

### ABSTRAKT

Cieľom bakalárskej práce bolo určiť parametre šumu MEMS akcelerometrov v statickom režime. Je to obmedzujúci parameter pre činnosť s nimi. Prípadne, ak výrobca udáva hodnotu šumu MEMS akcelerometra porovnať ich s nameranými hodnotami.

Práca obsahuje porovnanie šumu kariet a určenie, ktorá je vhodnejšia do meracieho reťazca pre meranie šumu.

Premerali sa statické parametre MEMS akcelerometrov. Navrhol sa merací reťazec pre meranie šumu MEMS akcelerometrov v dynamickom režime. Pre meranie v dynamickom režime bola použitá nová karta. Overila sa možnosť použitia tejto metódy.

V dynamickom režime boli zmerané tri akcelerometre v osi Z a jeden akcelerometer vo všetkých troch osiach.

### Kľúčové slová

MEMS, šum, akcelerometer, SNR, SINAD

### ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis was to determine noise static parameters of MEMS accelerometers. It is a limiting parameter for the activity with them. If the manufacturer gives the values of MEMS accelerometers noise compare them with measured values.

The work contains comparison the noise of cards and determines which is better suited to measuring chain for measuring noise.

Noise of the MEMS accelerometers was measured in static mode. Next step was to propose measurement setup for evaluation noise parameters of MEMS accelerometers in dynamic mode. For evaluation noise in dynamic mode was used new card. The possibility of using this measurement setup was verified.

In dynamic mode were noise of three MEMS accelerometers in axis Z measured and one three-axis accelerometer in all three axis.

### Keywords

MEMS, noise, accelerometer, SNR, SINAD

### **Bibliografická citácia**

MIHALKO, J. *Měření šumových vlastností MEMS akcelerometrů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 61 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření šumových vlastností MEMS akcelerometrů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: .....

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: .....

.....  
podpis autora

## Obsah

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2. DRUHY A PARAMETRE ŠUMU V MEMS.....</b>	<b>13</b>
2.1 Druhy šumov vyskytujúcich sa pri meraní MEMS.....	13
2.2 Základné parametre merania šumu .....	17
<b>3. MERANIE ŠUMU KARIET .....</b>	<b>18</b>
3.1 Karty pre meranie v statickom režime .....	18
3.2 Karty pre meranie v dynamickom režime.....	20
<b>4. MERANIE MEMS AKCELEROMETROV V STATICKOM REŽIME .</b>	<b>22</b>
4.1 ADXL 311 .....	23
4.2 ADXL 203 .....	25
4.3 GS3 SENSOR 61231 .....	26
4.4 GS3 SENSOR 61331 .....	29
4.5 MEMSIC A6500M .....	30
4.6 STMicroelectronics LIS2L02AS4 .....	32
4.7 ST Microelectronics LIS3L06AL .....	35
4.8 Freescale Semiconductor MMA7260QT .....	36
4.9 Porovnanie hodnôt šumu akcelerometrov .....	39
<b>5. MERANIE MEMS AKCELEROMETROV V DYNAMICKOM REŽIME</b>	<b>40</b>
.....	
5.1 Popis metód merania.....	40
5.1.1 Prvá metóda dynamického merania.....	40
5.1.2 Druhá metóda dynamického merania .....	41
5.2 Použitá metóda merania dynamického režimu .....	42
5.3 GS3 SENSOR 61231 dynamický režim .....	43
5.4 GS3 SENSOR 61331 dynamický režim .....	45
5.5 Freescale Semiconductor MMA7260QT dynamický režim .....	48
5.6 Porovnanie šumu akcelerometrov v dynamickom režime os z.....	50
5.7 STMicroelectronics LIS3L06AL dynamický režim .....	52
<b>6. ZÁVER.....</b>	<b>54</b>

<b>7. ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....</b>	<b>56</b>
<b>8. ZOZNAM SKRATIEK .....</b>	<b>58</b>
<b>9. ZOZNAM PRÍLOH .....</b>	<b>59</b>
<b>10. PRÍLOHY .....</b>	<b>60</b>

## Zoznam obrázkov

Obrázok č. 3.1.1 NI-PXI 6259 [1], NI-PXI 6251 .....	18
Obrázok č. 3.1.2 Schéma zapojenia NI-USB 6215 .....	18
Obrázok č. 3.1.3 Schéma zapojenia NI-PXI 6259 .....	19
Obrázok č. 3.1.4 Hladina šumu kariet NI-USB 6215, NI-PXI 6259 .....	19
Obrázok č. 3.2.1 NI-PXI 4462 .....	20
Obrázok č. 3.2.2 Schéma zapojenia NI-PXI 4462 .....	20
Obrázok č. 3.2.3 Hladina napät'ového šumu NI-PXI 4462 .....	21
Obrázok č. 4.1.1 Konfigurácia pinov ADXL 311 .....	23
Obrázok č. 4.1.2 Schéma zapojenia ADXL 311 .....	23
Obrázok č. 4.1.3 Zapojenie ADXL 311 .....	23
Obrázok č. 4.1.4 Hladina šumu ADXL 311 .....	24
Obrázok č. 4.2.1 Konfigurácia pinov ADXL 203 .....	25
Obrázok č. 4.2.2 Schéma zapojenia ADXL 203 .....	25
Obrázok č. 4.2.3 Zapojenie ADXL 203 .....	25
Obrázok č. 4.2.4 Hladina šumu ADXL 203 .....	26
Obrázok č. 4.3.1 Konfigurácia pinov GS3 61331, 61231 .....	27
Obrázok č. 4.3.2 Schéma zapojenia GS3 61231 .....	27
Obrázok č. 4.3.3 Zapojenie GS3 61231 .....	27
Obrázok č. 4.3.4 Hladina šumu GS3 61231 .....	28
Obrázok č. 4.4.1 Schéma zapojenia GS3 61331 .....	29
Obrázok č. 4.4.2 Zapojenie GS3 61331 .....	29
Obrázok č. 4.4.3 Hladina šumu GS3 61331 .....	30
Obrázok č. 4.5.1 Konfigurácia pinov A6500M .....	31
Obrázok č. 4.5.2 Schéma zapojenia A6500 .....	31
Obrázok č. 4.5.3 Zapojenie A6500M .....	31
Obrázok č. 4.5.4 Hladina šumu A6500M .....	32
Obrázok č. 4.6.1 Konfigurácia pinov LIS2L02AS4 .....	33
Obrázok č. 4.6.2 Schéma zapojenia LIS2L02AS4 .....	33
Obrázok č. 4.6.3 Zapojenie LIS2L02AS4 .....	33

Obrázok č. 4.6.4	Hladina šumu LIS2L02AS4 .....	34
Obrázok č. 4.7.1	Konfigurácia pinov LIS3L06AL .....	35
Obrázok č. 4.7.2	Schéma zapojenia LIS3L06AL .....	35
Obrázok č. 4.7.3	Hladina šumu LIS3L06AL .....	36
Obrázok č. 4.8.1	Konfigurácia pinov MMA7260QT .....	36
Obrázok č. 4.8.2	Schéma zapojenia MMA7260QT .....	37
Obrázok č. 4.8.3	Zapojenie MMA7260QT .....	37
Obrázok č. 4.8.4	Hladina šumu A7260QT .....	38
Obrázok č. 5.1.1	Metóda merania šumu akcelerometrov Breitenbach .....	40
Obrázok č. 5.1.2	Metóda merania šumu akcelerometrov F.Mohd-Yasin .....	41
Obrázok č. 5.2.1	Schéma zapojenia dynamického režimu.....	43
Obrázok č. 5.1.1	Spektrum 61231 a Polytec pre 80 Hz .....	44
Obrázok č. 5.1.2	SINAD GS3 61231 a Polytec .....	44
Obrázok č. 5.1.3	SNR GS3 61231 a Polytec.....	45
Obrázok č. 5.2.1	Spektrum 61331 a Polytec pre 80 Hz .....	46
Obrázok č. 5.2.2	SINAD GS3 61331 a Polytec .....	47
Obrázok č. 5.2.3	SNR GS3 61331 a Polytec.....	47
Obrázok č. 5.3.1	Spektrum MMA7260QT a Polytec pre 80 Hz.....	49
Obrázok č. 5.3.2	SINAD MMA7260QT a Polytec.....	49
Obrázok č. 5.3.3	SNR MMA7260QT a Polytec .....	50
Obrázok č. 5.6.1	Hodnoty SNR MMA7260QT, GS3 61231 a 61331 .....	51
Obrázok č. 5.6.2	Hodnoty SINAD MMA7260QT, GS3 61231 a 61331.....	51
Obrázok č. 5.7.1	Hodnoty SNR LIS3L06AL osi X, Z, Y .....	53
Obrázok č. 5.7.2	Hodnoty SINAD LIS3L06AL osi X, Z, Y .....	53

## Zoznam tabuliek

Tabuľka č.1 Namerané a tabuľkové hodnoty ADXL 311.....	24
Tabuľka č.2 Namerané a tabuľkové hodnoty ADXL 203.....	26
Tabuľka č.3 Namerané a tabuľkové hodnoty GS3 6123.....	28
Tabuľka č.4 Namerané a tabuľkové hodnoty GS3 61331.....	29
Tabuľka č.5 Namerané a tabuľkové hodnoty MEMSIC A6500M .....	31
Tabuľka č.6 Namerané a tabuľkové hodnoty LIS2L02AS4 .....	34
Tabuľka č.7 Namerané a tabuľkové hodnoty LIS3L06AL .....	35
Tabuľka č.8 Namerané a tabuľkové hodnoty MMA7260QT .....	38
Tabuľka č.9 Porovnanie nameraných hodnôt akcelerometrov v $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ .....	39
Tabuľka č.10 Porovnanie nameraných hodnôt akcelerometrov v $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ .....	39
Tabuľka č.11 Nastavené parametre pri meraní dynamického režimu 61231 .....	43
Tabuľka č.12 Nastavené parametre pri meraní dynamického režimu 61331 .....	46
Tabuľka č.13 Nastavené parametre pri meraní dynamického režimu MMA 7260QT .....	48
Tabuľka č.14 Nastavené parametre pri meraní dynamického režimu LIS3L06AL..	52

## 1. ÚVOD

Tému Meranie šumových vlastností MEMS akcelerometrov som si vybral z dôvodu rozširovania pôsobnosti MEMS snímačov, či už priemysle alebo aj bežnom živote. Motiváciou bola práca s kvalitnými meracími zariadeniami, ktoré si meranie šumu vyžaduje.

Parametre šumu (napr. SNR) sú dôležitým parametrom, ktorý obmedzuje možnosť použitia MEMS akcelerometrov. Niektoré druhy akcelerometrov tieto údaje neobsahujú, preto je dôležité tieto parametre premerať.

Bakalárska práca pozostávala z dvoch častí. V prvej časti bolo úlohou premerať statické parametre šumu MEMS akcelerometrov dostupných v laboratóriu. To znamenalo zistiť funkčnosť dostupných akcelerometrov, zostaviť ich zoznam a premerať šum. Pokiaľ výrobca udával parametre šumu snímača porovnať tieto hodnoty s nameranými a následne porovnať jednotlivé výsledky medzi sebou a zhodnotiť.

Cieľom druhej časti bolo vyhľadať literatúru o meraní šumových vlastností MEMS akcelerometrov v dynamickom režime a overiť danú metódu. Touto metódou boli premerané tri troj-osé MEMS akcelerometre v osi Z a jeden troj-osí MEMS akcelerometer vo všetkých troch osiach.

## 2. DRUHY A PARAMETRE ŠUMU V MEMS

Rozlišení akcelerometra je limitované šumom. Výstupný šum sa líši v závislosti od šírky pásma. Zmenšovaním šírky pásma, zapojením externého dolno-pásmového filtra, by výstupný šum akcelerometra mal klesnúť. Zmenšenie šírky pásma by malo zlepšiť SNR a rozlíšenie. [4]

### 2.1 DRUHY ŠUMOV VYSKYTUJÚCICH SA PRI MERANÍ MEMS [13]

Šum má veľa podôb, preto je potrebné určiť typ šumu. Šum v zariadeniach ako sú napríklad snímače MEMS a v systémoch, ktoré ich obsahujú, má dva základné pôvody, jeden externý (vonkajší) a druhý je interný (vnútorný). Šum pochádzajúci z okolia zariadenia MEMS vzhľadom k okolitým elektromagnetickým poliam alebo mechanickým pohybom, najmä zvuku a vibráciám, môže obmedziť výkon systému.

Veľkosť vonkajšieho signálu šumu ovplyvňujúceho zariadenie MEMS sa mení s okolitými podmienkami, ktoré sú napríklad elektrické prostredie, mechanické prostredie a samozrejme záleží na obale (materiál, technológia) a montáži MEMS zariadenia. Táto časť pojednáva o základných zdrojoch šumu, ktoré sú obmedzujúcim faktorom pre činnosť MEMS zariadenia, poskytujú pevné limity pre činnosť s nimi.

Zníženie vnútorného šumu z rôznych základných mechanizmov je dôležitou úlohou pre výrobcov a dizajnérov MEMS snímačov.

Pred prehľad niektorých z viac rozšírených a dôležitých zdrojov šumu v MEMS, je vhodné zvážiť základné príčiny šumu, všeobecne. Šum v inžinierskych systémoch má dve príčiny. Prvým z nich je granularita v oblasti energie a hmoty v zariadení. Fotóny, elektróny, atómy a molekuly sú kvantá. Ich existencia alebo vplyv na zariadenie sú nevyhnutne diskkrétne. Druhý dôvod pre vznik šumu sú nevyhnutné štatistické rozdiely v energiách a pohyby veľkého množstva príslušných kvánt.

Vo veľkých systémoch sú diskrétna a štatistická povaha prítomnosti, pohyby energie a materiálu často zanedbateľné. Pokiaľ sa veľkosť systému zmenší, signál má tendenciu zmenšiť sa a následne šum má tendenciu zvýšiť sa. Spoločne to má dvojaký vplyv na odstup signálu od šumu (SNR). Limity, na minimálnej detekčnej hranici MEMS senzorov a na minimálnom potrebnom vstupnom signáli pre MEMS, sú dané hladinou šumu. Toto platí pre jednotlivé druhy šumu pôsobiace v rámci štruktúry MEMS.

Predmet vzájomných pôsobení medzi mechanizmami šumu je dokonca zložitejší, ak existuje viac druhov energií v zariadení MEMS, zvyčajne elektrické a mechanické, ale aj optické, rádiové frekvencie a ďalšie.

Existuje jeden druh šumu, ktorý sa nachádza vo väčšine druhov MEMS, a síce tzv. výstrelový šum (shot noise). Je spôsobený kvantizačným charakterom signálov a materiálmi nachádzajúcimi sa v MEMS. Výstrelový šum je spôsobený premenlivým (náhodným) časom príchodu elektrónov alebo fotónov, prípadne nevyhnutnými diskretnými pohybmi atómov alebo molekúl vo vnútri, prípadne na zariadení MEMS.

Elektronický šum je najdôležitejší šum v MEMS vzhľadom k tomu, že samotný MEMS je elektronického charakteru. Existuje niekoľko druhov elektronického šumu, ktoré si zasluhujú pozornosť.

Sú to:

- Termálny (Johnsnov alebo Nyquistov) šum ktorý je spôsobený teplotne -indukovaným kolísaním hustoty elektrónov a dier (podobne ako pohyby atómov a molekúl).
- Šum generácie a rekombinácie, je spôsobený náhodným vytvorením a zánikom páru elektrón-diera v polovodiči. Môže sa objaviť aj v alebo po ionizácii v dôsledku absorpcie energetických kvánt.
- Šum, ktorý sa mení inverzne s frekvenciou ( $1 / f$ ), a vzhľadom na variabilný odchyt a uvoľnenie nosičov v hocijakom vodiči. Rôzne typy  $1/f$  šumu sa vyskytujú v rôznych systémov líšiacich sa charakterom a veľkosťou.

Mechanické šумы, ako sú napríklad vibrácie, sú zvyčajne vonkajšie. Každopádne je jeden dôležitý vnútorný mechanický šum, a to Brownov pohyb (Brownian motion). Je spôsobený dynamickými nevyváženými silami, ktoré sú zapríčinené náhodnými vplyvmi molekúl na malé čiastočky alebo štruktúry. Preto sa tiež nazýva náhodný šum (random walk noise). Brownov pohyb sa stáva viac významný, keď sa veľkosť štruktúry znižuje, napríklad seizmická hmotnosť (proof mass) MEMS akcelerometra alebo rezonančný šum v MEMS RF filtri.

AD šum je úzko spätý s Brownovým pohybom. Je to kvôli náhodnému príchodu a odchodu jednotlivých atómov a molekúl na povrchu zariadenia MEMS. AD šum zahŕňa niektoré nenulové častice, ktoré sa nachádzajú na povrchu, na rozdiel od prechodných dejov, ktoré sú príčinou Brownovho pohybu. To je bežný problém chemických a biologických senzorov, ktoré obsahujú drobné štruktúry.

Dôležitý druh šumu v optickom snímaní je šum v jeho intenzite. Vyplýva to z kvantového šumu (súvisiace so zosilnením lasera a dutinami, ktoré spôsobujú straty), čiastočne zo zdrojov, akými sú prekročenie šumu zo zdroja, tepelné výkyvy v zosilňovacom médiu a iné. Výsledná relatívna intenzita šumu (tzv. RIN), závisí aj na daných podmienkach. Najmä, často sa stáva slabšou pri vysokých zosilneniach, kde sú oscilácie silne tlmené.

