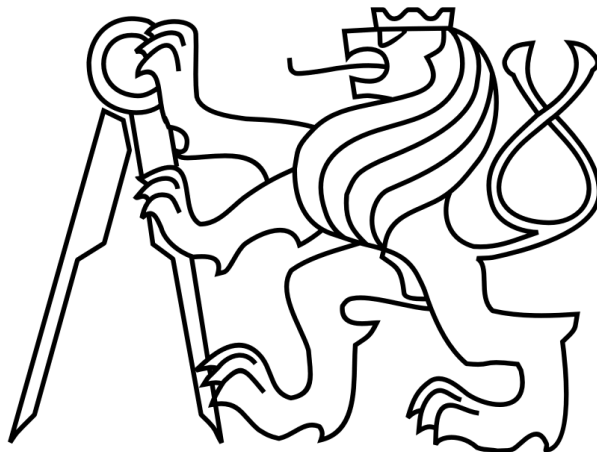


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2014**

**František Hruška**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky**

**Náklonoměr s akcelerometrem**

**Incliner with accelerometer**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

**František Hruška**

---

**Praha 2014**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **František Hruška**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Náklonoměr s akcelerometrem**

### Pokyny pro vypracování:


1. Proveďte rešerši současného stavu poznatků řešení náklonoměrů s akcelerometrem pro sledování úhlu náklonu.
2. Navrhněte a realizujte elektronicky náklonoměr s akcelerometrem pro sledování úhlu náklonu  $-180^{\circ}$  až  $+180^{\circ}$ , pro návrh využijte vhodný typ akcelerometru 1D až 3D dostupného na trhu. Realizujte laboratorní vzorek s mechanickou konstrukcí, navrhněte a realizujte vhodné elektronické zapojení pro zpracování a vyhodnocování naměřených dat. Pro vyhodnocování využijte prostředí LabView.
3. Zhodnoťte dosažené parametry, porovnejte s vybraným komerčním zařízením, vyhodnoťte možné chyby systému a navrhněte možnosti jejich odstranění. Navrhněte další možné pokračování řešení práce s rozšířením funkcí systému.
4. Proveďte ekonomický rozbor vývoje a následné výrobu systému.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Neumann, P., Uhlíř, J.: Elektronické obvody a funkční bloky (I,II), ČVUT.
- [2] Husák, M., Mikrosenzory a mikroaktuátory, Academia 2008, 540 s., ISBN 978-802-0014-788.
- [3] Ripka, P., Senzory a převodníky, 2. Vyd., ČVUT 2011, 136 s., ISBN 978-800-1046-968

Vedoucí: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

  
Prof. Ing. Miloš Klíma, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 10. 2. 2014

# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „náklonoměr s akcelerometrem“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne

František Hruška

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu prof. Ing. Miroslavu Husákovi, CSc. za cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat panu Miroslavu Horníkovi za pomoc při výrobě testovací konstrukce.

## **Anotace**

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit náklonoměr s rozsahem  $\pm 180^\circ$  pomocí komerčního akcelerometru. V teoretické části jsou popsány funkční principy akcelerometrů a vlastnosti senzorů. V druhé části práce jsou popsány hardwarové a softwarové části. V přílohách je pak uvedena výrobní dokumentace.

## **Klíčová slova**

Akcelerometr, DPS, LabVIEW

## **Keywords**

Accelerometer, DPS, LabVIEW

## **Abstract**

Target of this Bachelor thesis was developed inclinometer with range  $\pm 180^\circ$  by commercial accelerometer. In theoretical part are described functional principles of accelerometers and properties of sensors. In the second part are described hardware and software parts. In appendixes is mentioned manufacturing documentation.

# Obsah

Úvod .....	2
1 Senzory .....	2
1.1 Dělení a vlastnosti senzorů .....	4
1.2 Vyhodnocovací řetězec senzoru.....	5
1.3 Akcelerometry.....	7
1.3.1 Piezodporové akcelerometry.....	8
1.3.2 Piezoelektrické akcelerometry .....	8
1.3.3 Tepelné akcelerometry .....	9
1.3.4 Kapacitní akcelerometry.....	9
1.3.5 Porovnání 1D, 2D, 3D.....	10
2 Návrh a realizace hardwaru.....	11
2.1 Konstrukční bloky .....	11
2.1.1 Akcelerometr MMA7361LC .....	12
2.1.1.1 Popis pinů.....	13
2.1.1.2 Zapojení do obvodu.....	14
2.1.2 Mechanická konstrukce .....	15
2.1.3 DPS s akcelerometrem .....	17
2.1.4 Přepojovací DPS .....	18
2.1.5 NI USB DAQ 6009 .....	19
3 Návrh řídicího software .....	20
4 Dosažené výsledky .....	24
5 Ekonomický rozbor .....	28
6 Závěr .....	28
Literatura.....	30
Seznam příloh .....	31

## Seznam použitých symbolů a zkratek

C	(F)	kapacita
I	(A)	el. proud
$P_{vst}$	(W)	spotřebovaný výkon
U	(V)	el. napětí
$\omega_0$	(Hz)	rezonanční kmitočet
$\varepsilon_a$	(%)	relativní chyba senzoru
$\varepsilon_f$	(%)	relativní chyba senzoru vztažená na měřicí rozsah
$\varepsilon_0$	(F·m <sup>-1</sup> )	permitivita vakua
$\varepsilon_r$	(-)	relativní permitivita

BaTiO<sub>3</sub> – barium titanate

DAQ – data aquistion

DBL – double precision

DPS – deska plošných spojů

ESD – electro static discharge

ESP – electronic stability programme

RSE – referenced single-ended

SiO<sub>2</sub> – oxid křemičitý

USB – universal serial bus



# Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá vytvořením náklonoměru v měřicím rozsahu  $\pm 180^\circ$  pomocí akcelerometru. Práce bude členěna do několika částí, které popisují různé části problematik potřebných k celkové konstrukci funkčního vzorku. Obecně lze práci rozdělit do 3 podstatných částí. První částí bude teoretický rozbor. V něm bude uvedeno co je to senzor a v jakých oblastech se mohou v dnešní době využívat. Dále zde bude uvedeno, jaké energetické domény na ně mohou působit. Další popis se bude zabývat, pomocí jakých kombinací interdisciplinárních oborů lze vyrábět moderní senzory. Dále uvedu, jakým způsobem mohou být děleny a jaké vlastnosti budou v této práci měřeny. Sensory bývají prvotní součástí měřicího řetězce, proto i zde popíši, jakým způsobem takový řetězec může vypadat a jaké operace se v něm mohou provádět a za pomoci jakých programovacích metod může být řetězec vyhodnocován. Poslední oblastí, kterou se bude zabývat tato první část, je popis na jakém fyzikálním principu pracují současné akcelerometry a jejich porovnání z hlediska 1D, 2D a 3D. Ve druhé části se budu zabývat popisem hardwaru, konkrétně jednotlivých částí, které se následně spojí do jednoho funkčního celku a vytvoří tak měřicí řetězec senzoru. V rámci této části bude uveden podrobný popis vybraného akcelerometru zaměřený na jeho vlastnosti a způsob jakým lze ovládat. Dále zde popíšu DPS které budou navrženy a mechanickou konstrukci určenou pro demonstraci funkce sklonoměru. Třetí část bude určena pro popis a návrh softwaru v programovém prostředí LabVIEW. Popis zahrne vývojový diagram programu a jeho jednotlivé bloky se stanou předmětem popisu. Sestavené zařízení bude vhodné pro edukativní účely. Následně stanovím vybrané vlastnosti vytvořeného náklonoměru a stanovím ekonomický rozbor práce. Práce bude v samotném závěru obsahovat seznam použitých zdrojů a požitého softwaru včetně příloh, na které bude odkazováno v rámci textu této práce.

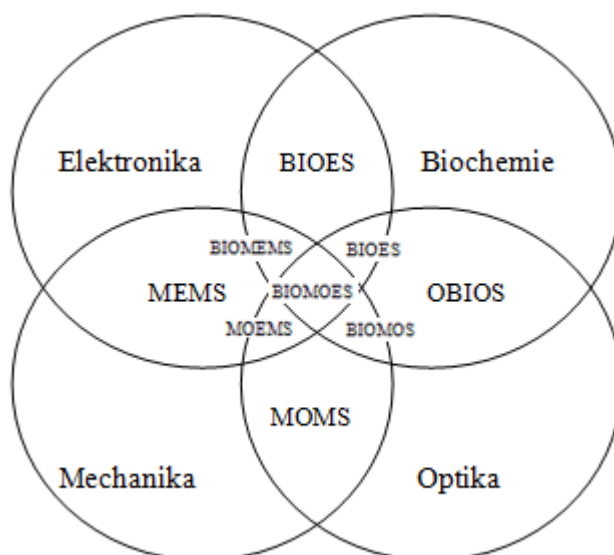
## 1 Sensory

Sensory jsou v dnešním světě velmi často používané elektronické zařízení. Svou nezastupitelnou roli mají nejen v elektrotechnickém průmyslu, ale i v řadě dalších oborů jako jsou stavebnictví, lékařství, letectví, strojírenství automotive atd.. Jde o prvotní blok v celém vyhodnocovacím (měřicím) řetězci. Pojmem senzor je myšlen tzv. vstupní transducer, což je vstupní převodník, který mění neelektrickou veličinu na elektrickou. Elektronická odezva bývá ve formě spojitého analogového výstupu, nebo diskrétního (číslicového) výstupu. Sensory jsou součástí celků nazývaných mikrosystémy. Ty dále obsahují obvody pro zpracování signálu, což bývá zpravidla elektrické převodníky a výstupní transducer (aktuátor), neboli převodník elektrické veličiny na neelektrickou. Jak již bylo řečeno transducery reagují na fyzikální podněty reálného světa. Tyto podněty lze klasifikovat dle následujících položek [1].

## Podněty působící na senzory

- Elektrické
- Mechanické
- Magnetické
- Biochemické
- Záření
- Teplotní

Není podmínkou, že na senzor působí pouze jeden z těchto uvedených podnětů, ale může to být i jejich kombinace. Dnešní mikrosystémy mají řadu výhod jako je nízká spotřeba, malé rozměry (miniaturizace), nízká cena při velkých sériích, spolehlivost, nové funkce a mnoho dalších. Zejména nové funkce vznikají díky interdisciplinárnímu propojení několika různých oborů. Těmito základními obory jsou elektronika, biochemie, mechanika, optika. Grafické znázornění tohoto prolnutí je znázorněno na obr. 1. Následné vysvětlení pojmů uvedených na obrázku je v tabulce 1.



Obr. 1. Vznik mikrosystémů [1]

Tabulka 1 Interdisciplinární kombinace oborů

Pojem	Vysvětlení
MOMS	mikro_opto_mechanický systém
BIOES	bio_opto_elektronický systém
MEMS	mikro_elekto_mechanický systém
OBIOS	opto_biochemický systém
MOEMS	mikro_opto_elekto_mechanický systém
BIOMEMS	mikro_bio_elekto_mechanický systém
BIOMOES	bio_opto_elekto_mechanický systém
BIOES	bio_elektronický systém
BIOMOS	bio_opto_mechanický systém

# 1.1 Dělení a vlastnosti senzorů

Senzory lze dělit pomocí několika dalších kritérií. Následující třídění je podle následujících bodů [2].

## Podle fyzikálního principu

Kapacitní, odporové, magnetické, indukční, chemické, indukčnostní, piezoelektrické atd.

## Podle měřené veličiny

Senzory pro měření tlaku, teploty, mechanických veličin (rychlost, zrychlení, síly, posunutí atd.), průtoku atd.

## Podle typu kontaktu s měřeným prostředím

Senzory dotykové a bezdotykové.

## Aktivní, pasivní senzory

**Aktivní s.** – Je takový typ zařízení, který ke své činnosti nepotřebuje přídavný zdroj napájení. Naopak sám lze klasifikovat díky působení měřené veličiny jako elektrický zdroj. Typickým představitelem může být termočlánek či indukční senzor.

**Pasivní s.** – Potřebují ke své činnosti externí zdroj energie. Tento zdroj nemusí být pouze elektrickým, ale může se jednat například o napájení světelným tokem.

## Podle principu převodu

Fyzikální převod – převod probíhá na základě zvoleného fyz. děje. Těmito jevy mohou být jevy Hallův, termorezistivní, magnetostrikční, piezoelektrický atd.

U senzorů se dále určují statické a dynamické vlastnosti, ty jsou blíže rozepsány ve zdroji [3] a [4]. Zpravidla je uváděna většina z nich v katalogovém listu výrobce. Při výběru senzoru do aplikace je ideální stav, když všechny parametry jsou co nejlepší. Ve skutečnosti jde ale o kompromis mezi jednotlivými údaji. Pro tuto práci jsou důležité následující vlastnosti: přesnost, doby odezvy a spotřeba, neboť budou u vytvořeného vzorku měřeny.

**Přesnost** – bývá také někdy označována jako relativní chyba senzoru  $\varepsilon_a$  (%) nebo bývá udávána jako chyba vztažená k plnému rozsahu měření  $\varepsilon_f$  (%). Vztahy č. 1 a 2 udávají, jakým způsobem lze přesnost vypočítat.

$$\varepsilon_a = 100 \cdot \frac{x_m - x_t}{x_t} (\%) \quad [3] (1)$$

$$\varepsilon_f = 100 \cdot \frac{x_m - x_t}{x_{FSO}} (\%) \quad [3] (2)$$

Kde  $x_m$  je naměřená hodnota veličiny,  $x_t$  je skutečná hodnota vstupní veličiny a  $x_{FSO}$  označuje maximální měřicí rozsah senzoru.

**Účinnost** – je parametr indikující, jak efektivně daný senzor pracuje z hlediska výkonu.

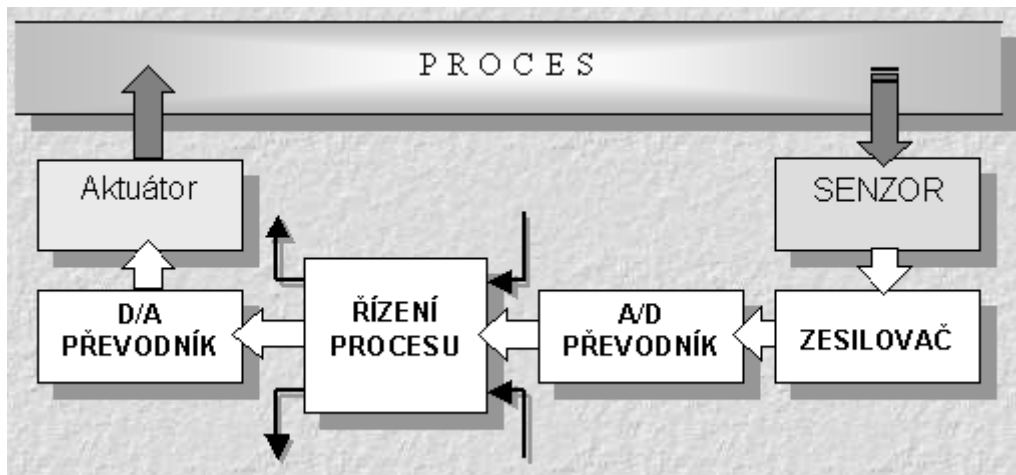
$$\eta = 100 \cdot \frac{P_{výst}}{P_{vst} + P_z} \quad (3)$$

Kde  $P_{výst}$  je výstupní výkon,  $P_{vst}$  je vstupní výkon (spotřebovaný výkon) a  $P_z$  zahrnuje ztrátový výkon.

