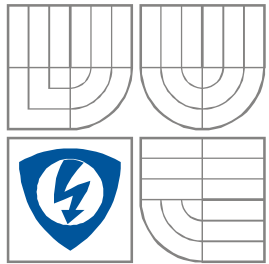


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## **Měření vibrací**

MEASUREMENT OF THE VIBRATIONS;

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Bc. Jan Diblík

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR  
BRNO, 2007

Ing. Viera Biolková.

zadání práce – originál z UREL

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jan Diblík  
Bytem: Bořetická 9, Brno, 628 00  
Narozen/a (datum a místo): 2. července 1984 v Brně

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Měření vibrací  
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Viera Biolková  
Ústav: Ústav radioelektroniky  
Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracování díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy  
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. května 2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## ***Anotace***

Diplomová práce se zabývá principy měření vibrací pomocí měřičů zrychlení, tzv. akcelerometrů a jejich užitím pro výrobu přípravku pro měření vibrací se zaměřením na moderní integrované digitální akcelerometry.

V úvodní části jsou popsány možnosti měření zrychlení a vibrací za pomoci dostupných technických prostředků s ohledem na místo a účel nasazení.

V praktické části jsou změřeny charakteristiky použitého snímače zrychlení, je navržen a vyroben přípravek pro měření zrychlení a jsou změřeny a graficky interpretovány zrychlení a vibrace několika pokusných objektů.

## ***Annotation***

Diploma thesis is focused on principles of measuring the vibrations using accelerometers and using them for making vibration measuring instrument with focus on modern integrated digital accelerometers.

In the first part are described ways to measure acceleration and vibrations with available technical supplies with respecting place and purpose of measuring.

In practical part are measured characteristics of used sensor, instrument for measuring vibrations is designed and built and for few experimental object vibrations or acceleration are measured and graphical interpreted.

## ***Klíčová slova***

Vibrace, zrychlení, digitální akcelerometr, PWM modulace, mikrokontrolér, ADXL210, 8051F040

## ***Key words***

Vibrations, acceleration, digital accelerometer, PWM modulation, microcontroller, ADXL210, 8051F040

## ***Bibliografická citace***

DIBLÍK, J. *Měření vibrací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Viera Biolková.

# Prohlášení

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

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

V Brně dne 30. května 2008

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vieře Biolkové a konzultantovi Doc. Ing. Rudolfu Jaloveckému CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou, odbornou a v neposlední řadě i materiální pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....  
podpis autora

## Obsah:

1	Úvod	9
2	Fyzikální veličiny	9
3	Čidla zrychlení	9
3.1	Rozdělení čidel zrychlení	10
3.1.1	Čidla odporová	10
3.1.2	Čidla piezoelektrická	11
3.1.3	Čidla indukční	14
3.1.4	Čidla kapacitní	14
3.2	Připojení akcelerometrů k dalšímu obvodu	15
3.3	Simulace digitálního akcelerometru v Matlab SimuLinku	16
3.3.1	Použité modely	16
3.3.2	Výsledky simulace	19
4	Výběr a volba součástek pro praktickou realizaci	20
4.1	Výběr akcelerometru	20
4.1.1	Požadavky na akcelerometr	20
4.1.2	Zvolený akcelerometr	26
4.2	Volba mikroprocesoru	27
4.2.1	Procesor C8051F040	27
5	Návrh zapojení a desek plošných spojů	29
5.1	Obvodové řešení	29
5.2	Desky plošných spojů	33
6	Měření charakteristik akcelerometru ADXL210	35
6.1	Měření statických charakteristik akcelerometru ADXL210	35
6.2	Zhodnocení měření	42
7	Software pro mikrokontrolér	43
7.1	Základní princip měření	43
7.1.1	Čtení dat ze snímače	45
7.1.2	Zpracování zachycených dat	45
7.1.3	Odesílání dat	46
7.1.4	Obsluha klávesnice a displeje	47
7.1.5	Problémy při realizaci	48
8	Měření	49
8.1	Základní parametry přípravku	49
8.2	Přesnost a chyby měření	49
8.2.1	Chyby systematické	49
8.2.2	Chyba linearity	50
8.2.3	Chyby nahodilé	50
8.3	Provedená měření	51
8.3.1	Měření tíhového zrychlení	51
8.3.2	Praktická měření zrychlení a vibrací	51
9	Závěr	57
10	Použitá literatura	58