V oblasti RF sa ideálny nosič zobrazí ako nekonečne tenká čiara vo frekvenčnom spektre. Typický nosič však bude mať okolie, ktorého amplitúdy nasledujú približne po  $1/f$ . Tieto okolia sú obálky postranného pásma spôsobené moduláciou nosiča (FM a AM), náhodne v oboch prípadoch, frekvencii aj amplitúde, spôsobené rôznymi javmi súvisiacimi s vlastnosťami daného oscilátora. Obyčajne sú označované ako fázový šum. Fázový šum je zvyčajne vyjadrený v jednotkách dBc/Hz v rôznych kompenzáciách od nosnej frekvencie. dBc je intenzita šumu k sile nosičov. Fázový šum môže byť meraný a vyjadrený ako SSB (single sideband) alebo DSB (double sideband) hodnota.

### **Biely šum (white noise) [11]**

Je to náhodný signál. Má rovnomernú výkonovú spektrálnu hustotou, rovnaký výkon v ktoromkoľvek pásme rovnakej šírky. Ak zoberiem napríklad pásmo od 100 do 200 Hz bude mať rovnaký výkon ako pásmo medzi 3000 a 3100 Hz . Je preto nazývaný ako analógia s bielym svetlom, ktoré obsahuje všetky frekvencie. Nekonečný frekvenčný rozsah signálu bieleho šumu je iba teoretický. Keby výkon bol nenulový na všetkých frekvenciách, bol by celkový výkon signálu nekonečný. V praxi je signál biely pokiaľ má ploché spektrum v definovanom rozsahu frekvencií.

Biely šum je používaný pre testovanie prenosovej charakteristiky zosilňovačov a elektronických filtrov. Býva základom niektorých generátorov náhodných čísel.

## 2.2 ZÁKLADNÉ PARAMETRE MERANIA ŠUMU [12]

Vyjadrení šumu môže byť veľa, no najpoužívanejšie sú SNR, SINAD a ENOB. Tieto parametre spolu úzko súvisia.

### SNR

Vyjadruje odstup signál-šum (signal to noise ratio). Ide o pomer (2.3) vstupného napätia  $U_{VST}$  (2.1) a kvantovacieho šumu (2.2). Napríklad ideálny 8-bitový A/D prevodník má  $SNR_I = 49,9\text{dB}$ . Skutočný prevodník má SNR vždy menšie, ako ideálny prevodník z dôvodu zväčšenia kvantovacej chyby.

$$U_{VST} = \frac{U_{MAX}}{2\sqrt{2}} \text{ [V]} \quad (2.1) , \quad U_q = \frac{q}{\sqrt{12}} U_{MAX} \text{ [V]} \quad (2.2)$$

$$SNR_I = 20 \log \frac{U_{VST}}{U_q} = 6,02n + 1,76 \text{ [dB]} \quad (2.3)$$

### ENOB

Je to efektívny počet bitov (ENOB) a je vždy menší ako menovitý počet bitov. Daný je veľkosťou SNR podľa vzťahu (2.4).

$$ENOB = \frac{SNR - 1,76}{6,02} \text{ [bity]} \quad (2.4)$$

### SINAD

Vyjadruje súčet pomeru signál-šum s harmonickým skreslením THD. Definovaný je pomerom rozptylu vstupného signálu k odmocnine súčtu štvorcov ostatných spektrálnych zložiek vrátane harmonických okrem jednosmernej zložky. Obsahuje všetky zložky skreslenia. Vynáša sa ako funkcia vstupnej frekvencie. Od parametru SNR sa odlišuje tým, že sa počíta z amplitúd prvých 5 harmonických, ktoré sú dominantné. Veľa výrobcov si s týmito parametrami nerobí starosti, preto sa často neuvádzajú. Podobne ako parameter SNR sa dá použiť pre výpočet ENOB.

$$SINAD = \frac{\text{Fundamental} + \text{Noise} + \text{Distortion}}{\text{Noise} + \text{Distortion}} \text{ [dB]} \quad (2.5)$$

### 3. MERANIE ŠUMU KARIET

#### 3.1 KARTY PRE MERANIE V STATICKOM REŽIME

Ako prvé bolo potrebné určiť kartu, ktorá bude použitá pre meranie. K dispozícii boli dve karty od firmy NI karta NI-USB 6215 a NI-PXI 6259. Obidve karty sú 16-bitové. NI-USB 6215 má 8 diferenčných vstupov alebo 16 single ended vstupov. NI-PXI 6259 má 16 diferenčných vstupov alebo 32 single ended vstupov.

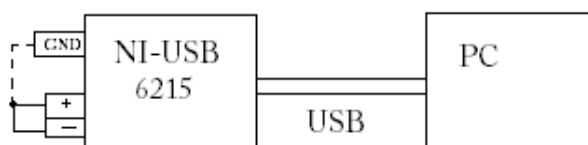


Obrázok č. 3.1.1 NI-PXI 6259 [1], NI-PXI 6251 [2]

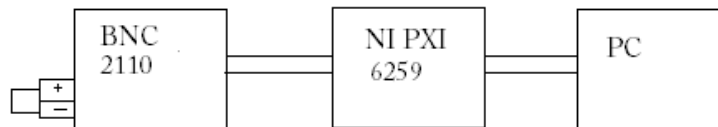
Pri meraní kariet boli použité rovnaké podmienky a parametre merania. Bol meraní napät'ový šum kariet t.j. vstupy boli prepojené v diferenčnom zapojení.

<b>Parametre merania:</b>	rozsah	$\pm 10V$
	priemerovanie	<b>RMS averaging (100)</b>
	počet vzoriek	<b>500</b>
	frekvencia	<b>1 kHz</b>

Schémy zapojenia:



Obrázok č. 3.1.2 Schéma zapojenia NI-USB 6215



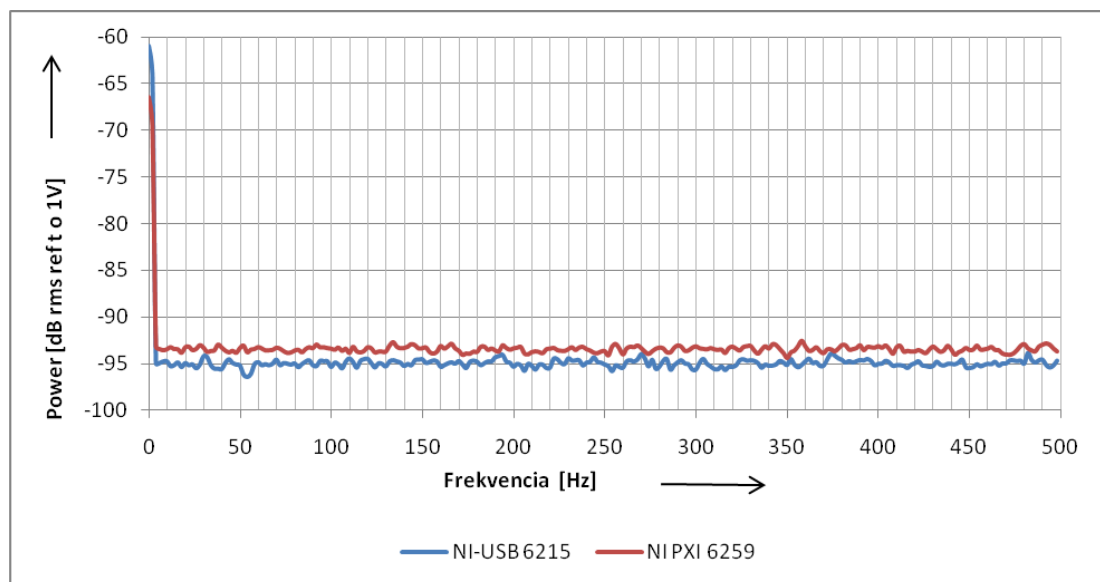
Obrázok č. 3.1.3 Schéma zapojenia NI-PXI 6259

Z dôvodu rušenia boli piny Ai0 prepojené s pinom GND ,čo pomohlo rušenie eliminovať.

Podľa vzorca (2.9) sa dá určiť hodnota ideálneho prevodníka. Hodnota SNR ideálneho prevodníka je 98,08dB.

$$SNR_l = 20 \log \frac{U_{VST}}{U_q} = 6,02n + 1,76 = 6,02 \cdot 16 + 1,76 = 98,08 \quad [\text{dB}]$$

Pre kartu NI-USB 6215 bola priemerná hodnota SNR -95,87dB. Pre kartu NI-PXI 6259 bola priemerná hodnota SNR -93,77dB.



Obrázok č. 3.1.4 Hladina šumu kariet NI-USB 6215, NI-PXI 6259

Pre meranie v statickom režime bola zvolená karta NI-USB 6215.

### 3.2 KARTY PRE MERANIE V DYNAMICKOM REŽIME

Pri meraní v statickom režime MEMS akcelerometrov bola použitá 16-bitová karta NI-USB 6215. Z dôvodu lepších šumových vlastností bola pre meranie v dynamickom režime použitá nová karta NI-PXI 4462. Jedná sa o 24-bitovú kartu. Podporuje komunikáciu so Sound and Vibration Toolkitom, nástrojovou sadou LabVIEW, taktiež od firmy NI a je priamo odporúčaná na meranie šumu a vibrácií. Má 4 analógové diferenčné vstupy a pri rozlíšení  $\pm 10V$  má nulové zosilnenie.

Podľa vzorca (2.9) bola určená hodnota ideálneho 24 bitového prevodníka. Hodnota SNR ideálneho prevodníka je 146,24 dB.

$$SNR_I = 20 \log \frac{U_{VST}}{U_q} = 6,02n + 1,76 = 6,02 \cdot 24 + 1,76 = 146,24 \quad [\text{dB}]$$

Nameraná hodnota sa pohybuje v okolí hodnoty -138 dB, čo je dostačujúce.

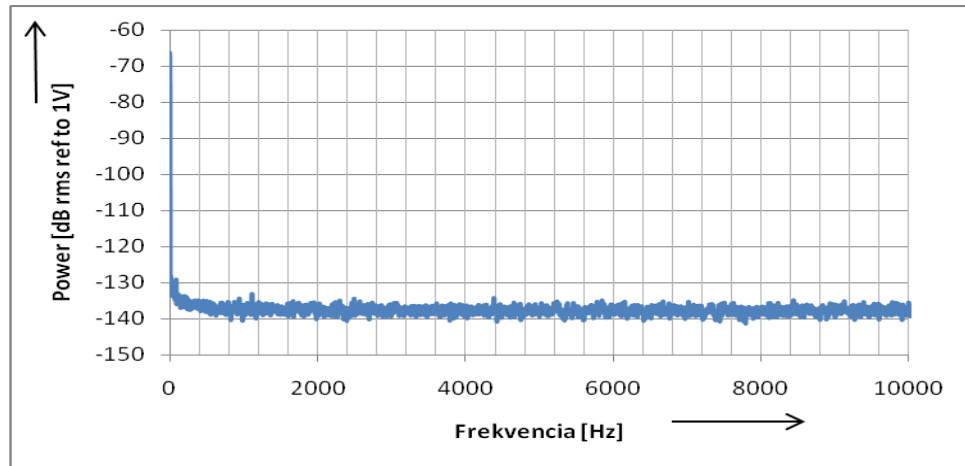
<b>Parametre merania:</b>	rozsah	<b><math>\pm 10V</math></b>
	priemerovanie	<b>RMS averaging (exponencial)</b>
	počet vzoriek	<b>10 000</b>
	frekvencia	<b>20 kHz</b>



Obrázok č. 3.2.1 NI-PXI 4462 [3]



Obrázok č. 3.2.2 Schéma zapojenia NI-PXI 4462



Obrázok č. 3.2.3 Hladina napät'ového šumu NI-PXI 4462

## 4. MERANIE MEMS AKCELEROMETROV V STATICKOM REŽIME

Všetky akcelerometre boli zmerané v statickom režime ,t.j. že veľkosť zrýchlenia je rovná 0. Aby bolo minimalizované interferenčné rušenie boli na napájanie použité tužkové batérie typu AA. Na vstup, medzi  $V_{DD}$  a COM, bol pri každom akcelerometri pripojený kondenzátor veľkosti 100nF. Ten slúži na zníženie interferenčného rušenia zo zdroja. V dôsledku toho, že pri meraní sa pohybuje hodnota v oblasti  $\mu V$  je potrebné potlačiť interferenčné rušenie čo najviac, preto bola pri meraniach použitá kartónová krabica potiahnutá alobalom. Z krabice do karty viedli tienené vodiče.

Vzorec použitý na prepočet hodnoty výkonu na  $U_{NOISE}$

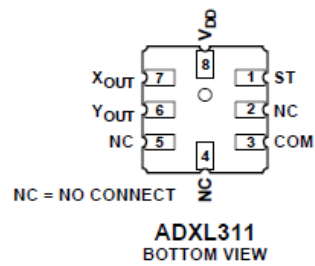
$$\begin{aligned} y &= \log_{10} x \\ x &= a^y \end{aligned} \quad (4.1)$$

Všetky snímače boli merané s FS nastaveným na  $\pm 10V$ , lebo pri niektorých snímačoch sa nedal použiť menší rozsah. Pre meranie je dôležité, aby samotný šum karty bol nižší ako šum snímačov. Pri meraniach jednotlivých MEMS akcelerometrov som použil rovnaké nastavenia v dôsledku porovnania jednotlivých šumov.

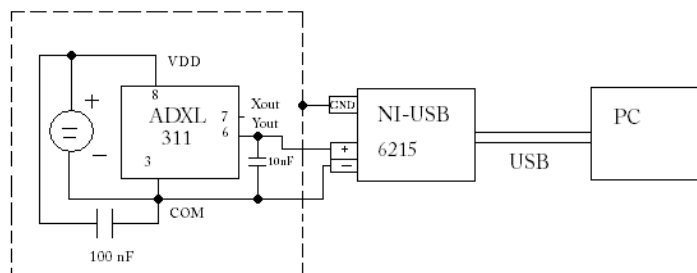
<b>Parametre meraní:</b>	rozsah	<b><math>\pm 10V</math></b>
	priemerovanie	<b>RMS averaging (exponencial)</b>
	počet vzoriek	<b>2 000</b>
	frekvencia	<b>10 kHz</b>
	$U_{NAP}$	<b>3,173V</b>
	Druh zapojenia	<b>diferenčné</b>

#### 4.1 ADXL 311

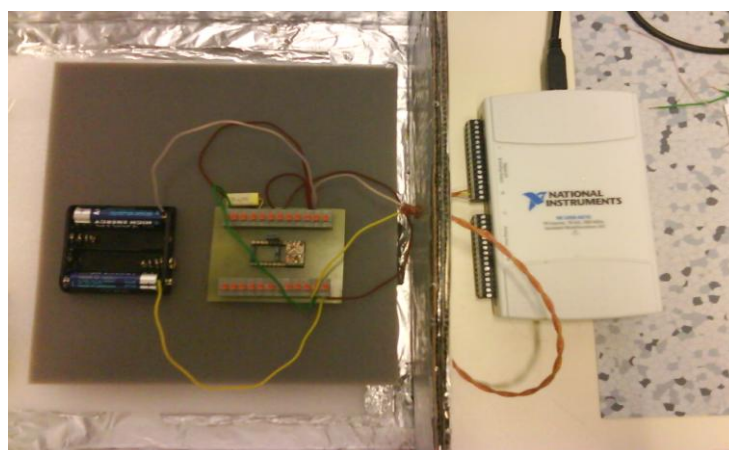
Akcelerometer od firmy Analog Devices. Bol meraný výstup  $X_{OUT}$ . Medzi výstup  $X_{OUT}$  a COM bol pripojený kondenzátor o veľkosti 10nF, ktorým bola nastavená šírka pásma snímača na 500Hz.