**Časové odezvy senzorů** – výstupní veličina se v závislosti na vstupní veličině mění, tato změna ovšem není skoková, tzn. že při skokové změně vstupní veličiny nedochází k okamžité změně výstupní veličiny. Můžou za to setrvačné děje. Tvar odezvy se u jednotlivých senzorů může lišit.

## 1.2 Vyhodnocovací řetězec senzoru

Měřicí řetězec (obr. 2) se skládá z několika členů, aby bylo možné co neefektivněji vyhodnotit působící veličinu. Senzor bývá zpravidla prvním blokem v celém měřicím řetězci [5]. Jak již bylo popsáno, přeměňuje působící např. fyzikální veličinu na elektrický signál. Výstupní signál senzoru poté bývá zesílen a filtrován, může se využívat více přepínání pro více vstupních veličin, linearizace statické charakteristiky, frekvenční omezení signálu a také modulace signálu. Dále následuje zpracování buď analogovými obvody, nebo mnohem častěji pomocí A/D převodníků. Následuje řízení procesu pomocí programu v mikrokontroleru nebo pomocí PC. To umožňuje matematickou manipulaci se signálem (sčítání, dělení, integrace, derivace atd.) a další operace týkající se signal procesingu jako jsou kalibrace, autodiagnostika, přepínání měřicích rozsahů, frekvenční analýza a mnoho dalšího. Následuje převod signálu do analogové formy, který řídí aktuátor, jenž ovlivňuje prvotně měřený proces. Výstup z měřicího rozhraní může být pomocí komunikačního rozhraní RS – 232 nebo RS – 485. U RS – 232 je využito minimálně tří signálových vodičů při přenosové rychlosti 20 kb/s do vzdálenosti 15 m. Rozhraní RS – 485 je mnohem výhodnější protože využívá kroucenou stíněnou dvojlinku na vzdálenost až 1200 m při rychlosti 20 Mb/s.



Obr. 2 Měřicí řetězec senzoru [5]

### Naprogramování měřicích systémů

Celý proces vždy bývá řízen předem danou logikou, nejčastěji programem. Tyto programy lze podle vzniku rozdělit do tří skupin.

- a) Programy vzniklé na úrovni vyšších programovacích jazyků
  - obvykle jde o jazyky C a C++
  - výhoda: optimalizace paměti a běhu programu
  - nevýhoda: vyšší pracnost
- b) Programy vzniklé za pomoci grafických vývojových prostředí
  - Výhody: menší náročnost, podprogramy ve formě ikon
  - Nevýhody: větší výpočetní náročnost, pomalejší běh programu
- c) Programy vzniklé za využití možností 1 a 2
  - kombinuje výhody obou možností a zároveň odstraňuje jejich nevýhody

### Inteligentní senzory

Velká řada dnešních senzorů lze klasifikovat jako tzv. inteligentní senzory (smart senzory). Základem je citlivá část senzoru, která převádí vstupní veličinu na el. signál. V senzoru jsou dále integrované obvody měřicího řetězce. Tato mikroelektronická část, je ovšem od citlivé části oddělena, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování (jde tedy převážně o technologické důvody). Velká část senzorů se během automatizovaného měření zapojuje přes inteligentní sensorové moduly.

#### Základní charakter inteligentního senzoru:

- piny pro obousměrnou komunikaci
- zabudovaná autodiagnostika a autokalibrace
- přepínání měřicích rozsahů
- zabudovaná korekce chyb (diferenční metoda, linearizace..)
- analogová a digitální část
- Výstupy – digitální, analogové nebo jejich kombinace

## 1.3 Akcelerometry

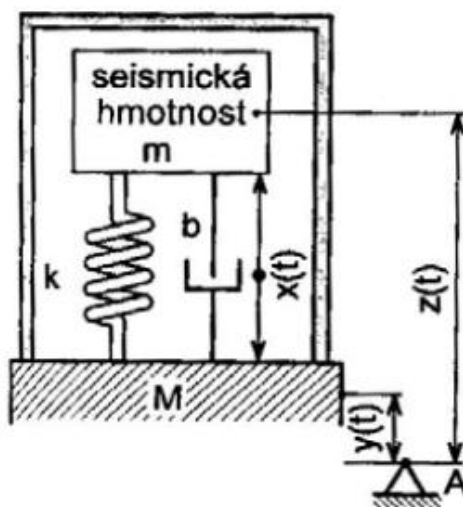
Akcelerometry se mohou využívat nejen pro měření náklonu, ale i pro měření pohybu a rychlosti, vibrací, ESP atd.. Akcelerometry jsou senzory, které mají v dnešním světě široké uplatnění. Akční veličina působící na akcelerometry je zrychlení. Zrychlení dělíme na statické a dynamické.

**Statické zrychlení** – senzor měří sílu, která vznikne v důsledku působení zemské gravitace

**Dynamické zrychlení** – senzor měří sílu vzniklou následkem změny rychlosti pohybujícího se senzoru

### Základní princip konstrukce

Obecný princip lze vysvětlit na obr. 3. Základ tvoří seismická hmota  $m$ , pružina  $k$  o definované tuhosti, základna  $M$  a viskózní tlumení  $b$ . Základna je provedena v pevném spojení s měřeným objektem, k ní je za pomoci pružiny připojena seismická hmota, jejíž výchylka vůči základně je vyhodnocována a tlumena pomocí viskózního tlumiče. Jde tedy o systém, u něž zátěžová síla vykonává práci v obvodu harmonického tlumeného oscilátoru.



Obr. 3 Obecná konstrukce senzoru [6]

Pro signály proměnné v čase lze složky souřadnic popsat vztahem 4.

$$z(t) = x(t) + y(t) \quad (4)$$

Bližší matematický popis poskytuje zdroj [2].

Jak již bylo uvedeno, akcelerometr obsahuje seismickou hmotu, která kmitá vlivem působení zrychlení, chování senzoru pak lze rozdělit do dvou případů podle

průběhu fázové a frekvenční charakteristiky. Rozhodujícím bodem je rezonanční kmitočet  $\omega_0$ .

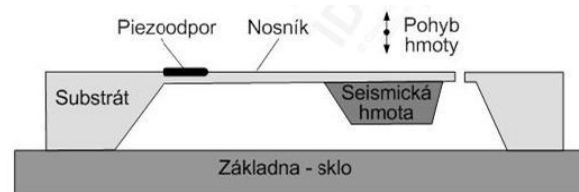
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5)$$

- $\omega \ll \omega_0$  - amplituda na výstupu je přímo úměrná velikosti měřeného zrychlení (princip dnešních akcelerometrů)
- $\omega \gg \omega_0$  - měří se dráha pohybu

Akcelerometry se dále dají rozdělit podle fyzikálního principu činnosti.

### 1.3.1 Piezodporové akcelerometry

Tento typ akcelerometru pracuje na základě pohybující se seismické hmoty na volném konci vetknutého nosníku. Pohyb hmoty je přes nosník přenášen do místa vetknutí, na kterém je umístěn tenzometr. Dochází tak ke zkracování nebo prodlužování odp. dráhy, což má za následek ohmickou změnu odporu. Tato změna odpovídá výchylce seismické hmoty. Vyhodnocování se provádí pomocí můstkového zapojení, kdy do něj s výhodou můžeme zapojit dva tenzometry, jeden z nich se stlačuje a druhý roztahuje. Sníží se tak vliv teploty a díky můstku využíváme čtyřvodičové zapojení, čímž snížíme vliv odporu u přírodních vodičů. Piezorezistivní akcelerometry dokážou měřit i neměnné zrychlení tzn, frekvenci změn od 0 Hz. Uspořádání konstrukce popisuje obr. 4.



Obr. 4 Konstrukce tenzometrického akcelerometru [6]

### 1.3.2 Piezoelektrické akcelerometry

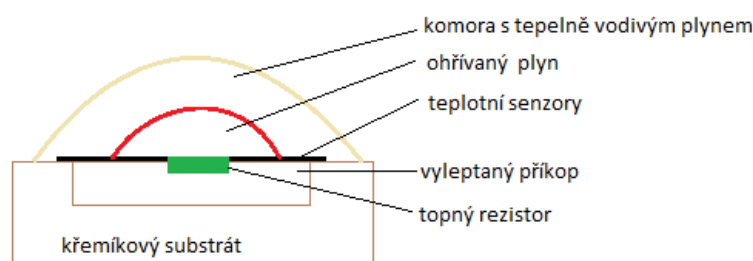
U tohoto principu se využívá piezoelektrického jevu. Při působení zrychlení dochází k pohybu seismické hmoty, čímž dojde k deformaci piezokrystalu. Ten je vyrobený buď jako  $\text{SiO}_2$  nebo  $\text{BaTiO}_3$ [6]. Díky tomu vzniká na povrchu krystalu el. náboj  $Q$ . Tento náboj je poté odváděn pomocí výstupních elektrod, jimiž je piezokrystal opatřen. Výhody této konstrukce spočívají v možnosti měření. Mezi hlavní výhody patří odolnost proti rušivým vlivům. Díky jednoduché konstrukci se používají jednodušší vyhodnocovací obvody. Má vysokou vlastní rezonanční frekvenci. Dokáže měřit velké hodnoty zrychlení. Hlavní nevýhody jsou nemožnost měření statického zrychlení (konstantního zrychlení) a teplotní závislost vyvolaná pyroelektrickým jevem. Celý princip je uveden na obr. 5.



Obr. 5 Konstrukce piezoelektrického akcelerometru

### 1.3.3 Tepelné akcelerometry

Využívá fyzikální princip, jaký se používá u kalorimetrických průtokoměrů. Princip konstrukce spočívá v umístění topného rezistoru na nosník v blízkosti plynné komory. Teplo od tohoto topného elementu prostupuje komorou s tepelně vodivým plynem tak, aby byla konstantní. Pokud na seismickou hmotu nepůsobí zrychlení je mezi topným elementem a plynem v komoře tepelná rovnováha. Teplota je měřena pomocí termočlánků v definovaných intervalech od vyhřívacího rezistoru. Pokud dojde k působení zrychlení, změní se množství tepla v komoře vedeného od top. odporu (se vzrůstající vzdáleností teplota klesá). Tato změna je vyhodnocena právě za pomoci termočlánků a je úměrná funkci vzdálenosti. Mezi hlavní výhody tohoto uspořádání patří spolehlivost a možnost měření velkých hodnot zrychlení v řádech desítek tisíc g, což je mimo jiné způsobeno velkým teplotním pracovním rozsahem. Citlivost senzoru ale může být ovlivněna pomocí okolní teploty. To se musí kompenzovat pomocí dalšího teplotního čidla, které může být implementováno přímo na jednom čipu se senzorem. Uspořádání je vykresleno na obr. 6.



Obr. 6 Konstrukce tepelného akcelerometru

### 1.3.4 Kapacitní akcelerometry

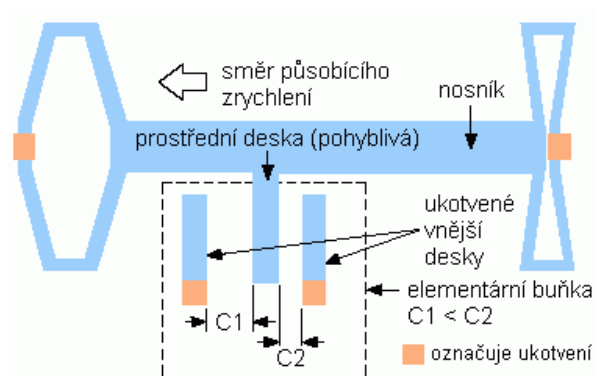
V současné době je tento princip u akcelerometrů nejrozšířenější. Je založen na funkci deskového kondenzátoru. Kde velikost kapacity  $C$  závisí na ploše desek



kondenzátoru  $S$ , vzdálenosti mezi nimi  $d$  a permitivitě dielektrika  $\epsilon$  ( $\epsilon_0\epsilon_r$ ). Tuto závislost lze popsat vztahem 6.

$$C = \epsilon_0\epsilon_r \frac{S}{d} \quad (6)$$

Princip činnosti je uveden na obr. 7. Základ tvoří seismická hmota, na které jsou vyvedeny nosníky, které jsou po stranách opatřeny deskami kondenzátoru, ty tvoří celek s ukotveným vnějšími deskami kondenzátoru umístěnými na pevných nosnicích. Při působení zrychlení se jedna kapacita zvětšuje a druhá zmenšuje. Toto uspořádání je také nazýváno jako diferenciální a je využíváno ve složitějších hřebenových strukturách. Což je v podstatě paralelní zapojení desítek až stovek diferenciálních kapacit. Jedná se o strukturu vyrobenou technologií MEMS. Hřebenová struktura je rozdělena do měřicí a testovací části. Testovací část je používána pro SelfTest, kdy při aktivaci dojde k působení elektrostatických sil a seismická hmota je tak definovaně vychýlena, čímž se mění odezva senzoru. V současné době se vyrábějí 1D, 2D a 3D akcelerometry, ty se liší vlastnostmi a tím pádem i cenou.



Obr. 7 Konstrukce kapacitního akcelerometru [7]

Při vyhodnocování se tedy nejprve měří kapacita, k tomu se nejčastěji používají operační zesilovače v invertujícím zapojení.

### 1.3.5 Porovnání 1D, 2D, 3D

Každý typ akcelerometru může měřit akceleraci v několika osách kartézského souřadného systému, nejrozšířenější jsou dnes 3D akcelerometry, to neznamená, že by 1D a 2D akcelerometry neměli být přestány používány. Je to opodstatněno tím, že v určitých směrech vykazují lepší parametry.

**1D** – akcelerace je snímána pouze v jednom směru, ten volíme podle instalace senzoru

**2D** – akcelerace je snímána ve dvou směrech, zpravidla jsou to směry X a Y, nebo X a Z

**3D** – akcelerace měřená současně ve všech osách X, Y, Z

### Měřicí rozsahy lze rozdělit do tří skupin podle velikosti g:

- Nízké – vhodné pro měření akcelerace několik jednotek g
- Střední – akcelerace nepřekračující přibližně desítky g
- Vysoké – určeno pro nejnáročnější aplikace, akcelerace může být měřena až do několika stovek g

Mezi hlavní přednosti 1D akcelerometrů patří jejich schopnost měřit vysoké g. Mají jednodušší konstrukci a vyšší pracovní teplotní rozsah. Oproti tomu u senzorů pro 2D lze buď využít přímo 2D akcelerometr, nebo dva 1D akcelerometry, které jsou vůči sobě vzájemně pootočený o 90 °. Poslední možnost je využít 3D akcelerometr a sledovat výstupy ze dvou os. Pro 2D se každý kanál zpracovává samostatně nastavené parametry senzoru např. citlivost je ale pro oba kanály totožná. U 3D je princip konstrukce stejný, jak již bylo popsáno dříve, jejich použití je ale určeno hlavně pro nízké úrovně g.

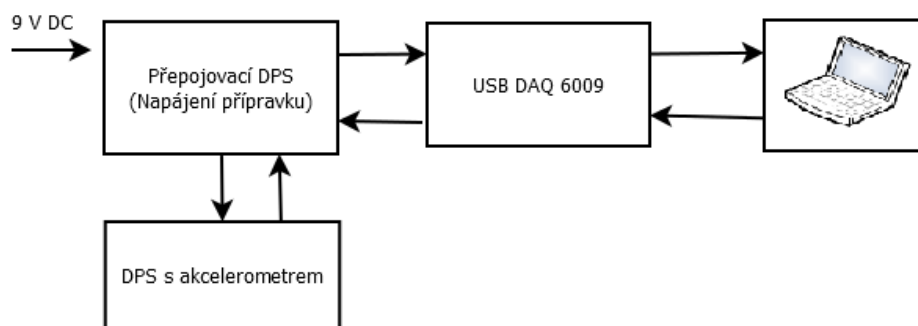
Výrobci akcelerometrů je celá řada vyrábějící senzory dle uvedených principů. Souhrn většiny výrobců je uveden v tabulce 2.

