

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## INKLINOMETRY A GYROSKOPY INCLINOMETERS AND GYROSCOPES

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. IRENA HÝVNAROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK

BRNO 2008

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Kybernetika, automatizace a měření

**Student:** Hývnarová Irena, Bc.

**ID:** 89097

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2007/08

**NÁZEV TÉMATU:**

## Inklinometry a gyroskopy

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

V návaznosti na semestrální práci 2 zpracujte přehled postupů pro ověřování základních parametrů snímačů úhlového natočení a úhlové rychlosti a jejich kalibraci. Ověřte základní i rozšířené parametry snímačů náklonu využívající Zemského zrychlení (citlivost, příčnou citlivost, odstup signál/šum, závislost na napájecím napětí, dynamické parametry, aj.). Dále ověřte a porovnejte parametry snímačů úhlového zrychlení. Pojednejte a případně prakticky ověřte možnost použití gyroskopů pro měření náklonu. Vyhodnoťte věrohodnost provedených měření.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- 1) Webster, J. G. "The measurement, Instrumentation and Sensors Handbook." CRC Press, 1999. ISBN 0-8493-8347-1.
- 2) Fraden, J. "Handbook of Modern Sensors." Springer, 2004. ISBN 0-387-00750-4.
- 3) Holman, J. P. "Experimental Methods For Engineers." Mc Graw-Hill College, 1994. ISBN 0-07-113354-2.
- 4) Gad-el-Hak, M. "MEMS: Applications." CRC Taylor & Francis, Florida, 2004. ISBN 0-8493-9139-3.
- 5) Firemní literatura a katalogové listy firem Analog Devices, Freescale, Panasonic a STMicroelectronics.

Další dle vlastního literárního průzkumu a podle doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 3.12.2007

**Termín odevzdání:** 26.5.2008

**Vedoucí projektu:** Ing. Zdeněk Havránek

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**

*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

**Vysoké učení technické Brno**

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**

**Ústav automatizace a měřicí techniky**

## **Inklinometry a gyroskopy**

**Diplomová práce**

Specializace studia: Kybernetika, řízení a měření

Autor práce: Irena Hývnarová

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek

### **ANOTACE:**

Tato práce se zabývá snímači detekujícími úhlový náklon. Kromě jiných snímačů je možné zařadit zde také akcelerometry a gyroskopy. V práci jsou popsány snímače náklonu pracující s kapacitní, piezorezistivní a tepelnou metodou. Kapacitní akcelerometry firem Analog Devices, STmicro a Freescale, piezorezistivní akcelerometry firmy Panasonic Matsushita a gyroskop ADXRS300 jsou ověřovány praktickým měřením. Jsou zjišťovány jejich parametry, které jsou následně porovnávány s údaji od výrobce. V práci je rovněž vyhodnocena věrohodnost jednotlivých měření. Práce je rozdělena na kapitoly, které teoreticky popisují principy jednotlivých akcelerometrů, a na kapitoly, které se zabývají vyhodnocením naměřených údajů a dat.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** náklon, úhlová rychlost, inklinometry, gyroskopy, metody měření

**Brno University of Technology**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication**

**Department of Control, Measurement and Instrumentation**

# **Inclinometers and Gyroscopes**

## **Thesis**

Specialisation of study:      Cybernetics, Control and Measurement  
Student:                              Irena Hývnarová  
Supervisor:                         Ing. Zdeněk Havránek

### **ANNOTATION:**

This study deals with tilt sensors. Besides others methods, accelerometers and gyroscopes are also convenient to solve this problem. Tilt sensors which are described in this thesis are working with capacitive, piezoresistive and thermal method. Capacitive accelerometers from producer Analog Devices, STmicro and Freescale, piezoresistive accelerometers from producer Panasonic Matsushita and gyroscope ADXRS300 are tested by practical measurement. Parameters of these accelerometers are found and they are compared with parameters from producer. Measurement reliability in this study is analysed as well. This thesis is divided in chapters theoretically describing principles of particular accelerometers and the chapters containing measured data evaluation.

**KEY WORDS:** tilt, inclinometer, accelerometer, gyroscope

## **Bibliografická citace**

Hývnarová, Irena. *Inklinometry a gyroskopy. Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. s. 66, příloh 18. Vedoucí práce. Ing. Zdeněk Havránek.

## **P r o h l á š e n í**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Inklinometry a gyroskopy jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny v práci řádně citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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:

## **P o d ě k o v á n í**

Na tomto místě chci poděkovat vedoucímu své práce Ing. Zdeňku Havránkovi za jeho odborné vedení, cenné rady, připomínky a za ochotný přístup při vypracování mé diplomové práce.

V Brně dne :

Podpis:

## OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. ÚVOD .....</b>  | <b>13</b> |
| <b>2. SNÍMAČE NÁKLONU VYUŽÍVAJÍCÍ ZEMSKÉ ZRYCHLENÍ [6] .....</b>                | <b>14</b> |
| 2.1 Akcelerometry .....   | 16        |
| 2.2 Princip kapacitního akcelerometru [1, 2, 6, 12] .....                       | 16        |
| 2.3 Princip piezorezistivního akcelerometru [2] .....                           | 19        |
| 2.4 Princip tepelného akcelerometru [3, 4, 5] .....                             | 20        |
| 2.5 Zastoupení kapacitního, piezorezistivního a tepelného akcelerometru na trhu | 24        |
| <b>3. OVĚŘOVÁNÍ PARAMETRŮ SNÍMAČŮ DOSTUPNÝCH NA UAMT ..</b>                     | <b>26</b> |
| 3.1 Postup měření .....   | 26        |
| 3.1.1 Použité přístroje .....   | 27        |
| 3.1.2 Postup při zpracování naměřených hodnot .....                             | 27        |
| 3.1.3 Postup při vyhodnocování naměřených údajů 1. metodou .....                | 28        |
| 3.1.4 Postup při vyhodnocování naměřených údajů 2. metodou [19] .....           | 29        |
| 3.1.5 Postup při zjišťování nejistot měření a nelinearity měření .....          | 31        |
| 3.2 Akcelerometr ADXL 203 od Analog Devices .....                               | 34        |
| 3.2.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou .....                            | 34        |
| 3.2.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou .....                            | 38        |
| 3.2.3 Porovnání parametrů akcelerometru ADXL 203 .....                          | 39        |
| 3.3 Akcelerometr ADXL 311 od Analog Devices .....                               | 40        |
| 3.3.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou .....                            | 40        |
| 3.3.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou .....                            | 41        |
| 3.3.3 Porovnání parametrů akcelerometru ADXL 311 .....                          | 42        |
| 3.4 Akcelerometr MMA7260QT od Freescale .....                                   | 43        |
| 3.4.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou .....                            | 43        |
| 3.4.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou .....                            | 45        |
| 3.4.3 Porovnání parametrů akcelerometru MMA7260QT .....                         | 47        |
| 3.5 Akcelerometr LIS2L0AS4 od STmicroelectronic .....                           | 47        |
| 3.5.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou .....                            | 47        |
| 3.5.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou .....                            | 50        |
| 3.5.3 Porovnání parametrů akcelerometru LIS2L02AS4 .....                        | 51        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.6 Akcelerometr LIS3l06AL od ST Microelectronic .....                                     | 52        |
| 3.6.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou .....                                       | 52        |
| 3.6.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou .....                                       | 53        |
| 3.6.3 Porovnání parametrů akcelerometru LIS3l06AL .....                                    | 54        |
| 3.7 Akcelerometr AGS61231 Panasonic Matsushita .....                                       | 54        |
| 3.7.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou .....                                       | 54        |
| 3.7.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou .....                                       | 55        |
| 3.7.3 Porovnání parametrů akcelerometru AGS61231 .....                                     | 56        |
| 3.8 Akcelerometr AGS61331 Panasonic Matsushita .....                                       | 57        |
| 3.8.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou .....                                       | 57        |
| 3.8.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou .....                                       | 58        |
| 3.8.3 Porovnání parametrů akcelerometru AGS61331 .....                                     | 59        |
| <b>4. MĚŘENÍ ÚHLOVÉ RYCHLOSTI S MEZIPŘEVODEM NA JINOU<br/>NEELEKTRICKOU VELIČINU .....</b> | <b>60</b> |
| 4.1 Optický gyroskop [7, 8, 9, 10] .....   | 60        |
| 4.1.1 Přehled trhu optických gyroskopů .....   | 61        |
| 4.2 Gyroskop využívající Coriolisovy síly [1, 10, 15] .....                                | 62        |
| 4.2.1 Vysvětlení vzniku Coriolisovy síly .....   | 62        |
| 4.2.2 Princip gyroskopu s měřením Coriolisovy síly .....                                   | 63        |
| 4.2.3 Přehled trhu gyroskopů využívajících Coriolisovy síly .....                          | 64        |
| <b>5. PRAKTICKÁ MĚŘENÍ S GYROSKOPEM ADXRS300 .....</b>                                     | <b>65</b> |
| 5.1 Test časové stálosti .....   | 65        |
| 5.2 Citlivost gyroskopu ADXRS300 .....   | 67        |
| <b>6. ZÁVĚR .....</b>  | <b>70</b> |
| <b>7. LITERATURA .....</b>   | <b>71</b> |



## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1: Složky úhlů náklonu [6].   | 14 |
| Obrázek 2: Rozdělení gravitačního zrychlení [6].  | 15 |
| Obrázek 3: Princip kapacitního akcelerometru [2].   | 17 |
| Obrázek 4: Struktura snímače a) bez působení zrychlení (0 g) b) při působení zrychlení [1].                                       | 17 |
| Obrázek 5: Principiální schéma akcelerometru [1].   | 18 |
| Obrázek 6: Princip piezorezistivního akcelerometru.   | 19 |
| Obrázek 7: Plocha měřidla piezorezistivního akcelerometru.  | 19 |
| Obrázek 8: Příklad návrhu měření piezorezistivním akcelerometrem v nízkých kmitočtech.  | 20 |
| Obrázek 9: Uspořádání tepelného akcelerometru [4].  | 21 |
| Obrázek 10: Symetrický tvar teploty tvořený centrálním topným tělesem je narušen použitým zrychlením [4].                         | 22 |
| Obrázek 11: Závislost změny odporu na úhlu náklonu [3].   | 23 |
| Obrázek 12: Schéma zapojení pro měření s akcelerometry.   | 26 |
| Obrázek 13: Vyhodnocení a porovnání naměřených hodnot se skutečnými údaji, relativní odchylka.                                    | 29 |
| Obrázek 14: Vyhodnocení naměřených hodnot akcelerometru ADXL 203 A pomocí 2. metody.  | 30 |
| Obrázek 15: Závislost citlivosti akcelerometru ADXL 203 A na zrychlení.   | 30 |
| Obrázek 16: Průběh naměřených a aproximovaných hodnot napětí $U_X$ akcelerometru ADXL 203 C a jejich vzájemné relativní odchylky. | 35 |
| Obrázek 17: Průběh naměřených a aproximovaných hodnot napětí $U_Y$ akcelerometru ADXL 203 C a jejich vzájemné relativní odchylky. | 35 |
| Obrázek 18: Průběh relativní odchylky výstupního $U_X$ a $U_Y$ akcelerometru ADXL 203 A.  | 36 |
| Obrázek 19: Průběh relativní odchylky výstupního $U_X$ a $U_Y$ akcelerometru ADXL 203 B.  | 36 |
| Obrázek 20: Srovnání průběhů napětí akcelerometrů ADXL 203 A, B a C.  | 37 |
| Obrázek 21: Závislost citlivosti akcelerometru ADXL 203 A na zrychlení.   | 38 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 22: Závislost citlivosti akcelerometru ADXL 203 B na zrychlení. ....   | 39 |
| Obrázek 23: Průběh relativní odchytky výstupních napětí $U_X$ a $U_Y$ akcelerometru ADXL 311 napájeného napětím 3V. .... | 41 |
| Obrázek 24: Závislost citlivosti akcelerometru ADXL 311 na zrychlení. ....   | 42 |
| Obrázek 25: Průběh relativní odchytky výstupních napětí $U_X$ a $U_Y$ akcelerometru MMA7260QT A. ....                    | 43 |
| Obrázek 26: Průběh relativní odchytky výstupních napětí $U_X$ a $U_Y$ akcelerometru MMA7260QT B. ....                    | 44 |
| Obrázek 27: Srovnání průběhů napětí akcelerometrů MMA7260QT A a B. ....  | 44 |
| Obrázek 28: Závislost citlivosti akcelerometru MMA7260QT A na zrychlení. ....  | 46 |
| Obrázek 29: Závislost citlivosti akcelerometru MMA7260QT B na zrychlení. ....  | 46 |
| Obrázek 30: Průběh relativní odchytky napětí $U_X$ a $U_Y$ akcelerometru LIS2L02AS4 A. ....                              | 48 |
| Obrázek 31: Průběh relativní odchytky napětí $U_X$ a $U_Y$ akcelerometru LIS2L02AS4 B. ....                              | 48 |
| Obrázek 32: Srovnání průběhů napětí akcelerometrů LIS2L02AS4 A a B. ....   | 49 |
| Obrázek 33: Závislost citlivosti akcelerometru LIS2L02AS4 A na zrychlení. ....   | 50 |
| Obrázek 34: Závislost citlivosti akcelerometru LIS2L02AS4 B na zrychlení. ....   | 51 |
| Obrázek 35: Průběh relativní odchytky výstupních napětí $U_X$ a $U_Y$ akcelerometru LIS3106AL napájeného 3,3V. ....      | 52 |
| Obrázek 36: Závislost citlivosti akcelerometru LIS3106AL na zrychlení. ....  | 53 |
| Obrázek 37: Průběh relativní odchytky výstupních napětí $U_X$ a $U_Y$ akcelerometru AGS61231 napájeného napětím 3V. .... | 55 |
| Obrázek 38: Závislost citlivosti akcelerometru AGS61231 na zrychlení. ....   | 56 |
| Obrázek 39: Průběh relativní odchytky výstupních napětí $U_X$ a $U_Y$ akcelerometru AGS61331 napájeného napětím 3V. .... | 57 |
| Obrázek 40: Závislost citlivosti akcelerometru AGS61331 na zrychlení. ....   | 58 |
| Obrázek 41: Sagnacův efekt ve spirálovém vlákně použitý pro měření rychlosti [7].<br>.....                               | 61 |
| Obrázek 42: Příklad působení Coriolisovy síly na osobu pohybující se od středu k okraji rotujícího kruhu. ....           | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 43: a) Vytvoření Coriolisovy síly u vibračního gyroskopu [15].                               | b) |
| Zjednodušená struktura kapacitního MEMS gyroskopu.....   | 63 |
| Obrázek 44: Průběhy měření při zjišťování časové stálosti ADXRS300. ....                             | 66 |
| Obrázek 45: Průběhy měření při zjišťování časové stálosti ADXRS300. ....                             | 66 |
| Obrázek 46: Průměrná a maximální časová stálost gyroskopu ADXRS300. ....                             | 67 |
| Obrázek 47: Průběh výstupního napětí gyroskopu ADXRS300 při rychlosti otáčení $\pm$<br>107 °/s. .... | 68 |
| Obrázek 48: Závislost napětí $U_{NAM}$ na rychlosti otáčení gyroskopem. ....                         | 69 |
| Obrázek 49: Závislost citlivosti gyroskopu ADXRS300 na rychlosti otáčení.....                        | 69 |

## SEZNAM TABULEK

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1: Parametry kapacitního akcelerometrů ADXL firmy Analog Devices [1].<br>.....                                | 24 |
| Tabulka 2: Parametry kapacitních akcelerometrů pracujících s nízkým zrychlením od<br>ostatních výrobců [11, 13]. .... | 25 |
| Tabulka 3: Parametry piezorezistivních akcelerometrů[16]. ....  | 25 |
| Tabulka 4: Parametry tepelných akcelerometrů MEMSIC [14]. ....  | 25 |
| Tabulka 5: Řádek tabulky vypočtených a naměřených hodnot akcelerometru ADXL<br>203, vzorek C. ....                    | 31 |
| Tabulka 6: Porovnání parametrů akcelerometru ADXL 203. ....   | 39 |
| Tabulka 7: Porovnání parametrů akcelerometru ADXL 311. ....   | 42 |
| Tabulka 8: Porovnání parametrů akcelerometru MMA7260QT.....   | 47 |
| Tabulka 9: Porovnání parametrů akcelerometru LIS2L02AS4. ....   | 51 |
| Tabulka 10: Porovnání parametrů akcelerometru LIS3106AL.....  | 54 |
| Tabulka 11: Porovnání parametrů akcelerometru AGS61231. ....  | 56 |
| Tabulka 12: Porovnání parametrů akcelerometru AGS61331. ....  | 59 |
| Tabulka 13: Parametry optického gyroskopu [8, 9]. ....  | 61 |

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 14: Hlavní parametry gyroskopů iMEMS Analog Devices řady ADXRS [1].<br>.....                | 64 |
| Tabulka 15: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro rychlost otáčení<br>gyroskopem 107 °/s..... | 68 |

## SEZNAM ZKRATEK

| Zkratka/Symbol                  | Jednotka              | Popis                         |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| g                               | [m*s <sup>-2</sup> ]  | Zemské (gravitační) zrychlení |
| U <sub>X</sub> , U <sub>Y</sub> | [V]                   | Výstupní napětí akcelerometru |
| U <sub>S</sub>                  | [V]                   | Napájecí napětí akcelerometru |
| K                               | [V/m*s <sup>2</sup> ] | Citlivost akcelerometru       |
| K                               | [V/°/s]               | Citlivost gyroskopu           |
| R                               | [Ω]                   | Elektrický odpor              |
| C                               | [F]                   | Kapacita kondenzátoru         |
| G                               | [S]                   | Elektrická vodivost           |
| T                               | [°C]                  | Teplota                       |
| φ                               | [°]                   | Úhel natočení akcelerometru   |
| t                               | [s]                   | Čas                           |

## 1. ÚVOD

Inklinometry jsou v této práci označovány snímače úhlové výchylky. Ta je udávána ve stupních, minutách a sekundách. Informace o náklonu je nezbytná v mnoha odvětvích, jako je například letectví, vojenský průmysl nebo robotika. Z tohoto důvodu je nutné náklon přesně změřit. Dnešní nabídka inklinometrů na trhu je velmi široká. Existuje velké množství snímačů úhlového natočení, záleží na tom, jaký typ snímače je použit a na jakém principu pracuje.

Cílem této práce je zpracování přehledu postupů pro ověřování základních parametrů těchto snímačů. Ověřovány jsou parametry snímačů náklonu využívajících Zemského zrychlení a také možnost použití gyroskopů pro měření náklonu. Vyhodnocena je i věrohodnost jednotlivých měření.

V první kapitole jsou teoreticky popsány metody snímačů, které ke zjištění úhlové výchylky využívají Zemského zrychlení. Snímači tohoto typu jsou například akcelerometry, které pracují na nejrůznějších principech. V této kapitole je popsán princip kapacitního, piezorezistivního a tepelného akcelerometru. Pro všechny tyto snímače je uvedeno zastoupení na trhu, včetně jejich parametrů.

Ve druhé kapitole jsou uvedeny výsledky a závěry testování 11 snímačů náklonu od čtyř různých výrobců - Analog Devices, Freescale, ST Microelectronic a Panasonic Matsushita. Je zde vyhodnocena také věrohodnost jednotlivých měření.

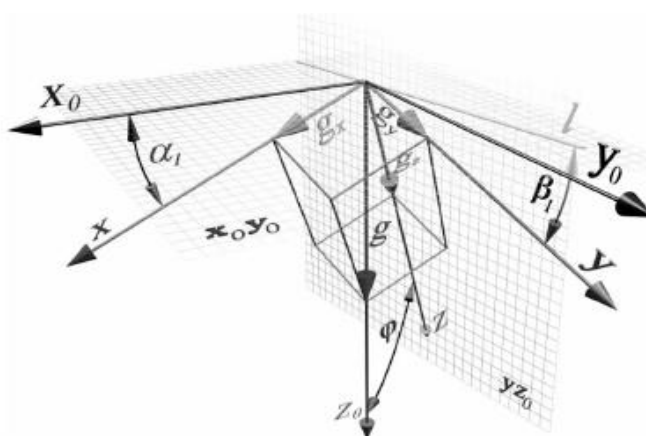
Třetí kapitola je věnována snímačům, které detekují náklon měřeními úhlové rychlosti. Jsou zde popsány optické gyroskopy, které pracují na principu Sagnacova jevu a také gyroskopy využívající měření Coriolisovy síly, oba včetně parametrů a výrobců, kteří jsou na trhu dostupní. Gyroskop pracující s Coriolisovou silou je rovněž ověřen měřeními.

V příloze této práce jsou uvedeny vlastnosti a parametry testovaných akcelerometrů tak, jak je jejich výrobcem uvádějí. Dále jsou v příloze uvedeny tabulky vypočtených a naměřených hodnot.

## 2. SNÍMAČE NÁKLONU VYUŽÍVAJÍCÍ ZEMSKÉ ZRYCHLENÍ [6]

Tato kapitola je věnována snímačům, které při měření náklonu využívají Zemského zrychlení. Takovéto snímače jsou založeny na myšlence, že jakýkoliv náklon je možné změřit právě vůči svislému směru Zemského zrychlení. Měření úhlového natočení vychází z toho, že náklon lze vyjádřit určením jeho dílčích úhlů.

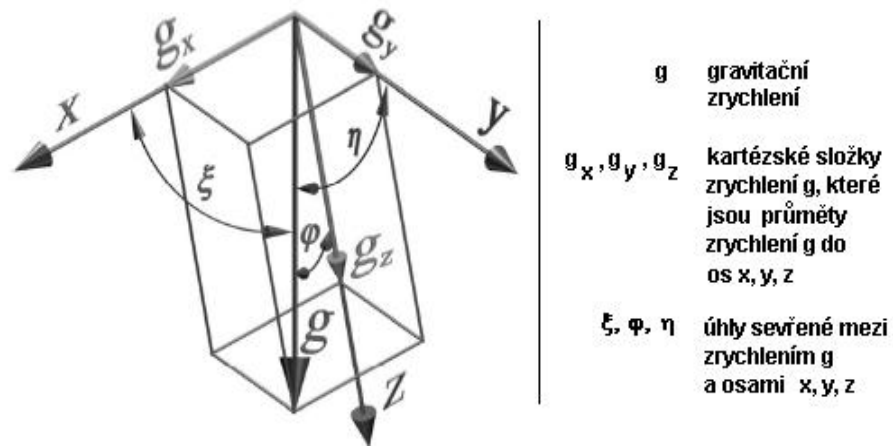
Snímače je možné rozdělit na dvouosé a trojosé. U dvouosého snímače se určuje náklon pomocí jednoho dílčího úhlu, který je vychýlený oproti směru Zemského zrychlení. Jedná se tedy o náklon v rovině. Trojosý snímač zjišťuje náklon určením jeho dvou dílčích úhlů. Obrázek 1 ukazuje libovolný úhel náklonu  $\varphi$ , který je rozložený do dvou složek úhlů  $\alpha_1$  a  $\beta_1$ , které jsou obsaženy v rovině  $xz_0$  a  $yz_0$ .



Obrázek 1: Složky úhlů náklonu [6].

Na obrázku 1 je souřadnicový systém  $x_0y_0z_0$  nehybný a jeho osa  $z_0$  je svislá. Souřadnicový systém  $xyz$  je pevně spojen s pohyblivým snímačem. Úhel  $\beta_1$  je tzv. úhel klopení sevřený mezi osou  $x$  a přímkou  $l$ , která je průnikem svislé roviny  $yz_0$  a vodorovné roviny  $x_0y_0$ . Většina snímačů náklonu tvoří dva nezávislé signály (nezávislé proto, že vzájemná interakce mezi těmito signály je zanedbána). Jeden z těchto signálů odpovídá úhlu klopení ( $\beta_1$ ), druhý signál úhlu klonění ( $\alpha_1$ ). Při měření náklonu jsou úhly klonění a klopení, definované v obrázku 1, jednoduše určeny na základě údajů snímače. Náklon je určen měřením složek gravitačního

zrychlení. Pokud je třeba snímač náklonu s takovým měřicím rozsahem, aby pokrýval všechny možné pozice s ohledem na vektor gravitace, musí být snímač alespoň trojosý. Nejjednodušší uspořádání je, pokud jsou všechny osy navzájem kolmé, tedy Kartézský systém souřadnic, jak ukazuje obrázek 2.



Obrázek 2: Rozdělení gravitačního zrychlení [6].

Ve svislé poloze snímače, pokud je osa z shodná se směrem gravitačního zrychlení, jsou měřeny úhly  $\eta$  a  $\zeta$  90°. Náklon je v tomto případě nulový. Vzhledem k tomu, že ve většině literatury se používají úhly  $\alpha_1$  a  $\beta_1$ , je vhodné převést úhly  $\zeta$  a  $\eta$  na úhly  $\alpha_1$  a  $\beta_1$ , které jsou jejich doplňky do pravých úhlů. Vztahy mezi úhly mohou být vyjádřeny rovnicemi 1, 2 a 3:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \varepsilon, \quad \beta_1 = \frac{\pi}{2} - \eta \quad \text{Rovnice 1}$$

$$g = \sqrt{(g_x^2 + g_y^2 + g_z^2)} \quad \text{Rovnice 2}$$

$$g_x = g \cdot \sin \alpha_1, \quad g_y = g \cdot \sin \beta_1, \quad g_z = g \cdot \cos \varphi \quad \text{Rovnice 3}$$

## 2.1 AKCELEROMETRY

Mezi snímače náklonu, které využívají Zemského zrychlení, jsou mj. řazeny i akcelerometry. Jsou to snímače, které, kromě Zemského zrychlení, měří také zrychlení dynamické. Dynamické zrychlení je síla vzniklá změnou rychlosti pohybujícího se předmětu. Zemské (statické) zrychlení je síla vzniklá působením gravitace Země, a proto je již z principu neustále přítomné.

Akcelerometry lze, kromě náklonu, použít v mnoha odlišných aplikacích. Lze jimi měřit např. vibrace, pohyb, rychlost, zrychlení aj. Mohou být soustředěny na jednom integrovaném obvodu, který obsahuje snímací prvek a zároveň vyhodnocovací obvody. Základní princip akcelerometrů používaných pro měření náklonu vychází z toho, že na těleso umístěné v prostoru působí Zemské zrychlení. Velikost náklonu je tedy vztažena ke směru gravitačního zrychlení, který je považován za nulovou hodnotu.

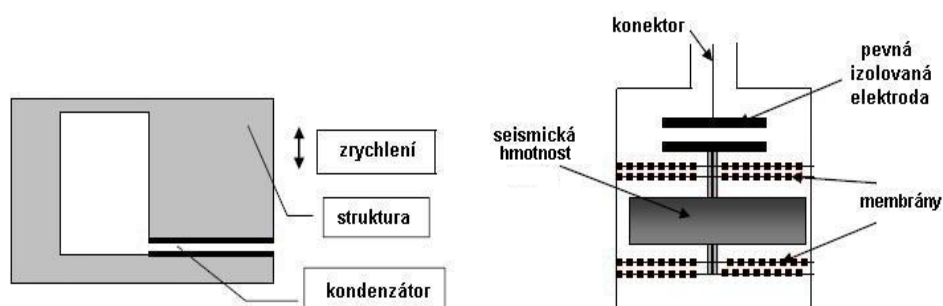
Akcelerometr je v podstatě stavební prvek snímače náklonu. Aby bylo možné změřit akcelerometrem náklon v rovině, je třeba použít dvouosý akcelerometr, nebo dva jednoosé akcelerometry uspořádané vůči sobě kolmo. Pro zjištění náklonu v prostoru je třeba použít minimálně trojosý akcelerometr, popř. kombinaci 3 jednoosých akcelerometrů, nebo 2 dvouosých akcelerometrů.

Existuje mnoho typů akcelerometrů, rozlišovány jsou podle toho, na jakém principu pracují. V následujících podkapitolách jsou uvedeny zejména takové typy akcelerometrů, které jsou běžně komerčně dostupné nebo které byly v následujících kapitolách práce prakticky ověřovány.

## 2.2 PRINCIP KAPACITNÍHO AKCELEROMETRU [1, 2, 6, 12]

Pro aplikace, které vyžadují lepší výkon, jsou používány kapacitní akcelerometry. Tento typ akcelerometru se nevytváří standardní výrobní technikou, proto bývá dražší. Princip akcelerometru je uveden na obrázku 3.

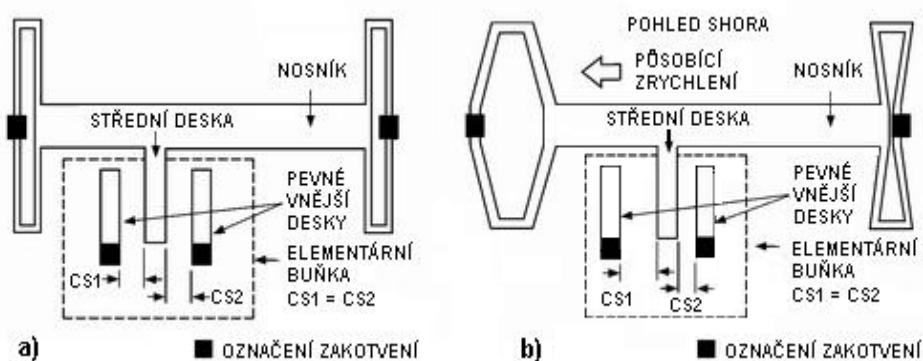




Obrázek 3: Princip kapacitního akcelerometru [2].

Hmota uložená svými konci ve dvou membránách nebo pružinách se pohybuje souhlasně se zrychlením. Jedna elektroda kondenzátoru je připojena k této hmotě, druhá je pevně uchycená. Pokud je akcelerometr vystaven zrychlení, mění se vzdálenost mezi elektrodami a tím se mění i hodnota kapacity kondenzátoru.

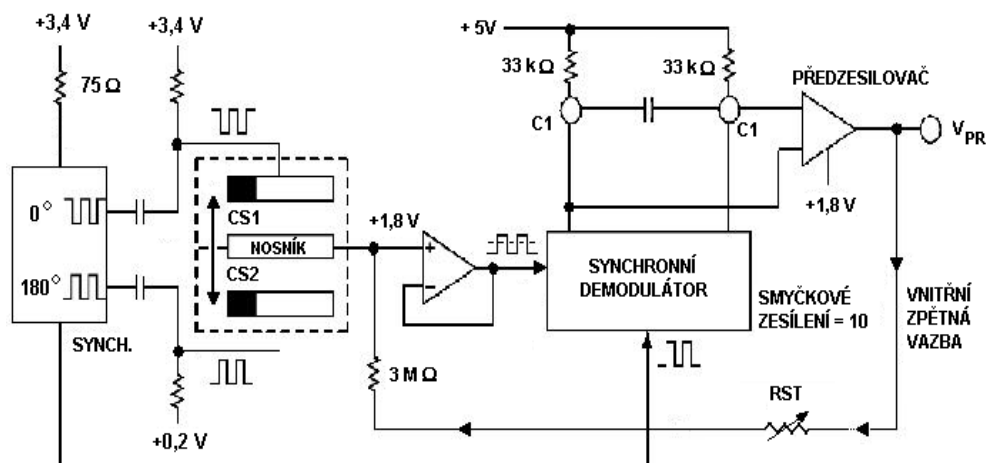
Struktura snímače umožňuje měřit kladná i záporná, statická i dynamická zrychlení. Na integrovaném obvodu je umístěn polykřemíkový mikromechanický snímač a obvody pro zpracování signálu ze snímače. Struktura snímače je na povrchu křemíkového monokrystalu, jak je na obrázku 4 a). Křemíkové pružiny umožňují pohyb celé mechanické struktury po povrchu monokrystalu a zároveň poskytují mechanický odpor síle vzniklé zrychlením, jak je vidět na obrázku 4 b).



Obrázek 4: Struktura snímače a) bez působení zrychlení (0 g) b) při působení zrychlení [1].

Prohnutí a deformace struktury jsou převedeny na změnu kapacity diferenciálního kondenzátoru. Ten je složen ze dvou pevných desek a střední desky pevně spojené s deformujícím se nosníkem. Diferenciální kondenzátor tvoří dělič pro dva obdélníkové signály stejné amplitudy vzájemně posunuté ve fázi o  $180^\circ$ , které budí jeho pevné desky. Působícím zrychlením dojde k posunutí střední desky a tím dojde ke změně dělicího poměru diferenciálního kondenzátoru. Na výstupu se objeví obdélníkový signál o amplitudě úměrné hodnotě zrychlení a fázi, která nese informaci o směru pohybu nosníku, tedy o směru působícího zrychlení.

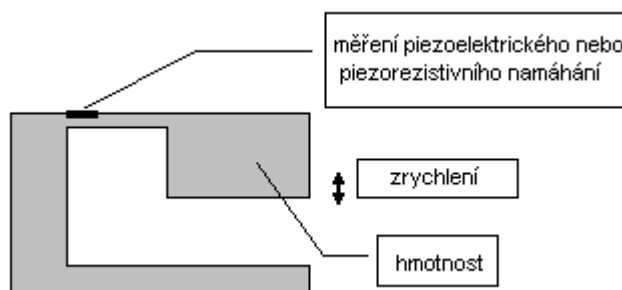
Obrázek 5 ukazuje principiální schéma vyhodnocení obdélníkového signálu. Ten je přiveden do synchronního demodulátoru spolu s hodinovým signálem z generátoru. Demodulátor potlačí veškeré signály, které nejsou synchronní s hodinovým signálem. Signál, který je ve fázi s hodinovým signálem, je pak vyhodnocen jako kladné napětí na výstupu demodulátoru, signál posunutý o  $180^\circ$  jako napětí záporné. Výstup z demodulátoru je pak přiveden na vstup předzesilovače, který provádí kalibraci na dané napětí pro zrychlení 0 g. Vnitřní zpětná vazba vyvolává vnitřní elektrostatickou sílu, která vrací nosník do původní pozice.