Obrázok č. 4.1.1 Konfigurácia pinov ADXL 311 [4]



Obrázok č. 4.1.2 Schéma zapojenia ADXL 311



Obrázok č. 4.1.3 Zapojenie ADXL 311

Tabuľkové hodnoty namerané pre  $V_{DD} = 3V$ ,  $25^{\circ}C$ , Merané pre  $V_{DD} = 3,173V$

Veličina	Min. hodnota	Typická hodnota	Max. hodnota	Namerané hodnoty
$V_{DD}$ [V]	-	2,4 to 5,25	5,25	3,173
Odoberaný prúd I [mA]	-	0,4	1	0,5
0 g Voltage $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [V]	1,2	1,5	1,8	1,58
Sensitivity at $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [mV/g]	-	174	-	-
Noise Density [ $\mu g/\sqrt{Hz}$ rms]	-	300	-	-

**Tabuľka č.1** Namerané a tabuľkové hodnoty ADXL 311 [4]

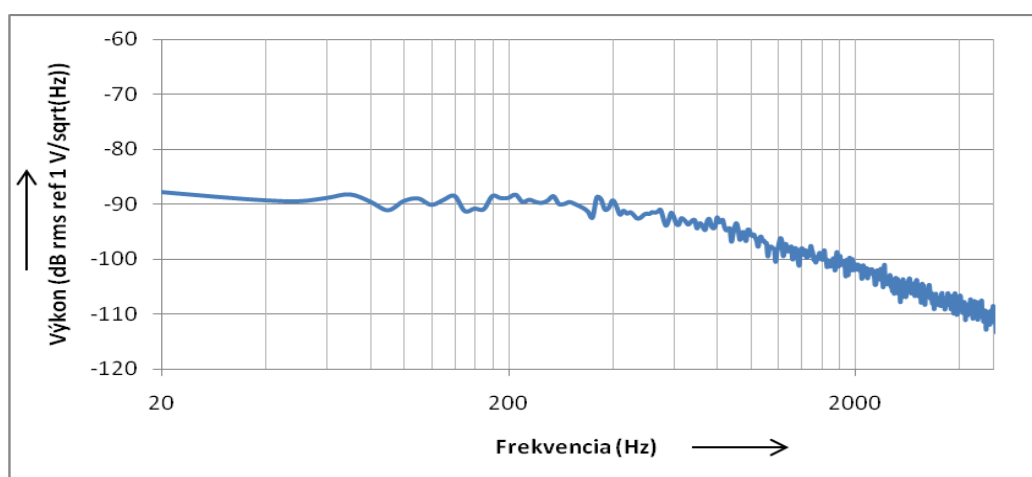
Prvé tri stĺpce v tabuľke sú hodnoty namerané výrobcom. Pomocou parametrov, z Tabuľky č.1, sensitivity a Noise Density bolo vypočítané akému napätiu zodpovedá hodnota  $300\mu g/\sqrt{Hz}$  Noise Density dosadením do vzorca (4.2).

$$U_{NOISE} = (300 \cdot 10^{-6} \cdot 174 \cdot 10^{-3}) / 1 = 52,2 \mu V / \sqrt{Hz} \quad (4.2)$$

$$y = \log_{10} x$$

$$x = 10^{-90dB/20} = 35,48 \mu V / \sqrt{Hz}$$

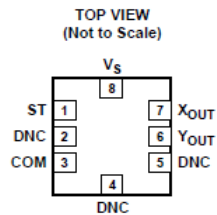
Z grafu je zrejmé, že pokles o 3dB nastáva v okolí 500Hz. Hodnota hladiny šumu bola spriemerovaná vo frekvenčnom pásme akcelerometra. Hodnota vyšla -90dB. Hodnota bola dosadená do vzorca (4.1), z ktorého sa vyjadrila napäťová hodnotu šumu, ktorá vyšla  $35,4\mu V/\sqrt{Hz}$ . Rozdiel s tabuľkovou hodnotou je  $16,8\mu V/\sqrt{Hz}$ .



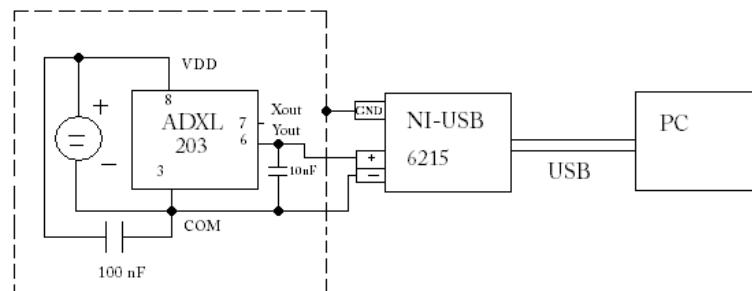
**Obrázok č. 4.1.4** Hladina šumu ADXL 311

## 4.2 ADXL 203

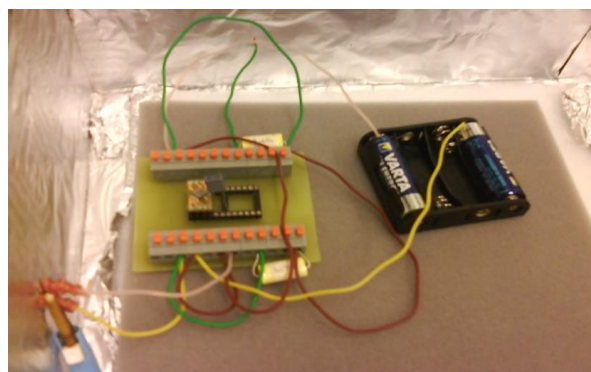
Ďalší akcelerometer od firmy Analog Devices. Medzi výstup  $X_{OUT}$  a COM bol pripojený kondenzátor o veľkosti 10nF, ktorým bola taktiež ako u predchádzajúceho akcelerometra nastavená šírka pásma na 500Hz.



Obrázok č. 4.2.1 Konfigurácia pinov ADXL 203 [5]



Obrázok č. 4.2.2 Schéma zapojenia ADXL 203



Obrázok č. 4.2.3 Zapojenie ADXL 203

Tabuľkové hodnoty namerané pre  $V_{DD} = 5V$ ,  $25^{\circ}C$ , Merané pre  $V_{DD} = 3,173V$

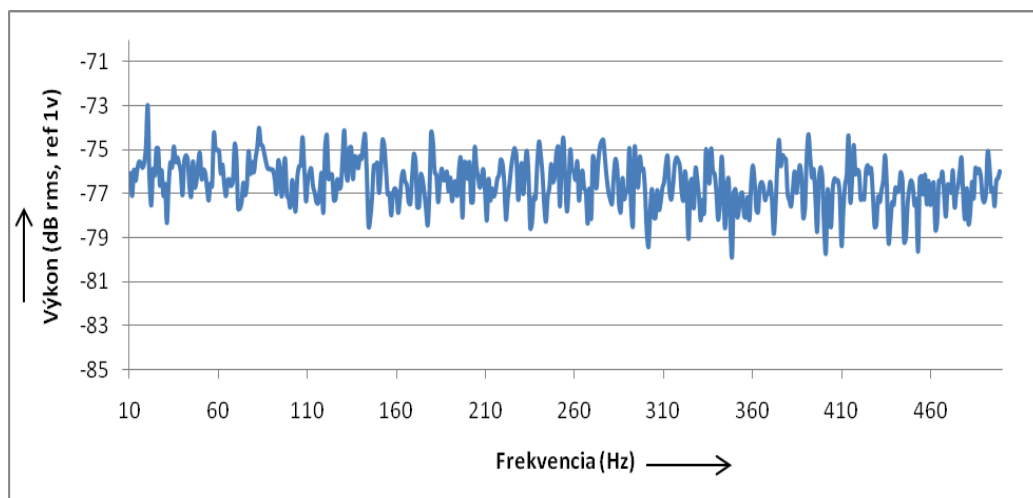
Veličina	Min. hodnota	Typická hodnota	Max. hodnota	Namerané hodnoty
$V_{DD}$ [V]	-	3 to 6	6	3,173
Odoberaný prúd I [mA]	-	0,7	1,1	0,72
0 g Voltage $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [V], DC zložka	2,4	2,5	2,6	1,577
Sensitivity at $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [mV/g]	940	1000	1060	-
Noise Density [ $\mu g/\sqrt{Hz}$ rms]	-	110	-	-
Pre hodnotu $V_{DD} = 3V$ je hodnota noise density rovná 190 [ $\mu g/\sqrt{Hz}$ rms] a sensitivita 560mV/g				

Tabuľka č.2 Namerané a tabuľkové hodnoty ADXL 203 [5]

Bol aplikovaný rovnaký postup výpočtu ako pri predošlom akcelerometri. Pomocou údajov výrobcu bol vyjadrený šum. Hodnota z grafu bola spriemerovaná a prepočítaná na príslušné jednotky.

$$U_{NOISE} = (190 \cdot 10^{-6} \cdot 560 \cdot 10^{-3}) / 1 = 106,4 \mu V / \sqrt{Hz}$$

Hodnota šumu je okolo  $139 \mu V/\sqrt{Hz}$ . Rozdiel s tabuľkovou hodnotou je  $32,6 \mu V/\sqrt{Hz}$ .



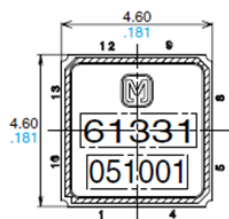
Obrázok č. 4.2.4 Hladina šumu ADXL 203

### 4.3 GS3 SENSOR 61231

Jedná sa o akcelometer od firmy Panasonic. Pomocou vzorca (4.3) bola vypočítaná šírka pásma. Jej hodnota vyšla 159,15 Hz.

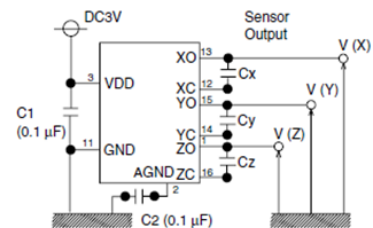
$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot (100k\Omega) \cdot C(X,Y,Z)} \quad [\text{Hz}] \quad (4.3)$$

kondenzátor  $C_X$  bol rovný 10nF t.j.  $f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot (100k\Omega) \cdot 9,86 \cdot 10^{-9}} = 159,15 \quad [\text{Hz}]$

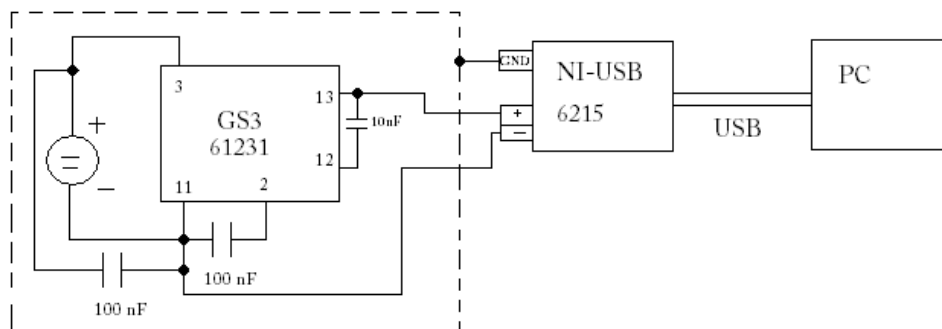


Terminal No.	Abbreviation	Terminal No.	Abbreviation
1	ZO	9	NC
2	AGND	10	NC
3	VDD	11	GND
4	NC	12	XC
5	NC	13	XO
6	NC	14	YC
7	GND	15	YO
8	NC	16	ZC

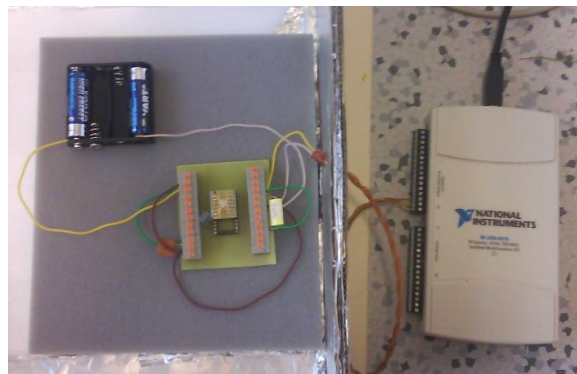
Leave terminal "NC (No. 4 to 6 and 8 to 10)"  
unconnected.  
The No. 7 and No. 11 terminals are connected  
internally.



Obrázok č. 4.3.1 Konfigurácia pinov GS3 61331, 61231 [6]



Obrázok č. 4.3.2 Schéma zapojenia GS3 61231



Obrázok č. 4.3.3 Zapojenie GS3 61231

Tabuľkové hodnoty namerané pre  $V_{DD}=3V$ ,  $25^{\circ}C$ , Merané pre  $V_{DD}=3,173V$

Veličina	Min. hodnota	Typická hodnota	Max. hodnota	Namerané hodnoty
$V_{DD}$ [V]	2,7	3	3,6	3,173
Odoberaný prúd I [mA]	-	1,7	2,5	1,725
0 g Voltage $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [V], DC zložka	1,41	1,5	1,59	1,534
Sensitivity at $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [V/g]	0,47	0,5	0,53	-
Noise Density [ $\mu V/\sqrt{Hz}$ rms]	-	-	-	53,58

Tabuľka č.3 Namerané a tabuľkové hodnoty GS3 61231 [6]

V prípade tohto snímača sa hodnota šumu musela určiť, keďže ju výrobca neudáva. Priemerná hodnota šumu ,ktorá bola nameraná v pásme 151 Hz bola -91,44 dB. Dosadením do vzorca (4.1) sa zistila hodnota šumu, ktorá bola po prepočte  $26,8 \mu V / \sqrt{Hz}$ . Pokles o 3 dB nastával pri hodnote -93,2 dB.

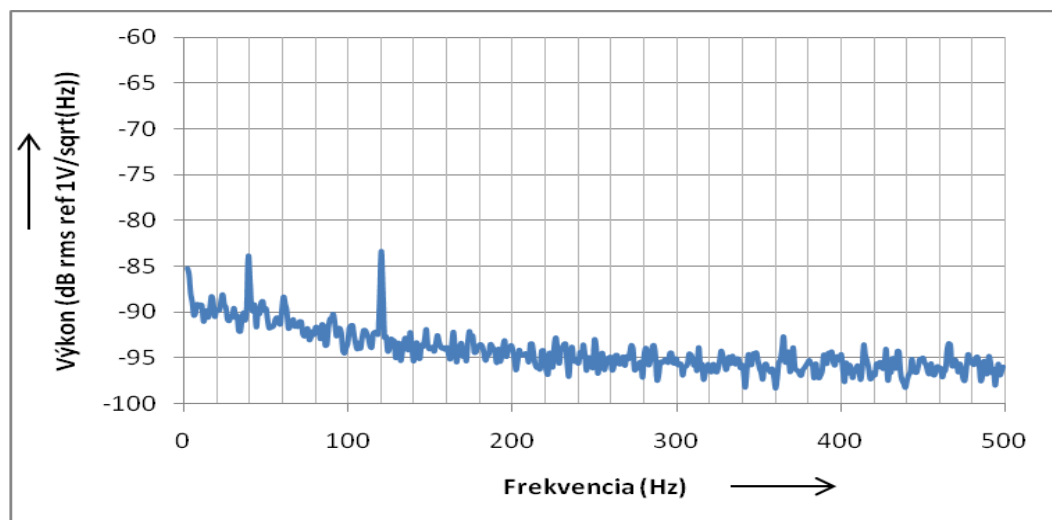
$$y = \log_{10} x$$

$$x = 10^{-91,44dB/20} = 26,8 \mu V / \sqrt{Hz}$$

Dosadením do vzorca (4.4) sa vypočítala hodnota ND.

$$ND = \frac{U_{NOISE}}{sensitivity} = \frac{26,8 \cdot 10^{-6}}{0,5} = 53,58 gV / \sqrt{Hz} \quad (4.4)$$

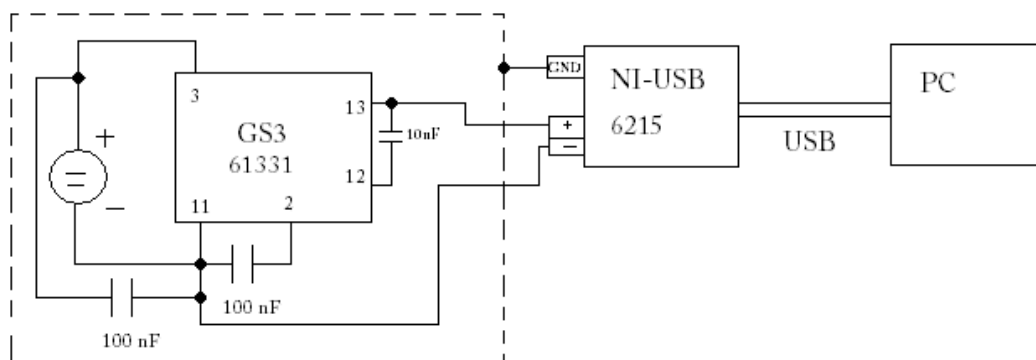
Z grafu je zrejmé, že pri hodnote 200 Hz dosiahol snímač hladinu šumu, tzv. noise floor. Pri hodnote 40 Hz a 120 Hz sa vyskytuje rezonancia.



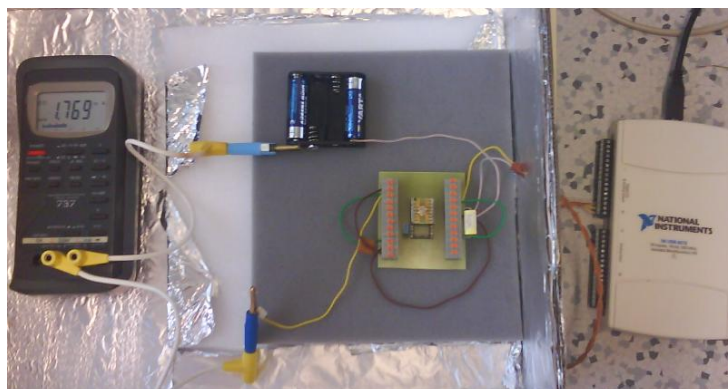
Obrázok č. 4.3.4 Hladina šumu GS3 61231

#### 4.4 GS3 SENSOR 61331

61331 je akcelerometer tej istej rady ako 31231. Šírka pásma je zhodná ako pri 61231, tak isto aj konfigurácia pinov je totožná. Tieto dva snímače sa líšia hlavne rozlíšením. 61231 má  $\pm 2g$  a 61331 má  $\pm 3g$ .