Tabulka 2 Výrobci akcelerometrů

Výrobci
<b>Freescall Semiconductor</b>
<b>Analog Devices</b>
<b>ST Microelectronics</b>
<b>Bosch</b>
<b>Honeywell</b>
<b>Dytran Instruments</b>
<b>PCB Piezotronics</b>
<b>B&amp;K</b>
<b>Panasonic Matsushita</b>

## 2 Návrh a realizace hardwaru

### 2.1 Konstrukční bloky



Obr. 8 Blokové zapojení přípravku

Hardwarové provedení této práce je uzpůsobeno do čtyř dílčích bloků a jednoho řídicího bloku a je uvedeno na obr. 8. Prvním blokem je mechanická konstrukce, na níž lze demonstrovat funkci výsledného náklonoměru v rozmezí hodnot  $0^\circ$  až  $180^\circ$ , nebo  $0^\circ$  až  $-180^\circ$  (neboli  $0^\circ$  až  $360^\circ$ ). Druhým blokem je DPS na níž je osazen níže popsaný akcelerometr MMA7361LC, tato DPS je umístěna na mechanické konstrukci. Třetí částí je přepojovací deska zajišťující napájení senzoru a přepojování signálu mezi bloky 2 a 4. Propojení mezi druhým a třetím blokem je provedeno pomocí plochého vícežilového vodiče a spojení mezi třetím a čtvrtým blokem je provedeno pomocí dílčích vodičů napojených do svorkovnic. Signály, které jsou výstupní ze senzoru a jsou zpracovávány čtvrtým blokem, jsou analogové, naopak signály kterými senzor ovládáme z PC, jsou digitální. Čtvrtým blokem je využití USB DAQ od společnosti National Instruments, konkrétně model NI USB – 6009 připojený k PC pomocí rozhraní USB 2.0. Řídicí blok je zde zastoupen ve formě osobního počítače s vytvořenou měřicí aplikací popsanou v kapitole 3. Všechny tyto celky dohromady tvoří měřicí řetězec senzoru popsán na obrázku 2. Do části procesu značící proces, ve které působí snímaná akční veličina, je tedy i zapojena obsluha tohoto zařízení, která skrz PC získává zpětnou vazbu o stavu měřeného procesu. Jednotlivé bloky jsou blíže popsány v kapitolách 2.4.1 až 2.4.4.

### 2.1.1 Akcelerometr MMA7361LC

Pro svou bakalářskou práci jsem zvolil akcelerometr MMA7361LC [8] od společnosti Freescale Semiconductor. Jedná se o tříosý akcelerometr, pracující na kapacitním principu. Je vyroben pomocí MEMS technologie. Citlivost měření lze volit ve dvou úrovních. Senzor je umístěn v pouzdře LGA – 14. Což značí, že má 14 pinů. Jeho rozměry jsou 3 mm x 5 mm x 1 mm.

#### **Možnosti typického použití**

- Robotika – senzor pohybu
- Navigace – kompenzace náklonu u elektronického kompasu
- PDA – přetočení textu
- Krokoměr – senzor pohybu
- Mobilní telefon – překlopení textu, stabilizace obrazu, e-kompas
- HDD – ochrana proti náhlému pádu
- 3D hry – snímání náklonu a pohybu

#### **Maximální hodnoty**

Tabulka 3 Mezní hodnoty

Veličina	Hodnota
Maximální zrychlení ve všech osách	5000 g
Napájecí napětí	- 0,3 V až 3,6 V
Teplotní rozsah zařízení	- 40 °C až 125 °C

Toto zařízení je citlivé na elektrostatický výboj, jde tedy o zařízení typu ESD. Uvnitř čipu je integrován ochranný obvod proti výboji, jehož maximální úroveň je stanovena na 2000 V. Po překročení této hodnoty může dojít k poškození nebo destrukci akcelerometru.

### **Charakteristické parametry**

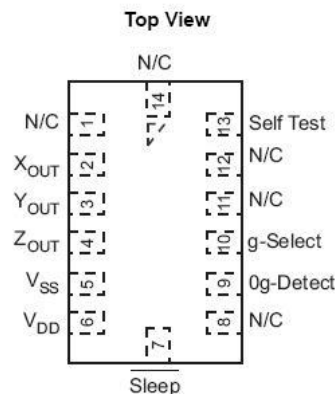
- Doporučené napájecí napětí 3,3 V
- Spotřeba proudu 400  $\mu$ A
- Spotřeba proudu v režimu spánku 3  $\mu$ A
- Citlivosti 800  $\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$  @  $\pm 1,5$  g ; 206  $\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$  @  $\pm 6$  g
- Doba odezvy při rychlém startu 0,5 ms
- Výkonový spektrální hustota 350  $\mu\text{g}/\text{Hz}$
- Nelinearita  $\pm 1$  % FSO
- Doba odezvy Selftestu 2 ms
- Vnitřní vzorkovací 11 kHz

#### 2.1.1.1 Popis pinů

Jednotlivé vývody jsou vyobrazeny na následujícím obrázku č. 9.

Vývody označené jako N/C jsou nepřipojeny.

- nepřipojené piny – 1, 8, 11, 12, 14
- vstupní piny – 7, 10, 13,
- výstupní piny – 2, 3, 4, 9
- napájecí piny – 5, 6



Obr. 9 Popis vývodů [8]

### Pin 2 – X<sub>OUT</sub>, Pin 3 – Y<sub>out</sub>, Pin 4 - Z<sub>out</sub>

Tyto vývody poskytují na svém výstupu spojitý analogový signál.

### Pin 7 – Sleep

Tento pin je výhodný pro aplikace napájené z baterie. Pokud je tento pin aktivní, výstupní piny jsou vypnuty. Tento pin je aktivní v momentě, kdy je na něj přiveden signál o úrovni logické nuly. Napájecí proud zároveň klesne na 3  $\mu\text{A}$  při současném nastavení g-Select na 1,5 g. V momentě přivedení log. 1 na pin 7 senzor se opět vrátí do běžného režimu.

### Pin 9 – 0g-Detect

Když jsou všechny tři osy v úrovni 0 g poskytuje tento pin na výstupu signál log.1. Těto možnosti se požívá, zejména pokud je akcelerometr využit jako ochrana před volným pádem.

### Pin 10 – g-Select

Akcelerometr může pracovat ve dvou citlivostních režimech, podle toho jaká logická úroveň na tento pin je připojena. Změna citlivosti se může provádět během činnosti. Přehled citlivostí je uveden v následující tabulce 4:

Tabulka 4 Volba citlivosti

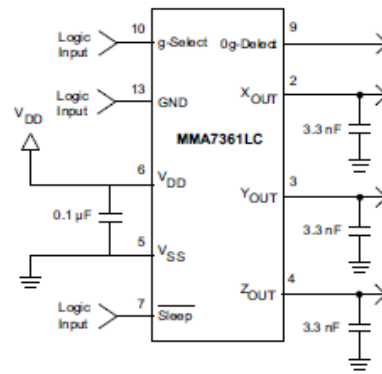
g - Select	g - Range	Citlivost
0	1,5 g	800 $\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$
1	6 g	206 $\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$

### Pin 13 – Self Test

Tato funkce je používána pro opětovné ověření funkčnosti mechanické a elektrické funkčnosti senzoru. Tento pin je spíše využit v automatizovaných aplikacích, kde má být zaručena dlouhá životnost výrobku, např. HDD u PC. Při přetočení senzoru a připojení log. 1 k pinu 13 se změní úroveň výstupního napětí v ose Z o 1 g, zatímco v ostatních směrech X a Y se hodnota výst. signálu takřka nezmění.

## 2.1.1.2 Zapojení do obvodu

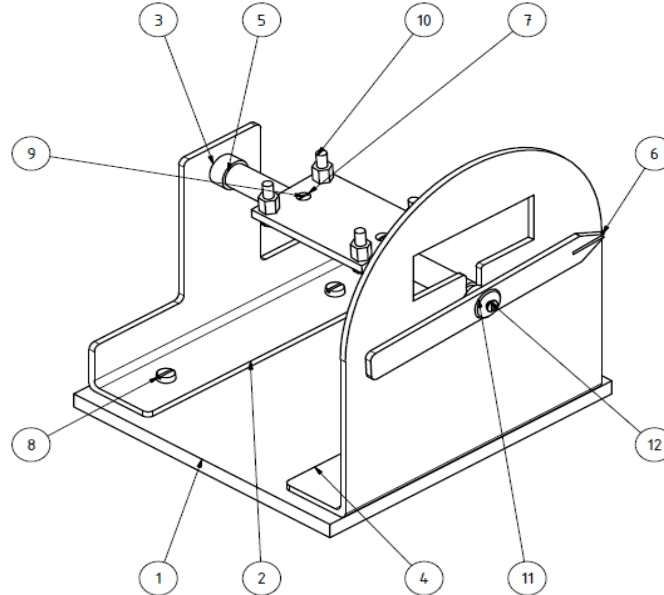
Na obrázku č. 10 je znázorněno doporučené zapojení do obvodu. Mezi napájecí napětí a zem je doporučen kondenzátor o hodnotě 0,1  $\mu\text{F}$  z důvodu oddělení napájecího zdroje. Na výstupních svorkách os X, Y, Z je pro potlačení šumu doporučeno použít 3,3 nF kondenzátory. Tento šum je způsoben spínanými kondenzátory ve filtračním obvodu.



Obr. 10 Doporučené zapojení [8]

## 2.1.2 Mechanická konstrukce

Prvním blokem jak již bylo uvedeno, je mechanická konstrukce. Její návrh byl proveden v programu Autodesk Inventor Professional. Nejprve byl pro jednotlivé součásti vytvořen 3D návrh jejich grafické podoby, poté z nich byla vytvořena 3D sestava, na které se ověřila její funkčnost a odpovídající velikosti rozměrů jednotlivých součástí. Po této kontrole byly vytvořeny dílčí výrobní výkresy. Vizuální podoba je patrná na obr. 11. Na čelní straně je ještě přidán plastový úhloměr.



Obr. 11 Mechanická konstrukce

## **Popis jednotlivých částí**

### a) Základní deska (pozice 1)

Má celkové rozměry 100 x 110 mm a tloušťku 5 mm. V rozích má udělané závitové otvory M3. Dokumentace je součástí přílohy číslo 1.

### b) Zadní stěna (pozice 2)

Je pomocí šroubů přichycena na základní desku a obsahuje kluzné ložisko z mosazi, s vnitřním průměrem 7 mm. Do něj je vsazena otočná hřídel. Výkres je obsahem přílohy číslo 2.

### c) Kluzné ložisko (pozice 3)

V zadní stěně je zasazeno kluzné ložisko z mosazi s průměrem 7 mm. Díky tomu bude sníženo tření v místě uložení hřídele. Jeho rozměry jsou popsány v příloze číslo 3.

### d) Úhломěrová stěna (pozice 4)

Tato stěna je opět přišroubována pomocí šroubu o závitě M3 k základní desce a je na ní přišroubován plastový úhломěr se stupnicí 360 °. Obsahuje také půlkulatý otvor pro uchycení druhého konce otočné hřídele. Bližší popis této součásti je uveden v příloze číslo 4.

### e) Hřídel (pozice 5)

Celková délka součásti činí 107 mm. Průměr nesoustružené části je 8 mm. V místech uchycení je hřídel zbroušená na jedné straně 7 mm a na druhé 6 mm. V prostřední části, je vytvořena malá ploška pro dosedání destičky s distančními sloupky. Na části, která přesahuje před úhломěrnou stěnu je navíc hřídel mírně seříznuta namísto čistého kruhu, kvůli osazení rysky. Dokumentace této části je v příloze č. 5

### f) Ryska (pozice 6)

Slouží k indikaci úhlu, o který je natočena DPS s akcelerometrem. Je opatřena ryskou s červenou barvou. Dokumentace je uvedena jako příloha č. 6.

### g) Deska (pozice 7)

Tato deska o rozměrech 28x43 mm je opatřena otvory pro uchycení distančních sloupků, na které je posazena deska plošného spoje s akcelerometrem. Zespoda má vyfrézovanou stejně velkou drážku jako je na hřídeli, po dosednutí k ní je přidělána šroubem M2 se zápusťnou hlavou. Podrobnější popis je opět uveden jako příloha č. 7.

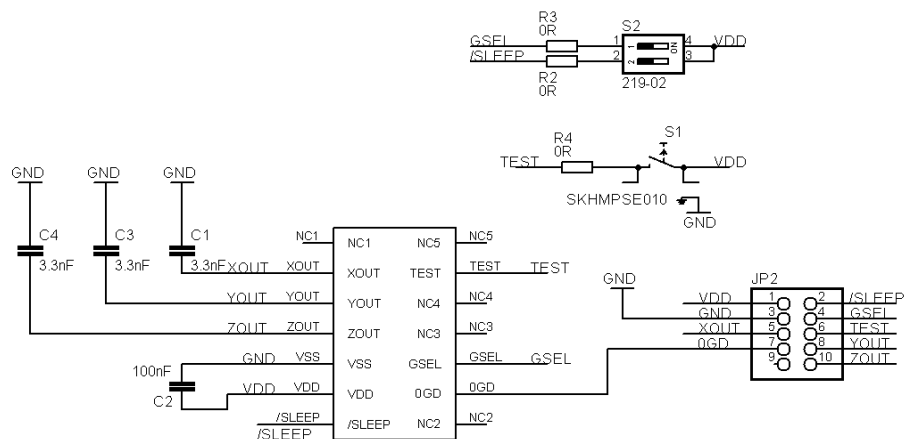
## h) Držák (pozice 11)

Pro stoprocentní zajištění rysky na hřídeli slouží kruhový přítlačný držák o průměru 10 mm a tloušťce 2 mm, kompletní výkres je k dispozici jako příloha č. 8.

Ve stojánku jsou dále použity šrouby M3x6 (pozice 8) a M2x6 (pozice 9, pozice 12). Distanční sloupky (pozice 10) mají závit M3 a jejich výška je 1 cm. Celý výkres sestavy podle výše uvedeného popisu z hlediska jednotlivých částí je uveden v příloze č. 9.

## 2.1.3 DPS s akcelerometrem

Pro osazení akcelerometru byla navržena oboustranná DPS o rozměrech 25 mm x 40 mm. V rozích jsou vyvrtány díry pro distanční sloupky M3, aby DPS mohla být upevněna na desku (pozice 1 v sestavě) a byla tak přímo na středu otáčení hřídele. Tento blok zajišťuje přeměnu snímané veličiny na el. signál, zesílení signálu a filtraci. Frekvenční omezení signálu a jeho modulaci. Všechny tyto funkce jsou totiž integrovány přímo na jednom čipu. Deska je navržena způsobem pro možnost manuálního ovládání, nebo pro obsluhu pomocí PC. Lze zde volit ON/OFF (SLEEP) stav, volba citlivosti ON/OFF (gSelect) a ověření funkčnosti pomocí SelfTestu (S1). Pokud je Dip switch ve volbě OFF, je zvolena hodnota logické nuly a naopak. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. č. 12.