Obrázek 5: Principiální schéma akcelerometru [1].

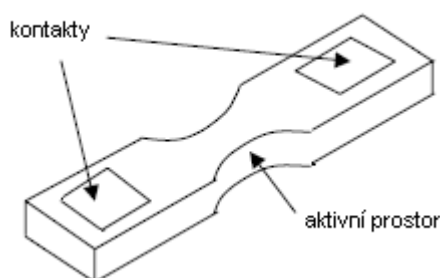
### 2.3 PRINCIP PIEZOREZISTIVNÍHO AKCELEROMETRU [2]

Hlavní princip piezorezistivního akcelerometru spočívá v tom, že seismická hmotnost je závislá na pružném návratu plochy vybavené dvěma nebo čtyřmi piezorezistivními měřiči zapojenými do Wheatstonova můstku. Ohýbání plochy je přenášeno do měřené deformace. Tato deformace dovolí změnu zrychlení na elektrickou hodnotu a získaný signál je úměrný zrychlení pohybujícího se objektu. Princip je ukázán na obrázku 6.



**Obrázek 6: Princip piezorezistivního akcelerometru [2].**

Namáhání může být u piezorezistivní metody měřeno například křemíkovým polovodičovým snímačem. Plocha snímače piezorezistivního akcelerometru je na obrázku 7.



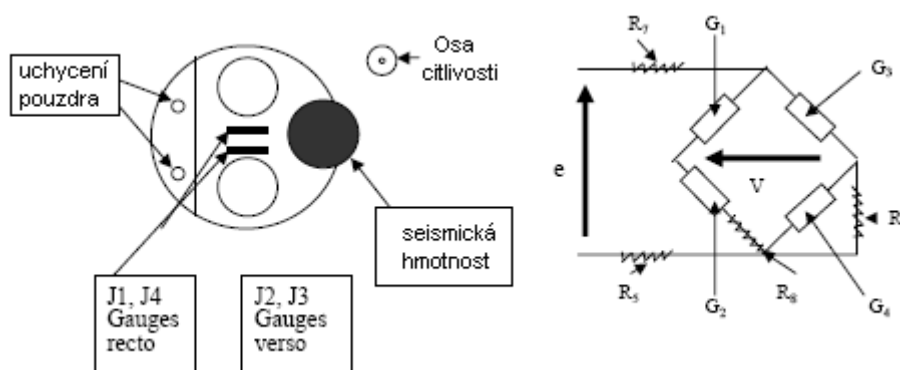
**Obrázek 7: Plocha měřidla piezorezistivního akcelerometru [2].**

Snímač má dvě relativně široké plošky, spojené dohromady úzkým středovým prvkem. V tomto uspořádání je soustředěno namáhání v miniaturním prvku, jehož povrch je leštěný a zbavený namáhání, které je nežádoucí. Díky

širokým kontaktům plošek na koncích bude namáhání indukované fixací zanedbatelné. Tyto snímače jsou vyráběny z jednoduchého křemíkového krystalu s vysokým stupněm čistoty.

Na obrázku 8 vpravo je detail vytvoření plošky snímače. Na obrázku 8 vlevo je zapojení do Wheatstonova můstku. Odpory R1 až R4 jsou měřidla, odpory R5 až R8 slouží ke kompenzaci kolísání citlivosti.

Výhodami piezorezistivního akcelerometru je vysoká citlivost, nízká cena, poměrně vysoká šířka frekvenčního pásma, jednoduché zpracování dat a možná miniaturizace.



**Obrázek 8: Příklad návrhu měření piezorezistivním akcelerometrem v nízkých kmitočtech [2].**

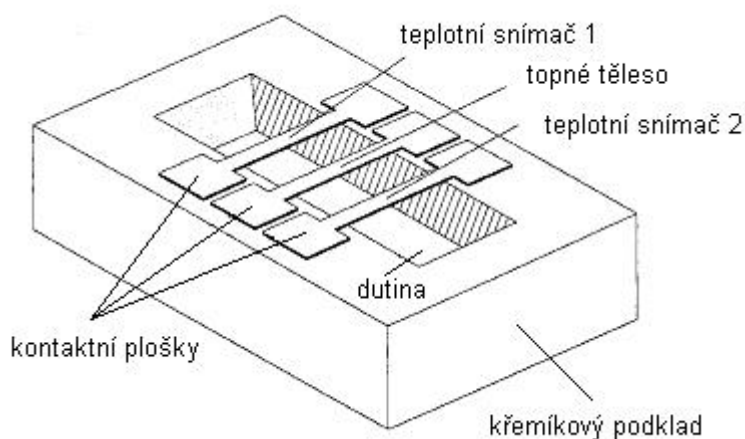
Mezi nevýhody patří to, že pro tento akcelerometr není právě příznačná linearita, akcelerometr se vyznačuje vysokou citlivostí na změnu teploty, má průměrný výkon, je citlivý na vibrace a otřesy, vyžaduje velmi stabilní zdroj napájení a při zvyšování šířky pásma dochází ke snižování citlivosti akcelerometru.

#### 2.4 PRINCIP TEPELNÉHO AKCELEROMETRU [3, 4, 5]

Teplný akcelerometr je jednoduchý, spolehlivý a levný snímač. Poprvé byl představen v roce 1991. Na rozdíl od typických akcelerometrů pracuje tento s úplně odlišným principem. Opět může být umístěn na jeden integrovaný obvod. Tento typ akcelerometru pracuje na principu šíření tepla malou bublinou horkého vzduchu

v uzavřené komoře. Snímač má citlivost 0,6 mg, která se teoreticky může rozšířit až pod úroveň  $\mu\text{g}$  [4]. Uspořádání akcelerometru je na obrázku 9.

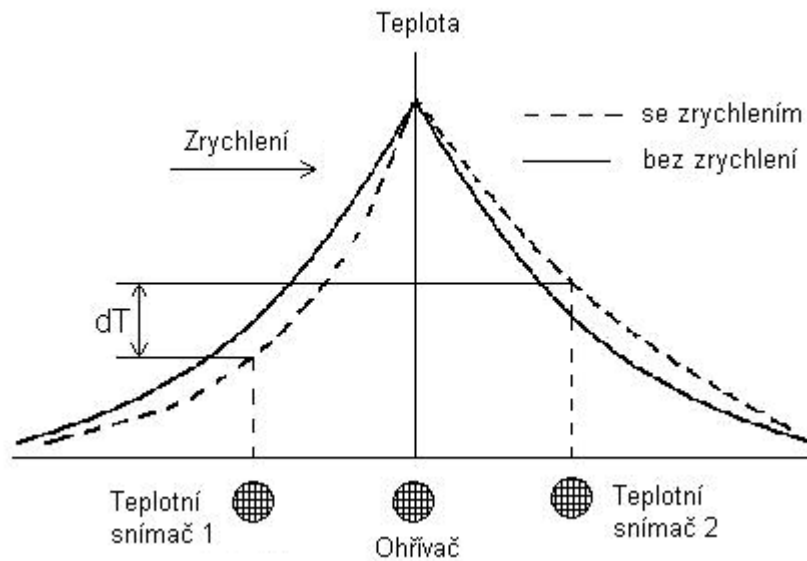
Má jednoduchou strukturu. Skládá se z malého křemíkového podkladu s vyleptanou dutinou kvůli termální izolaci. Uložené centrální topné těleso se zahřívá a snižuje hustotu vzduchu, který jej obklopuje. Teplotní rozdíl měří dva snímače teploty, stejně vzdálené od topného tělesa. Snímač je zapouzdřen v zatavené komoře, aby bylo zabráněno toku vnějšího rušivého vzduchu.



**Obrázek 9: Uspořádání tepelného akcelerometru [4].**

Symetrický tvar teploty vytvořený topným tělesem, ukázaný na obrázku 10 plnou čarou, nemá za následek žádný výstup. Teprve když začne působit zrychlení, je tato symetrie narušena, jak je ukázáno na stejném obrázku čárkovanou čarou. Následný teplotní rozdíl  $dT$  měřený dvěma teplotními snímači vytváří výstup odpovídající použitému zrychlení a tím také velikosti náklonu.

Rozměry křemíkového podkladu jsou přibližně 3 mm až 5 mm. Dutina (1,5 mm až 3mm) je tvořena specifickým plynem. Topné těleso a teplotní snímače jsou uloženy uprostřed dutiny, která je přibližně 480  $\mu\text{m}$  hluboká [4]. Akcelerometr je uložen v 16-ti bez pinovém mosazném pouzdře.



**Obrázek 10: Symetrický tvar teploty tvořený centrálním topným tělesem je narušen použitým zrychlením [4].**

Při experimentálních měřeních s tepelným akcelerometrem je pro zjištění průměrné teploty použit elektrický odpor.

$$T = \frac{R(T) - T_0}{\alpha \cdot R_0}$$

**Rovnice 4**

kde  $T$ ..... je zjištěná průměrná teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R(T)$ ..... je elektrický odpor ( $\Omega$ )

$R_0$ ..... je elektrický odpor při teplotě  $0^{\circ}\text{C}$  ( $\Omega$ )

$\alpha$  ..... je teplotní součinitel odporu  $^{\circ}\text{C}^{-1}$

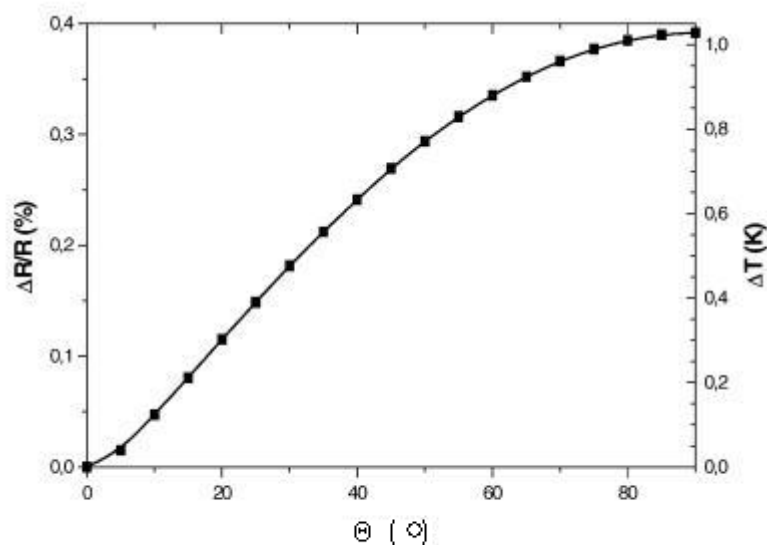
Pro topný rezistor je elektrický odpor odečten z Ohmova zákona:

$$R(T) = \frac{U}{I}$$

**Rovnice 5**

Měření náklonu je uskutečněno připevněním snímače na vertikální úhloměr. Osa rotace je horizontální a rovnoběžná s osou rezistoru. Poloha snímače je dána úhlem  $\theta$ , což je úhel mezi normálovým vektorem povrchu čipu a vektorem gravitačního zrychlení. Závislost je ukázána na obrázku 11.

V těchto podmínkách závisí použité zrychlení na sinu úhlu náklonu. Při měření vysokých zrychlení již není odezva snímače lineární. Pro 1g, když je teplota topného tělesa 200 °C, je rozdíl teploty mezi dvěma snímači typicky asi 1 °C. Aby byla odezva lineární i pro vysoké zrychlení, musel by být teplotní rozdíl mnohem vyšší, než je teplota topného tělesa, což je nemožné. U snímačů bez seismické hmoty je poměrně dobrá linearita v rozsahu 0 – 3g, zatímco u tepelných akcelerometrů se seismickou hmotou je lineární odezva pouze v rozsahu 0 až 0,4 g [3]. Šířka pásma snímače při použití sinusoidálního zrychlení je přibližně 20 Hz. Pro zvýšení šířky pásma je možné buď snížit objem dutiny nebo použít jiný plyn, protože vlastnosti plynu a objem pouzdra jsou pravděpodobně kritickými parametry časové odezvy snímače.



$\Delta R/R$  – poměr změny odporu způsobené zrychlením vůči odporu při zrychlení 0 g

**Obrázek 11: Závislost změny odporu na úhlu náklonu [3].**

Při proměřování tvaru teplotní charakteristiky tepelného akcelerometru bylo zjištěno strmé klesání se zvyšující se vzdáleností mezi topným tělesem a snímačem teploty. Citlivost je maximální, pokud je vzdálenost mezi topným tělesem a snímačem teploty asi 300 μm až 500 μm. Je zřejmé, že citlivost je úměrná síle ohřevu a snižuje se v závislosti na stoupající okolní teplotě [3].

## 2.5 ZASTOUPENÍ KAPACITNÍHO, PIEZOREZISTIVNÍHO A TEPELNÉHO AKCELEROMETRU NA TRHU

Jedním z hlavních výrobců kapacitního akcelerometru je firma Analog Devices. V tabulce 1 jsou uvedeny parametry kapacitního akcelerometru tohoto výrobce pracujícího s nízkým zrychlením. V tabulce 2 jsou pak parametry kapacitních akcelerometrů dalších výrobců. V tabulce 3 jsou uvedeny parametry piezorezistivních akcelerometrů Panasonic a v tabulce 4 jsou uvedeny tepelné akcelerometry výrobce Memsic.

| typ     | počet os | rozsah | citlivost | citlivostní přesnost (%) | typ výstupu | max. šířka pásma (kHz)     | hustota šumu (ug/rtHz)    | napětový zdroj (V)              | proudový zdroj (mA)  | teplotní rozsah (°C) | cena v dolarech | max. odchylka ve ° pro 45° |
|---------|----------|--------|-----------|--------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------------------|
| ADXL103 | 1        | ±1.7g  | 1000 mV/g | ±4                       | Analog      | 2.5                        | 110                       | $\frac{5}{(3 \text{ to } 6)}$   | 0.7                  | - 40 až 125 °C       | \$7.75          | 4,58                       |
| ADXL203 | 2        | ±1.7g  | 1000 mV/g | ±4                       | Analog      | 2.5                        | 110                       | $\frac{5}{(3 \text{ to } 6)}$   | 0.7                  | - 40 až 125 °C       | \$12.00         | 4,58                       |
| ADXL204 | 2        | ±1.7g  | 620 mV/g  | ±4                       | Analog      | 2.5                        | 170                       | $\frac{3.3}{(3 \text{ to } 6)}$ | 0.5                  | - 40 až 125 °C       | \$12.00         | 4,58                       |
| ADXL213 | 2        | ±1.2g  | 30 %/g    | ±10                      | PWM         | 2.5                        | 160                       | $\frac{5}{(3 \text{ to } 6)}$   | 0.7                  | - 40 až 85 °C        | \$9.70          |                            |
| ADXL330 | 3        | ±3g    | 300 mV/g  | ±10                      | Analog      | $\frac{1.6(X,Y)}{0.55(Z)}$ | $\frac{280(X,Y)}{350(Z)}$ | 1.8 to 3.6                      | $\frac{0.18}{@1.8V}$ | - 20 až 70 °C        | \$5.45          | 11,4                       |
| ADXL320 | 2        | ±5g    | 174 mV/g  | ±10                      | Analog      | 2.5                        | 250                       | 2.4 to 6                        | 0.5                  | - 20 až 70 °C        | \$3.75          | 11,4                       |
| ADXL321 | 2        | ±18    | 57 mV/g   | ±10                      | Analog      | 2.5                        | 320                       | 2.4 to 6                        | 0.5                  | - 20 až 70 °C        | \$3.75          | 11,4                       |
| ADXL322 | 2        | ±2g    | 420 mV/g  | ±10                      | Analog      | 2.5                        | 220                       | 2.4 to 6                        | 0.5                  | - 20 až 70 °C        | \$3.75          | 11,4                       |
| ADXL323 | 2        | ±3g    | 300 mV/g  | ±10                      | Analog      | 1.6                        | 280                       | 1.8 to 5.25                     | $\frac{0.18}{@1.8V}$ | - 20 až 70 °C        | \$3.50          | 11,4                       |
| ADXL311 | 2        | ±2g    | 174 mV/g  | ±15                      | Analog      | 6                          | 300                       | 2.4 to 5.25                     | 0.4                  | 0 až 70 °C           | \$4.25          | 16,7                       |
| ADXL202 | 2        | ±2g    | 12.5 %/g  | ±16                      | PWM         | 6                          | 200                       | 3 to 5.25                       | 0.6                  | - 40 až 85 °C        | \$8.50          |                            |
| ADXL210 | 2        | ±10g   | 4.0 %/g   | ±20                      | PWM         | 6                          | 200                       | 3 to 5.25                       | 0.6                  | - 40 až 85 °C        | \$8.50          |                            |

Tabulka 1: Parametry kapacitního akcelerometrů ADXL firmy Analog Devices

[1].



| výrobce                  | typ      | počet os | rozsah  | citlivost            | citlivostní přesnost (%) | max. šířka pásma (kHz) | hustota šumu (ug/rthz) | napětový zdroj (V) | teplotní rozsah (°C)                     | rozměry        |
|--------------------------|----------|----------|---------|----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--|----------------|
| freescala                | MMA2260D | X        | ± 1,5 g | 1200 mV/g            |                          | 0,05                   | 350                    | 5                  | -40 <sup>0</sup> C až 105 <sup>0</sup> C |                |
|                          | MMA6260Q | X - Y    | ± 1,5 g | 800/800 mV/g         |                          | 0,05                   | 300                    | 3,3                | -20 <sup>0</sup> C až 85 <sup>0</sup> C  | 6x6x1,98       |
|                          | MMA7260Q | XYZ      | ± 1,5 g | 800/600/300/200 mV/g |                          | 0,35 (XY)<br>0,15 (Z)  | 350                    | 3,3                | -20 <sup>0</sup> C až 85 <sup>0</sup> C  | 6x6x1,45       |
| Crosbow Inertial systems | CXL01LF3 | 3        | ± 1 g   | 2000 mV/g            | ± 5                      | 0,05                   | 70                     | + 5 ± 0,25         | -40 <sup>0</sup> C až 85 <sup>0</sup> C  | 19,8x44,5x27,2 |
|                          | CXL02LF3 | 3        | ± 2 g   | 1000 mV/g            | ± 5                      | 0,05                   | 140                    | + 5 ± 0,25         | -40 <sup>0</sup> C až 85 <sup>0</sup> C  | 19,8x44,5x27,2 |

**Tabulka 2: Parametry kapacitních akcelerometrů pracujících s nízkým zrychlením od ostatních výrobců [11, 13].**

| výrobce                  | typ      | počet os | rozsah | citlivost | příčná citlivost | napětový offset | spínací doba | napětový zdroj | teplotní rozsah                         | rozměry            |
|--------------------------|----------|----------|--------|-----------|------------------|-----------------|--------------|----------------|---|--------------------|
| Panasonic<br>Matshushita | AGS61231 | 3        | ± 2 g  | 500 mV/g  | ± 6 %            | 1,5 V           | 20 ms        | 3 V            | -20 <sup>0</sup> C až 70 <sup>0</sup> C | 4,6 x 4,6 x 1,3 mm |
|                          | AGS61331 | 3        | ± 3 g  | 333 mV/g  | ± 6 %            | 1,5 V           | 20 ms        | 3 V            | -20 <sup>0</sup> C až 70 <sup>0</sup> C | 4,6 x 4,6 x 1,3 mm |

**Tabulka 3: Parametry piezorezistivních akcelerometrů[16].**

| výrobce | typ      | počet os | rozsah | citlivost | max. šířka pásma (kHz) | hustota šumu (ug/rthz) | napětový zdroj (V) | teplotní rozsah (°C)                     | rozměry  |
|---------|----------|----------|--------|-----------|------------------------|------------------------|--------------------|--|----------|
| memsic  | MXD2020E | 2        | ± 1 g  | 20 %/g    | 0,1                    | 200                    | -0,5 až 7          | -40 <sup>0</sup> C až 105 <sup>0</sup> C | 5x5x2    |
|         | MXD6125Q | 2        | ± 1 g  | 12,5 %/g  | 0,1                    | 130                    | -0,5 až 7          | -40 <sup>0</sup> C až 105 <sup>0</sup> C | 5x5x1,55 |

**Tabulka 4: Parametry tepelných akcelerometrů MEMSIC [14].**

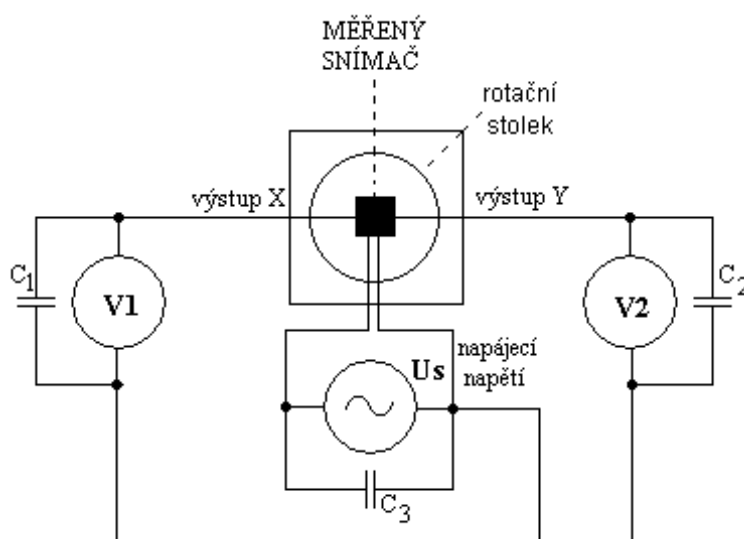
### 3. OVĚŘOVÁNÍ PARAMETRŮ SNÍMAČŮ DOSTUPNÝCH NA UAMT

Při ověřování snímačů bylo nutné se nejprve seznámit s parametry jednotlivých akcelerometrů. Proto byl vypracován podrobný popis každého testovaného akcelerometru na základě údajů, které byly získány z katalogových listů od výrobců. Popisy všech měřených snímačů jsou uvedeny v příloze, aby nebyla zbytečně zatěžována praktická část této práce. Po seznámení s vlastnostmi snímačů byla s akcelerometry využívajícími Zemské zrychlení provedena praktická měření.

Ověřovány byly akcelerometry výrobců Analog Devices, Freescale a ST Microelectronic, které využívají kapacitní princip a také snímače Panasonic Matsushita pracující s piezorezistivní metodou. Principy obou metod byly popsány v předchozí kapitole. V následujících podkapitolách budou parametry snímačů ověřeny a rozebrány na základě provedených měření.

#### 3.1 POSTUP MĚŘENÍ

Při proměřování všech parametrů ověřovaných snímačů byl dodržen v zásadě stejný postup. Obvod byl zapojen podle schématu na obrázku 12.



Obrázek 12: Schéma zapojení pro měření s akcelerometry.

Měřený akcelerometr byl připevněn k rotačnímu stolku. Snímač byl napájen zdrojem napětí ( $U_s$ ) o hodnotě, kterou udává výrobce. Jednotlivé výstupy snímače ( $X$  a  $Y$ ) byly snímány pomocí digitálních multimetrů ( $V_1$  a  $V_2$ ). Pokud byla nutná filtrace výstupu, byly do obvodu zapojeny kondenzátory ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ) s hodnotami udávanými výrobcem.

### 3.1.1 Použité přístroje

Při ověřování parametrů jednotlivých snímačů byly použity následující měřicí přístroje:

- 2 x digitální multimetr Agilent 34401A ( $V_1$ ,  $V_2$ )
- zdroj napětí Agilent E3631A DC 0 – 6 V, 5 A, ( $U_s$ )
- rotační stůl
- kabely
- měřené akcelerometry
  - ADXL203, ADXL311 (Analog Devices)
  - LIS2L02AS4, LIS3L06AL (STMicroelectronics)
  - MMA7260QT (Freescale)
  - AGS61331, AGS61231 (Panasonic Matsushita)

### 3.1.2 Postup při zpracování naměřených hodnot

Poté, co byl obvod zapojen podle výše zmíněných údajů, mohlo být provedeno samotné měření. Snímač připevněný k rotačnímu stolku se otáčel v rozmezí od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  a hodnoty napětí na dvou voltmetrech ( $V_1$  a  $V_2$ ) byly odečítány vždy po  $10^\circ$ . Tak byly získány dva fázově posunuté vektory výstupních napětí ( $U_X$  a  $U_Y$ ) pro každý ověřovaný akcelerometr. Na základě těchto charakteristik mohlo být provedeno vyhodnocení parametrů jako je citlivost, offset a nelinearita každého akcelerometru, porovnání těchto parametrů s hodnotami, které uvádí výrobce v katalogových listech a také vzájemné srovnání akcelerometrů stejného typu. Z důvodu věrohodnosti byla měření opakována vícekrát, proto mohly být vyčísleny i nejistoty měření. Při vyhodnocování byly použity dva postupy zpracování naměřených údajů.

### 3.1.3 Postup při vyhodnocování naměřených údajů 1. metodou

Při zpracování naměřených hodnot touto metodou je vyhodnocována závislost výstupního napětí  $U_X$  a  $U_Y$  na úhlové výchylce. Pro každý akcelerometr byly naměřeny dva průběhy výstupních napětí, proto získáme dvě rovnice (pro napětí v ose  $X$  a v ose  $Y$ ).

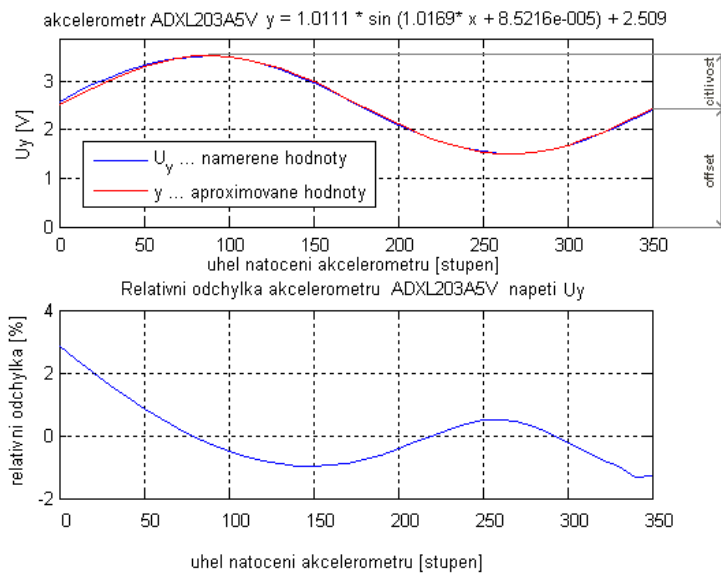
Tato závislost má tvar sinusového průběhu a může být popsána obecným vztahem:

$$U = O \cdot \sin(P \cdot \varphi + R) + S \quad \text{Rovnice 6}$$

kde  $U$  je hodnota napětí, která se mění v závislosti na úhlu natočení ( $\varphi$ ),  
 $O$  je citlivost akcelerometru,  
 $P$  je perioda měření ( $P = 1 \Rightarrow 1 \times 360^\circ$ ),  
 $R$  je počáteční nastavení úhlu,  
 $S$  je offset akcelerometru.

V těchto rovnicích budou u jednotlivých akcelerometrů parametry  $O$  (citlivost),  $P$  (perioda měření), i  $S$  (offset napětí akcelerometru) téměř shodné. Výrazně rozdílný je pouze parametr  $R$ , který označuje fázový rozdíl mezi napětím  $U_X$  a  $U_Y$ .

Naměřený průběh je porovnáván se sinusovým průběhem vygenerovaným v programu MATLAB. Tento generovaný průběh byl získán na základě přesných hodnot parametrů z katalogových listů (citlivosti a offsetu), a proto je považován za skutečný průběh. Srovnávány tedy byly naměřené a skutečné průběhy napětí  $U_X$  i  $U_Y$ . Díky tomu mohla být vypočtena relativní chyba měření v ose  $X$  i  $Y$ , a její průběh je pro každý snímač zobrazen v příslušném grafu. Z naměřených průběhů byly rovněž určeny parametry akcelerometru (citlivost, offset, nelinearita), které byly porovnány s hodnotami od výrobců. Jak takovéto vyhodnocení naměřených údajů vypadá je znázorněno na obrázku 13. V horní části obrázku je pro ukázkou zobrazen naměřený a skutečný průběh napětí  $U_Y$  akcelerometru ADXL 203, vzorek A, v dolní části obrázku je potom relativní odchylka těchto dvou průběhů.



**Obrázek 13: Vyhodnocení a porovnání naměřených hodnot se skutečnými údaji, relativní odchylka.**

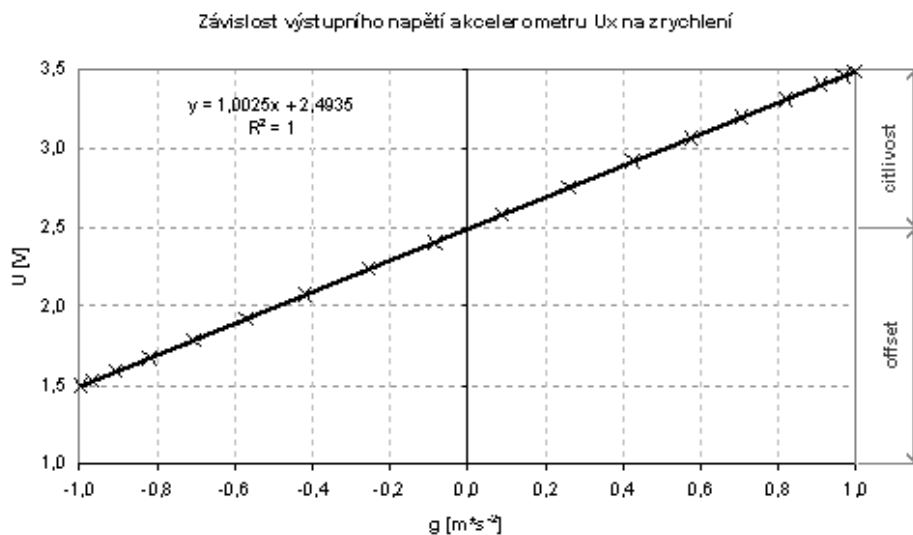
Z rovnice  $U_Y = (1,011 \cdot \sin \varphi + 2,509) \pm 0,022V$  je zřejmé, že citlivost má hodnotu 1,011 V/g a hodnota offsetu je 2,509 V (výrobce uvádí citlivost 1 V/g a offset 2,5 V).

Stejným způsobem jsou zpracovány všechny ostatní akcelerometry. Vzhledem k tomu, že byl každý ověřovaný akcelerometr měřen opakovaně, mohla být rovněž u jednotlivých snímačů vyčíslena nejistota měření. Nejistota měření u akcelerometru ADXL 203 A je  $\pm 0,022$  V.

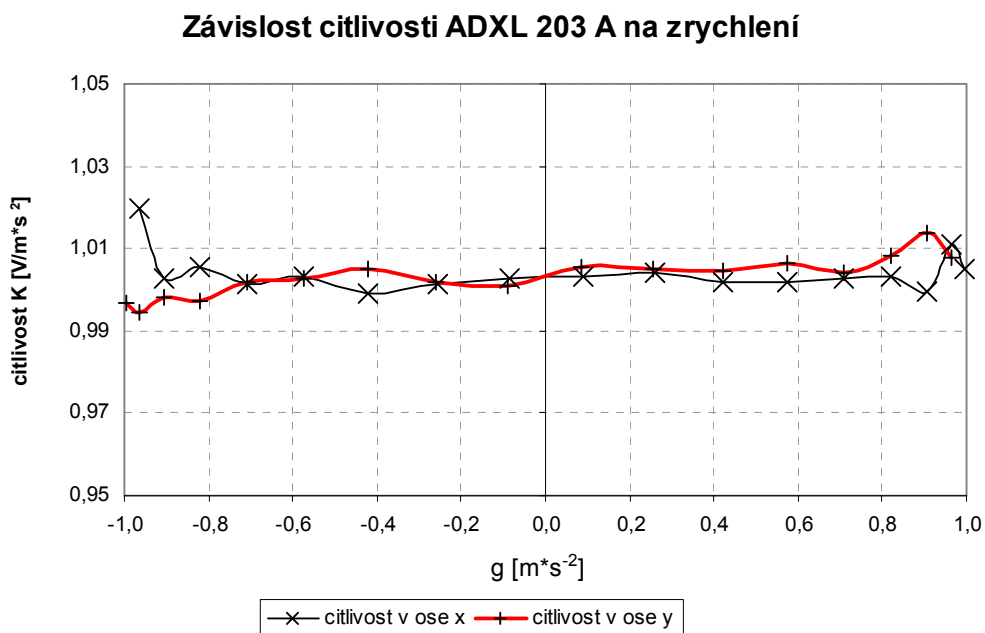
### 3.1.4 Postup při vyhodnocování naměřených údajů 2. metodou [19]

V této metodě je vyhodnocována závislost výstupního napětí  $U_X$  a  $U_Y$  na zrychlení  $g$ , které nabývá hodnot od -1 do +1 [ $m \cdot s^{-2}$ ]. Z přímkové závislosti výstupního napětí  $U$  na zrychlení  $g$  je možné zjistit jak offset akcelerometru, tak i hodnotu citlivosti. Postup je patrný z obrázku 14. V tomto případě se jedná o závislost napětí  $U_X$  akcelerometru ADXL 203, vzorku A. Citlivost je směrnice zobrazené přímky. Z rovnice regrese, která má pro tento příklad tvar

$U_x = 1,0025 \cdot g + 2,4935$ , je zřejmé, že citlivost je 1,0025 V/g a hodnota offsetu je 2,4935 V (výrobce uvádí citlivost 1 V/g a offset 2,5 V).



