometrů nabízí volbu z několika měřících rozsahů, podle zvoleného rozsahu se pak mění i citlivost (rozlišení) senzoru, jelikož počet bitů na rozsah (daný integrovaným A/D převodníkem) zůstává stejný.

### Měřitelné osy

Určuje, v jakých směrech dokáže akcelerometr měřit zrychlení.

### Počet měřících rozsahů

Přepínání rozsahů je typické pro digitální akcelerometry, ale umožňují jej i některé analogové.

### Offset drift

Určuje, jak se mění offset při změně teploty senzoru.

## **Nelinearita**

Nelinearita citlivosti v celém měřicím rozsahu může způsobit nepřesný, nebo komplikovaný přepočítání výstupního napětí na zrychlení, proto se jí snažíme vyvarovat.

## **Šum**

Odstup signálu od šumu omezuje nejnižší měřitelné úrovně zrychlení. Většinou je udávána RMS úroveň šumu.

## **Hustota šumu**

Frekvenční hustota šumu určuje rozložení šumu ve frekvenčním pásmu. Podle intenzity šumu na různých kmitočtech můžeme rozlišovat např. bílý šum (s konstantním rozložením), růžový šum (jehož výkonová frekvenční hustota je přímo úměrná převrácené hodnotě frekvence), adt.

### **3.3 Výběr vhodného akcelerometru**

Při výběru akcelerometru bychom nejdříve měli určit, jaké největší zrychlení chceme měřit a jakému zrychlení, byť jen krátkodobě, může být senzor vystaven. Podle toho vybereme akcelerometr s patřičným rozsahem a odolností.

Další úvaha by měla vést k účelu použití (low-cost aplikace, nebo přesné měření). Pro spotřební elektroniku jsou v současné době asi nejvýhodnější kapacitní akcelerometry s interním digitálním zpracováním. Pokud chceme přesné měření, je situace o poznání složitější. Záleží především na frekvenčním pásmu, které chceme obsáhnout. Pro vyšší frekvence zůstávají stále nejpresnější piezoelektrické, naopak pro nízké kmitočty jsou lepší analogové kapacitní.



## Důležité parametry pro některé aplikace

Měřicí účely:

- Frekvenční charakteristika (šířka pásma, vyrovnanost, rezonanční frekvence)
- Měřicí rozsah
- Citlivost
- Odstup signál šum

Spotřební elektronika:

- Měřicí rozsah
- Možnosti automatického zpracování
- Velikost čipu
- Malý odběr a nízké napájecí napětí
- Cena

Průmysl (automotive):

- Měřicí rozsah
- EMC odolnost
- Odolnost proti nárazům
- Frekvenční charakteristika (šířka pásma)

### 3.4 Možnosti využití

Akcelerometry, gyroskopy a další MEMS senzory se hojně využívají v nejrůznějších oblastech.

#### Spotřební elektronika

Jsou součástí takřka všech dnes prodávaných chytrých mobilních telefonů a tabletů. Využívají se také v herních zařízeních, chytrých hračkách, atd.

Používají se například u pevných disků, kde po detekci volného pádu dochází k automatickému zaparkování čtecích hlav, aby se při případném nárazu zabránilo vážnějšímu poškození. Jsou také důležitou součástí stabilizace obrazu u fotoaparátů a video kamer.

## **Automotive**

V automobilovém průmyslu se používají ve čtyřech hlavních oblastech.

Aktivní bezpečnostní systémy se snaží udržet vozidlo ovladatelné za všech povětrnostních podmínek a zabraňují smyku (např. ESP). Řídící jednotka vyhodnocuje informace o zrychlení, porovnává je s údaji o aktuální rychlosti z indukčních senzorů v kolech, případně z GPS systému a údaji o natočení kol. Z těchto informací dokáže rozpoznat, že se vozidlo dostalo do nebezpečné situace a snaží se jej stabilizovat (např. vhodným přibřďováním jednotlivých kol).

Další využití je v pasivních bezpečnostních systémech, které se aktivují po nárazu vozu do překážky. Pomocí akcelerometrů se detekují směr a síla nárazu, což je důležité pro správnou funkci airbagů. Pro tento účel se užívají akcelerometry s velkým měřicím rozsahem.

Třetí oblast použití je v zabezpečovacích systémech, hlídajících pohyb a náklon vozu v zamčeném stavu.

Důležitou roli hrají také při vyhodnocování chování motoru, tzv. snímače detonačního spalování, nebo snímače klepání, mohou řídicí jednotce vozidla dodat informace o nestandardním chování motoru a zjistit tak závadu dříve než dojde k vážnějšímu poškození.

## **Průmysl**

Pomocí měření vibrací je možné zjistit míru opotřebení některých strojů. Sledovat úroveň vibrací na pracovišti a zajisté najdeme mnoho jiných uplatnění.

## 4 Výběr zajímavých akcelerometrů

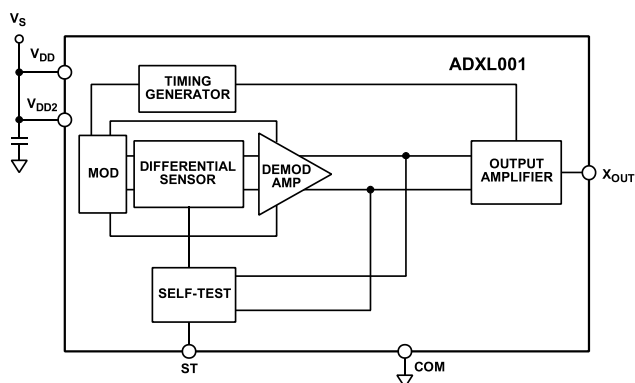
Při výběru akcelerometrů vhodných k otestování byl nejdříve proveden průzkumem trhu. Podařilo se nalézt osm firem, které se zabývají výrobou MEMS akcelerometrů (Analog Devices, Bosch Sensortec, Freescale, MEMSIC, Measurement, Kionix, STMicroelectronics a VTI Technologies). Je možné, že v tomto výčtu nějaký z výrobců chybí, ale měli by zde být ti nejvýznamnější.

Následně byl proveden průzkum nabízených produktů a vytvořena srovnávací tabulka, ve které jsou veškeré parametry uváděné v datasheetech. Srovnání některých parametrů nebylo úplně snadné, protože každý výrobce je uvádí trochu jinak a zpravidla neuvádí vše. Výslednou tabulku obsahující 231 akcelerometrů naleznete v elektronické příloze. Poté co byla hotová srovnávací tabulka, bylo z ní vybráno několik akcelerometrů, které vynikaly svými vlastnostmi, nebo technologií a zároveň byly dostupné na trhu. Nakonec bylo pro otestování zvoleno 11 následujících snímačů.

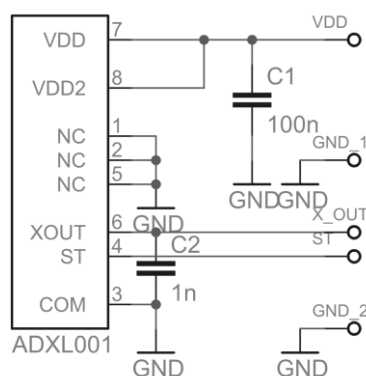
### 4.1 Analogové

#### ADXL001-70

Kvalitní jednoosý kapacitní akcelerometr od firmy Analog Devices, s měřicím rozsahem  $\pm 70$  g, vysokým frekvenčním rozsahem  $0 \div 32$  kHz a nízkou nelinearitou. Je vhodný pro aplikace náročné na šířku frekvenčního pásma. Potřebuje jen minimum externích součástek. Přivedením napětí na logický vstup ST (SELF-TEST) je možné ověřit funkčnost akcelerometru. SELF-TEST blok působí přímo na snímací elektrody a simuluje tak působení vnějšího zrychlení. Pokud je vše v pořádku, výstupní napětí by se mělo změnit o přesnou hodnotu. Důležité je, aby se v průběhu testu neměnilo vnější zrychlení působící na senzor. Podrobnější informace o tomto a všech dalších použitých akcelerometrech naleznete v příloze, nebo datasheetu od výrobce (viz seznam použité literatury), odkud byly čerpány veškeré informace.



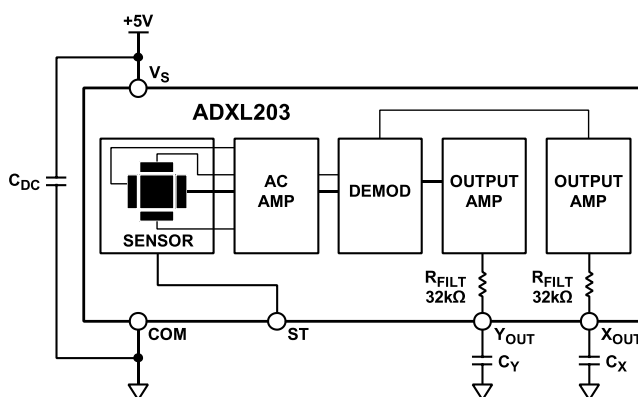
Obr. 4.1 ADXL001-70 blokové schéma [11].



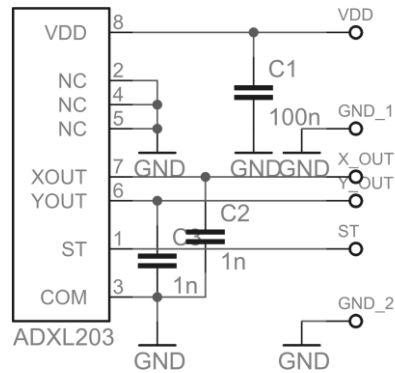
Obr. 4.1 ADXL001-70 schéma zapojení.

### ADXL203

Levný dvouosý kapacitní akcelerometr od firmy Analog Devices, s měřicím rozsahem  $\pm 1,7$  g, frekvenčním rozsahem  $0 \div 2,5$  kHz, vysokou citlivostí 1 V/g a malým šumem.



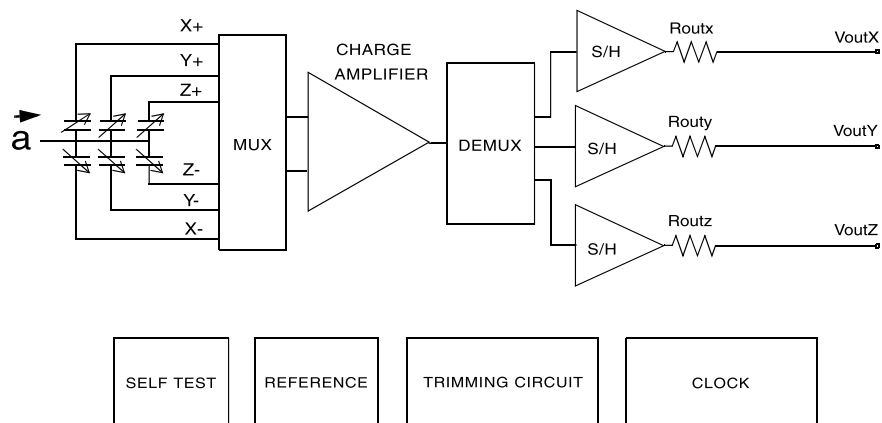
Obr. 4.2 ADXL203 blokové schéma [12].



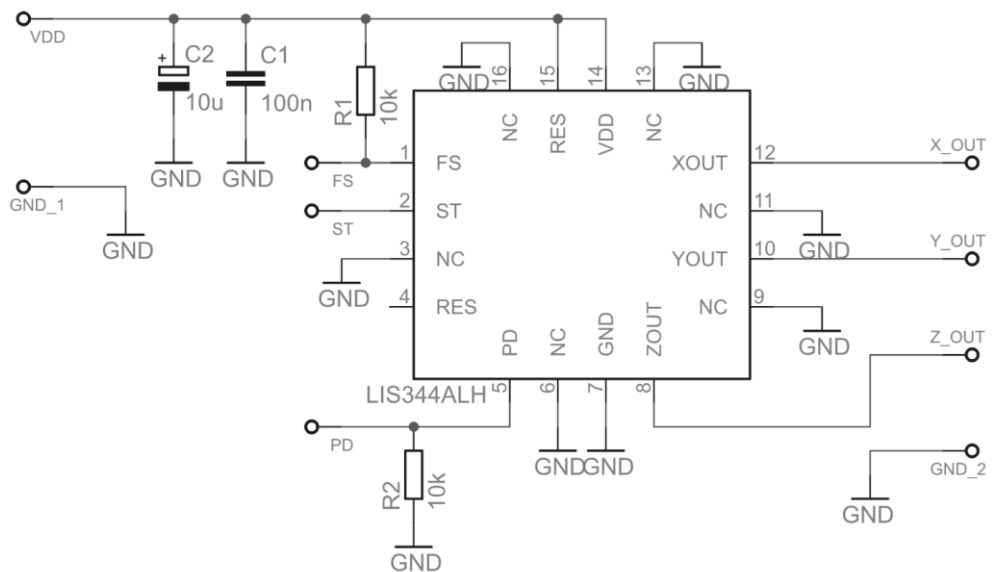
Obr. 4.3 ADXL203 schéma zapojení.

### LIS344ALH

Tříosý kapacitní akcelerometr od firmy STMicroelectronics, s měřícím rozsahem nastavitelným pomocí logického vstupu FS na  $\pm 2$  g, nebo  $\pm 6$  g. Frekvenční rozsah dosahuje  $0 \div 1,8$  kHz, citlivost na menším rozsahu je 660 mV/g.



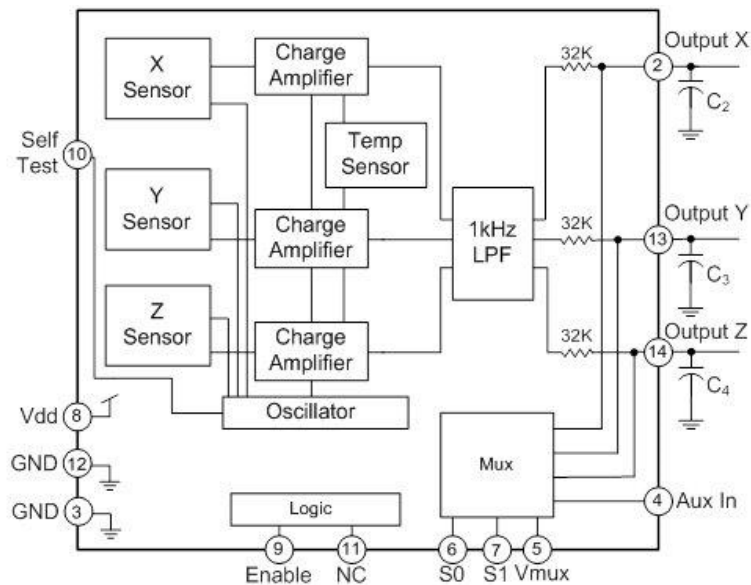
Obr. 4.4 LIS344ALH blokové schéma [20].



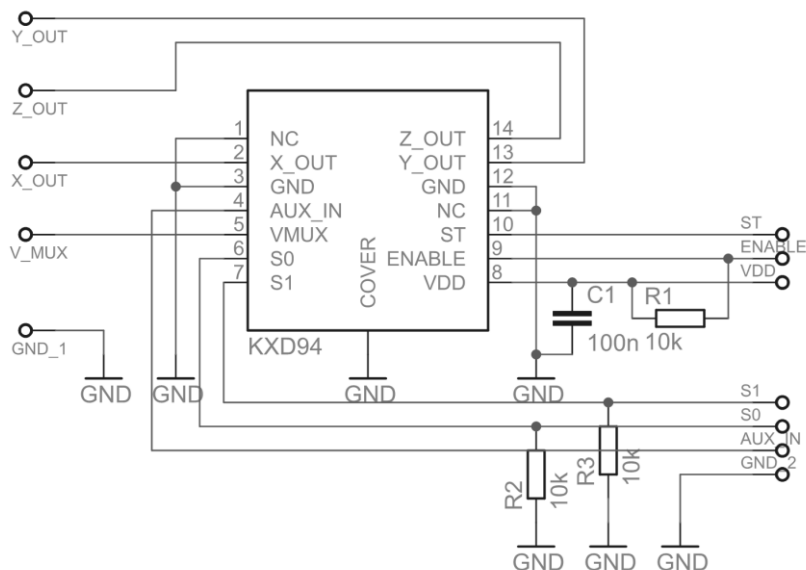
Obr. 4.5 LIS344ALH schéma zapojení.

**KXD94**

Třiosý kapacitní akcelerometr od firmy Kionix, s měřícím rozsahem  $\pm 10$  g, frekvenční rozsahem  $0 \div 800$  Hz, citlivostí 200 mV/g. S teplotní kompenzací a LP filtrem na výstupu.



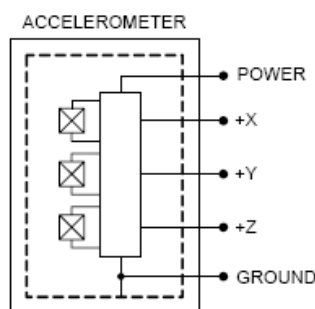
Obr. 4.6 KXD94 blokové schéma [16].



