



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

# INTEGROVANÉ MEMS AKCELEROMETRY

INTEGRATED MEMS ACCELEROMETERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ALEŠ SCHIMITZEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. TOMÁŠ MARADA, PH.D.

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2010/11

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Aleš Schimitzek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

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

### **Integrované MEMS akcelerometry**

V anglickém jazyce:

### **Integrated MEMS accelerometers**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je seznámit se s integrovanými MEMS akcelerometry a získat znalosti použití v oblasti mobilní robotiky, nejlépe aplikací na mobilní robot micromouse.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s funkcí integrovaných MEMS akcelerometrů.
2. Zvolte akcelerometr vhodný pro kategorii mobilních robotů micromouse.
3. Navrhněte a realizujte přípravek pro demonstraci funkčnosti akcelerometru.
4. Funkčnost akcelerometru demonstруйте.

Seznam odborné literatury:

[1] <http://hw.cz/novinky/freescale/art1970-akcelerometry-freescale-pro-kazdou-aplikaci.html>

[2] <http://www.robotika.cz>

[3] <http://www.robotika.sk>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 24. 11. 2011

L.S.

---

Ing. Jan Roupec, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

### **Licenční smlouva**

Zde bude vložena licenční smlouva



**Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s MEMS akcelerometry, vybrat dva vhodné akcelerometry, které by se daly použít na roboty micromouse. Vybrané dva akcelerometry porovnat mezi sebou a zhodnotit tyto dva akcelerometry.

**Abstract**

The aim of this bachelor's thesis is familiar with MEMS accelerometers, the selection of two suitable accelerometers, which would be put to use robots micromouse. Selected two accelerometers to compare and evaluate between the two accelerometers.

**Klíčové slova:**

Micromouse, Akcelerometr

**Key words:**

Micromouse, Accelerometer



**Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval Ing. Tomáši Maradovi, Ph.D. za odbornou pomoc a vedení při vypracování bakalářské práce.



**OBSAH:**

<b>Zadání závěrečné práce .....</b>	<b>3</b>
<b>Licenční smlouva.....</b>	<b>5</b>
<b>Abstrakt .....</b>	<b>7</b>
<b>Poděkování .....</b>	<b>9</b>
<b>Obsah .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Úvod .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Akcelerometr .....</b>	<b>14</b>
2.1. MMA7260Q.....	14
2.2. ADIS 16006.....	18
<b>3. Důležité součástky pro realizaci .....</b>	<b>20</b>
3.1. ATmega16L .....	20
3.2. MAX3232CSE .....	24
3.3. REF 5030 .....	24
<b>4. Realizace .....</b>	<b>25</b>
4.1. EAGLE 5.7.0 .....	25
4.2. Výsledný návrh .....	26
4.3. Výroba desky.....	27
4.4. Osazení desky .....	27
4.5. Výsledná deska.....	27
4.6. AVR Studio 4 .....	28
4.7. ASIX presto .....	30
4.8. RS-232.....	31
4.9. Hercules SETUP utility .....	31
<b>5. Naměřené hodnoty .....</b>	<b>33</b>
5.1. Statické zrychlení.....	33
5.2. Dynamické zrychlení .....	44
<b>6. Závěr .....</b>	<b>46</b>
<b>7. Seznam použité literatury .....</b>	<b>47</b>
<b>8. Seznam příloh.....</b>	<b>47</b>



## 1. Úvod

V dnešní době se docela často setkáváme s akcelerometry, i když ho ve spoustě případů nevidíme. Jako například v mobilních telefonech (hlavně tzv. smartphonech), nebo v PDA, Laptotech, MP3 přehrávačích, některých monitorech ale i v alarmech a bezpečnostních zařízeních. S akcelerometry se nemusíme setkat jen v běžném životě, využívají se rovněž ve snímání vibrací, jako stabilizátory, snímače náklonu atd.

V této bakalářské práci se budeme zabývat právě akcelerometry přesněji MEMS akcelerometry. Nejdůležitější bude výběr MEMS akcelerometrů, nejlépe co nejrozdílnější, abychom poté mohli zhodnotit, co by byla lepší volba pro použití na robotech (micromouse).



## 2. Akcelerometr

„Akcelerometr je senzor, který využívá setrvačnosti hmoty pro měření rozdílu mezi kinetickým zrychlením (vzhledem k určitému inerciálnímu prostoru) a gravitačním zrychlením.“ [1]

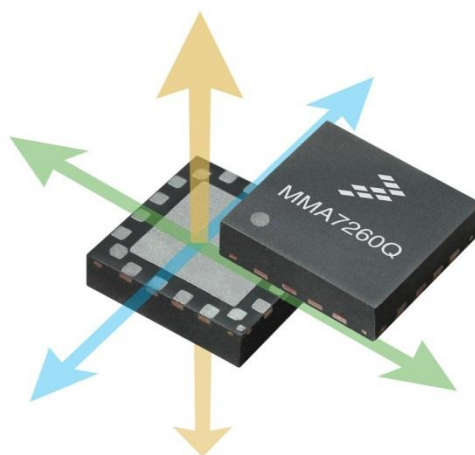
### Typy akcelerometrů:

1. Tenzometrické akcelerometry
2. Piezoelektrické akcelerometry
3. Kapacitní akcelerometry
4. Tepelné akcelerometry
5. Akcelerometry s využitím principu tunelování

### MEMS

MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) je označení technologie většinou na křemíkové bázi. Vyrábí se tak hlavně polohové senzory (gyroskopy, akcelerometry). Díky technologii MEMS jsou součástky menší (velikost SMD obvodů), levnější (řádově i o tisíce).

#### 2.1. MMA7260Q

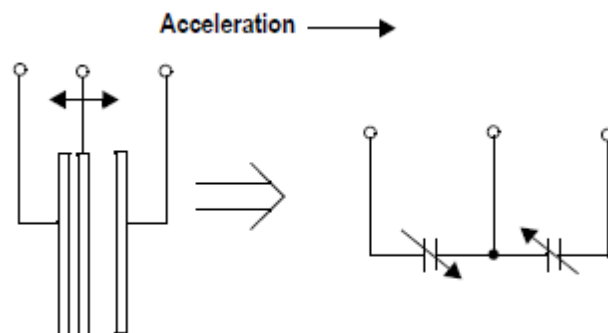


Obr. 1 Akcelerometr MMA7260Q [2].

MMA7260Q je tříosý analogový akcelerometr od firmy Freescale, který měří dynamické zrychlení (vibrace) a statické zrychlení (gravitace). Akcelerometr je zapouzdřen v pouzdře QFN-16. Napájení akcelerometru je v rozmezí 2,2 – 3,6V. Rozsah citlivosti je 1,5g/2g/4g/6g. Tento akcelerometr se používá v robotice, PDA, mobilních telefonech, navigaci, krokoměrech, Laptotech, MP3 přehrávačích atd.

### 2.1.1. Princip MMA7260Q

Princip činnosti MMA7260Q je takový, že v sobě má tři desky. Dvě krajní jsou pevné a prostřední je pohyblivá (Obr. 2). Pokud se změní vzdálenost mezi deskami, tak se změní kapacita. Takže se tento princip činnosti dá představit jako dva otočné kondenzátory, který při akceleraci změní kapacitu. Zrychlení je pak rozdíl mezi dvěma kondenzátory.



Obr. 2 Zjednodušený princip činnosti [3].

### 2.1.2. Vstupy a výstupy

- 1) Vstup:
  - a) g-Select1
  - b) g-Select2
  - c) Sleep Mode
- 2) Výstup:
  - a)  $X_{OUT}$
  - b)  $Y_{OUT}$
  - c)  $Z_{OUT}$

#### 2.1.2.1. G-Select

Pomocí „G-Select“ můžeme vybrat ze čtyř citlivostí akcelerometru (Obr. 3). Citlivost akcelerometru lze měnit i v provozním stavu. Pro naši potřebu jsme zvolili citlivost 1,5g. Což znamená, že dáme g-Select2 a g-Select1 na logickou nulu.

g-Select2	g-Select1	g-Range	Sensitivity
0	0	1.5g	800 mV/g
0	1	2g	600 mV/g
1	0	4g	300 mV/g
1	1	6g	200 mV/g

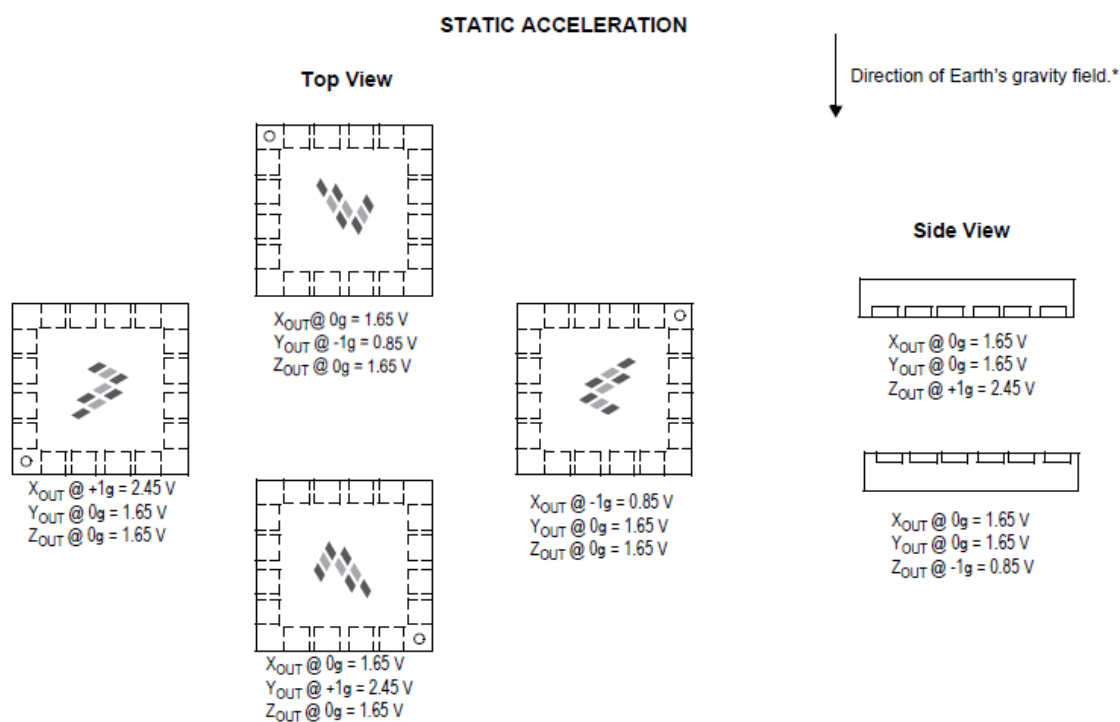
Obr. 3 Tabulka pro výběr g-Select [3].

### 2.1.2.2. Sleep Mode

„Sleep Mode“ tak zvaně uspí akcelerometr, což znamená, že se sníží odběr proudu na  $3\mu\text{A}$ . To je vhodné, pokud je akcelerometr napájen z baterie a nepoužívá se. Tento vstup je negovaný, což znamená, že pokud na vstup dáme logickou nulu, tak se akcelerometr přepne do režimu „Sleep Mode“. Výrobce doporučuje, pokud chceme přepnout do „Sleep Mode“ tak nastavit oba „g-Select“ na nulu.

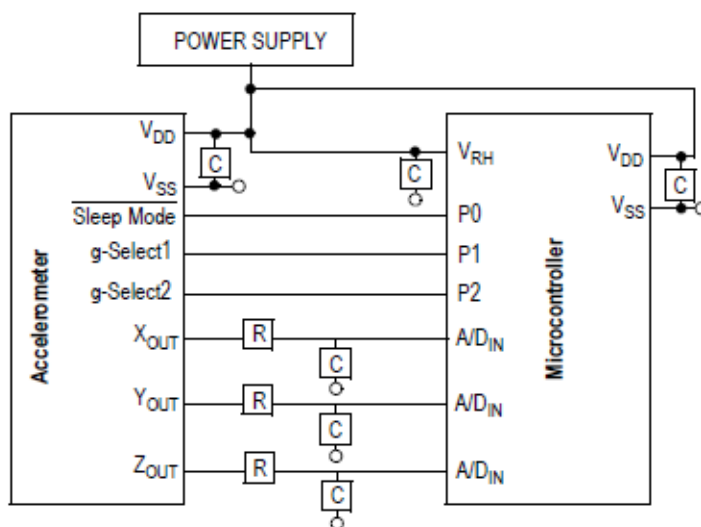
### 2.1.2.3. $X_{\text{OUT}}$ , $Y_{\text{OUT}}$ , $Z_{\text{OUT}}$

Jsou analogové výstupy, které svoji hodnotu vyjadřují ve formě napětí. Pro naši potřebu jsme zvolili citlivost  $1,5g$  ( $800\text{mV/g}$ ), tak z dokumentace akcelerometru vyplývá, že  $-1g$  je  $0,85\text{V}$ ,  $0g$  je  $1,65\text{V}$  a  $+1G$  je  $2,45\text{V}$  (Obr. 4).



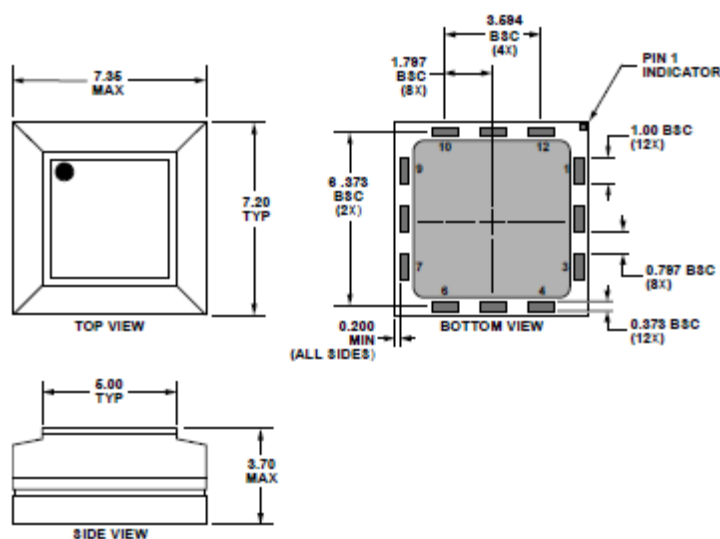
\* When positioned as shown, the Earth's gravity will result in a positive  $1g$  output.

Obr. 4 Statické zrychlení pro citlivost  $1,5g$  [3].



Obr. 5 Zapojení MMA7260Q k mikroprocesoru [3].

## 2.2. ADIS 16006



Obr. 6 Akcelerometr ADIS16006 [4].

Pro porovnání jsem zvolil dvouosý digitální akcelerometr, který je zapouzdřen do pouzdra LGA s 12 piny, abych zjistil, jaký rozdíl bude mezi analogovým a digitálním akcelerometrem jednak v naměřených hodnotách a v složitosti programování.

ADIS 16006 měří dynamické zrychlení (vibrace) a statické zrychlení (gravitace). Citlivost tohoto akcelerometru je  $\pm 5g$ . Napájení je v rozsahu 3,0 – 5,25V. Tento akcelerometr má v sobě i teplotní senzor (deseti bitový digitální teploměr), což znamená, že můžeme měřit buď teplotu, nebo zrychlení. Využívá se pro alarmy a bezpečnostní zařízení, snímání vibrací, stabilizátory, snímání náklonu, atd.

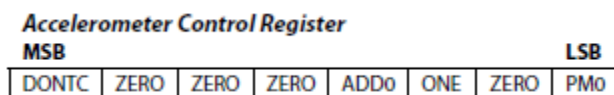
### 2.2.1. Sériová linka

Sériové rozhraní je tvořeno vývody CS, SCLK, DOUT, DIN a TCS. CS a TCS jsou negované. TCS a CS nesmí mít v jednom okamžiku stejnou logickou úroveň.

Pokud pošleme z mikroprocesoru na TCS logickou jedničku (na TCS pak po negaci bude logická nula), tak je aktivní teploměr. A z akcelerometru DOUT jdou data, které nám říkají teplotu. DIN musí být celou dobu v logické nule.

V DOUT jsou bity taktované na sestupnou hranu SCLK. U DIN jsou bity taktované na náběžnou hranu SCLK.

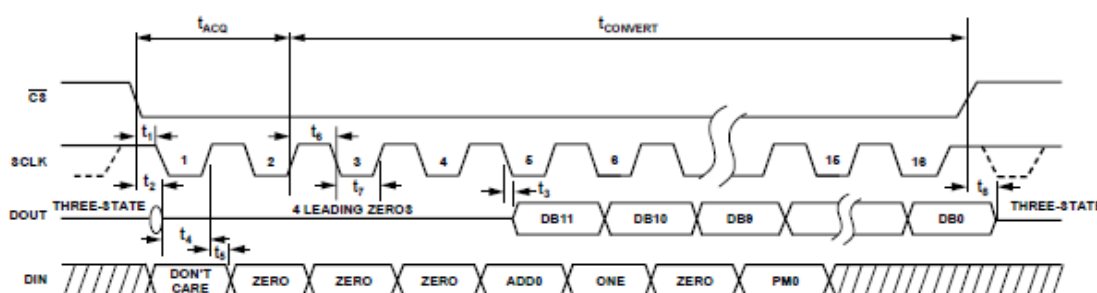
Jestliže z mikroprocesoru pošleme na CS logickou jedničku (na CS pak po negaci bude logická nula), tak akcelerometr bude na DOUT posílat data změřeného dynamického (vibrace) nebo statického (gravitace) zrychlení vybrané osy. Pokud jsme zvolili CS, tak do DIN posíláme tzv. kontrolní registr (Obr. 7).