Obrázek 14: Vyhodnocení naměřených hodnot akcelerometru ADXL 203 A pomocí 2. metody.



Obrázek 15: Závislost citlivosti akcelerometru ADXL 203 A na zrychlení.

Stejný postup byl u této metody použit pro všechny ověřované akcelerometry. Zjištěné parametry byly opět porovnány s údaji od výrobců, které jsou uvedeny v katalogových listech. Naměřené a vypočtené hodnoty napětí jednotlivých snímačů budou zpracovány a jejich parametry uvedeny v následujících kapitolách.

Na rozdíl od 1. metody, při které bylo akcelerometrem otáčeno ručně, byla tato metoda již automatizována. Rotačním stolem, ke kterému byl akcelerometr připevněn, otáčel krokový motor řízený počítačem.

### 3.1.5 Postup při zjišťování nejistot měření a nelinearity měření

Z důvodu věrohodnosti bylo každé měření opakováno vícekrát. Postup při zjišťování nejistot typu A a B bude popsán a také ukázán na příkladu pro akcelerometr ADXL 203, vzorek C, napětí  $U_x$ , které bylo měřeno 4x. Při vyčíslení nejistot u všech ostatních akcelerometrů byl dodržen stejný postup.

#### Nejistota typu A pro úhel natočení $\varphi = 90^\circ$ :

Pro ukázkou je zde uveden řádek tabulky s úhlem natočení  $\varphi = 90^\circ$ , pro který je nejistota A počítána.

Napájecí napětí  $U_s = 5\text{ V}$

| úhel<br>natočení | naměřené hodnoty napětí |        |           |        |           |        |           |        | průměrná hodnota<br>vypočtené hodnoty |        |
|------------------|-------------------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|---------------------------------------|--------|
|                  | 1. měření               |        | 2. měření |        | 3. měření |        | 4. měření |        | osa X                                 | osa Y  |
| $\varphi$        | $U_x$                   | $U_y$  | $U_x$     | $U_y$  | $U_x$     | $U_y$  | $U_x$     | $U_y$  | $U_x$                                 | $U_y$  |
| $[\circ]$        | $[V]$                   | $[V]$  | $[V]$     | $[V]$  | $[V]$     | $[V]$  | $[V]$     | $[V]$  | $[V]$                                 | $[V]$  |
| 90               | 2,5548                  | 3,5674 | 2,5563    | 3,5669 | 2,5561    | 3,5672 | 2,5579    | 3,5668 | 2,5563                                | 3,5671 |

Akcelerometr ADXL 203 C.

**Tabulka 5: Řádek tabulky vypočtených a naměřených hodnot akcelerometru ADXL 203, vzorek C.**

Z naměřených hodnot byla pro každý úhel natočení vypočítána průměrná hodnota napětí  $U_x$  podle následujícího vztahu:

$$u_x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{4} \cdot (2,5548 + 2,5563 + 2,5561 + 2,5579) = 2,5563V \quad \text{Rovnice 7}$$

Podle vztahu 8 byla zjištěna nejistota typu A.

$$u_A = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - u_x)^2} \quad \text{Rovnice 8}$$

$$\begin{aligned} u_A = s_{\bar{x}} &= \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - u_x)^2} = \\ &= \sqrt{\frac{(2,5548 - 2,5563)^2 + (2,5563 - 2,5563)^2 + (2,5561 - 2,5563)^2 + (2,5579 - 2,5563)^2}{4(4-1)}} = \\ &= 0,0006V \end{aligned}$$

### Nejistota typu B:

Nejistoty B jsou stanoveny jinak než opakovaným měřením. Standardní nejistoty typu B  $u_{Bz}$  se u každého zdroje nejistot určí převzetím hodnot z technické dokumentace nebo odhadem. Postup odhadu je takový, že se nejprve odhadne  $\pm\Delta_{zmax}$ , jejíž velikost se volí tak, aby její překročení bylo málo pravděpodobné. Dále je nutné zvolit rozdělení pravděpodobnosti, které nejlépe vystihuje výskyt hodnot v intervalu  $\pm\Delta_{zmax}$ . V tomto případě bylo zvoleno rovnoměrné rozdělení, kterému odpovídá koeficient  $\chi = \sqrt{3}$  [17]. Výpočet nejistoty B je uveden v následujících vztazích:

$$u_{Bz} = \frac{\Delta_{zmax}}{\chi}, \quad u_{Bz} = \sqrt{\sum_{z=1}^n u_{Bz}^2} \quad \text{Rovnice 9, 10}$$

Přestože během měření bylo vynaloženo úsilí, aby se všechny dále zmíněné vlivy projevíly na výsledcích měření co nejméně, nelze je zcela zanedbat. Proto zde budou uvedeny a bude odhadnuta jejich velikost.

Během měření mohlo k nejistotám B dojít:

- přiipevněním akcelerometru k rotačnímu stolku tak, že výchozí poloha akcelerometru nebyla zcela nulová,  $\Delta_{zmax1} = 2^\circ$
- nejistotou odečtu,  $\Delta_{zmax2} = 0,5^\circ$



$$u_{B1} = \sin \left( \sqrt{\left( \frac{\Delta_{z \max 1}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta_{z \max 2}}{\sqrt{3}} \right)^2} \right) = \sin \left( \sqrt{\left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left( \frac{0,5}{\sqrt{3}} \right)^2} \right) = 0,02^\circ \quad \text{Rovnice 11}$$

(tento zdroj nejistoty se projevil ve vztahu číslo 6 v parametru  $R$ )

- odchýlením svislé plochy rotačního stolku, ke kterému byl akcelerometr připevněn, od kolmice k Zemskému povrchu,  $\Delta_{z \max} = 5^\circ$

$$u_{B2} = O \cdot \frac{\cos 0^\circ - \cos \Delta_{z \max}}{\sqrt{3}} = 1 \cdot \frac{\cos 0^\circ - \cos 5^\circ}{\sqrt{3}} = \frac{1 - 0,9962}{\sqrt{3}} = 0,0022^\circ \quad \text{Rovnice 12}$$

(tento zdroj nejistoty se projevil ve vztahu č. 6 v parametru  $O$ , který představuje citlivost akcelerometru)

Kombinovaná nejistota  $u_C$  je spočítána sloučením (geometrickým součtem) nejistoty A a B. Byla vyhodnocena jako součet nejvyšších možných hodnot dílčích nejistot  $u_A$ ,  $u_{B1}$  a  $u_{B2}$ . Hodnota  $u_C$  tak vyjadřuje nejhorší možnou nejistotu, která mohla při měření nastat. Nejistota  $u_{B1}$  byla nejvyšší při natočení  $\varphi = 90^\circ$ , nejistota  $u_{B2}$  byla nejvyšší při  $\varphi = 180^\circ$ .

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 \cdot (O \cdot \cos(270^\circ + x))^2 + u_{B2}^2 \cdot (\sin(270^\circ + x))^2} \quad \text{Rovnice 13}$$

$$\begin{aligned} u_C &= \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 \cdot (O \cdot \cos(270^\circ + x))^2 + u_{B2}^2 \cdot (\sin(270^\circ + x))^2} = \\ &= \sqrt{0,0006^2 + 0,02^2 \cdot (O \cdot \cos(270^\circ + x))^2 + 0,0022^2 \cdot (\sin(270^\circ + x))^2} = \\ &= \sqrt{0,0006^2 + 0,02^2 \cdot (\cos(270^\circ + 90))}^2 + 0,0022^2 \cdot (\sin(270^\circ + 180))}^2} = 0,022V \end{aligned}$$

Nelinearita napětí  $U_X$ :

$$\delta_{\sin[\%]} = \frac{\Delta U_{\max}}{2 \cdot O} \cdot 100 = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1} \cdot 100 = 0,0597\% \quad \text{Rovnice 14}$$

Nelinearita napětí  $U_Y$ :

$$\delta_{\sin[\%]} = \frac{\Delta U_{\max}}{2 \cdot O} \cdot 100 = \frac{4,8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1} \cdot 100 = 0,2353\% \quad \text{Rovnice 15}$$

Závěry vyplývající z těchto rozdílných postupů a hodnoty jednotlivých parametrů byly navzájem srovnány v přehledných tabulkách, které jsou umístěny v příslušných kapitolách pro dané snímače.

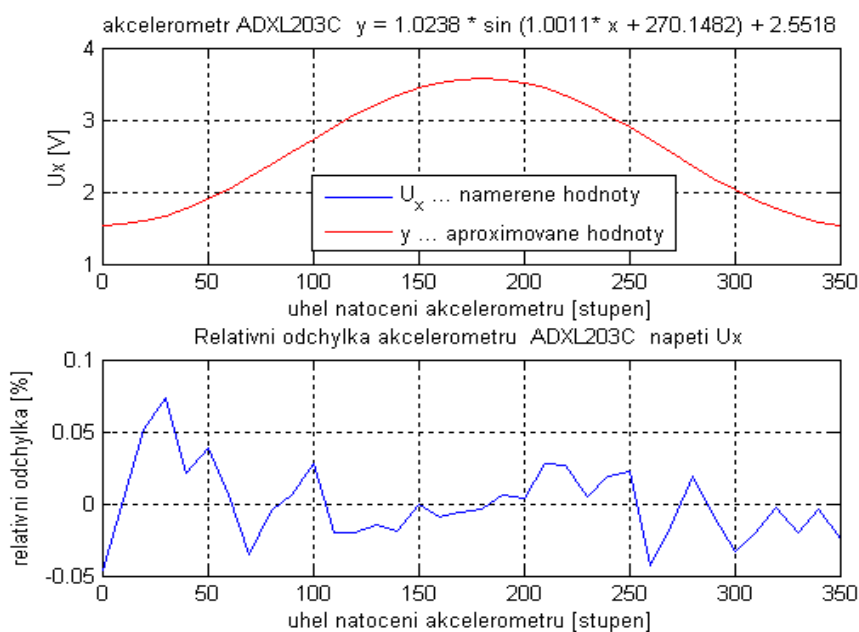
Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro jednotlivé snímače vztahující se k oběma použitým metodám jsou uvedeny na CD disku, který je přiložen k této práci.

### **3.2 AKCELEROMETR ADXL 203 OD ANALOG DEVICES**

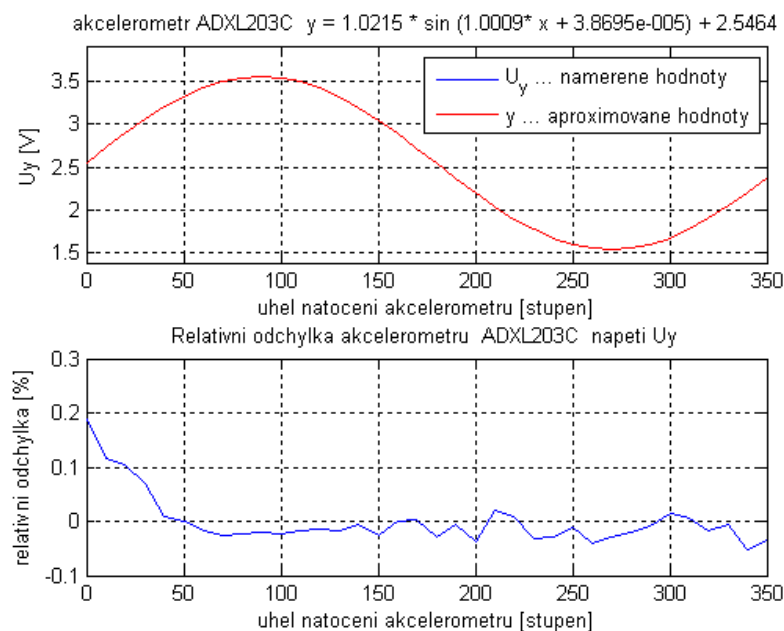
Nejprve byly ověřovány 3 vzorky akcelerometru ADXL 203 od výrobce Analog Devices, které byly z důvodu rozlišení pracovně označeny jako vzorky A, B a C. Podrobné údaje a parametry tohoto akcelerometru jsou uvedeny v příloze 1.

#### **3.2.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou**

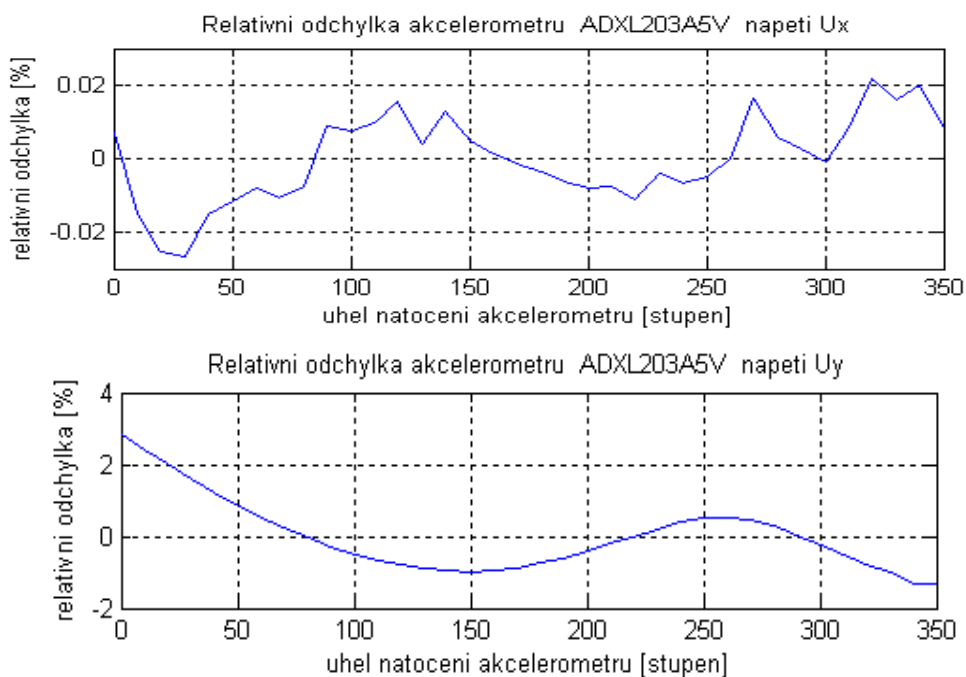
Průběh napětí  $U_X$  akcelerometru ADXL 203, vzorku C, jsou zobrazeny v horní části obrázku 16. Ve spodní části obrázku je pak zobrazena relativní odchylka tohoto napětí v průběhu otáčení akcelerometrem. Totéž, pouze pro napětí  $U_Y$  je na obrázku 17. Průběh relativní odchylky napětí  $U_X$  a  $U_Y$  pro akcelerometr ADXL 203 A je na obrázku 18, totéž pro akcelerometru ADXL 203 B je na obrázku 19. Srovnání průběhů výstupních napětí všech tří testovaných vzorků akcelerometru ADXL 203 je na obrázku 20.



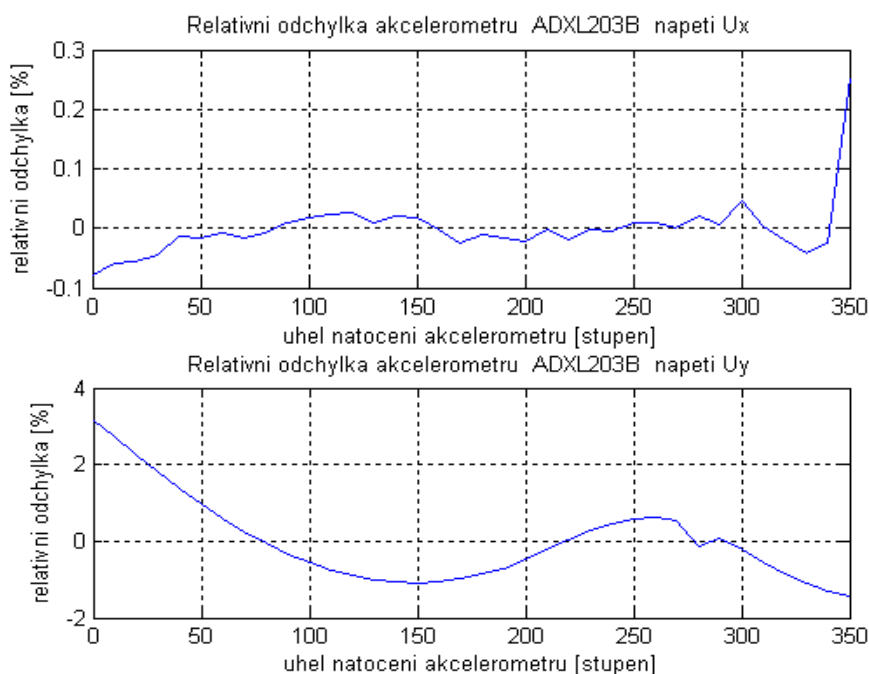
**Obrázek 16: Průběh naměřených a aproximovaných hodnot napětí U<sub>X</sub> akcelerometru ADXL 203 C a jejich vzájemné relativní odchylky.**



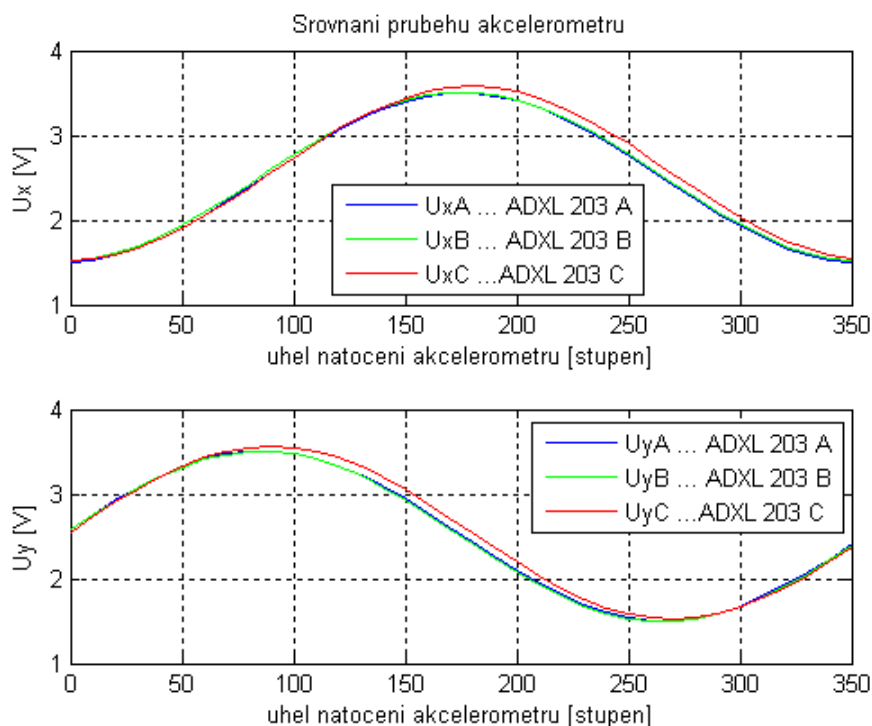
**Obrázek 17: Průběh naměřených a aproximovaných hodnot napětí U<sub>Y</sub> akcelerometru ADXL 203 C a jejich vzájemné relativní odchylky.**



**Obrázek 18: Průběh relativní odchylky výstupního  $U_x$  a  $U_y$  akcelerometru ADXL 203 A.**



**Obrázek 19: Průběh relativní odchylky výstupního  $U_x$  a  $U_y$  akcelerometru ADXL 203 B.**



**Obrázek 20: Srovnání průběhů napětí akcelerometrů ADXL 203 A, B a C.**

Pomocí programu MATLAB byly zjištěny následující vztahy, které platí pro výstupní napětí  $U_X$  a  $U_Y$  jednotlivých vzorků akcelerometru ADXL 203. Nejistoty k těmto vztahům byly dopočítány podle postupu v podkapitole 3. 1. 5.

Vzorek C:

|  |   |
|--|---|
| $U_X = 1,0238 \cdot \sin(\varphi + 270,1482) + 2,5518V$      | $U_Y = 1,0215 \cdot \sin(\varphi + 3,8695e^{-5}) + 2,5464V$ |
| $U_X = (1,024 \cdot \sin(\varphi + 270) + 2,552) \pm 0,022V$ | $U_Y = (1,022 \cdot \sin \varphi + 2,546) \pm 0,022V$       |

Vzorek A:

|  |  |
|--|--|
| $U_X = 1,0029 \cdot \sin(\varphi + 274,2636) + 2,4935V$      | $U_Y = 1,0111 \cdot \sin(\varphi + 8,5216e^{-5}) + 2,509V$ |
| $U_X = (1,003 \cdot \sin(\varphi + 274) + 2,494) \pm 0,021V$ | $U_Y = (1,011 \cdot \sin \varphi + 2,509) \pm 0,022V$      |

Vzorek B:

|  |   |
|--|---|
| $U_X = 0,99861 \cdot \sin(\varphi + 274,5814) + 2,5155V$     | $U_Y = 1,0167 \cdot \sin(\varphi + 2,1447e^{-5}) + 2,4963V$ |
| $U_X = (0,999 \cdot \sin(\varphi + 274) + 2,516) \pm 0,021V$ | $U_Y = (1,017 \cdot \sin \varphi + 2,496) \pm 0,022V$       |

Na základě těchto vztahů byly zjištěny parametry akcelerometru. Ty jsou porovnány s parametry zjištěnými pomocí 2. metody a s parametry udávanými výrobcem v podkapitole 3. 2. 3.

### 3.2.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou

Při ověřování akcelerometrů 2. metodou byly k dispozici vzorky A a B akcelerometru ADXL 203. Rovnice regrese závislosti napětí  $U_X$  a  $U_Y$  na zrychlení  $g$  jsou následující:

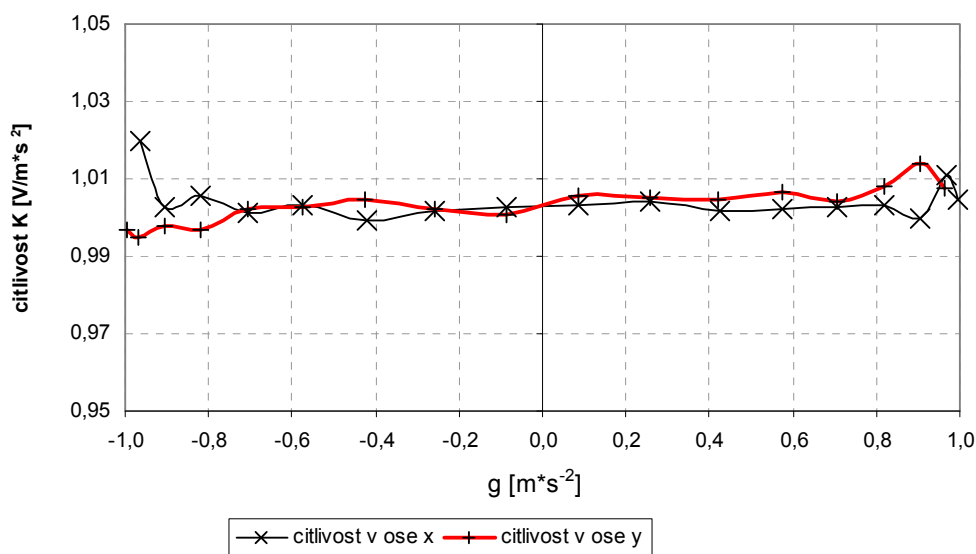
Vzorek A:

|   |   |
|---|---|
| $U_X = (1,0025 \cdot g + 2,4935) \pm 0,0029V$ | $U_Y = (1,0035 \cdot g + 2,5074) \pm 0,0030V$ |
|---|---|

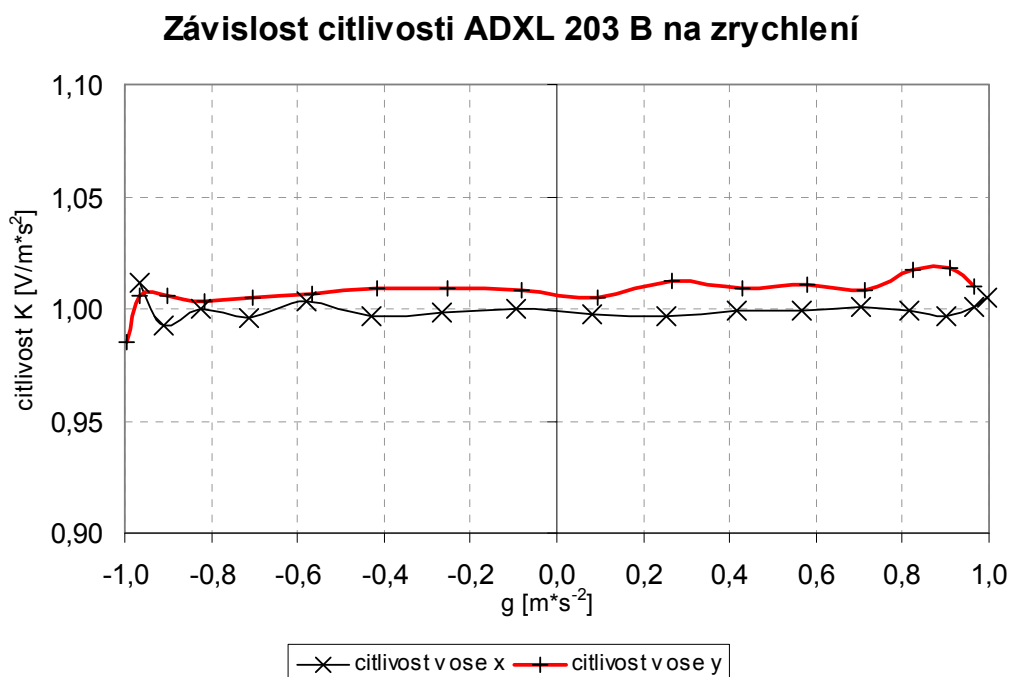
Vzorek B:

|                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|
| $U_X = 0,998 \cdot g + 2,5156V$ | $U_Y = 1,0082 \cdot g + 2,496V$ |
|---------------------------------|---------------------------------|

#### Závislost citlivosti ADXL 203 A na zrychlení



Obrázek 21: Závislost citlivosti akcelerometru ADXL 203 A na zrychlení.



**Obrázek 22: Závislost citlivosti akcelerometru ADXL 203 B na zrychlení.**

### 3.2.3 Porovnání parametrů akcelerometru ADXL 203

| ADXL 203  |           | citlivost |       | offset |       | nelinearita |         |
|-----------|-----------|-----------|-------|--------|-------|-------------|---------|
|           |           | [mV/g]    |       | [V]    |       | [%]         |         |
| měření:   |           | osa X     | osa Y | osa X  | osa Y | osa X       | osa Y   |
| vzorek A: | 1. metoda | 1003      | 1011  | 2,49   | 2,51  | - 0,0237    | 3,5238  |
|           | 2. metoda | 1002      | 1003  | 2,49   | 2,50  | 0,0183      | -0,0740 |
| vzorek B: | 1. metoda | 999       | 1002  | 2,52   | 2,50  | - 0,1937    | 3,8753  |
|           | 2. metoda | 998       | 1008  | 2,51   | 2,50  | 0,0220      | -0,0680 |
| vzorek C: | 1. metoda | 1024      | 1022  | 2,55   | 2,54  | 0,0597      | 0,2353  |
| výrobce:  |           | 1000      |       | 2,50   |       | ± 0,2000    |         |

**Tabulka 6: Porovnání parametrů akcelerometru ADXL 203.**

V tabulce 6 jsou uvedeny skutečné i zjištěné parametry akcelerometru ADXL 203. Vzorky A a B tohoto akcelerometru jsou dokonce ověřeny dvěma různými metodami. Výsledky vyhodnocení obou metod jsou si velmi blízké a odpovídají údajům z katalogových listů výrobce tohoto akcelerometru.

Citlivost všech tří testovaných vzorků akcelerometru ADXL 203 se pohybuje v rozmezí 998 - 1024 mV/g, což odpovídá hodnotě výrobce 1000 mV/g. V tomto měření byl offset u tří vzorků pro obě osy naměřen v rozmezí hodnot 2,49 V až 2,55 V, měření tedy opět potvrdilo údaj výrobce (2,5 V).

V katalogovém listu je uvedena hodnota nelinearity  $\pm 0,2\%$ . Tato hodnota je výrazně překročena pouze u vzorků A a B v ose Y ověřovaných 1. metodou. Důvodem tak vysoké nelinearity může být to, že ověřování vzorků neprobíhalo vždy za úplně stejných podmínek, které samozřejmě vzhledem k vyhodnocování měly být dodrženy. Chyba je tedy s velkou pravděpodobností na straně měřícího. Druhá metoda byla již automatizována, tzn., že rotačním stolkem nebylo otáčeno ručně (jako v 1. metodě), ale pomocí krokového motoru. To může být příčinou, proč jsou výsledky druhé metody uspokojivější.

U akcelerometru ADXL 203 A byla, na rozdíl od ostatních vzorků u druhé metody, vypočítána také nejistota typu A, která má v ose X hodnotu 0,0029 V a v ose Y hodnotu 0,0030 V.

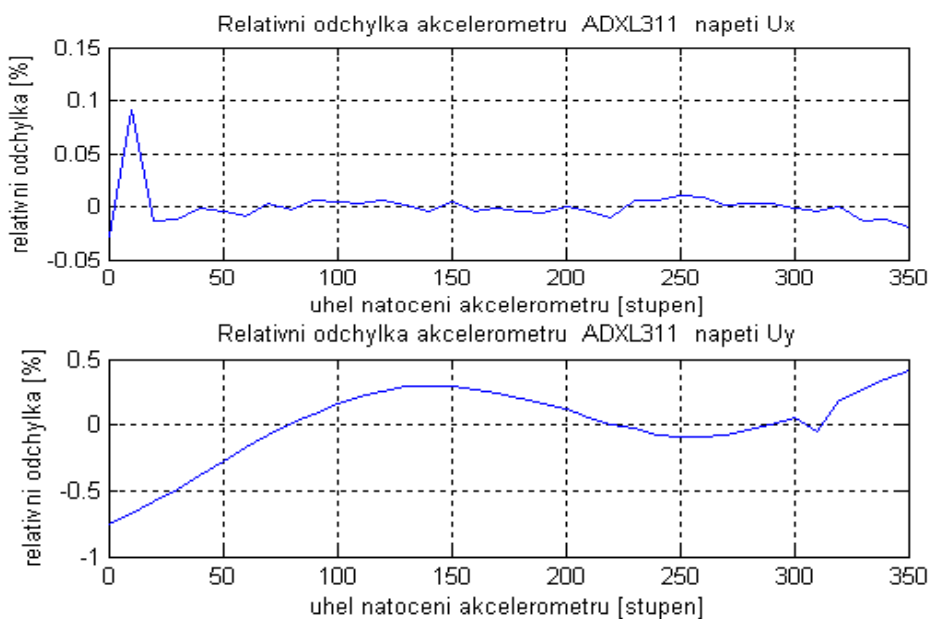
### 3.3 AKCELEROMETR ADXL 311 OD ANALOG DEVICES

Jako další akcelerometr od výrobce Analog Devices byl ověřován snímač ADXL 311. V popisu tohoto akcelerometru v příloze 2 jsou uvedeny zejména vlastnosti, které jsou rozdílné od akcelerometru ADXL 203.

#### 3.3.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou

Relativní odchylka napětí  $U_X$  a  $U_Y$  v průběhu otáčení akcelerometrem je na obrázku 23.





**Obrázek 23: Průběh relativní odchylky výstupních napětí  $U_X$  a  $U_Y$  akcelerometru ADXL 311 napájeného napětím 3V.**

Pomocí programu MATLAB byly zjištěny následující vztahy, které platí pro výstupní napětí  $U_X$  a  $U_Y$  akcelerometru ADXL 311. Nejistoty k těmto vztahům byly dopočítány podle postupu v podkapitole 3. 1. 5.

|  |  |
|--|--|
| $U_X = 0,18257 \cdot \sin(\varphi + 266,3345) + 1,4925V$     | $U_Y = 0,18008 \cdot \sin(\varphi - 1,1586e^{-5}) + 1,4802V$ |
| $U_X = (0,183 \cdot \sin(\varphi + 266) + 1,493) \pm 0,006V$ | $U_Y = (0,180 \cdot \sin \varphi + 1,480) \pm 0,011V$        |

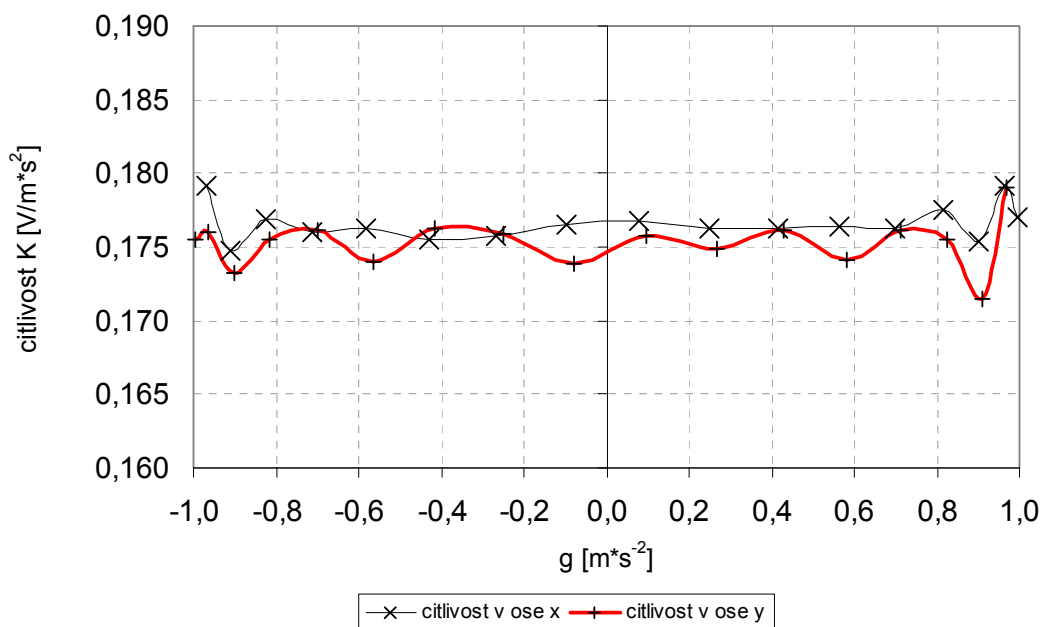
Na základě těchto vztahů byly zjištěny parametry akcelerometru. Ty jsou porovnány s parametry zjištěnými pomocí 2. metody a s parametry udávanými výrobcem v podkapitole 3. 3. 3.