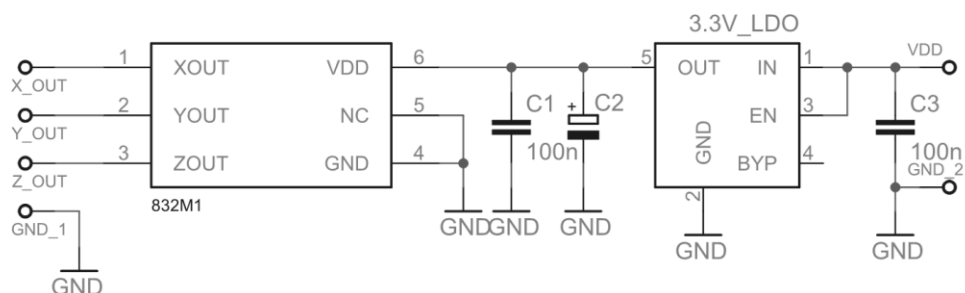
Obr. 4.7 KXD94 schéma zapojení.

### 832M1

Jedná se o nejdražší a rozměrově největší testovaný akcelerometr od firmy Measurement, založený na piezoelektrickém principu. Umožňuje měřit ve všech třech osách. O jeho kvalitě by mělo svědčit i to, že má i kalibrační list od výrobce. Jeho měřicí rozsah je  $\pm 50$  g, frekvenční rozsah 2 Hz ÷ 6 kHz (s tolerancí citlivosti  $\pm 2$  dB) a citlivost 25 mV/g.



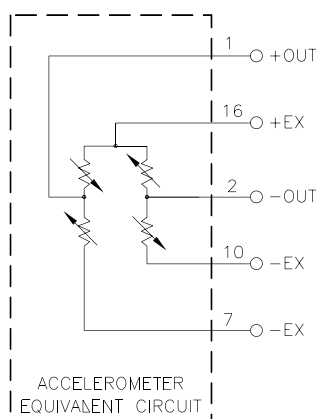
Obr. 4.8 832M1 blokové schéma [17].



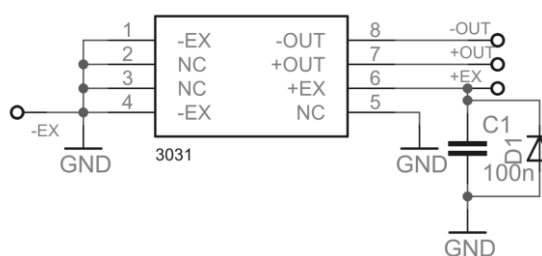
Obr. 4.9 832M1 schéma zapojení.

### 3031

Je jednoosý piezorezistivní akcelerometr též od firmy Measurement. Má velký měřicí rozsah  $\pm 100$  g, frekvenční rozsah  $0 \div 1,5$  kHz a citlivost  $0,6$  mV/g. Stejně jako předchozí má i kalibrační list od výrobce.



Obr. 4.10 3031 blokové schéma [18].



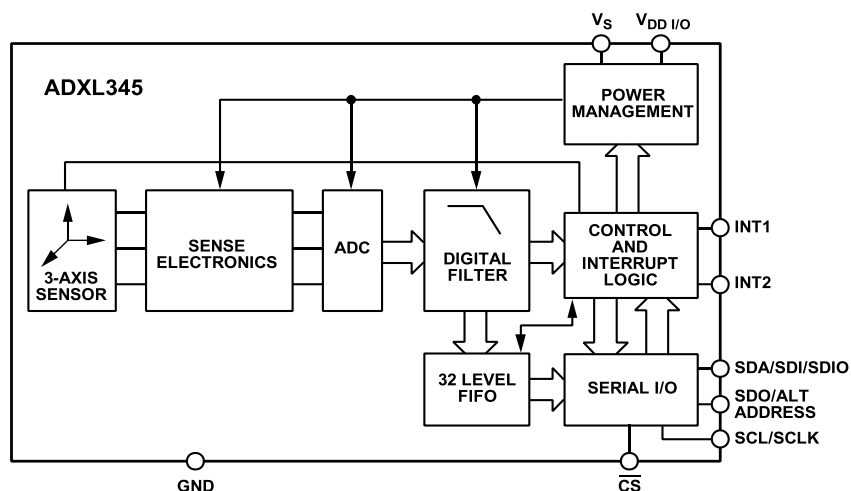
Obr. 4.11 3031 schéma zapojení.

## 4.2 Digitální

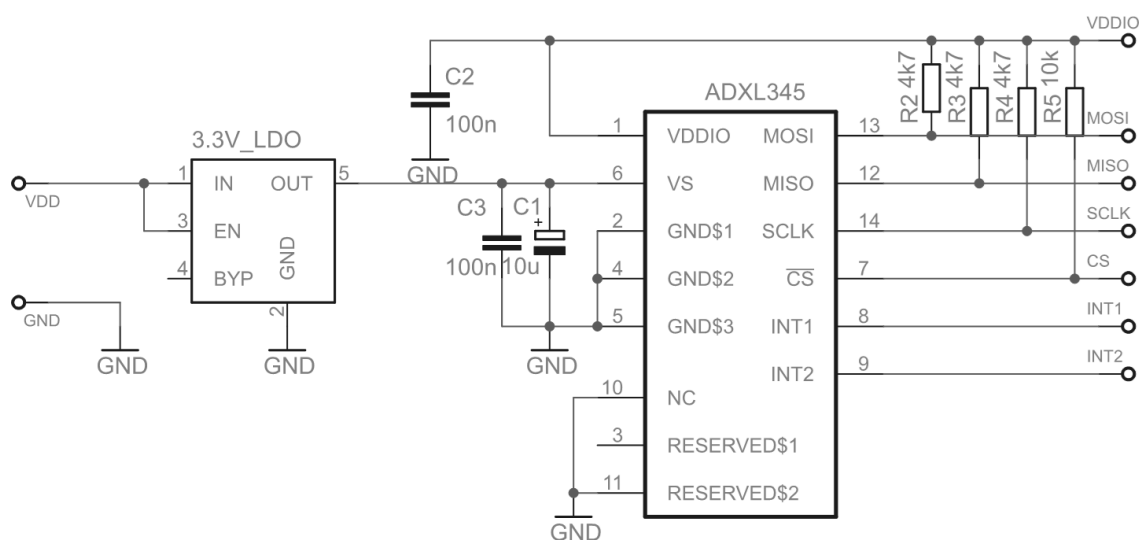
### ADXL345

Tříosý kapacitní akcelerometr od firmy Analog Devices s možností přepínání mezi čtyřmi měřicími rozsahy ( $\pm 2/4/8/16$  g), frekvenčním rozsahem  $0 \div 1,6$  kHz a třináctibitovým A/D převodníkem (rozlišení  $4$  mg/LSB). Komunikovat je s ním možné po SPI, nebo I<sup>2</sup>C sběrnici. K výběru tohoto typu jsem se rozhodl na základě dřívější koupě hotového modulu osazeného tímto akcelerometrem. Na zakoupeném modulu bylo provedeno odladění komunikace a první testovací měření. Dále pak bylo možné porovnat rozdíl mezi dvěma akcelerometry osazenými na různých deskách.





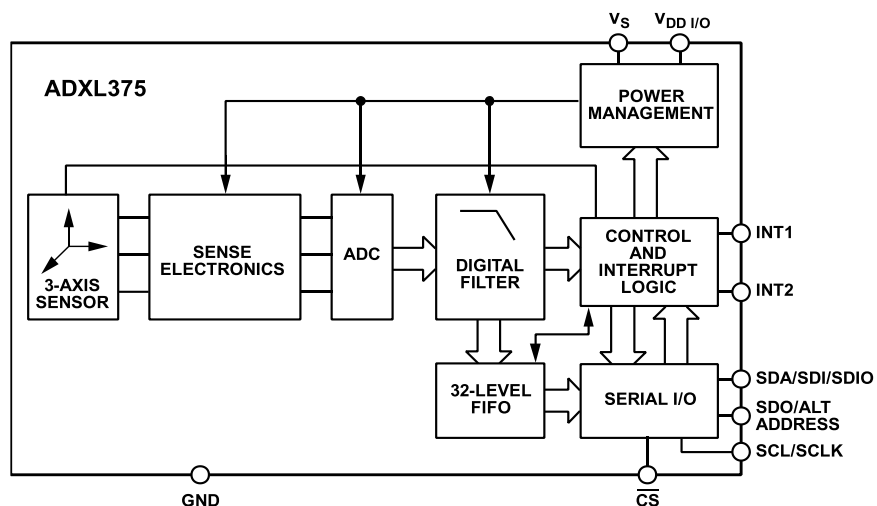
Obr. 4.12 ADXL345 blokové schéma [13].



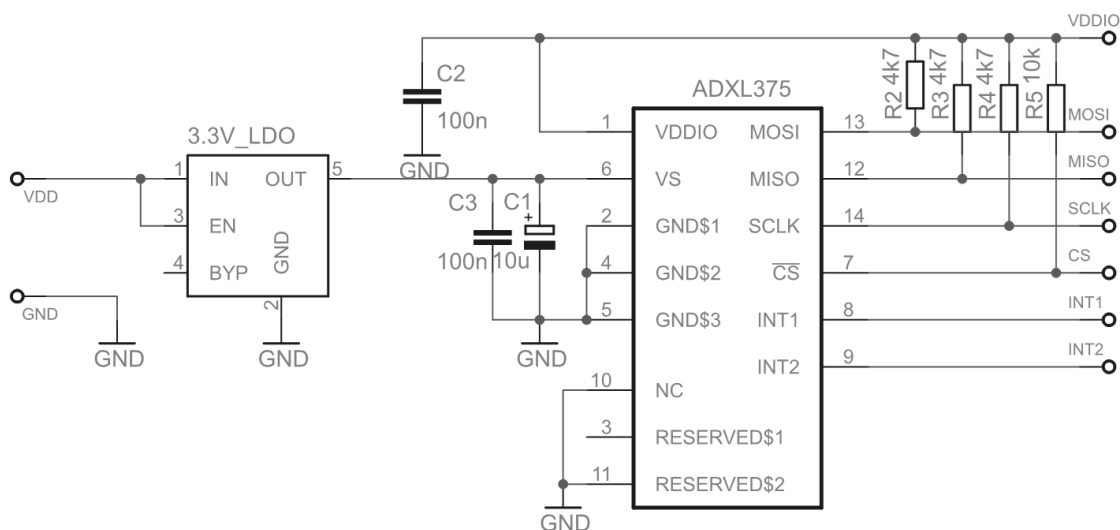
Obr. 4.13 ADXL345 schéma zapojení.

### ADXL375

Třiosý kapacitní akcelerometr od firmy Analog Devices s velkým měřicím rozsahem  $\pm 200$  g, frekvenčním rozsahem  $0 \div 1,6$  kHz a třináctibitovým A/D převodníkem (rozdílení 49 mg/LSB). Komunikovat s ním můžete po SPI, nebo I<sup>2</sup>C sběrnici.



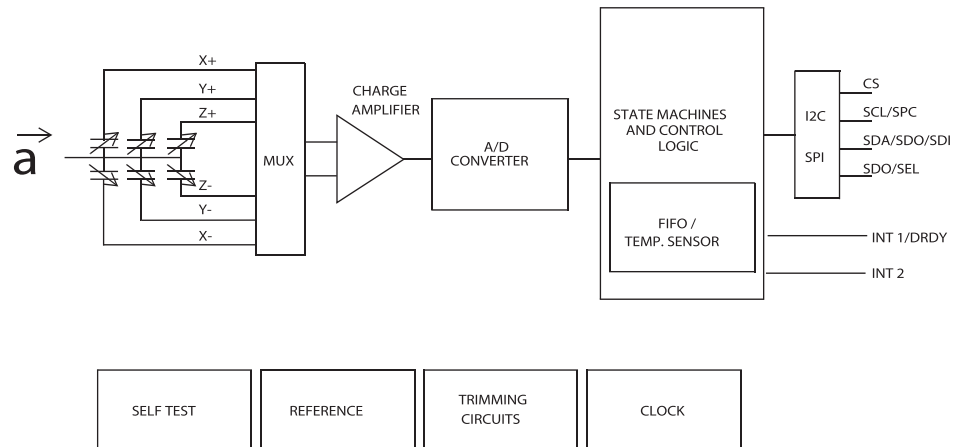
Obr. 4.14 ADXL375 blokové schéma [14].



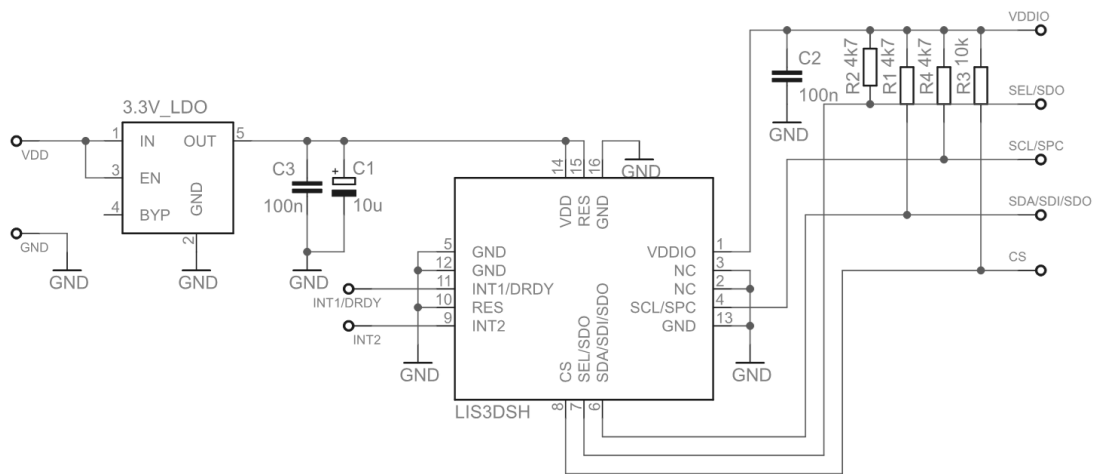
Obr. 4.15 ADXL375 schéma zapojení.

### LIS3DSH

Třiosý kapacitní akcelerometr od firmy STMicroelectronics s možností přepínání mezi pěti měřicími rozsahy ( $\pm 2/4/6/8/16$  g), frekvenčním rozsahem  $0 \div 800$  Hz a šestnáctibitovým A/D převodníkem (rozlišení na nejnižší rozsah  $60 \mu\text{g/LSB}$ ). Umožňuje komunikaci po SPI, nebo I<sup>2</sup>C sběrnici.



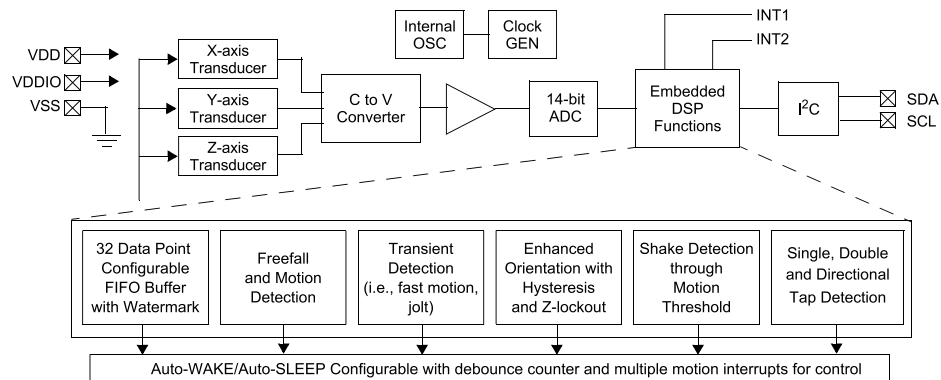
Obr. 4.16 LIS3DSH blokové schéma [21].



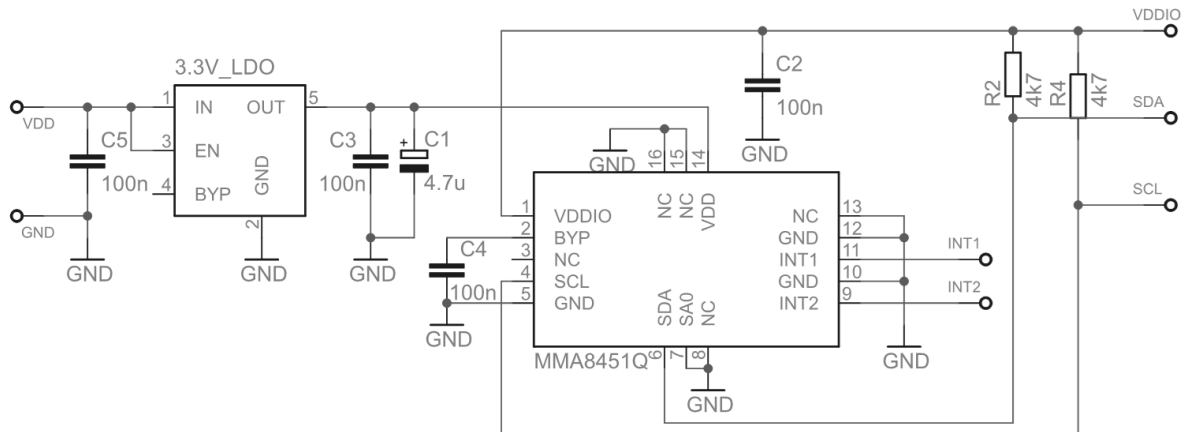
Obr. 4.17 LIS3DSH schéma zapojení.