Obrázok č. 4.4.1 Schéma zapojenia GS3 61331



Obrázok č. 4.4.2 Zapojenie GS3 61331

Tabuľkové hodnoty namerané pre  $V_{DD} = 3V$ ,  $25^{\circ}C$ , Merané pre  $V_{DD} = 3,173V$

Veličina	Min. hodnota	Typická hodnota	Max. hodnota	Namerané hodnoty
$V_{DD}$ [V]	2,7	3	3,6	3,173
Odoberaný prúd I [mA]	-	1,7	2,5	1,769
0 g Voltage $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [V], DC zložka	1,44	1,5	1,56	1,62
Sensitivity at $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [V/g]	0,313	0,333	0,353	-
Noise Density [ $\mu g/\sqrt{Hz}$ rms]	-	-	-	57,55

Tabuľka č.4 Namerané a tabuľkové hodnoty GS3 61331 [6]

Takisto ako v predošlom prípade ani pri tomto snímači nie je daná hodnota ND. Priemerná hodnota šumu nameraná v pásme 151 Hz bola -94,35 dB.

Dosadením do vzorca (4.1) bola zistená hodnota šumu, ktorá bola po prepočte  $19,16 \mu V / \sqrt{Hz}$ . Pokles o 3 dB nastáva pri hodnote -95,4 dB.

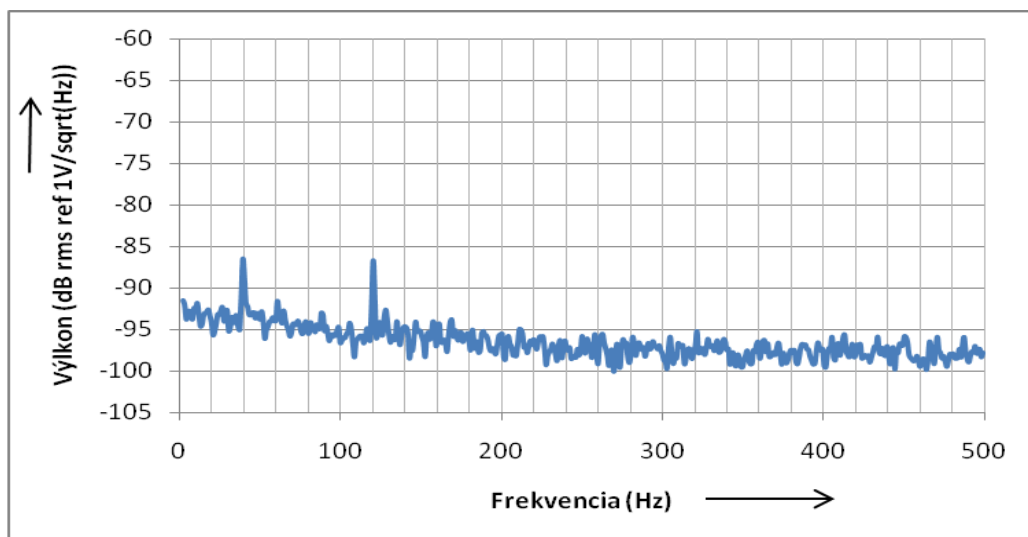
$$y = \log_{10} x$$

$$x = 10^{-94,35dB/20} = 19,16 \mu V / \sqrt{Hz}$$

Dosadením do vzorca (4.4) bola vypočítaná hodnota ND.

$$ND = \frac{U_{NOISE}}{sensitivity} = \frac{19,16 \cdot 10^{-6}}{0,333} = 57,55 \mu V / \sqrt{Hz}$$

Pri hodnote 40 Hz a 120 Hz sa vyskytovala rezonancia, čo je vidno na obrázku číslo 4.4.3.



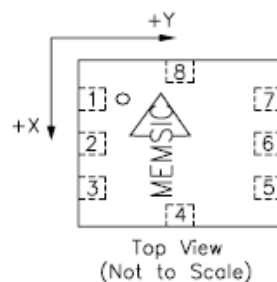
Obrázok č. 4.4.3 Hladina šumu GS3 61331

#### 4.5 MEMSIC A6500M

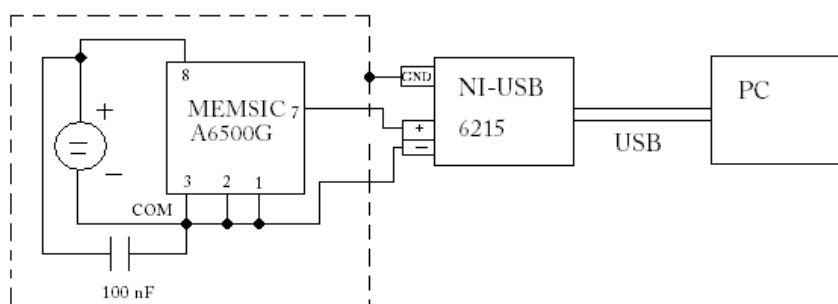
Pri meraní A6500M nebol použitý kondenzátor na nastavenie šírky pásma. Snímač obsahuje PD pin, ktorý slúži na aktivovanie režimu pre malý odber prúdu, okolo  $0,1 \mu A$  pri 3V. Pri meraní by mal byť pin pripojený na pin COM. Pokles o 3 dB nastal pri hodnote okolo 27 Hz, ako vidno v grafe č.6. Výrobca udáva, že pokles nastane pri hodnote okolo 20 Hz.

Pin Description: LCC-8 Package

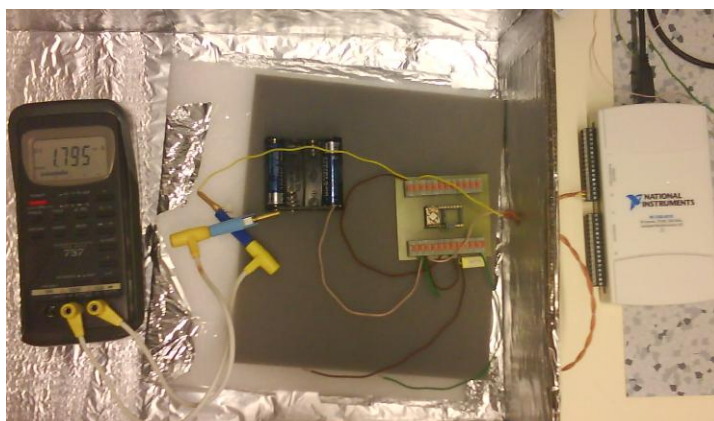
Pin	Name	Description	I/O
1	PD	Power Down Control	I
2	TP	Connect to ground	I
3	COM	Common	I
4	NC	Do Not Connect	NC
5	NC	Do Not Connect	NC
6	Yout	Y Channel Output	O
7	Xout	X Channel Output	O
8	V <sub>DD</sub>	2.7V to 3.6V	I



Obrázok č. 4.5.1 Konfigurácia pinov A6500M [7]



Obrázok č. 4.5.2 Schéma zapojenia A6500



Obrázok č. 4.5.3 Zapojenie A6500M

Tabuľkové hodnoty namerané pre  $V_{DD} = 3V$ ,  $25^{\circ}C$ , Merané pre  $V_{DD} = 3,173V$

Veličina	Min. hodnota	Typická hodnota	Max. hodnota	Namerané hodnoty
$V_{DD}$ [V]	2,7	-	3,6	3,173
Odoberaný prúd I [mA]	-	2	-	1,793
0 g Voltage $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [V], DC zložka	1,2	1,25	1,3	1,257
Sensitivity at $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [mV/g]	475	500	525	-
Noise Density [mg/√Hz rms]	-	0,4	1	-

Tabuľka č.5 Namerané a tabuľkové hodnoty MEMSIC A6500M [7]

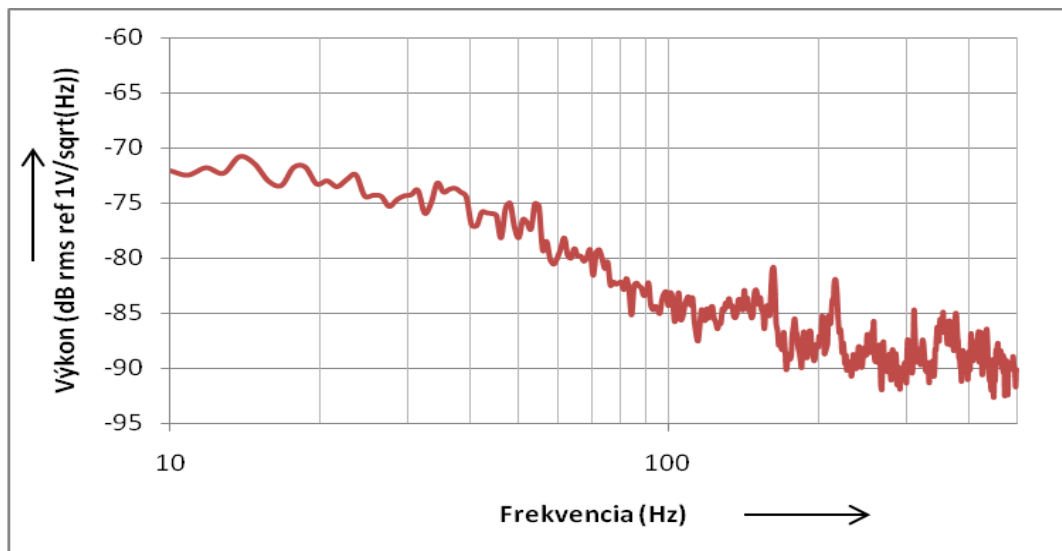
Hodnota sensitivity a ND bola dosadená do vzorca (4.2) a z nej určená hodnotu šumu vyjadrená napätím.

$$U_{NOISE} = (4 \cdot 10^{-4} \cdot 500 \cdot 10^{-3}) / 1 = 200 \mu V / \sqrt{Hz}$$

Dosadením do vzorca (4.1) bola zistená hodnota šumu, ktorá bola po prepočte  $243 \mu V / \sqrt{Hz}$ . Pokles o 3 dB nastáva pri hodnote -75 dB.

$$y = \log_{10} x$$

$$x = 10^{-72,3dB/20} = 243 \mu V / \sqrt{Hz}$$

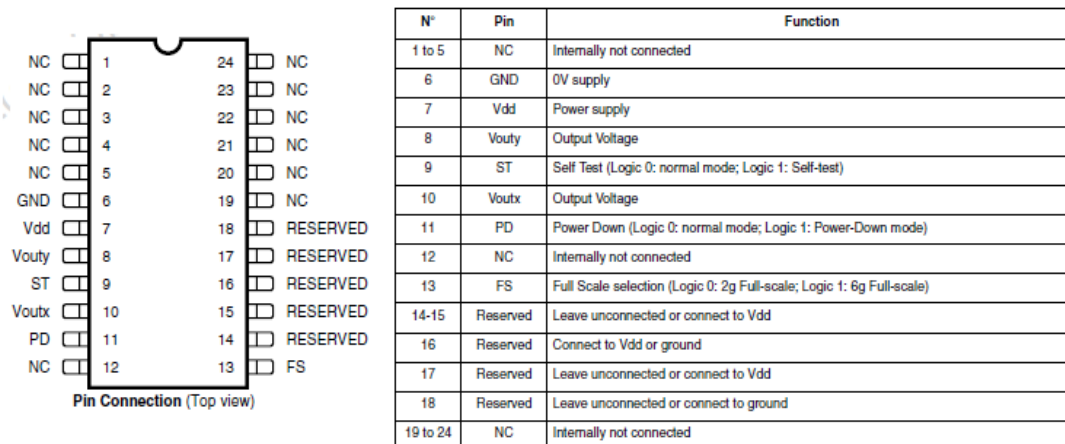


Obrázok č. 4.5.4 Hladina šumu A6500M

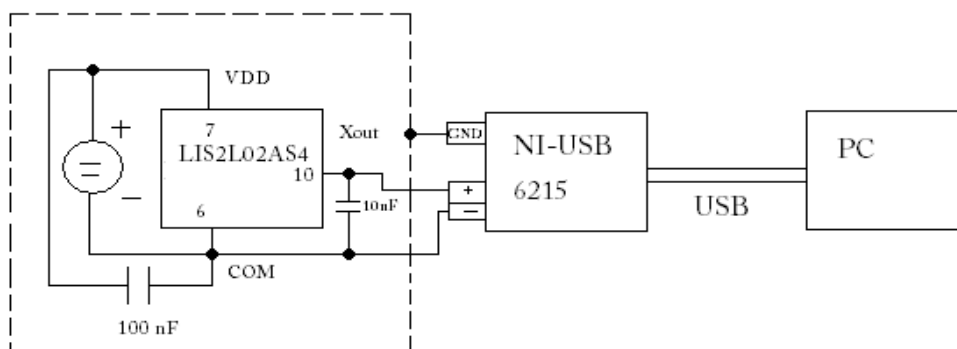
#### 4.6 STMICROELECTRONICS LIS2L02AS4

Ako pri snímači A6500M aj tento snímač obsahoval pin PD, ktorý by sa mal pripojiť na pin COM. Šírka pásma bola určená dosadením do vzorca (4.2), nominálna hodnota odporu bola  $110k\Omega$ .

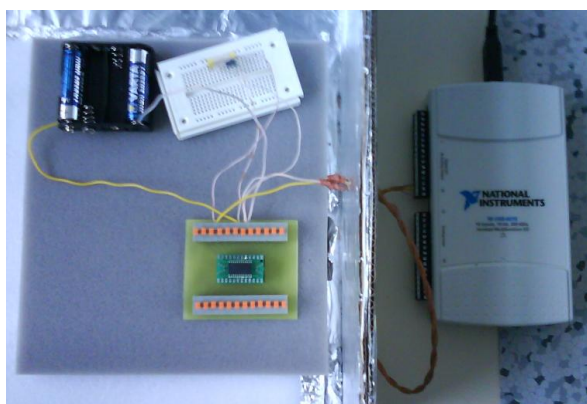
$$f_{-3dB} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (110k\Omega) \cdot 10nF} = 144,68Hz$$



Obrázok č. 4.6.1 Konfigurácia pinov LIS2L02AS4 [8]



Obrázok č. 4.6.2 Schéma zapojenia LIS2L02AS4



Obrázok č. 4.6.3 Zapojenie LIS2L02AS4

Tabuľkové hodnoty namerané pre  $V_{DD} = 3,3V$ ,  $25^{\circ}C$ , Merané pre  $V_{DD} = 3,173V$

Veličina	Min. hodnota	Typická hodnota	Max. hodnota	Namerané hodnoty
$V_{DD}$ [V]	2,4	3,3	5,25	3,173
Odoberaný prúd I [mA]	-	0,85	1,5	0,885
0 g Voltage $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [V], DC zložka	-	-	-	1,61
Sensitivity at $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [mV/g]	571,14	634,6	698,06	-
Noise Density [ $\mu g/\sqrt{Hz}$ rms]	-	30	-	-

Tabuľka č.6 Namerané a tabuľkové hodnoty LIS2L02AS4 [8]

Pri frekvencii 36900 Hz sa objavila rezonancia. Hodnota sensitivity a ND bola dosadená do vzorca (4.2) a z nej určená hodnota šumu vyjadrená napätím.

$$U_{NOISE} = (30 \cdot 10^{-6} \cdot 634,6 \cdot 10^{-3}) / 1 = 19 \mu V / \sqrt{Hz}$$

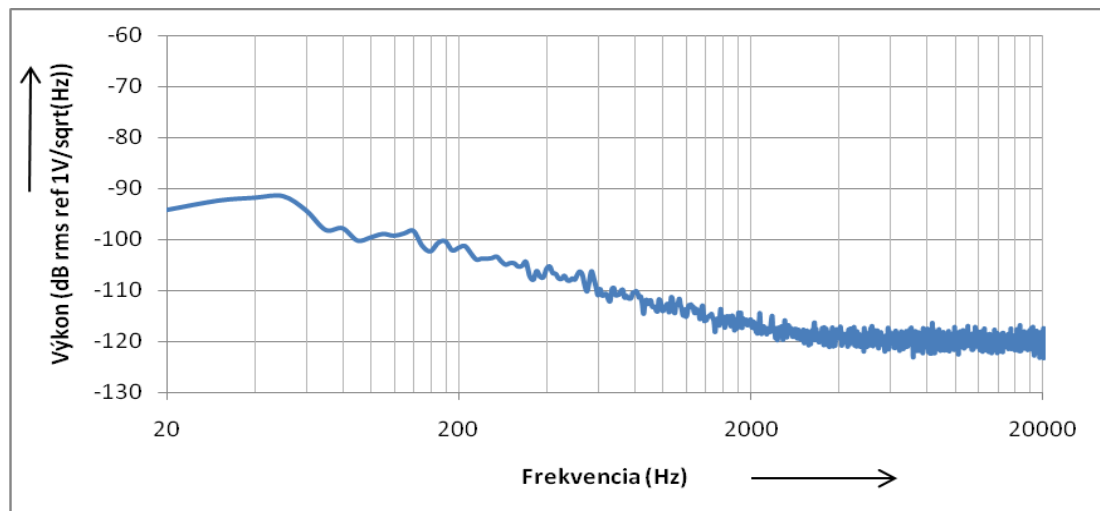
Dosadením do vzorca (4.1) bola zistená hodnota šumu, ktorá bola po prepočte v rozsahu  $19 \mu V / \sqrt{Hz}$  až  $26,9 \mu V / \sqrt{Hz}$ .

$$y = \log_{10} x$$

$$x = 10^{-94dB/20} = 19,95 \mu V / \sqrt{Hz}$$

$$y = \log_{10} x$$

$$x = 10^{-91,4dB/20} = 26,9 \mu V / \sqrt{Hz}$$



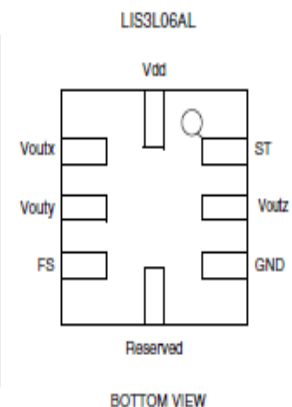
Obrázok č. 4.6.4 Hladina šumu LIS2L02AS4

#### 4.7 ST MICROELECTRONICS LIS3L06AL

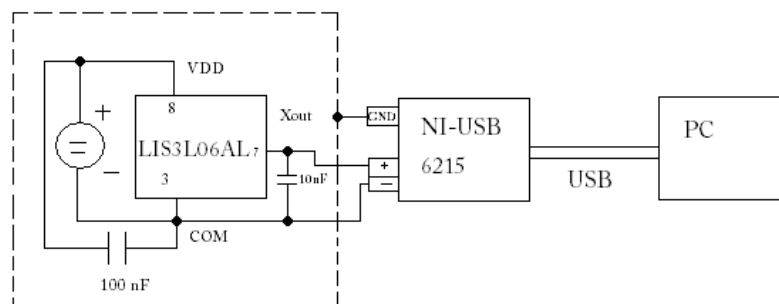
Na pine FS som nastavil logickú nulu, takže snímač bol nastavený na rozsah 2g, čomu zodpovedajú prepočty sensitivity a ND. Šírka pásma bola vypočítaná pomocou vzorca (4.2).