### 3.3.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou

Rovnice regrese závislosti napětí  $U_X$  a  $U_Y$  na zrychlení  $g$  pro akcelerometr ADXL 311 jsou následující:

|                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| $U_X = 0,1763 \cdot g + 1,4923V$ | $U_Y = 0,1752 \cdot g + 1,4657V$ |
|----------------------------------|----------------------------------|

### Závislost citlivosti ADXL 311 na zrychlení



Obrázek 24: Závislost citlivosti akcelerometru ADXL 311 na zrychlení.

### 3.3.3 Porovnání parametrů akcelerometru ADXL 311

| ADXL 311 |           | citlivost |       | offset |       | nelinearita |          |
|----------|-----------|-----------|-------|--------|-------|-------------|----------|
|          |           | [mV/g]    |       | [V]    |       | [%]         |          |
| měření:  |           | osa X     | osa Y | osa X  | osa Y | osa X       | osa Y    |
| naměřeno | 1. metoda | 183       | 180   | 1,49   | 1,48  | 0,3260      | - 3,0806 |
|          | 2. metoda | 176       | 175   | 1,49   | 1,46  | 0,0554      | -0,0378  |
| výrobce: |           | 174       |       | 1,5    |       | ± 0,2000    |          |

Tabulka 7: Porovnání parametrů akcelerometru ADXL 311.

Z tabulky 7 je patrné, že hodnota offsetu u obou použitých metod měření odpovídá hodnotám z katalogového listu. Citlivost zjištěná pomocí 2. metody odpovídá katalogové hodnotě přesněji než hodnoty citlivosti získané první metodou. Rovněž nelinearita zjištěná 2. metodou je nižší. Hodnoty nelinearit získané 1. metodou dokonce převyšují hodnotu výrobce.

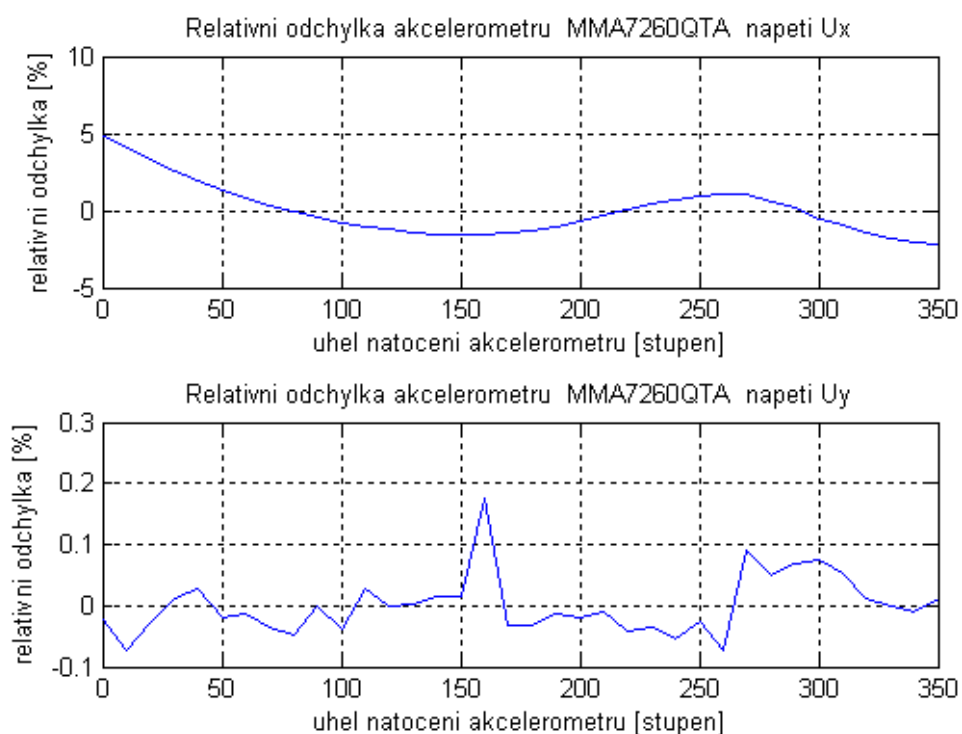
Tento rozdíl mezi oběma metodami je s velkou pravděpodobností způsoben tím, že 2. metoda je automatizována, a tím je více potlačen vliv chyby měřicího.

### 3.4 AKCELEROMETR MMA7260QT OD FREESCALE

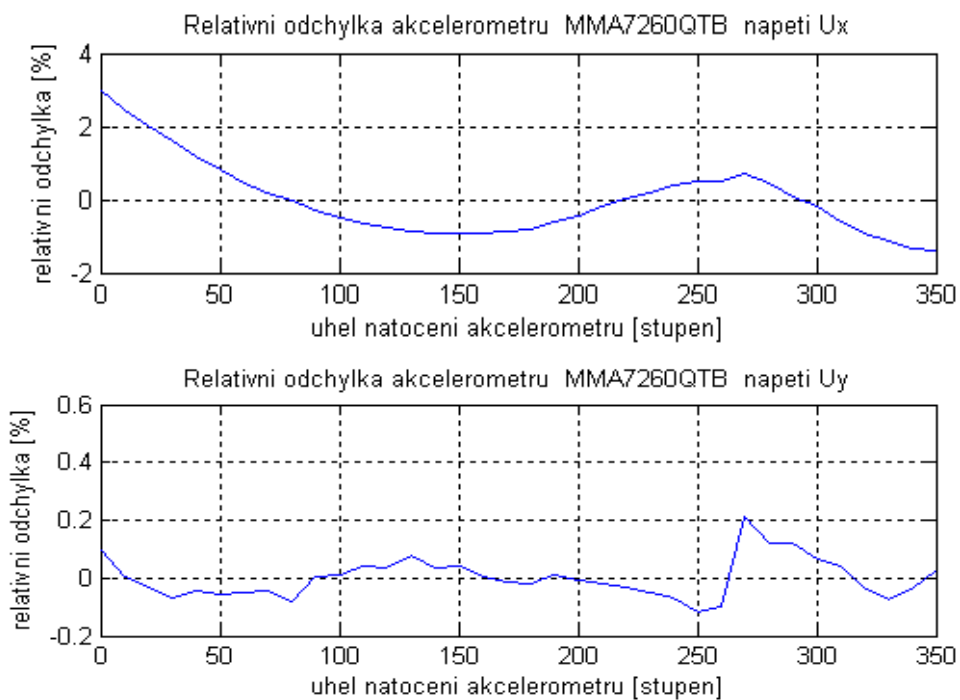
Dalším výrobcem ověřovaných snímačů je Freescale. Byly testovány dva vzorky akcelerometru MMA7260QT, označených A a B. Informace o tomto akcelerometru získané z údajů od výrobce jsou uvedeny v příloze 5.

#### 3.4.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou

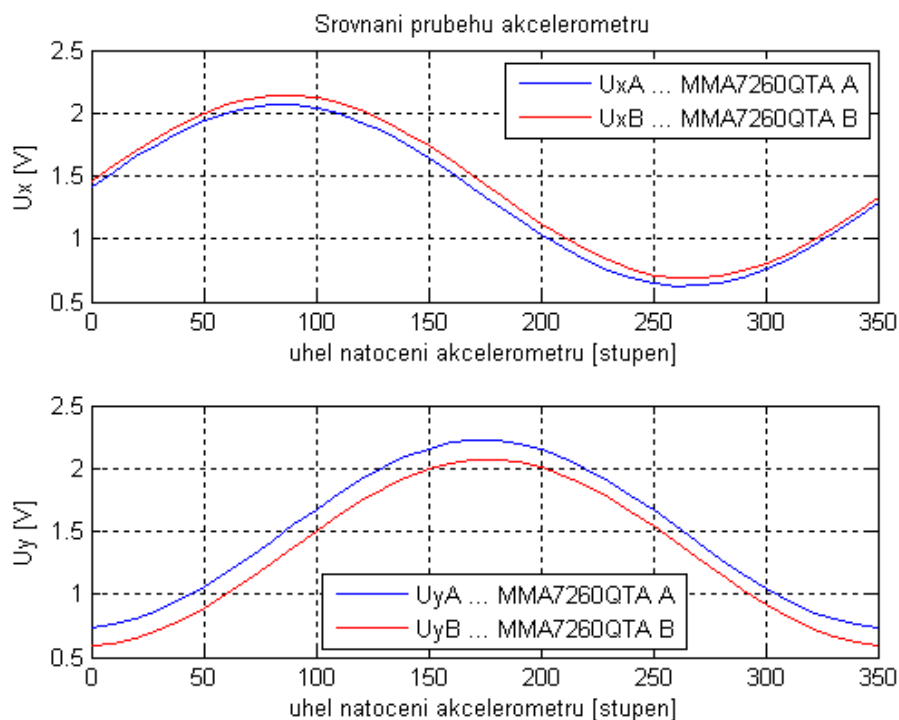
Relativní odchylka napětí  $U_X$  i  $U_Y$  akcelerometru MMA7260QT A v průběhu otáčení akcelerometrem je na obrázku 25, pro vzorek B je tato závislost na obrázku 26. Srovnání průběhů napětí vzorků A a B je na obrázku 27.



**Obrázek 25: Průběh relativní odchylky výstupních napětí  $U_X$  a  $U_Y$  akcelerometru MMA7260QT A.**



**Obrázek 26: Průběh relativní odchylky výstupních napětí  $U_x$  a  $U_y$  akcelerometru MMA7260QT B.**



**Obrázek 27: Srovnání průběhů napětí akcelerometrů MMA7260QT A a B.**

Pomocí programu MATLAB byly zjištěny následující vztahy, které platí pro výstupní napětí  $U_X$  a  $U_Y$  akcelerometru MMA7260QT. Nejistoty k těmto vztahům byly dopočítány podle postupu v podkapitole 3. 1. 5.

Vzorek A:

|  |  |
|--|--|
| $U_X = 0,7262 \cdot \sin(\varphi + 0,0008358) + 1,3443V$ | $U_Y = 0,7444 \cdot \sin(\varphi + 275,5726) + 1,4779V$      |
| $U_X = (0,726 \cdot \sin \varphi + 1,344) \pm 0,015V$    | $U_Y = (0,744 \cdot \sin(\varphi + 275) + 1,478) \pm 0,017V$ |

Vzorek B:

|   |  |
|---|--|
| $U_X = 0,7333 \cdot \sin(\varphi + 0,00035643) + 1,4118V$ | $U_Y = 0,7384 \cdot \sin(\varphi + 273,6624) + 1,3289V$      |
| $U_X = (0,733 \cdot \sin \varphi + 1,411) \pm 0,016V$     | $U_Y = (0,738 \cdot \sin(\varphi + 273) + 1,329) \pm 0,017V$ |

Na základě těchto vztahů byly zjištěny parametry akcelerometru. Ty jsou porovnány s parametry zjištěnými pomocí 2. metody a s parametry udávanými výrobcem v podkapitole 3. 4. 3.

### 3.4.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou

Rovnice regrese závislosti napětí  $U_X$  a  $U_Y$  na zrychlení  $g$  pro akcelerometr MMA7260QT jsou následující:

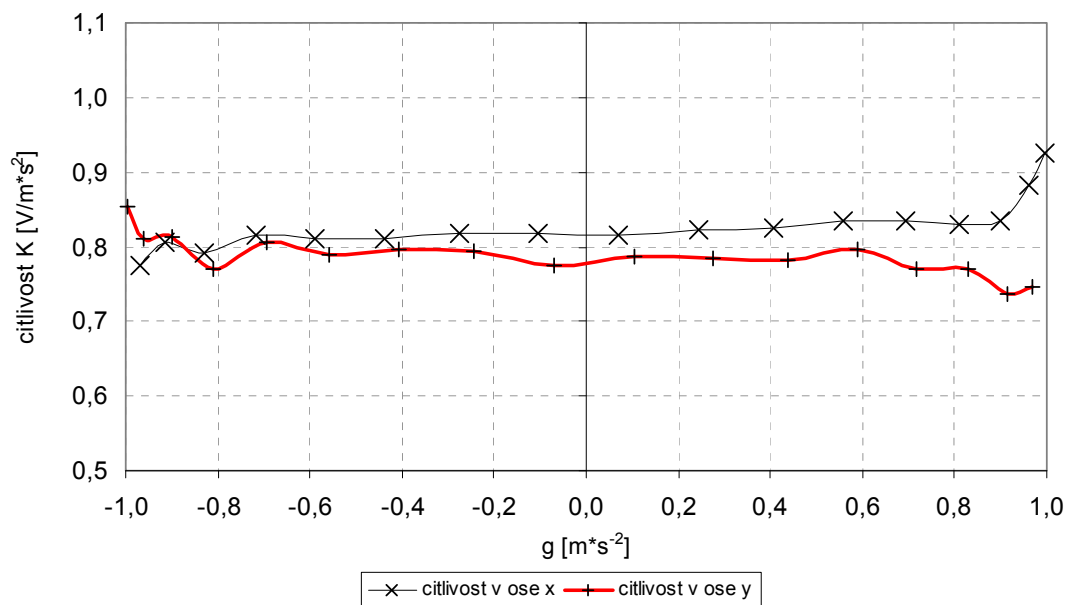
Vzorek A:

|                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| $U_X = 0,8222 \cdot g + 1,7847V$ | $U_Y = 0,7878 \cdot g + 1,6154V$ |
|----------------------------------|----------------------------------|

Vzorek B:

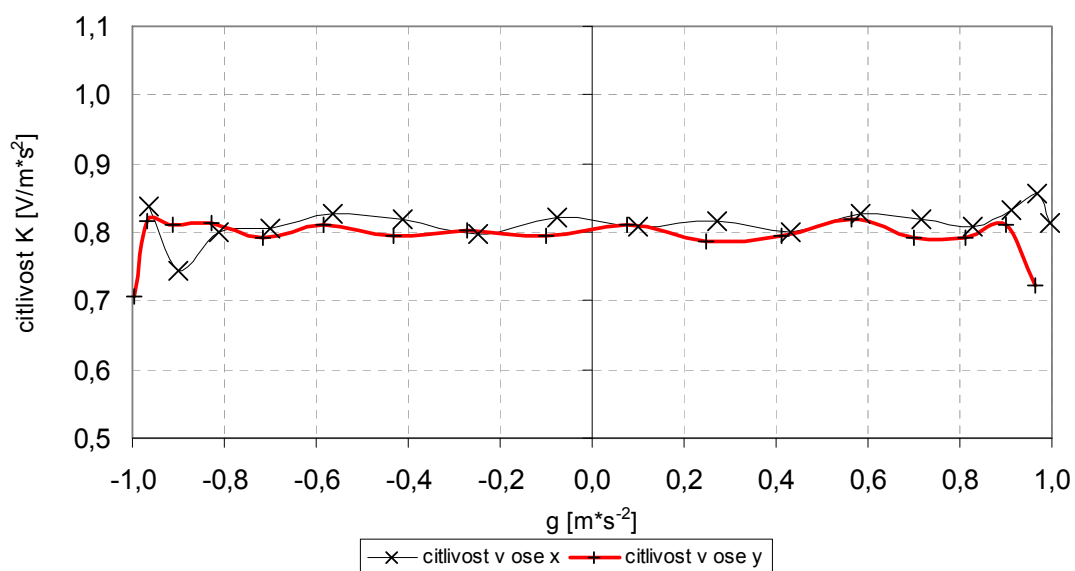
|                                 |                                  |
|---------------------------------|----------------------------------|
| $U_X = 0,813 \cdot g + 1,6209V$ | $U_Y = 0,8004 \cdot g + 1,7404V$ |
|---------------------------------|----------------------------------|

**Závislost citlivosti MMA7260QT A na zrychlení**



**Obrázek 28: Závislost citlivosti akcelerometru MMA7260QT A na zrychlení.**

**Závislost citlivosti MMA7260QT B na zrychlení**



**Obrázek 29: Závislost citlivosti akcelerometru MMA7260QT B na zrychlení.**

### 3.4.3 Porovnání parametrů akcelerometru MMA7260QT

| MMA726QT  |           | citlivost |       | offset |       | nelinearita |         |
|-----------|-----------|-----------|-------|--------|-------|-------------|---------|
|           |           | [mV/g]    |       | [V]    |       | [%]         |         |
| měření:   |           | osa X     | osa Y | osa X  | osa Y | osa X       | osa Y   |
| vzorek A: | 1. metoda | 726       | 744   | 1,34   | 1,48  | 4,4270      | -0,2596 |
|           | 2. metoda | 822       | 787   | 1,78   | 1,62  | 0,4560      | -0,2973 |
| vzorek B: | 1. metoda | 733       | 738   | 1,41   | 1,33  | -0,0009     | -2,1717 |
|           | 2. metoda | 813       | 800   | 1,62   | 1,74  | 0,2437      | -0,1137 |
| výrobce:  |           | 800       |       | 1,5    |       | ± 1,0000    |         |

**Tabulka 8: Porovnání parametrů akcelerometru MMA7260QT.**

Z tabulky 8 je zřejmé, že hodnota offsetu u obou použitých metod měření odpovídá hodnotám z katalogového listu. Citlivost zjištěná pomocí 2. metody odpovídá katalogové hodnotě přesněji než hodnoty citlivost získané první metodou. Rovněž nelinearita zjištěná 2. metodou je nižší. Hodnoty nelinearity získané 1. metodou dokonce převyšují hodnotu výrobce.

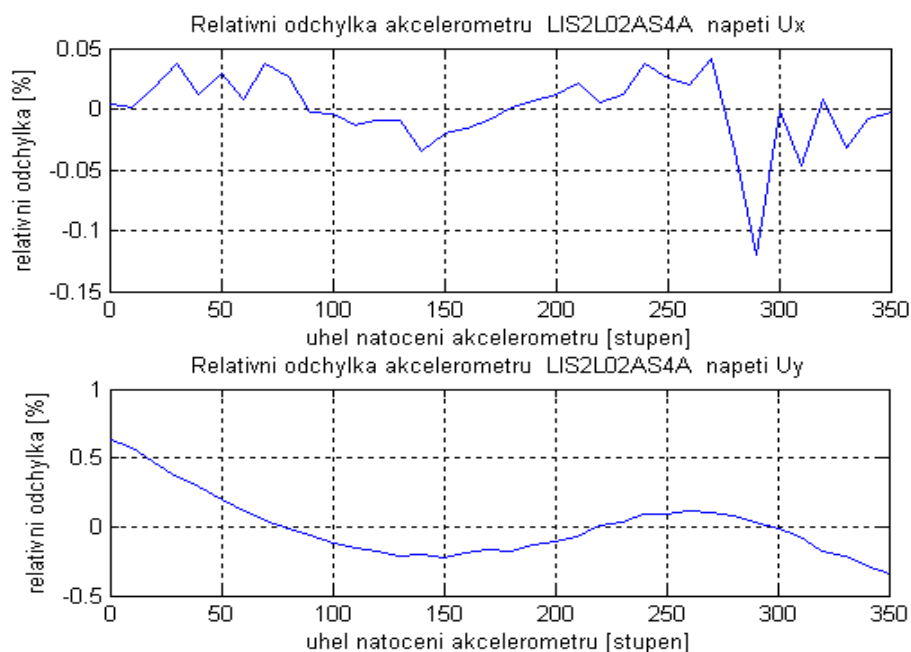
Tento rozdíl mezi oběmi metodami je s velkou pravděpodobností způsoben tím, že 2. metoda je automatizována, a tím je více potlačen vliv chyby měřícího.

## 3.5 AKCELEROMETR LIS2L0AS4 OD STMICROELECTRONIC

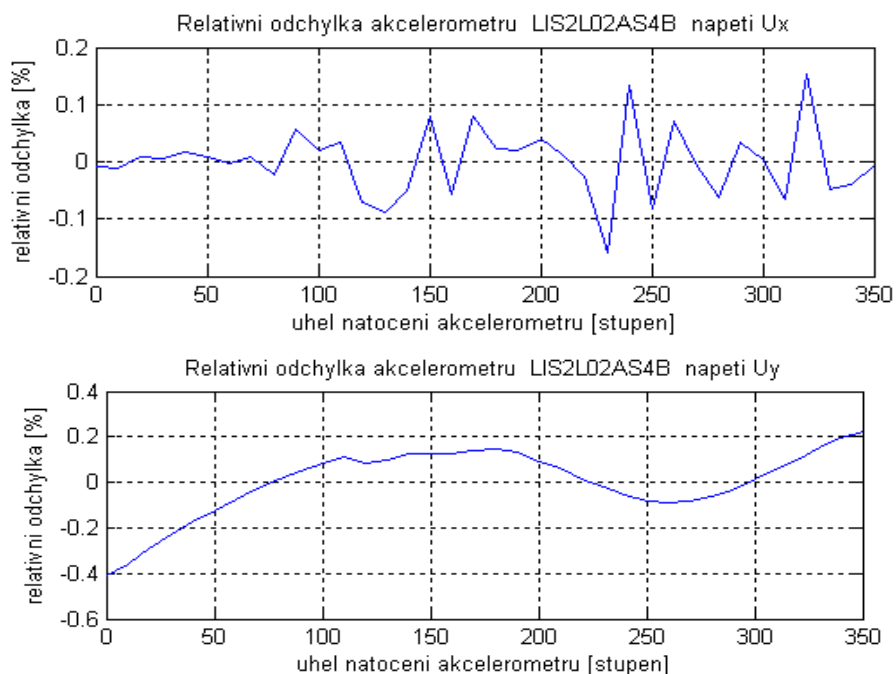
Dalším výrobcem měřených snímačů je STMicroelectronic. Byly ověřovány dva vzorky snímače LIS2L0AS4, označených jako A a B. Informace o tomto akcelerometru získány od výrobce jsou uvedeny v podrobném přehledu v příloze 3.

### 3.5.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou

Relativní odchylka napětí  $U_X$  i  $U_Y$  akcelerometru LIS2L02AS4 A v průběhu otáčení akcelerometrem je na obrázku 30. Totéž pro vzorek B je na obrázku 31. Srovnání průběhů napětí  $U_X$  i  $U_Y$  vzorků A a B je na obrázku 32.

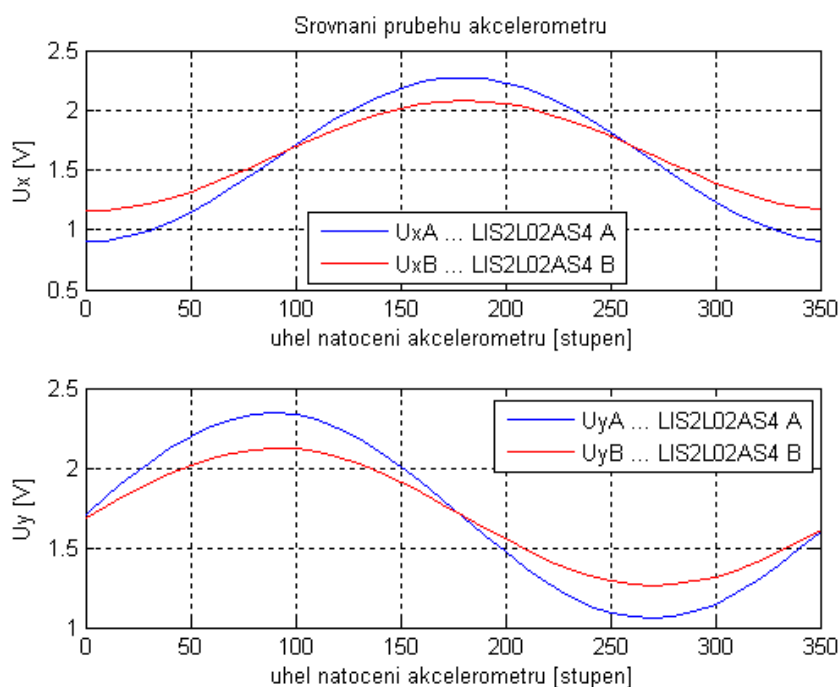


**Obrázek 30: Průběh relativní odchylky napětí  $U_x$  a  $U_y$  akcelerometru LIS2L02AS4 A.**



**Obrázek 31: Průběh relativní odchylky napětí  $U_x$  a  $U_y$  akcelerometru LIS2L02AS4 B.**





**Obrázek 32: Srovnání průběhů napětí akcelerometrů LIS2L02AS4 A a B.**

Pomocí programu MATLAB byly zjištěny následující vztahy, které platí pro výstupní napětí  $U_X$  i  $U_Y$  akcelerometru LIS2L02AS4. Nejistoty k těmto vztahům byly dopočítány podle postupu v podkapitole 3. 1. 5.

Vzorek A:

|  |   |
|--|---|
| $U_X = 0,68739 \cdot \sin(\varphi + 270,6213) + 1,5846V$     | $U_Y = 0,64432 \cdot \sin(\varphi + 0,0001481) + 1,6993V$ |
| $U_X = (0,687 \cdot \sin(\varphi + 270) + 1,585) \pm 0,015V$ | $U_Y = (0,644 \cdot \sin \varphi + 1,699) \pm 0,013V$     |

Vzorek B:

|  |  |
|--|--|
| $U_X = 0,45915 \cdot \sin(\varphi + 269,5438) + 1,6184V$     | $U_Y = 0,42823 \cdot \sin(\varphi + 0,00068546) + 1,6993V$ |
| $U_X = (0,459 \cdot \sin(\varphi + 269) + 1,618) \pm 0,138V$ | $U_Y = (0,428 \cdot \sin \varphi + 1,699) \pm 0,135V$      |

Na základě těchto vztahů byly zjištěny parametry akcelerometru. Ty jsou porovnány s parametry zjištěnými pomocí 2. metody a s parametry udávanými výrobcem v podkapitole 3. 5. 3.

### 3.5.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou

Rovnice regrese závislosti napětí  $U_X$  i  $U_Y$  na zrychlení  $g$  pro akcelerometr LIS2L02AS4 jsou následující:

Vzorek A:

$$U_X = 0,6479 \cdot g + 1,6676V$$

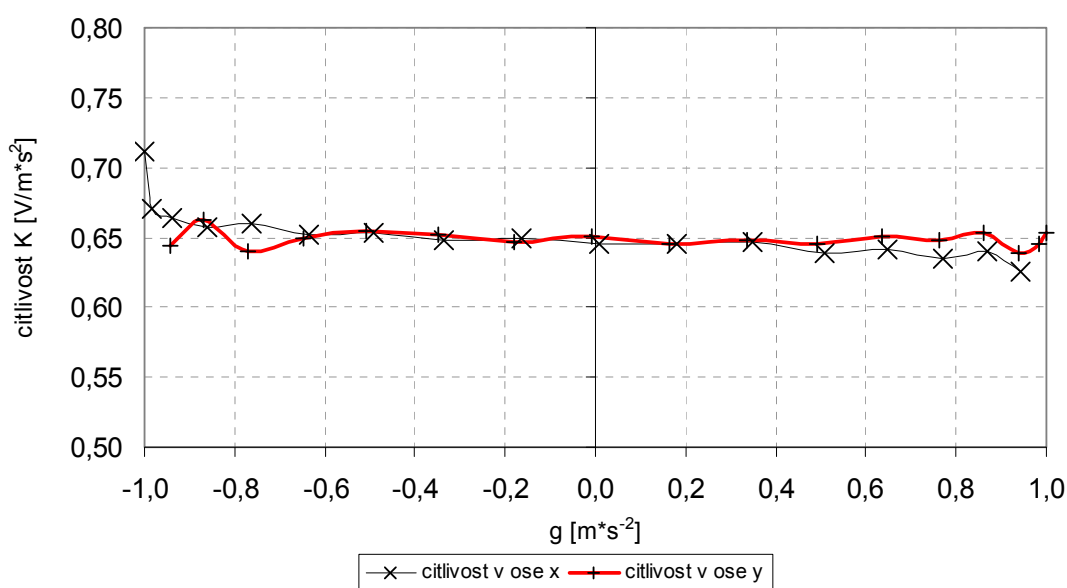
$$U_Y = 0,6486 \cdot g + 1,659V$$

Vzorek B:

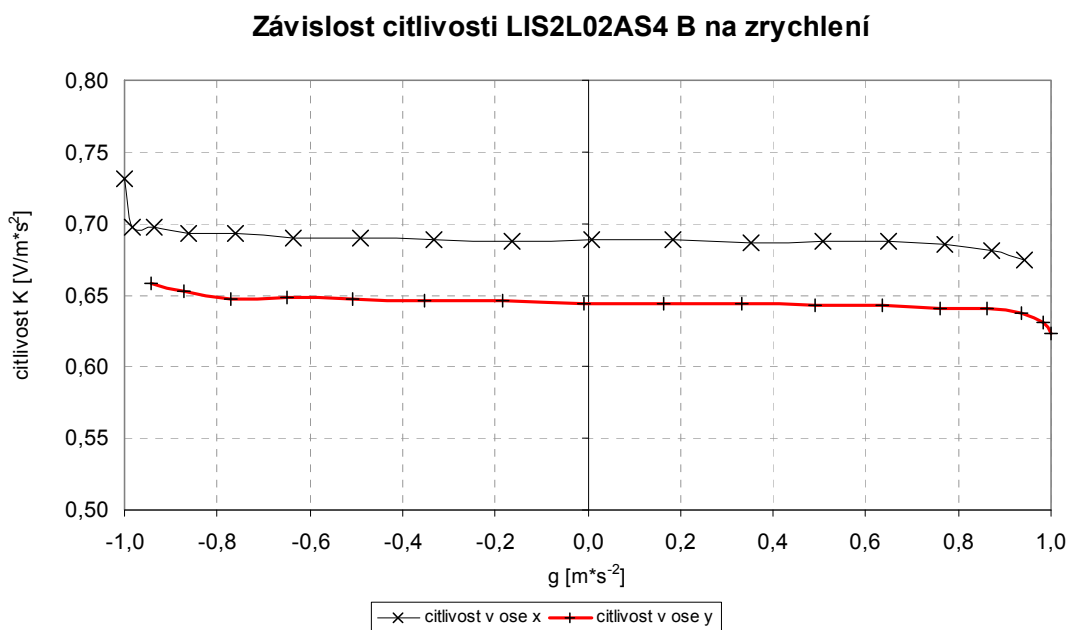
$$U_X = 0,6888 \cdot g + 1,6097V$$

$$U_X = 0,64468004 \cdot g + 1,7271V$$

#### Závislost citlivosti LIS2L02AS4 A na zrychlení



Obrázek 33: Závislost citlivosti akcelerometru LIS2L02AS4 A na zrychlení.



**Obrázek 34: Závislost citlivosti akcelerometru LIS2L02AS4 B na zrychlení.**

### 3.5.3 Porovnání parametrů akcelerometru LIS2L02AS4

| LIS2L02AS4 |           | citlivost |       | offset |       | nelinearita |         |
|------------|-----------|-----------|-------|--------|-------|-------------|---------|
|            |           | [mV/g]    |       | [V]    |       | [%]         |         |
| měření:    |           | osa X     | osa Y | osa X  | osa Y | osa X       | osa Y   |
| vzorek A:  | 1. metoda | 687       | 644   | 1,58   | 1,69  | 0,1168      | 0,8347  |
|            | 2. metoda | 647       | 648   | 1,66   | 1,66  | -0,0008     | 0,3211  |
| vzorek B:  | 1. metoda | 459       | 428   | 1,62   | 1,69  | 0,3313      | -0,8024 |
|            | 2. metoda | 688       | 645   | 1,61   | 1,72  | -0,0844     | 0,1039  |
| výrobce:   |           | 660       |       | 1,65   |       | ± 0,3000    |         |

**Tabulka 9: Porovnání parametrů akcelerometru LIS2L02AS4.**

I u tohoto snímače je zřejmé, že hodnota offsetu u obou použitých metod měření odpovídá hodnotám z katalogového listu. Citlivost u vzorku A je u obou metod přibližně stejná a odpovídá katalogovým hodnotám. Citlivost vzorku B je však u každé metody různá. Hodnoty citlivosti získané 2. metodou je katalogovým

hodnotám bližší. Rovněž nelinearita zjištěná 2. metodou je u obou měřených vzorků nižší. Hodnoty nelinearity získané 1. metodou dokonce převyšují hodnotu výrobce.