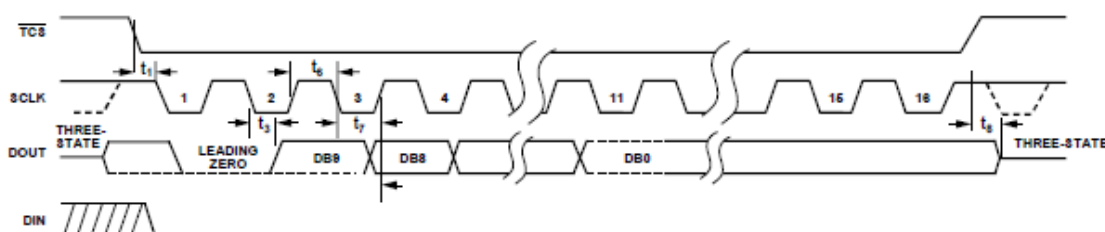
Obr. 7 Kontrolní registr [4]

DONTC může být logická jednička nebo logická nula, ZERO je logická nula. ADD0 slouží pro výběr osy, na které bude měřeno zrychlení. Pokud bude ADD0 v logické jedničce, tak bude měřena osa Y, pokud ADD bude v logické nule, tak v ose X. ONE je logická jednička. PM0, pokud je nastavena na logickou jedničku, tak akcelerometr jede v normálním režimu, pokud je PM0 v logické nule, tak je tzv. vypnutém stavu.

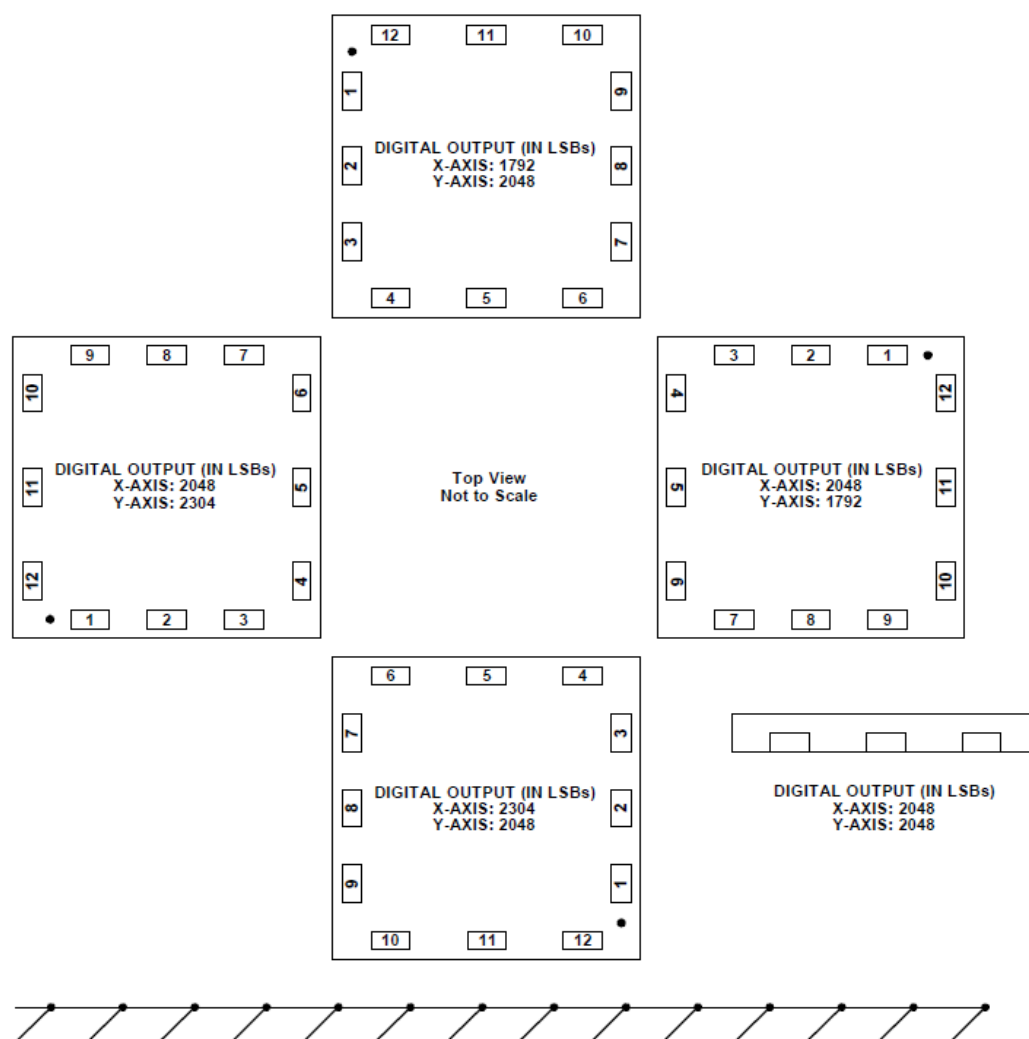
Z DOUT jdou výstupní data z akcelerometru které jsou 12 bitové (2 Bajtové). Kdy  $-1g$  je 1792 dekadicky,  $0g$  je 2048 dekadicky a  $1g$  je 2304 dekadicky viz Obr. 10



Obr. 8 Akcelerometr SPI časový diagram [4].



Obr. 9 Teploměr SPI časový diagram [4].



Obr. 10 Přehled výstupních dat, dle polohy akcelerometru [4].

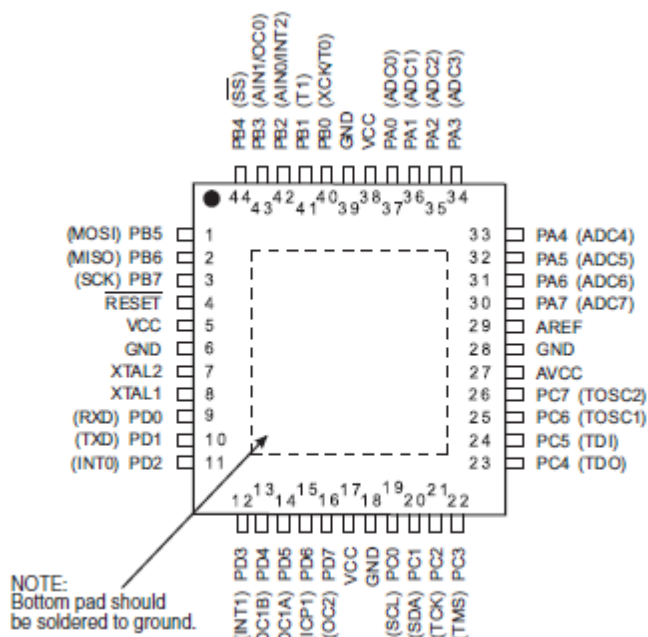
### 3. Důležité součástky pro realizaci

#### 3.1. Atmega16L

K vybraným akcelerometrům bylo zapotřebí vybrat vhodný mikroprocesor. Volba padla na Atmegu. Dalším požadavkem bylo, aby Atmega měla A/D převodník. V úvahu připadala Atmegu16. Dalším problémem bylo, že jsem potřeboval, aby Atmega16 mohla být napájena 3V, kvůli tomu, že akcelerometr MMA7260Q mohl být napájen v rozsahu 2,2 – 3,6V. V tom případě konečná volba padla na Atmega16L.

Atmega16 je nízkonapěťový CMOS 8bitový mikroprocesor, který je založen na rozšířené AVR RISC (Reduced Instruction Set Computer) architektuře. V sobě obsahuje paměti typu flash o velikosti 16kB, RAM (1kB) a EEPROM (512B). Paměť typu flash a EEPROM jsou přímo programovatelné pomocí sériového rozhraní a JTAG. Atmega16L disponuje rychlostí 0-8MHz. Atmega16 disponuje rychlostí 0-16MHz. Pro naše programování použijeme sériové rozhraní. Dále obsahuje 10bitový A/D převodník, dva 8 bitový čítač/časovač a jeden 16 bitový čítač/časovač, zabudovaný RC oscilátor,

jednotky USART, čtyři PWM kanály. Pro naše potřeby použijeme Atmegu16L v pouzdře TQFP 44.

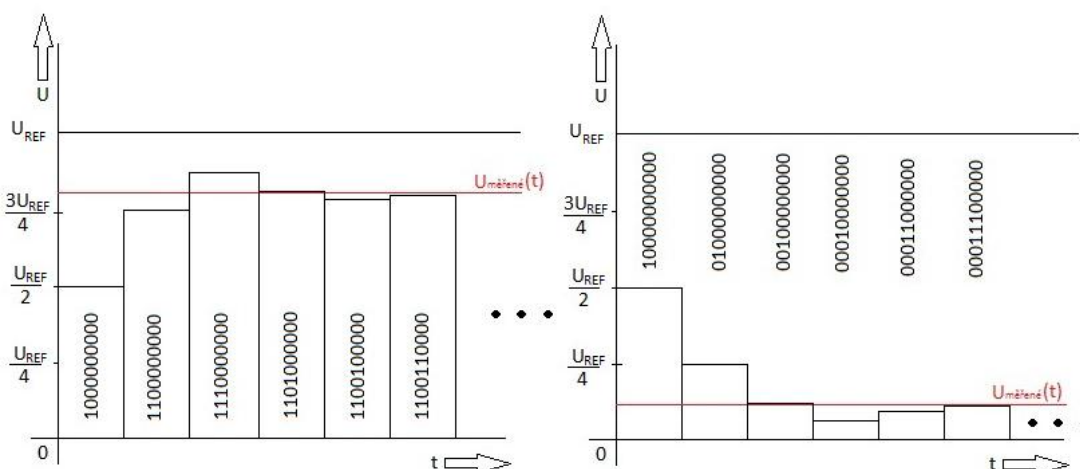


Obr. 11 Pouzdro TQFP 44 s popisem jednotlivých vývodů [5].

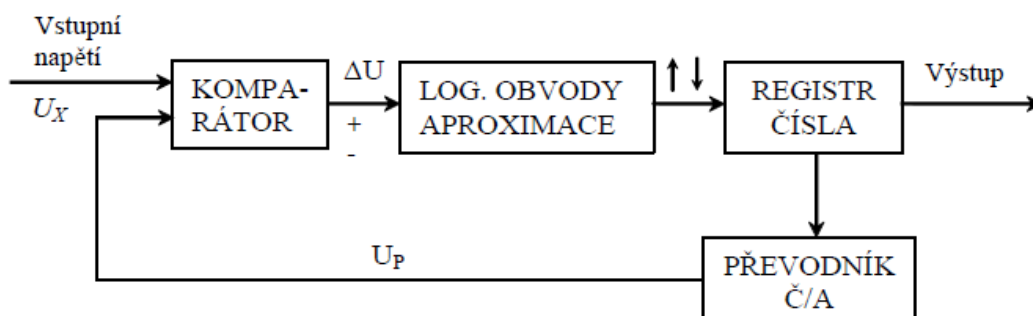
Napájení Atmega16L je v rozsahu 2,7 – 5,5V. Právě „L“ v názvu označuje, že může být napájena i nízkým napětím právě od 2,7V do 5,5V. Bez označení „L“ je napájení mikroprocesoru od 4,5V do 5,5V.

### 3.1.1. Princip A/D převodník

Atmega16L disponuje desetibitovým A/D převodníkem. Tento převodník pracuje s algoritmem postupné aproximace.



Obr. 12 Postupná aproximace.



Obr. 13 Jednoduché schéma postupné aproximace [6].

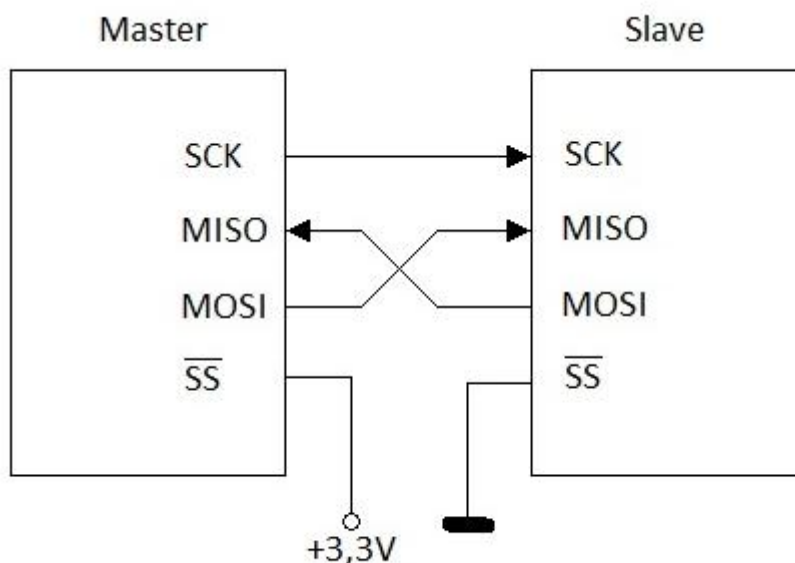
Postupná aproximace funguje tak, že v registru (Obr. 14) se zapíše 1000000000, čemuž odpovídá polovina napětí  $U_{REF}$ . Toto napětí se porovná v komparátoru s měřeným napětím. Pokud  $U_{REF}/2$  bude menší jak napětí měřené, tak v registru na nejvyšším váhovém bitu zůstane logická jednička (tj. 1000000000). Pokud  $U_{REF}/2$  bude větší jak napětí měřené, tak v registru na nejvyšším váhovém bitu bude logická nula (tj. 0000000000). Dále pokračuje tak, že v druhém nejvyšším bitu se nastaví logická jednička (tj. 1100000000 nebo 0100000000 dle předešlého porovnání). Opět se v komparátoru porovná napětí ( $3U_{REF}/4$  nebo  $U_{REF}/4$  dle předešlého výsledku) s měřeným napětím a nastaví se na druhém nejvyšším bitu nula (pokud bude napětí větší jak napětí měřené) nebo zůstane jednička (pokud bude napětí menší jak napětí měřené). Dále pokračuje dalšími bity stejným způsobem.

10. bit	9. bit	8. bit	7. bit	6. bit	5. bit	4. bit	3. bit	2. bit	1. bit
$\frac{U_{REF}}{2}$	$\frac{U_{REF}}{4}$	$\frac{U_{REF}}{8}$	$\frac{U_{REF}}{16}$	$\frac{U_{REF}}{32}$	$\frac{U_{REF}}{64}$	$\frac{U_{REF}}{128}$	$\frac{U_{REF}}{256}$	$\frac{U_{REF}}{512}$	$\frac{U_{REF}}{1025}$

Obr. 14 Registr postupné aproximace.

### 3.1.2. SPI (Serial Peripheral Interface)

Jedná se o plně duplexní tří vodičovou synchronní komunikační rozhraní, poměrně dost rozšířenou. Pracuje ve dvou režimech jako řízený obvod (slave) nebo jako řídící obvod (master). Nejčastěji se na toto rozhraní připojují paměti (EEPROM, Flash), LCD displeje, senzory (ADIS16006), atd. Důležité vodiče jsou SCK, MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out) a také negovaný SS (Slave Select), kterým vybíráme řízený obvod (slave) a řídící obvod (master).



Obr. 15 Zapojení SPI řídicího a řízeného obvodu.

Pro SPI linku jsou důležité tři registry. Jsou to registry SPCR, SPSR a SPDR.

Registr SPCR obsahuje bity SPIE, SPE, DORD, MSTR, CPOL, CPHA, SPR1 a SPR0.

#### Registr SPCR (SPI Control Register):

**SPIE** – Pokud nastavíme tento bit na logickou jedničku, tak povolíme přerušení SPI.

**SPE** – Na tomto bitu se povoluje sériová linka, což znamená, že pokud nastavíme SPE na logickou jedničku, tak vývody na portu B, jmenovitě jsou to vývody PB7, PB6, PB5 a PB4 se změní na SCK, MISO, MOSI a  $\overline{SS}$ .

**DORD** – Určuje posloupnost bitů při přenosu dat. Pokud je nastaven na logickou nulu, tak přenos začíná nevyšším bitem a končí nejnižším bitem. Jestliže je bit DODR nastaven na logickou jedničku přenos začne nejnižším bitem a končí nejvyšším bitem.

**MSTR** – Nastavíme mikroprocesor jako master (MSTR je nastaven na logickou jedničku) nebo slave (MSTR je nastaven na logickou nulu).

**CPOL, CPHA** – Určuje fázi a polaritu SCK. Jmenovitě CPOL určuje polaritu hodinového signálu a CPHA určuje fázi hodinového signálu.

**SPR1 a SPR0** – Volí kmitočet SCK viz Tab. 1.

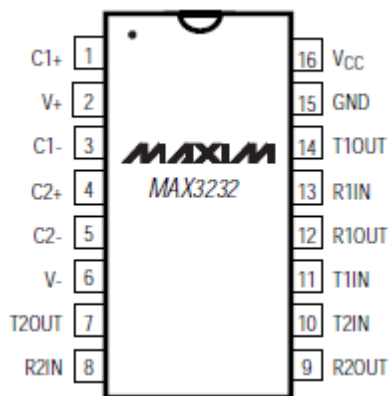
SPI2X	SPR1	SPR0	SCK	SCK pro $f_0=8$ MHz
0	0	0	$f_0/4$	2 MHz
0	0	1	$f_0/16$	500 kHz
0	1	0	$f_0/64$	125 kHz
0	1	1	$f_0/128$	62,5 kHz
1	0	0	$f_0/2$	4 MHz
1	0	1	$f_0/8$	1 MHz
1	1	0	$f_0/32$	250 kHz
1	1	1	$f_0/64$	125 kHz

Tab. 1 Volba kmitočtu SCK.

Druhým registrem je SPSR, který je sice osmibitový, ale využívají se pouze tři bity. Jsou to SPIF (příznak dokončení přenosu), WCOL (příznak kolize) a SPI2X, který může změnit rychlost přenosu viz Tab. 1.