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot (110k\Omega) \cdot 10nF} = 144,68Hz$$

Pin #	Pin Name	Function
1	ST	Self Test (Logic 0: normal mode; Logic 1: Self-test)
2	Voutz	Output Voltage Z channel
3	GND	0V supply
4	Reserved	Leave unconnected
5	FS	Full Scale (Logic 0:2g Full scale; Logic1: 6g Full Scale)
6	Vouty	Output Voltage Y channel
7	Voutx	Output Voltage X channel
8	Vdd	Power supply



Obrázok č. 4.7.1 Konfigurácia pinov LIS3L06AL [9]



Obrázok č. 4.7.2 Schéma zapojenia LIS3L06AL

Tabuľkové hodnoty namerané pre  $V_{DD} = 3,3V$ ,  $25^{\circ}C$ , Merané pre  $V_{DD} = 3,173V$

Veličina	Min. hodnota	Typická hodnota	Max. hodnota	Namerané hodnoty
$V_{DD}$ [V]	2,4	3,3	3,6	3,173
Odoberaný prúd I[mA]	-	0,95	1,5	1,197
0 g Voltage $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [V], DC zložka	-	-	-	1,598
Sensitivity at $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [mV/g]	571,14	634,6	698,06	-
Noise Density [ $\mu g/VHz$ rms]	-	50	-	-

Tabuľka č.7 Namerané a tabuľkové hodnoty LIS3L06AL [9]

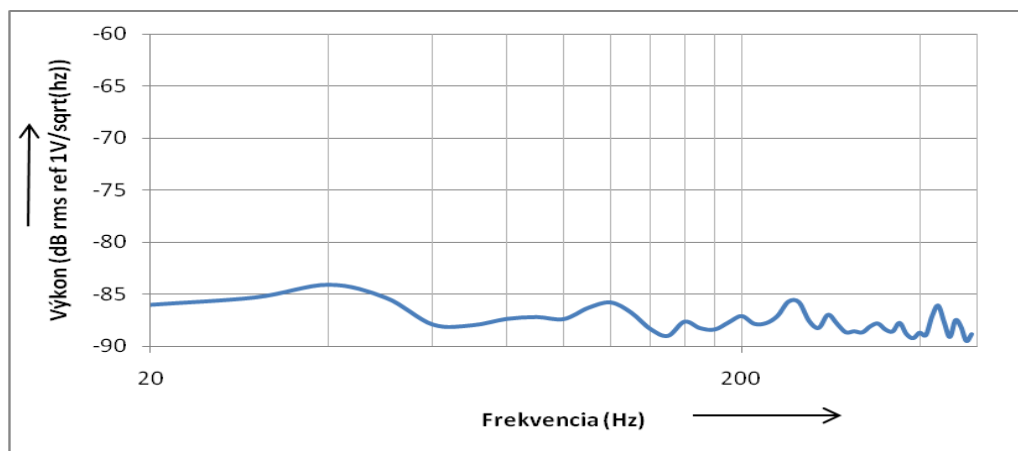
Šumové napätie bolo vypočítané pomocou vzorca (4.2).

$$U_{NOISE} = (50 \cdot 10^{-6} \cdot 634,6 \cdot 10^{-3}) / 1 = 31,73 \mu V / \sqrt{Hz}$$

Priemerná hodnota hladiny šumu bola -86,9dB. Dosadením do vzorca (4.1) bola zistená hodnota šumu, ktorá bola po prepočte  $45,19 \mu V / \sqrt{Hz}$ .

$$y = \log_{10} x$$

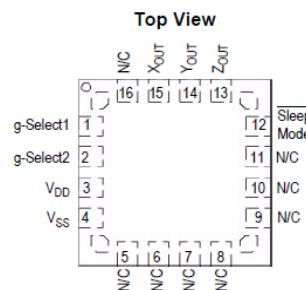
$$x = 10^{-86,9dB/20} = 45,19 \mu V / \sqrt{Hz}$$



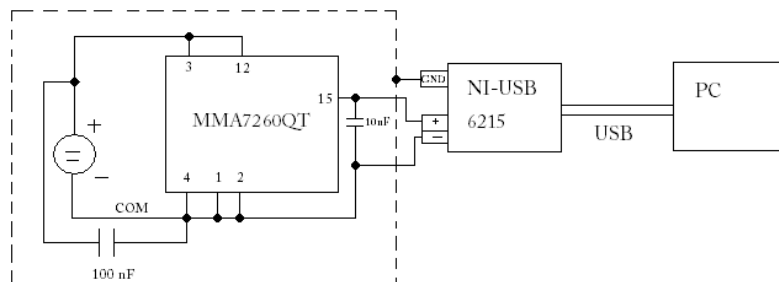
Obrázok č. 4.7.3 Hladina šumu LIS3L06AL

#### 4.8 FREESCALE SEMICONDUCTOR MMA7260QT

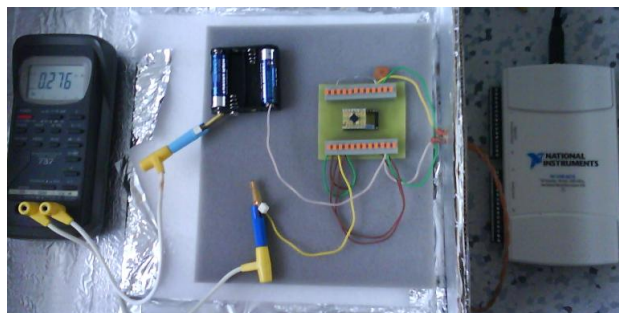
Pri tomto snímači si treba dať pozor na pin Sleep Mode, ktorý pokiaľ nie je pripojený je nastavený na úsporný režim. Pre aktiváciu ho treba pripojiť na napájacie napätie. Pomocou g Select1 a g Select2 sa nastaví rozsah g. Pri meraní bol pripojený na pin COM, čím sa rozsah g nastavil na 1,5g a sensitivita bola nastavená na 800mV/g. Pre odstránenie šumu hodín bol použitý kondenzátor 100nF a rezistor 110 k $\Omega$ , ktoré boli pripojené ako RC filter na výstup X<sub>OUT</sub>.



Obrázok č. 4.8.1 Konfigurácia pinov MMA7260QT [10]



Obrázok č. 4.8.2 Schéma zapojenia MMA7260QT



Obrázok č. 4.8.3 Zapojenie MMA7260QT

Šumové napätie bolo vypočítané pomocou vzorca (4.2).

$$U_{NOISE} = (350 \cdot 10^{-6} \cdot 800 \cdot 10^{-3}) / 1 = 280 \mu V / \sqrt{Hz}$$

Pokles o 3dB je pri hodnote okolo 350 Hz, tak ako udáva výrobca. Priemerná hodnota hladiny šumu bola -72,83dB. Dosadením do vzorca (4.1) bola zistená hodnota šumu, ktorá bola po prepočte  $228,3 \mu V / \sqrt{Hz}$ .

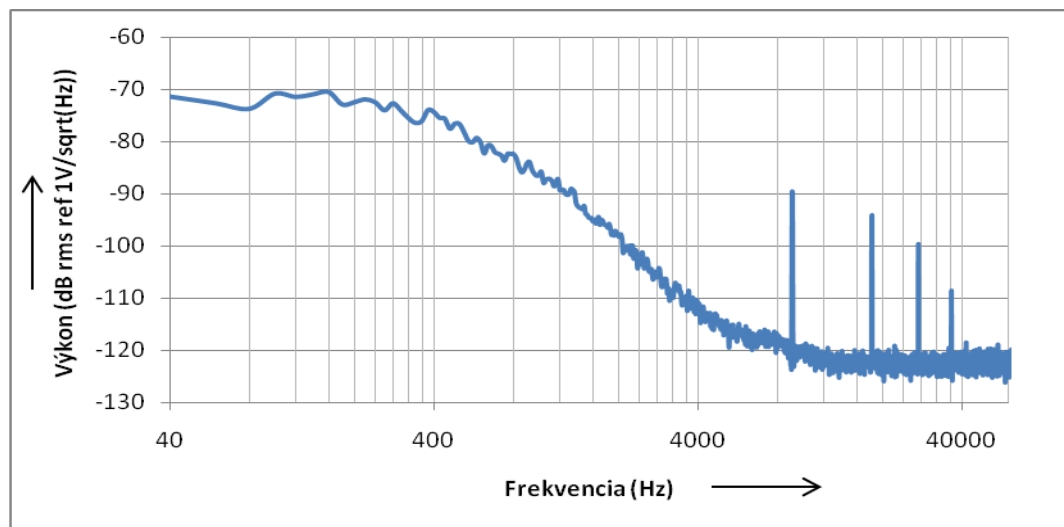
$$y = \log_{10} x$$

$$x = 10^{-72,83dB/20} = 228,3 \mu V / \sqrt{Hz}$$

Tabuľkové hodnoty namerané pre  $V_{DD} = 3,3V$ ,  $25^{\circ}C$ , Merané pre  $V_{DD} = 3,173V$

Veličina	Min. hodnota	Typická hodnota	Max. hodnota	Namerané hodnoty
$V_{DD}$ [V]	2,2	3,3	3,6	3,173
Odoberaný prúd I [mA]	-	0,5	0,8	0,641
0 g Voltage $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [V], DC zložka	-	-	-	1,65
Sensitivity at $X_{FILT}$ , $Y_{FILT}$ [mV/g]	740	800	860	-
Noise Density [ $\mu g/\sqrt{Hz}$ rms]	-	350	-	-

Tabuľka č.8 Namerané a tabuľkové hodnoty MMA7260QT [10]



Obrázok č. 4.8.4 Hladina šumu A7260QT

#### 4.9 POROVNANIE HODNÔT ŠUMU AKCELEROMETROV

Výrobca	Názov akcelerometra	Šírka pásma (Hz)	Tab. hod. šumu ( $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ )	Nam. hod. šumu ( $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
Analog Devices	ADXL 203	500	106,4	139
Analog Devices	ADXL 311	500	52,2	33,34
Panasonic	GS3 61331	159,15		19,16
Panasonic	GS3 61231	159,15		26,8
STMicroelectronics	LIS2L02AS4	144,68	19	26,9
STMicroelectronics	LIS3L06AL	144,68	31,73	45,19
Memsic	A6500M	20	200	243
Freescale	MMA7260QT	350	280	223

Tabuľka č.9 Porovnanie nameraných hodnôt akcelerometrov v  $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$

Výrobca	Názov akcelerometra	Šírka pásma (Hz)	Použitý princíp akcelerometra	Tab. hod. šumu ( $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ )	Nam. hod. šumu ( $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ )
Analog Devices	ADXL 203	500	Kapacitný	190	248
Analog Devices	ADXL 311	500	Kapacitný	300	204
Panasonic	GS3 61331	159,15	Piezo rezistívny		57,55
Panasonic	GS3 61231	159,15	Piezo rezistívny		53,58
STMicroelectronics	LIS2L02AS4	144,68		30	36,16
STMicroelectronics	LIS3L06AL	144,68		50	71,21
Memsic	A6500M	20	Tepelný	400	486
Freescale	MMA7260QT	350	Kapacitný	350	285

Tabuľka č.10 Porovnanie nameraných hodnôt akcelerometrov v  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$

## 5. MERANIE MEMS AKCELEROMETROV V DYNAMICKOM REŽIME

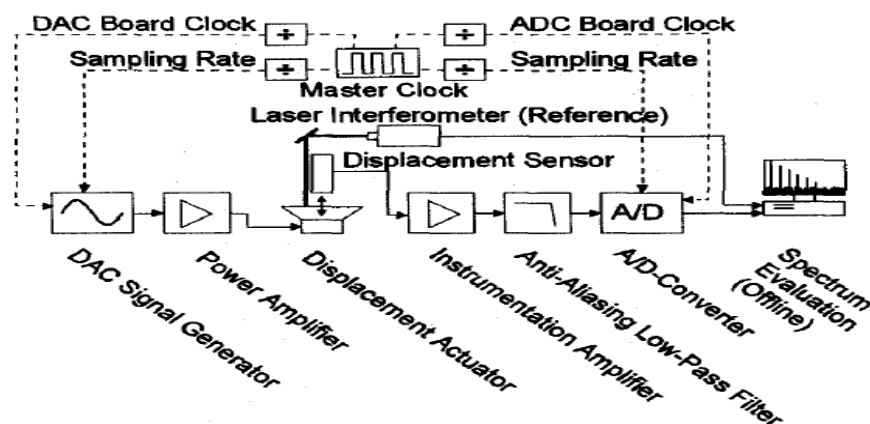
### 5.1 POPIS METÓD MERANIA

Meranie v dynamickom režime bolo realizované po naštudovaní dohľadanej literatúry. Boli nájdené dve metódy. Prvá bola z nemeckej univerzity v Mníchove od pána Arvida Breitenbacha a druhá pochádzala zo spolupráce Washingtonskej Univerzity a Multimediálnej Univerzity v Cyberjaya v Malaysii. Spoluprácou týchto dvoch univerzít už vzniklo niekoľko článkov o MEMS akcelerometroch.

#### 5.1.1 Prvá metóda dynamického merania [11]

Na vybudenie snímača bol použitý reproduktor. Pomocou lasera snímal reproduktor, ktorého hodnotu potom bral ako referenčnú. Z generátora bol reproduktor budený sínusovým signálom. Signál zo snímača bol vedený do nízkošumového zosilňovača a ďalej do dolno-frekvenčného AAF a nakoniec do A/D prevodníka. Na vyhodnocovanie bol použitý spektrálny analyzátor.

Tento merací reťazec je určený pre meranie vo frekvenčnom pásme od 100 mHz do 100 Hz a pre amplitúdu výchylky do 5 mm.

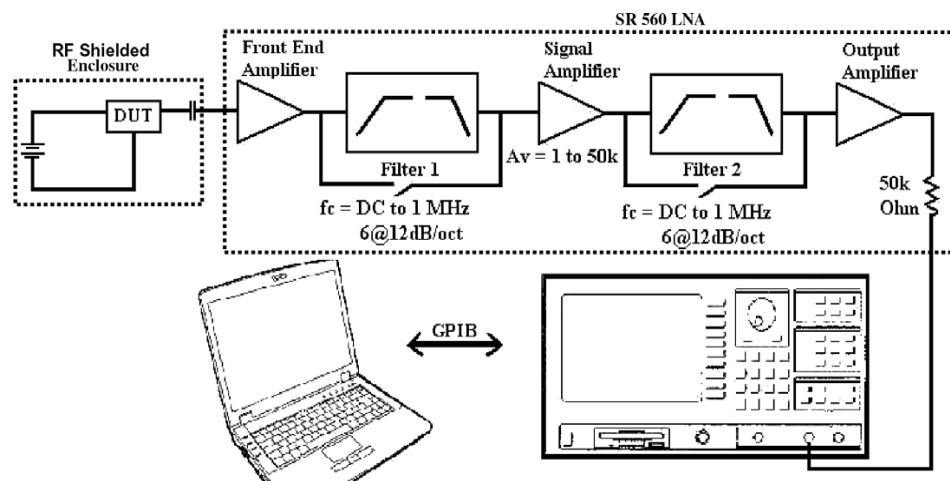


Obrázok č. 5.1.1 Metóda merania šumu akcelerometrov Breitenbach

### 5.1.2 Druhá metóda dynamického merania [14]

Táto metóda bola určená pre meranie komerčných mikro-akcelerometrov. Snímač bol uzavretý v medenej krabíčke, ktorá bola upevnená na držiakoch. Vo vnútri sa nachádzal aj piezo disk, ktorým budili akcelerometer. Na krabíčke bolo ďalej pripevnené výhrevné teliesko, ktoré dosahovalo teplotu do 120°C. Touto metódou merali statický šum, každej osi pomocou zmeny umiestnenia v držiaku, dynamický šum a teplotnú závislosť výstupu akcelerometra. Merací rozsah bol od DC do 100kHz. Reťazec pozostával z DUT, väzobného kondenzátora, medenej krabice, LNA, spektrálneho analyzátora a počítača, ktorý slúžil na spracovanie údajov.