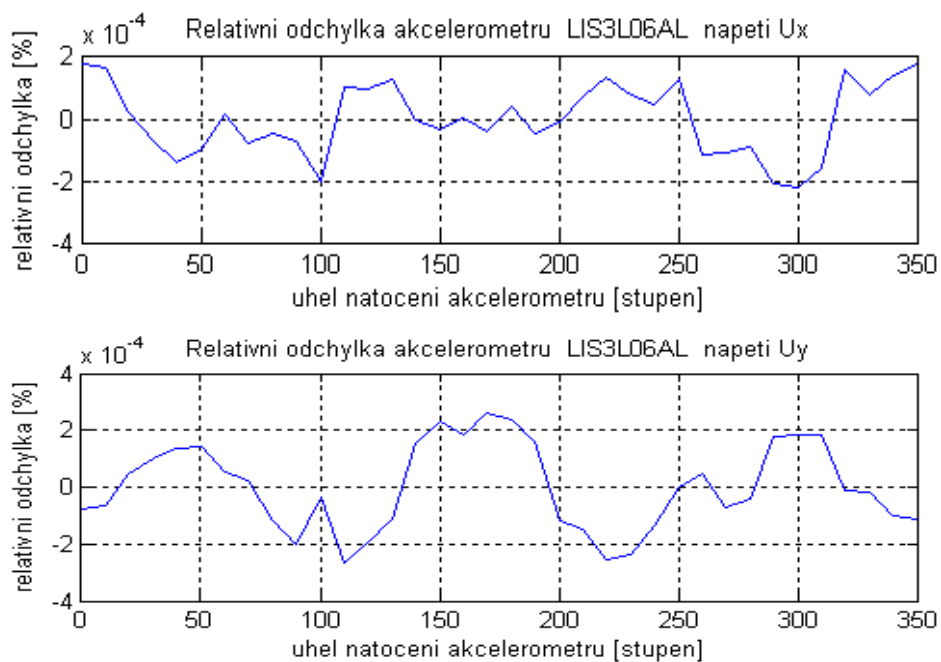
Rozdíl je opět s velkou pravděpodobností způsoben tím, že 2. metoda je automatizována, a tím je, na rozdíl od 1. metody, potlačen vliv chyby měřicího.

### 3.6 AKCELEROMETR LIS3L06AL OD ST MICROELECTRONIC

Testovaným snímačem od STMicroelectronics byl také akcelerometr LIS3106AL. S předchozím akcelerometrem LIS2L02AS4 má mnoho parametrů a vlastností společných, proto budou v přehledu v příloze 4 zmíněny zejména odlišné parametry.

#### 3.6.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou

Relativní odchylka napětí  $U_X$  i  $U_Y$  akcelerometru LIS3106AL v průběhu otáčení akcelerometrem je zobrazena na obrázku 35.



**Obrázek 35: Průběh relativní odchylky výstupních napětí  $U_X$  a  $U_Y$  akcelerometru LIS3106AL napájeného 3,3V.**

Postup při ověření parametrů akcelerometru LIS3106AL je shodný jako u ostatních akcelerometrů. Pomocí programu MATLAB byly zjištěny následující vztahy, které platí pro výstupní napětí  $U_X$  i  $U_Y$  akcelerometru LIS3106AL. Nejistoty k těmto vztahům byly dopočítány podle postupu v podkapitole 3. 1. 5.

|  |  |
|--|--|
| $U_X = 0,22917 \cdot \sin(\varphi + 186,9083) + 1,6461V$     | $U_Y = 0,22373 \cdot \sin(\varphi + 277,1183) + 1,6611V$     |
| $U_X = (0,229 \cdot \sin(\varphi + 186) + 1,646) \pm 0,005V$ | $U_Y = (0,224 \cdot \sin(\varphi + 277) + 1,661) \pm 0,005V$ |

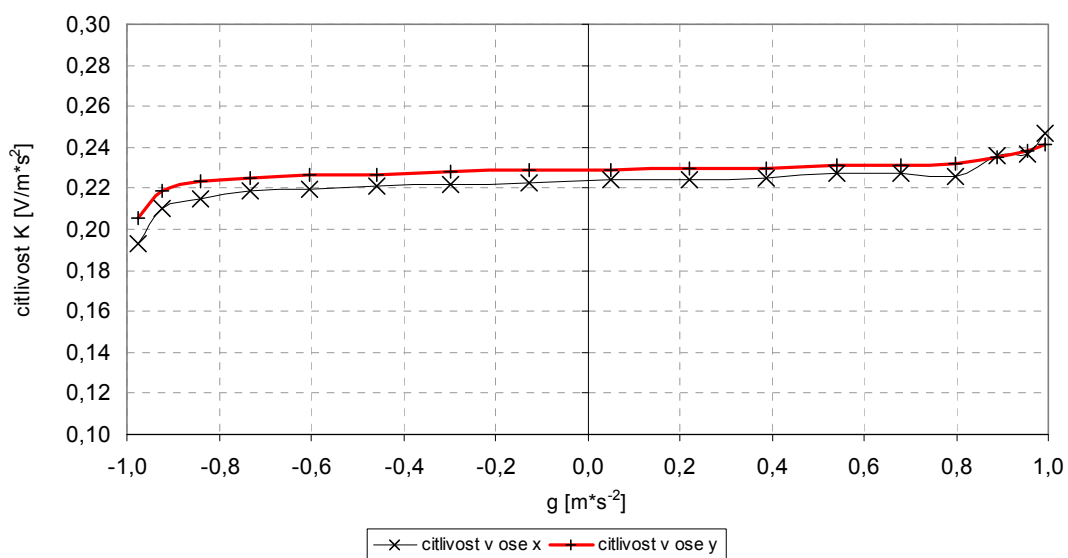
Na základě těchto vztahů mohly být zjištěny parametry akcelerometru a porovnány s parametry udávanými výrobcem.

### 3.6.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou

Rovnice regrese závislosti napětí  $U_X$  i  $U_Y$  na zrychlení  $g$  pro akcelerometr LIS3106AL jsou následující:

|                                 |                                  |
|---------------------------------|----------------------------------|
| $U_X = 0,224 \cdot g + 1,6563V$ | $U_Y = 0,2294 \cdot g + 1,6402V$ |
|---------------------------------|----------------------------------|

**Závislost citlivosti LIS3106AL A na zrychlení**



**Obrázek 36: Závislost citlivosti akcelerometru LIS3106AL na zrychlení.**

### 3.6.3 Porovnání parametrů akcelerometru LIS3I06AL

| LIS3I06AL |           | citlivost |       | offset |       | nelinearita |        |
|-----------|-----------|-----------|-------|--------|-------|-------------|--------|
|           |           | [mV/g]    |       | [V]    |       | [%]         |        |
| měření:   |           | osa X     | osa Y | osa X  | osa Y | osa X       | osa Y  |
| naměřeno  | 1. metoda | 229       | 224   | 1,65   | 1,66  | - 0,0483    | 0,0597 |
|           | 2. metoda | 229       | 224   | 1,64   | 1,66  | 0,6810      | 0,4315 |
| výrobce:  |           | 220       |       | 1,65   |       | ± 0,3000    |        |

**Tabulka 10: Porovnání parametrů akcelerometru LIS3I06AL.**

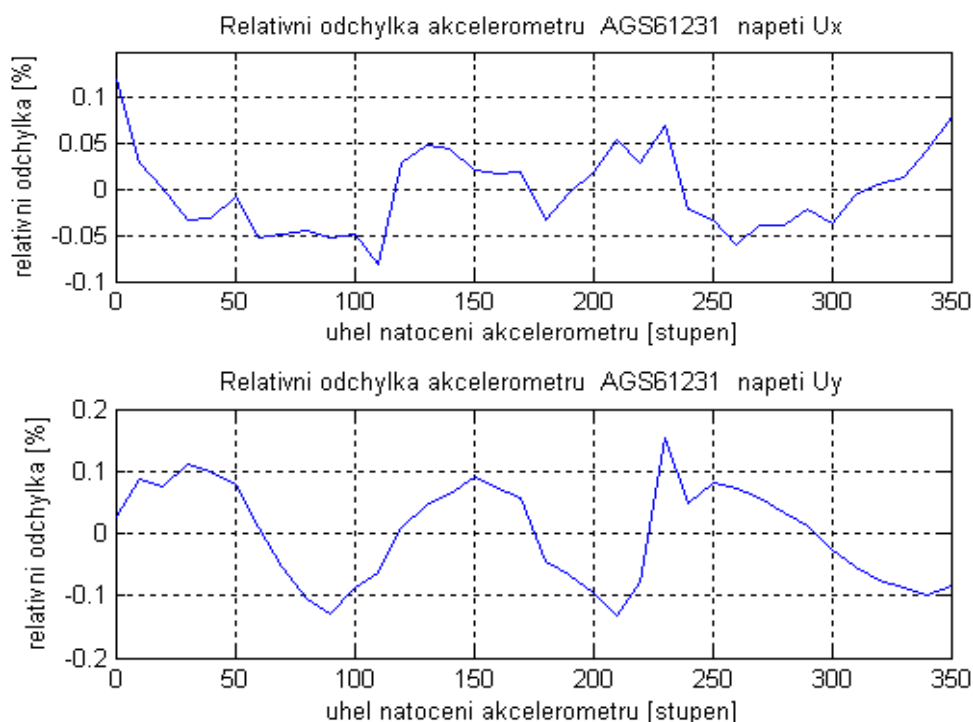
U tohoto snímače je ověřován pouze jeden jeho vzorek. Hodnoty citlivosti vyšly u obou metod shodně a stejně jako hodnoty offsetu odpovídají katalogovým hodnotám. Na rozdíl od snímačů vyhodnocených doposud je nelinearita akcelerometru LIS3I06AL vyhodnocená 1. metodou nižší než katalogové hodnoty, nelinearity získané 2. metodou jsou vyšší než hodnoty výrobce.

## 3.7 AKCELEROMETR AGS61231 PANASONIC MATSUSHITA

Dalším výrobcem ověřovaných akcelerometrů je Panasonic Matsushita. Na rozdíl od všech ostatních typů snímačů, které byly v této práci ověřovány, využívají akcelerometry tohoto výrobce piezorezistivní metodu (nikoli kapacitní metodu, jak to bylo u všech předchozích snímačů). Bližší údaje o akcelerometru AGS61231 se nachází v příloze 6 .

### 3.7.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou

Relativní odchylka napětí  $U_X$  i  $U_Y$  v průběhu otáčení akcelerometrem je zobrazena na obrázku 37. Postup při ověření parametrů akcelerometru AGS61231 je stejný jako u předchozích akcelerometrů.



**Obrázek 37: Průběh relativní odchylky výstupních napětí  $U_x$  a  $U_y$  akcelerometru AGS61231 napájeného napětím 3V.**

Pomocí programu MATLAB byly zjištěny následující vztahy, které platí pro výstupní napětí  $U_x$  i  $U_y$  akcelerometru AGS61231. Nejistoty k těmto vztahům byly dopočítány podle postupu v podkapitole 3. 1. 5.

|  |   |
|--|---|
| $U_x = 0,4973 \cdot \sin(\varphi + 182,4229) + 1,4351V$      | $U_y = 0,4966 \cdot \sin(\varphi + 92,7937) + 1,451V$       |
| $U_x = (0,497 \cdot \sin(\varphi + 182) + 1,435) \pm 0,014V$ | $U_y = (0,497 \cdot \sin(\varphi + 92) + 1,451) \pm 0,028V$ |

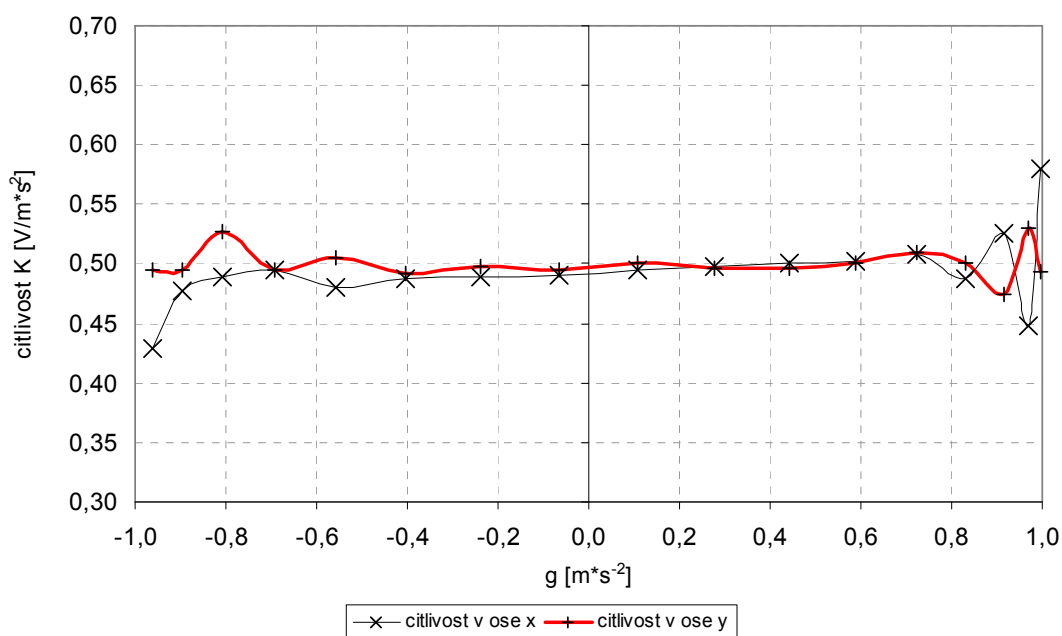
Na základě těchto vztahů mohly být zjištěny parametry akcelerometru a porovnány s parametry udávanými výrobcem.

### 3.7.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou

Rovnice regrese závislosti napětí  $U_x$  i  $U_y$  na zrychlení  $g$  pro akcelerometr AGS61231 jsou následující:

|                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| $U_x = 0,4943 \cdot g + 1,4684V$ | $U_y = 0,4991 \cdot g + 1,4732V$ |
|----------------------------------|----------------------------------|

### Závislost citlivosti AGS61231 na zrychlení



**Obrázek 38: Závislost citlivosti akcelerometru AGS61231 na zrychlení.**

### 3.7.3 Porovnání parametrů akcelerometru AGS61231

| AGS61231 |           | citlivost |       | offset |       | nelinearita |        |
|----------|-----------|-----------|-------|--------|-------|-------------|--------|
|          |           | [mV/g]    |       | [V]    |       | [%]         |        |
| měření:  |           | osa X     | osa Y | osa X  | osa Y | osa X       | osa Y  |
| naměřeno | 1. metoda | 497       | 497   | 1,44   | 1,45  | 0,1696      | 0,2121 |
|          | 2. metoda | 494       | 499   | 1,47   | 1,47  | 0,4576      | 0,1711 |
| výrobce: |           | 500       |       | 1,5    |       | ± 2,0000    |        |

**Tabulka 11: Porovnání parametrů akcelerometru AGS61231.**

I u tohoto akcelerometru jsou hodnoty citlivosti i offsetu z obou metod shodné a odpovídají hodnotám výrobce. Nelinearita průběhu výstupních napětí je u 1. použité metody nižší než katalogové hodnoty. U 2. metody je nelinearita v ose X vyšší než je uvedeno v katalogovém listu.

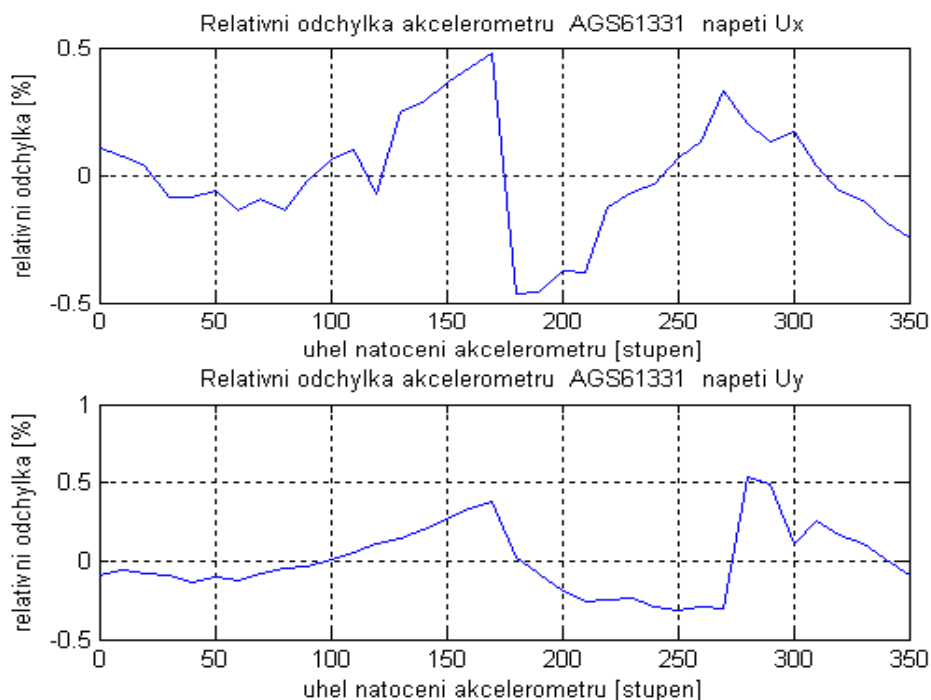


### 3.8 AKCELEROMETR AGS61331 PANASONIC MATSUSHITA

Akcelerometr AGS61331 je dalším z řady akcelerometrů od Panasonic Matsushita, který pracuje na piezorezistivním principu. Bližší údaje o akcelerometru AGS61331 se nachází v příloze 7.

#### 3.8.1 Vyhodnocení naměřených hodnot 1. metodou

Relativní odchylka napětí  $U_X$  a  $U_Y$  v průběhu otáčení akcelerometrem je na obrázku 39.



**Obrázek 39: Průběh relativní odchylky výstupních napětí  $U_X$  a  $U_Y$  akcelerometru AGS61331 napájeného napětím 3V.**

Postup při ověření parametrů akcelerometru AGS61331 je stejný jako u předchozích akcelerometrů. Pomocí programu MATLAB byly zjištěny následující vztahy, které platí pro výstupní napětí  $U_X$  a  $U_Y$  akcelerometru AGS61331. Nejistoty k těmto vztahům byly dopočítány podle postupu v podkapitole 3. 1. 5.

|  |  |
|--|--|
| $U_X = 0,3396 \cdot \sin(\varphi + 187,203) + 1,4889V$       | $U_Y = 0,3166 \cdot \sin(\varphi + 458,0325) + 1,4835V$      |
| $U_X = (0,340 \cdot \sin(\varphi + 187) + 1,489) \pm 0,027V$ | $U_Y = (0,317 \cdot \sin(\varphi + 458) + 1,484) \pm 0,030V$ |

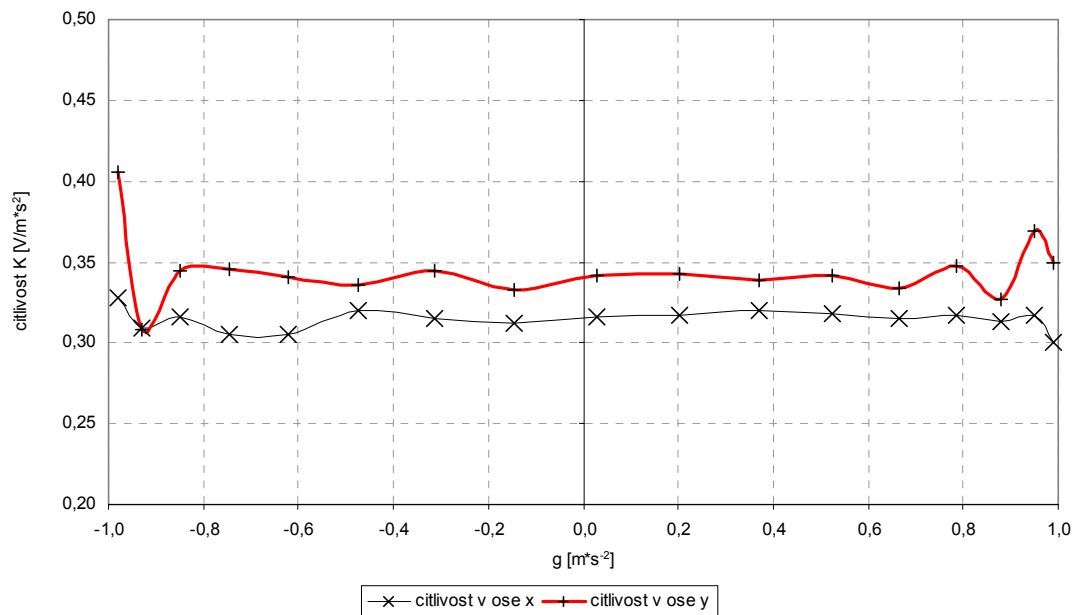
Na základě těchto vztahů mohly být zjištěny parametry akcelerometru a porovnány s parametry udávanými výrobcem.

### 3.8.2 Vyhodnocení naměřených hodnot 2. metodou

Rovnice regrese závislosti napětí  $U_X$  a  $U_Y$  na zrychlení  $g$  pro akcelerometr AGS61331 jsou následující:

|                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| $U_X = 0,3151 \cdot g + 1,5164V$ | $U_Y = 0,3399 \cdot g + 1,5068V$ |
|----------------------------------|----------------------------------|

**Závislost citlivosti AGS61331 na zrychlení**



**Obrázek 40: Závislost citlivosti akcelerometru AGS61331 na zrychlení.**

### 3.8.3 Porovnání parametrů akcelerometru AGS61331

| AGS61331 |           | citlivost |       | offset |       | nelinearita |        |
|----------|-----------|-----------|-------|--------|-------|-------------|--------|
|          |           | [mV/g]    |       | [V]    |       | [%]         |        |
| měření:  |           | osa X     | osa Y | osa X  | osa Y | osa X       | osa Y  |
| naměřeno | 1. metoda | 340       | 317   | 1,49   | 1,48  | - 1,0655    | 1,3256 |
|          | 2. metoda | 315       | 339   | 1,50   | 1,50  | 0,1687      | 0,2350 |
| výrobce: |           | 333       |       | 1,5    |       | ± 2,0000    |        |

**Tabulka 12: Porovnání parametrů akcelerometru AGS61331.**

Z tabulky 12 je patrné, že hodnoty citlivosti i offsetu odpovídají hodnotám výrobce. Nelinearita průběhu výstupních napětí je u 1. použité metody vyšší než u 2. metody, v obou případech je však nelinearita nižší než dovolují katalogové hodnoty. Požadavky na nelinearitu jsou u akcelerometru AGS61331 splněny.

## 4. MĚŘENÍ ÚHLOVÉ RYCHLOSTI S MEZIPŘEVODEM NA JINOU NEELEKTRICKOU VELIČINU

Další možnost, jak zjistit náklon, je měření úhlové rychlosti. Typickým zařízením, které měří úhlovou rychlost ve  $[\text{°}/\text{s}]$  je gyroskop. Gyroskopy jsou již dlouhou dobu známy a využívány pro měření a určování změny polohy nebo natočení libovolného předmětu, ke kterému jsou připevněny. Velkou výhodou je možnost použití gyroskopů v integrované podobě, která kromě snímače obsahuje také vyhodnocovací obvody. Gyroskopy jsou založeny na různých fyzikálních principech. V následujících kapitolách budou popsány gyroskopy optické a gyroskopy využívající Coriolisovy síly.

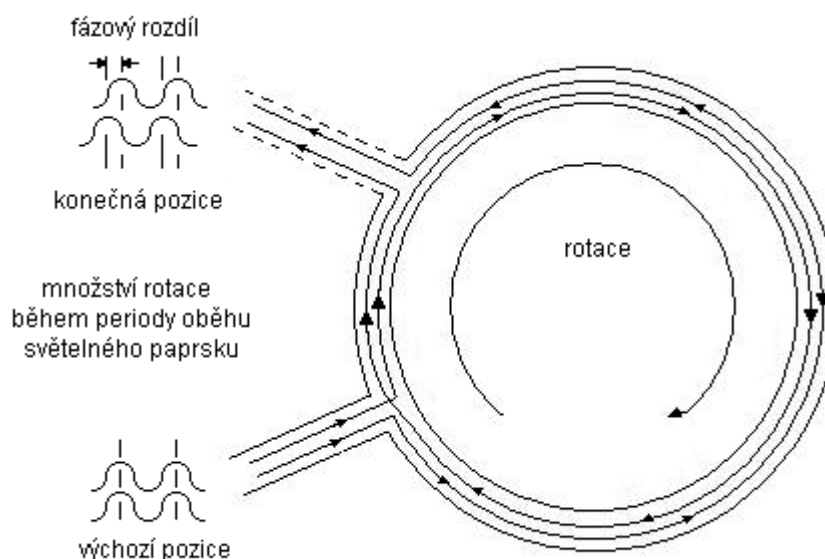
### 4.1 OPTICKÝ GYROSKOP [7, 8, 9, 10]

Hlavními výhodami vláknových optických gyroskopů je to, že nezahrnují žádné pohyblivé části, vyžadují minimální údržbu, mají velký dynamický rozsah, malé rozměry a velkou přesnost. Tyto systémy se však vyznačují také vysokou cenou.

Princip všech optických snímačů úhlových rychlostí je založen na Sagnacově efektu. Ten využívá pro zjištění úhlové rychlosti rozdílnou dobu oběhu dvou paprsků putujících uzavřenou smyčkou v opačných směrech. Smyčka tvoří rovinu kolmou na osu rotace. Počáteční světelný paprsek je rozdělen do dvou paprsků, které putují jednoduchým vláknem ve spirálovém uspořádání, jak ukazuje obrázek 41.

Jedna dráha je ve směru, druhá je proti směru hodinových ručiček. Jestliže se vláknová smyčka otáčí ve směru hodinových ručiček, šíření světla je v tomto směru delší, protože rychlost světla je konstantní, výchozí bod se nepohnul a světelný paprsek tak musí urazit větší vzdálenost. Naopak, světelný paprsek šířící se proti směru hodinových ručiček urazí kratší vzdálenost. Rozdíl optické délky má

za následek fázový rozdíl, který má vliv na výstup Sagnacova interferometru. Podle intenzity jasu na výstupu měřicího přístroje je zjištěna úhlová rychlost.



Obrázek 41: Sagnacův efekt ve spirálovém vlákně použitý pro měření rychlosti [7].

#### 4.1.1 Přehled trhu optických gyroskopů

| výrobce                | typ        | maximální vstupní rozsah ( $^{\circ}/s$ ) | šířka frekvenčního pásma (Hz) | šum                 | vstupní napětí      | rozměry (mm)         | teplotní rozsah        |         |
|------------------------|------------|---|-------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|------------------------|---------|
| kvh industries         | DSP - 3000 | $\pm 375$                                 | $< 400$                       | $4^{\circ}/hr/rtHz$ | 5 VDC<br>$\pm 10\%$ | 88,9x58,42x<br>33,02 | - 40 až 75 $^{\circ}C$ | digital |
|                        |            | $\pm 100$                                 | 100                           | $6^{\circ}/hr/rtHz$ |                     |                      |                        | analog  |
|                        | DSP - 4000 | $\pm 375$                                 | 500                           | $4^{\circ}/hr/rtHz$ | 18 - 32 VDC         | 144,3x162,8<br>x88,9 | - 40 až 75 $^{\circ}C$ | digital |
|                        |            | $\pm 100$                                 | 100                           | $6^{\circ}/hr/rtHz$ |                     |                      |                        | analog  |
|                        | TG - 6000  | $\pm 750$                                 | $< 75$                        |                     | 14 - 30 VDC         | 143x130,3x1<br>15,57 | - 20 až 55 $^{\circ}C$ |         |
| hitachi cable gyroskop | HOFG-1(A)  | $\pm 60$                                  |                               | $0,01^{\circ}/s$    | 12 VDC              | 120x100x73           | - 10 až 60 $^{\circ}C$ |         |
|                        | HOFG-OLC   | $\pm 120$                                 | 30                            | $0,04^{\circ}/s$    | 12 VDC              | 92x85x26             | - 10 až 60 $^{\circ}C$ |         |

Tabulka 13: Parametry optického gyroskopu [8, 9].

## 4.2 GYROSKOP VYUŽÍVAJÍCÍ CORIOLISOVY SÍLY [1, 10, 15]

Gyroskop může fungovat také na principu detekce Coriolisovy síly. Tyto gyroskopy umí měřit pouze v jednom směru - kolmém na plochu integrovaného obvodu. Pro jiné směry měření je nutné zajistit správné natočení a umístění gyroskopu.

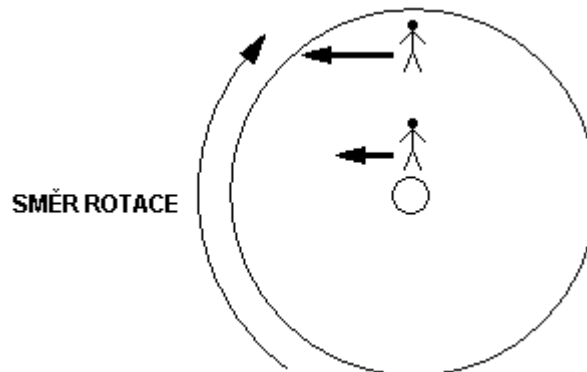
### 4.2.1 Vysvětlení vzniku Coriolisovy síly

Pro pochopení principu tohoto snímače je dobré vysvětlit, co je Coriolisova síla. Jedná se o setrvačnou sílu, která působí na pohybující se tělesa v rotující neinerciální vztažné soustavě, přičemž těleso mění svou vzdálenost od osy otáčení určitou rychlostí. Coriolisova síla má směr kolmý ke spojnici těleso - osa otáčení a způsobuje stáčení trajektorie tělesa proti směru otáčení soustavy. Coriolisova síla se vypočítá podle vztahu:

$$\mathbf{F}_c = -2m\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}, \quad \text{Rovnice 16}$$

kde  $F_c$ .....je Coriolisova síla,  
 $m$ .....je hmotnost tělesa,  
 $v$ .....je rychlost tělesa v neinerciální vztažné soustavě,  
 $\omega$ .....je vektor úhlové rychlosti otáčení soustavy  
 $\times$ .....označuje vektorový součin.

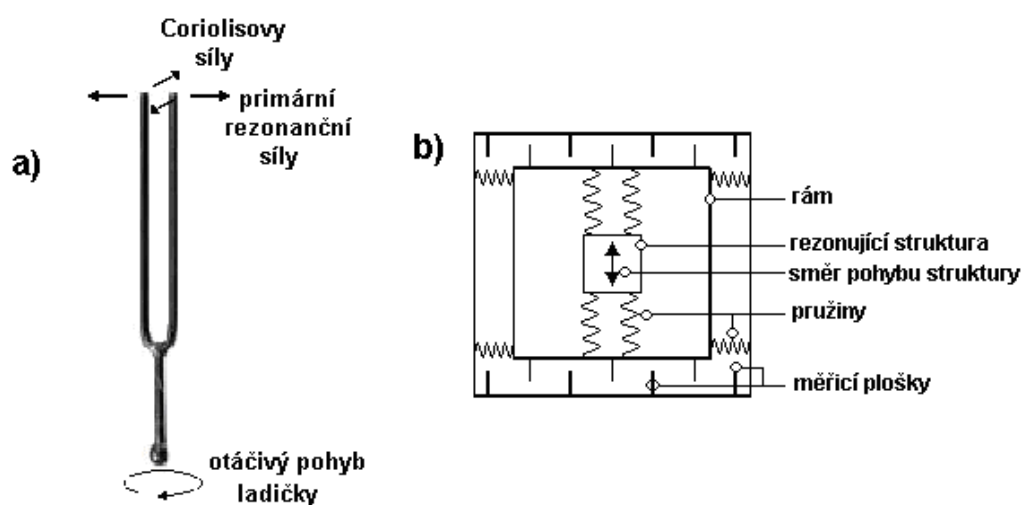
Působení Coriolisovy síly lze vysvětlit na pohybu člověka od středu rotujícího kruhu k jeho okraji určitou rychlostí  $v$ , jak je ukázáno na obrázku 42. Při pohybu na člověka působí vzrůstající virtuální Coriolisova síla, která má maximální velikost na kraji kruhu. Stejná síla působí na všechny hmotné objekty na naší planetě, protože ta je právě takovouto soustavou otáčející se pravidelně kolem své osy. Podle vzorce pak na severní polokouli působí ve směru hodinových ručiček, na jižní polokouli v protisměru. Na rovníku je síla nulová, na pólech maximální. Praktický důsledek lze pozorovat například v točení vírů při odtoku vody z umyvadla, u tornáda nebo na vymletých pravých březích řek.



Obrázek 42: Příklad působení Coriolisovy síly na osobu pohybující se od středu k okraji rotujícího kruhu.

#### 4.2.2 Princip gyroskopu s měřením Coriolisovy síly

Při použití Coriolisovy síly v integrovaných gyroskopech se využívá technologie MEMS (mikroelektromechanické systémy), kde se vytváří na integrovaném obvodu spolu s elektrickými obvody i mechanické mikrosoučásti, které tvoří samotný snímač. Obsahují vibrující ladičku nebo jinou srovnatelnou strukturu realizovanou v křemíkovém substrátu (na obrázku 43a).



Obrázek 43: a) Vytvoření Coriolisovy síly u vibračního gyroskopu [15].

b) Zjednodušená struktura kapacitního MEMS gyroskopu.

Struktury se aktivují elektrostatickými, piezoelektrickými nebo elektromagnetickými silami. Rotační pohyb struktur vyvolává Coriolisovy síly, které jsou příčinou dodatečných vibrací v kolmém směru (k původním vibracím). Snímače, které reagují na tyto vibrace vyvolané rotačním pohybem, mohou být kapacitní, piezorezistivní nebo piezoelektrické. Připojená elektronika generuje analogový výstup. Současná zařízení produkují základní napětí kolem 2,5 V. Toto napětí vzrůstá (klesá), pokud systém rotuje v jednom (nebo druhém) směru. Gyroskopy tohoto typu jsou malé a mají dobrou výkonnost.

Používaným principem pro měření velikosti Coriolisovy síly v integrovaných gyroskopech je kapacitní metoda. Je ukázána na obrázku 43b. Kmitáním rezonující struktury se rozkmitá také rám. Tak se mění vzdálenost měřicích plošek (desek kondenzátoru) a tím i kapacita kondenzátoru.