Poslední osmibitový registr je SPDR neboli datový registr, ve kterém jsou data pro komunikaci nebo z komunikace s jinou součástí. Ve výchozím stavu je obsah tohoto registru náhodný.

### 3.2. MAX3232CSE



Obr. 16 MAX3232 pohled z hora [7].

MAX3232CSE jsem si vybral, kvůli tomu, abych mohl posílat údaje, které byli změřeny akcelerometry a následně zpracovány mikroprocesorem do počítač. Z tohoto důvodu jsem použil transceiver mezi TTL – RS-232. MAX3232CSE obsahuje dva přijímače a dva budiče, ale pro naše účely poslouží jen jeden přijímač a jeden vysílač. Je zapouzdřen v pouzdře SO16. Maximální rychlost přenosu u MAX3232CSE je 12kbps. Tento transceiver se používá v noteboocích, tiskárnách, periferních zařízeních, bateriově poháněných zařízení, vysoko rychlostních modemech atd.

### 3.3. REF 5030

REF 5030 je výrobek od firmy Texas Instruments. REF 5030 jsem použil, právě proto, abych zvýšil přesnost referenčního napětí pro A/D převodník. REF 5030 se rovněž vyznačuje malým tepelným vlivem (katalogově 3ppm/°C) a malým šumem. REF

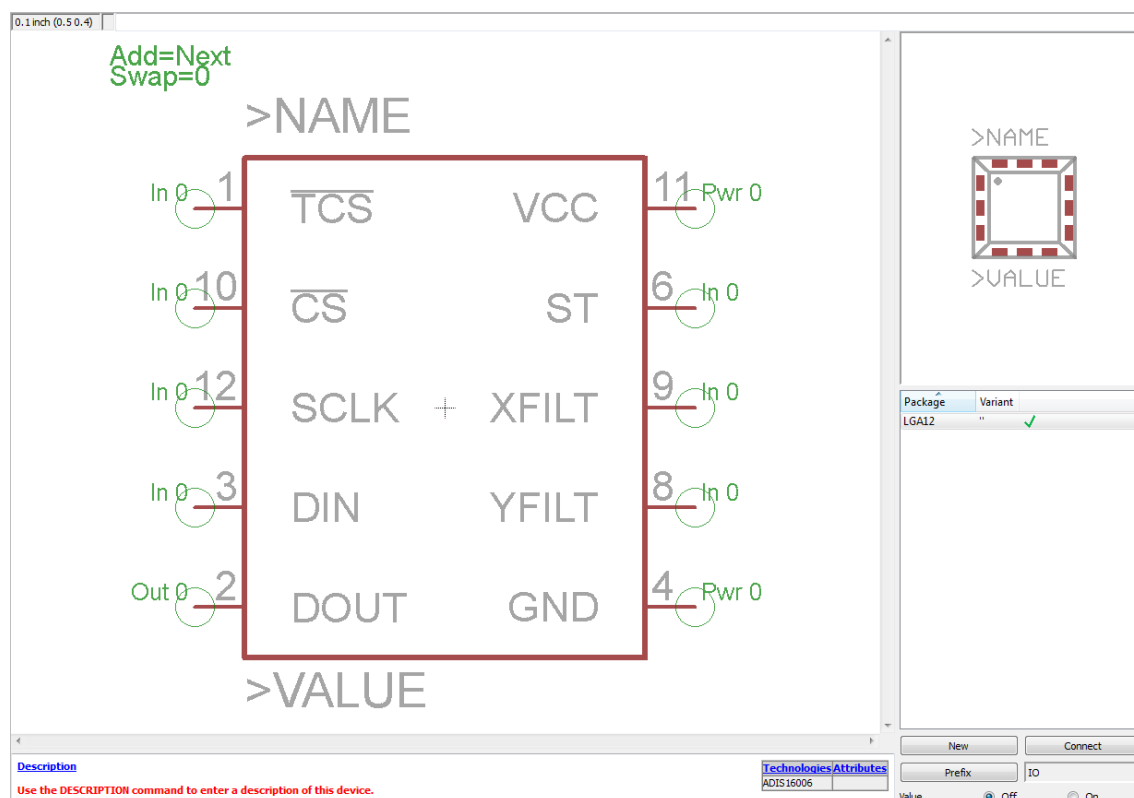
5030 je v pouzdře SO-8. Výstupní referenční napětí je 3V. REF5030 se využívá ve vysoce přesných systémech, které sbírají data.

## 4. Realizace

### 4.1. EAGLE 5.7.0

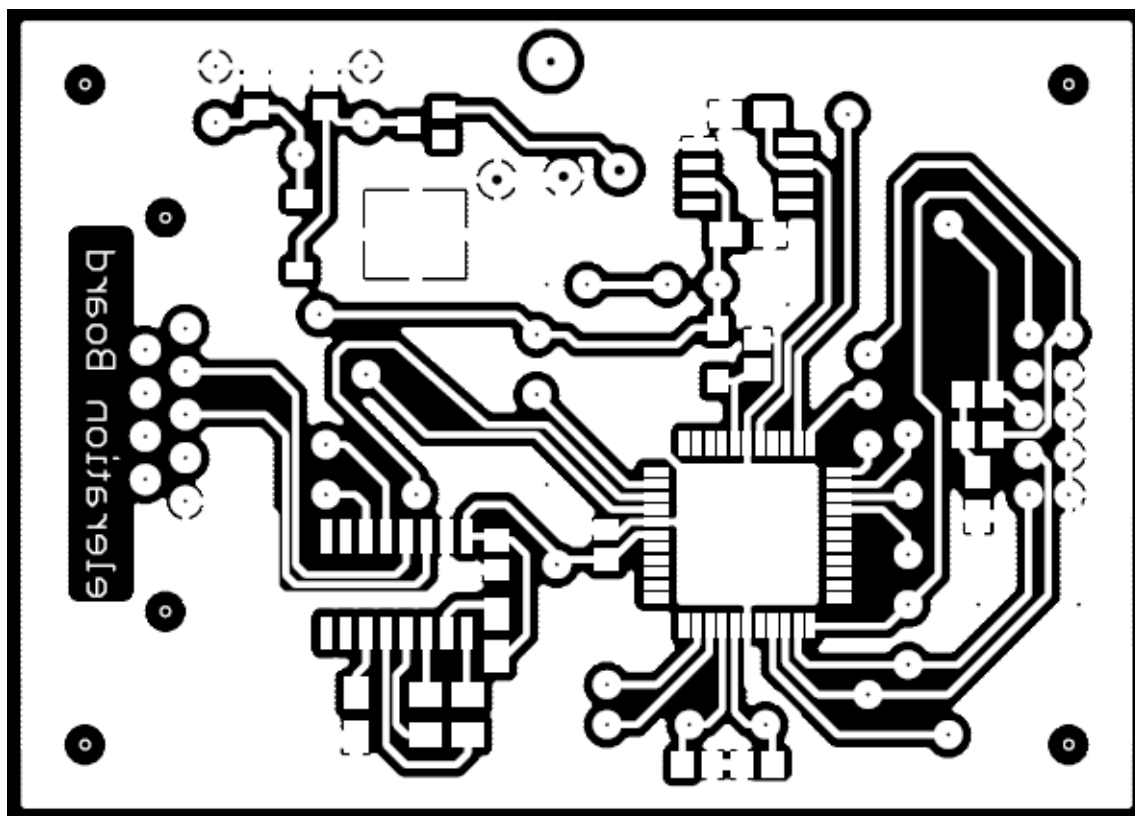
EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor) je software od firmy CadSoft. Software, který slouží pro návrhy plošných spojů a schémat zapojení elektrosoučástek. Program se skládá ze tří hlavních modulů. První z modulů je editor schémat, druhý editor spojů a poslední je tzv. autorouter.

Obsahuje bohatou knihovnu elektrosoučástek, pokud se některá součástka v této knihovně nevyskytuje (setkali jsme se u akcelerometru ADIS16006), lze ji vytvořit. Vytvoříme ji tak, že vytvoříme novou knihovnu v kontrolním panelu a zde v editoru vytvoříme nové pouzdro a novou schématickou značku. Při tvorbě nového pouzdra se musí dávat pozor, aby se dodržovaly skutečné rozměry pouzdra, aby následně při zhotovování desky součástka seděla. Musíme pak jednotlivé vývody propojit schématu a pouzdra, aby byla zajištěna jejich návaznost při návrhu plošné desky a schématu.

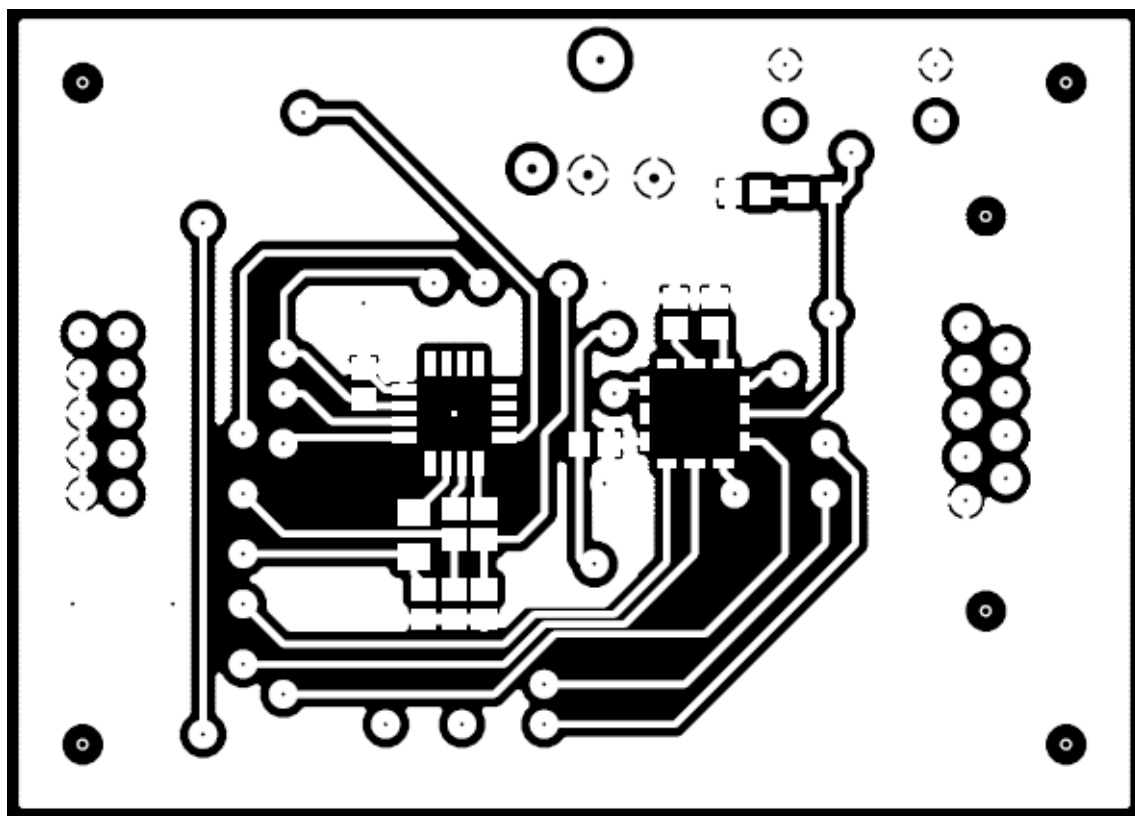


Obr. 17 Navrhnuté nové pouzdro a nové schéma (ADIS 16006) v EAGLU

#### 4.2. Výsledný návrh desky



Obr. 18 Výsledný návrh desky spodní část



Obr. 19 Výsledný návrh desky vrchní část

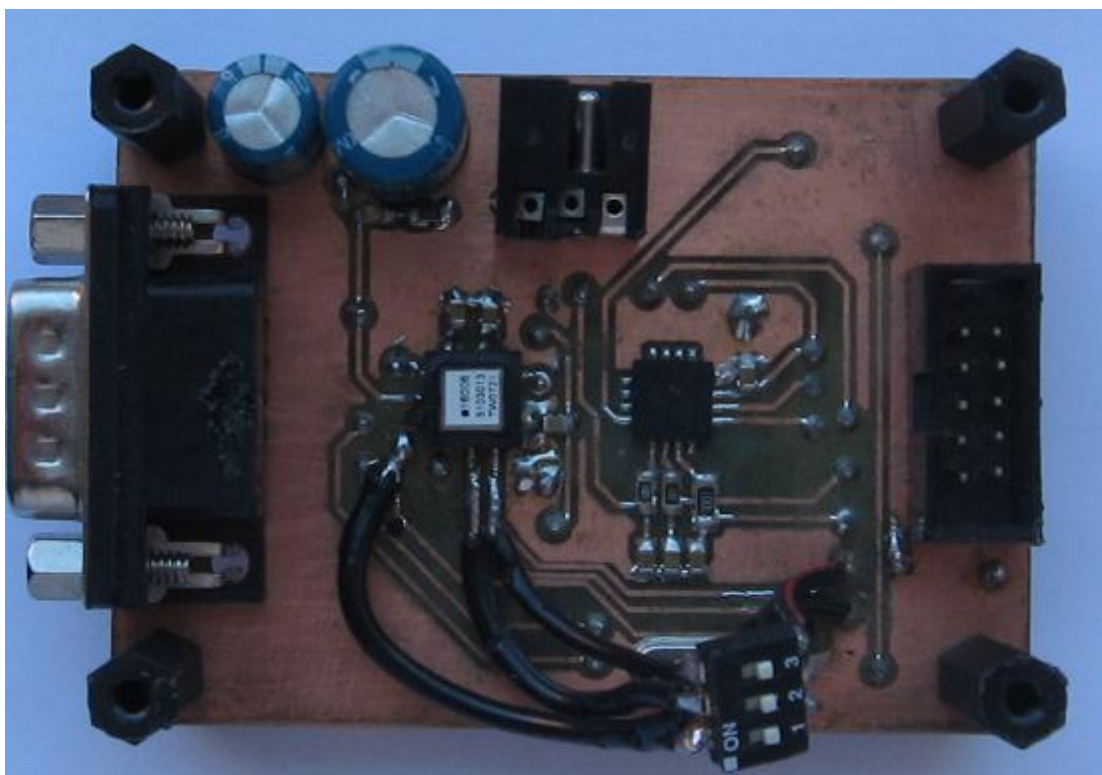
#### 4.3. Výroba desky

Výroba desky byla provedena FAKULTOU ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ – ÚSTAV RÁDIOELEKTRONIKY.

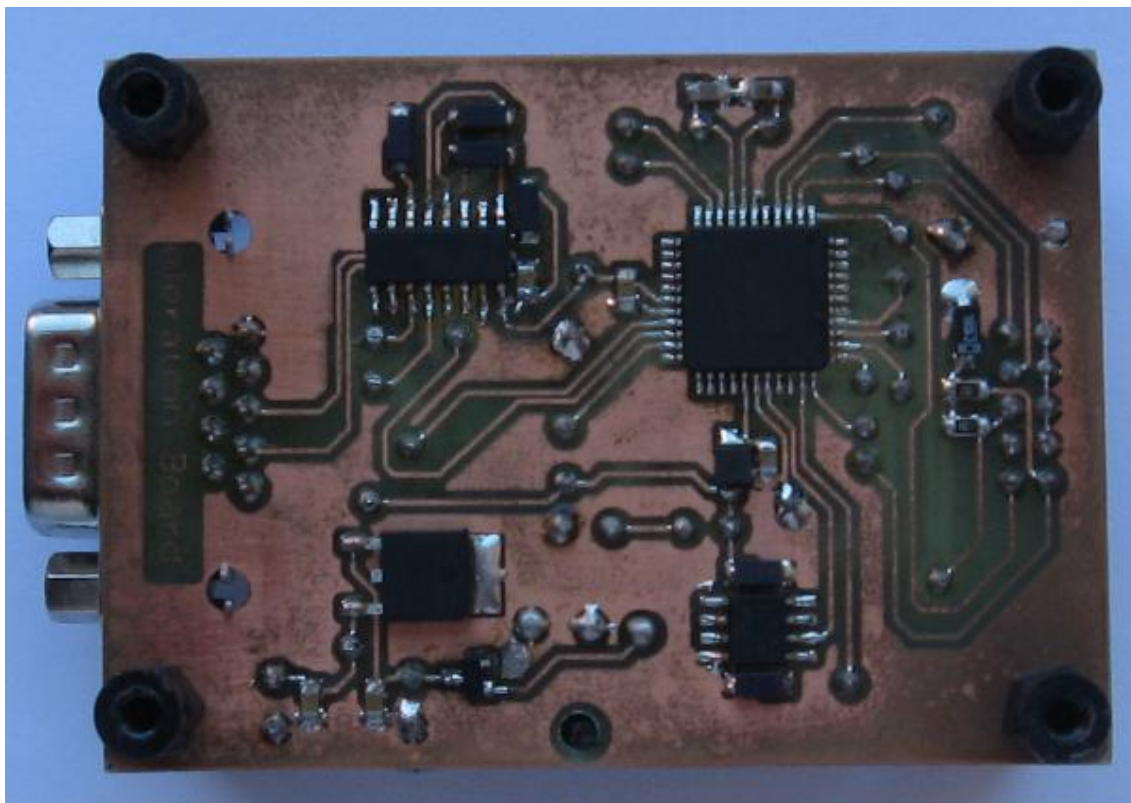
#### 4.4. Osazení desky

Pájení součástek bylo provedeno od nejmenších (SMD odpory, SMD kondenzátory, SMD cívka, SMD diody), jako druhé „šváby“ (Atmega16L, REF5030, stabilizátor, MAX3232CSE), po nich přišli na řadu kondenzátory, oscilátor, odpory a konektory. Jako poslední jsme pájeli akcelerometry, kvůli tomu, že jejich vývody nebyli pro pájení mikropájkou vhodné. A proto jsme cín nanесли na desku, lehce nahřáli, aby se cín se roztavil a přiložili akcelerometr.