Pre napájanie boli použité tužkové batérie umiestnené v osobitnom odtienenom krytí. Ako spektrálny analyzátor použili Hewlet Packard 35665A a ako LNA Stanford Research SR560 so zosilnením 10-50000. Šírka pásma zosilňovača od DC do 1MHz. Analyzátor má rozsah od DC do 100kHz a hladinu šumu na -110dBm. Pre spracovanie údajov bol použitý program Matlab.



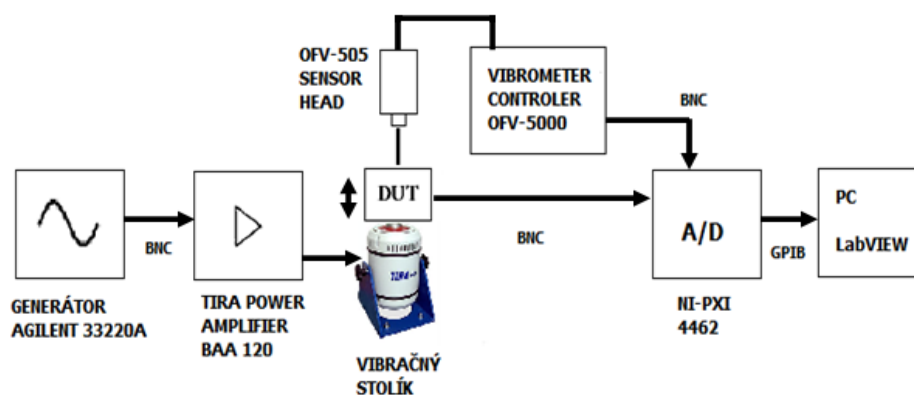
Obrázok č. 5.1.2 Metóda merania šumu akcelerometrov F.Mohd-Yasin

## 5.2 POUŽITÁ METÓDA MERANIA DYNAMICKÉHO REŽIMU

Tento merací reťazec pozostával z generátora Agilent 33220A, ďalej bol zapojený zosilňovač od firmy TIRA typ BAA 120, vibračný stolík, ktorý bol taktiež od firmy TIRA. Vibračný stolík bol budený sínusovým signálom. Veľkosť budenia sa prispôbovala tak, aby bol výstupný signál z akcelerometra v 2/3 rozsahu.

Na vibračný stolík bol pripevnený akcelerometer pomocou prípravku. Počas meraní boli použité dva druhy prípravku, ktoré sú zobrazené v prílohe-2. Na snímač bola namierená hlava laser interferometra OFV-505, ktorý bol ovládaný pomocou vibrometer kontroléra OFV-5000. Bol použitý modul VD-06. Výstupný parameter z vibrometer kontroléra bola rýchlosť. Tento výstup bol pomocou BNC kábla pripojený ku karte NI-PXI 4462. Výstup z DUT bol taktiež vedený do karty NI-PXI 4462. Výstupom z akcelerometra bolo zrýchlenie. Pomocou GPIB bola prepojená karta a PC. V PC bol na vyhodnotenie hodnôt použitý program od firmy NI LabVIEW.

Aby sa mohli hodnoty porovnávať bolo potrebné previesť rýchlosť na zrýchlenie alebo naopak. Bol zvolený prevod zo zrýchlenia na rýchlosť, lebo pri tomto prepočte dochádza k menšej chybe. V LabVIEW v Signal Expresse bol toolkit Sound and Vibration, ktorý ma priamo prevod zo zrýchlenia na rýchlosť. Pri prevodoch bolo potrebné si dať pozor na správne nastavené citlivosti, aby sa porovnávali rovnaké hodnoty. Priamo v Signal Expresse sa uskutočňoval výpočet hodnôt SNR a SINAD zo spektra. Akcelerometre boli premerané vo frekvenčnom rozsahu od 80 Hz do 300 Hz. Frekvenčný rozsah snímačov končil v okolí 150 Hz.



Obrázok č. 5.2.1 Schéma zapojenia dynamického režimu

### 5.3 GS3 SENSOR 61231 DYNAMICKÝ REŽIM

Pri meraní bol použitý prípravok č.1. Tento akcelerometer ma rozlíšenie na  $\pm 2g$ . Citlivosť má  $0,5V/g$ , preto bolo udržované výstupné napätie na  $\pm 800mV$ , čo sú  $2/3$  rozsahu.

Nastavené parametre merania	
$U_{NAP}$ akcelerometer [V]	3,337
$Z_{OUT}$ [mV]= udržovať konštantné	$\pm 800$
LabVIEW Signal Express 3.0	
rozsah	$\pm 10V$
druh zapojenia	diferenčné
režim merania	continuous samples
počet vzoriek	5000
frekvencia [Hz]	2000
priemerovanie	rms averaging
počet priemerovaní	20
weighthing mode	linear
Polytec vibrometer controller OFV-5000	
výstup	rýchlosť
dekodér	VD-06
citlivosť	10mm/s/V
max frekvencia [kHz]	350
dolno-pásmový filter [kHz]	20
horno-pásmový filter [kHz]	off

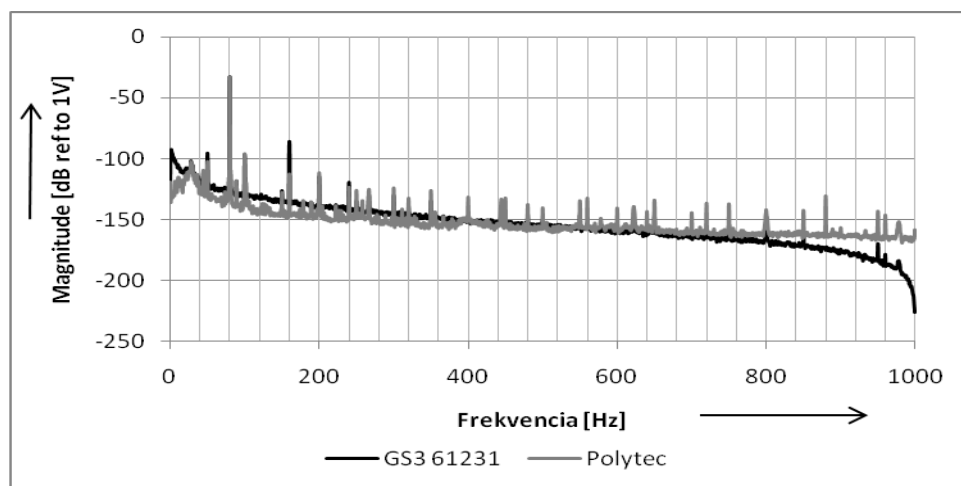
Tabuľka č.11 Nastavené parametre pri meraní dynamického režimu 61231

Pomocou vzorca (4.3) bola vypočítaná šírku pásma.

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot (100k\Omega) \cdot C(X,Y,Z)} \quad [\text{Hz}] \quad (4.3)$$

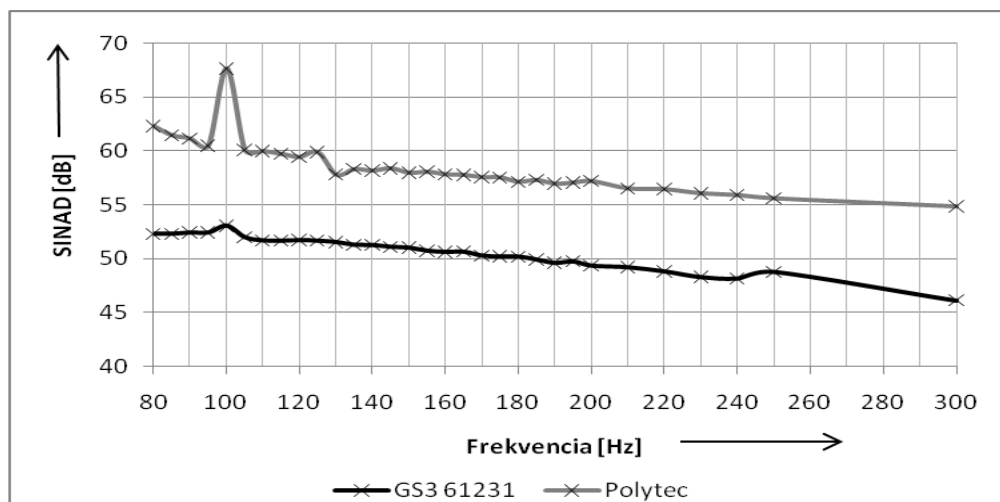
kondenzátor  $C_X$  bol rovný 10nF t.j.  $f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot (100k\Omega) \cdot 9,86 \cdot 10^{-9}} = 159,15 \quad [\text{Hz}]$

Na obrázku č.5.1.1 je zobrazené spektrum akcelerometra GS3 61231 a Polytec. Spektrum je merané pri hodnote frekvencie 80 Hz.



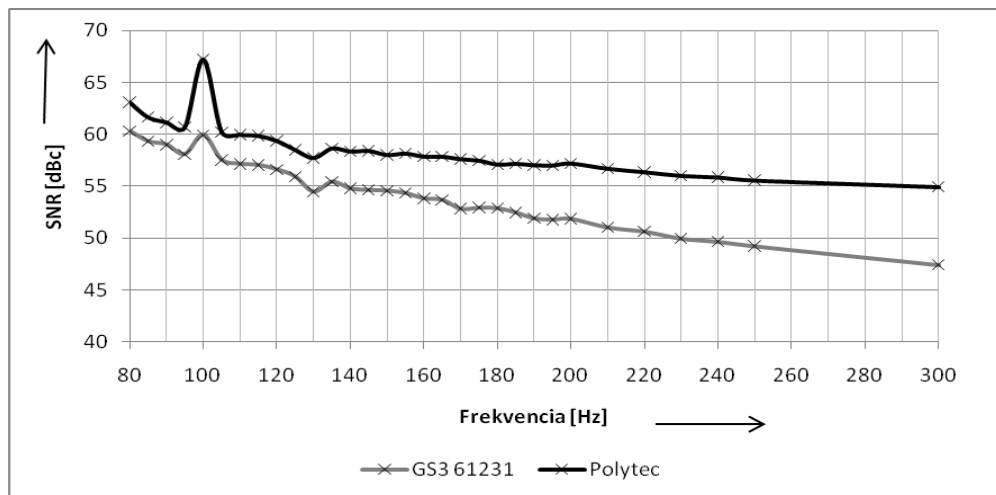
Obrázok č. 5.1.1 Spektrum 61231 a Polytec pre 80 Hz

Aj napriek tomu, že rozsah akcelerometra je 159 Hz boli parametre šumu namerané do 300 Hz. Pri 100 Hz vyskočila harmonická. Medzi referenčnou hodnotou lasera a medzi akcelerometrom sa udržoval konštantný odstup okolo 8dB.



Obrázok č. 5.1.2 SINAD GS3 61231 a Polytec

Hodnota SNR a SINAD referenčnej hodnoty bola skoro totožná. Hodnota SINADu vyšla horšie ako hodnota SNR. Pri frekvencii vyššej ako 160 Hz bolo problematické udržovať výstupné napätie na rovnakej hodnote, preto tieto hodnoty sú len informačné.



Obrázok č. 5.1.3 SNR GS3 61231 a Polytec

#### 5.4 GS3 SENSOR 61331 DYNAMICKÝ REŽIM

Bol použitý prípravok na upevnenie MEMS č.1. Tento akcelerometer ma rozlíšenie na  $\pm 3g$ . Citlivosť má  $0,33V/g$ , preto bolo na výstupe udržované napätie na  $\pm 800mV$ , čo je zhruba v  $2/3$  rozsahu.

Pomocou vzorca (4.3) bola vypočítaná šírka pásma.

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot (100k\Omega) \cdot C(X,Y,Z)} \quad [Hz] \quad (4.3)$$

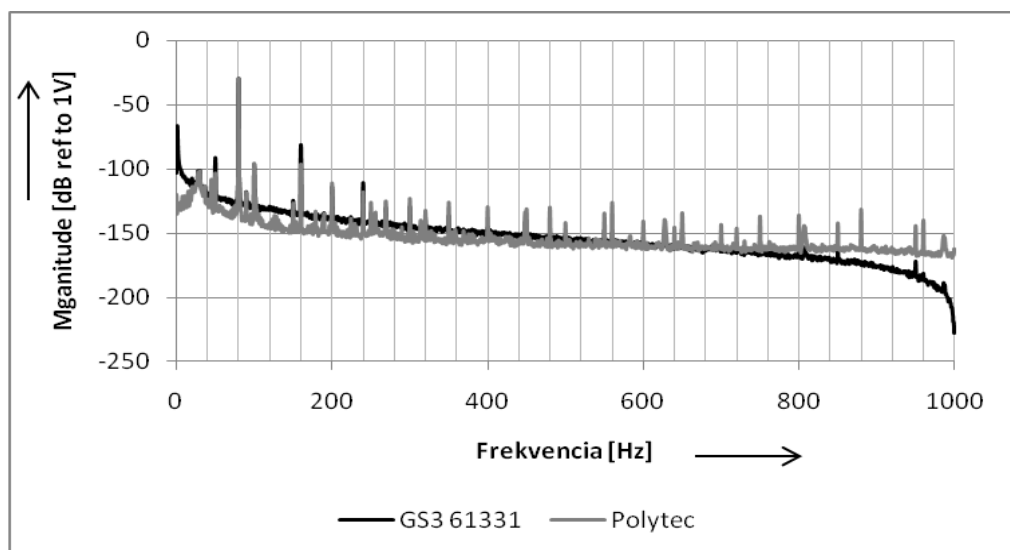
kondenzátor  $C_X$  bol rovný  $10nF$  t.j.  $f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi \cdot (100k\Omega) \cdot 9,86 \cdot 10^{-9}} = 159,15 \quad [Hz]$

Šírka pásma je rovnaká ako pri akcelerometri 61231.

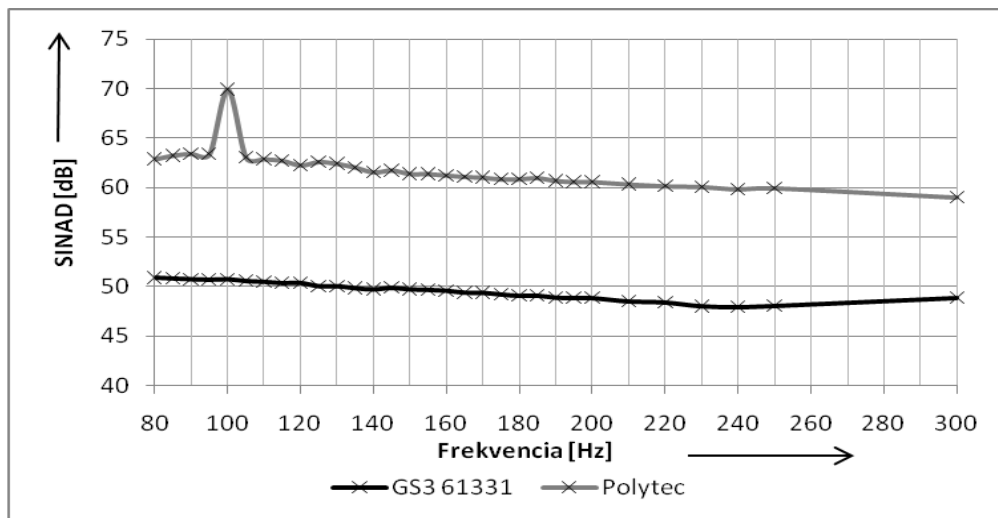
Nastavené parametre merania	
$U_{NAP}$ akcelerometer [V]	3,337
$Z_{OUT}$ [mV]= konštantné	$\pm 800$
LabVIEW Signal Express 3.0	
rozsah	$\pm 10V$
druh zapojenia	diferenčné
režim merania	continuous samples
počet vzoriek	5000
frekvencia [Hz]	2000
priemerovanie	rms averaging
počet priemerovaní	20
weighthing mode	linear
Polytec vibrometer controller OFV-5000	
výstup	rýchlosť
dekodér	VD-06
citlivosť	10mm/s/V
max frekvencia [kHz]	350
dolno-pásmový filter [kHz]	20
horno-pásmový filter [kHz]	off

Tabuľka č.12 Nastavené parametre pri meraní dynamického režimu 61331

Na obrázku č.5.1.1 je zobrazené spektrum akcelerometra GS3 61331 a Polytecu. Spektrum je merané pri hodnote frekvencie 80 Hz. Spektrum je skoro totožné s predchádzajúcim akcelerometrom.