#### 4.2.3 Přehled trhu gyroskopů využívajících Coriolisovy síly

V nabídce firmy Analog Devices lze nalézt miniaturní integrované kapacitní gyroskopy, které využívají měření Coriolisovy síly. Parametry těchto gyroskopů jsou uvedeny v tabulce 14.

| typ      | rozsah (°/s) | citlivost (mV/°/s) | šířka pásma | hustota šumu (°/s/rHz) | nelinearita | napětový zdroj (V) | proudový zdroj (mA) | teplotní rozsah (°C) | cena v dolarech |
|----------|--------------|--------------------|-------------|------------------------|-------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| ADXRS150 | ±150         | 12.5± 10 %         | DC to 2 kHz | 0.05                   | 0.1% of FS  | 4.75V to 5.25V     | 6                   | - 40 až 85 °C        | \$30.00         |
| ADXRS300 | ±300         | 5.0± 8 %           | DC to 2 kHz | 0.10                   | 0.1% of FS  | 4.75V to 5.25V     | 6                   | - 40 až 85 °C        | \$30.00         |
| ADXRS401 | ±75          | 15.0± 15 %         | DC to 2 kHz | 0.05                   | 0.1% of FS  | 4.75V to 5.25V     | 6                   | - 40 až 85 °C        | \$22.00         |
| ADXRS610 | ±300         | 6± 0.5             | DC to 2 kHz | 0.05                   | 0.1% of FS  | 4.75V to 5.25V     | 3.5                 | - 40 až 105 °C       | \$30.00         |
| ADXRS612 | ±250         | 7± 0.8             | DC to 2 kHz | 0.05                   | 0.1% of FS  | 4.75V to 5.25V     | 3.5                 | - 40 až 105 °C       | \$30.00         |
| ADXRS614 | ±75          | 25.0± 2.5          | DC to 2 kHz | 0.04                   | 0.1% of FS  | 4.75V to 5.25V     | 3.5                 | - 40 až 105 °C       | \$30.00         |

**Tabulka 14: Hlavní parametry gyroskopů iMEMS Analog Devices řady ADXRS [1].**



## 5. PRAKTICKÁ MĚŘENÍ S GYROSKOPEM ADXRS300

Praktické měření bylo provedeno také s gyroskopem, který pracuje na principu Coriolisovy síly. Tento princip je popsán v předchozí kapitole. Bližší údaje o gyroskopu ADXRS300 získané z katalogových listů výrobce jsou uvedeny v příloze 8.

Měření s gyroskopem probíhalo podobně jako s akcelerometry. Bylo jím otáčeno kolem osy kolmé na plochu integrovaného obvodu, a na jeho výstupu bylo měřeno napětí, které odpovídá rychlosti otáčení. Integrací tohoto napětí byl získán signál úměrný úhlu natočení gyroskopu v daném okamžiku. Integrační konstanta byla v tomto případě 50 ms. Vždy po zapnutí programu, kterým bylo otáčení gyroskopu řízeno, probíhalo prvních 5 sekund průměrování aktuální hodnoty.

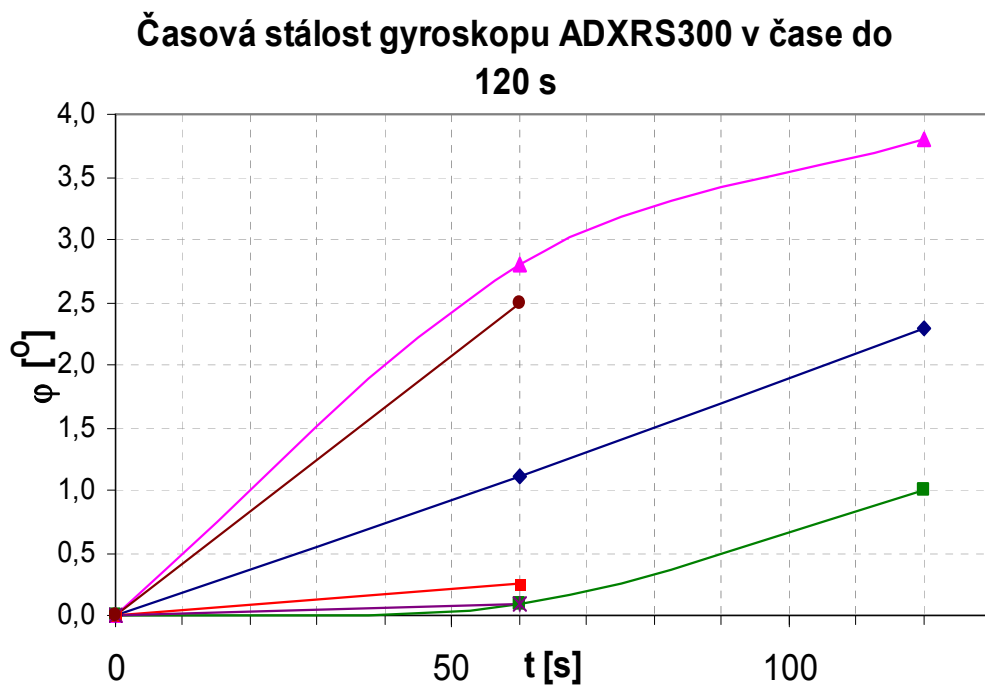
U gyroskopu byla prováděna dvě základní měření, která jsou popsána v následujících podkapitolách.

### 5.1 TEST ČASOVÉ STÁLOSTI

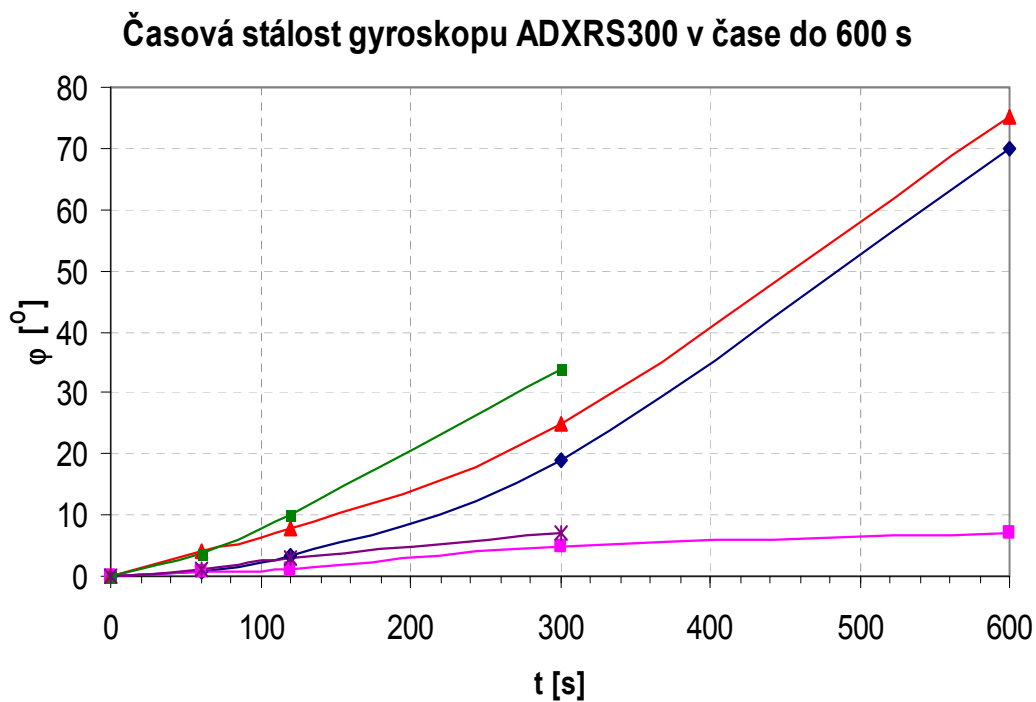
Při ověřování gyroskopu bylo zjištěno, že i po zastavení otáčení gyroskopu se integrovaný signál stále mění. To je způsobeno vlastním šumem gyroskopu, který není zanedbatelný, docházelo tedy k integraci šumu. Proto byl proveden test časové stálosti, který slouží ke zjištění vlastního šumu gyroskopu. Bylo zjišťováno, o kolik stupňů se gyroskop vychýlí v určitém čase po zastavení otáčení.

V praxi to znamená, jak dlouho je možné udržet gyroskop v ustáleném stavu, aniž by došlo k výrazné úhlové odchylce, resp. v jakém čase je tato odchylka ještě akceptovatelná.

Měření probíhalo tak, že po zastavení otáčení gyroskopu byly zaznamenávány hodnoty integrovaného signálu ( $^{\circ}$ ) v časových úsecích 1 minuta, 2 minuty, 5 minut a 10 minut. Výsledky získané tímto měřením jsou v následujících grafech.

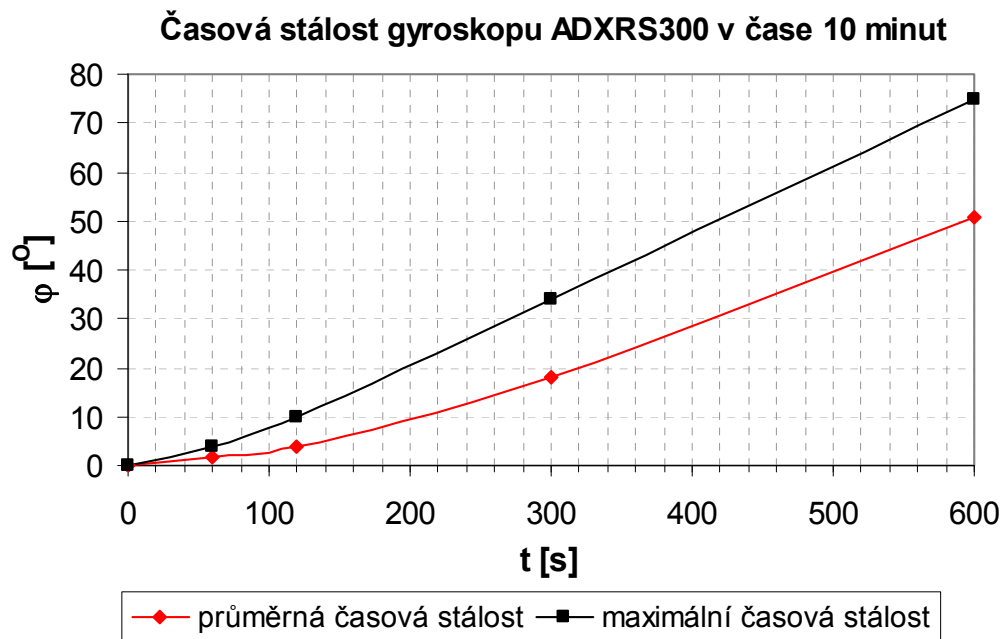


Obrázek 44: Průběhy měření při zjišťování časové stálosti ADXRS300.



Obrázek 45: Průběhy měření při zjišťování časové stálosti ADXRS300.

Ze dvou předchozích grafů byla spočítána průměrná hodnota pro jednotlivé časy, které jsou v grafu na obrázku 46 zobrazeny červeně. Maximální hodnoty, kterých bylo v jednotlivých časech dosaženo, jsou zobrazeny černě.



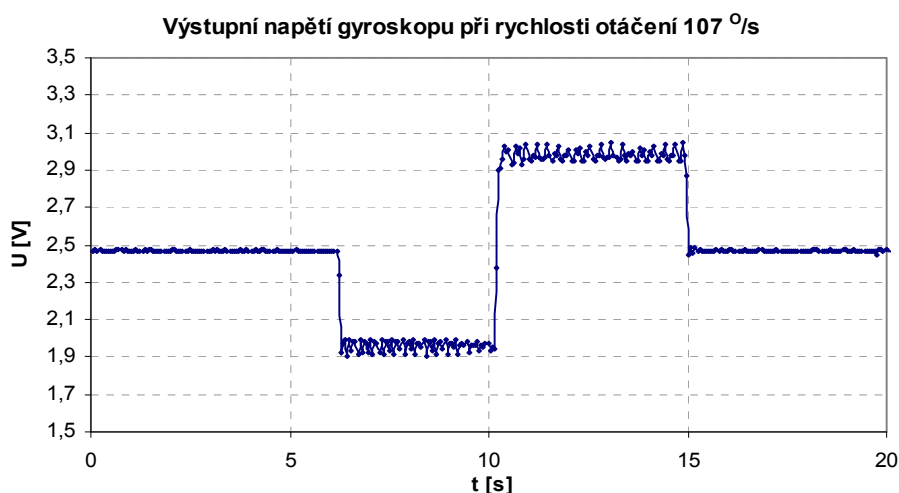
**Obrázek 46: Průměrná a maximální časová stálost gyroskopu ADXRS300.**

Z grafu na obrázku 46 je patrné, že v čase do 120 s je úhlová výchylka nižší než  $10^\circ$ . Poté se již prudce zvyšuje.

## 5.2 CITLIVOST GYROSKOPU ADXRS300

Dalším měřením byla u gyroskopu ADXRS300 ověřována jeho citlivost. Výrobce udává citlivost o hodnotě  $5 \text{ mV}/^\circ/\text{s}$ . Tímto měřením byla zjištěna citlivost  $4,7 \text{ mV}/^\circ/\text{s}$ .

Postup při zjišťování této hodnoty byl následující. Gyroskopem bylo otáčeno různými rychlostmi. Každé rychlosti odpovídá určitá hodnota napětí na výstupu gyroskopu. Průběh výstupního napětí gyroskopu ADXRS300 při rychlosti otáčení  $\pm 107^\circ/\text{s}$  je na následujícím obrázku.



**Obrázek 47: Průběh výstupního napětí gyroskopu ADXRS300 při rychlosti otáčení ± 107 °/s.**

Z naměřených hodnot byly získány údaje uvedené v následující tabulce.

| Rychlost otáčení                      | v                 | [°/s]    | -107    | 107    |
|---------------------------------------|-------------------|----------|---------|--------|
| Offset signálu                        | $U_{\text{off}}$  | [V]      | 2,4684  | 2,4684 |
| Výstupní napětí                       | $U_{\text{výst}}$ | [V]      | 1,9599  | 2,9716 |
| $U_{\text{výst}} - U_{\text{offset}}$ | $U_{\text{nam}}$  | [V]      | -0,5085 | 0,5032 |
| Citlivost                             | K                 | [mV/°/s] | 4,7394  | 4,6899 |

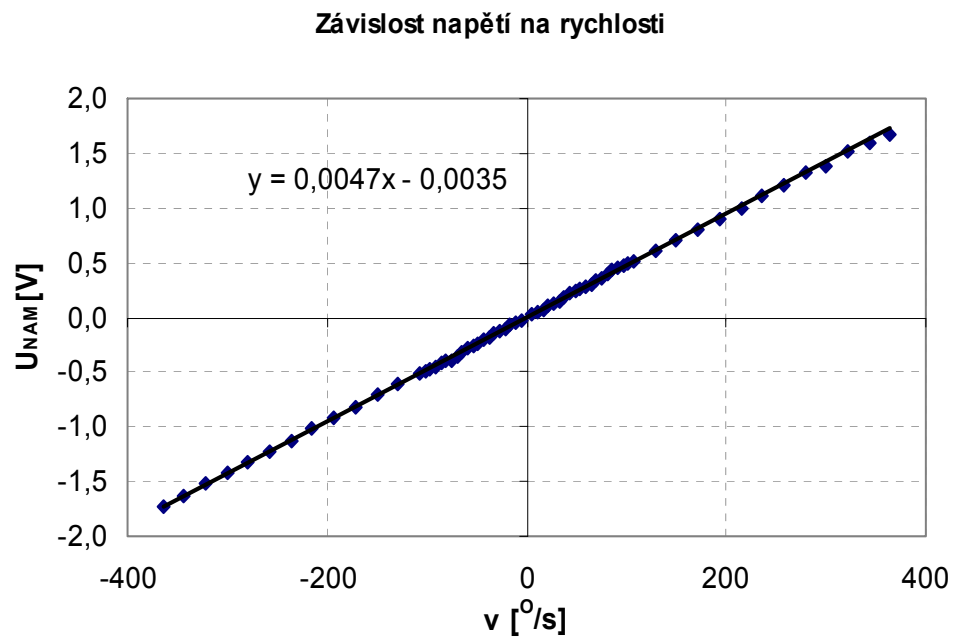
**Tabulka 15: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro rychlost otáčení gyroskopem 107 °/s.**

Postup při výpočtu citlivosti K pro rychlost - 107 °/s.:

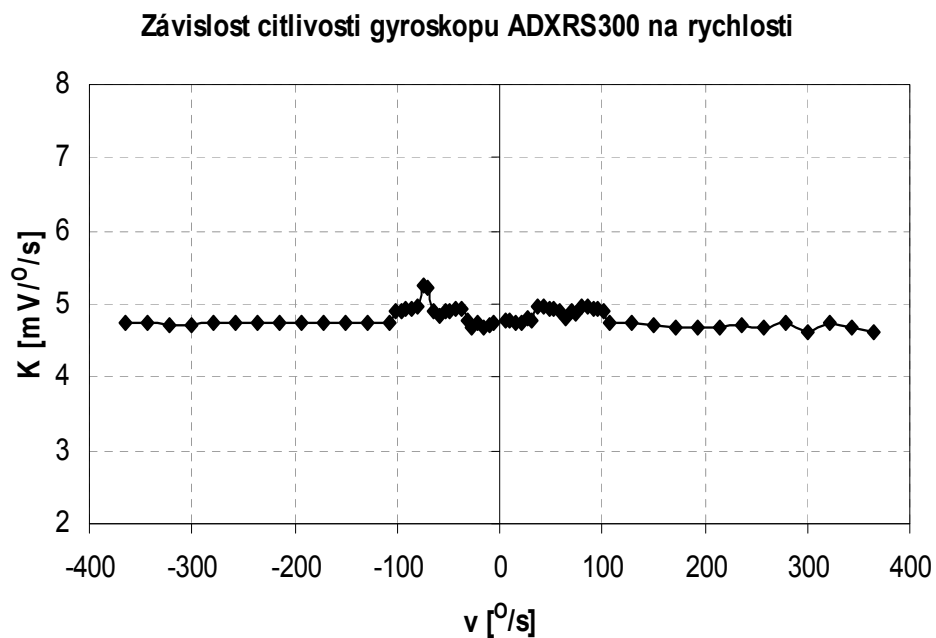
$$U_{\text{NAM}} = U_{\text{VÝST}} - U_{\text{OFFSET}} = 1,9599 - 2,4684 = -0,5085 \text{ V}$$

$$K = -0,5085 / -107 = 4,7394 \text{ mV/°/s}$$

Stejným způsobem bylo postupováno při zjišťování citlivosti u všech 31 hodnot rychlosti, kterými bylo gyroskopem otáčeno. Všechna měření byla opakována 3x a jejich výsledky zprůměrovány. Závislost napětí  $U_{\text{NAM}}$  na rychlosti je na obrázku 48. Závislost citlivosti na rychlosti je na obrázku 49.



Obrázek 48: Závislost napětí  $U_{NAM}$  na rychlosti otáčení gyroskopem.



Obrázek 49: Závislost citlivosti gyroskopu ADXRS300 na rychlosti otáčení.

## 6. ZÁVĚR

Práce je věnována snímačům úhlové výchylky. Náklon je možné zjistit mj. pomocí akcelerometrů nebo gyroskopů. Úkolem této práce bylo ověřit parametry gyroskopů a akcelerometrů hned několika výrobců. Hlavní těžiště práce spočívá ve vyhodnocení parametrů předložených snímačů a také v porovnání těchto parametrů s hodnotami v katalogových listech.

K ověření parametrů akcelerometrů čtyř výrobců byly použity dvě odlišné metody. První metoda vychází ze sinusové závislosti výstupního napětí akcelerometru  $U_X$  a  $U_Y$  na úhlové výchylce. Tato závislost byla porovnána s ideálním sinusovým průběhem získaným na základě katalogových hodnot. Při této metodě bylo rotačním stolem otáčeno ručně. Druhá metoda již byla automatizována, rotačním stolem otáčel krokový motor řízený počítačem. Metoda vychází ze závislosti výstupního napětí akcelerometru  $U_X$  a  $U_Y$  na zrychlení  $g$ . Tato závislost má tvar přímky.

Prostřednictvím měření bylo zjištěno, že kapacitní akcelerometry firem Analog Devices a Freescale, které byly prověřovány hned v několika provedeních, jsou velmi přesné. Parametry citlivost, offset a nelinearita uváděné v katalogových listech výrobců jsou shodné s údaji, které byly zjištěny prostřednictvím naměřených dat. Zajímavým zjištěním měření je odlišná orientace os akcelerometrů X a Y u jednotlivých výrobců.

Výsledné parametry, které byly naměřeny a dopočítány na základě 1. metody nejsou tak přesné a uspokojivé, jako parametry akcelerometrů získané 2. metodou. Příčinou nepřesností v 1. metodě je zajisté měřicí operátor a to, že rotačním stolem bylo otáčeno ručně. 1. metoda také vyrábí značnou nelinearitu, téměř u všech snímačů vznikla v 1. metodě nelinearita vyšší, než u 2. metody.

V této práci byl ověřován také gyroskop. Bylo zjištěno, že je vhodné jím měřit v ustáleném stavu v době do 2 minut, poté vzniká vlivem vlastního šumu gyroskopu značné úhlové vychýlení. Citlivost gyroskopu zjištěná měřením, odpovídá údajům, který je uveden v katalogovém listu.

## 7. LITERATURA

- [1] Analog Devices. Aktualizováno 2007-11-16. Dostupné z: [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [2] Migeon, A.a kol.: *Accelerometers and Inclometers*. Modular courses and modern sensors. Leonardo pilot project. Str. 5-1 - 5-89.
- [3] Mailly, F.: *Micromachined thermal accelerometer*. Sensors and Actuators. Science direct – Elsevier. Str 359 - 363. 2002, 0924-4247.
- [4] Leung, A., M. a kol.: *Micromachined accelerometer based on convection heat transfer*. IEEE Xplore. Str. 627 – 630, 1998. 0-7803-4412.
- [5] Dauderstadt, U., A. a kol.: *Temperature dependence and drift of a thermal accelerometer*. IEEE Xplore. International Conference on Solid – State Sensors and actuators. Str. 1209 – 1212, Chicago. 1997. 635424
- [6] Luczak, S.a kol.: *Sesing Tilt With MEMS Accelerometers*. IEEE Sensors Journal. Str. 1669 – 1674. 2006. 1530-473
- [7] Krohn, D. A., *Fiber optic sensors*. USA: 2000, ISBN 1-55617-714-3
- [8] Hitaci Cable. Aktualizováno 2007-11-4. Dostupné z: [www.hitachi-cable.com](http://www.hitachi-cable.com)
- [9] KVH Industries. Aktualizováno 2007-11-30. Dostupné z: [www.kvh.com](http://www.kvh.com)
- [10] Hrdlička, I.: *Bezgardanový systém orientace pro bezpilotní letoun*. Laboratoř konstrukce a architektury číslicových systémů. Publikace MUNI. Brno. Aktualizováno 2007-11-23. Dostupné z: <http://1202.fi.muni.cz>
- [11] Freescale semiconductor. Aktualizováno 2007-11-09. Dostupné z: [www.freescale.com](http://www.freescale.com)
- [12] Beneš, P.,a kol.: *Měření fyzikálních veličin, návody do laboratorních cvičení*. Brno: VUT, 2006
- [13] Crossbow. Aktualizováno 2007-11-28. Dostupné z: [www.xbow.com](http://www.xbow.com)
- [14] Memsic. Aktualizováno 2007-11-02. Dostupné z: [www.memsic.com](http://www.memsic.com)
- [15] Amman, D. a kol.: *Kontinuální navigace*. Novinky zeměměřičské knihovny. Roč.16, č.4 (2005), Str. 47-54. ISSN 1048-5104 Aktualizováno 2007-05-01. Dostupné z: [www.vugtk.cz](http://www.vugtk.cz)
- [16] Panasonic. Aktualizováno 2008-01-05. Dostupné z: <http://www.mew.co.jp/ac/e/tech/pimites/index.jsp>

- [17] Čejka, M.: *Elektronické měřicí systémy*. Brno: VUT, 2007
- [18] STmicroelectronic. Aktualizováno 2008-01-05. Dostupné z:
- [19] Pradeep, K., K.: *Nonlinear regression model of a low-g MEMS accelerometer*. IEEE Xplore. Str. 81 – 87, 2006. 1530-437.

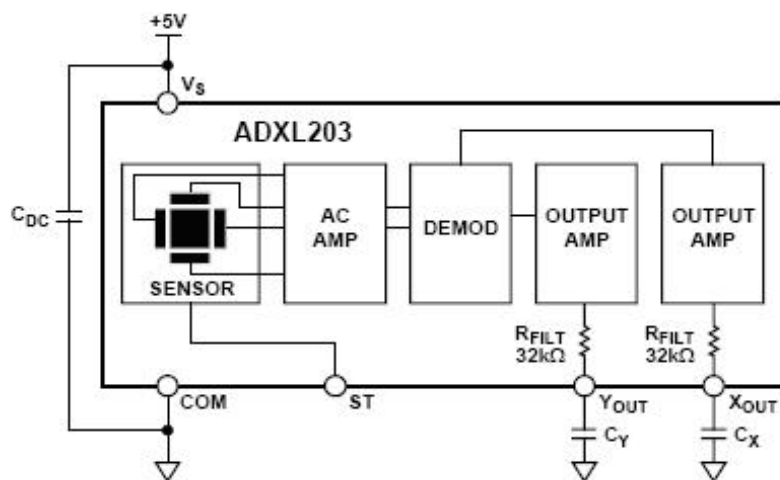


## SEZNAM PŘÍLOH

|           |   |
|-----------|---|
| Příloha 1 | Popis akcelerometru ADXL 203 [1]  |
| Příloha 2 | Popis akcelerometru ADXL 311 [1]  |
| Příloha 3 | Popis akcelerometru LIS2L0AS4 [18]  |
| Příloha 4 | Popis akcelerometru LIS3106AL [18]  |
| Příloha 5 | Popis akcelerometru MMA7260QT [11]  |
| Příloha 6 | Popis akcelerometru AGS61231 [16]   |
| Příloha 7 | Popis akcelerometru AGS61331 [16]   |
| Příloha 8 | Popis gyroskopu ADXRS 300 [1]   |
| Příloha 9 | Tabulky naměřených a vypočtených hodnot akcelerometrů 1. a 2. metodou, tabulka pro gyroskop |

## Příloha 1

Akcelerometr ADXL 203 je dvouosý kapacitní lineární akcelerometr s měřicím rozsahem  $\pm 1.7$  g umístěný na jednom integrovaném obvodu. Je dostupný ve vzduchotěsném LCC pouzdře s rozměry 5 x 5 x 2 mm. Při kmitočtu o hodnotě 60 Hz je jeho rozlišení 1mg. Akcelerometr využívá jednoduché napájení (typicky 5V), kterému odpovídá proud 700  $\mu$ A. Má vysokou citlivost a teplotní rozsah od  $-40$   $^{\circ}$ C do  $+125$   $^{\circ}$ C. Vzájemné uspořádání os X a Y má odchylku nižší než 0,1 %. Akcelerometr překoná otřesy až 3600 g.



Blokové schéma akcelerometru ADXL 203 [1].

Šířku frekvenčního pásma akcelerometru je možné nastavit použitím kondenzátorů  $C_X$  a  $C_Y$  na pinech  $X_{OUT}$  a  $Y_{OUT}$ . Jak ovlivní hodnota kondenzátoru šířku frekvenčního pásma, je vidět v následující tabulce. Šířka frekvenčního pásma od 0,5 Hz do 2,5 kHz je vybírána s ohledem na to, k jakému účelu má být akcelerometr použit.

| Šířka pásma<br>[Hz] | Kapacita<br>[ $\mu$ F] |
|---------------------|------------------------|
| *                   | 1                      |
| 10                  | 0.47                   |
| 50                  | 0.10                   |
| 100                 | 0.05                   |
| 200                 | 0.027                  |
| 500                 | 0.01                   |

Nastavení šířky pásma užitím  $C_X$  a  $C_Y$  [1].

\* - řádek označený hvězdičkou platí pouze u akcelerometru ADXL 203, nikoli u ADXL 311

Tento snímač bývá používán při navigacích, detekcích pohybu a jiných dvouosých snímáních. Skládá se z polykřemíkového mikromechanického sensoru a obvodu pro úpravu signálu v otevřené smyčce. Výstupním signálem je analogové napětí úměrné zrychlení. Akcelerometr ADXL 203 je schopný měřit obě – kladné i záporné zrychlení, statické i dynamické zrychlení a stejně tak může posloužit právě jako snímač náklonu.

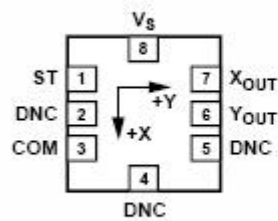
Další parametry akcelerometru ADXL 203 jsou v následující tabulce, která, pokud není uvedeno jinak, platí při podmínkách:  $T_A = -40^{\circ}\text{C}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$ ,  $V_S = 5\text{ V}$ ,  $C_X = C_Y = 0.1\ \mu\text{F}$ , zrychlení = 0 g.

| Parameter  | Conditions                             | Min <sup>1</sup> | Typ       | Max <sup>1</sup> | Unit                        |
|--|--|------------------|-----------|------------------|-----------------------------|
| <b>SENSOR INPUT</b>                                |  |                  |           |                  |                             |
| Measurement Range <sup>2</sup>                     | Each axis                              | $\pm 1.7$        |           |                  | g                           |
| Nonlinearity                                       | % of full scale                        |                  | $\pm 0.2$ | $\pm 1.25$       | %                           |
| Package Alignment Error                            |  |                  | $\pm 1$   |                  | Degrees                     |
| Alignment Error (ADXL203)                          | X sensor to Y sensor                   |                  | $\pm 0.1$ |                  | Degrees                     |
| Cross-Axis Sensitivity                             |  |                  | $\pm 1.5$ | $\pm 3$          | %                           |
| <b>SENSITIVITY (RATIOMETRIC)<sup>3</sup></b>       |  |                  |           |                  |                             |
| Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}$                  | Each axis<br>$V_S = 5\text{ V}$        | 960              | 1000      | 1040             | mV/g                        |
| Sensitivity Change Due to Temperature <sup>4</sup> | $V_S = 5\text{ V}$                     |                  | $\pm 0.3$ |                  | %                           |
| <b>ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)</b>             |  |                  |           |                  |                             |
| 0 g Voltage at $X_{OUT}, Y_{OUT}$                  | Each axis<br>$V_S = 5\text{ V}$        | 2.4              | 2.5       | 2.6              | V                           |
| Initial 0 g Output Deviation from Ideal            | $V_S = 5\text{ V}, 25^{\circ}\text{C}$ |                  | $\pm 25$  |                  | mg                          |
| 0 g Offset vs. Temperature                         |  |                  | $\pm 0.1$ | $\pm 0.8$        | mg/ $^{\circ}\text{C}$      |
| <b>NOISE PERFORMANCE</b>                           |  |                  |           |                  |                             |
| Output Noise                                       | <4 kHz, $V_S = 5\text{ V}$             |                  | 1         | 3                | mV rms                      |
| Noise Density                                      |  |                  | 110       |                  | $\mu\text{g}/\text{Hz rms}$ |
| <b>FREQUENCY RESPONSE<sup>5</sup></b>              |  |                  |           |                  |                             |
| $C_X, C_Y$ Range <sup>6</sup>                      |  | 0.002            |           | 10               | $\mu\text{F}$               |
| $R_{FILTER}$ Tolerance                             |  | 24               | 32        | 40               | k $\Omega$                  |
| Sensor Resonant Frequency                          |  |                  | 5.5       |                  | kHz                         |
| <b>OUTPUT AMPLIFIER</b>                            |  |                  |           |                  |                             |
| Output Swing Low                                   | No load                                | 0.05             | 0.2       |                  | V                           |
| Output Swing High                                  | No load                                |                  | 4.5       | 4.8              | V                           |
| <b>POWER SUPPLY</b>                                |  |                  |           |                  |                             |
| Operating Voltage Range                            |  | 3                |           | 6                | V                           |
| Quiescent Supply Current                           |  |                  | 0.7       | 1.1              | mA                          |
| Turn-On Time <sup>8</sup>                          |  |                  | 20        |                  | ms                          |

Parametry akcelerometru ADXL 203 udávaných výrobcem [1].

Dále pak platí, že citlivost je úměrná napájecímu napětí. Pro napájecí napětí o velikosti 4,75 V až 5,25 V je citlivost 186 mV/g až 215 mV/g. Aktuální frekvenční odezva je kontrolována použitím externího kondenzátoru ( $C_X, C_Y$ ). Pro  $C_X$  a  $C_Y = 0,002\ \mu\text{F}$  je šířka pásma = 2500 Hz. Pro  $C_X, C_Y = 10\ \mu\text{F}$  je šířka pásma 0,5 Hz.

$$\text{Šířka pásma} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

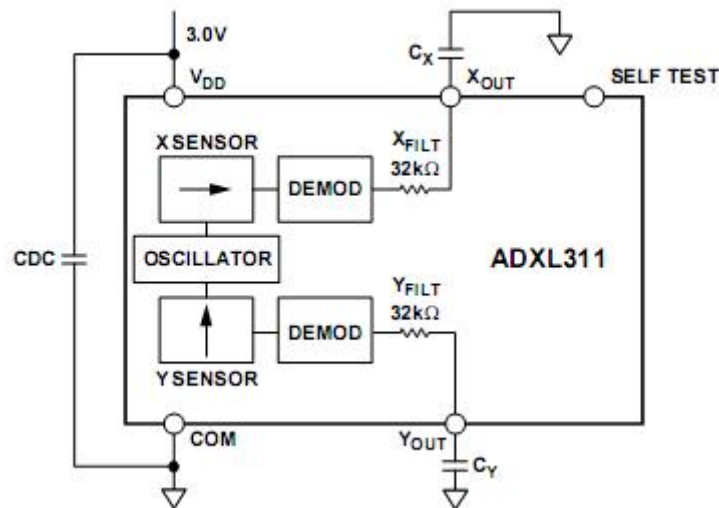


| Číslo pinu | Význam           | Popis            |
|------------|------------------|------------------|
| 1          | ST               | Self Test        |
| 2          | DNC              | Nepřipojeno      |
| 3          | COM              | Společná zem     |
| 4          | DNC              | Nepřipojeno      |
| 5          | DNC              | Nepřipojeno      |
| 6          | X <sub>OUT</sub> | Výstupní kanál X |
| 7          | Y <sub>OUT</sub> | Výstupní kanál Y |
| 8          | Us               | 3 V až 6 V       |

Konfigurace a popis funkce pinů akcelerometru ADXL 203 [1].