Obr. 12 Schéma zapojení

Montážní schéma a celý návrh DPS včetně finální podoby uvádím dále v přílohách č. 10-13. Při konstrukci jsem původně zamýšlel místo odporů 0 R použít hodnotu 62 k $\Omega$ . Z důvodu ochrany, a aby byla změna napětí plynulejší a nedocházelo při přepnutí k překmitům signálu. Při měření jsem totiž zjistil, že by hodnoty proudu měla v dané větvi být přibližně 53  $\mu$ A. Proto jsem volil hodnotu 62 k $\Omega$ . Nicméně toto řešení fungovalo jen částečně a nešlo ovládat pomocí dříve popsaných logických úrovní signálu všechny funkce senzoru ale jen některé, protože docházelo ke změně proudu v jednotlivých větvích. Proto jsem zvolil, jako finální hodnotu 0 R, a pomocí měření

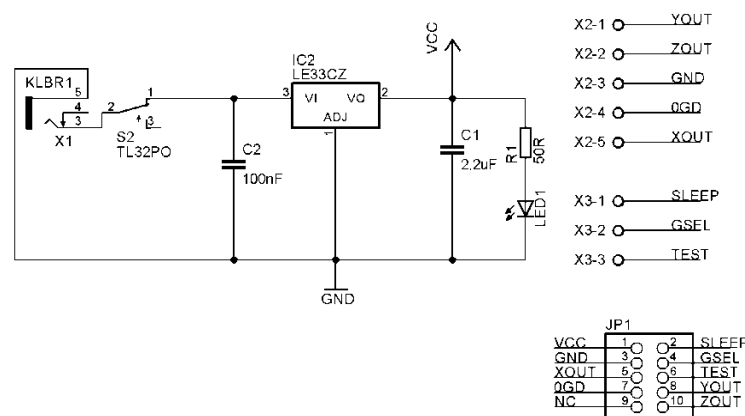


jsem odzkoušel plnou funkčnost zapojení (při další výrobě nemusí být rezistor 0 R přítomen, proto nebude započítán do finálního rozpočtu), které po této změně fungovalo dle předpokladů. V příloze č. 14 a č 15 jsou k vidění momenty přepnutí logických úrovní signálu z jednoho z kontrolních měření. Pro 62 k $\Omega$  trvalo přepnutí 16,6  $\mu$ s, zatímco pro případ kdy je použit rezistor 0  $\Omega$  je změřená doba 256 ns.

## 2.1.4 Přepojovací DPS

Tato DPS je, jak již bylo uvedeno třetím konstrukčním blokem. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 13. Plní tři základní funkce. Těmito funkcemi jsou napájení, signalizace zapnutí a přepojování signálů mezi DPS s akcelerometrem a USB DAQ 6009. Pro napájení je použita 9V baterie GP Greencel 6F22, napětí je poté spínáno dvoustavovým páčkovým přepínačem. Napětí je poté zpracováno stabilizátorem LE33CZ na 3,3 V, což je doporučená hodnota pro napájení akcelerometru. U stabilizátoru je mezi vstupním pinem a zemí zapojen kondenzátor 100 nF a mezi výstupním pinem a zemí 2,2  $\mu$ F. Maximální vstupní napětí může být 20V aby nedošlo k destrukci součástky. Musí se zde počítat s  $U_{drop} = 0,2$  V, o tuto hodnotu napětí musí být připojený zdroj minimálně větší.

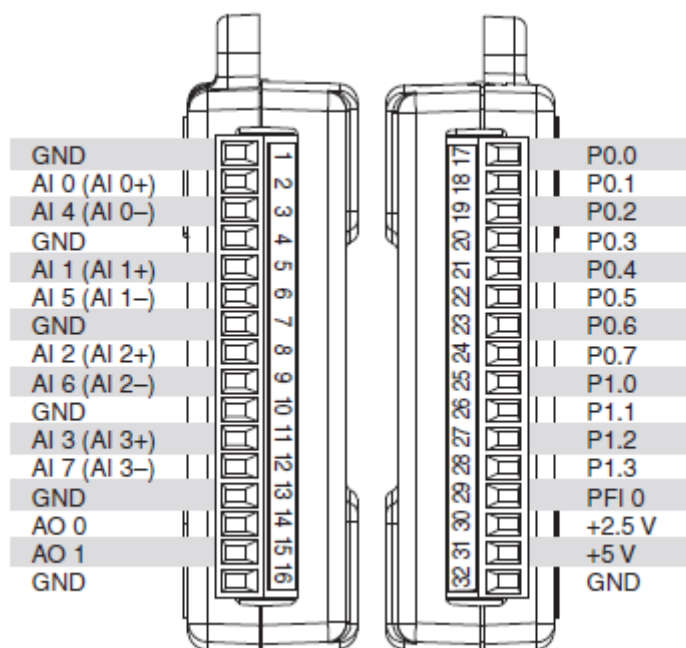
Další prvek je signalizační led dioda červené barvy indikující sepnutý stav. S doporučeným propustným  $U_F = 2,3$  V a  $I_F = 20$  mA. Její dominantní vlnová délka je stanovena hodnotou 650 nm. Poslední části jsou zde prvky pro přepojení signálů Xout, Yout, Zout a logické signály pro výběr citlivosti, testování funkčnosti senzoru a signál pro aktivaci sleep módu. Tato deska je propojena s deskou akcelerometru pomocí 10-ti žilového plochého vodiče. Vodiče pro připojení k USB DAQ jsou připojeny na jedné straně do šroubovacích svorkovnic a na druhé straně do násuvných svorkovnic s roztečí 3,81 mm, což je rozteč pro vývody DAQU. Pokud jsou jednotlivé bloky spolu spojeny do jednoho celku a řízeny pomocí PC s vytvořenou aplikací, která je popsána v následující kapitole, musí být piny DIP switche na DPS s akcelerometrem v poloze OFF, jinak by docházelo k nesprávným úrovním řídicích signálů. Návrh plošného spoje a schéma pro jeho osazení je uvedeno dále v přílohách jako č. 16 a č. 17.



Obr. 13 Zapojení přepojovací DPS

## 2.1.5 NI USB DAQ 6009

Jedná se o čtvrtý blok tohoto zapojení a jde o multifunkční měřicí kartu připojenou k PC pomocí USB 2.0 [9]. Zde je použita jako A/D převodník odezev senzoru a k jeho ovládaní pomocí výstupních logických úrovní. Celé jeho řízení probíhá pomocí vytvořené aplikace v PC. Na obr. č. 14 je uveden popis připojení jednotlivých pinů.



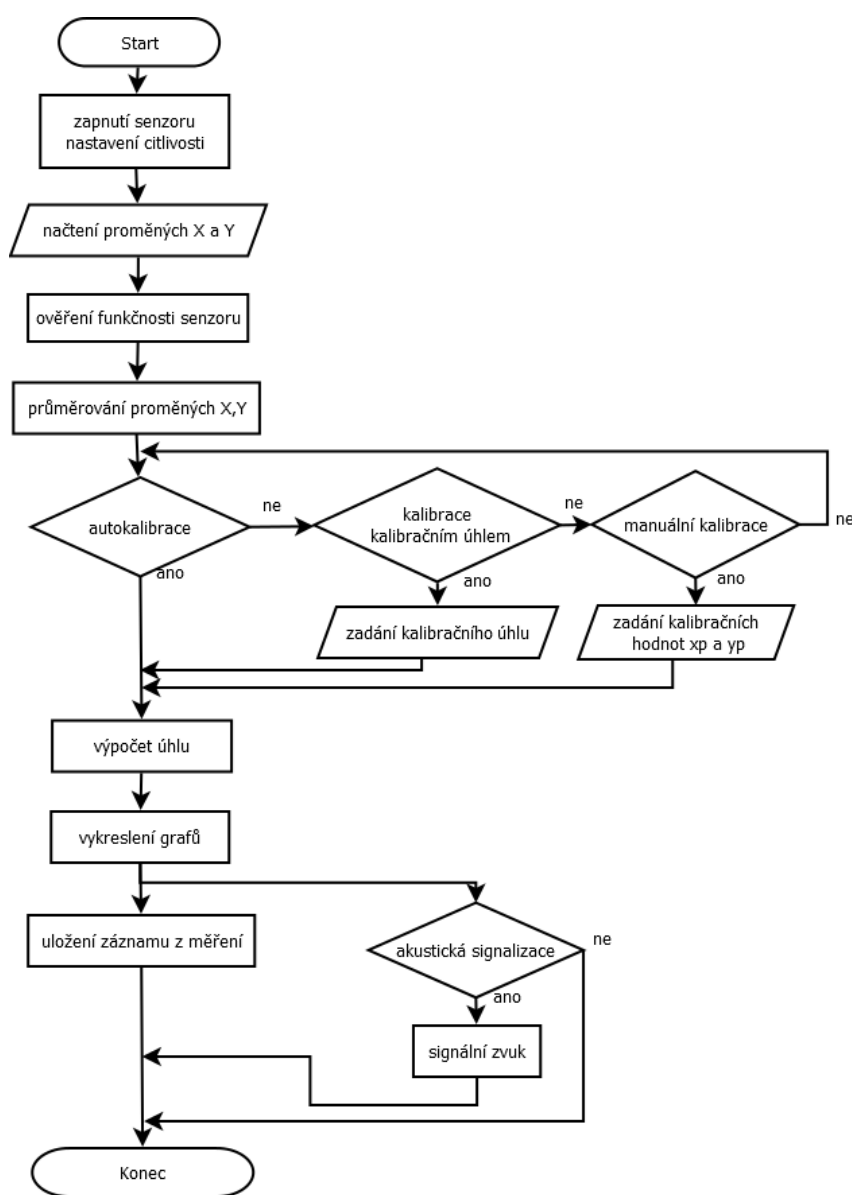
Obr. 14 Popis pinů NI USB DAQ 6009 [9]

Vstupy 1 – 16 se nacházejí po levé straně zařízení a 17 -32 po pravé straně. Zařízení obsahuje 8 analogových vstupů ( značeny AI 0 – AI 7), dva analogové výstupy ( značeny AO 0 a AO 1), 12 obousměrných číslicových vstupně/výstupních svorek (P0.0 – P1.1) a jeden čítač 32 bitů (PFI 0).

Analogové vstupy lze zapojit, buď jako symetrické kanály tzn. využijeme AI + a AI-. Další variantou je zapojit je jako nesymetrické vstupy proti společné zemi. Možnost nesymetrického zapojení je využita i v této práci. Rozsah vstupního napětí může být při této volbě max.  $\pm 10V$ . Pro výstup z osy X jsou využity piny 1 a 2, pro výstup z osy Z jsou využity piny 4 a 5. Rozlišení pro nesymetrické vstupy je 13 bitů. V této práci jsou dále využity 3 číslicové výstupy (P0.0 –P0.2) sloužící pro aktivaci senzoru, volbu citlivosti a pro spuštění SelfTestu pomocí úrovní logické 0 a 1.. Vzorkovací kmitočet může být nastavován rozdílně pro jednotlivé kanály. Maximální hodnota, kterou lze zvolit je 48 kHz. V rámci A/D převodu je využita stejná vzorkovací frekvence pro kanály X a Z a to 11 kHz, což je doporučená hodnota, protože se shoduje s vnitřní vzorkovací frekvencí senzoru. Je tak dodržen ShanonKotelnikov theorem a nebude docházet k aliasingu.

### 3 Návrh řídicího software

Pro tvorbu řídicí aplikace byl použit produkt od společnosti National Instruments, konkrétně program LabVIEW 2011. Jedná se o variantu programu popsanou již dříve v kapitole **1.2 Vyhodnocovací řetězec senzoru**, v části zabývající se, jakými programy lze tvořit řídicí aplikace. Labview lze tedy klasifikovat do skupiny C. Pro tvorbu aplikace byl využit zdroj [10]. Program má dvě hlavní okna pro tvorbu programu. První se nazývá Block Diagram a slouží pro definování vlastního algoritmu programu. Jednotlivé prvky, které se zde využívají, jsou umístěné v paletě *Functions*. Druhé okno je označeno jako Front Panel, kde jsou používané prvky dostupné z palety *Controls*. Právě Front panel je okno aplikace, které v konečné fázi uživatel používá. Vývojový diagram programu je znázorněn na obrázku č. 15.



Obr. 15 Vývojový diagram programu

## **Zapnutí a nastavení senzoru**

Zapnutí a ovládání senzorů probíhá pomocí tří přepínatelných switchů. U Front panelu jsou sdruženy v sekci ovládání senzoru. Tyto switche dávají odezvu ve formě true nebo false. Jsou pojmenovány aktivace senzoru, citlivost, Self test. Pokud má switch na výstupu hodnotu true je senzor aktivován, v opačném případě je uveden do sleep módu a k indikaci slouží kontrolka sleep. Pokud je u přepínače citlivost na výstupu hodnota true je zvolena hodnota  $206 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$ , nebo v opačném případě je vybrána hodnota  $800 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$ . Poslední ovládací tlačítko Self test po aktivaci změní barvu na žlutou a pokud je senzor současně otočen o  $180^\circ$  rozsvítí se kontrolka out, která hlídá odezvu signálu při Self testu senzoru, pokud senzor pracuje správně. V Block Diagram jsou switche citlivost a aktivace senzoru opatřeny podmínkou zajišťující vypnutí logických úrovní na USB DAQ v momentě ukončení činnosti aplikace. Signály jsou ovšem před vstupem do nástroje DAQ Assistant transformovány z polí do dynamických dat, které jsou následně sloučeny pomocí Merge signals a poté opět změněny do datového pole, připojené k již zmiňovanému DAQ Assistant. Zde jsou pak nastaveny jako výstupní logické piny P0.0 až P0.2 popsané v kapitole 2. 4. 4.

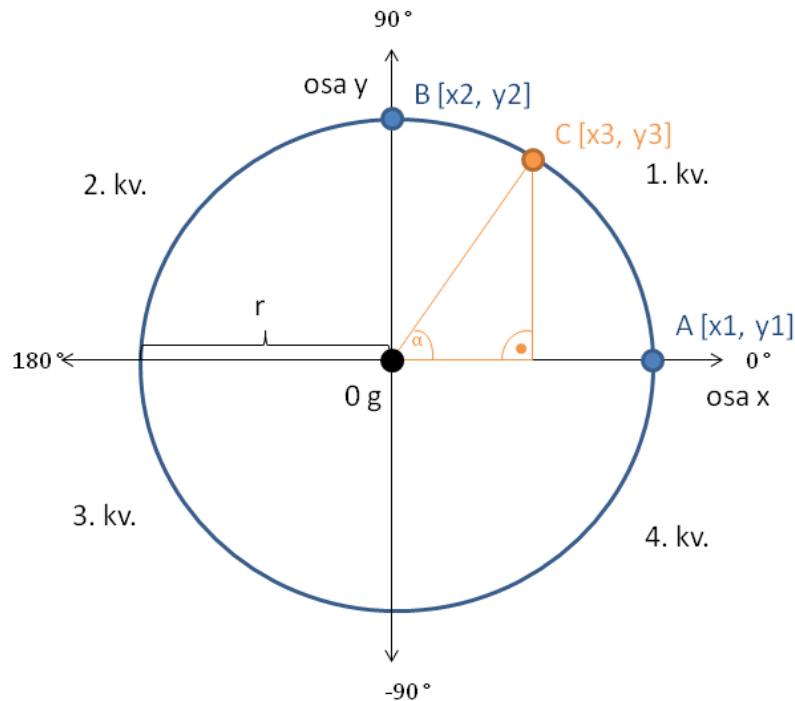
## **Načtení proměnných X a Y**

Načítání probíhá opět pomocí DAQ Assistant, kde jsou nastaveny piny č.1, 2, 4 a 5. Jsou nastaveny jako RSE s rozmezím vstupní úrovně napětí 0 - 3,5 V. Výstup z DAQ Assistant jsou opět dynamická data, která jsou rozdělena pomocí bloku Split Signals na data osy X a Z a konvertována do datové typu DBL s pohyblivou řadovou čárkou s dvojitou přesností a velikostí 64 bitů. Poté jsou data zprůměrována padesátkrát ve for cyklu. Osu Z a její data již v dalším zpracování označují jako osu Y vzhledem k zadání vytvořit sklonoměr  $\pm 180^\circ$ . Pohybujeme se tak již jen ve 2D rovině. Data po průměrování jsou značena jako xp a yp. Ukazatelé těchto hodnot jsou vyvedeny na Front panel.