## Seznam obrázků:

Obr. 1: Princip čidla zrychlení s odporovým tenzometrem [1] .....	10
Obr. 2: Elektrické náhradní schéma piezoelektrického čidla [1].....	11
Obr. 3: Frekvenční charakteristika piezoelektrického čidla [1] .....	12
Obr. 4: Základní principy řešení piezoelektrických čidel [1].....	12
Obr. 5: Indukční čidlo zrychlení [1].....	14
Obr. 6: Kapacitní čidlo [2] .....	14
Obr. 7: Kapacitní akcelerometr při zrychlení [2] .....	15
Obr. 8: Náhradní schéma mechanické části akcelerometru.....	16
Obr. 9: Obvod modulace střídavy.....	17
Obr. 10: kompletní schéma pro simulaci digitálního akcelerometru.....	18
Obr. 11: Výsledky simulace.....	19
Obr. 12: Doporučené zapojení ADXL105 s nastavením citlivosti [2] .....	21
Obr. 13: PWM modulace pro 2 výstupní signály ADXL210 nebo ADXL202 [9].....	22
Obr. 14: Dekódovací procedura pro 2 signály PWM.....	23
Obr. 15: Doporučené zapojení ADXL210 [9].....	24
Obr. 16: Vnitřní zapojení ADXL321[2].....	25
Obr. 17: Pouzdro akcelerometru ADXL321 o rozměrech 4x4 mm .....	25
Obr. 18: Vnitřní zapojení akcelerometru ADXL 330.....	26
Obr. 19: Blokové schéma procesoru C8051C040 [7] .....	28
Obr. 20: Tabulka možných přiřazení portů k integrovaným perifériím [7].....	28
Obr. 21: Vývojová deska Cygnal C8081F040 [7].....	29
Obr. 22: Schéma zapojení procesorové desky.....	30
Obr. 23: Typické zapojení I2C sběrnice [7].....	31
Obr. 24: Schéma zapojení sériového rozhraní.....	31
Obr. 25: Schéma zapojení desky akcelerometru .....	32
Obr. 26: Zapojení desky LCD a tlačítek .....	32
Obr. 27: Návrh desky akcelerometru .....	33
Obr. 28: Návrh desky procesoru .....	33
Obr. 29: Návrh desky LCD a tlačítek.....	34
Obr. 31: Doporučení výrobce pro demodulaci PWM [2].....	37
Obr. 32: Převodní charakteristika akcelerometru ADXL210 v ose X na PWM výstupu.....	38
Obr. 33: Převodní charakteristika akcelerometru ADXL210 v ose X na analogových vstupech.....	38
Obr. 34: Převodní charakteristika akcelerometru ADXL210 v ose Y na PWM výstupu.....	40
Obr. 35: Převodní charakteristika akcelerometru ADXL210 v ose Y na analogových vstupech.....	40
Obr. 36: Skutečné průběhy na výstupu akcelerometru ADXL210 při zrychlení 4 g v prvním kanále.....	41
Obr. 37: Skutečné průběhy na výstupu akcelerometru ADXL210 při výpadku PWM modulace.....	41
Obr. 38: Rozjezd a zastavení osobního výtahu .....	52
Obr. 39: Rozjezd a zastavení nákladního výtahu .....	53
Obr. 40: Vibrace motoru stolního ventilátoru .....	54
Obr. 41, Obr. 42: Start motoru vozidla Trabant 601 .....	55

## 1 Úvod

Cílem této práce je návrh a realizace přípravku pro měření zrychlení a vibrací, který má být použit pro měření vibrací zmenšených funkčních modelů dopravních prostředků. Charakter vibrací těchto modelů je do značné míry podobný prostředkům v reálné velikosti a vlastnosti změřené na modelech mohou tedy být využity pro konstrukce a úpravy vzorů modelů. Zrychlení a vibrace jsou toutéž fyzikální veličinou, kdy vibrace jsou definovány jako amplitudově modulované zrychlení. K jejímu měření je nutný snímač zrychlení jako neelektrické veličiny. Základním úkolem měřiče zrychlení je převedení neelektrické veličiny na veličinu elektrickou a následně zpracování, aby informace byla srozumitelná jak pro počítač, tak měla vypovídací schopnost pro lidskou obsluhu.

## 2 Fyzikální veličiny

Zrychlením rozumíme časovou změnu lineární nebo úhlové rychlosti sledovaného objektu.

Jednotkou je  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , příp. při úhlovém pohybu (rotaci tělesa) úhlovou rychlost  $\omega$   $1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$ . U rovnoměrného kruhového pohybu je  $\omega = \text{konst.}$  ( $a \neq 0$ ).

U lineárního zrychlení:

$$a_x = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1.1)$$

Střední hodnotu lineárního zrychlení můžeme vyjádřit poměrem

$$\bar{a}_x = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Se zrychlením se setkáváme při nerovnoměrném pohybu těles a s tím souvisejícími dynamickými silami. Velikost těchto sil je

$$F = m \cdot a \quad (1.3)$$

## 3 Čidla zrychlení

Zrychlení je vázáno na pohyb a platnost druhého Newtonova zákona. U čidel se využívá působení Newtonovy síly na deformační člen nebo přímo na vlastní čidlo. Čidla zrychlení pracují tak, že se snímá síla nebo deformace (výchylna) vytvořená touto silou. Podobně jako u rychlosti, podle pohybu tělesa, jehož zrychlení měříme, můžeme tato čidla rozdělit na čidla pro lineární a pro úhlové zrychlení.