#### 4.5. Výsledná deska



*Obr. 20 Výsledná deska vrchní část*

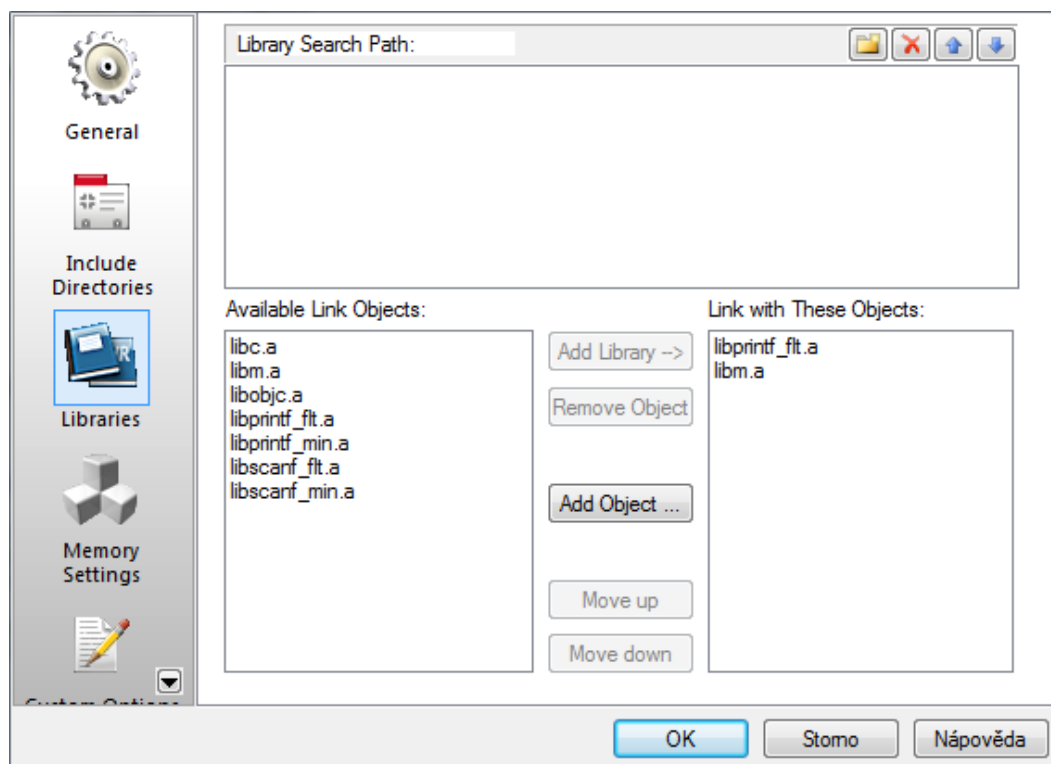


*Obr. 21 Výsledná deska spodní část*

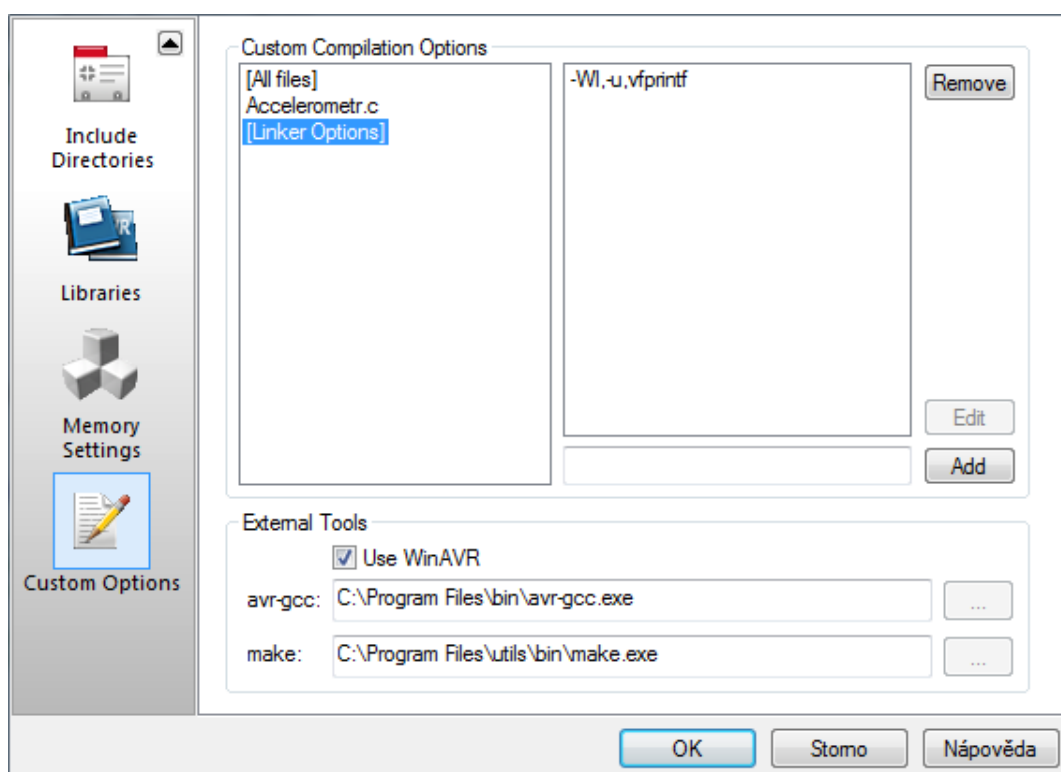
#### 4.6. AVR Studio 4

AVR Studio je integrované vývojové prostředí pro mikroprocesory AVR (Atmega, Atmegax, atd.). AVR Studiu se programuje v jazyce symbolických instrukcí (assembler). Abychom mohli programovat v jazyce C/C++ musíme nainstalovat WinAVR. Tento program v sobě zahrnuje překladač, programátor, debugger atd. AVR studio dokáže simulovat běh mikroprocesoru. Lze rovněž při simulaci sledovat časovače/čítače, SPI, USART, porty, A/D převodník, EEPROM atd. Což je výhodné pokud potřebujeme zkontrolovat co se děje při určité instrukci. Program se vytváří v textovém editoru, který automaticky rozpozná instrukci, komentář, atd. a zbarví je příslušnou barvou, která je v AVR Studiu daná (např. komentář je zbarven světle zeleně), což přispívá k přehlednosti programu.

Při programování jsem se setkal s tím, že kompilátor nebyl nastaven na práci s float ve funkci printf. To jsme udělal tak, že pokud máme otevřený projekt v AVR studiu, tak v hlavní nabídce vybereme „Project“ a zde zvolíme „Configuration Options“. Otevře se nám okno v levé liště, a vybereme si „Libraries“. Zde vybereme „libprintf\_flt.a“ a „libm.a“ a přidáme je pomocí „Add Library“ přesuneme do pravého sloupce (Link with These Objects) (Obr. 22). Po tomto nastavení v levé liště zvolíme „Custom Option“ Zvolíme „Linker Options“ a vložíme „-Wl, -u, vfprintf“ (Obr. 23). Tím jsem komparátor nastavil na práci s float ve funkci printf.



Obr. 22 Okno Project Options (Libraries) převedení „libprintf\_ft.a“ a „libm.a“



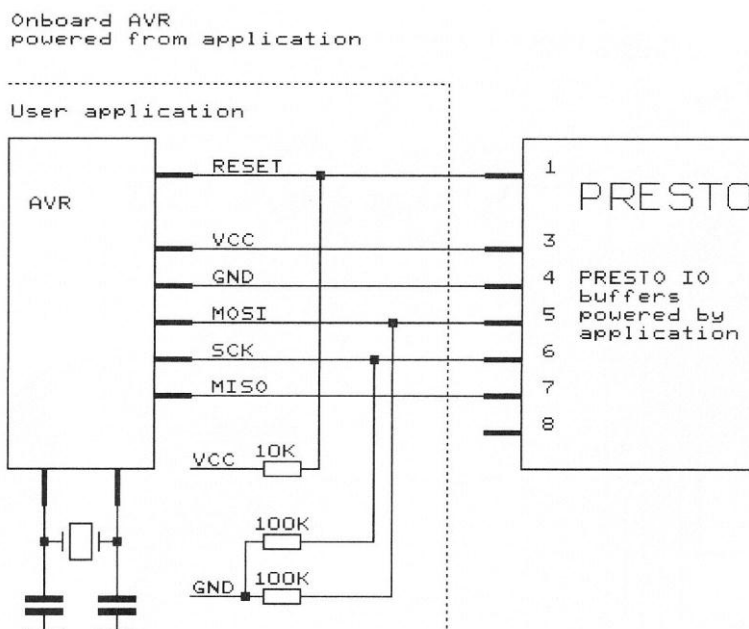
Obr. 23 Okno Project Options (Custom Options) vložení „-Wl, -u, vfprintf“

#### 4.7. ASIX Presto

Pro nahrání programu do mikroprocesoru jsem vybral programátor Presto od české firmy ASIX. Presto je jednoduchý USB programátor, který dokáže programovat velkou škálu obvodů (mikroprocesory, sériové paměti, CPLD, a další). Z počítače je ovládán programem ASIX UP rovněž od firmy ASIX.



Obr. 24 Programátor ASIX Presto [8].

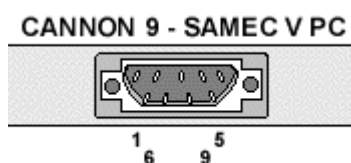


Obr. 25 Zapojení programátoru Presta a Atmegy16L[9]

#### 4.8. RS-232

RS-232 (neboli sériová linka) je komunikační rozhraní pro komunikaci mezi dvěma zařízeními nejčastěji s počítačem a elektronikou. V dnešní době je RS-232 spíše na ústupu díky USB (Universal Serial Bus).

RS-232 může být použita na vzdálenost 20m (v některých materiálech je udáváno jen 15m). Konektory RS-232 jsou nejčastěji 9pinový.



Obr. 26 Konektor CAN9[10].

Pin	Název	I/O	Popis
1	CD	Vstup	Carrier Detect
2	RXD	Příjem	Receive Data
3	TXD	Vysílač	Transmit Data
4	DTR	Výstup	Data Terminal Ready
5	GND	Zem	Ground
6	DSR	Vstup	Data Set Ready
7	RTS	Výstup	Request To Send
8	CTS	Vstup	Clear To Send
9	RI	Vstup	Ring Indicator

Tab. 2 Popis jednotlivých pinů v konektoru CAN9.

Pro naše požití jsme využili je piny RXD, TXD a GND.

#### 4.9. Hercules SETUP utility 3.2.4

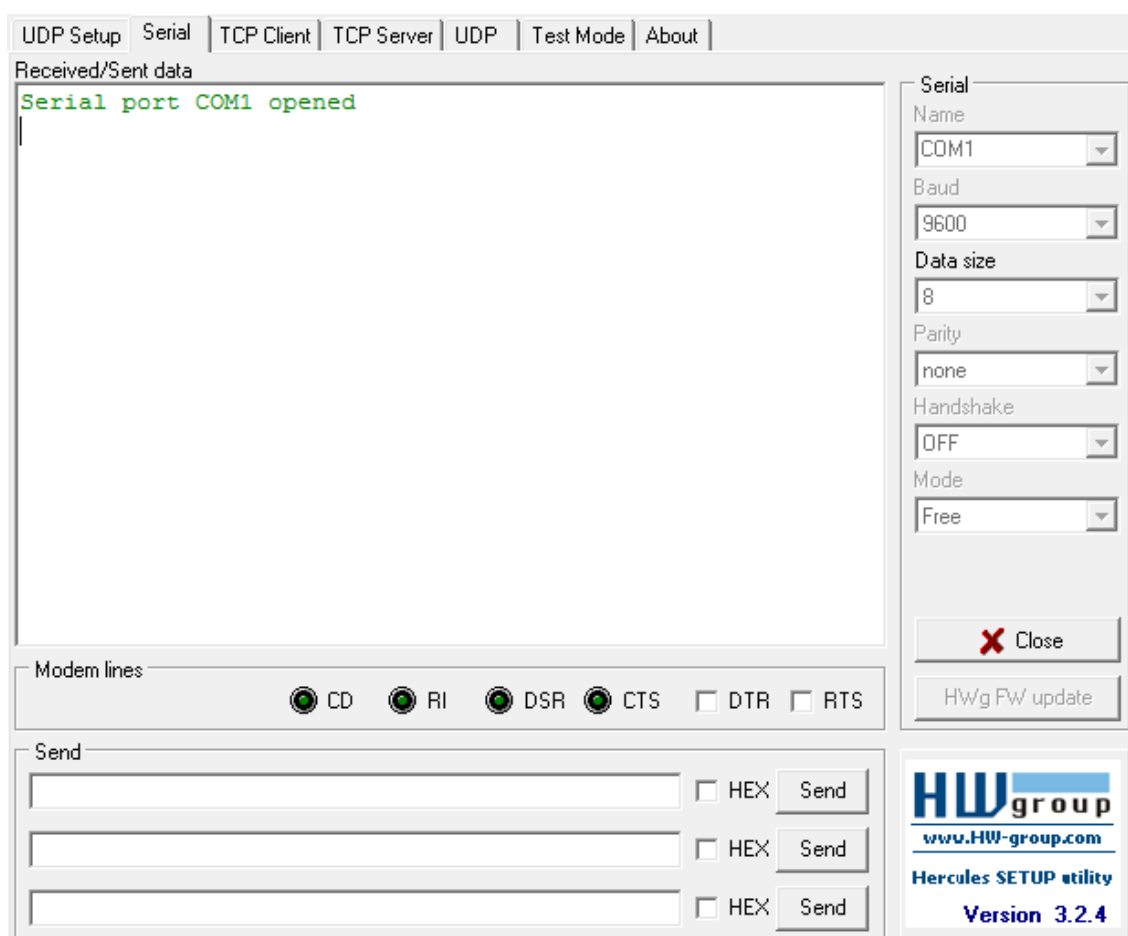
Tato aplikace může být používána, pokud pracujeme se sériovým nebo Ethernetovým zařízením nebo rozhraním. Jedná se o aplikaci od firmy HW group.

Aplikace se skládá z částí:

- Serial port terminal
- TCP/IP Client terminal
- TCP/IP Server „terminal“
- UDP „terminal“
- UDP Config utility
- Test mode

Poslední dvě části fungují pouze s výrobky od firmy HW group.

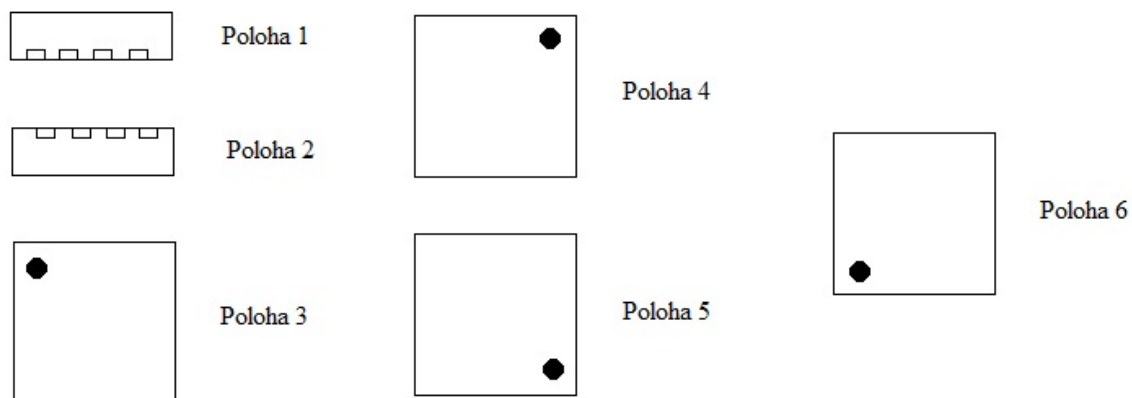
Pro naše účely postačí pouze část Serial port terminal. Na kterém budeme číst výstupní data z desky.



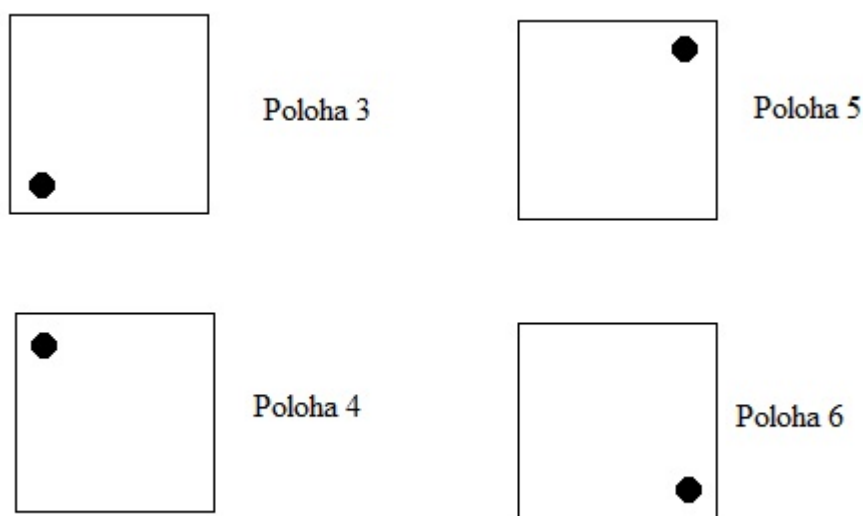
Obr. 27 Serial port Terminal jeho nastavení.

## 5. Naměřené hodnoty:

### 5.1. Statické (tíhové) zrychlení



Obr. 28 Očíslované polohy akcelerometru MMA7260Q.



Obr. 29 Očíslované polohy akcelerometru ADIS16006.