## **Kalibrace senzoru**

V rámci tohoto programu jsou vytvořeny celkem tři druhy kalibrace. Těmi jsou autokalibrace, kalibrace pomocí kalibračního úhlu a manuální kalibrace. Ve Front panelu jsou dostupné na druhé záložce (Vykreslení náklonu, kalibrace). V rámci kontrolního měření vyšly odezvy signálů jako funkce sinus a cosinus. Naměřené hodnoty tvoří kruh v X, Y rovině o poloměru r. Bližší princip kalibrace popisuje obr. 16. Pro následný výpočet úhlu je zapotřebí získat kalibrační hodnoty svislé a vodorovné osy kruhu, k tomu poslouží hodnoty pro  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Pro nulový úhel náklonu je potřeba znát hodnotu osy X ( $x_1$  v bodě A) a při pravém úhlu je zapotřebí znát hodnotu osy Y ( $y_2$  v bodě B). Pokud je zvolena autokalibrace, tyto hodnoty jsou již uloženy v interních proměnných a není je zapotřebí nastavovat. Pro volbu kalibračního úhlu jsou využity opět předem uložené hodnoty s tím rozdílem, že následný vypočítaný úhel bude brát kalibrační úhel jako novou nulu a teprve od této hodnotě bude připočten reálně změřený úhel. V praxi to znamená, že bude-li kalibrační úhel např. nastaven

na hodnotu  $10^\circ$  a reálný náklon bude  $30^\circ$ , tak vypočítaný a vykreslený úhel bude  $20^\circ$ . Při volbě manuální kalibrace zadává uživatel hodnoty  $x_1$  do pole kalibrace v ose X a  $y_2$  do pole kalibrace v ose Y. V Block Diagram je přepínání mezi těmito možnostmi řešeno pomocí case struktury.



Obr. 16 Princip kalibrace a výpočtu úhlu

### Výpočet úhlu

Hlavní výpočet probíhá v bloku MathScript Node umístěný v Block Diagram. K názorné ukázce poslouží již známý obr. 16. První krok, který se zde provádí je výpočet korigovaných hodnot napětí v osách X a Y (od okamžitých hodnot např.  $[x_3, y_3]$  v bodě C je odečtena kalibrační hodnota pro každou osu). Následně jsou vypočteny jejich absolutní hodnoty. Pro výpočet zde budeme pracovat s pravoúhlým trojúhelníkem. Jak je uvedeno v kapitole 4 odpovídají odezvy signálů v osách X a Z funkci sinus a cosinus, lze využít poměr těchto funkcí, který vytvoří funkci tangens. Pomocí ní a z korigovaných absolutních hodnot je vypočítán úhel  $\alpha$  a převeden z radiánů na stupně.

V dalším kroku následuje rozhodovací proces, v jakém kvadrantu se ve skutečnosti měří. Podle zjištěného kvadrantu se k úhlu  $\alpha$  připočítávají nebo odečítají stupně. Princip je uveden v následujících bodech

- 1. kvadrant  

$$\text{uhel} = 90 - \alpha; \tag{7}$$

- 2. kvadrant  

$$\text{uhel} = \alpha + 90; \tag{8}$$

- 3. kvadrant  

$$\text{uhel}=(\text{alfa}+90)*(-1); \quad (9)$$
- 4. Kvadrant  

$$\text{uhel}=(90-\text{alfa})*(-1); \quad (10)$$

### **Vykreslení grafů**

Výsledná aplikace obsahuje celkem tři grafy ( 1x Waveform chart, 2 x Compass plot). Waveform chart vykresluje v čase aktuální hodnotu napětí v jednotlivých osách. Výsledný graf lze zoomovat a posouvat v čase, jde tak o přehledný histogram. Průběh xp je značen bílou barvou a yp barvou červenou. Další typ grafu Compass plot slouží ke znázornění náklonu roviny ve 2D prostoru. Jeden tento graf je vykreslován s pevnou amplitudou a druhý je vykreslován jako odmocnina kvadrátů napětí xp a yp.

### **Uložení záznamu z měření**

Ukládání záznamu probíhá do předem zvolené složky, kterou je možné zadat na záložce číslo 3 (Odezva signálů ze senzoru, Záznam z měření). Pokud by již soubor ve složce existoval, je uživatel vyzván, zda-li jej chce přepsat. Zápis probíhá do textového souboru. Zápis může být volen ve třech tvarech.

- 1. tvar  
 hodina:minuta:sekunda úhel
- 2. tvar  
 datum hodina:minuta:sekunda úhel
- 3. tvar  
 úhel

Jednotlivé položky zápisu jsou vždy odděleny středníkem. Přepínání těchto variant je v Block Diagram zajištěno pomocí Case struktury.

### **Akustická signalizace**

Pokud se změřený úhel liší o  $\pm 1^\circ$  oproti úhlům  $0^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$  nebo  $180^\circ$ . Dojde k akustické signalizaci. Toto upozornění může být aktivováno či deaktivováno tlačítkem zvukové signalizace na Front panelu, pokud je stisknuté, je signalizace aktivní, v opačném případě je deaktivována.

Cyklické opakování programu je zajištěno tím, že celý program se nachází ve while cyklu. Perioda opakování je pomocí časování nastavena na 500 ms. Program může být ukončen pomocí tlačítka stop, jež je připojené k podmínkovému terminálu, který zastaví běh programu, pokud hodnota na jeho vstupu je true.

V příloze č. 18 je vyfoceno okno Block Diagramu programu. Program může být spustitelný přímo v LabVIEW, nebo je k dispozici vyexportovaná aplikace. K jejímu spuštění je ale zapotřebí mít nainstalovaný následující software dostupný z [11].

## 4 Dosažené výsledky

V této kapitole, jsou uvedeny vlastnosti funkčního zařízení, včetně měření, kterým bylo určeno, jaké funkci odpovídá charakter výstupního signálu v jednotlivých osách akcelerometru a změřené charakteristiky náklonu.

### Odezvy akcelerometru

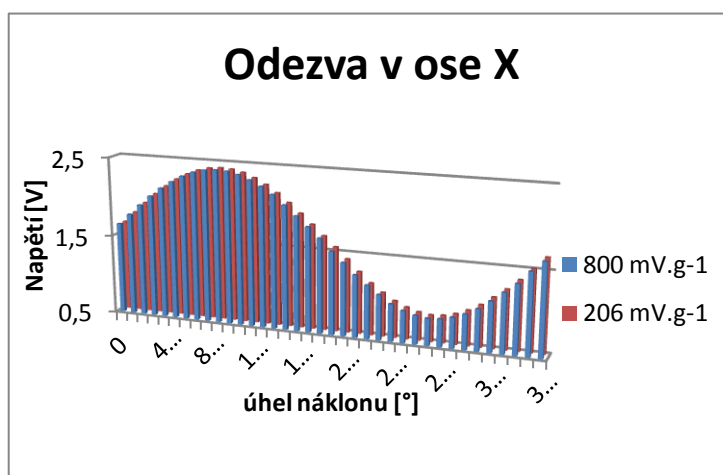
U DPS s akcelerometrem provedeno kontrolní měření za účelem zjistit, jakou odezvu poskytují jednotlivé osy při rozsahu  $0^\circ - 360^\circ$  ( $\pm 180^\circ$ ) při umístění DPS na stojánek. Měření bylo prováděno pro dvě citlivosti  $800 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$  a  $206 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$  s krokem otáčení  $10^\circ$ . Zároveň byla ověřena funkčnost senzoru pomocí SelfTestu.

### Použité přístroje

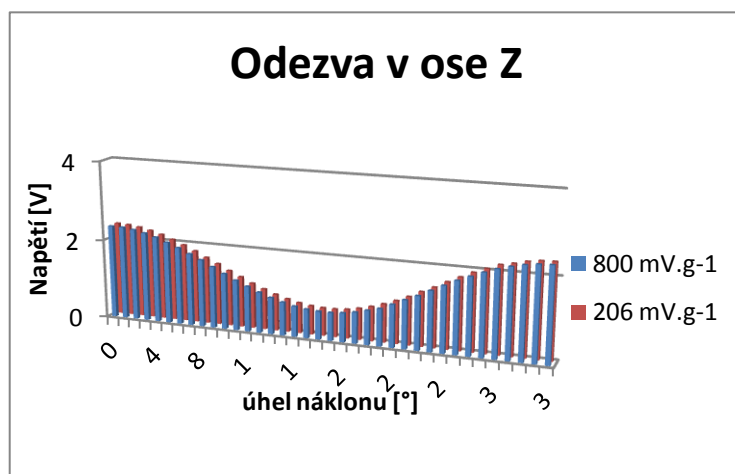
Stabilizovaný zdroj Tesla BS 525

3 x voltmetr Metex M3800

Výsledné naměřené hodnoty pro obě citlivosti jsou v příloze č. 19. Z naměřených hodnot jasně vyplývá, že k podstatné změně dochází při tomto otočném pohybu pouze v osách X a Z. V ose Y se naměřené hodnoty mění maximálně v řádu setin nebo tisícín voltu. Je to dáno tím, že ve směru této osy není konán pohyb. Aby bylo patrné, jaké matematické funkci odezvy z jednotlivých os odpovídají, byly hodnoty pro osy X a Z vyneseny do grafů znázorněných na obrázcích 17 a 18.



Obr. 17 Odezva v ose X



Obr. 18 Odezva v ose Z

Z grafů je patrné, že ve směru osy X má odezva charakter funkce sinus a ve směru osy Z charakter odezvy odpovídá funkci cosinus.

### Doba odezvy řetězce

Celková doba odezvy potřebná pro výpočet úhlu zahrnuje odezvy všech celků zapojených do vyhodnocovacího procesu. Tato doba je tak vyšší, než je doba odezvy samotného senzoru. Odezva byla zjištěna pomocí časových údajů ukládaných do textového souboru jakožto záznam měření. Standardně je v Block diagram u funkce Timing nastavena hodnota na 500 ms. V rámci ověření doby odezvy ale byla nastavena na dobu 0,1 ms, což je doba menší, než je doba odezvy samotného senzoru. Po kontrole souboru záznamu z měření bylo zjištěno, že v rámci jedné vteřiny dojde k maximálně 18-ti uložení v rámci jedné vteřiny. Znamená to tedy, že 1000 ms reprezentující vteřinu po vydělení číslem 18 udává maximální rychlost odezvy na 55,5 ms.

### Přesnost v porovnání s měřicím přístrojem Leica Disto D3

Za účelem zjištění přesností s jakou pracuje sestavený měřicí řetězec náklonu, bylo zkonstruované zařízení porovnáno s měřicím přístrojem Leica Disto D3. Tento přístroj může měřit v rozsahu  $\pm 45^\circ$  a přesností  $\pm 0,3^\circ$ . Porovnání bylo provedeno při měření reference  $0^\circ$ . Změřená přesnost bude ovšem pouze relativní, protože je porovnávána s jiným měřicím přístrojem a bude vztažena na měřicí rozsah  $\pm 180^\circ$ . Měření probíhalo pro mód autokalibrace. Pro výpočet byl využit vzorec (2). Hodnota  $x_t = 0,3^\circ$  změřená pomocí Leicy. Hodnota  $x_m$ , se díky cyklickému opakování vyhodnocování neustále mění maximální výchylka, pro citlivost  $800 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$  byla  $x_m = 1,33^\circ$  a pro  $206 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$  byla  $x_m = 2,66^\circ$ . Po výpočtu vyšly následující hodnoty přesnosti uvedené v tabulce 5.

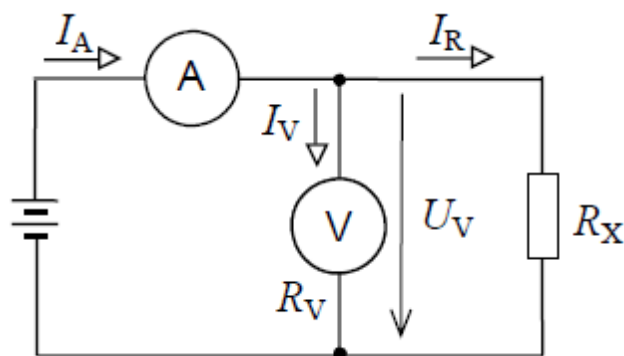
Tabulka 5 Relativní přesnost

Citlivost [ $\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$ ]	$\varepsilon_f$ [%]	Rozsah a přesnost
800	0,57	$\pm 180^\circ, \pm 1,026^\circ$
206	1,3	$\pm 180^\circ, \pm 2,34^\circ$



## Spotřeba

Měření spotřeby bylo realizováno pomocí voltmetru a ampérmetru pro měření výkonu stejnosměrného proudu. Zapojení je identické jako u Ohmovy metody pro měření malých odporů. Schéma zapojení je na obr. 19. Ampérmetr zde měří nejen proud zátěže, ale i proud, který protéká voltmetrem. Výsledný výkon se vypočte podle vzorce 21. K napájení je použita 9 V baterie GP Greencel 6F22.



Obr. 19 Zapojení Ohmovy metody

$$P_{vst} = U_V \cdot I_R = U_V \cdot (I_A - I_V) = U_V \cdot I_A - U_V \cdot I_V = U_V \cdot I_A - \frac{U_V^2}{R_V} \quad (21)$$

## Použité přístroje

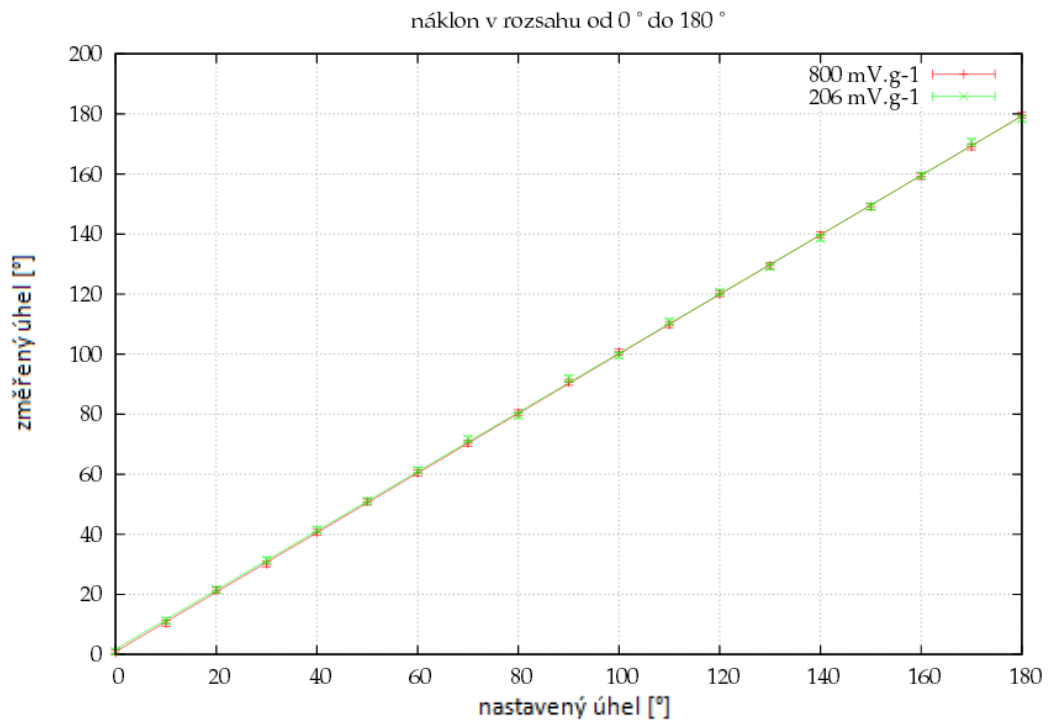
V – voltmetr METEX M-370D ,  $R_V = 10 \text{ M}\Omega$

A – ampérmetr HC 81

Naměřené hodnoty proudu a napětí byly následující  $I_A = 21,88 \text{ mA}$ ,  $U_V = 8,72 \text{ V}$ . Po dosazení těchto hodnot do vztahu 21 vyšla spotřeba na 190,7 mW.