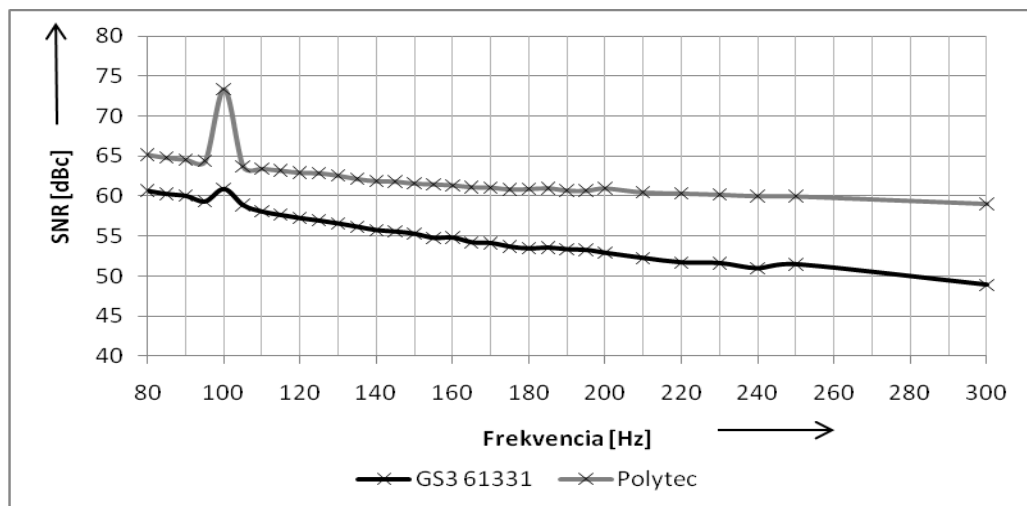


Obrázok č. 5.2.1 Spektrum 61331 a Polytec pre 80 Hz



Obrázok č. 5.2.2 SINAD GS3 61331 a Polytec

Hodnota SNR sa oproti predchádzajúcemu snímaču zmenila o 2 dB. Závislosť SINAD na frekvencii má lineárnejší charakter ako SNR. SNR s rastúcou frekvenciou klesal ako vidno na obrázku č.5.2.2. Priebehy majú očakávaný charakter.



Obrázok č. 5.2.3 SNR GS3 61331 a Polytec

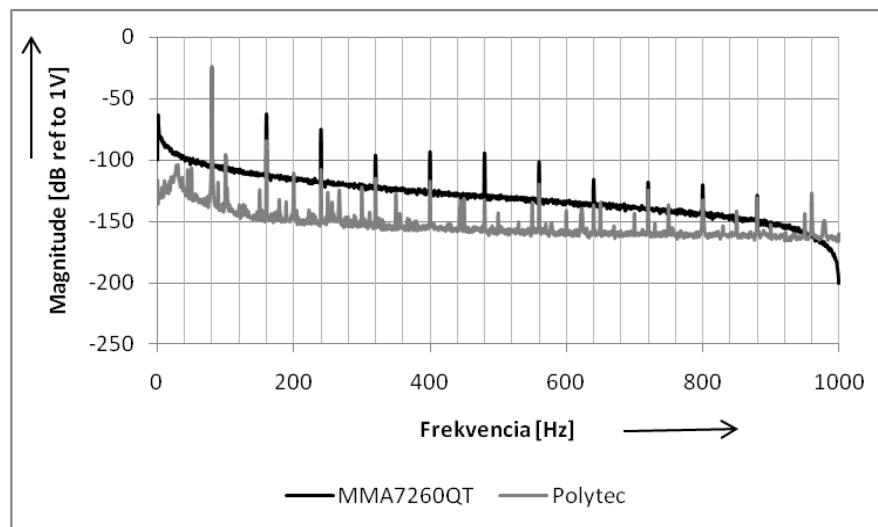
## 5.5 FREESCALE SEMICONDUCTOR MMA7260QT DYNAMICKÝ REŽIM

Bol použitý prípravok na upevnenie MEMS č.1. Pri meraní sa vyskytli harmonické frekvencie, ktoré boli podľa všetkého spôsobené zlým mechanickým upevnením akcelerometra k prípravku, čo spôsobovalo rezonancie. Pri meraní bol akcelerometer nastavený na rozlíšenie  $\pm 6g$ . Citlivosť akcelerometra je  $200 \text{ mV/g}$ . Výstupné napätie bolo udržiavané na  $\pm 800 \text{ mV}$ , čo je na spodnej hranici  $2/3$  rozsahu. Šírka pásma akcelerometra bola  $150 \text{ Hz}$ .

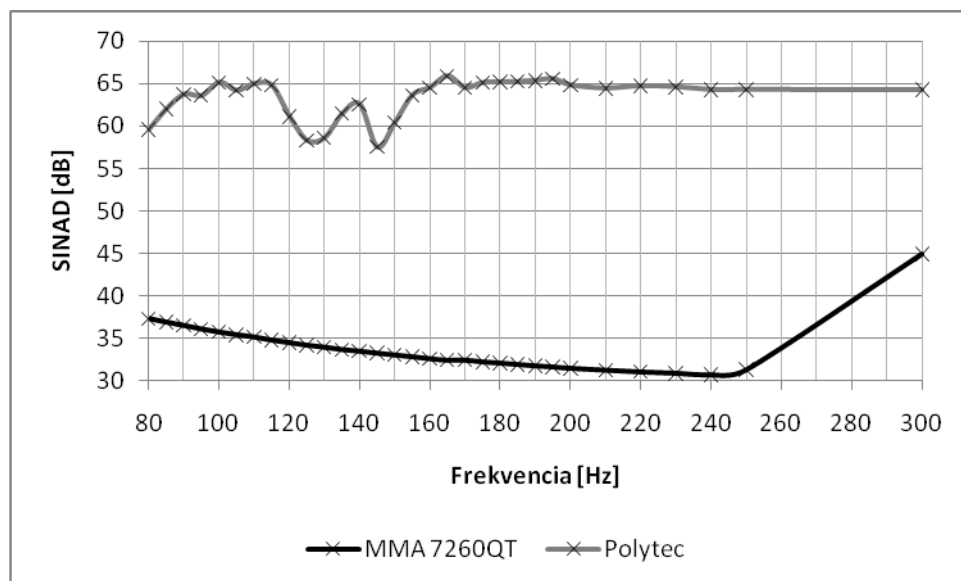
Nastavené parametre merania	
$U_{\text{NAP}}$ akcelerometer [V]	3,337
$Z_{\text{OUT}}$ [mV]= konštantné	$\pm 800$
LabVIEW Signal Express 3.0	
rozsah	$\pm 10V$
druh zapojenia	diferenčné
režim merania	continuous samples
počet vzoriek	5000
frekvencia [Hz]	2000
priemerovanie	rms averaging
počet priemerovaní	20
weighing mode	linear
Polytec vibrometer controller OFV-5000	
výstup	rýchlosť
dekodér	VD-06
citlivosť	$10 \text{ mm/s/V}$
max frekvencia [kHz]	350
dolno-pásmový filter [kHz]	20
horno-pásmový filter [kHz]	off

Tabuľka č.13 Nastavené parametre pri meraní dynamického režimu MMA 7260QT

Na obrázku č.5.3.1 môžeme vidieť spektrum Polytecu a MMA7260QT, na ktorom sa prejavujú harmonické, ako na Polytecu, tak aj na akcelerometri.

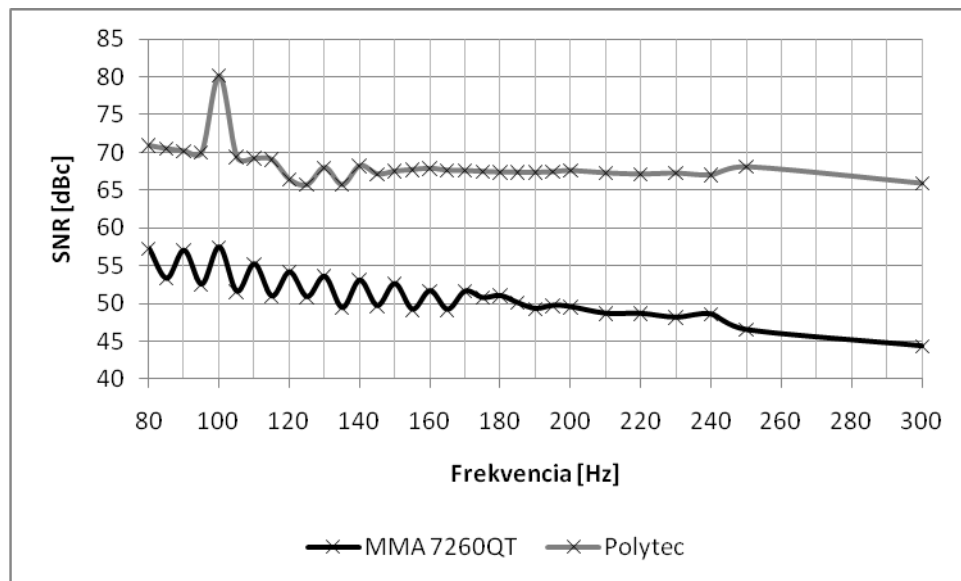


Obrázok č. 5.3.1 Spektrum MMA7260QT a Polytec pre 80 Hz



Obrázok č. 5.3.2 SINAD MMA7260QT a Polytec

Na obrázku č.5.3.2 môžeme vidieť charakteristiku hodnoty SINAD závislú na frekvencii. Pri referenčnej hodnote došlo k zvlneniu, ktoré spôsobili harmonické frekvencie. Pri akcelerometri vybehla hodnota SINAD pri 300 Hz na 45 dB, čo bolo spôsobené tým, že akcelerometer mal pásmo do 150 Hz a pri vyšších frekvenciách bolo problematické udržať rovnaký výstup, hodnota skákala. Hodnota sa dá brať len informatívne.

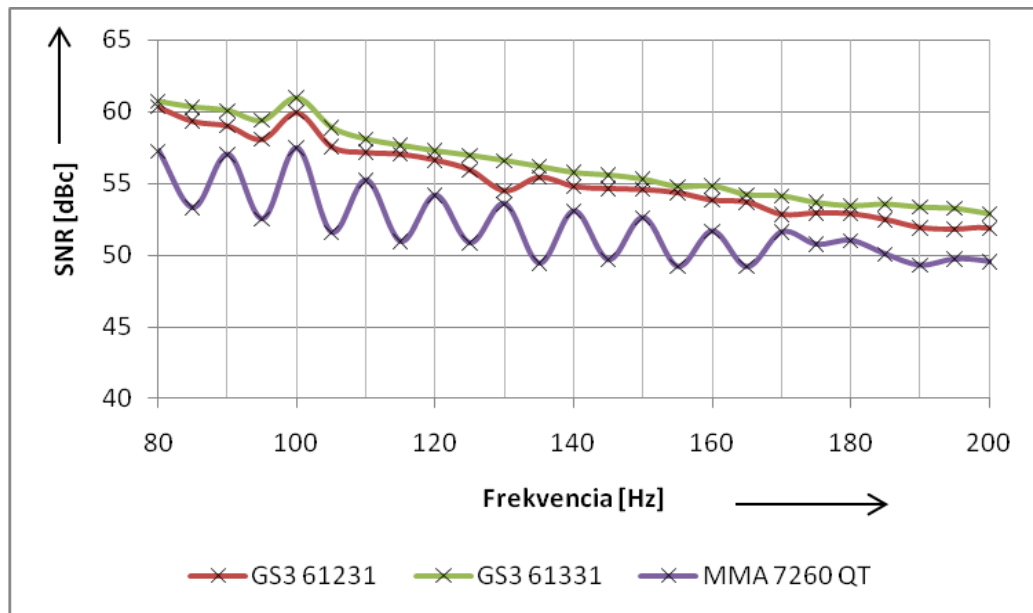


Obrázok č. 5.3.3 SNR MMA7260QT a Polytec

Pri výpočte SNR sa prejavilo zvlnenie nielen pri akcelerometri, ale aj pri referenčnej hodnote Polytecu, z čoho usudzujem, že podľa všetkého došlo k mechanickej rezonancii prípravku a snímača. Zvlnenie môžeme vidieť na obrázku č.5.3.3. Pri akcelerometri MMA 7260QT som mal problém dobre zaostriť na prípravok hlavou laser interferometra OFV-505, čo tiež vnieslo chybu do merania.

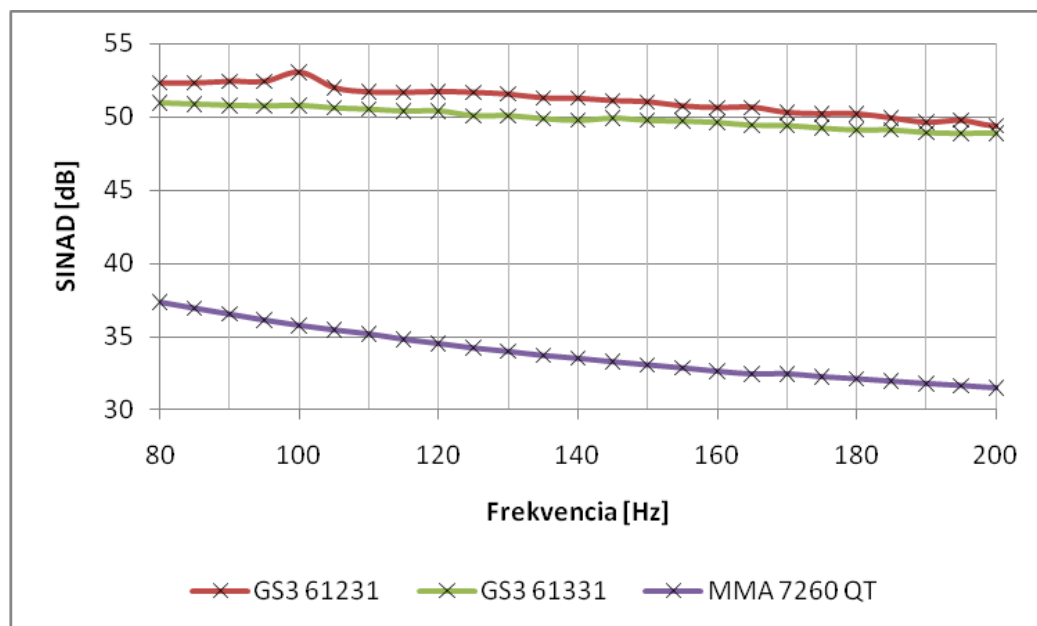
## 5.6 POROVNANIE ŠUMU AKCELEROMETROV V DYNAMICKOM REŽIME OS Z

Všetky tri akcelerometre boli premerané za rovnakých podmienok. Každý akcelerometer bol meraný na maximálnom zosilenení, aby do merania nezasahoval vnútorný zosilňovač daného akcelerometra. Akcelerometre od Panasonicu sú založené na piezo princípe a akcelerometer od Freescale Semiconductors MMA 7260QT bol zostrojený na kapacitnom princípe. Merali sa len troj-osé akcelerometre z toho dôvodu, že sa prípravok č.1 nedal použiť pre meranie ďalších osí. Hodnoty výsledkov sú zobrazené graficky. Na obrázku č.5.6.1 je znázornený priebeh SNR a na obrázku č.5.6.2 je znázornený priebeh SINAD.



Obrázok č. 5.6.1 Hodnoty SNR MMA7260QT, GS3 61231 a 61331

Najlepší odstup signálu od šumu má akcelerometer GS3 61331. Zhruba o jeden dB nižšie je akcelerometer GS3 61231. MMA7260QT má hodnotu SNR o 3 až 4 dB nižšiu ako 61231. Pri výpočte SINAD sa ukázalo, že je lepší GS3 61231 ako 61331. Akcelerometer MMA 7260QT mal hodnotu SINAD o okolo 15 dB nižšiu ako akcelerometer GS3 61231.



Obrázok č. 5.6.2 Hodnoty SINAD MMA7260QT, GS3 61231 a 61331

## 5.7 STMICROELECTRONICS LIS3L06AL DYNAMICKÝ REŽIM

Toto meranie prebiehalo na novom prípravku č.2, ktorý sa dal použiť už aj na meranie všetkých troch osí. Pre tento prípravok bolo potrebné upraviť aj DPS akcelerometrov.