## Příloha 2

Akcelerometr ADXL 311 je dvouosý kapacitní lineární akcelerometr s měřicím rozsahem  $\pm 2g$ . Akcelerometr využívá jednoduché napájení (typicky 3V), kterému odpovídá proud 400  $\mu A$ .



Blokové schéma akcelerometru ADXL 311 [1].

Šířku frekvenčního pásma lze stejně jako u akcelerometru ADXL 203 nastavit pomocí kondenzátorů  $C_X$  a  $C_Y$  na pinech  $X_{OUT}$  a  $Y_{OUT}$ . Šířka frekvenčního pásma od 1 Hz do 3 kHz.

Bližší parametry akcelerometru ADXL 311 jsou v následující tabulce, která, pokud není uvedeno jinak, platí při podmínkách:  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 3\text{ V}$ , zrychlení = 0 g.

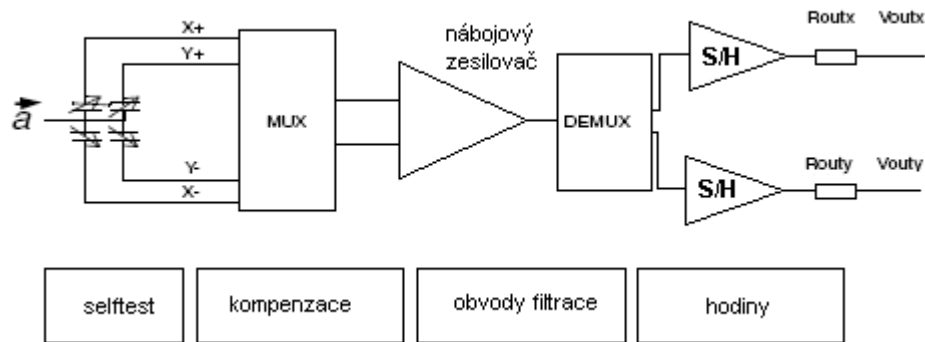
| Parameter  | Conditions                                      | Min  | Typ                             | Max  | Unit                               |
|--|---|------|---------------------------------|------|------------------------------------|
| SENSOR INPUT                                       | Each axis                                       |      |                                 |      |                                    |
| Measurement Range                                  |   |      | $\pm 2$                         |      | g                                  |
| Nonlinearity                                       | Best fit straight line                          |      | 0.2                             |      | % of FS                            |
| Alignment Error <sup>1</sup>                       |   |      | $\pm 1$                         |      | Degrees                            |
| Alignment Error                                    | X sensor to Y sensor                            |      | $\pm 0.1$                       |      | Degrees                            |
| Cross-Axis Sensitivity <sup>2</sup>                |   |      | $\pm 2$                         |      | %                                  |
| SENSITIVITY  | Each axis                                       |      |                                 |      |                                    |
| Sensitivity at $X_{\text{FLT}}$ , $Y_{\text{FLT}}$ | $V_{\text{DD}} = 3\text{ V}$                    |      | 174                             |      | mV/g                               |
| Sensitivity Tolerance (part to part)               |   |      | $\pm 15$                        |      | %                                  |
| Sensitivity Change due to Temperature <sup>3</sup> | $\Delta$ from $25^\circ\text{C}$                |      | $\pm 0.02$                      |      | %/ $^\circ\text{C}$                |
| 0 g BIAS LEVEL                                     | Each axis                                       |      |                                 |      |                                    |
| 0 g Voltage $X_{\text{FLT}}$ , $Y_{\text{FLT}}$    | $V_{\text{DD}} = 3\text{ V}$                    | 1.2  | 1.5                             | 1.8  | V                                  |
| 0 g Offset vs. Temperature                         | $\Delta$ from $25^\circ\text{C}$                |      | $\pm 1.0$                       |      | mg/ $^\circ\text{C}$               |
| NOISE PERFORMANCE                                  |   |      |                                 |      |                                    |
| Noise Density                                      | @ $25^\circ\text{C}$                            |      | 300                             |      | $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms |
| FREQUENCY RESPONSE                                 |   |      |                                 |      |                                    |
| -3 dB Bandwidth                                    | @ Pin $X_{\text{FLT}}$ and Pin $Y_{\text{FLT}}$ |      | 3                               |      | kHz                                |
| Sensor Resonant Frequency                          |   |      | 5.5                             |      | kHz                                |
| FILTER   |   |      |                                 |      |                                    |
| $R_{\text{FLT}}$ Tolerance                         | 32 k $\Omega$ nominal                           |      | $\pm 15$                        |      | %                                  |
| Minimum Capacitance                                | @ Pin $X_{\text{FLT}}$ and Pin $Y_{\text{FLT}}$ | 1000 |                                 |      | pF                                 |
| POWER SUPPLY                                       |   |      |                                 |      |                                    |
| Operating Voltage Range                            |   | 2.4  |                                 | 5.25 | V                                  |
| Quiescent Supply Current                           |   |      | 0.4                             | 1.0  | mA                                 |
| Turn-On Time <sup>4</sup>                          |   |      | $160 \times C_{\text{FLT}} + 4$ |      | ms                                 |
| TEMPERATURE RANGE                                  |   |      |                                 |      |                                    |
| Operating Range                                    |   | 0    |                                 | 70   | $^\circ\text{C}$                   |

Parametry akcelerometru ADXL 311 udávané výrobcem [1].

Dále pak platí, že chyba sousosti je specifikována jako úhel mezi skutečnou a indikovanou osou citlivosti. Příčná citlivost je algebraický součet chyby sousosti a chyby vnitřní citlivosti. Popis a konfigurace pinů akcelerometru jsou u tohoto akcelerometru stejné jsou u akcelerometru ADXL 203.

### Příloha 3

Akcelerometr LIS2L0AS4 je dvouosý kapacitní lineární akcelerometr a má možnost volby plného rozsahu,  $\pm 2\text{g}$  a  $\pm 6\text{g}$  (v tomto měření byl zvolen plný rozsah  $\pm 2\text{g}$ ). Napájecí napětí snímače udává výrobce v rozmezí 2,4 až 5,25 V. Rozlišení akcelerometru je 0,3 mg při šířce frekvenčního pásma o hodnotě 100 Hz. Snímač je vysoce odolný proti otřesům.



Funkční blokové schéma akcelerometru LIS2L0AS4 [18].

LIS2L02AS4 je dostupný v plastovém SMD pouzdře a je specifikován při teplotním rozsahu - 40 °C až 85 °C. Lze jím měřit zrychlení i při šířce pásma 1,5 kHz pro všechny osy. Šířka pásma může být redukována užitím externích kapacit, jejichž hodnoty pro příslušné mezní kmitočty jsou v následující tabulce. Ta je společná pro oba akcelerometry od STMicroelectronic (další typ akcelerometru od STMicroelectronic bude popsán v následující podkapitole).

| Mezní kmitočet<br>[Hz] | Kapacita<br>[nF] |
|------------------------|------------------|
| 1                      | 1 500            |
| 10                     | 150              |
| * 20                   | 68               |
| 50                     | 30               |
| 100                    | 15               |
| 200                    | 6.8              |
| 500                    | 3                |

Výběr vhodné filtrační kapacity s ohledem na mezní kmitočet [18].

\* - tento řádek tabulky platí pouze pro LIS3l06AL, nikoli pro LIS2L02AS4.

LIS2L02AS4 zahrnuje jak snímací prvek tak i IC rozhraní schopné předat informace z měřicího prvku v podobě analogového signálu. Snímací prvek schopný detekovat zrychlení je vyráběn užitím procesu vyvinutého ST k výrobě setrvačných snímačů. IC rozhraní je vyrobeno užitím standardního CMOS zpracování. Akcelerometr LIS2L02AS4 je používán, stejně jako předchozí akcelerometry, pro mobilní vývody, vstupní zařízení her a virtuálních realit, detekci volného pádu pro ochranu dat, inerciální navigaci a robotiku. Více o parametrech akcelerometru

LIS2L02AS4 jsou v následujících tabulkách, které, pokud není uvedeno jinak, platí při podmínkách: (Teplotní rozsah  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$ ),  $V_S = 3,3$ ,  $T = 25^{\circ}\text{C}$ .

| Symbol  | Parameter   | Test Condition   | Min.             | Typ. <sup>2</sup> | Max.             | Unit                           |
|---------|---|--|------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|
| Ar      | Acceleration Range <sup>3</sup>                   | FS pin connected to GND                                | $\pm 1.8$        | $\pm 2.0$         |                  | g                              |
|         |   | FS pin connected to Vdd                                | $\pm 5.4$        | $\pm 6.0$         |                  | g                              |
| So      | Sensitivity <sup>4</sup>                          | Full-scale = 2g  | $V_{dd}/5-10\%$  | $V_{dd}/5$        | $V_{dd}/5+10\%$  | V/g                            |
|         |   | Full-scale = 6g  | $V_{dd}/15-10\%$ | $V_{dd}/15$       | $V_{dd}/15+10\%$ | V/g                            |
| SoDr    | Sensitivity Change Vs Temperature                 | Delta from $+25^{\circ}\text{C}$                       |                  | $\pm 0.01$        |                  | $\%/^{\circ}\text{C}$          |
| Voff    | Zero-g Level <sup>4</sup>                         | $T = 25^{\circ}\text{C}$                               | $V_{dd}/2-10\%$  | $V_{dd}/2$        | $V_{dd}/2+10\%$  | V                              |
| OffDr   | Zero-g level Change Vs Temperature                | Delta from $+25^{\circ}\text{C}$                       |                  | $\pm 0.2$         |                  | $\text{mg}/^{\circ}\text{C}$   |
| NL      | Non Linearity <sup>5</sup>                        | Best fit straight line<br>Full-scale = 2g<br>X, Y axis |                  | $\pm 0.3$         | $\pm 1.5$        | % FS                           |
| CrossAx | Cross-Axis <sup>6</sup>                           |  |                  | $\pm 2$           | $\pm 4$          | %                              |
| An      | Acceleration Noise Density                        | $V_{dd}=3.3\text{V}$ ;<br>Full-scale = 2g              |                  | 30                |                  | $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| Fres    | Sensing Element Resonance Frequency <sup>10</sup> | all axes   | 1.5              |                   |                  | kHz                            |
| Top     | Operating Temperature Range                       |  | -40              |                   | +85              | $^{\circ}\text{C}$             |
| Wh      | Product Weight                                    |  |                  | 0.6               |                  | gram                           |

Mechanické parametry akcelerometru LIS2L02AS4 udávaných výrobcem [18].

| Symbol | Parameter                                 | Test Condition                        | Min. | Typ. <sup>2</sup>              | Max. | Unit          |
|--------|---|---------------------------------------|------|--------------------------------|------|---------------|
| Vdd    | Supply Voltage                            |                                       | 2.4  | 3.3                            | 5.25 | V             |
| Idd    | Supply Current                            | mean value<br>PD pin connected to GND |      | 0.85                           | 1.5  | mA            |
| IddPdn | Supply Current in Power Down Mode         | rms value<br>PD pin connected to Vdd  |      | 2                              | 5    | $\mu\text{A}$ |
| Vst    | Self Test Input                           | Logic 0 level                         | 0    |                                | 0.8  | V             |
|        |   | Logic 1 level                         | 2.2  |                                | Vdd  | V             |
| Rout   | Output Impedance                          |                                       | 80   | 110                            | 140  | $k\Omega$     |
| Cload  | Capacitive Load Drive <sup>3</sup>        |                                       | 320  |                                |      | pF            |
| Ton    | Turn-On Time at exit from Power Down mode | Cload in $\mu\text{F}$                |      | $550 \cdot \text{Cload} + 0.3$ |      | ms            |

Elektrické parametry akcelerometru LIS2L02AS4 udávaných výrobcem [18].

Pro obě tabulky platí, že výrobek je kalibrován při napětí 3,3 V. Typické specifikace nejsou zaručeny. Nulové g a citlivost jsou úměrné napájecímu napětí. Minimální rezonanční frekvence  $F_{RES} = 1,5$  kHz. Šířka pásma snímače

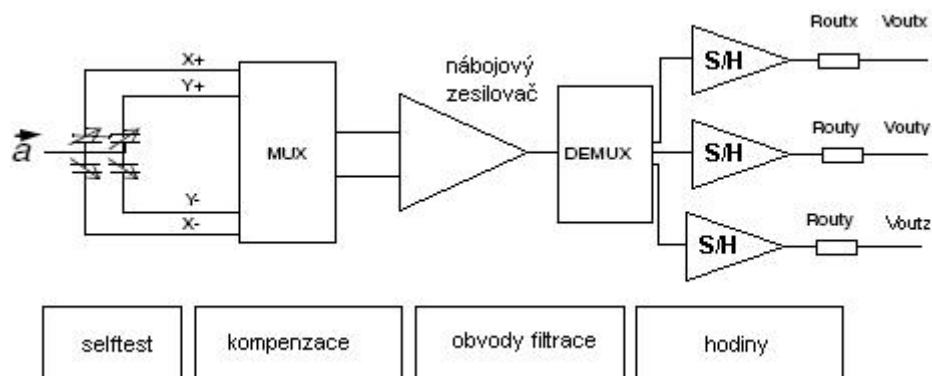
$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 110k\Omega \cdot \text{Cload}}, \text{ s } \text{Cload} > 1\text{nF}.$$

| Číslo pinu | Pin       | Význam  |
|------------|-----------|---|
| 1 až 5     | NC        | Vnitřně nepřipojen  |
| 6          | GND       | 0 V napájení  |
| 7          | Vdd       | Napájení  |
| 8          | Vouty     | Výstupní napětí   |
| 9          | ST        | SelfTest (Log. 0: normální režim, log. 1: SelfTest)                     |
| 10         | Voutx     | Výstupní napětí   |
| 11         | PD        | Pokles výkonu (Log. 0: normální režim, log. 1: režim poklesu výkonu)    |
| 12         | NC        | Vnitřně nepřipojen  |
| 13         | FS        | Výběr plného rozsahu (Log. 0: 2 g plný rozsah, log. 1: 6 g plný rozsah) |
| 14 - 15    | Vyhrazený | Nepřipojen, nebo připojen k Vdd   |
| 16         | Vyhrazený | Připojen k Vdd, nebo k zemi   |
| 17         | Vyhrazený | Nepřipojen, nebo připojen k Vdd   |
| 18         | Vyhrazený | Nepřipojen, nebo připojen k zemi  |
| 19 - 24    | NC        | Vnitřně nepřipojen  |

Popis funkce pinů akcelerometru LIS2L02AS4 [18].

## Příloha 4

Jedná se o trojosý lineární kapacitní akcelerometr, který má opět možnost volby plného rozsahu, a to mezi  $\pm 2g$  a  $\pm 6g$ . Měřen byl rozsah  $\pm 6g$ . Rozlišení akcelerometru je  $0,5 \text{ mg}$  při šířce frekvenčního pásma o hodnotě  $100 \text{ Hz}$ .



Funkční blokové schéma akcelerometru LIS3106AL [18].



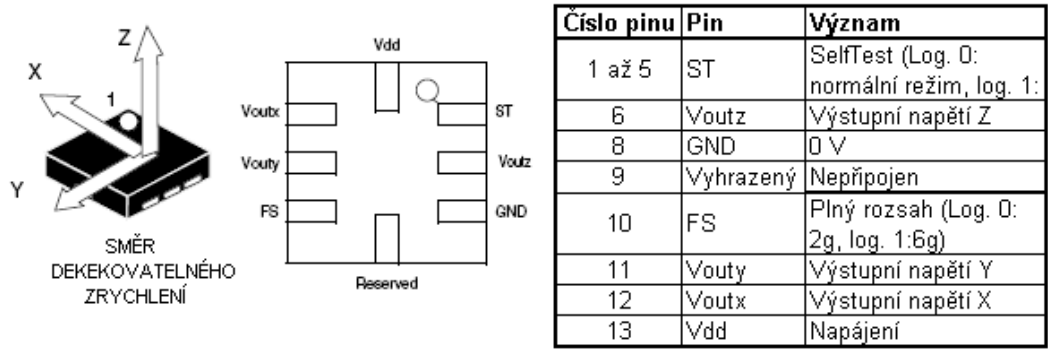
| Symbol  | Parameter   | Test Condition   | Min.       | Typ. <sup>(2)</sup> | Max.       | Unit   |
|---------|---|--|------------|---------------------|------------|--------|
| Ar      | Acceleration Range <sup>(3)</sup>                   | Full-scale = 2g  | ±1.8       | ±2.0                |            | g      |
|         |   | Full-scale = 6g  | ±5.4       | ±6.0                |            | g      |
| So      | Sensitivity <sup>(4)</sup>                          | Full-scale = 2g  | Vdd/5–10%  | Vdd/5               | Vdd/5+10%  | V/g    |
|         |   | Full-scale = 6g  | Vdd/15–10% | Vdd/15              | Vdd/15+10% | V/g    |
| SoDr    | Sensitivity Change Vs Temperature                   | Delta from +25°C                                       |            | ±0.01               |            | %/°C   |
| Voff    | Zero-g Level <sup>(4)</sup>                         | T = 25°C   | Vdd/2-6%   | Vdd/2               | Vdd/2+6%   | V      |
| OffDr   | Zero-g level Change Vs Temperature                  | Delta from +25°C                                       |            | ±0.5                |            | mg/°C  |
| NL      | Non Linearity <sup>(5)</sup>                        | Best fit straight line<br>Full-scale = 2g<br>X, Y axis |            | ±0.3                | ±1.5       | %      |
|         |   | Best fit straight line<br>Full-scale = 2g<br>Z axis    |            | ±0.5                | ±1.5       | %      |
| CrossAx | Cross-Axis <sup>(6)</sup>                           |  |            | ±2                  | ±4         | %      |
| An      | Acceleration Noise Density                          | Vdd=3.3V;<br>Full-scale = 2g                           |            | 50                  |            | μg/√Hz |
| Fres    | Sensing Element Resonance Frequency <sup>(10)</sup> | all axes   | 1.5        |                     |            | kHz    |
| Top     | Operating Temperature Range                         |  | -40        |                     | +85        | °C     |
| Wh      | Product Weight                                      |  |            | 0.08                |            | gram   |

Mechanické parametry akcelerometru LIS3106AL udávaných výrobcem [18].

Bližší parametry akcelerometru LIS3106AL jsou v uvedených tabulkách, které, pokud není uvedeno jinak, platí při podmínkách: teplotní rozsah -40°C to +85°C,  $V_S = 3,3$ ,  $T = 25$  °C.

| Symbol | Parameter                            | Test Condition | Min.    | Typ. <sup>(2)</sup> | Max.    | Unit |
|--------|--------------------------------------|----------------|---------|---------------------|---------|------|
| Vdd    | Supply Voltage                       |                | 2.4     | 3.3                 | 3.6     | V    |
| Idd    | Supply Current                       | mean value     |         | 0.95                | 1.5     | mA   |
| Vst    | Self Test Input                      | Logic 0 level  | 0       |                     | 0.3*Vdd | V    |
|        |                                      | Logic 1 level  | 0.7*Vdd |                     | Vdd     | V    |
| Vfs    | Full Scale Input                     | Logic 0 level  | 0       |                     | 0.3*Vdd | V    |
|        |                                      | Logic 1 level  | 0.7*Vdd |                     | Vdd     | V    |
| Rout   | Output Impedance                     |                | 80      | 110                 | 140     | kΩ   |
| Cload  | Capacitive Load Drive <sup>(3)</sup> |                | 1       |                     |         | nF   |
| Top    | Operating Temperature Range          |                | -40     |                     | +85     | °C   |

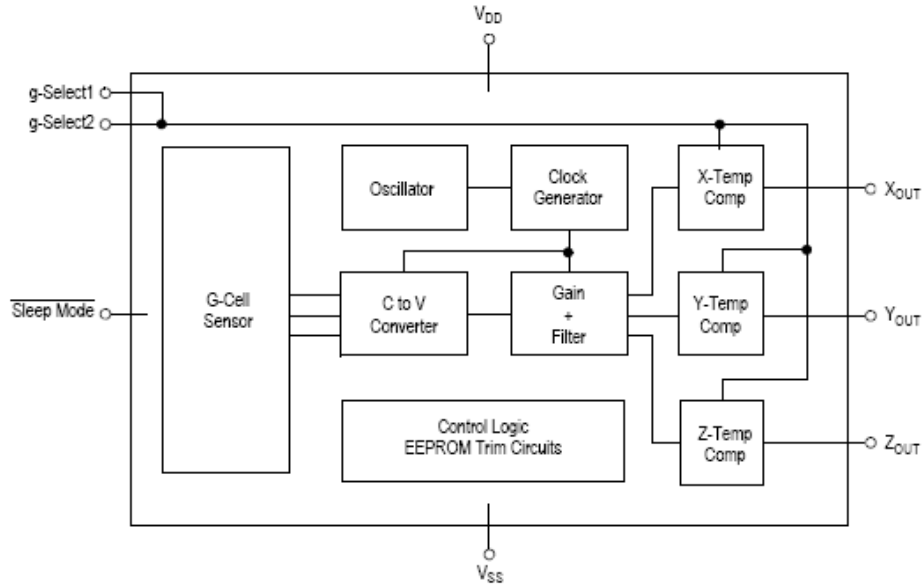
Elektrické parametry akcelerometru LIS3106AL udávaných výrobcem [18].



Konfigurace a popis pinů akcelerometru LIS3106AL [18].

### Příloha 5

Jedná se o trojosý kapacitní akcelerometr umístěný na jednom integrovaném obvodu s volitelným rozsahem měření  $\pm 1,5g/2g/4g/6g$ . Rozsah je volen prostřednictvím dvou pinů – g-Select1 a g-Select2. Napájecí napětí je mezi 2,2 až 3,6 V. Rozměry tohoto snímače jsou 6 x 6 x 1,45 mm. Akcelerometr se vyznačuje rychlou spínací dobou a vysokou citlivostí (při rozsahu  $\pm 1,5g$  je citlivost 800 mV/g).



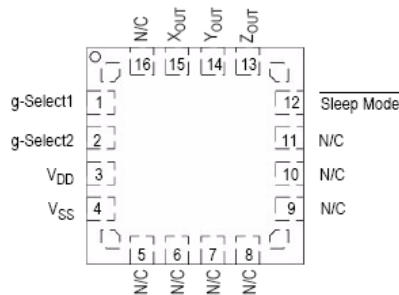
Blokové schéma akcelerometru MMA7260QT [11].

Používán je nejčastěji při detekcích volného pádu (např. u notebooků), při navigacích, v robotice, při detekcích pohybu nebo snímání náklonu.

| Characteristic   | Symbol                          | Min                   | Typ  | Max                   | Unit                |
|--|---------------------------------|-----------------------|------|-----------------------|---------------------|
| Operating Range <sup>(2)</sup>   |                                 |                       |      |                       |                     |
| Supply Voltage <sup>(3)</sup>  | V <sub>DD</sub>                 | 2.2                   | 3.3  | 3.6                   | V                   |
| Supply Current   | I <sub>DD</sub>                 | —                     | 500  | 800                   | μA                  |
| Supply Current at Sleep Mode <sup>(4)</sup>                            | I <sub>DD</sub>                 | —                     | 3.0  | 10                    | μA                  |
| Operating Temperature Range  | T <sub>A</sub>                  | -40                   | —    | +105                  | °C                  |
| Acceleration Range, X-Axis, Y-Axis, Z-Axis<br>g-Select1 & 2: 00        | g <sub>FS</sub>                 | —                     | ±1.5 | —                     | g                   |
| Output Signal  |                                 |                       |      |                       |                     |
| Zero-g (T <sub>A</sub> = 25°C, V <sub>DD</sub> = 3.3 V) <sup>(5)</sup> | V <sub>OFF</sub>                | 1.485                 | 1.65 | 1.815                 | V                   |
| Zero-g <sup>(4)</sup>  | V <sub>OFF, T<sub>A</sub></sub> |                       |      |                       | mg/°C               |
| X-axis   |                                 | ±2.6 <sup>(6)</sup>   | ±0.6 | ±3.8 <sup>(7)</sup>   |                     |
| Y-axis   |                                 | ±5.8 <sup>(6)</sup>   | ±5.8 | ±5.9 <sup>(7)</sup>   |                     |
| Z-axis   |                                 | ±1.0 <sup>(6)</sup>   | ±0.8 | ±0.8 <sup>(7)</sup>   |                     |
| Sensitivity (T <sub>A</sub> = 25°C, V <sub>DD</sub> = 3.3 V)           |                                 |                       |      |                       |                     |
| 1.5g   | S <sub>1.5g</sub>               | 740                   | 800  | 860                   | mV/g                |
| Bandwidth Response   |                                 |                       |      |                       |                     |
| XY   | f <sub>-3dB</sub>               | —                     | 350  | —                     | Hz                  |
| Z  | f <sub>-3dB</sub>               | —                     | 150  | —                     | Hz                  |
| Noise  |                                 |                       |      |                       |                     |
| RMS (0.1 Hz – 1 kHz) <sup>(4)</sup>                                    | n <sub>RMS</sub>                | —                     | 4.7  | —                     | mVrms               |
| Power Spectral Density RMS (0.1 Hz – 1 kHz) <sup>(4)</sup>             | n <sub>PSD</sub>                | —                     | 350  | —                     | μg <sub>r</sub> /Hz |
| Output Stage Performance   |                                 |                       |      |                       |                     |
| Full-Scale Output Range (I <sub>OUT</sub> = 30 μA)                     | V <sub>FSO</sub>                | V <sub>SS</sub> +0.25 | —    | V <sub>DD</sub> -0.25 | V                   |
| Nonlinearity, X <sub>OUT</sub> , Y <sub>OUT</sub> , Z <sub>OUT</sub>   | NL <sub>OUT</sub>               | -1.0                  | —    | +1.0                  | %FSO                |
| Cross-Axis Sensitivity <sup>(10)</sup>                                 | V <sub>XY, XZ, YZ</sub>         | —                     | —    | 5.0                   | %                   |

Specifikace akcelerometru MMA7260QT [11].

Další specifikace tohoto akcelerometru jsou uvedeny v předchozí tabulce. Pokud není uvedeno jinak, platí uvedené hodnoty při podmínkách:  $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 105^{\circ}\text{C}$ ,  $2,2\text{ V} \leq V_{DD} \leq 3,6\text{ V}$ , zrychlení  $0\text{g}$ .



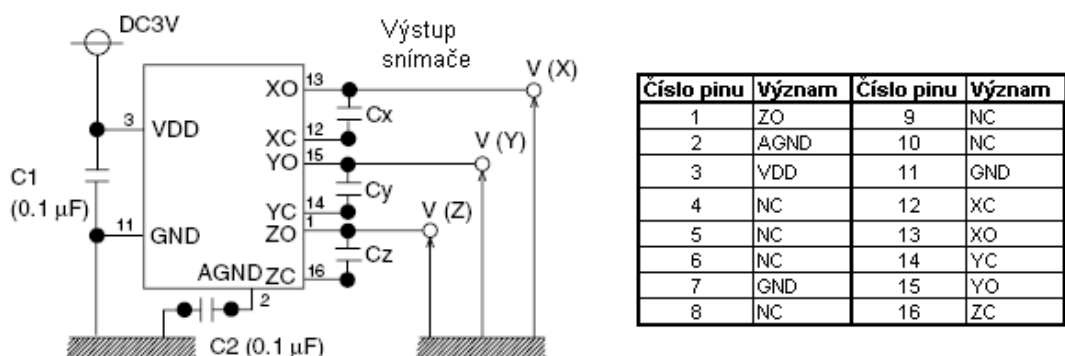
| Číslo pinu | Význam          | Popis  |
|------------|-----------------|--|
| 1          | g-Select1       | Logický vstup k nastavení rozsahu                              |
| 2          | g-Select2       | Logický vstup k nastavení rozsahu                              |
| 3          | V <sub>DD</sub> | Napájecí napětí  |
| 4          | V <sub>SS</sub> | GND  |
| 5 - 7      | N/C             | Nepřipojeno  |
| 8 - 11     | N/C             | Nepřipojeno  |
| 12         | Sleep Mode      | Logický vstup, volba mezi sleep modem a činností akcelerometru |
| 13         | Zout            | Výstupní napětí osy Z  |
| 14         | Yout            | Výstupní napětí osy Y  |
| 15         | Xout            | Výstupní napětí osy X  |
| 16         | N/C             | Nepřipojeno  |

Popis pinů akcelerometru MMA7260QT [11].

## Příloha 6

Jedná se o tříosý akcelerometr o rozměrech 4,6 x 4,6 x 1,3 mm. Měřicí rozsah akcelerometru AGS61231 je  $\pm 2\text{g}$ . Tento snímač překoná otřesy o hodnotě až 5 000 g. Kromě snímání zrychlení slouží také jako snímač náklonu (např. v herních zařízeních), při detekci vibrací a také v robotice. Akcelerometr je typicky napájen napětím o hodnotě 3 V. Na následujícím obrázku je uvedeno zapojení a popis

jednotlivých pinů akcelerometru. Toto zapojení je shodné také pro akcelerometr AGS61331.



Popis pinů akcelerometru AGS61231 a AGS61331 [16].

Bližší údaje uváděné výrobcem jsou v následující tabulce.

|  | Axis    | Unit | AGS61231       |      |      | Remarks  |
|--|---------|------|----------------|------|------|--|
|  |         |      | Standard value |      |      |  |
|  |         |      | min.           | typ. | max. |  |
| Acceleration detection range               | X, Y, Z | g    | -2             | —    | 2    |  |
| Operation power supply voltage             | —       | V    | 2.7            | 3.0  | 3.6  | -20 to 70°C                                    |
| Current consumption                        | —       | mA   | —              | 1.7  | 2.5  | Ta=25°C  |
| Sensitivity                                | X, Y, Z | V/g  | 0.47           | 0.5  | 0.53 | Ta=25°C  |
| Temperature sensitivity characteristic     | X, Y, Z | %    | -9             | —    | 9    | -20 to 70°C                                    |
| Offset voltage (0g)                        | X, Y, Z | V    | 1.41           | 1.5  | 1.59 | Ta=25°C  |
| Offset voltage temperature characteristics | X, Y, Z | %FS  | -12            | —    | 12   | -20 to 70°C                                    |
| Other axis sensitivity                     | X, Y, Z | %    | -6             | —    | 6    | Ta=25°C  |
| Non-linearity                              | X, Y, Z | %FS  | -2             | —    | 2    | Ta=25°C  |
| Turn-on time                               | X, Y, Z | ms   | —              | 20   | —    | 0g, Ta=25°C,<br>C1=C2=0.1µF, Cx,Cy,<br>Cz=33nF |
| Frequency response                         | X, Y, Z | Hz   | DC             | 50   | —    | -3dB point,<br>Cx, Cy, Cz=33nF                 |

Parametry akcelerometru AGS61231 [16].

## Příloha 7

Jedná se o tříosý akcelometr o rozměrech 4,6 x 4,6 x 1,3 mm. Měřicí rozsah akcelerometru AGS61331 je  $\pm 3g$ . Akcelerometr je typicky napájen napětím o hodnotě 3 V. Zapojení a popis jednotlivých pinů akcelerometru je shodné s akcelerometrem AGS61231. Bližší specifikace tohoto snímače jsou v následující tabulce.