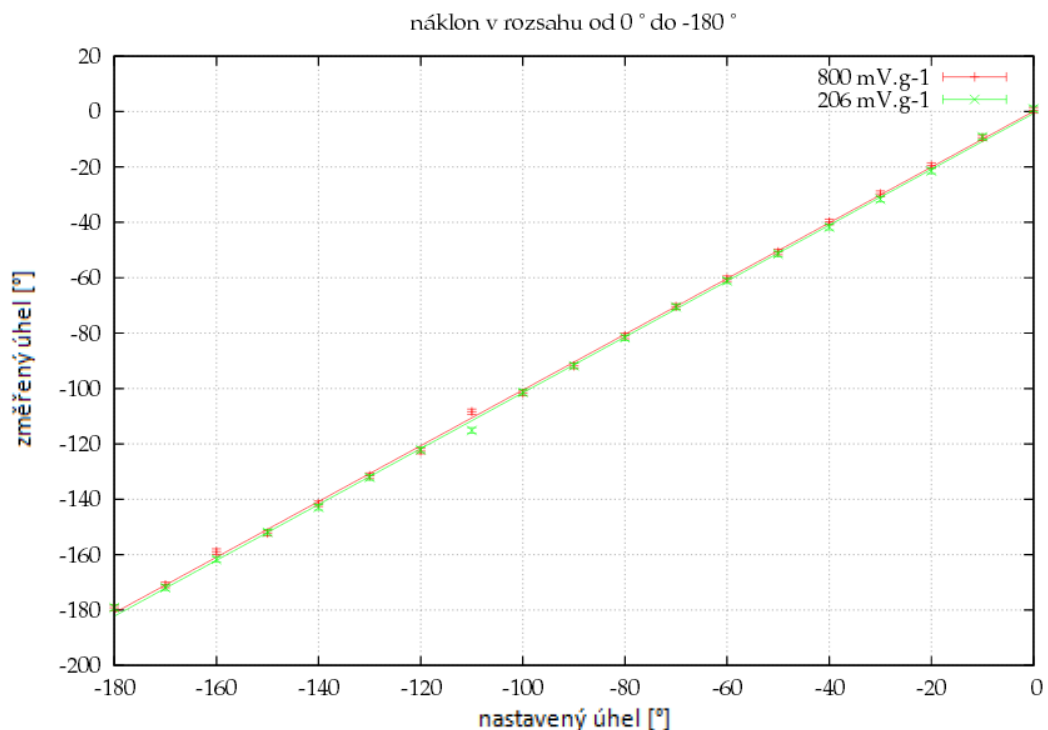
## Charakteristika měřeného náklonu

Za účelem zjištění závislosti změřeného náklonu od úhlu vychýlení nastaveným na konstrukci otočného zařízení bylo provedeno měření charakteristiky náklonu v rozsahu  $\pm 180^\circ$  pro obě dvě citlivosti. Naměřené hodnoty jsou uvedené v příloze č. 20. Všechny průběhy, byly proloženy lineární přímkou ve tvaru  $f = a \cdot x + b$ . Získáme tak funkční závislost naměřených dat na nastaveném úhlu. Výpočet probíhal pomocí zdroje [12]. Pro rozsah od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  je lineární rovnice regrese pro citlivost  $800 \text{ mV} \cdot \text{g}^{-1}$   $f_1 = 0,9909 \cdot x + 0,9487$  a pro citlivost  $206 \text{ mV} \cdot \text{g}^{-1}$  má rovnice lin. regrese tvar  $f_2 = 0,9854 \cdot x + 1,7788$ . Grafické znázornění těchto průběhů je znázorněno na obr. 20.



Obr. 20 Závislost změřeného úhlu na nastaveném v rozsahu 0 ° až 180°

Stejně bylo postupováno i při měření závislosti pro rozsah 0 ° až -180 °. Pro citlivost  $800 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$  je závislost  $f_3=1,0061\cdot x+0,0595$ . Funkční závislost pro citlivost  $206 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$  je  $f_4=1,0083\cdot x-0,7164$ . Obě závislosti jsou znázorněny na obr. 21.



Obr. 21 Závislost změřeného úhlu na nastaveném v rozsahu 0 ° až -180°

## 5 Ekonomický rozbor

Materiálové náklady jsou vyčísleny dle tabulky č. 8 uvedené v příloze č. 21 v částce 7 932,614 Kč. K této ceně je dále zapotřebí přičíst čas strávený vývojem, který činí přibližně 30 hodin čistého času na návrh a hlavně na následnou konstrukci zařízení. Nedílnou součástí práce je vyhodnocovací aplikace, jejíž vývoj trval přibližně 90 hodin čistého času. Hodinová cena vývoje je orientačně stanovena na 300 Kč/hod. V součtu tato částka činí 36 000 Kč. Cena funkčního vzorku včetně finančního ohodnocení času potřebného k vývoji činí 43 932,614 Kč. K tomu je dále přičteno 500 ks oboustranného kolíku XINYA S2G40 2,55mm za 9,90 Kč, tj. 4 985 Kč.

Na základě současného stavu trhu lze pozorovat prodej sklonoměrů v různých technických variantách a v různých velikostech měřících rozsahů. Podle toho lze usuzovat, že by počáteční prodej mohl být stanoven na 1 000 ks/rok.

Místo výroby by bylo situováno do vlastních prostorů domácí dílny, díky čemuž bychom ušetřily na pronájmu cizích prostorů. Pracovníci by byli najmutí fyzickou osobou (studentem OSVČ do 26 let), která své odvozy bude řešit jednou ročně v rámci svého daňového přiznání. Výroba by byla zajišťována dvěma osobami (studenty), s nimiž by byla uzavřena dohoda o provedení činnosti. Tito studenti by měli podepsané Prohlášení poplatníka k dani. Jejich finanční ohodnocení by bylo stanoveno na 58 Kč za vyrobený kus. To znamená, že každý by při výrobě 500 ks/rok obdržel finanční částku 29 000 Kč/rok. Měsíční plán by byl stanoven na max. limit 43 ks/pracovník. Měsíční odměny by pro jednotlivé pracovníky nepřesáhly 2 500 Kč/měsíc. Tím pádem, by zaměstnanec ani zaměstnavatel neplatily zdravotní, sociální a nemocenské pojištění. Dle propočtů by max. měsíční odměna činila 2 494 Kč/pracovník.

Roční materiálové náklady včetně započteného vývoje při množství 1 000 ks činí 7 974 000 Kč. Na jeden výrobek připadne obchodní marže 500 Kč, tzn. finální cena výrobku pro koncového zákazníka bude 8 474 Kč. Při sérii 1 000 ks je předpokládaná hodnota ročních tržeb 8 474 000 Kč. Od této částky je nutné odečíst materiálové náklady a mzdy zaměstnanců, čímž bude dosaženo částky 442 000 Kč. Z této částky bude ale ještě potřeba odečíst poplatky za energie, které nelze jednoznačně určit.

## 6 Závěr

Tuto práci jsem strukturoval do několika hlavních bodů. První bod pojednává o současném stavu akcelerometrů a obecně o senzorech a jejich vlastnostech. Na základě toho jsem pro svou práci vybral tříosý kapacitní akcelerometr MMA 7361LC. Jeho popis jsem zde také uvedl, neboť je důležitý pro pochopení jak lze ovládat pomocí logických úrovní. V dalším bodě jsem pro něj navrhl DPS tak, mohla být umístěna na hřideli. Následně jsem u něj provedl kontrolní měření, abych mohl určit, jaký charakter odezvy má výstupní signál v jednotlivých osách. V ose X šlo

o průběh funkce sinus a v ose Z šlo o průběh funkce cosinus. Osa Y není pro nás důležitá, neboť navržené řešení zpracovává signál z os X a Z. Aby bylo možné demonstrovat funkci náklonoměru vytvořil jsem konstrukci s hřídelí, na níž je právě umístěna DPS s akcelerometrem. Dále jsem vytvořil přepojovací DPS, která zajišťuje stabilizaci napětí napájecího napětí na 3,3 V, což je hodnota doporučená výrobcem. Dále slouží k indikaci, zda-li je zařízení pod napětím. Propojení s počítačem je zajištěno skrze NI USB DAQ 6009. Ten je podrobně psán v kapitole 2.4.4. Třetí významný bod je tvorba vyhodnocovacího softwaru. Měřicí aplikace byla vytvořena v programu LabVIEW. Vývojový diagram programu a popis programu je uveden v kapitole 3. Díky předem zjištěným odezvám byl pro vyhodnocení použit poměr funkcí sinus a cosinus, který udává funkci tangens. Vyhodnocovací aplikace obsahuje nejen čisté ovládání senzoru jako je jeho aktivace či uvedení do stavu sleep módu nebo přepínání mezi citlivostmi a testování jeho funkčnosti pomocí SelfTestu ale i grafy pro vykreslení jak okamžitého měřeného úhlu, tak odezvu v čase obou využívaných os a možnost ukládání naměřených dat. Dále obsahuje 3 možnosti kalibrace. Poslední položkou je záložka, která obsahuje popis celého měřicího zařízení a návod k jeho použití. Měřicí aplikace je k dispozici pro spuštění buď přímo v Labview nebo jako spustitelná aplikace. Pro tento měřicí vzorek byly poté určeny následující vlastnosti (doba odezvy, přesnost v porovnání s přístrojem Leica Disto D3, spotřeba a charakteristiky náklonu). Doba odezvy měřicího řetězce byla stanovena na hodnotu 55,5 ms. Přesnost v porovnání s přístrojem Leica Disti D3 byla pro citlivost  $800 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$  spočítána na FSO jako  $\varepsilon_f = 0,57 \%$  a pro citlivost  $206 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$  bylo  $\varepsilon_f = 1,3 \%$  (měření probíhalo pro mód autokalibrace). Nepřesnost může být způsobena několika faktory. Jednak samotným vyhodnocovacím algoritmem, protože výpočet úhlu pomocí funkce tg probíhá vždy z průměrného vzorku 50 hodnot, možná bylo lepší tento počet průměrovaných vzorků ještě zvýšit. Dalším faktorem může být nelinearita samotného senzoru, která je podle výrobce stanovena na  $\pm 1 \%$  z FSO. Důležitou roli zde může hrát i správné provedení kalibrace senzoru. Možná metoda, která by odstraňovala nelinearitu, je zpětnovazební metoda, kde je signál zpětné vazby odečten od měřené veličiny v rozdílovém členu. Poslední změřená vlastnost je spotřeba určena pomocí Ohmovy metody na  $P_{\text{vst}} = 190,7 \text{ mW}$ . Na závěr práce je uveden ekonomický rozbor funkčního vzorku. Na základě sestaveného řešení, by šlo tuto práci do budoucna rozpracovat. Bylo by možné využívat odezvy z os X a Z jak je tomu nyní a jako druhou dvojici využít odezvy z os Y a Z pro určení náklonu roviny ve 2D rozměru, nebo využít plně stávající řešení se dvěma akcelerometry vzájemně pootočenými o  $90^\circ$  taktéž pro určení náklonu roviny ve 2D rozměru. Stávající program v Labview by šel pro tento účel lehce modifikovat. Na základě změřených úhlů by šlo řídit motory, které by nastavovali roviny do rovnovážné polohy nebo do definovaného naklonění. Pro laboratorní vzorek také byla navržena laboratorní úloha uvedena v příloze č. 22. Pro vytvoření bakalářské práce byly využity tyto programy: Eagle 6. 5. 0, Autodesk Inventor Professional 2011, LabVIEW 2011, Diaw.

# Literatura

- [1] 01 Úvod - proč senzory. *Katedra mikroelektroniky FEL ČVUT* [online]. 2014 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/01%20Uvod%20-%20proc%20senzory.pdf>
- [2] RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 136 s. ISBN 978-80-01-04696-8.
- [3] HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2008, s. 51-73. ISBN 978-80-200-1478-8.
- [4] 15 Senzory. *15 Senzory* [online]. ©1997 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: [http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html\\_tree/node16.html](http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/node16.html)
- [5] Měřicí řetězec. *Základní pojmy* [online]. ©2004-2014 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s\\_1\\_1.htm](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_1_1.htm)
- [6] 8, Akcelerometry. *Katedra mikroelektroniky FEL ČVUT* [online]. 2014 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf>
- [7] Dálkové ovládání pro interaktivní televizi. *DigiZone* [online]. © 2005 – 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.digizone.cz/clanky/dalkove-ovladani-pro-interaktivni-televizi/>
- [8] MMA 7361LC. *Freescale Semiconductor* [online]. 2011 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: [http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7361LC.pdf?pspl=1](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361LC.pdf?pspl=1)
- [9] NI USB-6008/6009. *National Instruments* [online]. ©2004-2012 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303m.pdf>
- [10] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. 1. vyd. Ilustrace Viktorie Vlachová. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [11] LabVIEW Run-Time Engine 2011 SP1 - (32-bit Standard RTE) - Windows 7 64-bit/7 32-bit/Vista 64-bit/Vista 32-bit/XP 32-bit/Server 2008 64-bit/Server 2003 R2 32-bit. *National Instruments* [online]. ©2014 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.ni.com/download/labview-run-time-engine-2011-sp1/2897/en/>
- [12] *Universální nástroj pro kreslení grafů* [online]. ©2014 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/grafy-new/grafy.php>

# Seznam příloh

- Příloha č. 1 – Základní deska mechanické konstrukce
- Příloha č. 2 – Zadní stěna
- Příloha č. 3 – Kluzné ložisko
- Příloha č. 4 – Úhломěrová stěna
- Příloha č. 5 – Hřídél
- Příloha č. 6 – Ryska
- Příloha č. 7 – Deska
- Příloha č. 8 – Držák
- Příloha č. 9 – Sestava
- Příloha č. 10 – DPS s akcelerometrem-návrh vrchní strany
- Příloha č. 11 – DPS s akcelerometrem-návrh spodní strany
- Příloha č. 12 – DPS s akcelerometrem-montážní schéma
- Příloha č. 13 – DPS s akcelerometrem-foto
- Příloha č. 14 – Obrázek měření náběžné hrany pro  $62 \text{ k}\Omega$
- Příloha č. 15 – Obrázek měření náběžné hrany pro  $0 \text{ }\Omega$
- Příloha č. 16 – Propojovací DPS-návrh
- Příloha č. 17 – Propojovací DPS-montážní schéma
- Příloha č. 18 – Block Diagram vytvořeného programu
- Příloha č. 19 – Naměřené hodnoty odezev v jednotlivých osách
- Příloha č. 20 – Změřený náklon v závislosti na nastaveném úhlu
- Příloha č. 21 – Rozpis součástí
- Příloha č. 22 – Měřicí protokol
- Příloha č. 23 – Přiložené CD