Nastavené parametre merania	
$U_{NAP}$ akcelerometer [V]	3,337
$Z_{OUT}$ [mV]= konštantné	$\pm 1056$
LabVIEW Signal Express 3.0	
rozsah	$\pm 10V$
druh zapojenia	diferenčné
režim merania	continuous samples
počet vzoriek	5000
frekvencia [Hz]	2000
priemerovanie	rms averaging
počet priemerovaní	20
weighing mode	linear
Polytec vibrometer controller OFV-5000	
výstup	rýchlosť
dekodér	VD-06
citlivosť	50mm/s/V
max frekvencia [kHz]	350
dolno-pásmový filter [kHz]	20
horno-pásmový filter [kHz]	off

Tabuľka č.14 Nastavené parametre pri meraní dynamického režimu LIS3L06AL

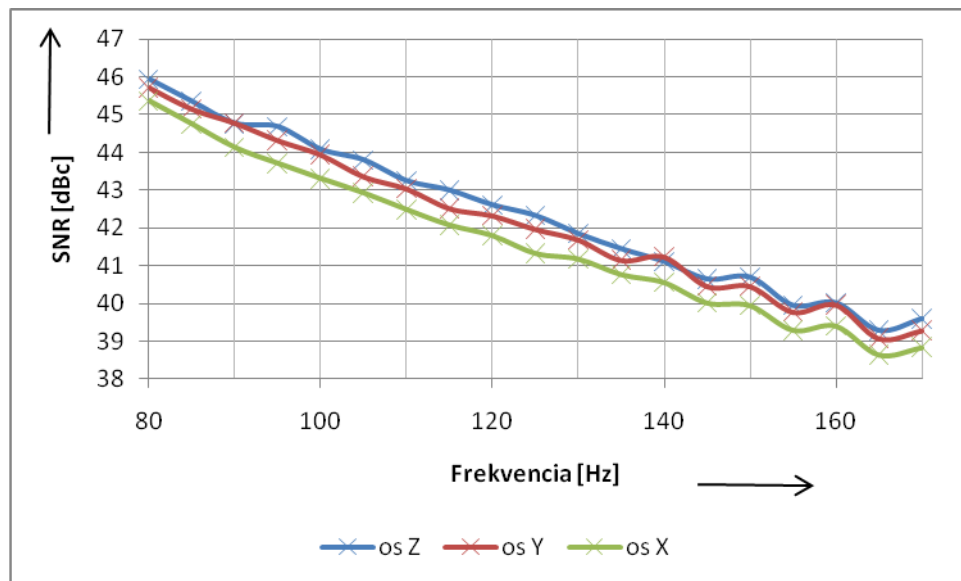
LIS3L06AL je kapacitný MEMS akcelerometer . Rozsah akcelerometra bol nastavený na  $\pm 6g$ . Citlivosť snímača sa počítala ako pätnástina napájacieho napätia akcelerometra. Pri napájaní 3,337 je citlivosť 0,22 V/g. Na výstupe akcelerometra bola udržiavaná hodnota napätia v okolí  $\pm 1,056$  V. Citlivosť vibrometra sa musela zvýšiť na 50mm/s/V, lebo vibrometer kontroler nebol schopný merať danú výchylku vibračného stolíka.

Šírka pásma bola vypočítaná pomocou vzorca (4.2).

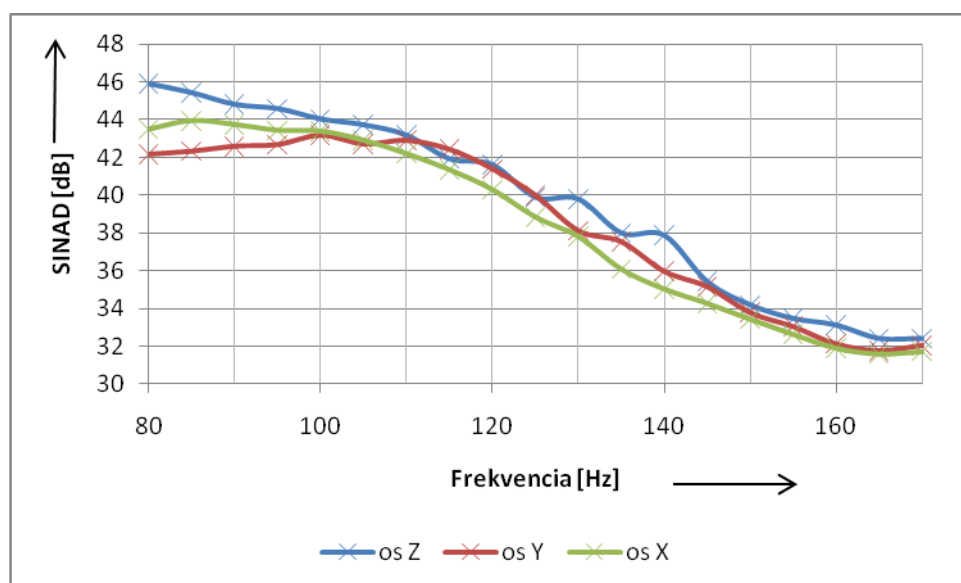
$$f_{-3dB} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (110k\Omega) \cdot 10nF} = 144,68Hz$$

Na obrázku č.5.7.1 sú zobrazené hodnoty SNR. Všetky tri osi majú podobný odstup signálu od šumu. Najhorší ma os X. Má o 0,2 dB nižšiu hladinu ako os Z a Y.

Pri SINAD, ktorý je na obrázku č.5.7.2, má do hodnoty 100 Hz najvyššiu hodnotu os Z. Najnižšiu hodnotu má os Y.



Obrázok č. 5.7.1 Hodnoty SNR LIS3L06AL osi X, Z, Y



Obrázok č. 5.7.2 Hodnoty SINAD LIS3L06AL osi X, Z, Y

## 6. ZÁVER

V tejto práci som si naštudoval software LabVIEW, ktorý sa používa pre prácu s hardvérom od firmy NI.

Porovnal som šum kariet NI-USB 6215 a NI-PXI 6259 a vyhodnotil som ich. Hladina šumu karty NI-USB 6215 bola -95,87dB SNR, karta NI-PXI 6259 mala hodnotu šumu -93,77dB SNR. Pre meranie som zvolil kartu NI-USB 6215.

V ďalšej časti som premeral funkčnosť dostupných MEMS akcelerometrov. Potom som určil ich hodnotu šumu pre dané rozlíšenie. Meranie šumu MEMS akcelerometrov prebiehalo v statickom režime. Pri meraní bola použitá krabica potiahnutá alobalom na odstránenie interferenčného rušenia, ktoré sa pri hodnotách v okolí  $10^{-6}$  V môže vyskytovať a ovplyvniť výsledky merania. Od krabice viedla do prevodníka tienená krútená dvojlinka. Meranie som vyhodnotil aj graficky.

Okrem dvoch akcelerometrov GS3 61231, 61331 výrobca udával hodnotu šumu.

V tabuľke č.9 a č.10 sú namerané akcelerometre vyhodnotené. Z dôvodu toho, že nie každý akcelerometer má nastavené rovnaké rozlíšenie je lepšie túto hodnotu uvádzať v  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Najnižšou hodnotou sa vyznačoval akcelerometer LIS2L02AS4 od firmy ST. Hodnota šumu bola  $36,16 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ . O niečo vyššou hodnotou sa vyznačovali akcelerometre GS3 61231 a 61331. Ich hodnota bola okolo  $55 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Tieto akcelerometre využívali piezo-rezistívny jav. Najhoršou hodnotou šumu sa vyznačoval akcelerometer od firmy MEMSIC A6500M, ktorý mal  $486 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Tento akcelerometer využíva tepelný princíp. Akcelerometre využívajúce kapacitný princíp, Freescale MMA7260QT a akcelerometre od Analog Devices, ADXL 203 a 311, mali hodnoty od 204 do  $285 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

V druhej fáze bolo cieľom zostrojiť merací reťazec a vyskúšať meranie MEMS akcelerometrov v dynamickom režime. Rozhodol som sa pre spracovanie údajov v programe LabVIEW. Najväčším problémom bolo integrovať zrýchlenie na rýchlosť. Správnosť integrácie som overoval na vibrometer kontroléri, ktorý má na výstupe nielen rýchlosť, ale aj polohu. Po integrácii rýchlosti som dostal polohu. Priebehy sa zhodovali. Samotné meranie prebiehalo v dvoch častiach.

V prvej časti som premeral 3 troj-osé akcelerometre na prípravku č.1. Boli to MMA 7260QT, GS3 61231 a 61331. Tento prípravok nebol schopný merať os Y a os X, preto som premeral len osi Z. Ako akčný člen som použil vibračný stolík a laser interferometer som použil ako referenčnú hodnotu, voči ktorej som šum porovnával. Pri všetkých akcelerometroch som na výstupe udržiaval konštantnú hodnotu v okolí 2/3 rozsahu snímača. Akcelerometre boli nastavené na maximálne rozlíšenie GS3 61231 na  $\pm 2g$ , 61331 na  $\pm 3g$  a MMA7260QT na  $\pm 6g$ . Najlepší SNR dosiahol GS3 61231. Pri meraní MMA7260QT sa objavili rezonancie, ktoré boli spôsobené mechanickým rezonovaním prípravku a akcelerometra.

Ďalej som premeral troj-osí akcelerometer LIS3L06AL od firmy ST. Postupne som premeral všetky tri osi akcelerometra. Pri meraní bol použitý merací prípravok č.2. Všetky osi akcelerometra mali minimálne rozdiely vo výslednej charakteristike SNR. Hodnota SINAD bola rozdielna do frekvencie 100 Hz, potom už boli hodnoty porovnateľné. Tieto rozdiely mohli byť spôsobené rôznou citlivosťou jednotlivých kanálov.

Pre meranie v dynamickom režime by som neodporučil používať prípravok č.1, pretože vnášal chybu do merania.

## 7. ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] High-Speed M Series Multifunction Data Acquisition, Data Sheet,  
Dostupné z: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-22/lang/en>, National Instruments, 2009
- [2] Bus-Powered M Series Multifunction DAQ for USB, Data Sheet,  
Dostupné z: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-9/lang/en>, National Instruments, 2008
- [3] 24-Bit, 204.8 kS/s Dynamic Signal Acquisition and Generation, Data Sheet,  
Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/products/us/pxi4461.pdf>, National Instruments, 2006
- [4] ADXL 311, Data Sheet, Dostupné z:  
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/83687/AD/ADXL311.html>  
Analog Devices, 2003
- [5] ADXL103/ADXL203, Data Sheet, Dostupné z:  
[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADXL103\\_203.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL103_203.pdf),  
Analog Devices, 2006
- [6] GS3 SENSOR, Data Sheet, Dostupné z:  
<http://pewa.panasonic.com/pcsd/product/sens/pdf/g3.pdf>, Matsushita Electric Works,
- [7] LIS3L06AL, Data Sheet, Dostupné z:  
<http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/11669/lis3l06al.pdf>,  
STMicroelectronics, 2006
- [8] LIS2L02AS4, Data Sheet,  
Dostupné z: <http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/10219.pdf>,  
STMicroelectronics, 2005
- [9] MMA7260QT, Data Sheet, Dostupné z:  
[http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7260QT.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf),  
Freescale Semiconductor, 2008

- [10] MXA6500G/M, Data Sheet, Dostupné z:  
<http://www.memsic.com/data/products/MXA6500G&M/MXA6500G&M.pdf>  
Memsic, 2007
- [11] BREITENBACH, Arvid . A Method for Determining the Signal-to-Noise Ratio of Sensors by Spectral Analysis. IEEE INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE PROCEEDINGS. 1997, 1, s. 457-462.
- [12] GIRARD, Tony. *Understanding effective bits*, Appl. Note 95091, str.1-9, Dostupné z: [www.fastcomtec.com/fwww/datashee/tra/effbits.pdf](http://www.fastcomtec.com/fwww/datashee/tra/effbits.pdf).
- [13] MOHD-YASIN, F.; NAGEL, D. J.; KORMAN, C. E. Noise in MEMS. Measurement Science and Technology [online]. 2010, 21, 1, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <stacks.iop.org/MST/21/012001>.
- [14] MOHD-YASIN, F., et al. Noise and reliability measurement of three-axis micro-accelerometer. Microelectronic Engineering [online]. 25.12.2008, 86, [cit. 2010-05-23]. Dostupný z WWW: <www.elsevier.com>.
- [15] HAVLÍČEK, Josef - VLACH, Jaroslav – VLACH, Martin. *Začínáme s LABVIEW*. Praha: BEN Technická literatura, 2008. 248s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [16] UHLÍŘ, Jan. SOVKA, Pavel. *Číslíkové zpracování signálů*. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2002. 327 s. ISBN 80-01-02613-2.
- [17] MOHD-YASIN, Faisal; KORMAN, Can E.; NAGEL, David J. Measurement of noise characteristics of MEMS accelerometers. Solid-State Electronics [online]. 16.4.2002, 47, [cit. 2010-05-24]. Dostupný z WWW: <www.sciencedirect.com>.
- [18] MOHD-YASIN, Faisal, et al. Low Frequency noise measurement and analysis of capacitive micro-accelerometers. Microeletronic Engineering [online]. 4.2.2007, 84, [cit. 2010-05-24]. Dostupný z WWW: <www.sciencedirect.com>.

## 8. ZOZNAM SKRATIEK

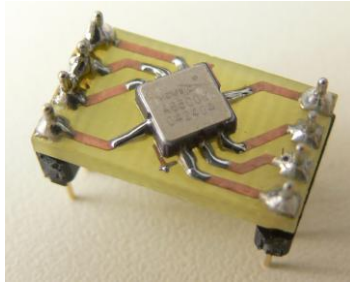
NI	National Instruments
ADC	Analog to digital convertor ,Analogovo-digitálny prevodník
FC	Full scale, plný rozsah
DC	Direct current, jednosmerné napätie
MEMS	Microelectromechanical systems, mikroelektromechanické systémy
SNR	Signal to noise ratio, odstup signál šum
COM	Common, zem
ST	Self test
SINAD	Signal to Noise and Distortion
ND	Noise Density, hustota šumu
AD šum	Adsorption–desorption noise
DUT	Device under test
LNA	low noise amplifier, nízko šumový zosilňovač

## 9. ZOZNAM PRÍLOH

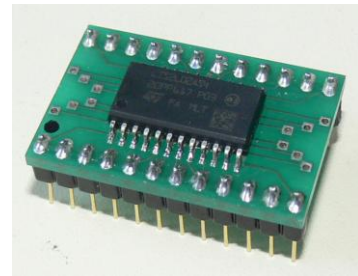
Príloha 1- Obrázky premeraných akcelerometrov.....	60
Príloha 2- Redukcie použité pre upevnenie MEMS v dynamickom režime...	61
Príloha 3- Priložené CD	

## 10. PRÍLOHY

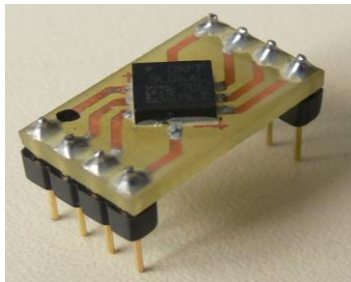
Príloha 1- Obrázky premeraných akcelerometrov



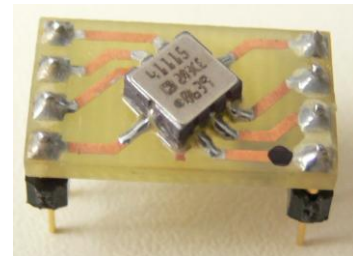
**MEMSIC A65000M**



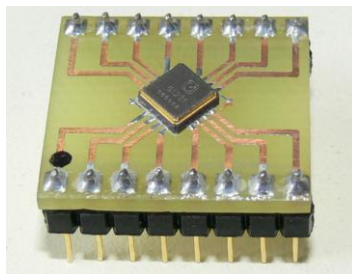
**LIS2L02AS4**



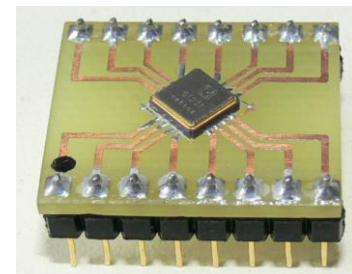
**LIS3L06AL**



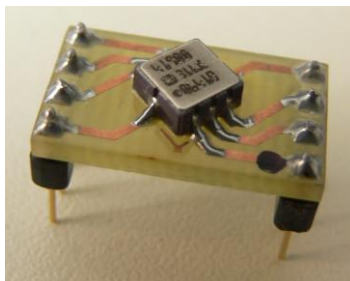
**ADXL 203**



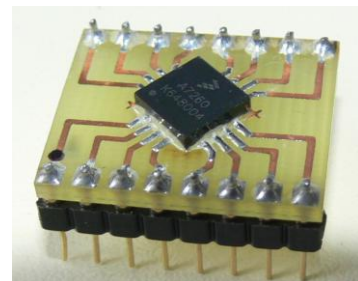
**GS3 61231**



**GS3 61331**



**ADXL 311**

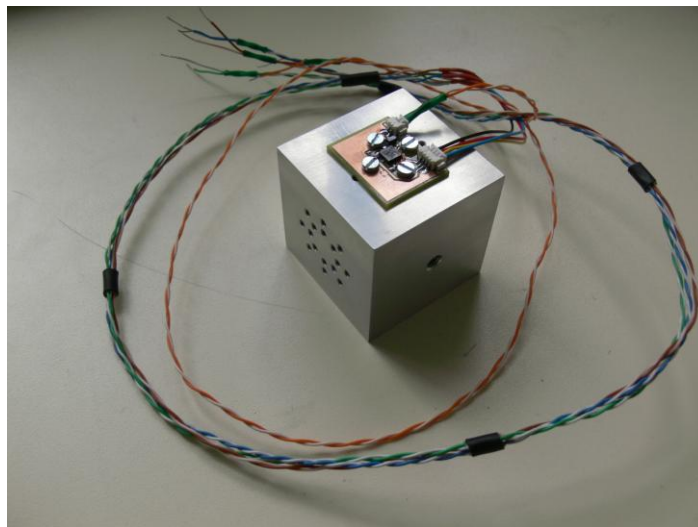


**MMA 7260QT**

Príloha 2- Redukcie použité pre upevnenie MEMS v dynamickom režime



Prípravok pre upevnenie MEMS č.1



Prípravok na upevnenie MEMS č.2