### 3.1 Rozdělení čidel zrychlení

Podle fyzikálního principu lze dělit čidla zrychlení dále do následujících skupin:

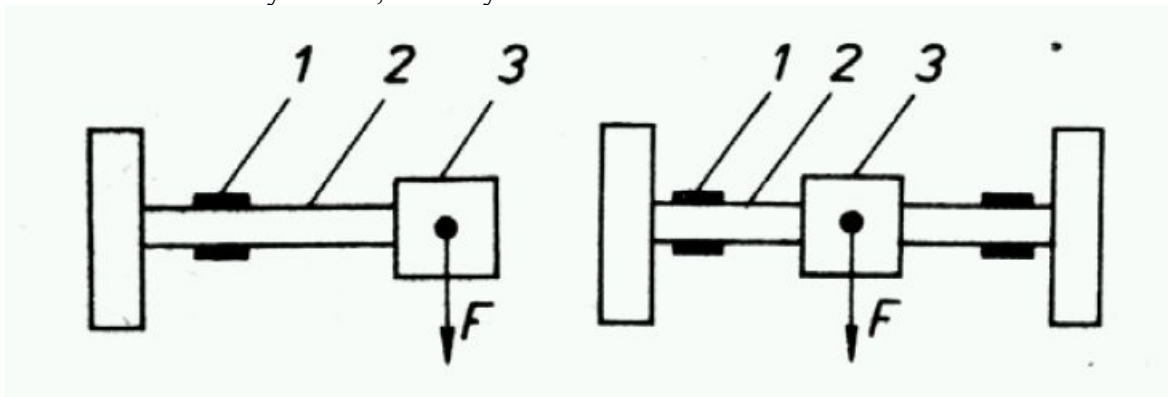
1. odporová – potenciometry, tenzometry
2. indukční
3. magnetoelastická
4. kapacitní
5. piezoelektrická
6. fotoelektrická
7. ostatní (světlovodná, fluidiková...)

Čidla zrychlení jsou konstruována pro pohyb jednosměrný nebo střídavý. Vyrábějí se jednosložková nebo vícesložková. Informaci o zrychlení tělesa můžeme získat také měřením časového průběhu výchylky (pomocí čidla polohy) nebo časového průběhu rychlosti (čidlem rychlosti). Výstupní signál z těchto čidel je třeba derivovat. Čidla zrychlení jsou dostupná v širokém rozsahu maximálních měřených hodnot zrychlení, a to od zlomků  $\text{m.s}^{-2}$  do  $10^6 \text{ m.s}^{-2}$ , při zachování linearit ve frekvenčním rozsahu  $10^{-1} - 10^5 \text{ Hz}$ . Pro většinu aplikací je důležitá hmotnost čidel zrychlení (především spodní hranice). Čidla s nejmenší hmotností váží řádově desítky gramů.

Z hlediska základních parametrů, působení parazitních vlivů atd. jsou nejvíce vyráběna a nejčastěji používána čidla tenzometrická a piezoelektrická.

#### 3.1.1 Čidla odporová

Využívá se odporových tenzometrů (kovových, polovodičových) pro měření mechanické deformace členu, na který působí zrychlení. Odporový tenzometr je vhodně uchycen (přilepen) do místa největší deformace. Základní konstrukční člen je většinou jednostranně nebo oboustranně vetknutý nosník, zatížený setrvačnou hmotou.



Obr. 1: Princip čidla zrychlení s odporovým tenzometrem [1]

Na obr.1 je princip čidla zrychlení s odporovým tenzometrem. Při působení zrychlení na čidlo je setrvačnou silou  $F$ , která vzniká v těžišti hmotnosti 3, ohýbán nosník 2. Deformace je snímána odporovými tenzometry 1, umístěnými na povrchu nosníku 2. Rezonanční frekvence deformačního členu je nastavena na požadovanou hodnotu a tlumena (magneticky, hydraulicky). Vysoké rezonanční frekvence, malé hmotnosti a velké citlivosti lze dosáhnout polovodičovým deformačním členem (křemík) s difúzně vytvořenými tenzometry.

### 3.1.2 Čidla piezoelektrická

Jako čidla zrychlení se používají velmi často. Elektromechanická transformace zrychlení na elektrický signál vyplývá z elektrického náhradního schématu na obr. 2. Členy mechanické strany zahrnují tzv. transformační konstantu  $k_b$ , pro kterou platí:

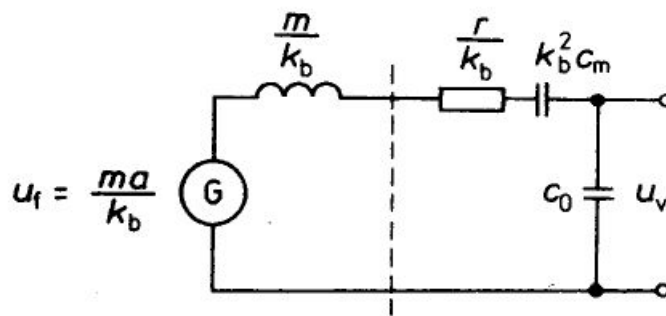
$$k_b = d_{33} \frac{A}{h} \cdot E \quad (2.4)$$

kde  $d_{33}$  je piezoelektrická konstanta při podélném piezoelektrickém jevu,  
 $A$  plocha piezoelektrického čidla,  
 $h$  tloušťka čidla a  
 $E$  modul pružnosti.