## Příloha č. 1 – Základní deska mechanické konstrukce

## Příloha č. 2 – Zadní stěna



## Příloha č. 3 – Kluzné ložisko

## Příloha č. 4 – Úhloměrová stěna

## Příloha č. 5 – Hřidel

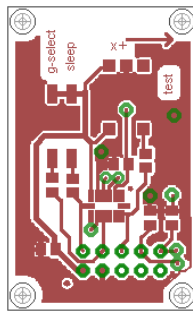
## Příloha č. 6 – Ryska

## Příloha č. 7 – Deska

## Příloha č. 8 – Držák

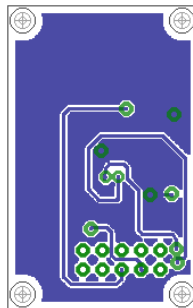
## Příloha č. 9 – Sestava

## Příloha č. 10 – DPS s akcelerometrem-návrh vrchní strany



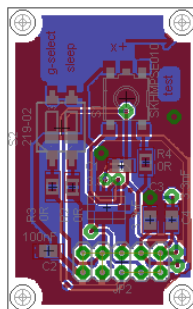
Obr. 22 DPS s akcelerometrem-návrh vrchní strany

## Příloha č. 11 – DPS s akcelerometrem-návrh spodní strany



Obr. 23 DPS s akcelerometrem-návrh spodní strany

## Příloha č. 12 – DPS s akcelerometrem-montážní schéma



Obr. 24 DPS s akcelerometrem-montážní schéma

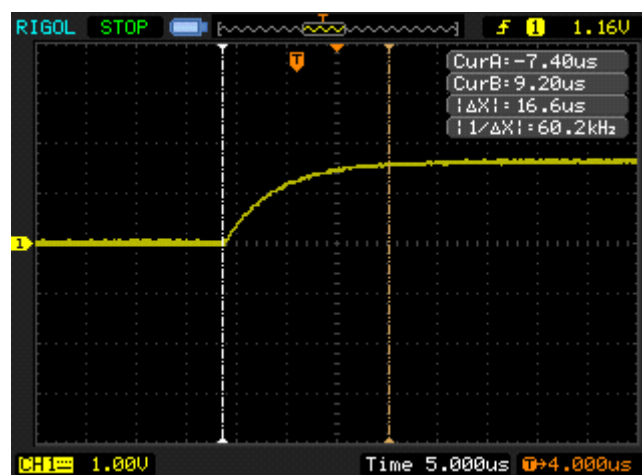


Příloha č. 13 – DPS s akcelerometrem-foto



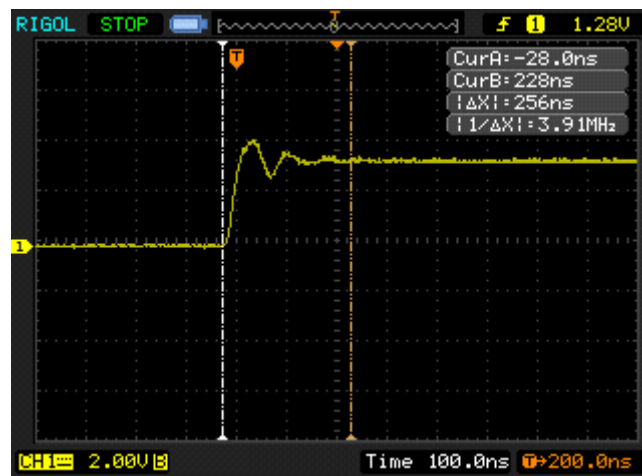
Obr. 25 DPS s akcelerometrem-foto

Příloha č. 14 – Obrázek měření náběžné hrany pro 62 k $\Omega$



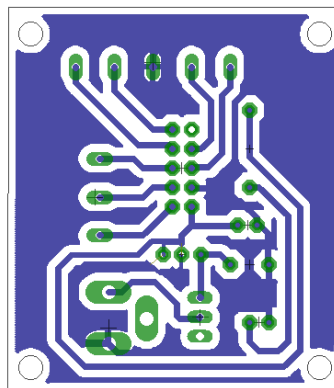
Obr. 26 Náběžná hrana pro rezistor 62k $\Omega$

Příloha č. 15 – Obrázek měření náběžné hrany pro  $0\ \Omega$



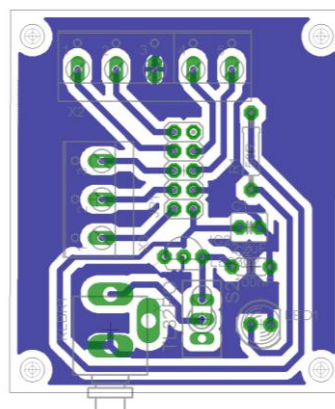
Obr. 27 Náběžná hrana pro rezistor  $0\ \Omega$

Příloha č. 16 – Propojovací DPS-návrh



Obr. 28 Propojovací DPS-návrh

Příloha č. 17 – Propojovací DPS-montážní schéma



Obr. 29 Propojovací DPS-montážní schéma

## Příloha č. 18 – Block Diagram vytvořeného programu

## Příloha č. 19 – Naměřené hodnoty odezev v jednotlivých osách

Tabulka 6 Odezvy výstupních signálů

citlivost 800 mV·g <sup>-1</sup>				citlivost 206 mV·g <sup>-1</sup>			
gsel-0	výstupní napětí os [V]			gsel-1	výstupní napětí os [V]		
úhel natočení [°]	osa X	osa Y	osa Z	úhel natočení [°]	osa X	osa Y	osa Z
0	1,65	1,662	2,35	0	1,647	1,662	2,359
10	1,782	1,663	2,345	10	1,782	1,663	2,345
20	1,913	1,666	2,307	20	1,915	1,667	2,308
30	2,038	1,67	2,246	30	2,039	1,671	2,248
40	2,15	1,67	2,165	40	2,151	1,672	2,167
50	2,24	1,672	2,06	50	2,248	1,672	2,064
60	2,32	1,672	1,95	60	2,322	1,674	1,95
70	2,379	1,674	1,82	70	2,38	1,674	1,823
80	2,414	1,674	1,694	80	2,415	1,676	1,684
90	2,427	1,674	1,548	90	2,428	1,676	1,55
100	2,421	1,673	1,402	100	2,421	1,675	1,402
110	2,389	1,676	1,264	110	2,391	1,677	1,271
120	2,334	1,674	1,139	120	2,335	1,676	1,137
130	2,266	1,678	1,022	130	2,262	1,68	1,02
140	2,177	1,678	0,917	140	2,169	1,679	0,914
150	2,06	1,677	0,834	150	2,06	1,678	0,83
160	1,937	1,677	0,762	160	1,939	1,678	0,764
170	1,817	1,672	0,72	170	1,814	1,673	0,721
180	1,688	1,672	0,7	180	1,685	1,671	0,7
190	1,54	1,67	0,699	190	1,56	1,671	0,701
200	1,417	1,671	0,724	200	1,424	1,671	0,727
210	1,279	1,673	0,776	210	1,281	1,672	0,782
220	1,166	1,669	0,852	220	1,153	1,672	0,859
230	1,064	1,669	0,928	230	1,051	1,671	0,955
240	0,966	1,669	1,063	240	0,963	1,668	1,069
250	0,899	1,667	1,205	250	0,899	1,667	1,199
260	0,857	1,666	1,335	260	0,855	1,667	1,35
270	0,836	1,666	1,491	270	0,834	1,666	1,488
280	0,845	1,663	1,644	280	0,845	1,664	1,648
290	0,881	1,662	1,792	290	0,881	1,663	1,793
300	0,937	1,659	1,917	300	0,941	1,661	1,933
310	1,016	1,661	2,043	310	1,024	1,663	2,053
320	1,125	1,663	2,15	320	1,13	1,662	2,173
330	1,245	1,661	2,235	330	1,241	1,666	2,231
340	1,364	1,662	2,302	340	1,369	1,669	2,305
350	1,521	1,66	2,344	350	1,514	1,662	2,348
360	1,653	1,665	2,357	360	1,662	1,663	2,358

## Příloha č. 20 - Změřený náklon v závislosti na nastaveném úhlu

Tabulka 7 Charakteristika náklonu

	změřený úhel [°]			změřený úhel [°]	
	citlivost			citlivost	
nastavený úhel [°]	800 mV·g <sup>-1</sup>	206 mV·g <sup>-1</sup>	nastavený úhel [°]	800 mV·g <sup>-1</sup>	206 mV·g <sup>-1</sup>
0	0,454	0,98	0	0,454	0,98
10	10,36	11,26	-10	-9,456	-9,09
20	21,4	21,62	-20	-19,51	-21,45
30	30,12	31,42	-30	-29,68	-31,63
40	40,65	41,52	-40	-39,86	-41,75
50	50,83	51,1	-50	-50,69	-51,41
60	60,44	61,29	-60	-60,36	-61,13
70	70,35	71,75	-70	-70,42	-70,53
80	80,46	79,55	-80	-81	-81,69
90	90,65	91,97	-90	-91,8	-91,8
100	100,7	99,59	-100	-101,6	-101,4
110	109,8	11,8	-110	-108,4	-115,15
120	120,1	120,59	-120	-122,6	-122,16
130	129,5	129,11	-130	-131,5	-132,1
140	139,7	138,63	-140	-141,6	-142,9
150	149,1	149,11	-150	-152,2	-151,9
160	159,2	159,48	-160	-158,9	-161,7
170	169	170,71	-170	-170,9	-171,92
180	179,6	178,36	-180	-179,2	-179,12

## Příloha č. 21 – Rozpis součástek

Tabulka 8 Rozpis součástek

<b>Druh materiálu</b>	<b>Cena</b>	<b>Ks</b>
Akcelerometr MMA7361LC	73,314	1
NI USB 6009	6 800	1
Baterie GP Greencel 6F22	17	1
Napájecí konektor DCI 006-PI	7,35	1
Napájecí souosý konektor SCP-2009B	5	1
Napájecí souosý konektor WEALTHMETAL DS-241B	5,60	1
Svorkovnice PTR AK500/2DS	5,26	2
Svorkovnice PTR AK500/3DS	8,18	1
Násuvná svorkovnice PTR AKZ 1550/3	31,25	1
Násuvná svorkovnice PTR AKZ 1550/5	45,36	1
Páčkový spínač P-MS611A	68	1
LED 5MM RED POINT	1,23	1
Kondenzátor CT100n/35V	3,47	1
Kondenzátor CT2,2u/35V	4,03	1
Rezistor MPR 50R	6,16	1
DIP přepínač DIP 02LP BLACK ECE	16,02	1
Kondenzátor CK8 0805 100n/50V X7R	0,75	1
Kondenzátor CK8 0805 3,3n/50V X7R	1,05	3
Mikrospínač do DPS TD-03XBT-A00-TR	3,47	1
Konektor XINYA PFL10	5,49	2
Distanční sloupek plastový M3F/F KSS KDI6MX18W	4,48	4
Distanční sloupek plastový M3M/F KSS KDA6M3X06W	5,60	4
Kovový dist. sloupek DA5M3X05S	3,92	4
Šrouby	15	12
Polykarbonátová matice SPCM3	4,48	4
Úhломěr plastový	10	1
Izolační podložka	1	4
Plochý kabel AVG 28-10H-152	6,2	0,5 m
Plochý kabel FBK 10H 1,2 mm	2,66	0,25 m
Náklady na DPS	135	
Stojánek materiál	400	
<b>Cena</b>	<b>7932,614</b>	

## Příloha č. 22 – Měřicí protokol

### Náklonoměr s akcelerometrem MMA7361LC

#### Úkol měření

- Proveďte měření v rozsahu  $\pm 180^\circ$  s krokem  $10^\circ$ . Nejprve měřte pro citlivost  $800 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$  a poté ji přepněte na hodnotu  $206 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$ . Sledujte odezvu hodnot napětí v osách X a Y.
- Vyneste změřené hodnoty do grafu jako závislost napětí na úhlu náklonu pro oba průběhy a stanovte, jaký matematický charakter mají odezvy těchto os.
- Vyzkoušejte si manuální kalibraci senzoru pro Vámi zvolenou citlivost.
- Pokuste se navrhnout, jakým způsobem bylo postupováno při výpočtu změřeného úhlu. Využijte k tomu naměřené hodnoty napětí, teoretický rozbor a obr. 4.

#### Teoretický rozbor

Akcelerometry se mohou využívat nejen pro měření náklonu, ale i pro měření pohybu a rychlosti, vibrací, ESP atd.. Akcelerometry jsou senzory, které mají v dnešním světě široké uplatnění. Akční veličina působící na akcelerometry je zrychlení. Zrychlení dělíme na statické a dynamické.

Statické zrychlení – senzor měří sílu, která vznikne v důsledku působení zemské gravitace

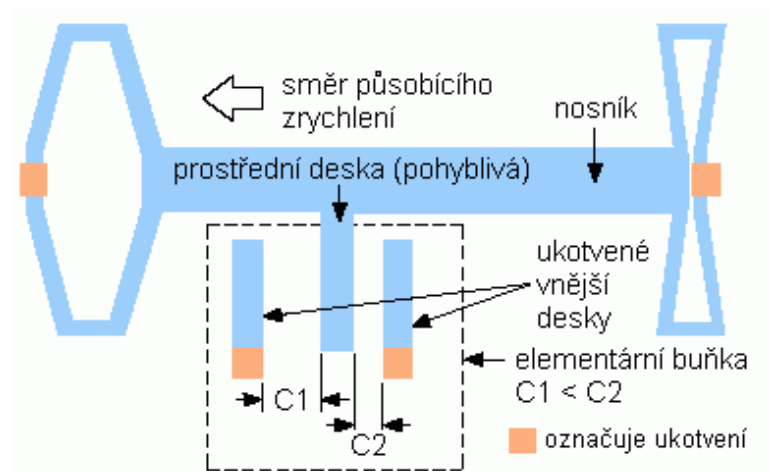
Dynamické zrychlení – senzor měří sílu vzniklou následkem změny rychlosti pohybujícího se senzoru

V současné době je kapacitní princip u akcelerometrů nejrozšířenější. Je založen na funkci deskového kondenzátoru. Kde velikost kapacity  $C$  závisí na ploše desek kondenzátoru  $S$ , vzdálenosti mezi nimi  $d$  a permitivitě dielektrika  $\epsilon$  ( $\epsilon_0\epsilon_r$ ). Tuto závislost lze popsat vztahem 1.

$$C = \epsilon_0\epsilon_r \frac{S}{d} \quad (1)$$

Princip činnosti je uveden na obr. 1. Základ tvoří seismická hmota, na které jsou vyvedeny nosníky, které jsou po stranách opatřeny deskami kondenzátoru, ty tvoří celek s ukotveným vnějšími deskami kondenzátoru umístěnými na pevných nosnících. Při působení zrychlení se jedna kapacita zvětšuje a druhá zmenšuje. Toto uspořádání je také nazýváno jako diferenciální a je využíváno ve složitějších hřebenových strukturách. Což je v podstatě paralelní zapojení desítek až stovek diferenciálních kapacit. Jedná se o strukturu vyrobenou technologií MEMS. Hřebenová struktura je rozdělena

do měřicí a testovací části. Testovací část je používána pro SelfTest, kdy při aktivaci dojde k působení elektrostatických sil a seismická hmota je tak definovaně vychýlena, čímž se mění odezva senzoru. V současné době se vyrábějí 1D, 2D a 3D akcelerometry, ty se liší vlastnostmi a tím pádem i cenou. Bližší matematický popis je uveden ve zdroji [1].