### MMA8451Q

Tříosý kapacitní akcelerometr od firmy Freescale s možností třemi mezi pěti měřicími rozsahy ( $\pm 2/4/8$  g), frekvenčním rozsahem  $0 \div 400$  Hz a čtrnáctibitovým A/D převodníkem (rozlišení na nejnižší rozsah  $244 \mu\text{g/LSB}$ ). Komunikovat je s ním možné pouze po I<sup>2</sup>C sběrnici.



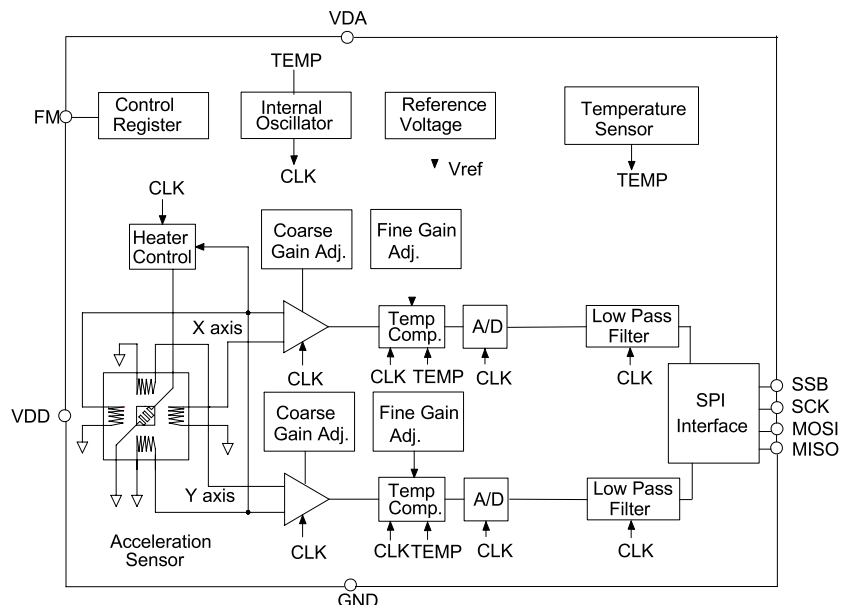
Obr. 4.18 MMA8451Q blokové schéma [15].



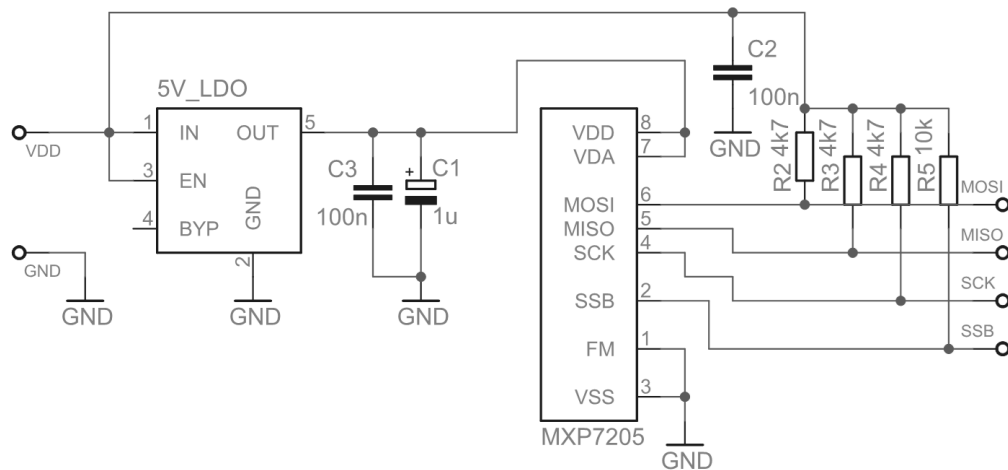
Obr. 4.19 MMA8451Q schéma zapojení.

### MXP7205VF

Jde o dvouosý akcelerometr založený na tepelném principu od firmy MEMSIC. Jeho měřicí rozsah je  $\pm 5$  g, ale díky tomu, že neobsahuje žádné pohyblivé části, výrobce uvádí, že dokáže vydržet bez poškození šokové zrychlení až 50 000 g. Jeho frekvenční rozsah je pouze 0 ÷ 29 Hz a rozlišení pak díky čtrnáctibitovému A/D převodníku 1,2 mg/LSB. Komunikovat s ním můžete po SPI sběrnici.



Obr. 4.20 MXP7205 blokové schéma [19].



Obr. 4.21 MXP7205 schéma zapojení.

### 4.3 Návrh DPS

Při návrhu desek plošných spojů byl kladen důraz na co nejmenší rozměry výsledné desky, protože výhodou MEMS technologie je hlavně možnost vytvořit miniaturní senzory se srovnatelnými nebo dokonce lepšími parametry, než mají ty klasické. Rozměry celé desky ovlivňují především rezonanční frekvenci. Jelikož všechny testované akcelerometry si vystačí jen s minimem externích součástek, byly zvoleny dvouvrstvé plošné spoje. S tím, že všechny součástky jsou osazeny pouze z jedné strany, kvůli snadnějšímu uchycení desek na vibrační stolici.

### 4.4 Realizace měřicích přípravků

Pro plošné spoje byl použit standardní typ FR4 1,5 mm 18 µm Cu. Všechny desky mají pro uchycení vytvořeny dva otvory na šrouby M2, kromě desky pro piezoelektrický akcelerometr, která má kvůli větším rozměrům čtyři otvory v rozích. Akcelerometr je umístěn v ose otvorů.

## 5 Měření

### 5.1 Způsob měření

Měření bylo soustředěno na dynamické parametry akcelerometrů. Statické parametry jako přesnost měření při konstantním zrychlení nebo šum při nulovém zrychlení nebyly měřeny. Jako zdroj budící síly a vibrací sloužila vibrační stolice RFT 11075. Vibrační stolice byla buzena výkonovým zesilovačem Yamaha CP2000. Zrychlení, které je možné vibrační stolicí vytvořit je pro nižší frekvence limitováno max. amplitudou ( $\pm 10$  mm),

$$a_{max} = \frac{d \cdot f^2}{g_n} \quad [\pm g] \quad (5.1)$$

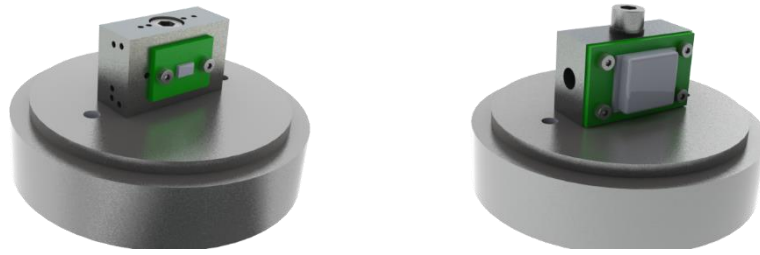
pro vyšší pak max. silou (100 N).

$$a_{max} = \frac{F}{m \cdot g_n} \quad [\pm g] \quad (5.2)$$

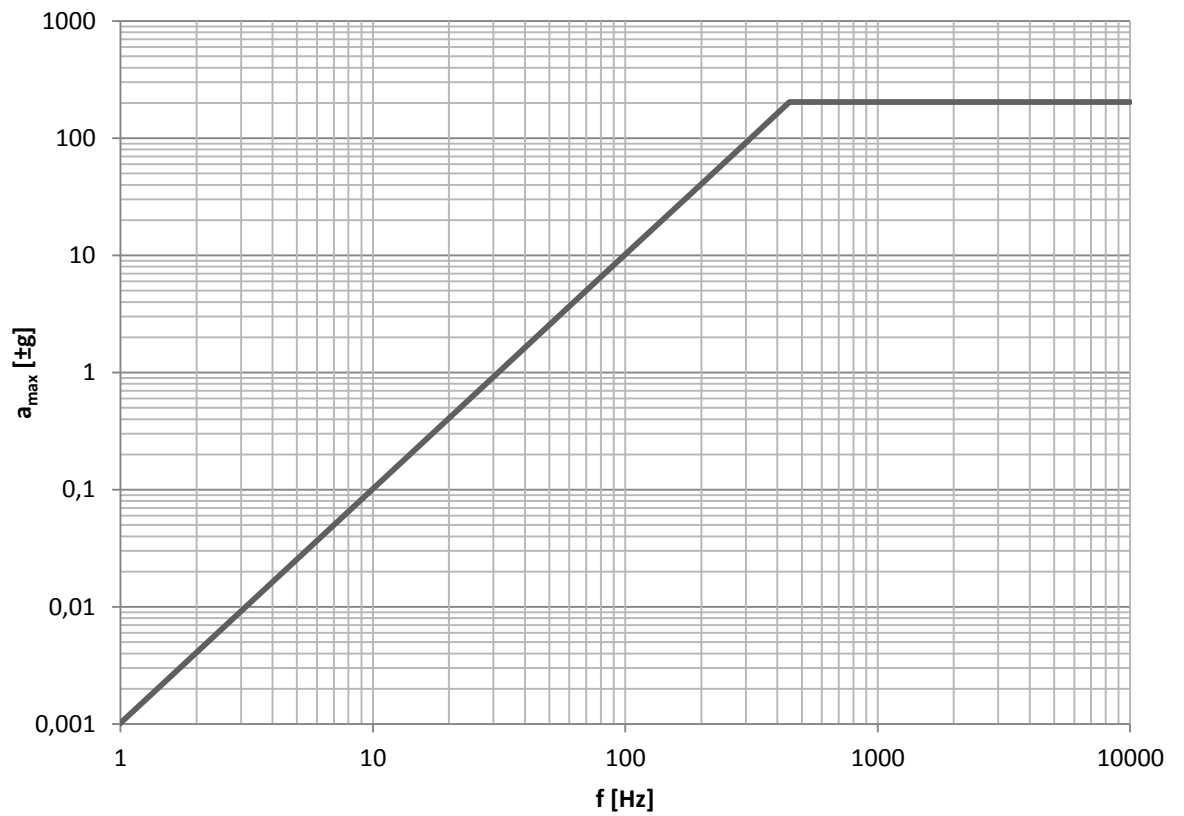
Spojením těchto dvou omezujících faktorů vznikne graf Obr. 5.2.

Parametry akcelerometrů byly zjištěny porovnáním s referenčním akcelerometrem Brüel & Kjaer 4507 [22]. Nejdříve bylo provedeno měření citlivosti, při buzení harmonickým signálem o frekvenci 220 Hz, pak měření frekvenční charakteristiky šumovým signálem. Pro vyhodnocení byl použit analyzátor Brüel & Kjaer PULSE 3560C a software Labshop s nastavenou metodou analýzy FFT (FFT\_Spectrum\_Averaging, šířka pásma 25,6 kHz, 6400 spektrálních čar s průměrováním po 4 Hz). Pro budící signál byla nastavena horní propust na 7 Hz.

Jednotlivé akcelerometry byly na vibrační stolicí uchyceny pomocí dvou hranolů (jeden pro DPS 832M1 s uchycením na čtyři šrouby, druhý univerzální pro všechny ostatní, používající uchycení na dva šrouby). Hranoly byly vyrobeny z hliníkové slitiny, aby byly pevné ale nepříliš těžké. Jejich rozměry byly voleny s ohledem na zamezení vzniku stojatého vlnění v poměru stran 0,62:1:1,62. Jejich hmotnost je pouze 50 g. Umožňují uchycení akcelerometrů tak, aby je bylo možné měřit ve všech třech osách.



Obr. 5.1 Hranoly pro uchycení desek na vibrační stolici (kruhová podstava znázorňuje píšť vibrační stolice).



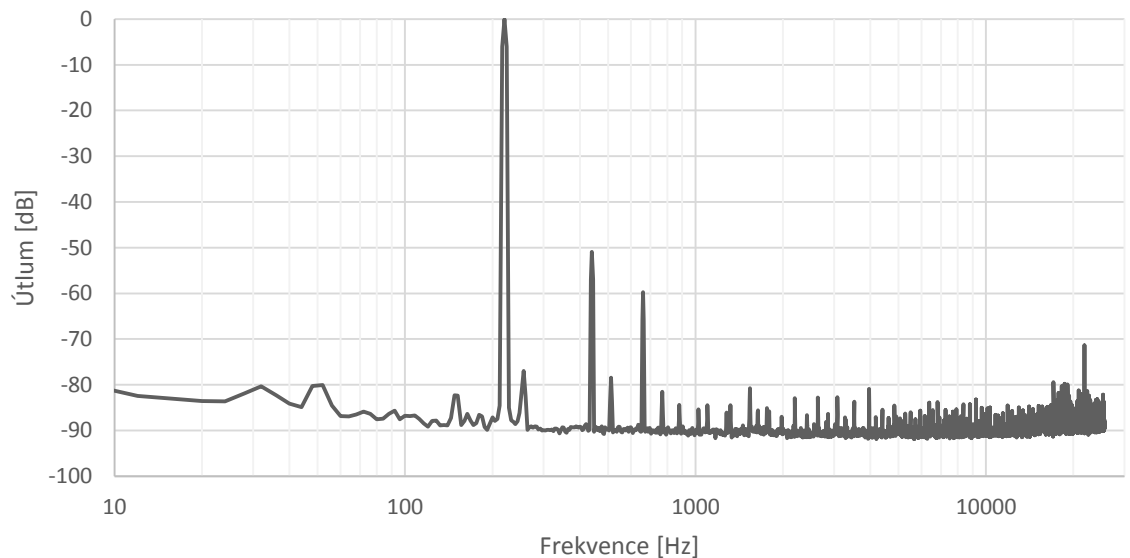
Obr. 5.2 Maximální dosažitelné zrychlení vibrační stolice v závislosti na frekvenci. (při buzení harmonickým signálem).

## 5.2 Měření analogových akcelerometrů

Všechny měřené analogové akcelerometry (kromě 3031, o kterém se zmíním dále) mají aktivní výstup a byly napájeny stabilizovaným zdrojem SZ 3.81, napájecí napětí bylo nastaveno na 3,3 V. Jejich výstup byl vyveden audio kabelem TAS-C117 a přes BNC konektor připojen přímo na vstup analyzátoru. Měření bylo prováděno dvoukanálově (jeden kanál referenční akcelerometr, druhý měřený).

### Citlivost

Pro měření citlivosti byl použit harmonický signál 220 Hz, jeho amplituda byla volena s ohledem na měřicí rozsah daného akcelerometru. Do souboru bylo uloženo změřené výstupní napětí, které bylo porovnáno se zrychlením naměřeným referenčním snímačem. Z těchto údajů byla následně vypočtena citlivost v [mV/g].

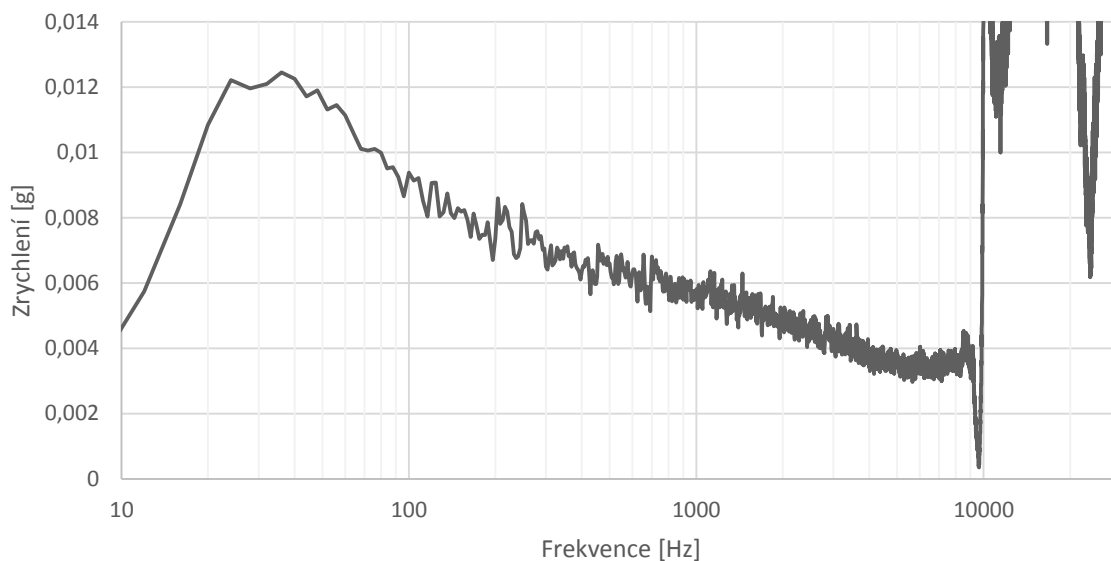


Obr. 5.3 Odezva na harmonický signál 220 Hz naměřená referenční akcelerometrem.