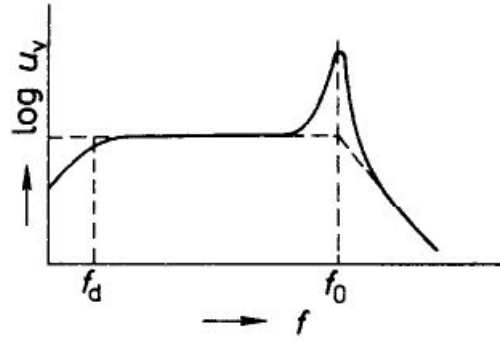
Pro napětí, které vznikne působením zrychlení  $a$ , platí:

$$u_f = \frac{m \cdot a}{k_b} \quad (2.5)$$

kde  $m$  je hmotnost setrvačné hmoty čidla a  $c_m$  poddajnost piezoelektrického členu.



Obr. 2: Elektrické náhradní schéma piezoelektrického čidla [1]



Obr. 3: Frekvenční charakteristika piezoelektrického čidla [1]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_m}{m}} \quad (2.6)$$

Výstupní napětí čidla  $u_v$  je přímo úměrné zrychlení, které působí na hmotu o hmotnosti  $m$  a pokud

$C_0 \gg k_b^2 \cdot c_m$  je výstupní napětí čidla

$$u_v = \frac{k_b \cdot m}{k_b^2 \cdot c_m + C_0} \quad (2.7)$$

kde:

$C_0$  je kapacita čidla

$k_b$  konstanta převodu zrychlení

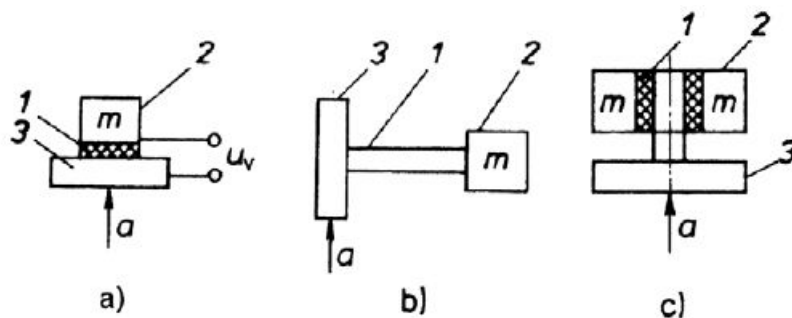
$c_m$  je poddajnost piezoelektrického členu

Napěťová citlivost čidla je definována jako:

$$S_u = \frac{u_v}{a} \quad (2.8)$$

Mezi napěťovou a nábojovou citlivostí platí:

$$S_q = C_0 \cdot S_u \quad (2.9)$$



Obr. 4: Základní principy řešení piezoelektrických čidel [1]

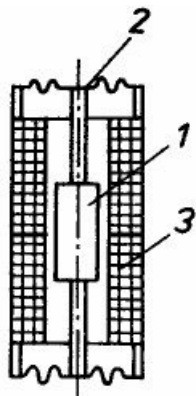
Základní principy konstrukčního řešení piezoelektrických čidel zrychlení jsou na obr. 4. Uspořádání na obr. 4a využívá podélného piezoelektrického jevu s piezoelektrickým členem 1, na němž je uchycena setrvačná hmota 2. Obě části jsou uchyceny na základně 3. V tomto uspořádání jsou používány především piezokeramické materiály, protože mají při podélném piezoelektrickém jevu větší citlivost.

Na obrázku obr. 4b je uspořádání s piezoelektrickým členem 1, který je jednostranně vetknut v základně 3. Na volném konci piezoelektrického členu je upevněna setrvačná hmota 2. Toto uspořádání je velmi vhodné pro velmi lehká čidla s velkou citlivostí a poměrně nízkou rezonanční frekvencí. Ohybový člen bývá obvykle složen ze dvou prvků (dvojče) se samostatnými elektrodami, které jsou zapojeny paralelně nebo sériově. Výhodou sériového zapojení je vyšší výstupní napětí. Výhodou paralelního zapojení je větší kapacita, lepší stínění vnějšími elektrodami při asymetrickém výstupu a možnost vetknutí dvojčete do kovové základny 3. Většinou bývá piezoelektrický člen vetknut oboustranně. Na obou koncích podepřené dvojče má větší tuhost a tedy vyšší rezonanční frekvenci.

Na obr. 4c je uspořádání čidla s piezoelektrickými členy 1 namáhanými na střiž. Silové působení je vytvořeno hmotou závaží 2. Obě části jsou uchyceny na základně 3. V tomto případě se obvykle získá součinitel elektromechanické vazby větší než pro příčný piezoelektrický jev. Běžně se vyrábějí diferenční čidla.

### 3.1.3 Čidla indukční

Využívá se obvykle indukčních čidel polohy, kde část magnetického obvodu nebo cívka vytváří současně setrvačnou hmotu.