Obr. 1 Konstrukce kapacitního akcelerometru [2]

Při vyhodnocování se tedy nejprve měří kapacita, k tomu se nejčastěji používají operační zesilovače v invertujícím zapojení.

Laboratorní přípravek této úlohy využívá tříosý akcelerometr MMA7361LC od společnosti Freescale Semiconductor. Jde o senzor s pouzdem LGA 14 (má 14 vývodů).

### Charakteristické parametry

- Doporučené napájecí napětí 3,3 V
- Spotřeba proudu 400  $\mu\text{A}$
- Spotřeba proudu v režimu spánku 3  $\mu\text{A}$
- Citlivosti 800  $\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$  @  $\pm 1,5 \text{ g}$  ; 206  $\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$  @  $\pm 6 \text{ g}$
- Doba odezvy při rychlém startu 0,5 ms
- Nelinearita  $\pm 1 \%$  FSO
- Doba odezvy Selftestu 2 ms
- Vnitřní vzorkovací 11 kHz

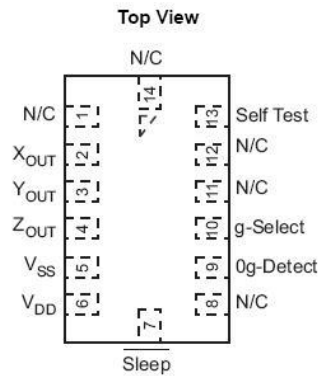
### Popis pinů

Jednotlivé vývody jsou vyobrazeny na následujícím obrázku č. 2.

Vývody označené jako N/C jsou nepřipojeny.

- nepřipojené piny – 1, 8, 11, 12, 14
- vstupní piny – 7, 10, 13,
- výstupní piny – 2, 3, 4, 9
- napájecí piny – 5, 6





Obr. 2 Popis vývodů [3]

Pin 2 – X<sub>OUT</sub>, Pin 3 – Y<sub>out</sub>, Pin 4 - Z<sub>out</sub>

Tyto vývody poskytují na svém výstupu spojitý analogový signál.

Pin 7 – Sleep

Tento pin je výhodný pro aplikace napájené z baterie. Pokud je tento pin aktivní, výstupní piny jsou vypnuty. Tento pin je aktivní v momentě, kdy je na něj přiveden signál o úrovni logické nuly. Napájecí proud zároveň klesne na 3  $\mu\text{A}$  při současném nastavení g-Select na 1,5 g. V momentě přivedení log. 1 na pin 7 senzor se opět vrátí do běžného režimu.

Pin 9 – 0g-Detect

Když jsou všechny tři osy v úrovni 0 g poskytuje tento pin na výstupu signál log.1. Těto možnosti se požívá, zejména pokud je akcelerometr využit jako ochrana před volným pádem.

Pin 10 – g-Select

Akcelerometr může pracovat ve dvou citlivostních režimech, podle toho jaká logická úroveň na tento pin je připojena. Změna citlivosti se může provádět během činnosti. Přehled citlivostí je uveden v následující tabulce 1:

Tabulka 1 Volba citlivosti

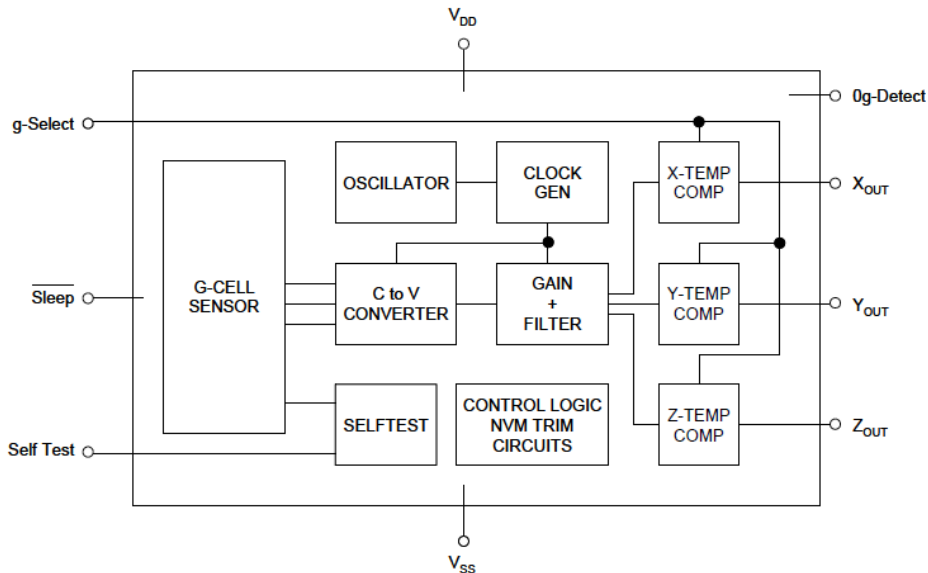
g - Select	g - Range	Citlivost
<b>0</b>	1,5 g	800 $\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$
<b>1</b>	6 g	206 $\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$

Pin 13 – Self Test

Tato funkce je používána pro opětovné ověření funkčnosti mechanické a elektrické funkčnosti senzoru. Tento pin je spíš využit v automatizovaných aplikacích, kde má být zaručena dlouhá životnost výrobku, např. HDD u PC. Při přetočení senzoru

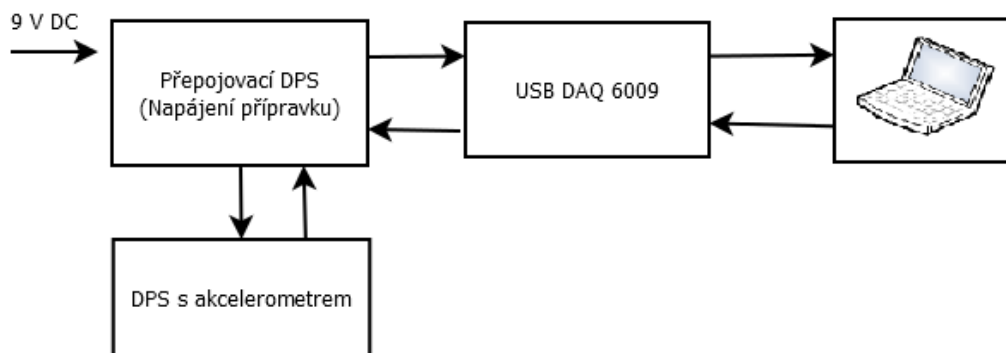
a připojení log. 1 k pinu 13 se změní úroveň výstupního napětí v ose Z o 1 g, zatímco v ostatních směrech X a Y se hodnota výst. signálu takřka nezmění.

Akcelerometry se vyrábějí většinou pomocí MEMS technologie. V rámci senzoru jsou již integrovány obvody předzesilovačů, teplotní kompenzace, vnitřní oscilátor atd. Blokové schéma akcelerometru MMA 7361LC je uvedeno na obr. 3.



Obr. 3 Blokové schéma zapojení akcelerometru MMA 7361LC [3]

Zapojení se skládá z DPS s akcelerometrem umístěné na otočné hřídeli. Ta je spojena pomocí plochého vícežilového vodiče s DPS zajišťující napájení a přepojování signálů s USB DAQ 6009, který je připojen k počítači přes rozhraní USB 2.0. Blokové zapojení je znázorněno na obr. 4.

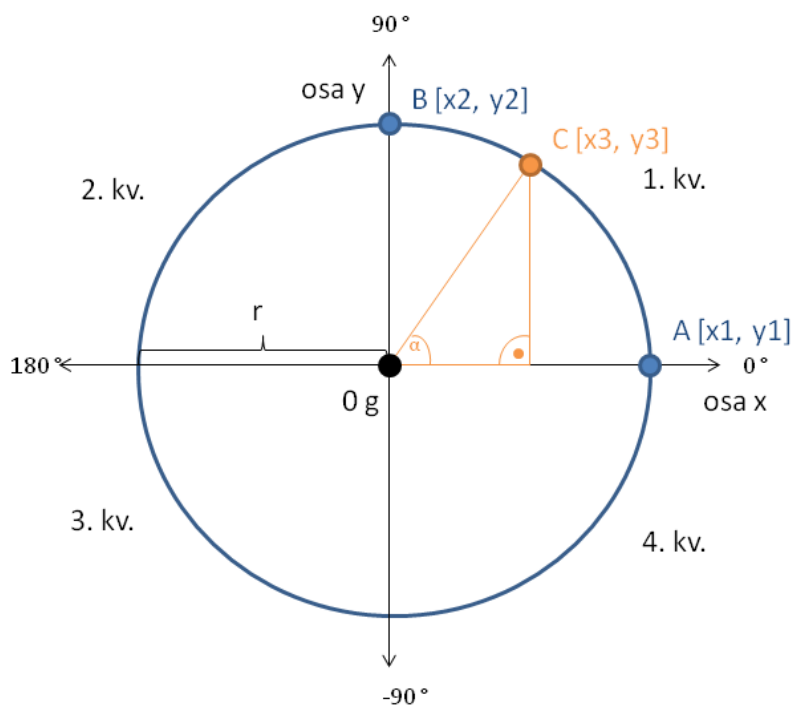


Obr. 4 Blokové zapojení

## Popis programu

Vyhodnocovací aplikace je vytvořena v softwaru LabVIEW. V levé části obsahuje přepínatelné switche logických úrovní pro aktivaci senzoru, nebo uvedení do stavu SLEEP. Dále se zde mohou přepínat citlivosti senzoru a ověření funkčnosti Self

testem (natočte senzor do polohy  $180^\circ$  a zmáčkněte Selftest, měla by se rozsvítit kontrolka out). K dispozici je buď  $800 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$  nebo  $206 \text{ mV}\cdot\text{g}^{-1}$ . Pod oknem rámcem určeným pro ovládání senzoru je umístěn rámeček indikující aktuální odezvu v jednotlivých osách. Senzor je nainstalován na DPS ve směru kdy měří zrychlení ve směru osy X a Z kartézského souřadného systému. V rámci vyhodnocování je osa Z zde nazývána osou Y, protože změřený úhel je vykreslován ve 2D rovině. V levé části se dále nachází zvuková signalizace. Je-li tlačítko zapnuto, podbarví se oranžově a indikuje, je-li změřený úhel v intervalu  $\pm 1^\circ$  od kvadrantových úhlů  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $-90^\circ$ ). Dále jsou zde k dispozici 4 přepínatelné záložky. Na 1. záložce (pevné vykreslení náklonu) je vykreslován změřený úhel s pevnou amplitudou. Na 2. záložce (vykreslení náklonu, kalibrace) je již vykreslovaný úhel udáván v grafu s proměnnou amplitudou odpovídající odmocnině součtu kvadrátů obou os. Jsou zde k dispozici 3 možnosti kalibrace autokalibrace, kalibrační úhel či manuální kalibrace. Při autokalibraci se uživatel o kalibraci senzoru již starat nemusí, provádí se automaticky. Při volbě kalibračního úhlu se zadává do pole kalibrační úhel hodnota, která se poté bere jako nová reference, od které se odměřuje a vykresluje úhel. Např. bude-li reálný náklon odpovídat  $30^\circ$  a kalibrační úhel bude nastaven na hodnotu  $10^\circ$ , bude změřený úhel udávat hodnotu  $20^\circ$ . Poslední možnost je manuální kalibrace. Pro názornost je princip uveden na obr. 5. Při volbě manuální kalibrace je zapotřebí změřit hodnotu  $x_1$  a zadat ji do pole kalibrace v ose X a hodnotu  $y_2$  zadat do pole kalibrace v ose Y. Stejný princip je již automaticky proveden v módu autokalibrace. Z obrázku je patrné, že každý bod měření je udáván souřadnicemi  $x$  a  $y$  ve 2D rovině, které se pohybují po kružnici s poloměrem  $r$ . Dále je zde i patrný náznak výpočtu úhlu.



Obr. 5 Princip kalibrace a výpočtu úhlu

Na 3. záložce (odezva signálů senzoru, záznam z měření) můžete sledovat průběh aktuální odezvy signálu v jednotlivých osách v reálném čase. Dále je zde možnost uložit záznam z měření do požadované složky ve zvolené struktuře zápisu. Celý program lze kdykoliv ukončit tlačítkem STOP. Na čtvrté záložce (návod) je k dispozici stručný návod jak ovládat aplikaci plus správné foto zapojení přípravku.

### Postup měření:

- 1) Ověřte správnost zapojení (vícežilový kabel svévolně nepřepojujte, mohlo by dojít k poškození senzoru!!!, viz. foto zapojení na 4. záložce v měřicí aplikaci )
- 2) Spusťte soubor naklonomer.vi a zvolte adresář, kam chcete uložit záznam z měření.
- 3) Spusťte aplikaci (Run) a proved'te měření dle prvního bodu zadání (měřte v režimu autokalibrace). Naměřené hodnoty запиšte do tabulky 1 a vynes'te do grafů a určete jejich charakter.
- 4) Proved'te manuální kalibraci senzoru.
- 5) Sestavte postup výpočtu náklonoměru dle 4. bodu zadání.

### Naměřené výsledky

#### 1) Naměřené hodnoty

Tabulka 2 Naměřené hodnoty

úhel [°]		citlivost 800 mV·g <sup>-1</sup>		citlivost 206 mV·g <sup>-1</sup>	
nastavený	změřený	xp [V]	yp [V]	xp [V]	yp [V]
0					
10					
20					
30					
40					
50					
60					
70					
80					
90					
100					
110					
120					
130					
140					
150					
160					
170					
180					
190 (-170)					

200 (-160)						
210 (-150)						
220 (-140)						
230 (-130)						
240 (-120)						
250 (-110)						
260 (-100)						
270 (-90)						
280 (-80)						
290 (-70)						
300 (-60)						
310 (-50)						
320 (-40)						
330 (-30)						
340 (-20)						
350 (-10)						

grafy vytvořte na PC

odezva v ose X = fce ...

odezva v ose Y = fce ...

## 2) Manuální kalibrace

Porovnejte, o kolik stupňů se liší Vámi změřený úhel při nastavení rysky na 0 ° oproti předchozímu měření, kdy jste využívali autokalibraci. Uveďte možné příčiny.

### 3) Postup výpočtu úhlu v jednotlivých kvadrantech

(Nápověda: využijte goniometrickou funkci, která vznikne poměrem goniometrických funkcí, které jste zjistili v 1. bodě měření (včetně naměřených hodnot) a teoretický rozbor)

#### Použité zdroje

[1] HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Praha: Academia, 2008, s. 129-132. ISBN 8020014780.

[2] Dálkové ovládání pro interaktivní televizi. *DigiZone* [online]. © 2005 – 2014 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.digizone.cz/clanky/dalkove-ovladani-pro-interaktivni-televizi/>

[3] MMA 7361LC. *Freescale Semiconductor* [online]. 2011 [cit. 2014-04-28].

Dostupné z:

[http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7361LC.pdf?pspll=1](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361LC.pdf?pspll=1)

## Příloha č. 23 – přiložené CD

### Obsah přiloženého CD

- bakalářská práce v pdf formátu, tisknutelné přílohy
- fotodokumentace
- vyhodnocovací program pro program LabVIEW a v provedení exe aplikace