### Frekvenční charakteristika

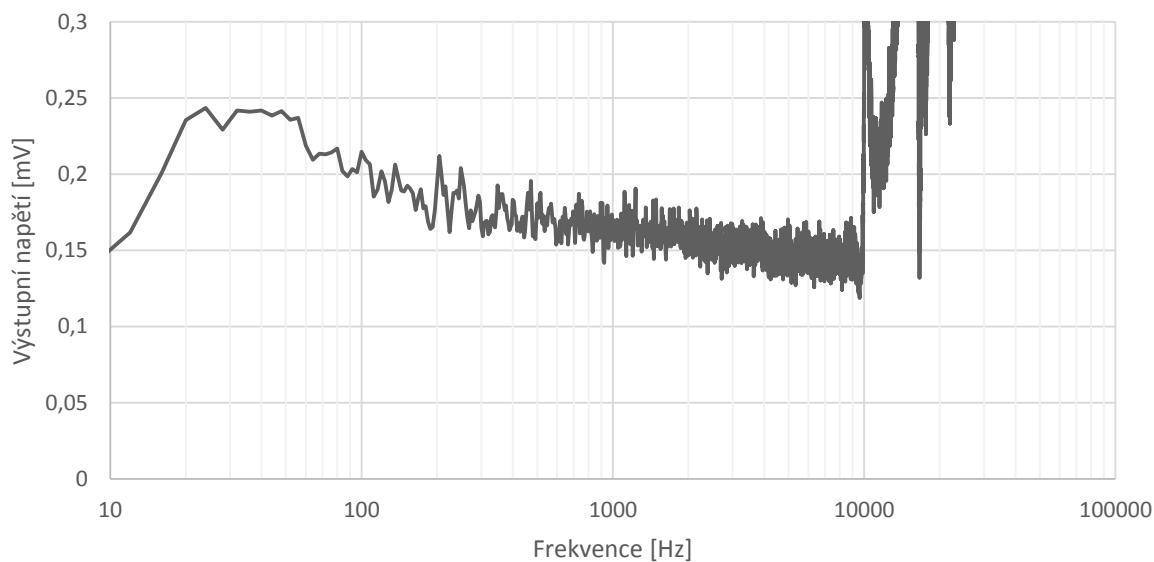
Pro získání frekvenční charakteristiky snímačů byla použita šumová metoda. Do souboru byly opět uloženy údaje z referenčního a měřeného akcelerometru. Frekvenční charakteristika šumového signálu naměřená referenčním snímačem je vidět na následujícím grafu.





Obr. 5.4 Šumový signál naměřený referenční akcelerometrem.

Jak je z grafu dobře patrné, od 10 kHz se začínají objevovat rezonance vibrační stolice, tím je omezen měřitelný frekvenční rozsah. Výstupní napětí měřeného akcelerometru bylo přepočítáno na zrychlení, dle dříve změřené citlivosti. Od těchto hodnot byly následně odečteny údaje naměřené referenčním snímačem. Tím jsme získali frekvenční charakteristiku akcelerometru.



Obr. 5.5 Šumový signál naměřený akcelerometrem ADXL001.

### 5.3 Měření digitálních akcelerometrů

Pro komunikaci s digitálními akcelerometry byl vytvořen převodník, který zjednodušeně řečeno přeposílá data z SPI či I2C sběrnice na sériový port do PC. Přes sériový port je také možné měnit nastavení jednotlivých akcelerometrů (měřicí rozsah, vzorkovací frekvenci, nastavení filtrů atd.), následně potom přijímat naměřená data. Pro tento převodník byl použit mikroprocesor Atmel ATmega20. Program do mikroprocesoru je pro každý akcelerometr trochu jiný, liší se v závislosti na tom, zda akcelerometr komunikuje po SPI, nebo I2C sběrnici. SPI sběrnice byla preferována, protože umožňuje vyšší přenosové rychlosti. Každý akcelerometr má také jiné ovládací registry, které je nutné před zahájením přenosu dat správně nastavit. Kvůli zjednodušení nebyl použit jeden univerzální program, ale jestliže chceme připojit jiný akcelerometr, musíme nejdříve do mikroprocesoru nahrát nový firmware.

Pokud to daný snímač umožňoval, byl nastaven tak, že po naměření jednoho vzorku dat sepnul interrupt výstup, na který následně reagoval mikroprocesor čtením dat. Mikroprocesor přijatá data okamžitě přeposílal na sériový port.

Tento způsob komunikace zajišťuje, že jsou data čtena až v okamžiku, kdy je převod A/D převodníku dokončen. Ale pro přesné měření se tato metoda ukázala jako nepříliš vhodná. Vzorkovací frekvence je totiž závislá na snímači a má určitou odchylku od nastavené hodnoty. Lepší způsob měření je nastavit na snímači vzorkovací frekvenci, ale nečekat na interrupt a číst data raději s trochu nižší frekvencí. Vzorkovací frekvenci je pak možné odvodit od krystalového oscilátoru procesoru, který je mnohem přesnější, než RC oscilátor ve snímači.

typ	chyba frek. [%]	nastaveno [Hz]	reálně [Hz]
ADXL345	-3,2	3200	3099
ADXL345 2	-2,7	3200	3114
ADXL375	-2,6	3200	3116
LIS3DSH	0,9	1600	1615
MMA8451Q	1,1	800	809

Tab. 5.1 Odchylka vzorkovací frekvence.

Měření harmonickým signálem i měření šumem probíhalo stejně jako u analogových akcelerometrů, s tím rozdílem, že analyzátozem byl měřen pouze jeden kanál (referenční snímač) a data z měřeného akcelerometru byla ukládána přímo do PC.

Naměřená data byla pomocí programu napsaného v C++ převedena do wave souboru, pro rychlou analýzu pomocí audio analyzátorů. Následně byla pomocí Matlabu provedena FFT analýza se stejným průměrováním, jaké bylo nastaveno pro analogové akcelerometry. Frekvenční charakteristika snímače tak mohla být získána stejně jako u analogových (odečtením hodnot naměřených referenčním akcelerometrem).

## 5.4 Naměřené výsledky

Veškeré grafy s naměřenými hodnotami jsou uvedeny v příloze. Jsou zde tři typy grafů. V první části jsou odezvy jednotlivých akcelerometrů na harmonický signál 220 Hz, přičemž hodnota naměřená senzorem na 220 Hz je brána jako referenční hladina. Z těchto grafů je možné vyčíst odstup signálu od šumu a harmonických.

V další části jsou pak získané frekvenční charakteristiky jednotlivých akcelerometrů.

Ve třetí části jsou grafy ukazující data naměřená v osách, ve kterých nepůsobilo zrychlení, vztažená k hodnotám naměřeným v ose působení zrychlení. Z těchto grafů získáme informace o odstupu signálu z jednotlivých os.

### Analogové akcelerometry

Analogové akcelerometry byly měřeny pro každou osu zvlášť. Byl zaznamenáván pouze výstup odpovídající právě měřené ose. Piezorezistivní akcelerometr 3031 se nepodařilo změřit. Jedná se o pasivní snímač a vzhledem k nízké citlivosti byl jeho výstup příliš zahlcen šumem, proto není ve výsledných grafech zahrnut. Pro správné proměření tohoto snímače by bylo nutné použít předzesilovač. V následující tabulce jsou vidět naměřené hodnoty citlivosti v porovnání s tím, co udává výrobce.

typ	uváděná citlivost [mV/g]			naměřená citlivost [mV/g]
	min.	typ.	max.	
ADXL001		16		16,2
ADXL203 X	634	660	686	622,1
ADXL203 Y	634	660	686	626,4
LIS344ALH X	627	660	693	614,8
LIS344ALH Y	627	660	693	613,1
LIS344ALH Z	627	660	693	598,4
832M1 Y	17,5	25	32,5	24,4
832M1 Z	17,5	25	32,5	28
KXD94 X	127	132	137	122
KXD94 Y	127	132	137	119,7
KXD94 Z	127	132	137	131,5

Tab. 5.2 Citlivost analogových akcelerometrů.

### Digitální akcelerometry

Digitální akcelerometry byly měřeny vždy pouze v jedné ose (X nebo Y), ale zaznamenávány byly všechny měřitelné osy (kromě MMA8451Q). Snímač MMA8451Q umožňuje komunikovat pouze po I2C sběrnici a na maximální vzorkovací frekvenci 800 Hz by nebylo možné přenést data ze všech tří měřitelných osy. Jelikož vzorkovací frekvence určuje měřený frekvenční rozsah, bylo preferováno použití max. vzorkovací frekvence.

## 6 Zhodnocení naměřených výsledků

Z naměřených grafů uvedených v příloze je patrné, že analogové akcelerometry jsou mnohem lepší pro přesné měření. Jejich frekvenční rozsah není omezen vzorkovací frekvencí integrovaného A/D převodníku. Odstup signálu od šumu byl také výrazně lepší (u analogových to bylo 40 dB a více, u digitálních okolo 20 dB). Nejvyrovnanější frekvenční charakteristiku z analogových měl kapacitní ADXL001, u kterého výrobce uvádí rezonanční frekvenci až na 20 kHz. Do této frekvence ovšem, vzhledem k použitému vybavení, nebylo možné měřit. Velmi dobře měřil také piezoelektrický 832M1.

Určitou nevýhodou analogových snímačů je nutnost použití kvalitních analyzátorů pro další zpracování. Oproti tomu digitální vyhodnocují signál přímo na čipu. Nabízejí také mnoho zajímavých funkcí jako detekce volného pádu, interrupt při překročení určité úrovně zrychlení, použití HP či DP digitálních filtrů, FIFO buffer na několik vzorků a mnoho dalších. Procesor tak nemusí data neustále vyhodnocovat, ale může čekat na interrupt od snímače.

Dle předpokladu se ukázalo, že parametry pro osu X a Y jsou u akcelerometrů téměř stejné. Rozdíl je až v ose Z, kvůli problematičnosti výroby 3D struktury s identickými vlastnostmi ve všech osách. V ose Z má snímač obvykle jinou citlivost a jinou rezonanční frekvenci.

Nejllepší frekvenční charakteristiku z měřených digitálních akcelerometrů, měl ADXL345, i když se jedná o velmi levný snímač primárně určený pro spotřební elektroniku.

Rozdíl mezi různými DPS u snímače ADXL345 (jedna zakoupena jako hotový modu s akcelerometrem, druhá navržená se snahou o co nejmenší rozměry) se ukázal jako neměřitelný, v daném frekvenčním pásmu (omezeném vzorkovací frekvencí 3200 Hz). Na vyšších frekvencích už by byl rozdíl určitě znatelný.

Nečekanou odezvu na harmonický signál měl snímač MMA8451Q, který kromě požadované frekvence 220 Hz naměřil i spoustu harmonických a subharmonických (rozložených v intervalech po 16 Hz). Ty nejsilnější byly od úrovně na 220 Hz vzdáleny jen o 5 dB. Zřejmě to způsobuje digitální zpracování signálu. Pro měřicí účely by nebyl tento akcelerometr příliš vhodný.

## **Závěr**

MEMS akcelerometry jsou určitě zajímavou alternativou ke klasickým snímačům. Některé z analogových by bylo možné použít i pro účely přesného měření. Při srovnání pořizovací ceny použitého referenčního snímače (Brüel & Kjaer 4507 [22]) s měřeními, vycházejí všechny měřené výrazně levněji. Je zřejmé, že ve vývoji kapacitních akcelerometrů došlo v posledních letech k velkému pokroku. Pomocí prvků jako např. teplotní kompenzace se podařilo výrazně zlepšit jejich parametry a zvýšit přesnost.

Testované digitální akcelerometry také nedopadly špatně, jen jejich použitelné frekvenční pásmo je omezeno vzorkovací frekvencí interního A/D převodníku. Ukázalo se, že jsou dělány spíše pro snímání nízkofrekvenčního zrychlení. Tomu odpovídá i možnost nastavení nižší vzorkovací frekvence a zapnutí LP filtrů. Jejich využití je hlavně pro určování směru působení gravitačního zrychlení, tedy měření natočení v 3D prostoru. Pro tento účel je odfiltrování vyšších frekvencí žádoucí.

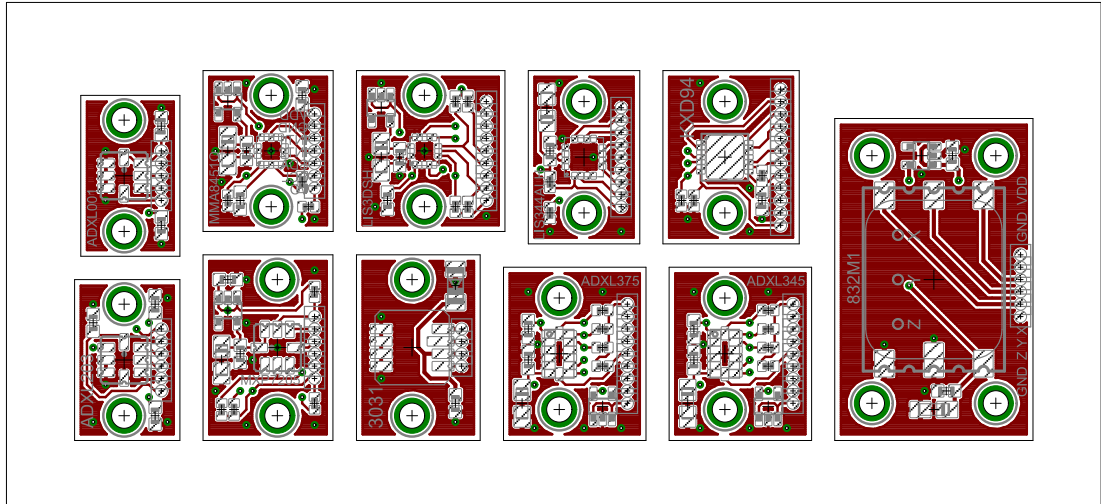
## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BEEBY, Stephen, a další. *MEMS Mechanical Sensors*. Norwood: Artech House, 2004. 271 s. ISBN 1-58053-536-4.
- [2] ĎAĎO, Stanislav a KREIDL, Marcel. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. 315 s. ISBN 80-01-02057-6.
- [3] GAD-EL-HAK, Mohamed. *MEMS: Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2005. 568 s. ISBN 978-0849391392.
- [4] HUBÁLEK, Jaromír a ADÁMEK, Martin. *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy*. Brno: VUT v Brně, 2007.
- [5] HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2008. 540 s. Gerstner; sv. 3. ISBN 978-80-200-1478-8.
- [6] SMETANA, Ctirad et al. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
- [7] VRBA, Radimír a ADÁMEK, Martin. *Mikrosenzory a mikromechanické systémy*. Brno: VUT v Brně, 2002.
- [8] Gardner, Julian W., Varadan, V. K. a Awadelkarim, Osama O. *Microsensors, MEMS, and smart devices*. Chichester: John Wiley & Sons, 2002. xi, 503 s. ISBN 0-471-86109-X.
- [9] GAURA, Elena a NEWMAN, Robert M. *Smart MEMS and sensor systems* [online]. London: Imperial College Press, ©2006 [cit. 2015-05-11]. ISBN 978-1-86094-920-3. Dostupné z:  
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=210814&lang=cs&site=ehost-live>.
- [10] ELWENSPOEK, Miko a WIEGERINK, Remco. *Mechanical microsensors*. Berlin: Springer, ©2001. 295 s. Microtechnology and MEMS. ISBN 3-540-67582-5.
- [11] Analog Devices. Datasheet. *ADXL001.pdf*. [Online] 2010. [Citace: 15. 2 2015.]  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADXL001.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL001.pdf).
- [12] Analog Devices. Datasheet. *ADXL103\_203.pdf*. [Online] 2014. [Citace: 15. 2 2015.]  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADXL103\\_203.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL103_203.pdf).
- [13] Analog Devices. Datasheet. *ADXL345.pdf*. [Online] 2013. [Citace: 15. 2 2015.]  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADXL345.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL345.pdf).
- [14] Analog Devices. Datasheet. *ADXL375.PDF*. [Online] 2014. [Citace: 15. 2 2015.]  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADXL375.PDF](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL375.PDF).
- [15] Freescale. Datasheet. *MMA8451Q.pdf*. [Online] 2014. [Citace: 15. 2 2015.]  
[http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA8451Q.pdf?fpsp=1&Parent\\_nodeId=1280942466187701001159&Parent\\_pageType=product](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA8451Q.pdf?fpsp=1&Parent_nodeId=1280942466187701001159&Parent_pageType=product).
- [16] Kionix. Datasheet. *KXD94-2802%20Specifications%20Rev%20A\_0.pdf*. [Online] 2014. [Citace: 15. 2 2015.]  
[http://www.kionix.com/sites/default/files/KXD94-2802%20Specifications%20Rev%20A\\_0.pdf](http://www.kionix.com/sites/default/files/KXD94-2802%20Specifications%20Rev%20A_0.pdf).
- [17] Measurement. Datasheet. *832M1.pdf*. [Online] 2013. [Citace: 15. 2 2015.]  
<http://www.meas-spec.com/downloads/832M1.pdf>.
- [18] Measurement. Datasheet. *Model%203031.pdf*. [Online] 2002. [Citace: 15. 2 2015.]  
<http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Measurement%20Specialties%20PDFs/Model%203031.pdf>.