Měření bylo provedeno tak, že desku jsem položil do určité polohy a odčetl jsem výstupní data (u všech poloh sto hodnot na každou osu).

			ADIS16006		MMA7260Q	
Poloha			Průměr <sup>(1)</sup>	Nejistota <sup>(2)</sup>	Průměr <sup>(1)</sup>	Nejistota <sup>(2)</sup>
1	G <sub>X</sub>	[g]	-	-	-0,03	±0,0034
	G <sub>Y</sub>	[g]	-	-	-0,04	±0,0037
	G <sub>Z</sub>	[g]	-	-	0,96	±0,0030
2	G <sub>X</sub>	[g]	-	-	-0,04	±0,0033
	G <sub>Y</sub>	[g]	-	-	-0,04	±0,0034
	G <sub>Z</sub>	[g]	-	-	-0,96	±0,0030
3	G <sub>X</sub>	[g]	0,00	±0,0018	-0,03	±0,0035
	G <sub>Y</sub>	[g]	-1,00	±0,0014	-0,96	±0,0031
	G <sub>Z</sub>	[g]	-	-	-0,05	±0,0038
4	G <sub>X</sub>	[g]	-0,99	±0,0013	-0,96	±0,0033
	G <sub>Y</sub>	[g]	0,00	±0,0016	-0,04	±0,0037
	G <sub>Z</sub>	[g]	-	-	-0,04	±0,0037
5	G <sub>X</sub>	[g]	0,00	±0,0015	-0,04	±0,0038
	G <sub>Y</sub>	[g]	1,00	±0,0015	0,96	±0,0029
	G <sub>Z</sub>	[g]	-	-	-0,04	±0,0031
6	G <sub>X</sub>	[g]	0,99	±0,0019	0,96	±0,0031
	G <sub>Y</sub>	[g]	0,00	±0,0016	-0,04	±0,0034
	G <sub>Z</sub>	[g]	-	-	-0,05	±0,0039

Tab. 3 Výsledky měření statického zrychlení akcelerometrů v různých polohách.

<sup>(1)</sup> Vzorec pro výpočet aritmetického průměru:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, [g]$

<sup>(2)</sup> Vzorec pro výpočet nejistot typu A:  $u_A(x) = s(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, [g]$

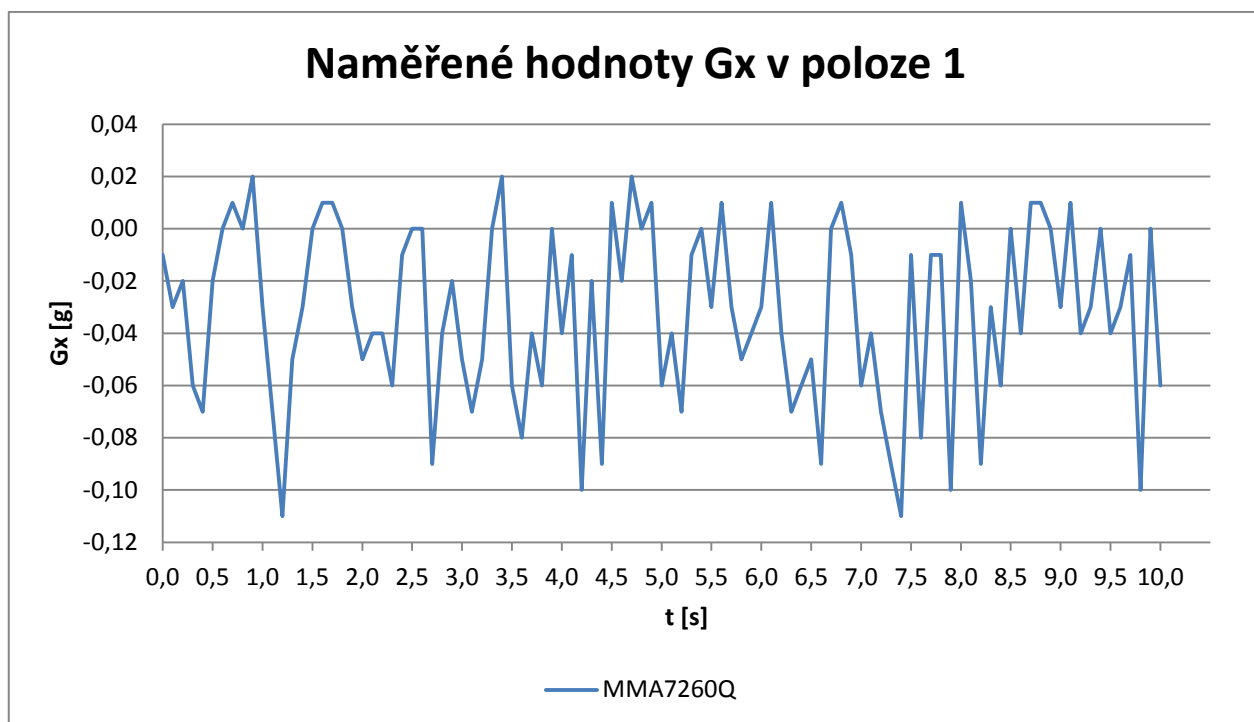
**Symboly:**

$\bar{x}$  Aritmetický průměr

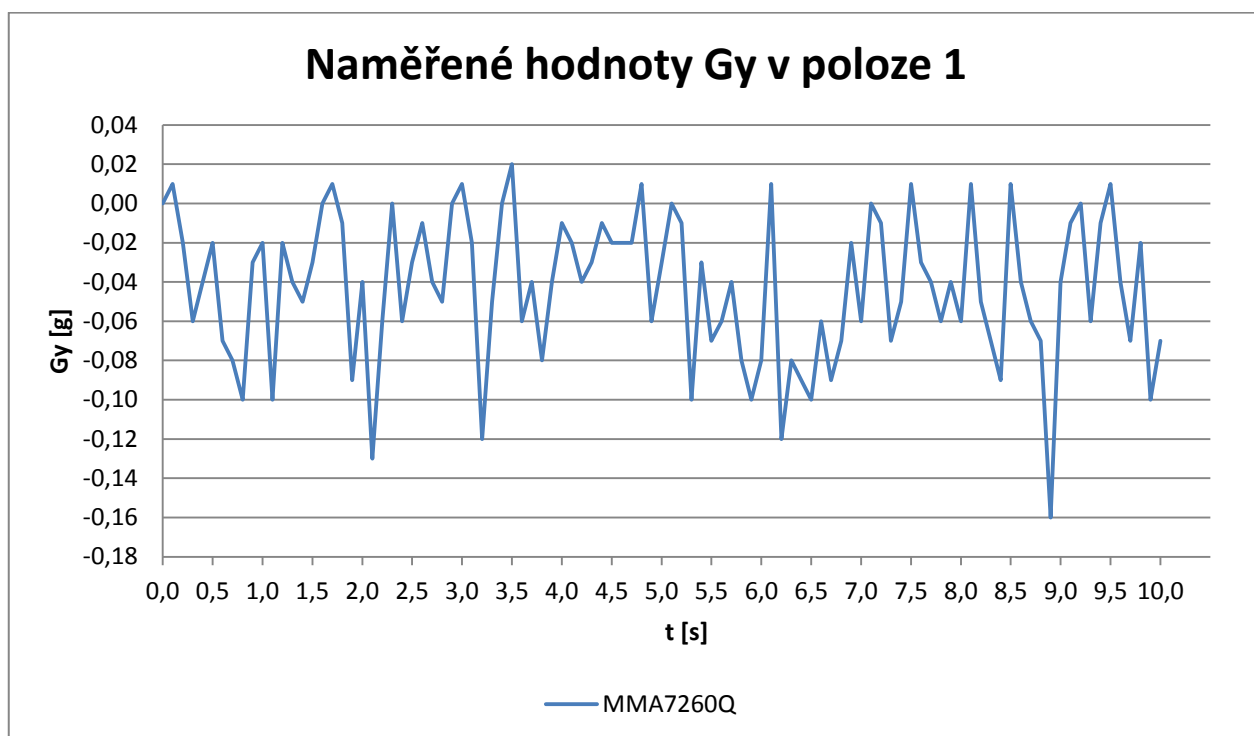
$n$  Počet hodnot

$x_i$  i hodnota

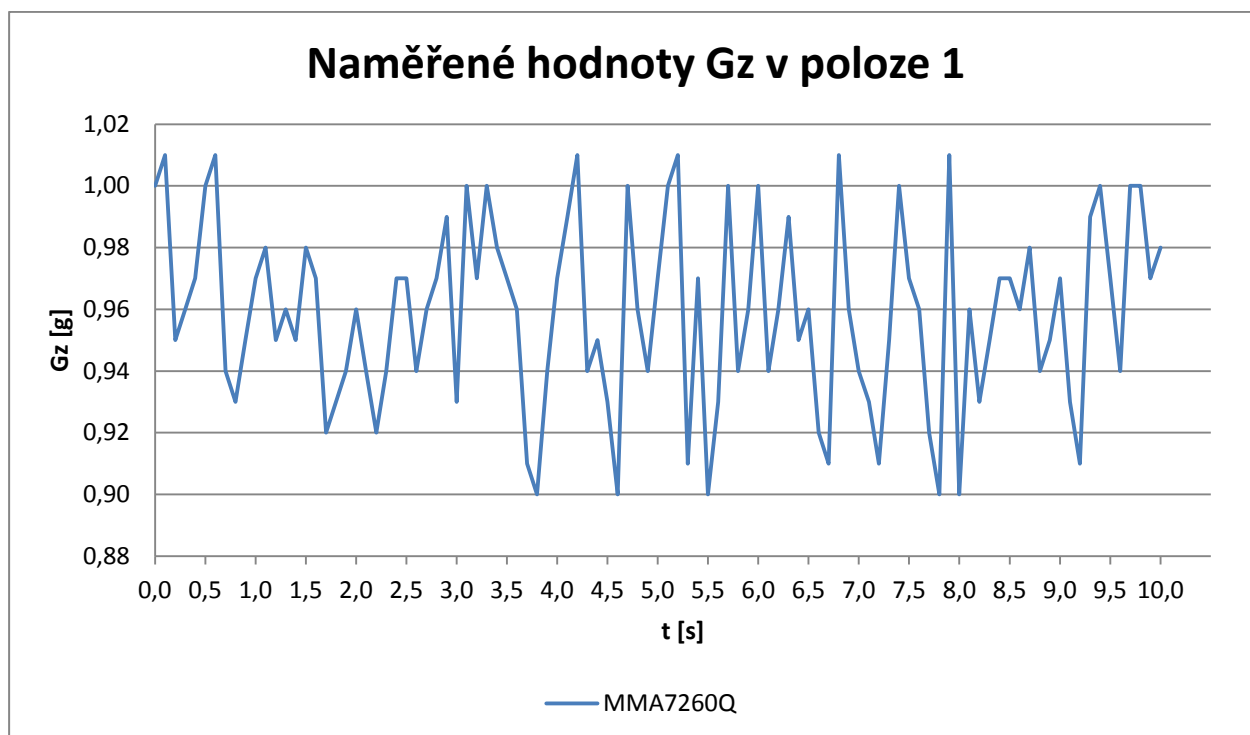
$u_A$  Nejistota typu A



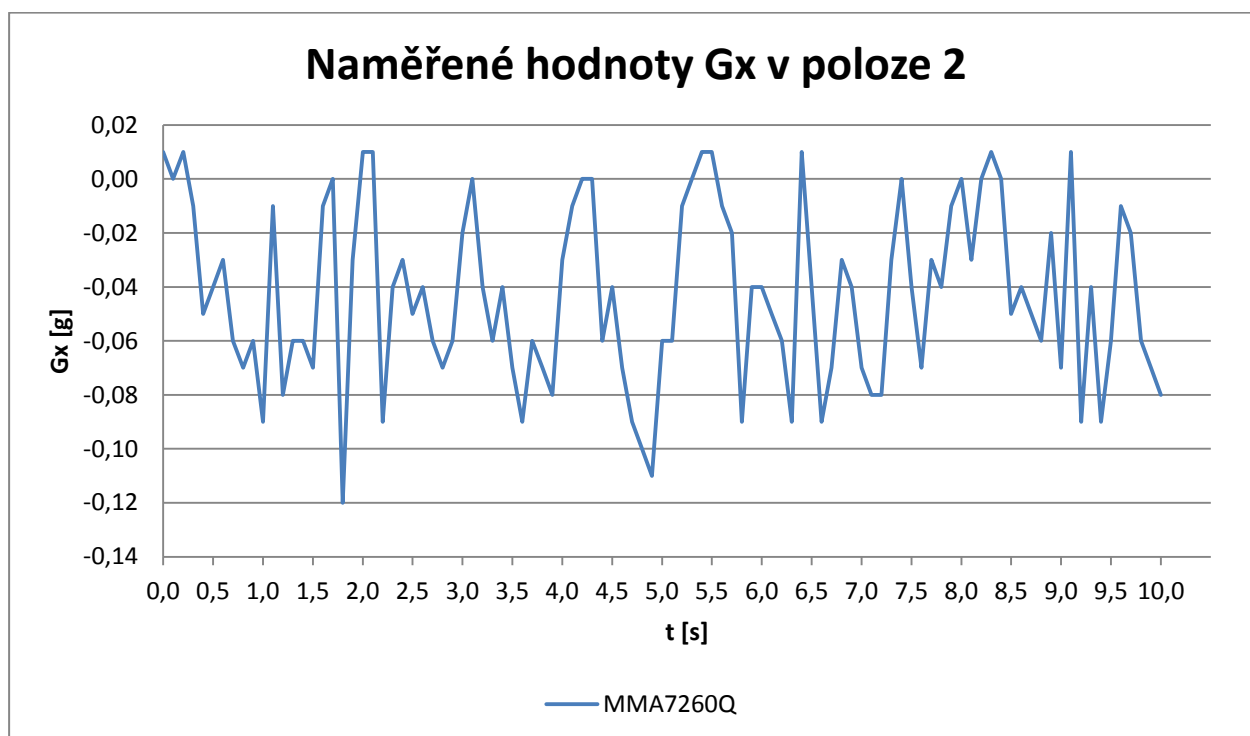
Obr. 30 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 1.



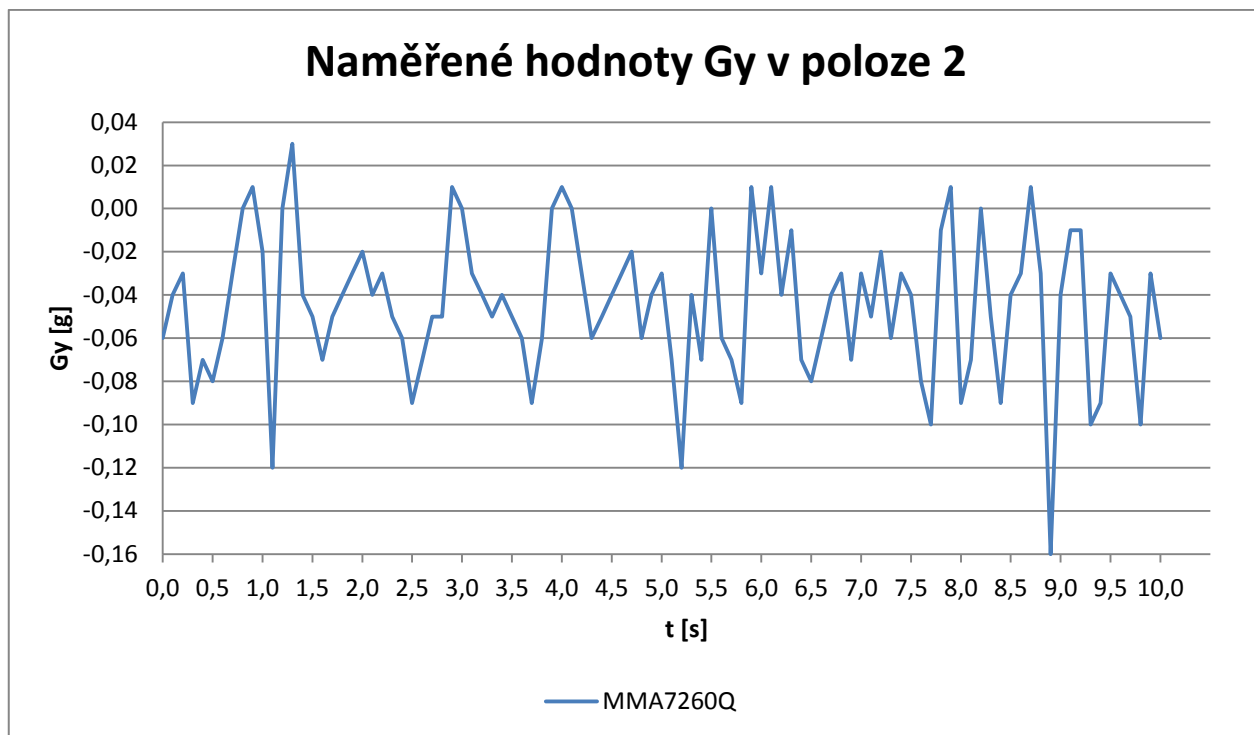
Obr. 31 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 1.