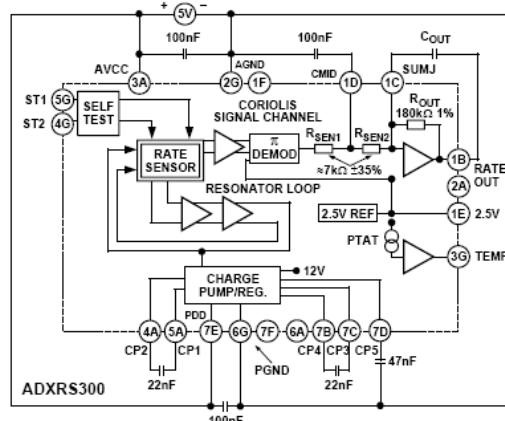
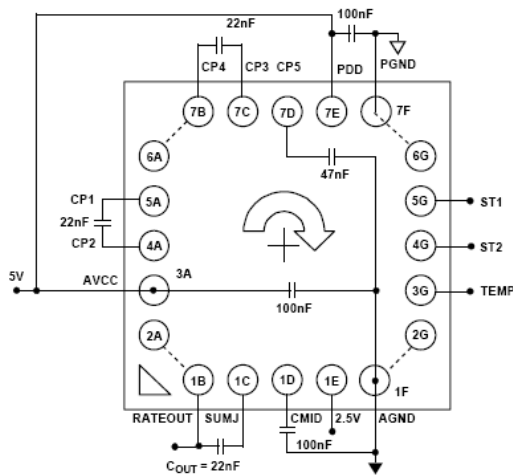
|  | Axis    | Unit | AGS61331       |       |       | Remarks  |
|--|---------|------|----------------|-------|-------|--|
|  |         |      | Standard value |       |       |  |
|  |         |      | min.           | typ.  | max.  |  |
| Acceleration detection range               | X, Y, Z | g    | -3             | —     | 3     |  |
| Operation power supply voltage             | —       | V    | 2.7            | 3.0   | 3.6   | -20 to 70°C                                    |
| Current consumption                        | —       | mA   | —              | 1.7   | 2.5   | Ta=25°C  |
| Sensitivity                                | X, Y, Z | V/g  | 0.313          | 0.333 | 0.353 | Ta=25°C  |
| Temperature sensitivity characteristic     | X, Y, Z | %    | -9             | —     | 9     | -20 to 70°C                                    |
| Offset voltage (0g)                        | X, Y, Z | V    | 1.44           | 1.5   | 1.56  | Ta=25°C  |
| Offset voltage temperature characteristics | X, Y, Z | %FS  | -8             | —     | 8     | -20 to 70°C                                    |
| Other axis sensitivity                     | X, Y, Z | %    | -6             | —     | 6     | Ta=25°C  |
| Non-linearity                              | X, Y, Z | %FS  | -2             | —     | 2     | Ta=25°C  |
| Turn-on time                               | X, Y, Z | ms   | —              | 20    | —     | 0g, Ta=25°C,<br>C1=C2=0.1µF, Cx,Cy,<br>Cz=33nF |
| Frequency response                         | X, Y, Z | Hz   | DC             | 50    | —     | -3dB point,<br>Cx, Cy, Cz=33nF                 |

Parametry akcelerometru AGS61331 [16].

## Příloha 8

Gyroskop ADXRS300 je kompletní snímač úhlové rychlosti, který je integrován spolu s potřebnou elektronikou pro zpracování signálu v jednom integrovaném obvodu. Jeho rozměry jsou 7 x 7 x 3 mm. Výstupní signál (RATEOUT) je napětí úměrné úhlové rychlosti kolem osy kolmé na povrch zapouzdření snímače.

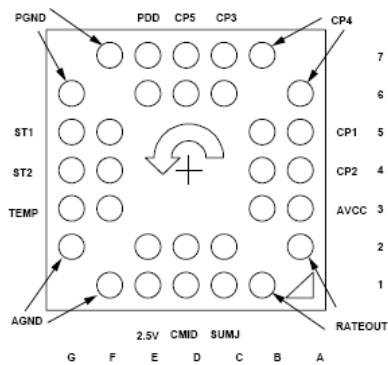
ADXRS300 pracuje na principu rezonátorového setrvačnicku. Každá ze dvou polykřemíkových snímacích struktur obsahuje vibrující rám, který je elektrostaticky řízen rezonancí. Ta vyrábí rychlostní prvek nezbytný ke vzniku Coriolisovy síly během úhlové rychlosti. Ve dvou vnějších extrémech každého rámu, kolmo ke směru pohybu, jsou pohyblivé prsty, které jsou umístěny mezi pevně uchycenými snímacími prsty tak, aby vytvořily kapacitní snímací strukturu, která snímá Coriolisův pohyb. Dvojitý snímač vyloučí vliv externích sil a vibrací. Konstrukce snímače s elektrickým zpracováním snímáče zaručí neporušenost signálu v rušivém prostředí.



Blokové schéma gyroskopu ADXRS300 [1].

| Parameter                                     | Conditions  | ADXRS300ABG      |      |                       | Unit    |
|---|---|------------------|------|-----------------------|---------|
|   |   | Min <sup>1</sup> | Typ  | Max <sup>1</sup>      |         |
| <b>SENSITIVITY</b>                            | Clockwise rotation is positive output                 |                  |      |                       |         |
| Dynamic Range <sup>2</sup>                    | Full-scale range over specifications range            | ±300             |      |                       | %/s     |
| Initial                                       | @25°C   | 4.6              | 5    | 5.4                   | mV/°/s  |
| Over Temperature <sup>3</sup>                 | V <sub>S</sub> = 4.75 V to 5.25 V                     | 4.6              | 5    | 5.4                   | mV/°/s  |
| Nonlinearity                                  | Best fit straight line                                |                  | 0.1  |                       | % of FS |
| <b>NULL</b>                                   |   |                  |      |                       |         |
| Initial Null                                  |   | 2.3              | 2.50 | 2.7                   | V       |
| Over Temperature <sup>3</sup>                 | V <sub>S</sub> = 4.75 V to 5.25 V                     | 2.3              |      | 2.7                   | V       |
| Turn-On Time                                  | Power on to ±½%/s of final                            |                  | 35   |                       | ms      |
| Linear Acceleration Effect                    | Any axis  |                  | 0.2  |                       | %/s/g   |
| Voltage Sensitivity                           | V <sub>CC</sub> = 4.75 V to 5.25 V                    |                  | 1    |                       | %/s/V   |
| <b>NOISE PERFORMANCE</b>                      |   |                  |      |                       |         |
| Rate Noise Density                            | @25°C   |                  | 0.1  |                       | %/s/√Hz |
| <b>FREQUENCY RESPONSE</b>                     |   |                  |      |                       |         |
| 3 dB Bandwidth (User Selectable) <sup>4</sup> | 22 nF as comp cap (see the Setting Bandwidth section) |                  | 40   |                       | Hz      |
| Sensor Resonant Frequency                     |   |                  | 14   |                       | kHz     |
| <b>SELF-TEST INPUTS</b>                       |   |                  |      |                       |         |
| ST1 RATEOUT Response <sup>5</sup>             | ST1 pin from Logic 0 to 1                             | -150             | -270 | -450                  | mV      |
| ST2 RATEOUT Response <sup>5</sup>             | ST2 pin from Logic 0 to 1                             | +150             | +270 | +450                  | mV      |
| Logic 1 Input Voltage                         | Standard high logic level definition                  | 3.3              |      |                       | V       |
| Logic 0 Input Voltage                         | Standard low logic level definition                   |                  |      | 1.7                   | V       |
| Input Impedance                               | To common   |                  | 50   |                       | kΩ      |
| <b>TEMPERATURE SENSOR</b>                     |   |                  |      |                       |         |
| V <sub>OUT</sub> at 298°K                     |   |                  | 2.50 |                       | V       |
| Max Current Load on Pin                       | Source to common                                      |                  |      | 50                    | μA      |
| Scale Factor                                  | Proportional to absolute temperature                  |                  | 8.4  |                       | mV/°K   |
| <b>OUTPUT DRIVE CAPABILITY</b>                |   |                  |      |                       |         |
| Output Voltage Swing                          | I <sub>OUT</sub> = ±100 μA                            | 0.25             |      | V <sub>S</sub> - 0.25 | V       |
| Capacitive Load Drive                         |   | 1000             |      |                       | pF      |
| <b>2.5 V REFERENCE</b>                        |   |                  |      |                       |         |
| Voltage Value                                 |   | 2.45             | 2.5  | 2.55                  | V       |
| Load Drive to Ground                          | Source  |                  | 200  |                       | μA      |
| Load Regulation                               | 0 < I <sub>OUT</sub> < 200 μA                         |                  | 5.0  |                       | mV/mA   |
| Power Supply Rejection                        | 4.75 V <sub>S</sub> to 5.25 V <sub>S</sub>            |                  | 1.0  |                       | mV/V    |
| Temperature Drift                             | Delta from 25°C                                       |                  | 5.0  |                       | mV      |
| <b>POWER SUPPLY</b>                           |   |                  |      |                       |         |
| Operating Voltage Range                       |   | 4.75             | 5.00 | 5.25                  | V       |
| Quiescent Supply Current                      |   |                  | 6.0  | 8.0                   | mA      |
| <b>TEMPERATURE RANGE</b>                      |   |                  |      |                       |         |
| Specified Performance Grade A                 | Temperature tested to max and min specifications      | -40              |      | +85                   | °C      |

Parametry gyroskopu ADXRS300 [1].



| Pin No. | Mnemonic | Description                 |
|---------|----------|-----------------------------|
| 6D, 7D  | CP5      | HV Filter Capacitor—47 nF   |
| 6A, 7B  | CP4      | Charge Pump Capacitor—22 nF |
| 6C, 7C  | CP3      | Charge Pump Capacitor—22 nF |
| 5A, 5B  | CP1      | Charge Pump Capacitor—22 nF |
| 4A, 4B  | CP2      | Charge Pump Capacitor—22 nF |
| 3A, 3B  | AVCC     | + Analog Supply             |
| 1B, 2A  | RATEOUT  | Rate Signal Output          |
| 1C, 2C  | SUMJ     | Output Amp Summing Junction |
| 1D, 2D  | CMID     | HF Filter Capacitor—100 nF  |
| 1E, 2E  | 2.5V     | 2.5 V Precision Reference   |
| 1F, 2G  | AGND     | Analog Supply Return        |
| 3F, 3G  | TEMP     | Temperature Voltage Output  |
| 4F, 4G  | ST2      | Self-Test for Sensor 2      |
| 5F, 5G  | ST1      | Self-Test for Sensor 1      |
| 6G, 7F  | PGND     | Charge Pump Supply Return   |
| 6E, 7E  | PDD      | + Charge Pump Supply        |

Popis pinů gyroskopu ADXRS300 [1].

## Příloha 9

| Napájecí napětí $U_s = 5 \text{ V}$    |                         |              |              |              |              |              |              |              |              |              |                             |              |           |  |                  |  |
|--|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------|--|------------------|--|
| úhel<br>natočení<br>akcelero-<br>metru | 1. měření               |              |              |              |              |              |              |              | 2. měření    |              | 3. měření                   |              | 4. měření |  | průměrná hodnota |  |
|  | naměřené hodnoty napětí |              |              |              |              |              |              |              |              |              | vypočtené hodnoty<br>napětí |              |           |  |                  |  |
|  | osa X                   | osa Y        | osa X        | osa Y        | osa X        | osa Y        | osa X        | osa Y        | osa X        | osa Y        | osa X                       | osa Y        |           |  |                  |  |
| $\varphi$<br>[ $^\circ$ ]              | $U_x$<br>[V]            | $U_y$<br>[V] | $U_x$<br>[V] | $U_y$<br>[V] | $U_x$<br>[V] | $U_y$<br>[V] | $U_x$<br>[V] | $U_y$<br>[V] | $U_x$<br>[V] | $U_y$<br>[V] | $U_x$<br>[V]                | $U_y$<br>[V] |           |  |                  |  |
| 0                                      | 1,5274                  | 2,5477       | 1,5271       | 2,5522       | 1,5275       | 2,5531       | 1,5271       | 2,5516       | 1,5273       | 2,5512       |                             |              |           |  |                  |  |
| 10                                     | 1,5438                  | 2,7244       | 1,5436       | 2,7255       | 1,5446       | 2,7297       | 1,5445       | 2,7286       | 1,5441       | 2,7271       |                             |              |           |  |                  |  |
| 20                                     | 1,5900                  | 2,8951       | 1,5920       | 2,9007       | 1,5927       | 2,9013       | 1,5918       | 2,8991       | 1,5916       | 2,8991       |                             |              |           |  |                  |  |
| 30                                     | 1,6662                  | 3,0566       | 1,6685       | 3,0606       | 1,6688       | 3,0609       | 1,6686       | 3,0608       | 1,6680       | 3,0597       |                             |              |           |  |                  |  |
| 40                                     | 1,7680                  | 3,2013       | 1,7710       | 3,2050       | 1,7706       | 3,2040       | 1,7708       | 3,2044       | 1,7701       | 3,2037       |                             |              |           |  |                  |  |
| 50                                     | 1,8952                  | 3,3279       | 1,8989       | 3,3306       | 1,8968       | 3,3291       | 1,8980       | 3,3301       | 1,8972       | 3,3294       |                             |              |           |  |                  |  |
| 60                                     | 2,0419                  | 3,4302       | 2,0437       | 3,4312       | 2,0430       | 3,4308       | 2,0446       | 3,4315       | 2,0433       | 3,4309       |                             |              |           |  |                  |  |
| 70                                     | 2,2032                  | 3,5054       | 2,2055       | 3,5059       | 2,2031       | 3,5050       | 2,2067       | 3,5064       | 2,2046       | 3,5057       |                             |              |           |  |                  |  |
| 80                                     | 2,3747                  | 3,5513       | 2,3793       | 3,5518       | 2,3781       | 3,5517       | 2,3799       | 3,5520       | 2,3780       | 3,5517       |                             |              |           |  |                  |  |
| 90                                     | 2,5548                  | 3,5674       | 2,5563       | 3,5669       | 2,5561       | 3,5672       | 2,5579       | 3,5668       | 2,5563       | 3,5671       |                             |              |           |  |                  |  |
| 100                                    | 2,7328                  | 3,5519       | 2,7356       | 3,5512       | 2,7365       | 3,5507       | 2,7342       | 3,5510       | 2,7348       | 3,5512       |                             |              |           |  |                  |  |
| 110                                    | 2,9032                  | 3,5064       | 2,9048       | 3,5053       | 2,9084       | 3,5042       | 2,9068       | 3,5042       | 2,9058       | 3,5050       |                             |              |           |  |                  |  |
| 120                                    | 3,0648                  | 3,4315       | 3,0684       | 3,4289       | 3,0677       | 3,4294       | 3,0682       | 3,4287       | 3,0673       | 3,4296       |                             |              |           |  |                  |  |
| 130                                    | 3,2116                  | 3,3293       | 3,2151       | 3,3254       | 3,2132       | 3,3269       | 3,2134       | 3,3264       | 3,2133       | 3,3270       |                             |              |           |  |                  |  |
| 140                                    | 3,3376                  | 3,2032       | 3,3396       | 3,2003       | 3,3395       | 3,2001       | 3,3384       | 3,2009       | 3,3388       | 3,2011       |                             |              |           |  |                  |  |
| 150                                    | 3,4396                  | 3,0578       | 3,4419       | 3,0529       | 3,4422       | 3,0523       | 3,4407       | 3,0543       | 3,4411       | 3,0543       |                             |              |           |  |                  |  |
| 160                                    | 3,5147                  | 2,8967       | 3,5157       | 2,8926       | 3,5159       | 2,8916       | 3,5151       | 2,8928       | 3,5154       | 2,8934       |                             |              |           |  |                  |  |
| 170                                    | 3,5606                  | 2,7243       | 3,5610       | 2,7197       | 3,5609       | 2,7203       | 3,5606       | 2,7206       | 3,5608       | 2,7212       |                             |              |           |  |                  |  |
| 180                                    | 3,5758                  | 2,5461       | 3,5753       | 2,5414       | 3,5753       | 2,5416       | 3,5751       | 2,5421       | 3,5754       | 2,5428       |                             |              |           |  |                  |  |
| 190                                    | 3,5600                  | 2,3696       | 3,5587       | 2,3643       | 3,5590       | 2,3654       | 3,5586       | 2,3643       | 3,5591       | 2,3659       |                             |              |           |  |                  |  |
| 200                                    | 3,5132                  | 2,1965       | 3,5113       | 2,1927       | 3,5118       | 2,1935       | 3,5104       | 2,1899       | 3,5117       | 2,1932       |                             |              |           |  |                  |  |
| 210                                    | 3,4381                  | 2,0362       | 3,4354       | 2,0327       | 3,4346       | 2,0313       | 3,4357       | 2,0327       | 3,4360       | 2,0332       |                             |              |           |  |                  |  |
| 220                                    | 3,3351                  | 1,8902       | 3,3320       | 1,8867       | 3,3307       | 1,8852       | 3,3321       | 1,8869       | 3,3325       | 1,8873       |                             |              |           |  |                  |  |
| 230                                    | 3,2071                  | 1,7630       | 3,2036       | 1,7603       | 3,2036       | 1,7601       | 3,2041       | 1,7604       | 3,2046       | 1,7610       |                             |              |           |  |                  |  |
| 240                                    | 3,0614                  | 1,6613       | 3,0564       | 1,6585       | 3,0567       | 1,6587       | 3,0576       | 1,6591       | 3,0580       | 1,6594       |                             |              |           |  |                  |  |
| 250                                    | 2,8983                  | 1,5859       | 2,8941       | 1,5849       | 2,8942       | 1,5843       | 2,8957       | 1,5849       | 2,8956       | 1,5850       |                             |              |           |  |                  |  |
| 260                                    | 2,7250                  | 1,5399       | 2,7206       | 1,5391       | 2,7192       | 1,5387       | 2,7189       | 1,5387       | 2,7209       | 1,5391       |                             |              |           |  |                  |  |
| 270                                    | 2,5480                  | 1,5247       | 2,5423       | 1,5245       | 2,5409       | 1,5244       | 2,5432       | 1,5244       | 2,5436       | 1,5245       |                             |              |           |  |                  |  |
| 280                                    | 2,3697                  | 1,5405       | 2,3655       | 1,5410       | 2,3651       | 1,5413       | 2,3662       | 1,5408       | 2,3666       | 1,5409       |                             |              |           |  |                  |  |
| 290                                    | 2,1961                  | 1,5875       | 2,1924       | 1,5885       | 2,1925       | 1,5884       | 2,1942       | 1,5875       | 2,1938       | 1,5880       |                             |              |           |  |                  |  |
| 300                                    | 2,0338                  | 1,6637       | 2,0322       | 1,6642       | 2,0299       | 1,6655       | 2,0320       | 1,6640       | 2,0320       | 1,6644       |                             |              |           |  |                  |  |
| 310                                    | 1,8900                  | 1,7650       | 1,8875       | 1,7666       | 1,8852       | 1,7666       | 1,8843       | 1,7687       | 1,8868       | 1,7672       |                             |              |           |  |                  |  |
| 320                                    | 1,7642                  | 1,8912       | 1,7618       | 1,8932       | 1,7601       | 1,8956       | 1,7615       | 1,8936       | 1,7619       | 1,8934       |                             |              |           |  |                  |  |
| 330                                    | 1,6622                  | 2,0372       | 1,6603       | 2,0400       | 1,6590       | 2,0429       | 1,6602       | 2,0402       | 1,6604       | 2,0401       |                             |              |           |  |                  |  |
| 340                                    | 1,5880                  | 2,1982       | 1,5864       | 2,2008       | 1,5862       | 2,2021       | 1,5859       | 2,2030       | 1,5866       | 2,2010       |                             |              |           |  |                  |  |
| 350                                    | 1,5422                  | 2,3706       | 1,5415       | 2,3744       | 1,5415       | 2,3744       | 1,5412       | 2,3754       | 1,5416       | 2,3737       |                             |              |           |  |                  |  |

Tabulka vypočtených a naměřených hodnot pro akcelerometr ADXL 203 C.



| Napájecí napětí $U_s = 3\text{ V}$ |                             |                                     |        |           |         |
|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------|-----------|---------|
| úhel natočení rotačního stolku     | úhel natočení akcelerometru | průměrná hodnota napětí na výstupu: |        | Zrychlení |         |
|                                    |                             | X                                   | Y      | v ose X   | v ose Y |
| $\varphi$                          | $\varphi$                   | $U_x$                               | $U_y$  | a         | a       |
| [ $^\circ$ ]                       | [ $^\circ$ ]                | [V]                                 | [V]    | [g]       | [g]     |
| 0                                  | -14,8                       | 3,4624                              | 2,7712 | 0,9668    | -0,2554 |
| 10                                 | -4,8                        | 3,4926                              | 2,5989 | 0,9965    | -0,0837 |
| 20                                 | 5,2                         | 3,4926                              | 2,4242 | 0,9959    | 0,0906  |
| 30                                 | 15,2                        | 3,4624                              | 2,2524 | 0,9650    | 0,2622  |
| 40                                 | 25,2                        | 3,4023                              | 2,0874 | 0,9048    | 0,4258  |
| 50                                 | 35,2                        | 3,3153                              | 1,9358 | 0,8171    | 0,5764  |
| 60                                 | 45,2                        | 3,2030                              | 1,8017 | 0,7046    | 0,7096  |
| 70                                 | 55,2                        | 3,0693                              | 1,6885 | 0,5707    | 0,8211  |
| 80                                 | 65,2                        | 2,9181                              | 1,6010 | 0,4195    | 0,9078  |
| 90                                 | 75,2                        | 2,7541                              | 1,5410 | 0,2554    | 0,9668  |
| 100                                | 85,2                        | 2,5818                              | 1,5099 | 0,0837    | 0,9965  |
| 110                                | 95,2                        | 2,4069                              | 1,5091 | -0,0906   | 0,9959  |
| 120                                | 105,2                       | 2,2347                              | 1,5390 | -0,2622   | 0,9650  |
| 130                                | 115,2                       | 2,0706                              | 1,5982 | -0,4258   | 0,9048  |
| 140                                | 125,2                       | 1,9197                              | 1,6850 | -0,5764   | 0,8171  |
| 150                                | 135,2                       | 1,7856                              | 1,7966 | -0,7096   | 0,7046  |
| 160                                | 145,2                       | 1,6733                              | 1,9303 | -0,8211   | 0,5707  |
| 170                                | 155,2                       | 1,5855                              | 2,0815 | -0,9078   | 0,4195  |
| 180                                | 165,2                       | 1,5255                              | 2,2461 | -0,9668   | 0,2554  |
| 190                                | 175,2                       | 1,4945                              | 2,4180 | -0,9965   | 0,0837  |
| 200                                | 185,2                       | 1,4950                              | 2,5925 | -0,9959   | -0,0906 |
| 210                                | 195,2                       | 1,5249                              | 2,7651 | -0,9650   | -0,2622 |
| 220                                | 205,2                       | 1,5846                              | 2,9298 | -0,9048   | -0,4258 |
| 230                                | 215,2                       | 1,6718                              | 3,0815 | -0,8171   | -0,5764 |
| 240                                | 225,2                       | 1,7843                              | 3,2160 | -0,7046   | -0,7096 |
| 250                                | 235,2                       | 1,9180                              | 3,3287 | -0,5707   | -0,8211 |
| 260                                | 245,2                       | 2,0693                              | 3,4167 | -0,4195   | -0,9078 |
| 270                                | 255,2                       | 2,2332                              | 3,4773 | -0,2554   | -0,9668 |
| 280                                | 265,2                       | 2,4056                              | 3,5080 | -0,0837   | -0,9965 |
| 290                                | 275,2                       | 2,5805                              | 3,5087 | 0,0906    | -0,9959 |
| 300                                | 285,2                       | 2,7528                              | 3,4790 | 0,2622    | -0,9650 |
| 310                                | 295,2                       | 2,9169                              | 3,4195 | 0,4258    | -0,9048 |
| 320                                | 305,2                       | 3,0686                              | 3,3323 | 0,5764    | -0,8171 |
| 330                                | 315,2                       | 3,2027                              | 3,2205 | 0,7096    | -0,7046 |
| 340                                | 325,2                       | 3,3151                              | 3,0865 | 0,8211    | -0,5707 |
| 350                                | 335,2                       | 3,4023                              | 2,9351 | 0,9078    | -0,4195 |
| 360                                | 345,2                       | 3,4620                              | 2,7709 | 0,9668    | -0,2554 |

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot akcelerometru ADXL 203 A.

Všechny ostatní tabulky obsahující veškeré naměřené a dopočítané údaje jsou v souborech na příloženém CD.

| v         | 1. měření |          | 2. měření |          | 3. měření |          | prumer  |          |
|-----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|---------|----------|
|           | U         | K        | U         | K        | U         | K        | U       | K        |
| [°/s]     | [V]       | [mV/°/s] | [V]       | [mV/°/s] | [V]       | [mV/°/s] | [V]     | [mV/°/s] |
| -364,7792 | -1,7339   | 4,75329  | -1,7363   | 4,75978  | -1,7367   | 4,76087  | -1,7356 | 4,7580   |
| -343,3216 | -1,6323   | 4,75437  | -1,6325   | 4,75503  | -1,6334   | 4,75756  | -1,6327 | 4,7557   |
| -321,8640 | -1,5216   | 4,72760  | -1,5199   | 4,72208  | -1,5221   | 4,72908  | -1,5212 | 4,7263   |
| -300,4064 | -1,4137   | 4,70612  | -1,4103   | 4,69452  | -1,4107   | 4,69583  | -1,4116 | 4,6988   |
| -278,9488 | -1,3264   | 4,75508  | -1,3279   | 4,76028  | -1,3274   | 4,75874  | -1,3272 | 4,7580   |
| -257,4912 | -1,2222   | 4,74667  | -1,2251   | 4,75774  | -1,2234   | 4,75119  | -1,2236 | 4,7519   |
| -236,0336 | -1,1212   | 4,74996  | -1,1229   | 4,75717  | -1,1228   | 4,75700  | -1,1223 | 4,7547   |
| -214,5760 | -1,0193   | 4,75010  | -1,0204   | 4,75521  | -1,0207   | 4,75690  | -1,0201 | 4,7541   |
| -193,1184 | -0,9164   | 4,74519  | -0,9182   | 4,75463  | -0,9183   | 4,75536  | -0,9176 | 4,7517   |
| -171,6608 | -0,8151   | 4,74850  | -0,8162   | 4,75495  | -0,8168   | 4,75833  | -0,8161 | 4,7539   |
| -150,2032 | -0,7127   | 4,74516  | -0,7145   | 4,75686  | -0,7143   | 4,75539  | -0,7138 | 4,7525   |
| -128,7456 | -0,6092   | 4,73182  | -0,6089   | 4,72927  | -0,6114   | 4,74861  | -0,6098 | 4,7366   |
| -107,2880 | -0,5085   | 4,73941  | -0,5088   | 4,74248  | -0,5096   | 4,74947  | -0,5090 | 4,7438   |
| -101,9239 | -0,5098   | 5,00142  | -0,5080   | 4,98384  | -0,4844   | 4,75227  | -0,5007 | 4,9125   |
| -96,5595  | -0,4834   | 5,00651  | -0,4812   | 4,98365  | -0,4586   | 4,74904  | -0,4744 | 4,9131   |
| -91,1951  | -0,4598   | 5,04142  | -0,4572   | 5,01333  | -0,4335   | 4,75368  | -0,4502 | 4,9361   |
| -85,8307  | -0,4319   | 5,03184  | -0,4312   | 5,02382  | -0,4083   | 4,75678  | -0,4238 | 4,9375   |
| -80,4663  | -0,4061   | 5,04719  | -0,4072   | 5,06009  | -0,3846   | 4,77912  | -0,3993 | 4,9621   |
| -75,1019  | -0,3793   | 5,04995  | -0,3802   | 5,06294  | -0,4244   | 5,65155  | -0,3946 | 5,2548   |
| -69,7374  | -0,4238   | 6,07743  | -0,3338   | 4,78650  | -0,3321   | 4,76181  | -0,3632 | 5,2086   |
| -64,3730  | -0,3301   | 5,12790  | -0,3069   | 4,76816  | -0,3090   | 4,80024  | -0,3153 | 4,8988   |
| -59,0086  | -0,2988   | 5,06371  | -0,2797   | 4,74004  | -0,2808   | 4,75821  | -0,2864 | 4,8540   |
| -53,6442  | -0,2796   | 5,21219  | -0,2546   | 4,74578  | -0,2561   | 4,77358  | -0,2634 | 4,9105   |
| -48,2798  | -0,2518   | 5,21483  | -0,2294   | 4,75225  | -0,2303   | 4,76918  | -0,2372 | 4,9121   |
| -42,9153  | -0,2281   | 5,31399  | -0,2035   | 4,74200  | -0,2038   | 4,74877  | -0,2118 | 4,9349   |
| -37,5509  | -0,2031   | 5,40847  | -0,1764   | 4,69736  | -0,1780   | 4,73989  | -0,1858 | 4,9486   |
| -32,1865  | -0,1531   | 4,75816  | -0,1521   | 4,72699  | -0,1546   | 4,80315  | -0,1533 | 4,7628   |
| -26,8221  | -0,1255   | 4,68048  | -0,1264   | 4,71139  | -0,1260   | 4,69821  | -0,1260 | 4,6967   |
| -21,4577  | -0,1018   | 4,74388  | -0,1017   | 4,73931  | -0,1022   | 4,76169  | -0,1019 | 4,7483   |
| -16,0933  | -0,0731   | 4,54236  | -0,0757   | 4,70666  | -0,0764   | 4,74676  | -0,0751 | 4,6653   |
| -10,7288  | -0,0503   | 4,68379  | -0,0505   | 4,70480  | -0,0510   | 4,75679  | -0,0506 | 4,7151   |
| -5,3644   | -0,0251   | 4,68771  | -0,0263   | 4,91174  | -0,0247   | 4,59852  | -0,0254 | 4,7327   |
| 5,3644    | 0,0255    | 4,75831  | 0,0257    | 4,78366  | 0,0259    | 4,82821  | 0,0257  | 4,7901   |
| 10,7288   | 0,0510    | 4,75273  | 0,0517    | 4,81588  | 0,0511    | 4,76221  | 0,0513  | 4,7769   |
| 16,0933   | 0,0767    | 4,76495  | 0,0768    | 4,76966  | 0,0761    | 4,72703  | 0,0765  | 4,7539   |
| 21,4577   | 0,1023    | 4,76874  | 0,1015    | 4,73137  | 0,1020    | 4,75414  | 0,1020  | 4,7514   |
| 26,8221   | 0,1298    | 4,83962  | 0,1282    | 4,77816  | 0,1278    | 4,76635  | 0,1286  | 4,7947   |
| 32,1865   | 0,1545    | 4,80150  | 0,1530    | 4,75410  | 0,1535    | 4,76820  | 0,1537  | 4,7746   |
| 37,5509   | 0,2042    | 5,43754  | 0,1780    | 4,74118  | 0,1789    | 4,76373  | 0,1870  | 4,9808   |
| 42,9153   | 0,2299    | 5,35672  | 0,2046    | 4,76665  | 0,2038    | 4,74795  | 0,2127  | 4,9571   |
| 48,2798   | 0,2560    | 5,30307  | 0,2298    | 4,76066  | 0,2299    | 4,76208  | 0,2386  | 4,9419   |
| 53,6442   | 0,2813    | 5,24321  | 0,2548    | 4,74956  | 0,2558    | 4,76919  | 0,2640  | 4,9207   |
| 59,0086   | 0,3068    | 5,19887  | 0,2806    | 4,75597  | 0,2809    | 4,75995  | 0,2894  | 4,9049   |
| 64,3730   | 0,3387    | 5,26125  | 0,3071    | 4,77028  | 0,2809    | 4,36329  | 0,3089  | 4,7983   |
| 69,7374   | 0,3582    | 5,13706  | 0,3284    | 4,70851  | 0,3361    | 4,81955  | 0,3409  | 4,8884   |
| 75,1019   | 0,3817    | 5,08203  | 0,3812    | 5,07634  | 0,3361    | 4,47530  | 0,3663  | 4,8779   |
| 80,4663   | 0,4088    | 5,08013  | 0,4067    | 5,05377  | 0,3834    | 4,76433  | 0,3996  | 4,9661   |
| 85,8307   | 0,4340    | 5,05609  | 0,4332    | 5,04753  | 0,4086    | 4,76088  | 0,4253  | 4,9548   |
| 91,1951   | 0,4582    | 5,02466  | 0,4603    | 5,04758  | 0,4350    | 4,76976  | 0,4512  | 4,9473   |
| 96,5595   | 0,4853    | 5,02612  | 0,4835    | 5,00762  | 0,4595    | 4,75855  | 0,4761  | 4,9308   |
| 101,9239  | 0,5101    | 5,00494  | 0,5083    | 4,98752  | 0,4860    | 4,76805  | 0,5015  | 4,9202   |
| 107,2880  | 0,5032    | 4,68991  | 0,5104    | 4,75720  | 0,5106    | 4,75941  | 0,5081  | 4,7355   |
| 128,7456  | 0,6104    | 4,74131  | 0,6124    | 4,75641  | 0,6118    | 4,75216  | 0,6115  | 4,7500   |
| 150,2032  | 0,7052    | 4,69478  | 0,7138    | 4,75237  | 0,7114    | 4,73628  | 0,7101  | 4,7278   |
| 171,6608  | 0,7943    | 4,62734  | 0,8074    | 4,70327  | 0,8153    | 4,74927  | 0,8057  | 4,6933   |
| 193,1184  | 0,8788    | 4,55076  | 0,9181    | 4,75413  | 0,9172    | 4,74942  | 0,9047  | 4,6848   |
| 214,5760  | 0,9669    | 4,50598  | 1,0197    | 4,75233  | 1,0195    | 4,75136  | 1,0020  | 4,6699   |
| 236,0336  | 1,0856    | 4,59943  | 1,1235    | 4,75990  | 1,1215    | 4,75147  | 1,1102  | 4,7036   |
| 257,4912  | 1,1655    | 4,52640  | 1,2233    | 4,75069  | 1,2222    | 4,74640  | 1,2036  | 4,6745   |
| 278,9488  | 1,3200    | 4,73217  | 1,3235    | 4,74451  | 1,3242    | 4,74708  | 1,3226  | 4,7413   |
| 300,4064  | 1,3188    | 4,38996  | 1,4263    | 4,74801  | 1,4257    | 4,74597  | 1,3903  | 4,6280   |
| 321,8640  | 1,5192    | 4,71987  | 1,5281    | 4,74757  | 1,5266    | 4,74315  | 1,5246  | 4,7369   |
| 343,3216  | 1,5478    | 4,50837  | 1,6297    | 4,74687  | 1,6273    | 4,73984  | 1,6016  | 4,6650   |
| 364,7792  | 1,5781    | 4,32618  | 1,7319    | 4,74769  | 1,7314    | 4,74645  | 1,6805  | 4,6068   |

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot gyroskopu ADXRS300