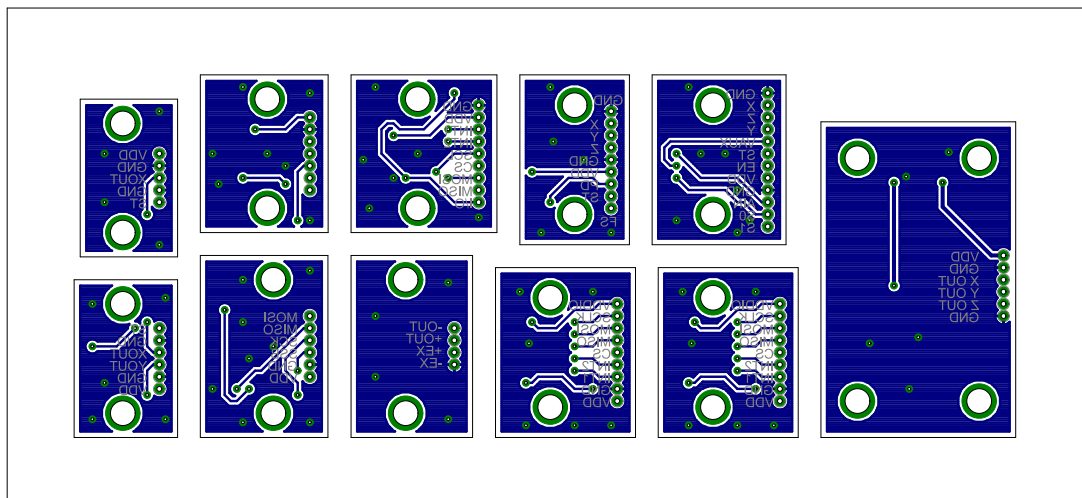
- [19] MEMSIC. Datasheet. *MXP7205VF-Rev\_E.pdf*. [Online] 2012. [Citace: 15. 2 2015.] [http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/Accelerometer-Datasheets/MXP7205VF-Rev\\_E.pdf](http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/Accelerometer-Datasheets/MXP7205VF-Rev_E.pdf).
- [20] STMicroelectronics. Datasheet. *CD00182781.PDF*. [Online] 2008. [Citace: 15. 2 2015.] <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00182781.pdf>.
- [21] STMicroelectronics. Datasheet. *DM00040962.pdf*. [Online] 2011. [Citace: 15. 2 2015.] <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00040962.pdf>.
- [22] Brüel & Kjaer: Miniature DeltaTron Accelerometers - Types 4507 and 4508, Product Data, [www.bksv.com](http://www.bksv.com)



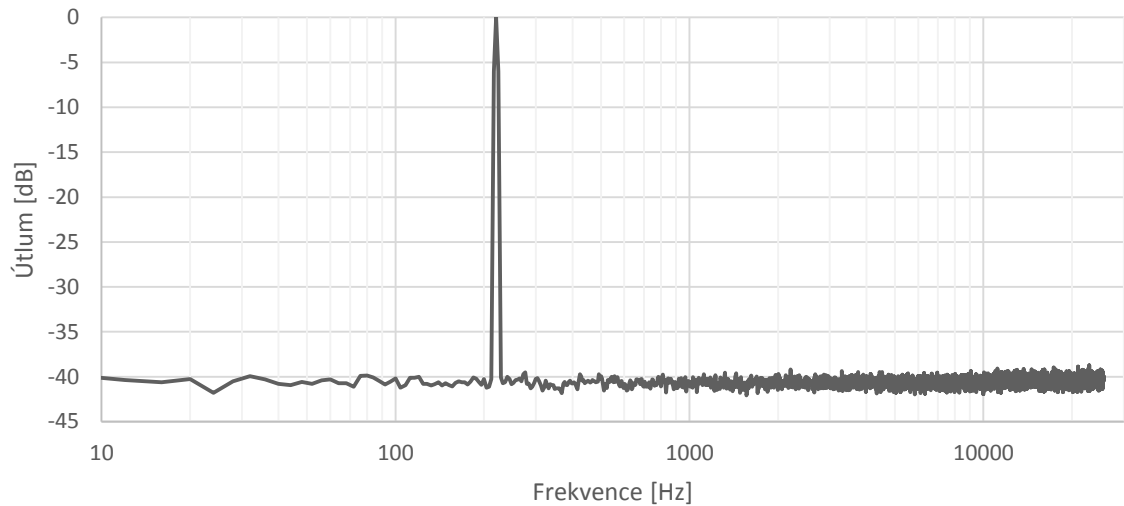
## Přílohy



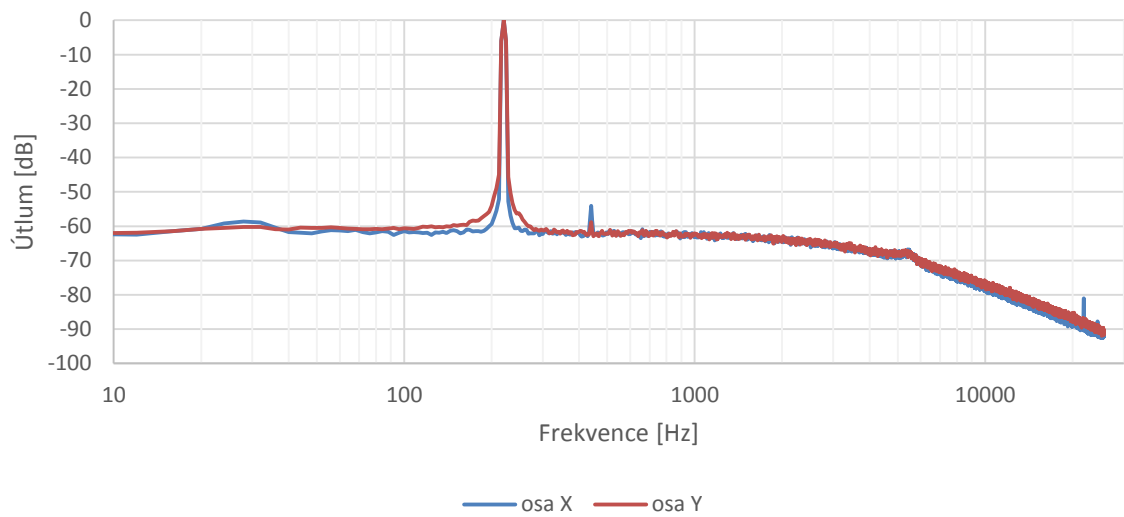
Obr. 0.1 DPS pro akcelerometry – horní strana.



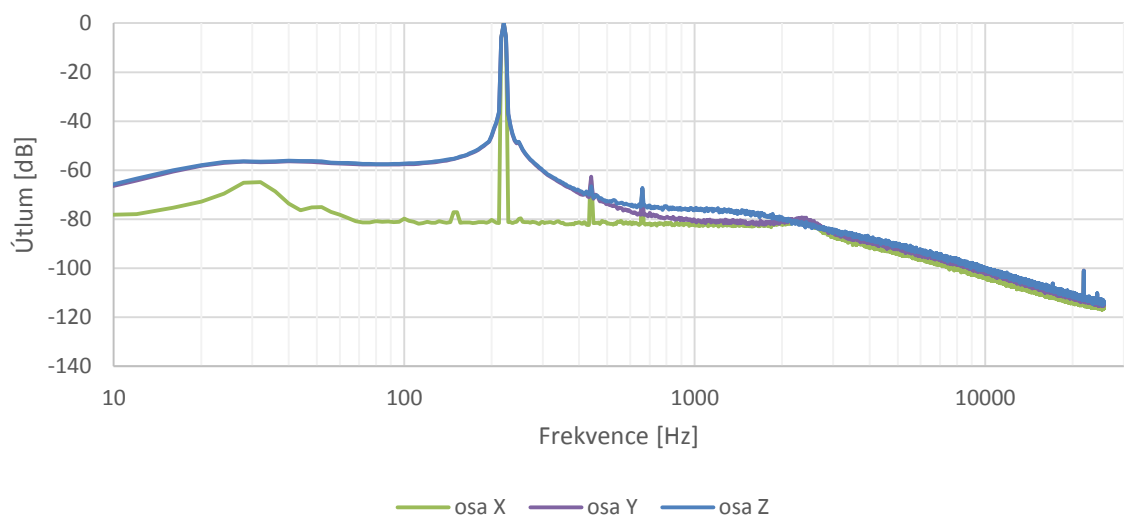
Obr. 0.2 DPS pro akcelerometry – spodní strana.



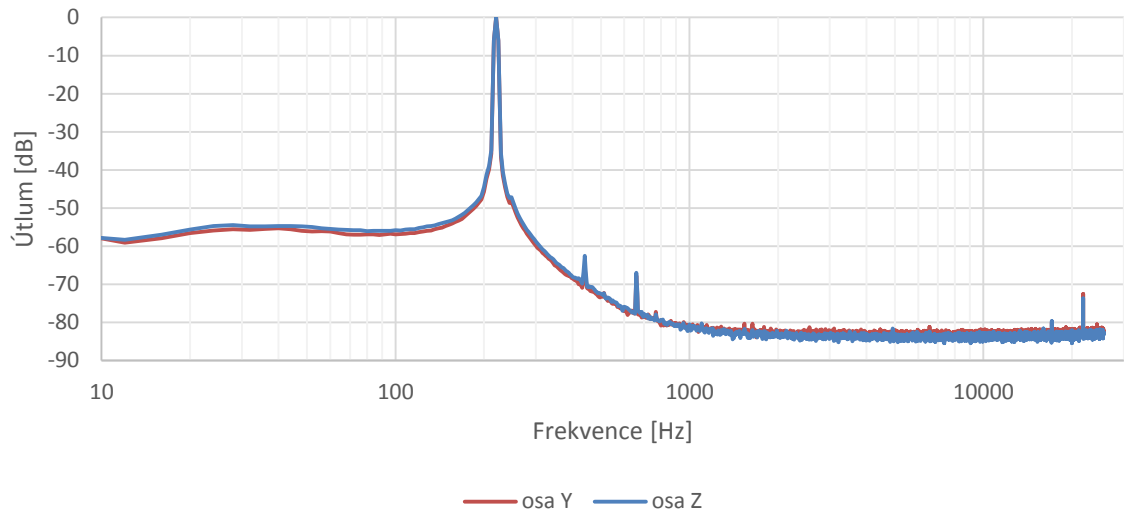
Obr. 0.3 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro ADXL001.



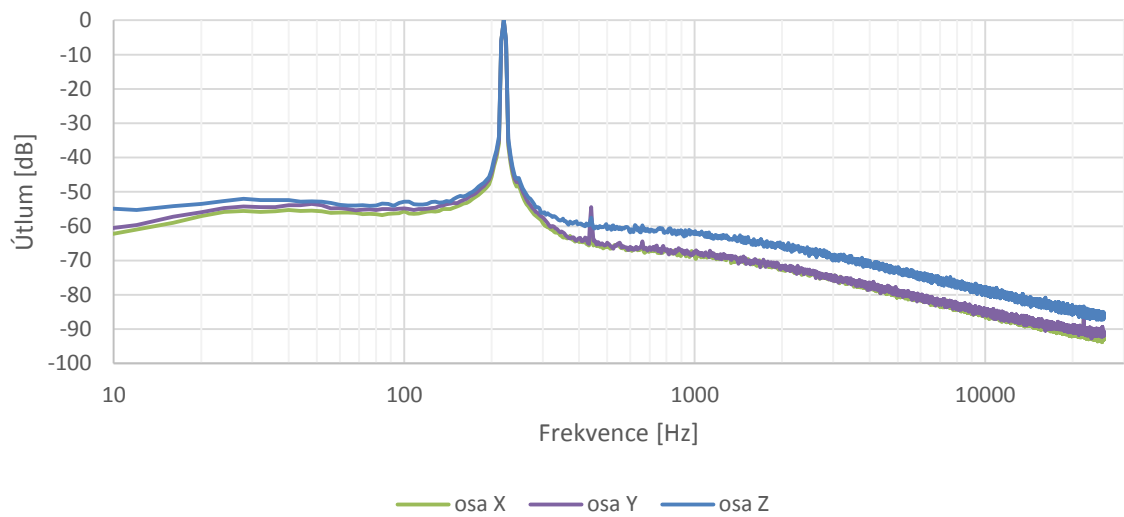
Obr. 0.4 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro ADXL203.



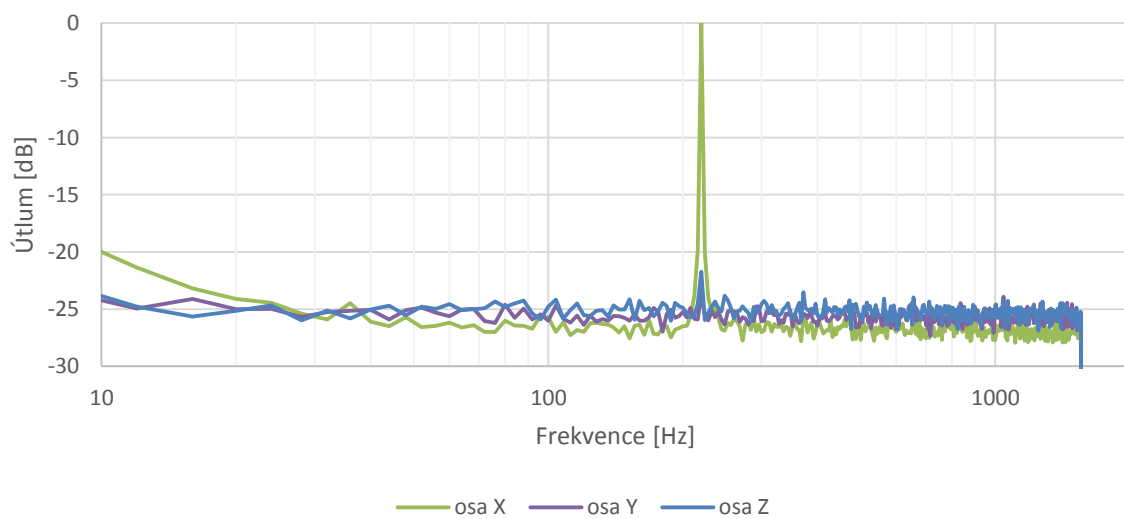
Obr. 0.5 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro LIS344ALH.



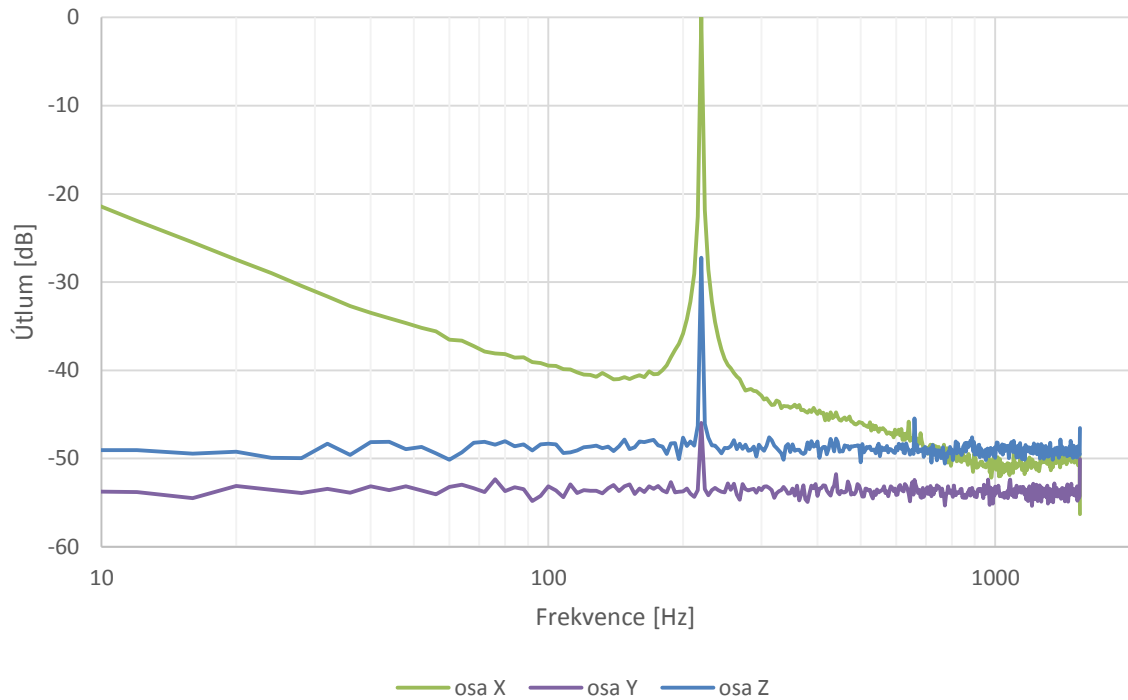
Obr. 0.6 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro 832M1.