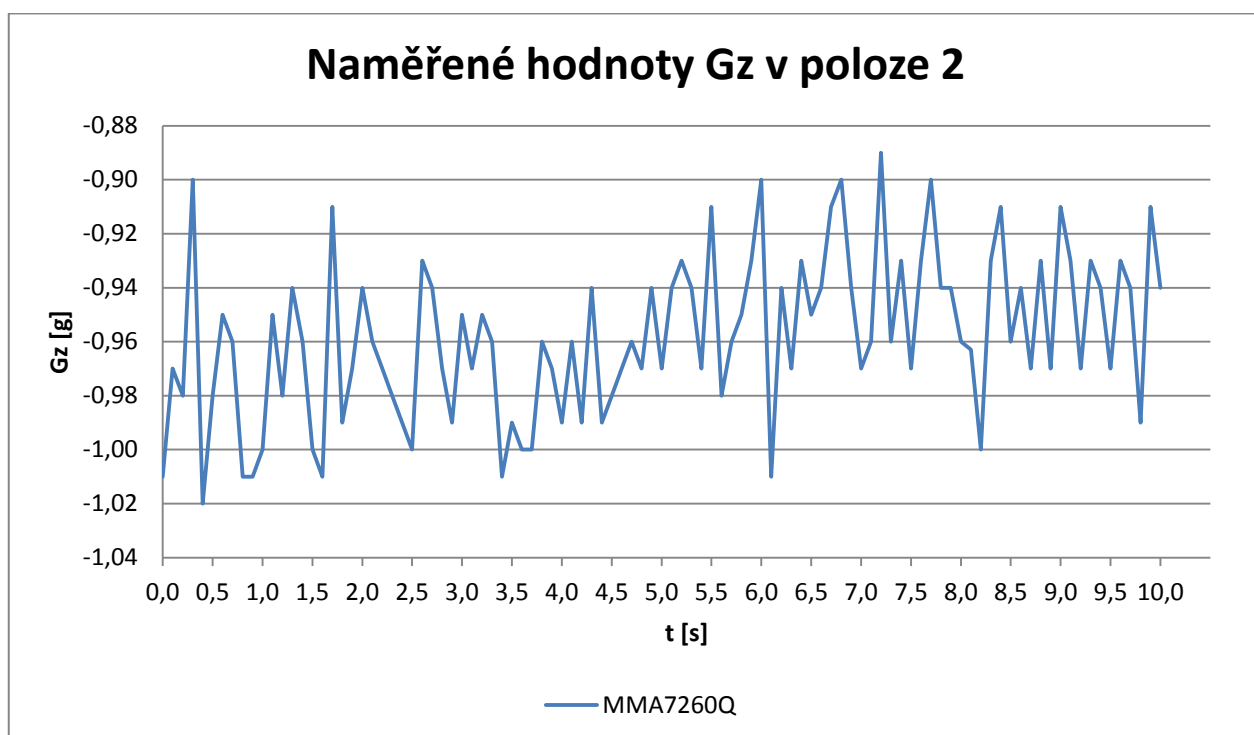
Obr. 32 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 1.



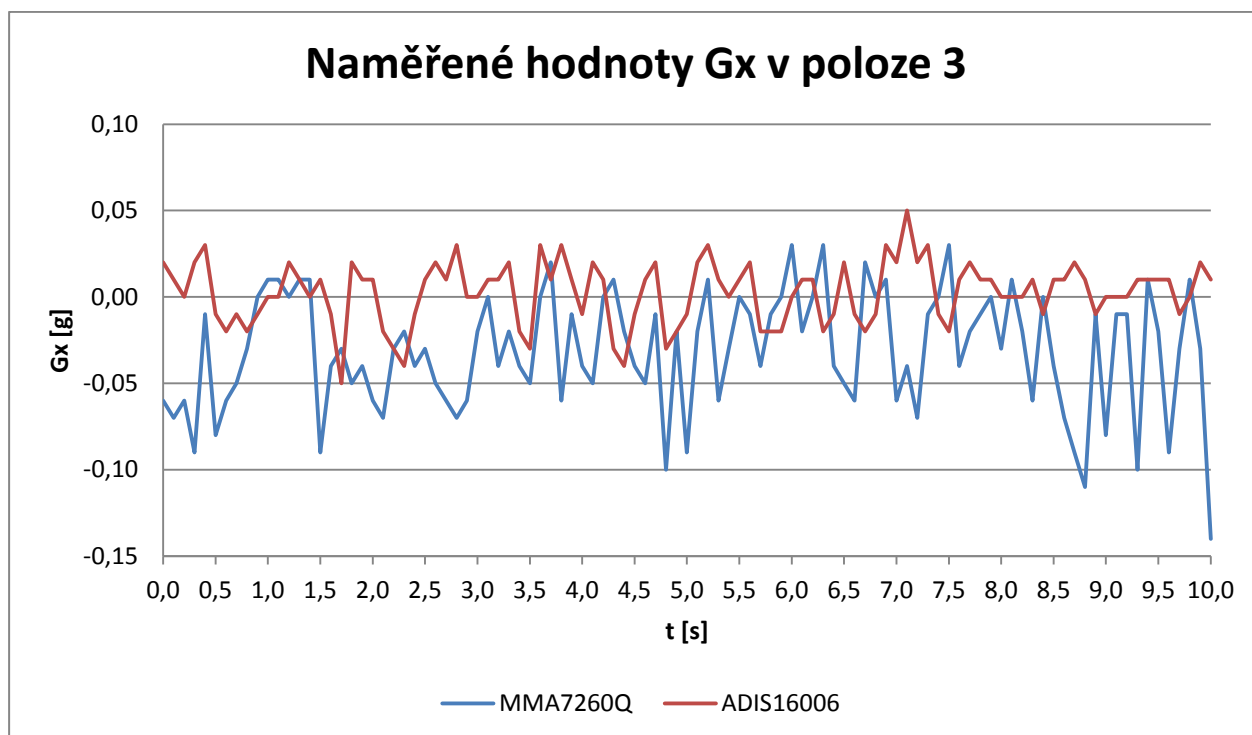
Obr. 33 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 2.



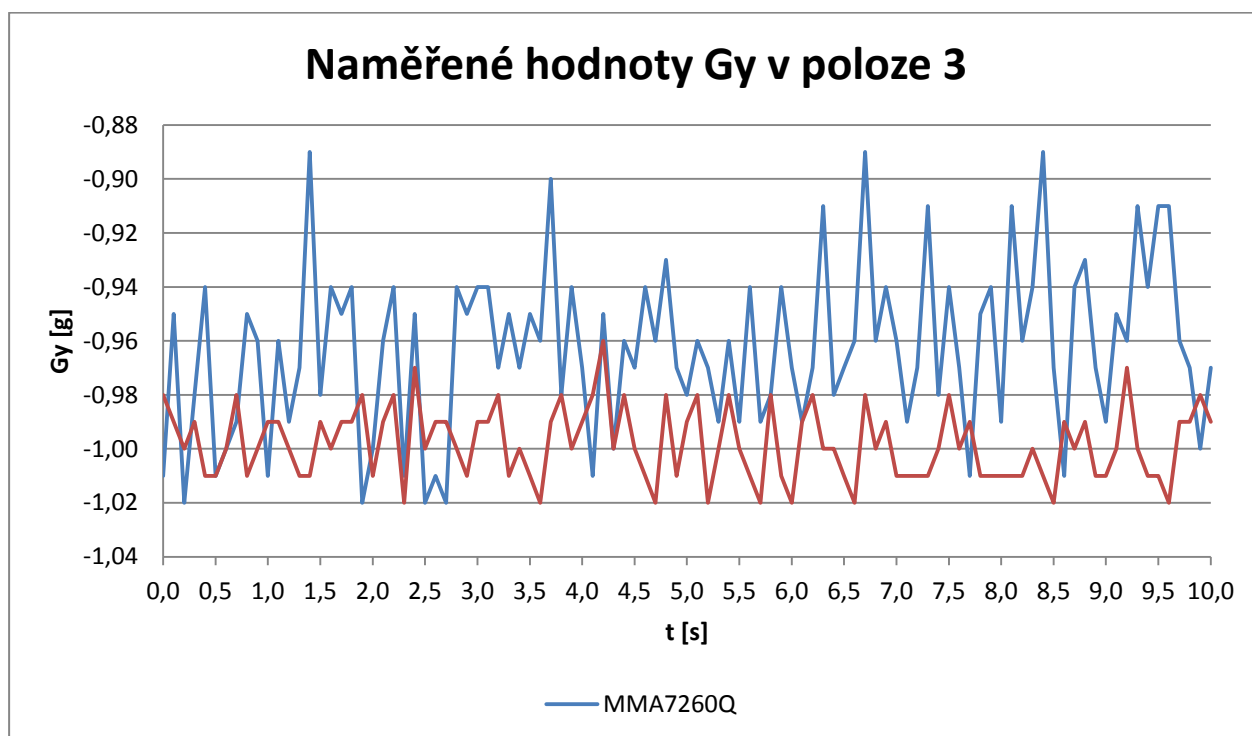
Obr. 34 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 2.



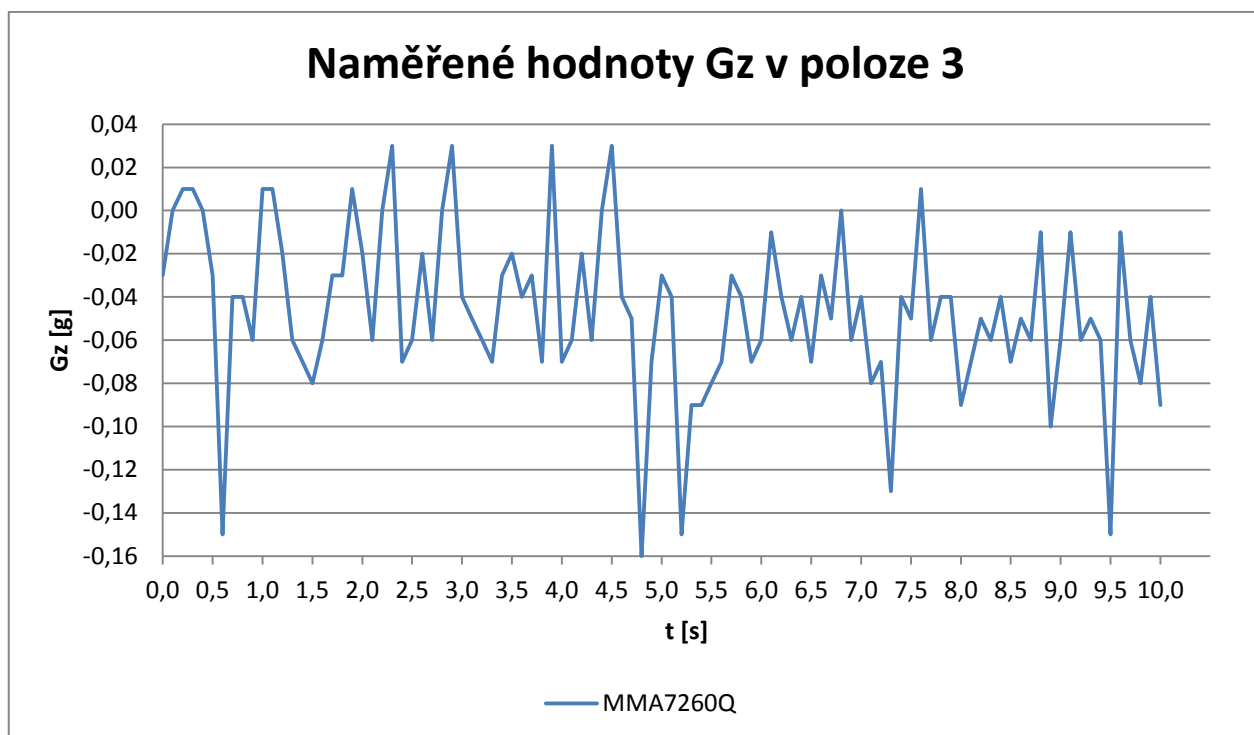
Obr. 35 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 2.



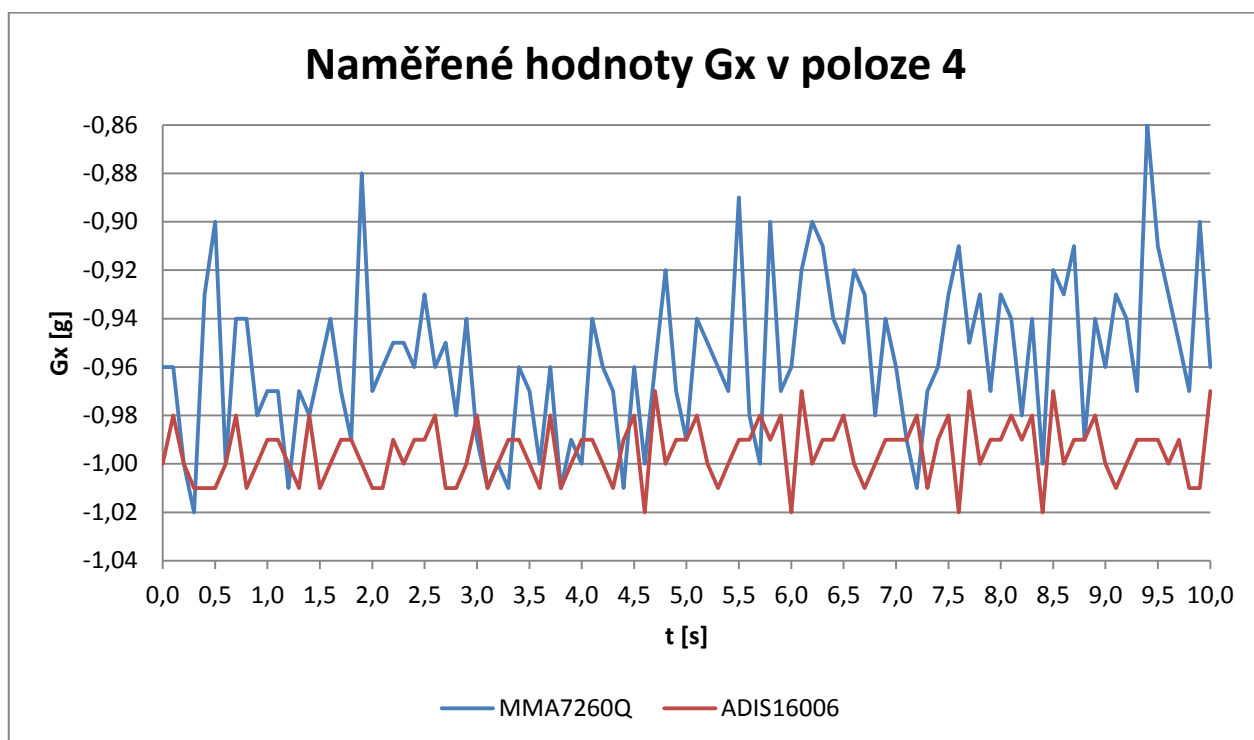
Obr. 35 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 3.



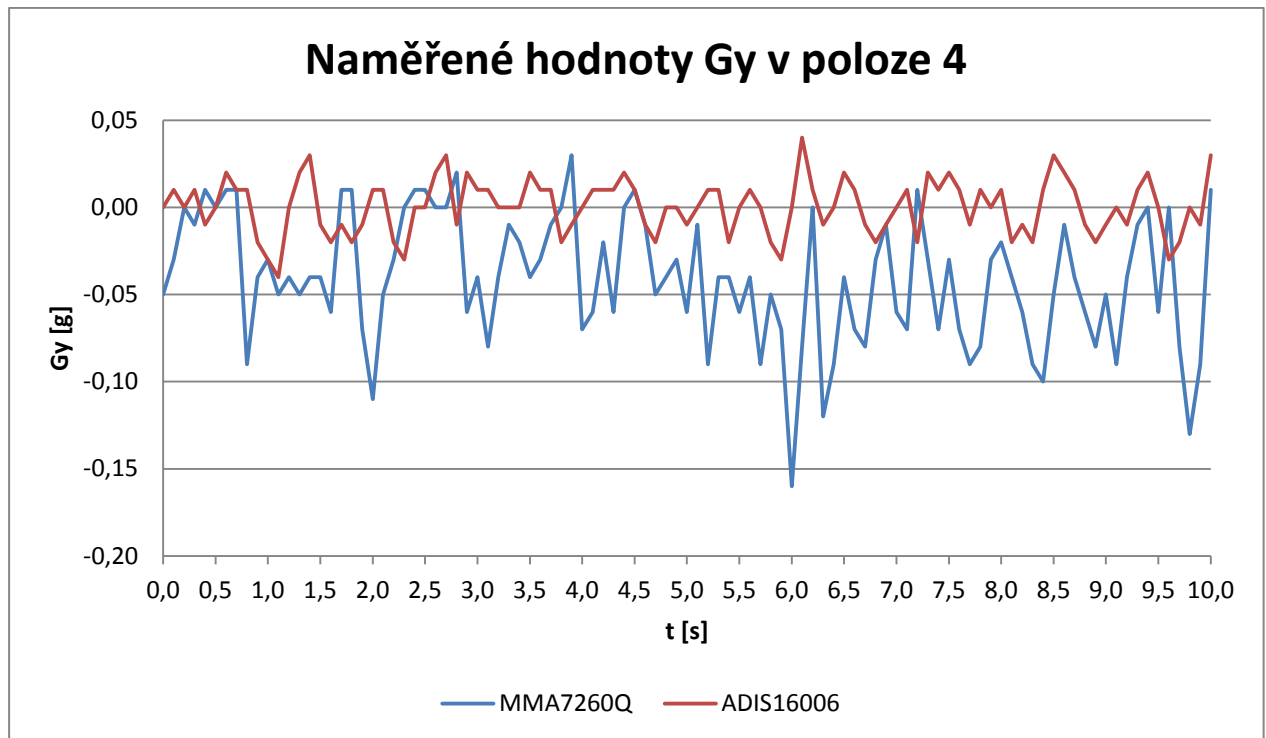
Obr. 36 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 3.