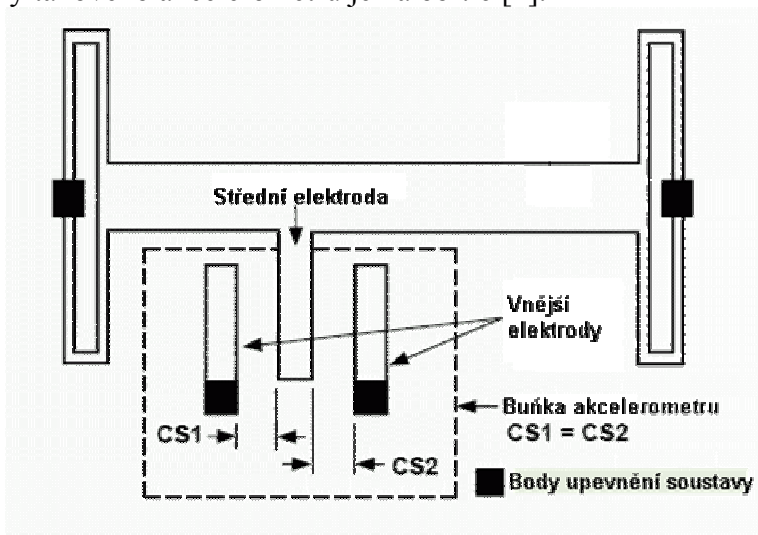


Obr. 5: Indukční čidlo zrychlení [1]

Princip indukčního čidla zrychlení je na obr. 5. Jádru 1 je uchyceno ve středu cívkového systému 3 (diferenční uspořádání) na dvou membránách 2. Při působení zrychlení ve směru osy čidla se jádro posouvá a mění se indukčnost obou cívek. Změna je převedena např. v můstkovém zapojení na elektrický signál. Jsou vhodná pro aplikace, kde používáme analogová čidla polohy s příslušnými obvody pro napájení a vyhodnocení.

### 3.1.4 Čidla kapacitní

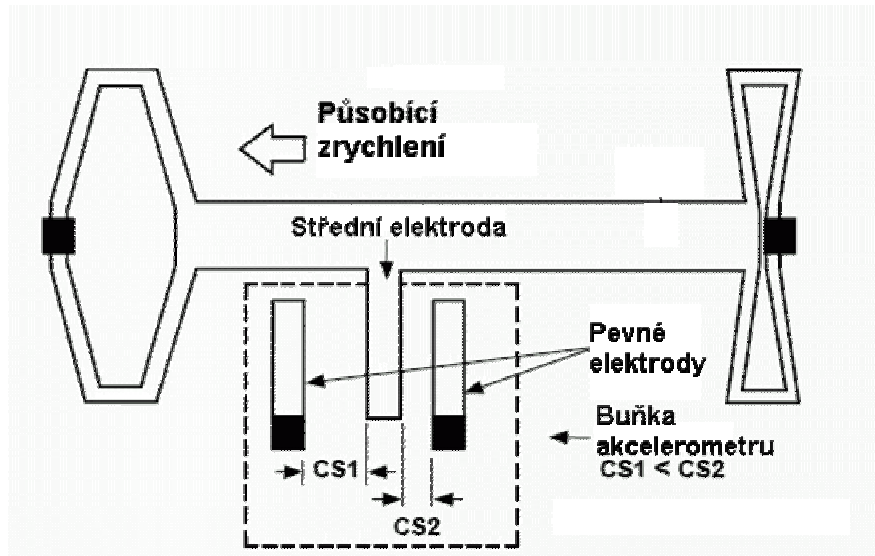
Princip kapacitních čidel je často používán v moderních integrovaných měřicích zrychlení. Schéma jedné buňky takového akcelerometru je na obr. 6 [2].



Obr. 6: Kapacitní čidlo [2]

Jedná se o jednu buňku akcelerometru ADXL05. Celá struktura tohoto obvodu obsahuje 46 takových buněk.

Jedná se o diferenční kapacitní snímač. Pevné desky jsou buzeny obdélníkovým protifázovým signálem. Pokud jsou kapacity kondenzátorů stejné, tedy za nulového zrychlení  $a=0$  je i napětí na střední elektrodě nulové.



Obr. 7: Kapacitní akcelerometr při zrychlení [2]

Při zrychlení se střední elektroda přiblíží k některé z pevných desek. To způsobí nerovnost kapacit elementárních kondenzátorů. Nerovnost kapacit má za následek nenulové napětí na střední pohyblivé desce. Amplituda výstupního signálu je závislá na velikosti působícího zrychlení, jeho fáze pak díky protifázovému buzení pevných desek vypovídá o směru působící síly.

### 3.2 Připojení akcelerometrů k dalšímu obvodu

Moderní akcelerometry mají ve většině případů na vlastním čipu součástky naintegrované převodník do některého ze standardních kódů, a přímo tedy poskytují kromě napětí z diferenčního kondenzátoru i některý z dalších standardních kódů. Běžně se na výstupech měřičů zrychlení objevují signály s poměrem střídavosti, které jsou bez problémů zpracovatelné v jakémkoliv mikrokontroléru pomocí jednoduché vzorkovací procedury na některém ze vstupů. Při vzorkování dochází k chybě:

$$T_{ch} = \frac{200 \cdot t_s}{\sqrt{6 \cdot t_m \cdot t_p}} \quad (2.10)$$

kde

$T_{ch}$  = chyba měření (obdobu kvantizačního šumu)