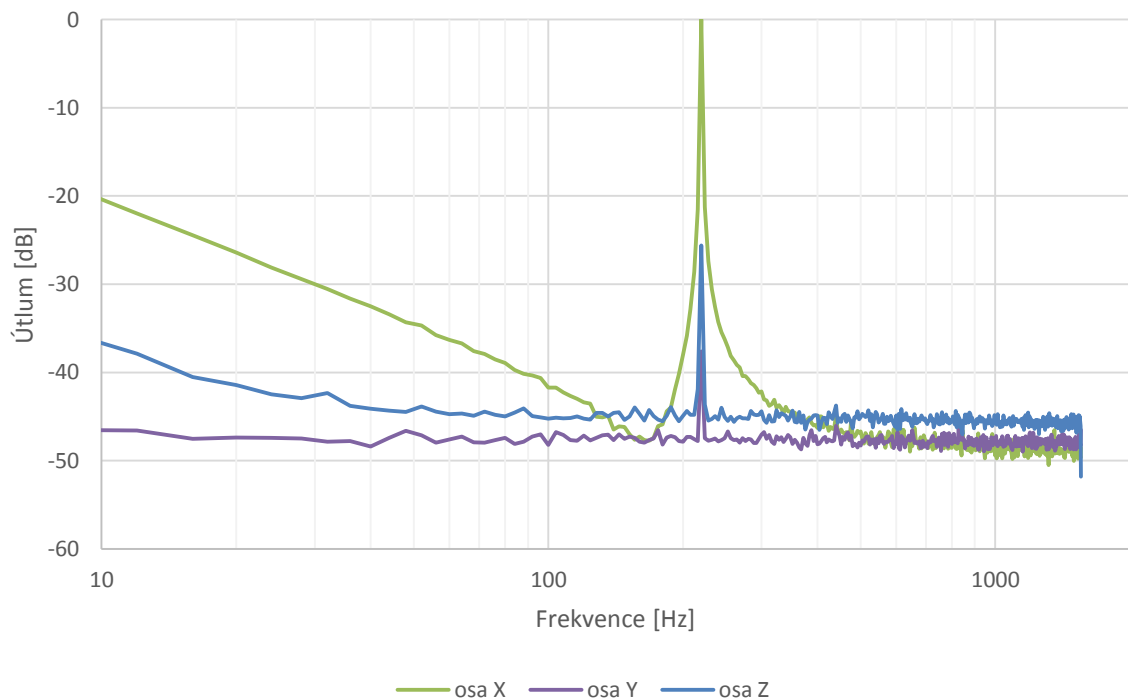
Obr. 0.7 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro KXD94.



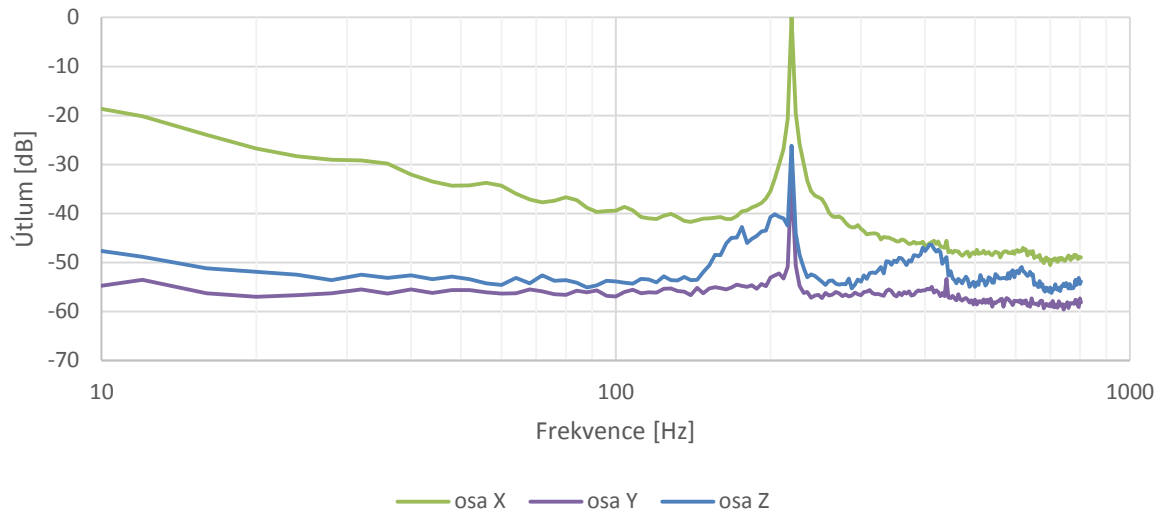
Obr. 0.8 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro ADXL375 (při buzení v ose X).



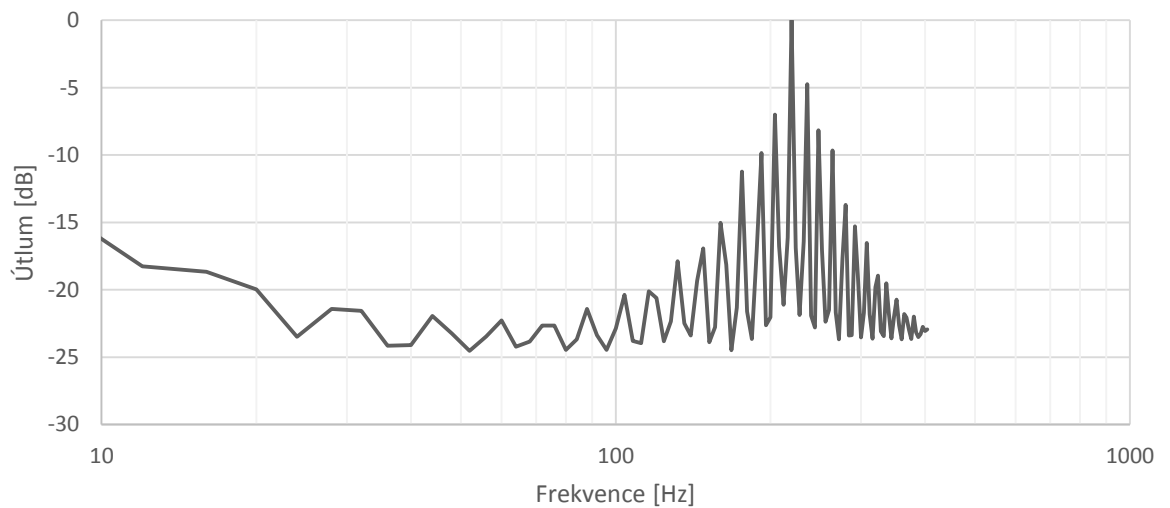
Obr. 0.9 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro navržený ADXL345 (při buzení v ose X).



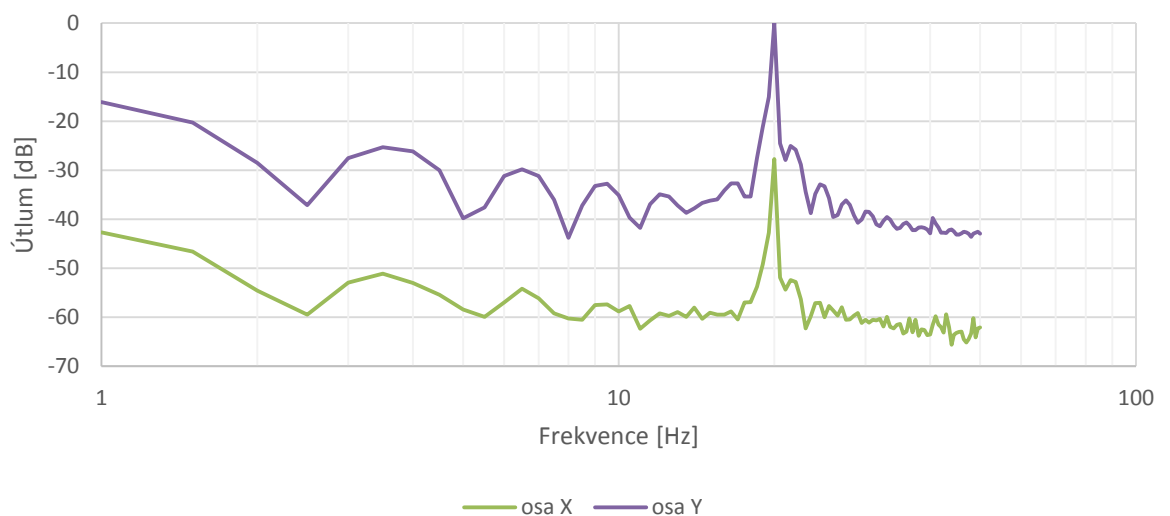
Obr. 0.10 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro zakoupený modul ADXL345 (při buzení v ose X).



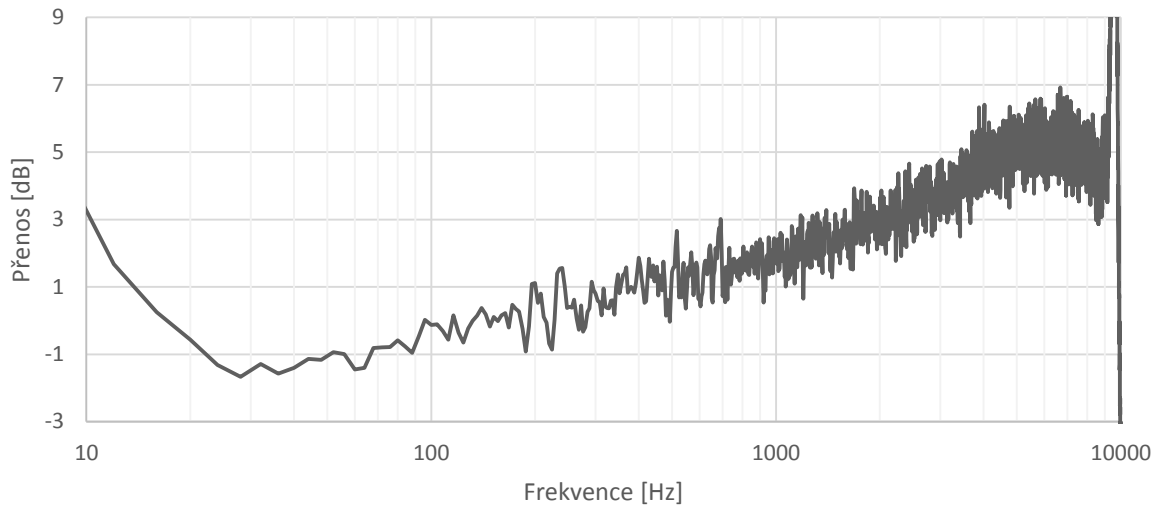
Obr. 0.11 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro LIS3DSH (při buzení v ose X).



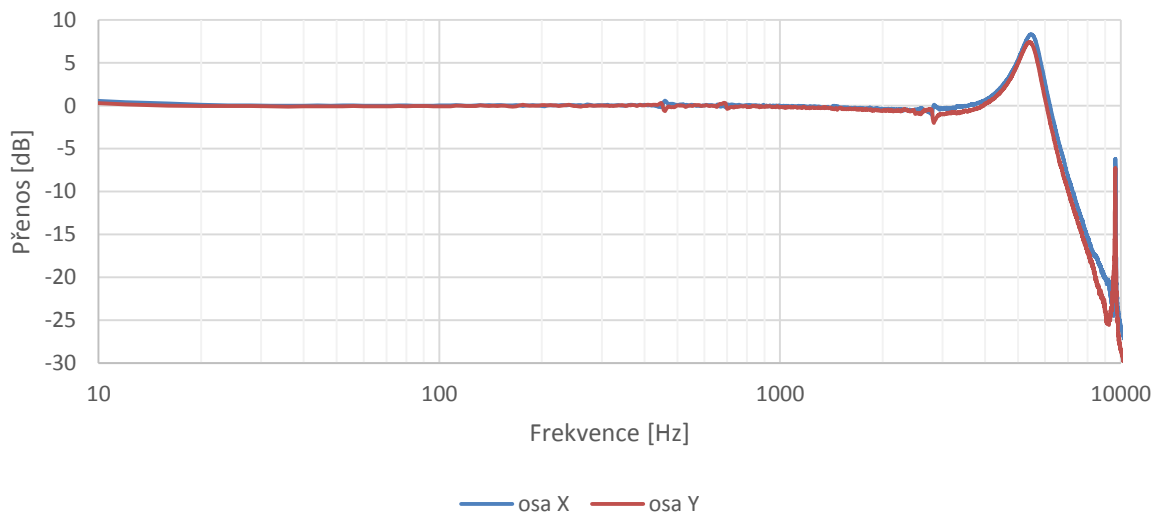
Obr. 0.12 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro MMA8451Q (při buzení v ose X).



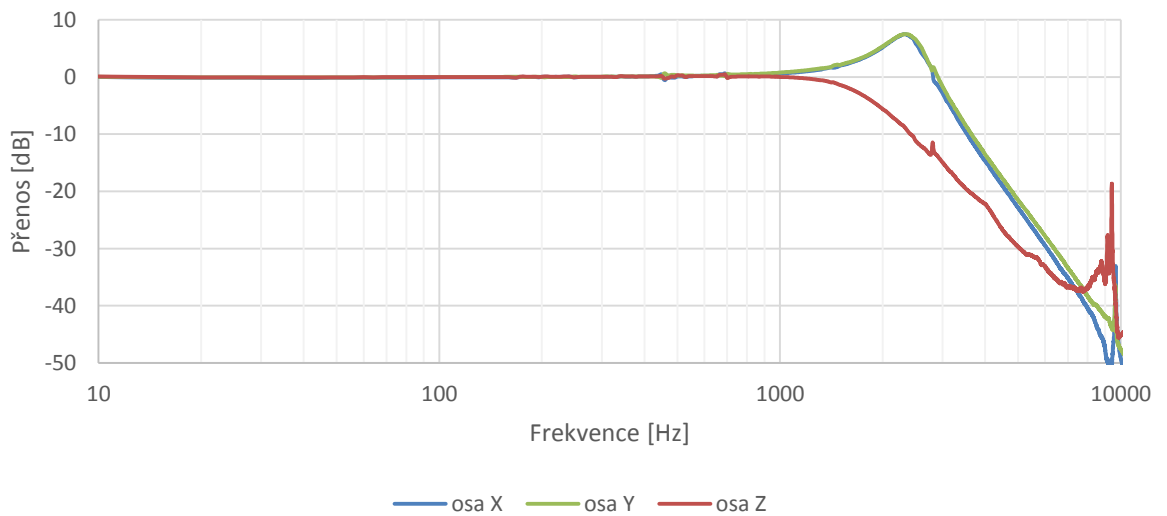
Obr. 0.13 Odezva na harmonický signál 220 Hz pro MXP7205VF (buzený v ose Y).



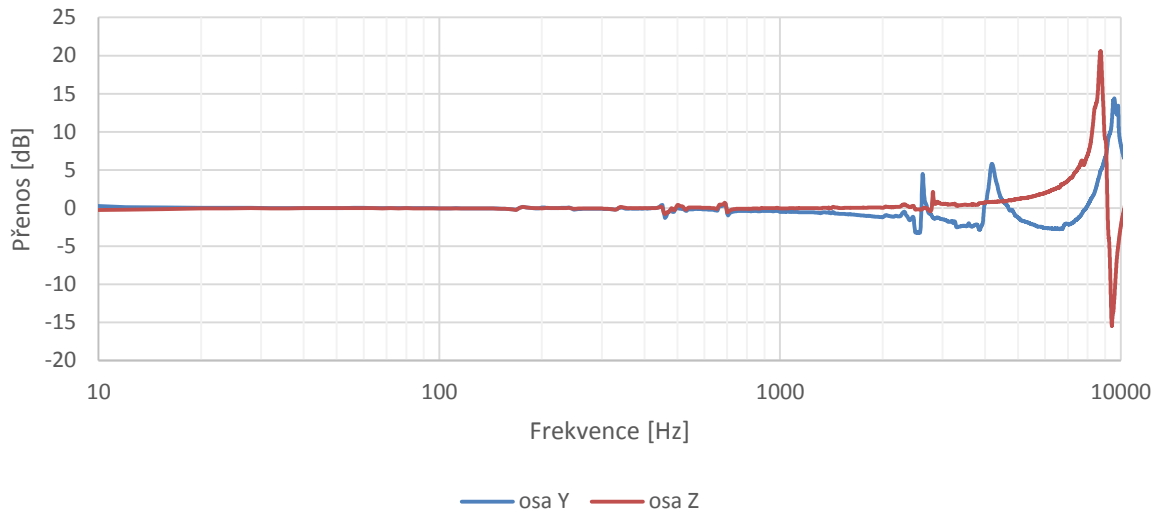
Obr. 0.14 Frekvenční charakteristika ADXL001.