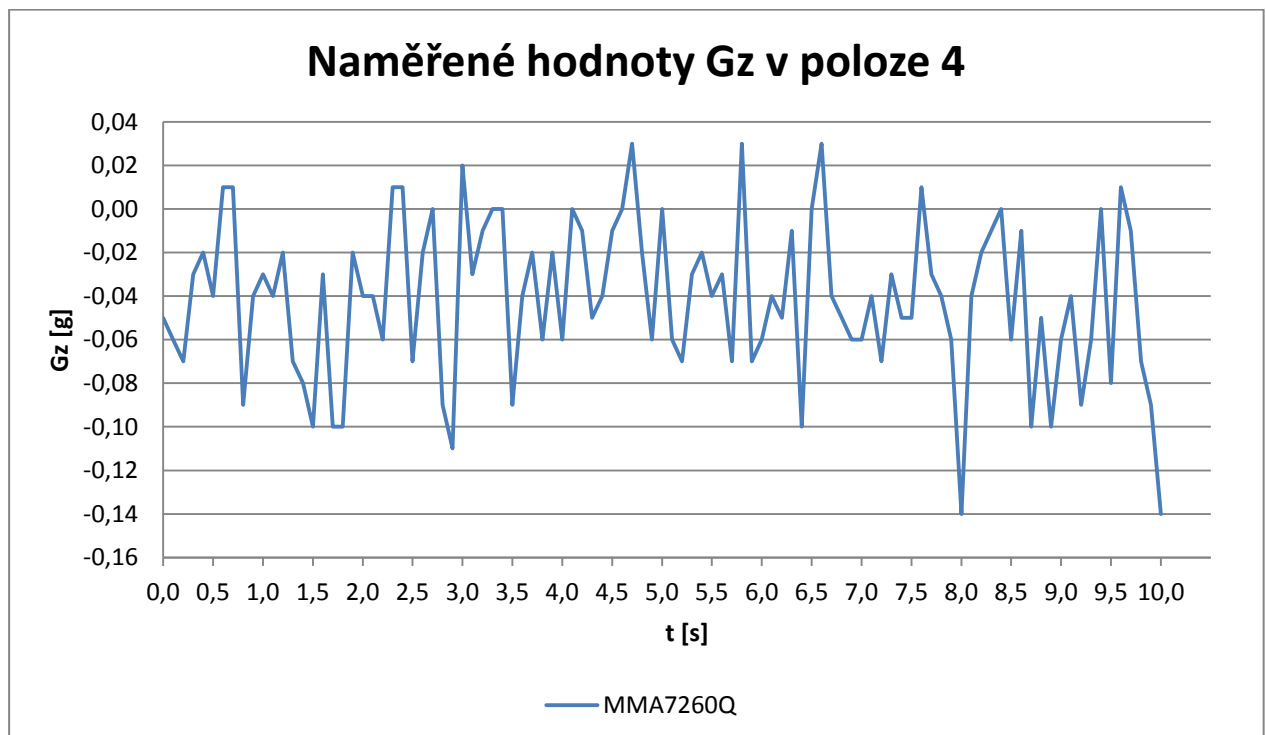
Obr. 37 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 3.



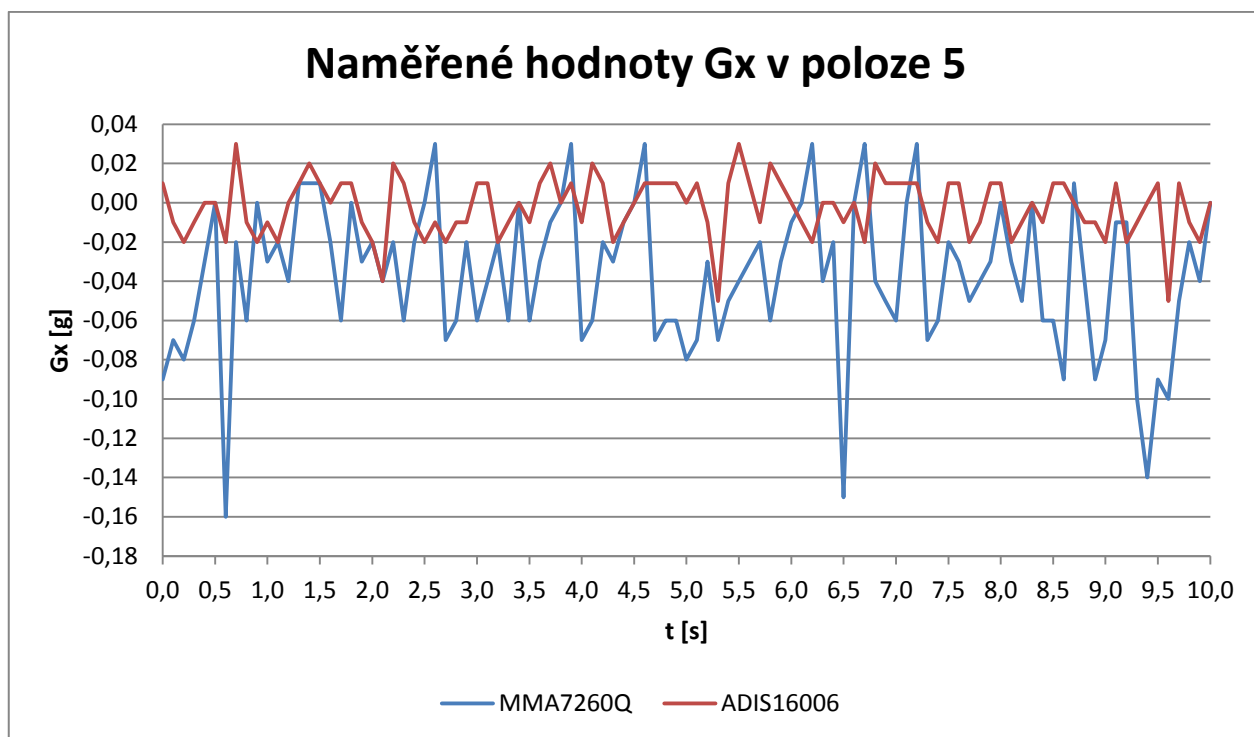
Obr. 38 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 4.



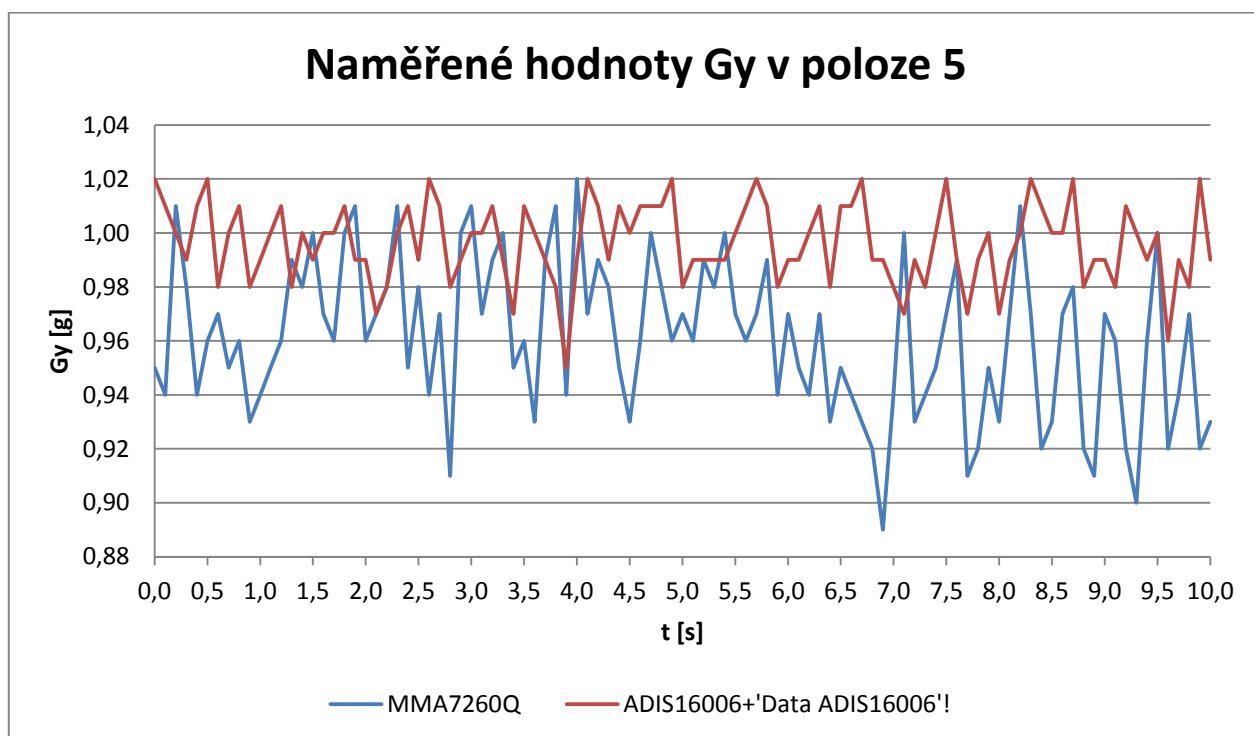
Obr. 39 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 4.



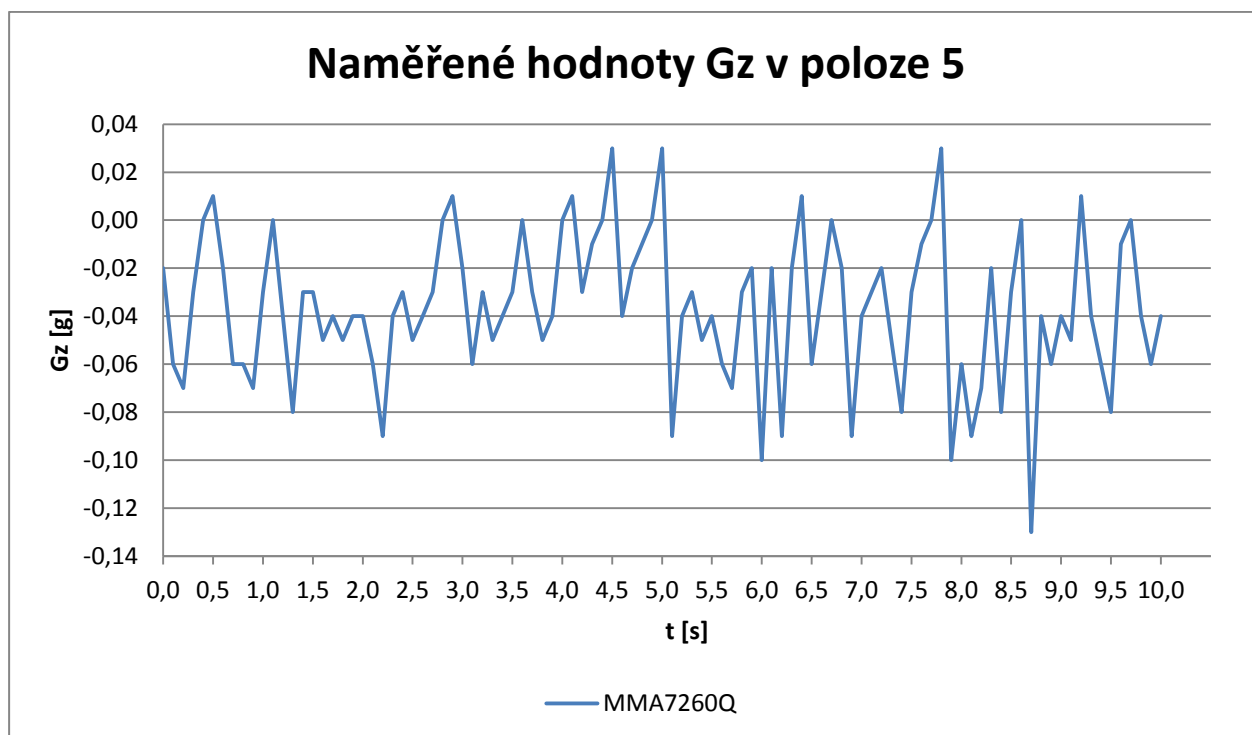
Obr. 40 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 4.



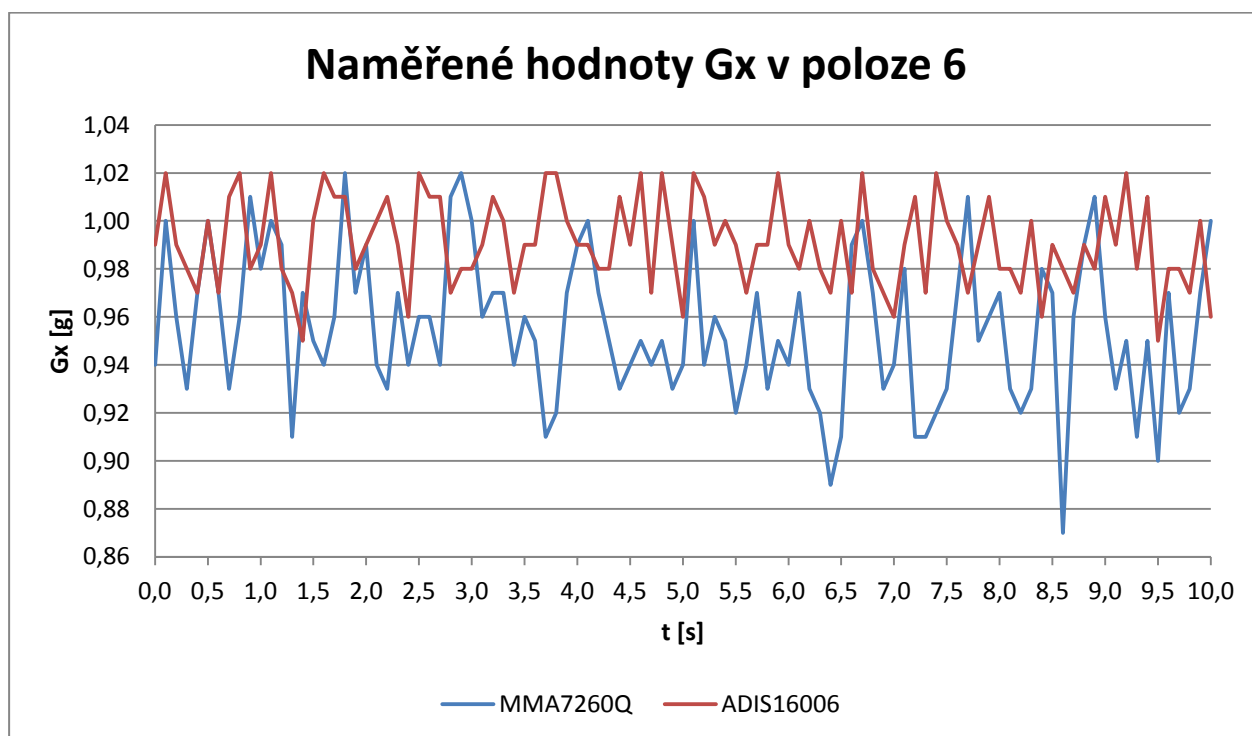
Obr. 41 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 5.



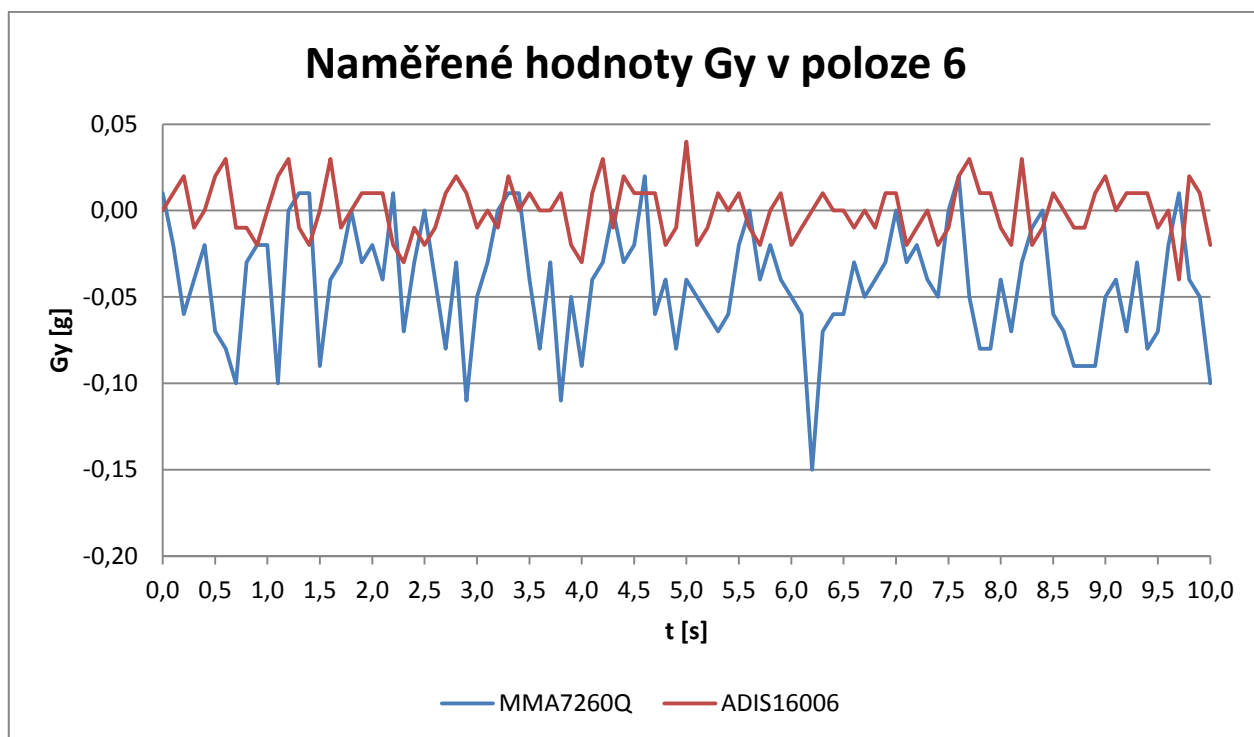
Obr. 42 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 5.