$t_s$  = vzorkovací perioda mikrokontroléru

$t_m$  = celkový čas měření

$t_p$  = perioda výstupního signálu senzoru

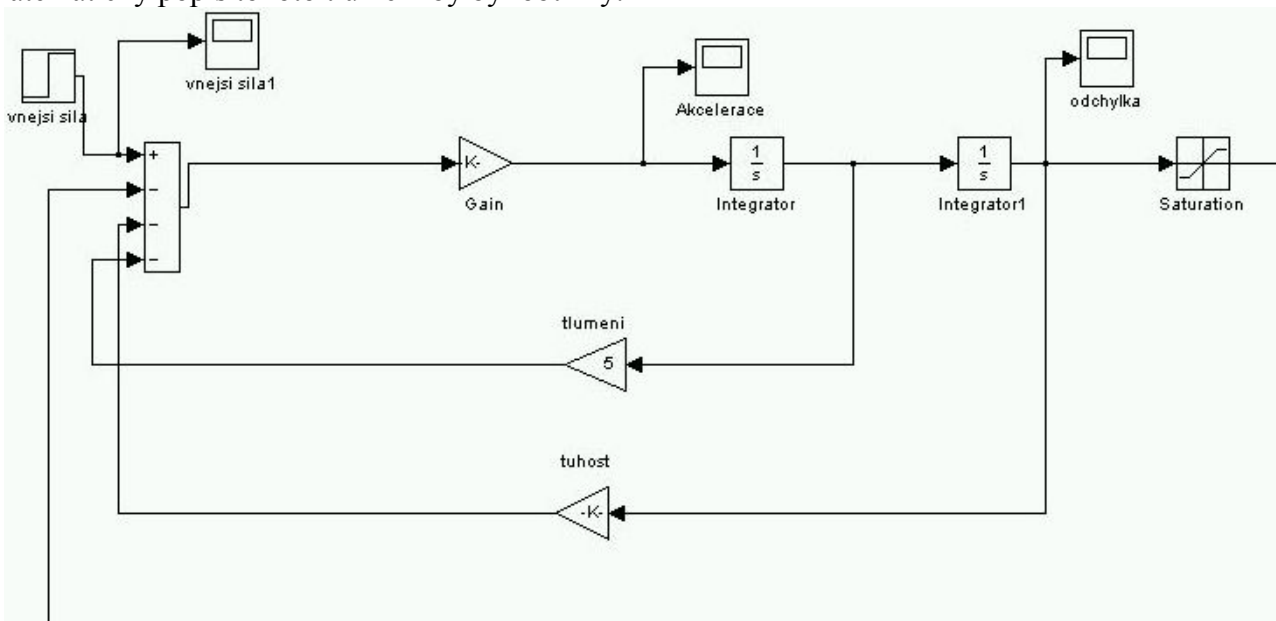
Tato chyba však bude zanedbatelná ve srovnání s vlastní chybou senzoru za předpokladu přesného odečtení periody a aktivní doby signálu, tedy dostatečně jemné vzorkovací periodě mikrokontroléru.

### 3.3 Simulace digitálního akcelerometru v Matlab SimuLinku

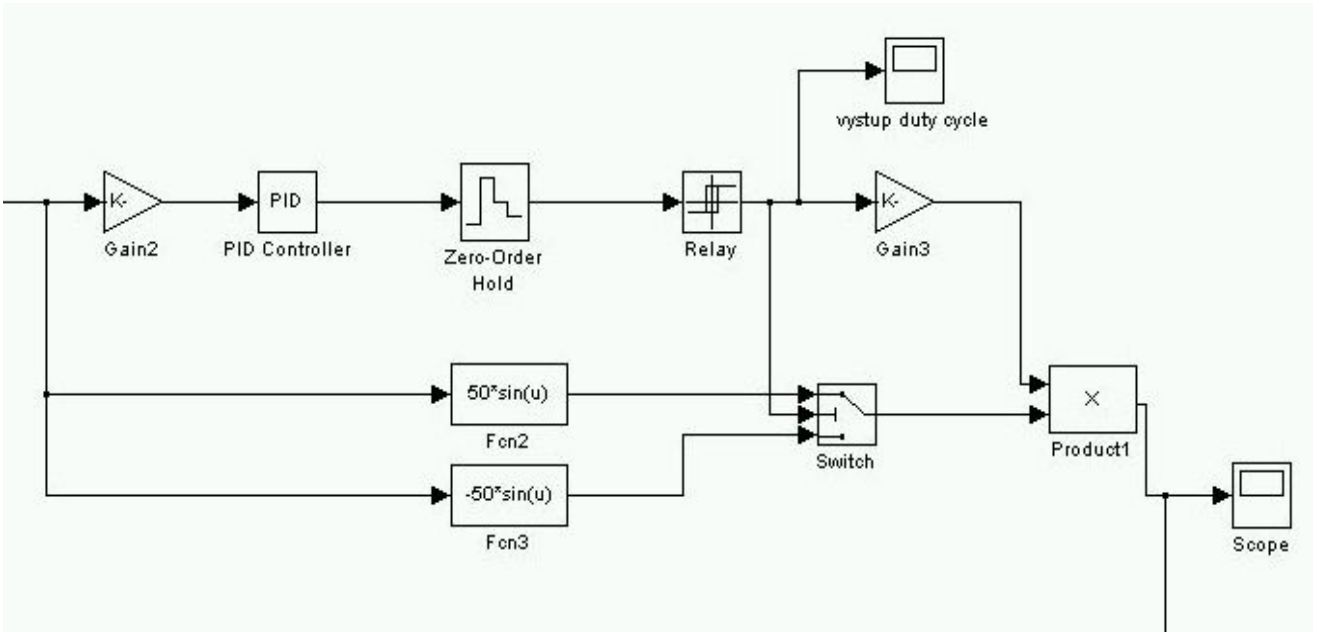
#### 3.3.1 Použité modely

Pro akcelerometr byly použity tyto modely:

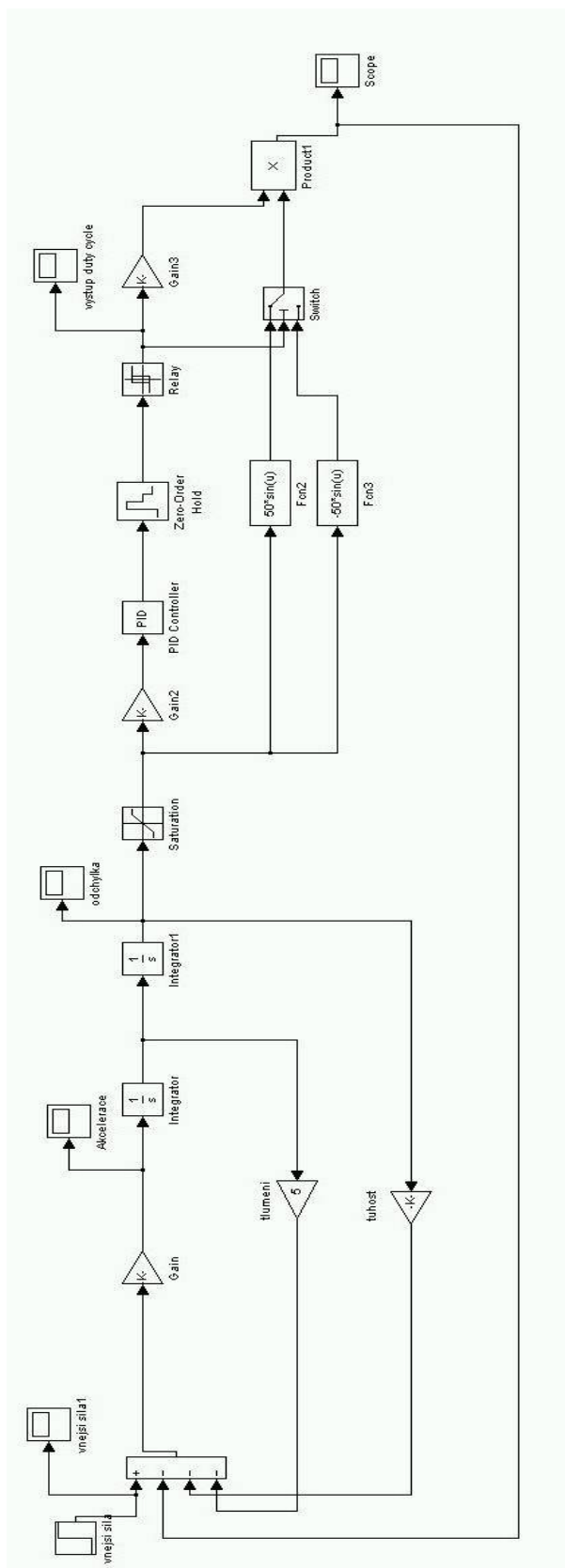
pro mechanickou část akcelerometru bylo s pomocí internetových zdrojů a dokumentace STlabs [3] vytvořeno náhradní schéma na obr. 8. Citlivost na vnější podněty, tuhost mechanického systému a jeho tlumení jsou simulovány zpětnými vazbami. Pro jednoduchost byl celý systém pojat jako lineární, pro lepší výsledky by musel být použit nelineární model. Nejvíce by se nelinearita projevila na tlumení systému. V reálném zařízení je systém zatlučen vzduchem a matematický popis tohoto tlumení by byl obtížný.