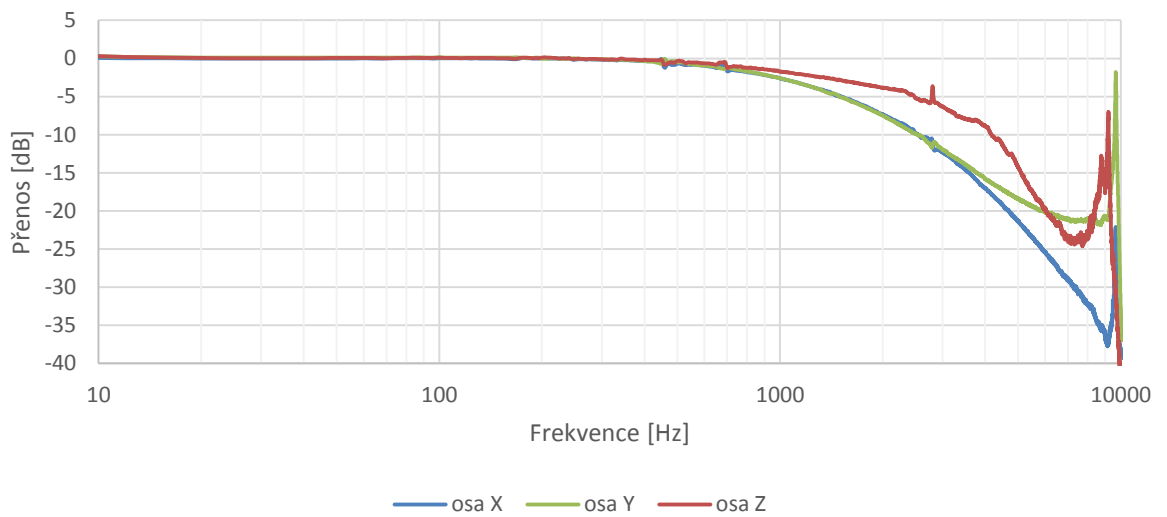
Obr. 0.15 Frekvenční charakteristika ADXL203 pro osu X a Y.



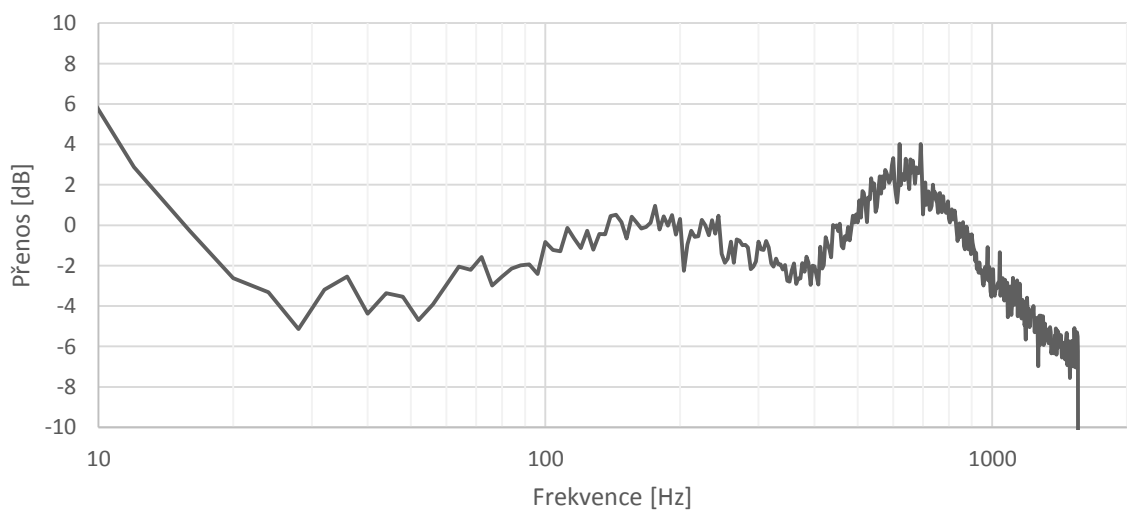
Obr. 0.16 Frekvenční charakteristika LIS344 pro osu X, Y a Z.



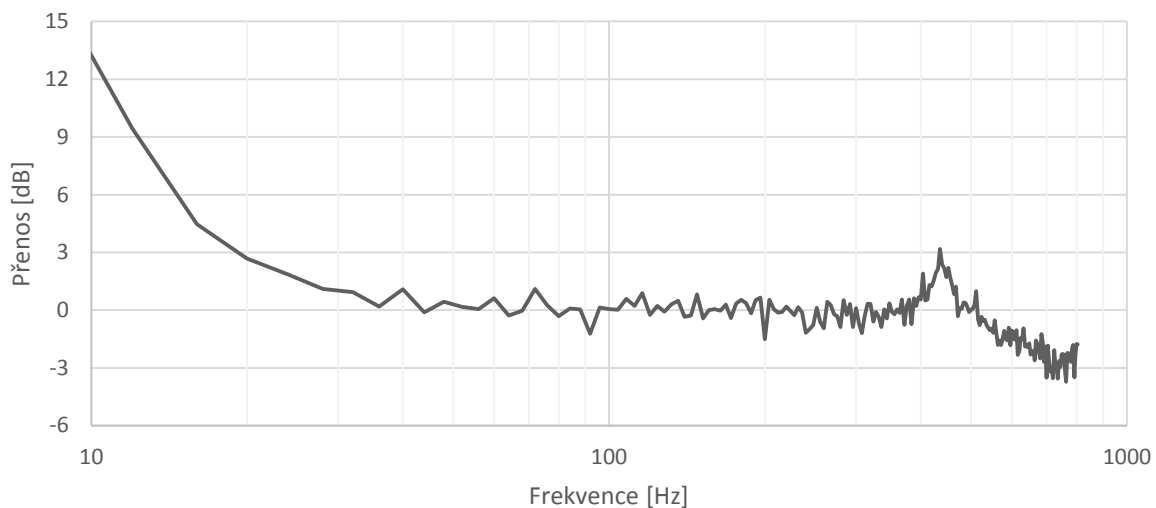
Obr. 0.17 Frekvenční charakteristika 832M1 pro osu Y a Z.



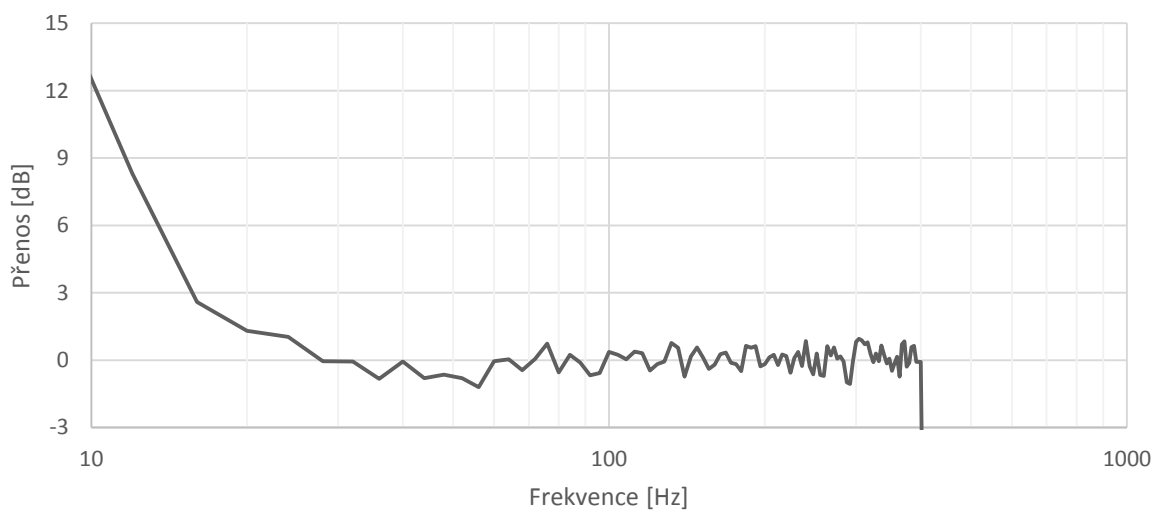
Obr. 0.18 Frekvenční charakteristika KXD94 pro osu X, Y a Z.



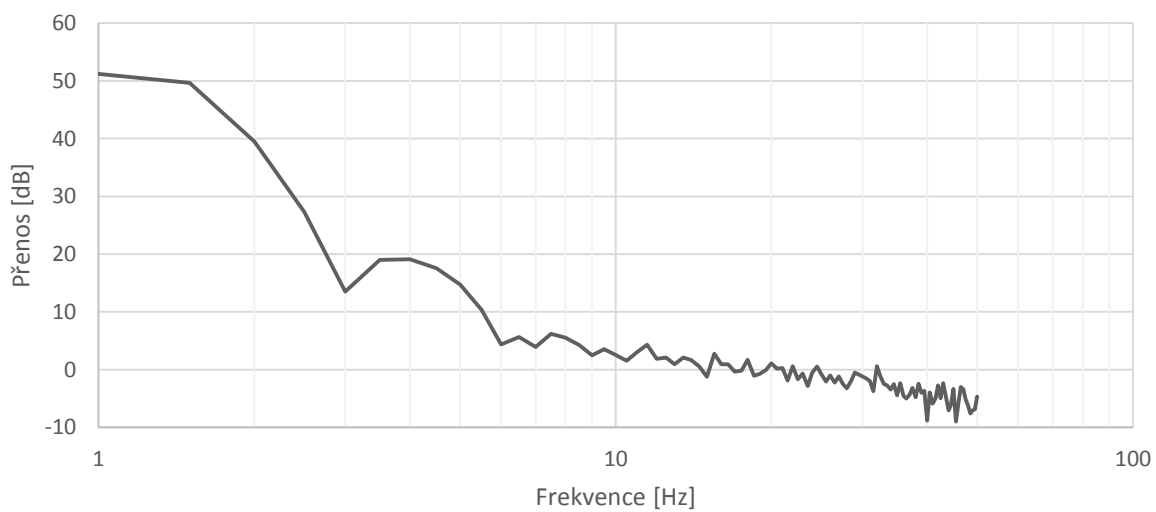
Obr. 0.19 Frekvenční charakteristika ADXL375 pro osu X.



Obr. 0.20 Frekvenční charakteristika LIS3DSH pro osu X.

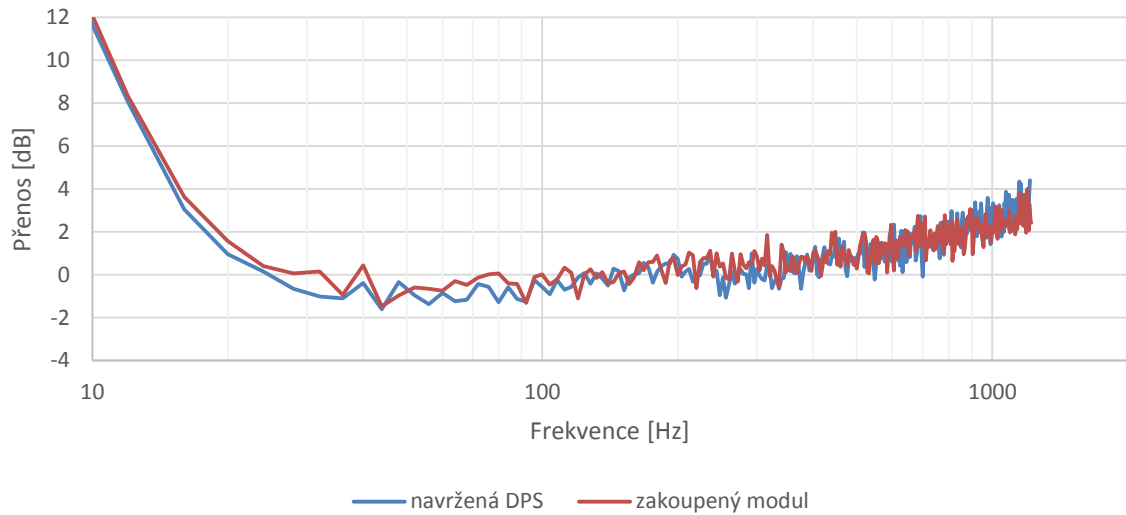


Obr. 0.21 Frekvenční charakteristika MMA8451Q pro osu X.

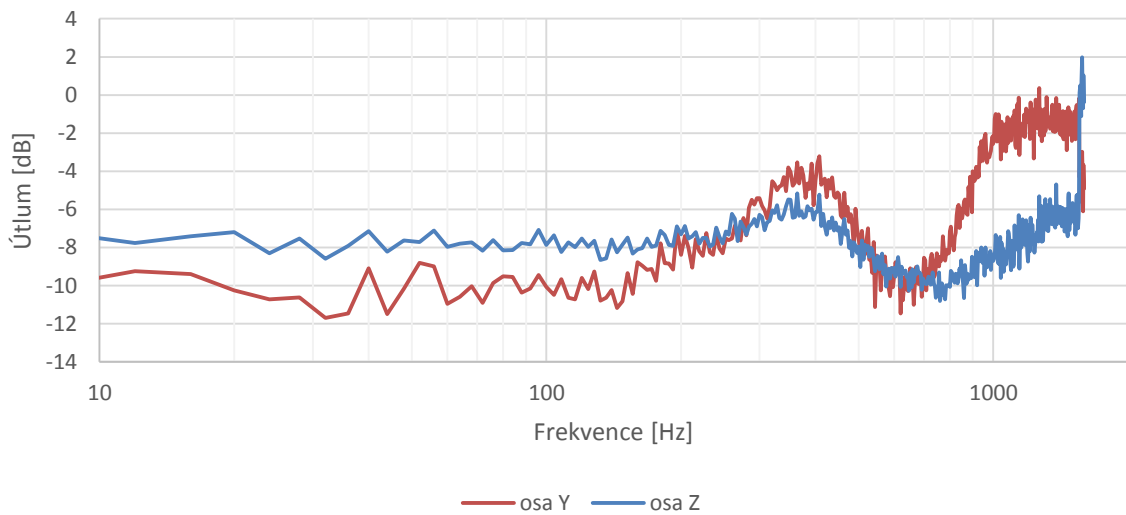


Obr. 0.22 Frekvenční charakteristika MXP7205VF pro osu Y.

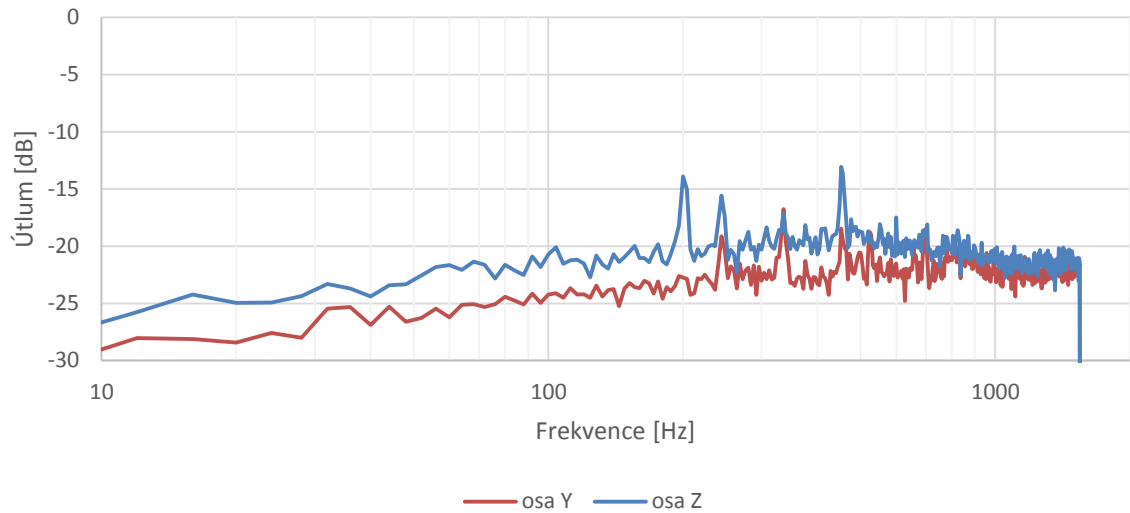




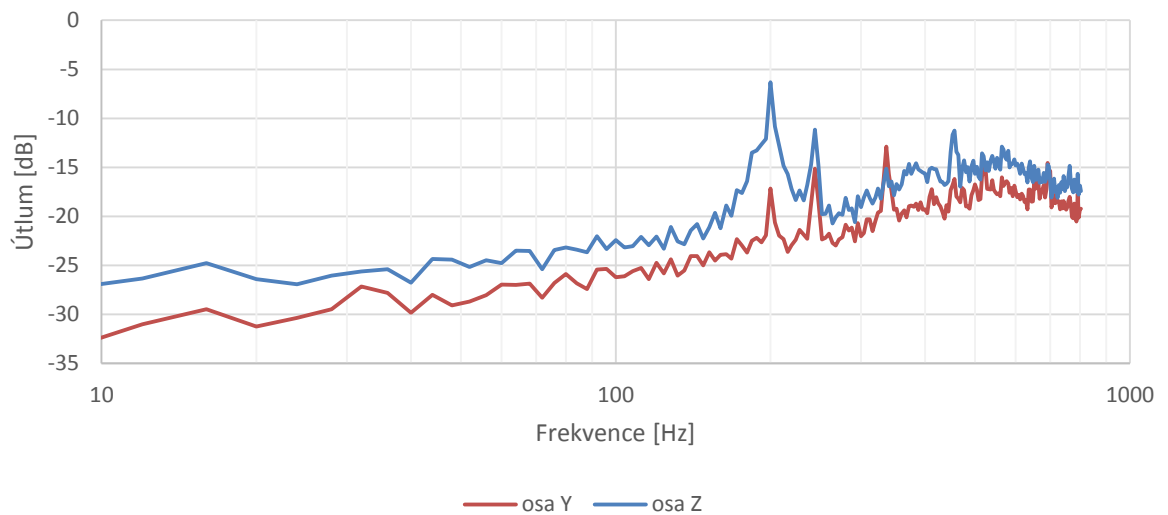
Obr. 0.23 Frekvenční charakteristika ADXL345 pro osu X (porovnání zakoupeného modulu a navržené DPS).