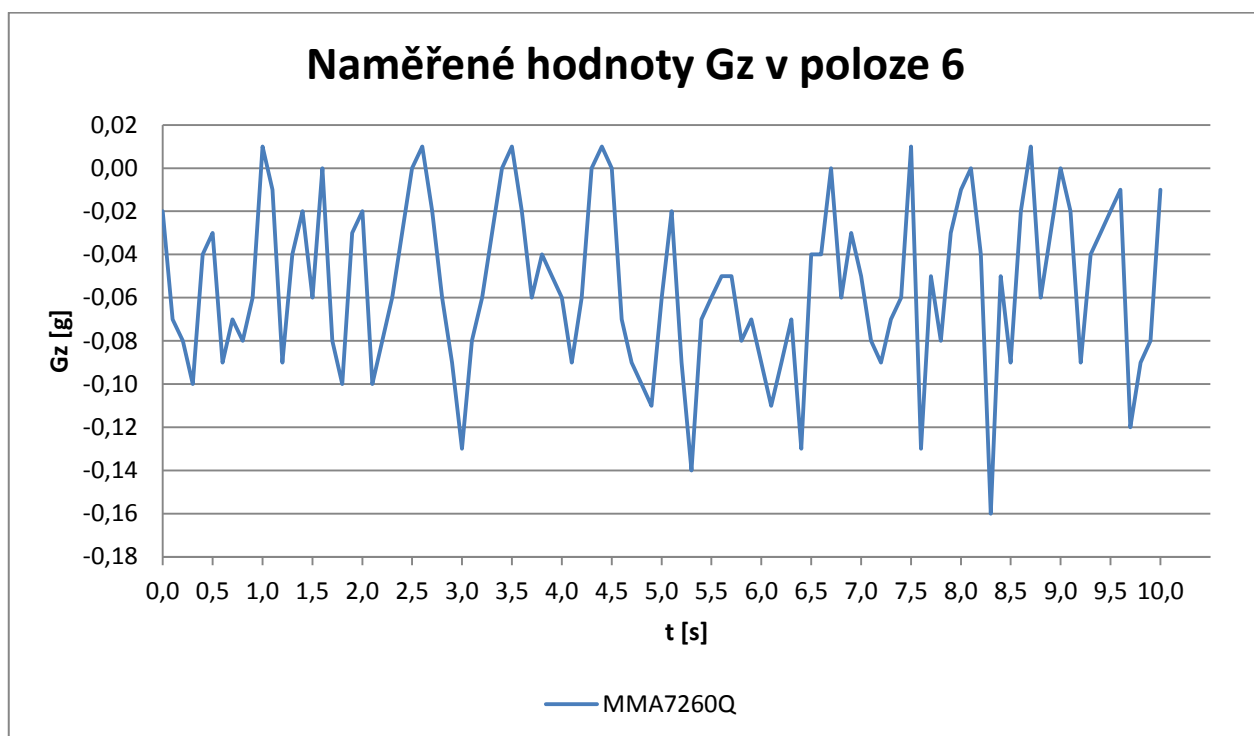
Obr. 43 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 5.



Obr. 44 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 6.



Obr. 45 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 6.



Obr. 46 Naměřené hodnoty akcelerometrů v poloze 6.

## 5.2. Dynamické zrychlení

Měření proběhlo tak, že autem jsem dosáhl 80km/h, pak jsem začal konstantně brzdít. Až jsem dosáhl 60km/h, začal jsem měřit dynamické zrychlení, měření probíhalo až do rychlosti 20km/h, pak jsem vypl měření a dále brzdil až do úplného zastavení vozidla. Rozmezí od 80km/h až do 60km/h (rovněž od 20km/h až do 0km/h) jsem neměřil, jelikož jsem chtěl, aby auto brzdilo rovnoměrně, a to při sešlápnutí brzdového pedálu nedocílím, tak jsem nechal menší mezeru, aby brždění bylo konstantní.

Celý tento pokus byl prováděn na uzavřeném prostoru mimo pozemní komunikaci, kvůli bezpečnosti. Auto mělo vypnuté ABS.

### Data při měření osy $G_X$ :

$$\Delta v = 11,1 \text{ ms}^{-1}$$

$$t_1 = 5,3 \text{ s}$$

$$t_2 = 0 \text{ s}$$

$$g = 9,82 \text{ ms}^{-2}$$

### Data při měření osy $G_Y$ :

$$\Delta v = 11,1 \text{ ms}^{-1}$$

$$t_1 = 5,9 \text{ s}$$

$$t_2 = 0 \text{ s}$$

$$g = 9,82 \text{ ms}^{-2}$$

		MMA7260Q		ADIS16006		Vypočítané <sup>(3)</sup>
		Průměr <sup>(1)</sup>	Nejistota <sup>(2)</sup>	Průměr <sup>(1)</sup>	Nejistota <sup>(2)</sup>	
$G_X$	[g]	0,17	$\pm 0,0041$	0,18	$\pm 0,0025$	0,21
$G_Y$	[g]	0,15	$\pm 0,0039$	0,17	$\pm 0,0024$	0,19

Tab. 4 Výsledky měření dynamického zrychlení akcelerometrů.

<sup>(1)</sup> Vzorec pro výpočet aritmetického průměru:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ , [g]

<sup>(2)</sup> Vzorec pro výpočet nejistot typu A:  $u_A(x) = s(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ , [g]

<sup>(3)</sup> Vzorec pro výpočet teoretického průměrného dynamického zrychlení auta při brždění

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{v_1 - v_2}{t_1 - t_2}\right)}{g}, [g]$$

### Symbols:

$\bar{x}$  Aritmetický průměr

$n$  Počet hodnot

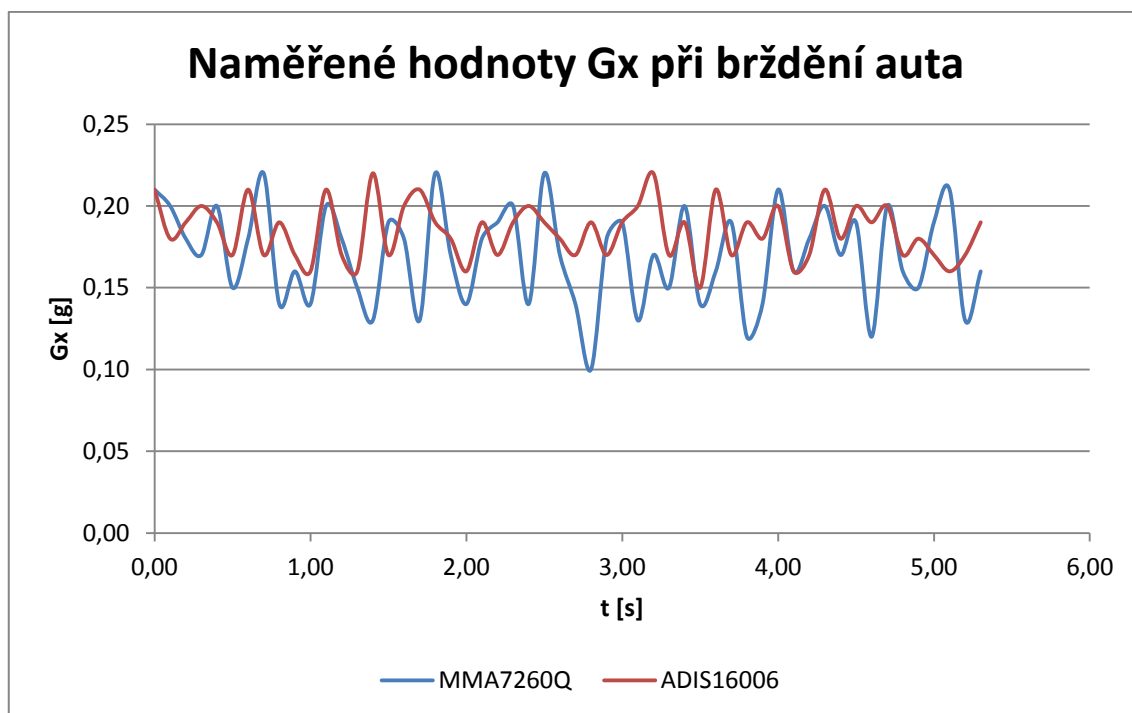
$x_i$  i hodnota

$u_A$  Nejistota typu A

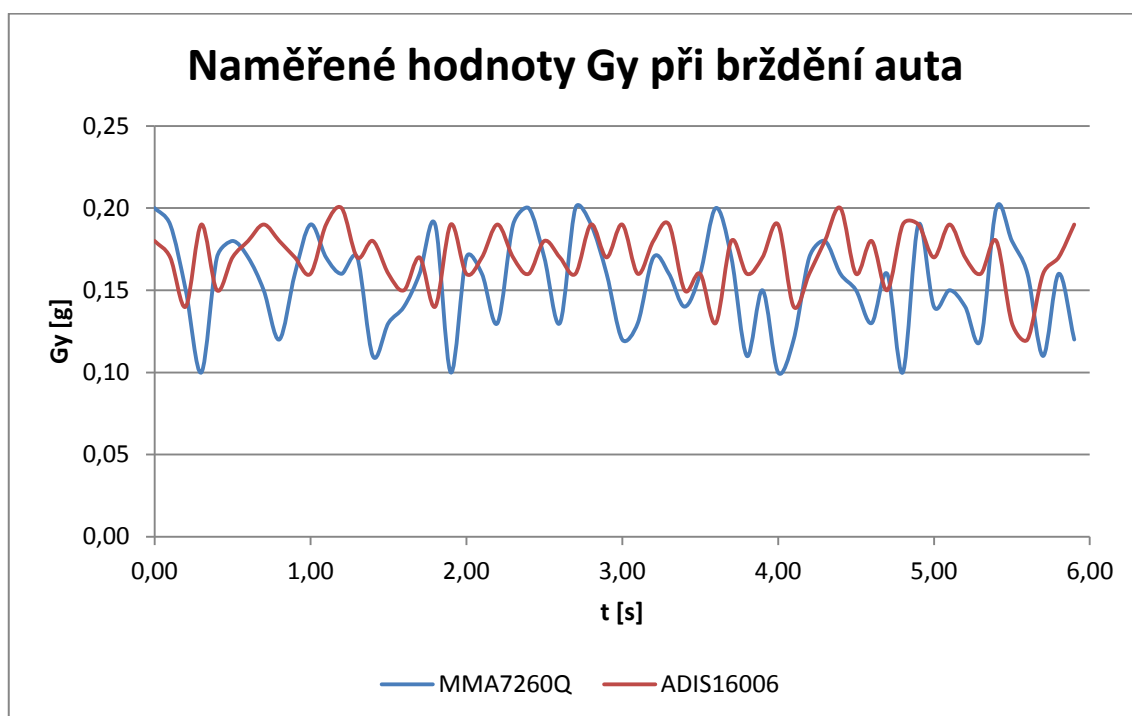
$\bar{a}$  Průměrné zrychlení v čase  $\Delta t$

$\Delta v$  Rozdíl rychlostí v čase  $\Delta t$

$\Delta t$  Rozdíl časů  $t_1 - t_2$



Obr. 47 Výsledné hodnoty  $G_x$  při brždění vozu.



Obr. 48 Výsledné hodnoty  $G_y$  při brždění vozu.

## 6. Závěr

Když jsem poprvé přemýšlel nad využitelností těchto akcelerometrů, tak jsem schválně zvolil tříosý a dvouosý akcelerometr, aby si sám popřemýšlel nad využitelností dvouosého a tříosého akcelerometrů u mobilních robotů – micromousů. Pokud vezmeme dvouosý akcelerometr a jeho použitelnost u mobilních robotů, tak můžeme měřit náklon mobilního robota, ale jen boční náklony nebo přední (zadní) náklon robotů. Nebo lze ADIS16006 použít pro měření přetížení, ale pro mobilního robota je toto vcelku zbytečné. Za to použití MMA7260Q by bylo pro použití do mobilních robotů smysluplnější, jelikož by měřilo, jak boční náklon a náklon dopředu (dozadu). Tento akcelerometr by mohl zároveň detekovat převrácení mobilního robota.

Co se týče pájení obou akcelerometrů, tak dle mé zkušenosti šel lépe zapájet na desku MMA7260Q, jelikož měl vývody až na boční strany pouzdra, což znamenalo, že jsem měl jistotu, že ho připájím na desku. Za to ADIS16006 měl vývody jenom ze spod a ještě poměrně daleko od bočních stěn, což jsem neměl jistotu, že vývody ADIS16006 chytanou na desku a akcelerometr bude správně fungovat.

U programování se mi osobně více zamlouvalo programovat A/D převodník, ale to je pouze subjektivní názor jelikož s A/D převodníkem už nějaké zkušenosti mám. Za to programování SPI bylo pro mě těžší.

Jako ukázkou obou akcelerometrů jsem zvolil jejich proměření (jak statického, tak dynamického zrychlení), tím pádem můžeme oba akcelerometry i porovnat v jejich přesnosti.

U statického zrychlení je ADIS16006 přesnější než MMA7260Q, to lze vyčíst nejen z grafů, kde jasně ADIS16006 má menší rozptyl hodnot kolem katalogových hodnot a jeho hodnoty se pohybují kolem hodnot katalogových, ale i jeho průměrné hodnoty jsou buďto totožné s hodnotami v datasheetu nebo jen o 0,01g rozdílné. Nejistoty ADIS16006 jsou v některých hodnotách skoro poloviční (viz Tab. 3) vzhledem k MMA7260Q. MMA7260Q je mnohem nepřesnější. Jednak má větší rozptyl hodnot kolem katalogových hodnot, ale i průměrné hodnoty neodpovídají katalogovým hodnotám. Co je ale zajímavé, že například průměrné hodnoty, které by měly vyjít 1g (-1g), tak jsou 0,96g (-0,96g) a to v každé poloze, která má vyjít 1g (-1g).

U dynamického zrychlení to není až tak zřetelné. Sice MMA7260Q má při bližším ohledání grafu více rozptýlené hodnoty než ADIS16006. Do výsledků může ještě promlouvat brzdění jako takové (přilnavost, stav brzd, stav pneumatik, stav tlumičů, atd.), i když jsem se snažil brzdit tak, aby bylo zpomalení konstantní. Za povšimnutí stojí vypočítané nejistoty, které jasně má menší ADIS16006 a tyto hodnoty se blíží k hodnotám nejistot ze statického zrychlení ADIS16006. Nejistoty MMA7260Q se rovněž blíží k hodnotám statického zrychlení MMA7260Q. Pokud porovnáme vypočítané hodnoty a hodnoty změřené, tak můžeme vidět, že ADIS16006 má blíže k těmto hodnotám, rozdíl dělá v ose  $G_x$  0,03g a v ose  $G_y$  0,02g. U MMA7260Q je tento rozdíl větší v ose  $G_x$  0,04g a v ose  $G_y$  rovněž 0,04g.

Porovnání těchto akcelerometrů patří i jeho pořizovací cena u MMA7260Q se jedná o částku 159 Kč (prodejce GM Electronic, 20. 5. 2011) u ADIS16006 se jedná o částku \$99,00 (Výrobce a prodejce Analog Devices, 20. 5. 2011) nebo 2111,49Kč (prodejce Farnell, 20. 5. 2011).

Pokud tedy můžeme tyto dva akcelerometry úplně porovnat, tak můžeme říci, že ADIS16006 je přesnější ale dražší a měří jen ve dvou osách, zato MMA7260Q je levnější, měří ve třech osách ale je zase méně přesný. Proto použití obou akcelerometrů je možné, ale s přihlédnutím na to, k čemu tyto akcelerometry budou chtít využít.

## 7. Seznam použité literatury:

- [1] *Akcelerometr* [online]. 2009, [cit.: 21. 1. 2011] Dostupné z: <http://wiki.kn.vutbr.cz/robot/index.cgi?akcelerometr>
- [2] Freescale Semiconductor, Inc. *MMA7260Q 3ARROW LOW* [online]. 2010, [cit.: 24. 1. 2011] Dostupné z: [http://www.freescale.com/files/graphic/product\\_freescale/MMA7260Q\\_3ARROW\\_LOWRES.jpg](http://www.freescale.com/files/graphic/product_freescale/MMA7260Q_3ARROW_LOWRES.jpg)
- [3] Freescale Semiconductor, Inc. *Datasheet, dsh.955-062.1* [online]. 2006, [cit.: 25. 1. 2011] Dostupné z : <http://www.gme.cz/dokumentace/dokumenty/955/955-062/dsh.955-062.1.pdf>
- [4] Analog Devices, Inc. Datasheet, ADIS16006 [online]. 2007, [cit.: 25. 1. 2011] Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADIS16006.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16006.pdf)
- [5] Atmel Corporation. Datasheet, doc2466 [online]. 2010, [cit.: 26. 1. 2011] Dostupné z: [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2466.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf)
- [6] doc. Ing. Zdeněk Němec, CSc., Prostředky automatického řízení elektrické, Vydavatelství VUT FSI UAI, srpen 2008 [cit.: 26. 1. 2011]
- [7] Maxim Integrated Products, Datasheet, MAX3222-MAX3241 [online]. 1999, [cit.: 26. 1. 2011] Dostupné z : <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX3222-MAX3241.pdf>
- [8] ASIX s.r.o., presto\_down\_720 [online]. 2010, [cit.: 2. 2. 2011] Dostupné z: [http://www.asix.cz/img/presto\\_down\\_720.jpg](http://www.asix.cz/img/presto_down_720.jpg)
- [9] ASIX s.r.o., PRESTO USB programátor uživatelská příručka, Vydavatelství ASIX s.r.o. [cit.: 3. 2. 2011]
- [10] Vít Olmer , cann\_9\_m [online]. 2005, [cit.: 16. 4. 2011] Dostupné z: <http://hw.cz/rs-232>

## 8. Seznam příloh:

- Příloha 1 - Schéma zapojení část 1
- Příloha 2 - Schéma zapojení část 2
- Příloha 3 - CD