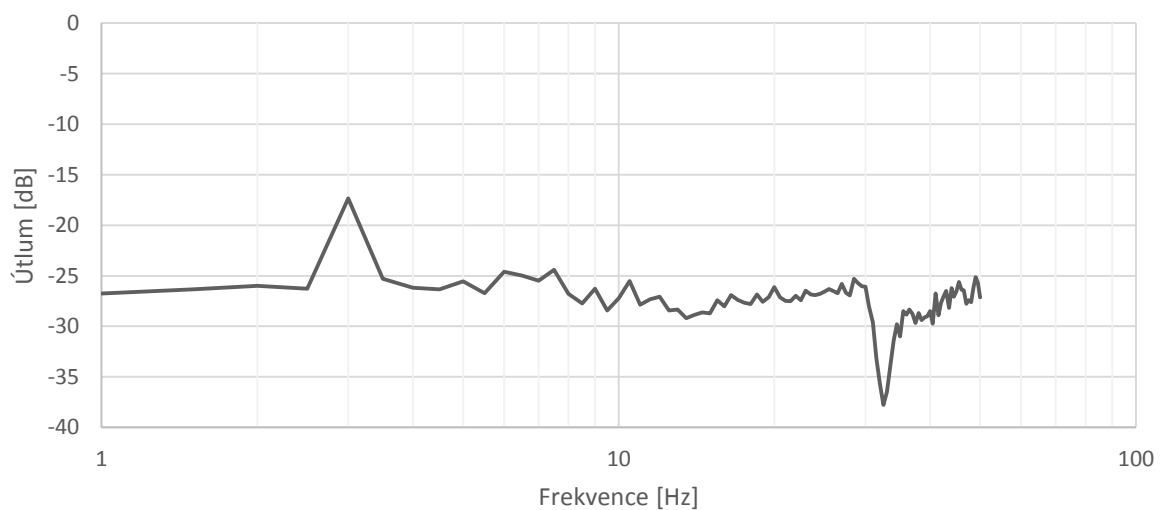
Obr. 0.24 Odstup signálu neměřených os (Y a Z) od měřené (X) pro ADXL375.



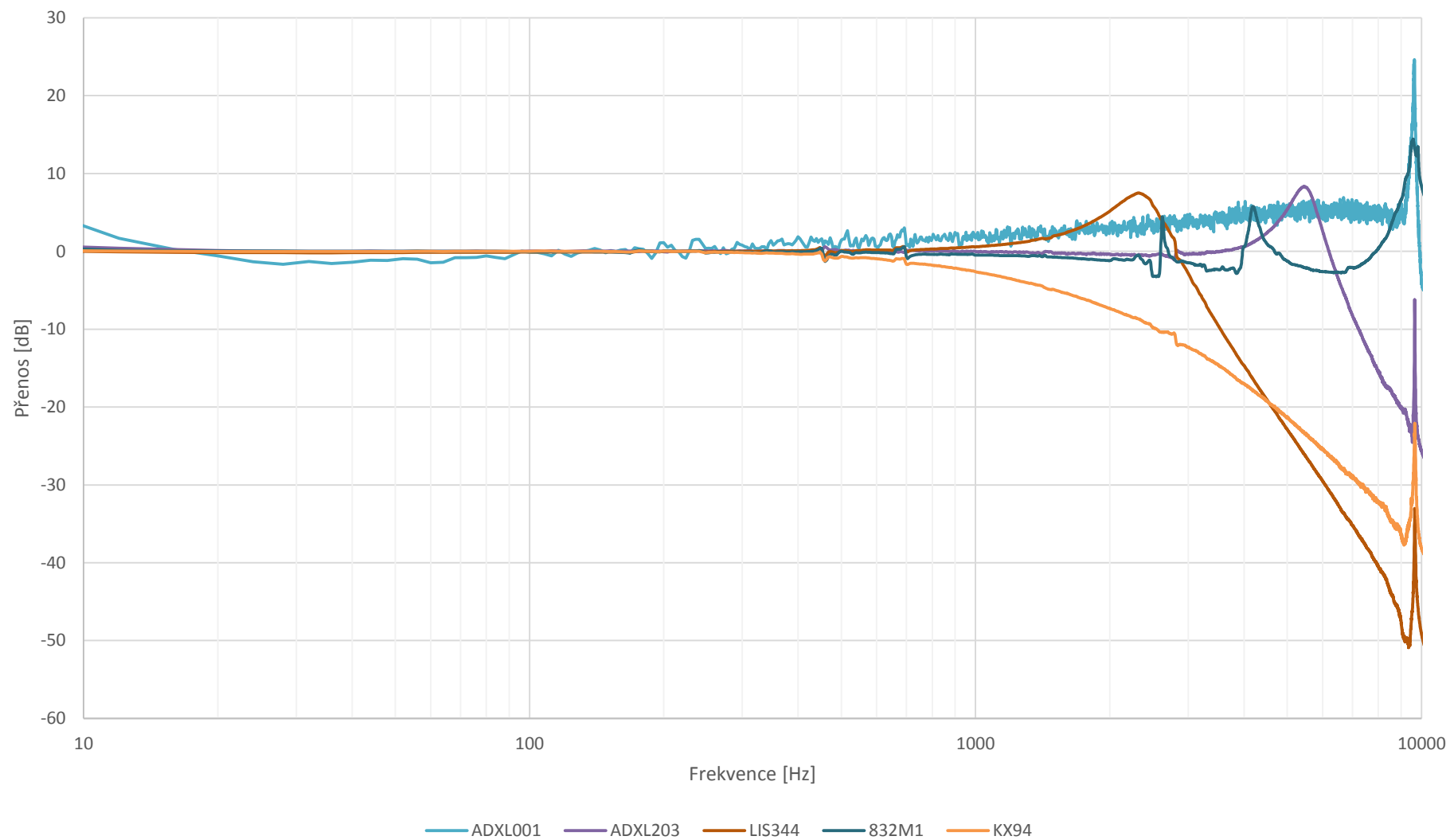
Obr. 0.25 Odstup signálu neměřených os (Y a Z) od měřené (X) pro ADXL345.



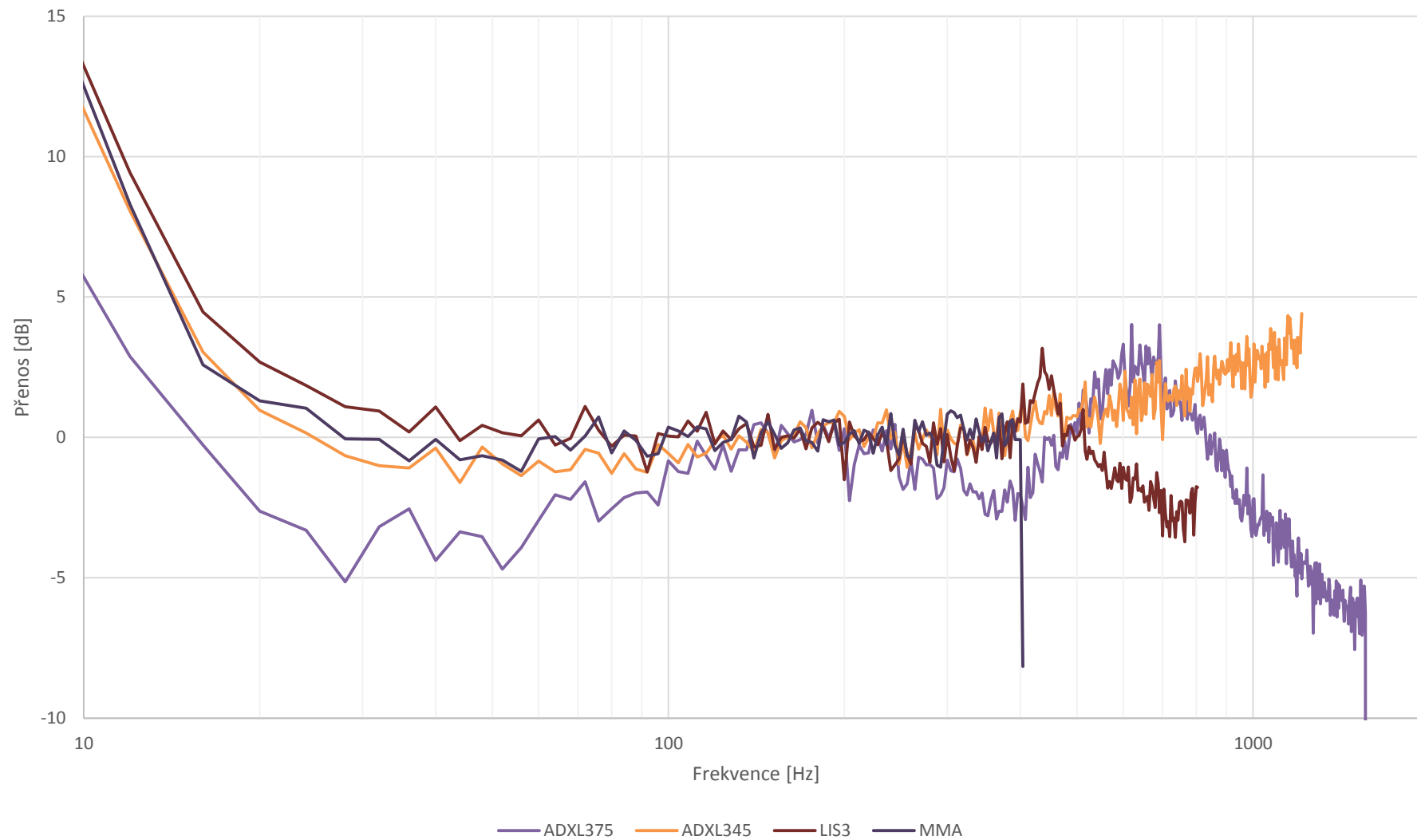
Obr. 0.26 Odstup signálu neměřených os (Y a Z) od měřené (X) pro LIS3DSH.



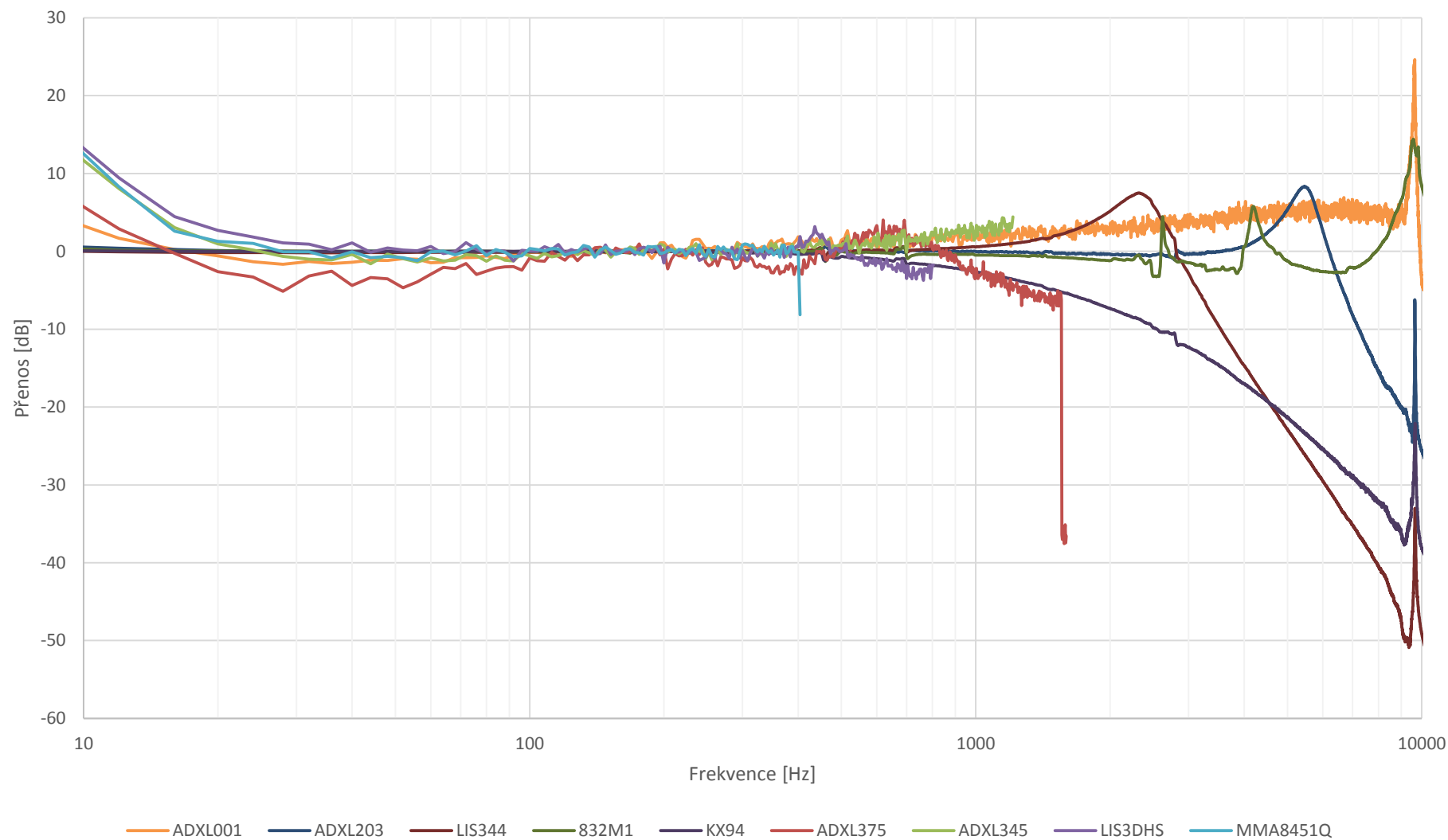
Obr. 0.27 Odstup signálu neměřené osy (X) od měřené (Y) pro MXP7205VF.



Obr. 0.28 Porovnání frekvenčních charakteristik všech analogových akcelerometrů.



Obr. 0.29 Porovnání frekvenčních charakteristik všech digitálních akcelerometrů (kromě MXP7205VF).



Obr. 0.30 Porovnání frekvenčních charakteristik všech akcelerometrů (kromě MXP7205VF).

Testované akcelerometry										Max. citlivost								Napájení			Teploty		Pouzdro [mm]
Výrobce	Typ	Výstup	Technologie	Osy [-]	Rozsah [±g]	Min. rozsah [±g]	Max. rozsah [±g]	Max. zrychlení [±g]	Offset Drift [fmg/°C]	[mV/g]	[LSB/g]	Přesnost citlivosti [%]	Nonlinearita [±%]	Frekvenční rozsah [Hz]	Rezonance [kHz]	Hustota šumu [μg/√Hz]	Šum rms [mg]	Min. napětí [V]	Max. napětí [V]	Proud [mA]	Min. [°C]	Max. [°C]	
Analog Devices	ADXL203	Analog	Kapacitní	2	1,7/ 5/ 18	1,7	18	3 500	0,1	1000		4	0,2	2 500		110	1	3	6	0,7	-40	125	5 x 5 x 2 (LCC 8)
Analog Devices	ADXL001-70	Analog	Kapacitní	1	70	70	500	4 000		24,2			0,2	32 000	22	2150	55	3,135	6	5	-40	125	5 x 5 x 2 (LCC 8)
Kionix	KXD94	Analog	Kapacitní	3	10	10	10	5 000	1	200			0,1	800	3,5	100		2,5	5,25	1,5	-40	85	5 x 5 x 1.2 (DFN 14)
Measurement	832M1	Analog	Piezoelektrický	3	50	50	50	5 000		25			2	2 ÷ 6000	10	160	3,6	3,3	5,5	0,022	-40	125	18.8 x 14.5 x 4.3 (6 pin)
Measurement	3031	Analog	Piezoresistivní	1	100	100	100	2 000	1000	0,6			0,5	1 500	3			2	10		-40	125	7,6 x 7,6 x 3,6 (8 pin)
STMicroelectronics	LIS344ALH	Analog	Kapacitní	3	2/6	2	6	10 000	0,4	660			0,5	1 800	1,8	50		2,4	3,6	0,68	-40	85	4 x 4 x 1,5 (LLGA 16)
Analog Devices	ADXL375	Digital	Kapacitní	3	200	200	200	10 000	10		20,5		0,25	1 600		5000		1,6	3,5	0,145	-40	85	3 x 5 x 1 (LGA 14)
Analog Devices	ADXL345	Digital	Kapacitní	3	2/ 4/ 8/ 16	2	16	10 000	0,4		256	10	0,5	1 600			2,9	2	3,6	0,145	-40	85	3 x 5 x 1 (LGA 14)
Freescale	MMA8451Q	Digital	Kapacitní	3	2/4/8	2	8	5 000	0,15		4096	2,64		400		126		1,95	3,6	0,165	-40	85	3 x 3 x 1 (QFN 16)
MEMSIC	MXP7205	Digital	Teplotní	2	5	5	5	50 000	0,1		800		1	29	žádná	500	2,7	4,5	5,2	3,5	-40	105	5 x 5 x 1,8 (LCC 8)
STMicroelectronics	LIS3DSH	Digital	Kapacitní	3	2/4/6/8/16	2	16	10 000	0,5		16384			800		150		1,71	3,6	0,25	-40	85	3 x 3 x 1 (LLGA 16)