Obr. 8: Náhradní schéma mechanické části akcelerometru



Obr. 9: Obvod modulace střídá



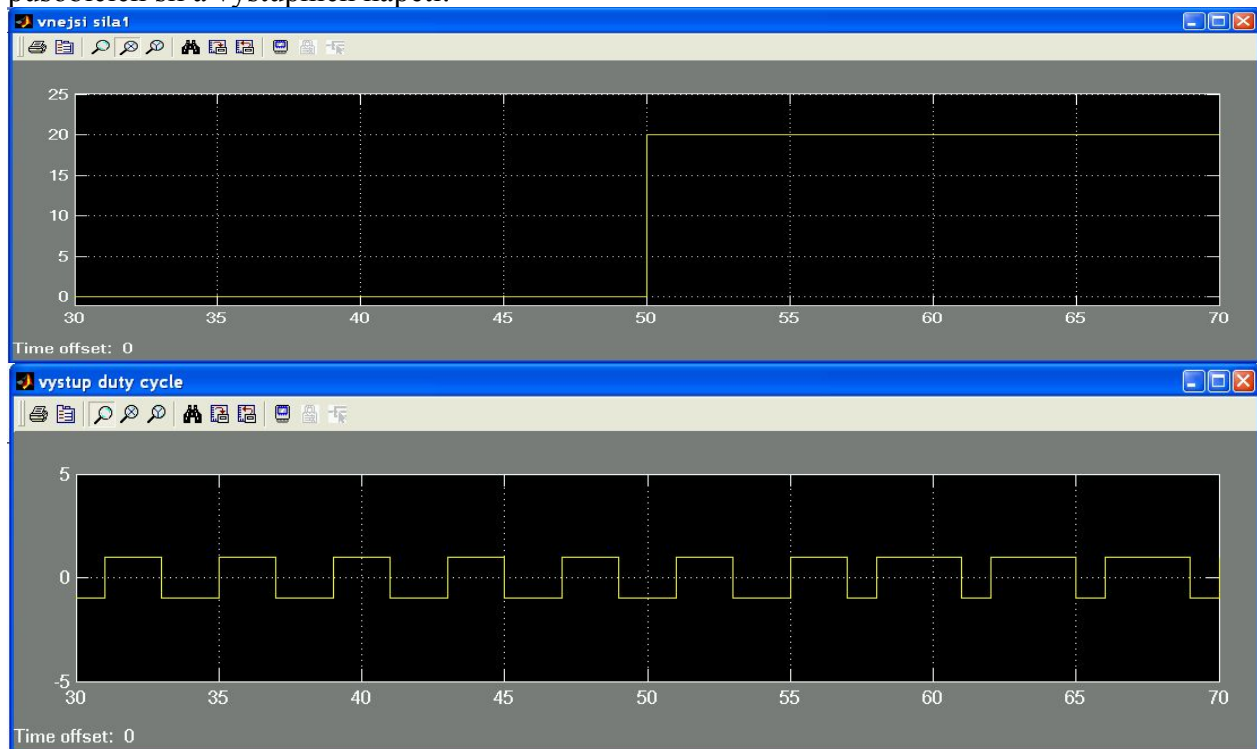
Obr. 10: kompletní schéma pro simulaci digitálního akcelerometru

Pro obvod modulační střídy bylo použito upravené schéma na obr. 9. sestavené s pomocí internetových zdrojů. Jako funkce napětí na elektrodách byly použity sinusoidy, které jsou použity i v reálných obvodech. PID regulátor byl nastaven jako proporcionálně integrační,  $P=1$  a  $I=1$ . Reléová charakteristika byla řízena průchodem signálu 0 a měla výstupy 1 a  $-1$  aby výstupem bylo možné

řídít přepínač. Výstup mechanické části modelu musí mít při nulovém zrychlení nulovou střední hodnotu. Toho je dosaženo při nastavení počátečních podmínek integrací na  $c1=0$  a  $c2=-1$ .

### 3.3.2 Výsledky simulace:

Za výsledky simulace v Matlabu je možné považovat grafické výstupy, zobrazující průběhy působících sil a výstupních napětí:



Obr. 11: Výsledky simulace

V průbězích je vidět princip činnosti zařízení. Reakce zařízení vykazuje mírné zpoždění, které je dáno modelem mechanických vlastností systému. Velikost vnější síly odpovídá přibližně čtvrtině rozsahu akcelerometru.

Simulace tohoto typu je použitelná pouze pro demonstrativní účely, pro skutečné výsledky by bylo potřeba do schématu zanést skutečné hodnoty a dříve zmiňované nelinearity, které však nejsou známé.

Pro lepší výsledky je možné použít simulace pomocí modulu dodávaných přímo výrobcí (volně ke stažení na internetových stránkách). Tyto simulace však bohužel vyžadují jinou verzi SimuLinku a nemohu tedy konfrontovat výsledky. Tyto modely jsou poměrně dokonalými obrazy skutečných obvodů a to včetně měření zrychlení ve více osách.

## 4 Výběr a volba součástek pro praktickou realizaci

### 4.1 Výběr akcelerometru

Jako jeden z nejdůležitějších a limitujících parametrů pro praktickou realizaci zařízení je dostupnost použitých součástek. Při zahrnutí požadavku na dostupnost čidel do výběru zůstávají jako jediná možnost akcelerometry z řady ADXL od firmy Analog Devices. Proto se dále budu zabývat výhradně součástkami od tohoto výrobce.

#### 4.1.1 Požadavky na akcelerometr

Za základní parametry akcelerometrů lze považovat :

1. Maximální rozsah měřené hodnoty
2. Horní mezní kmitočet
3. Počet os

Požadavek na rozsah byl zadán minimálně  $\pm 5g$ , tedy zrychlení v rozsahu  $\pm 49ms^{-2}$ , horní mezní kmitočet  $f_{max}=500$  Hz a libovolný počet os, ve kterých bude zrychlení měřeno.

Těmto požadavkům vyhovují následující akcelerometry:

1. ADXL05,
2. ADXL105
3. ADXL210
4. ADXL321
5. tříosé akcelerometry

##### 4.1.1.1 ADXL05

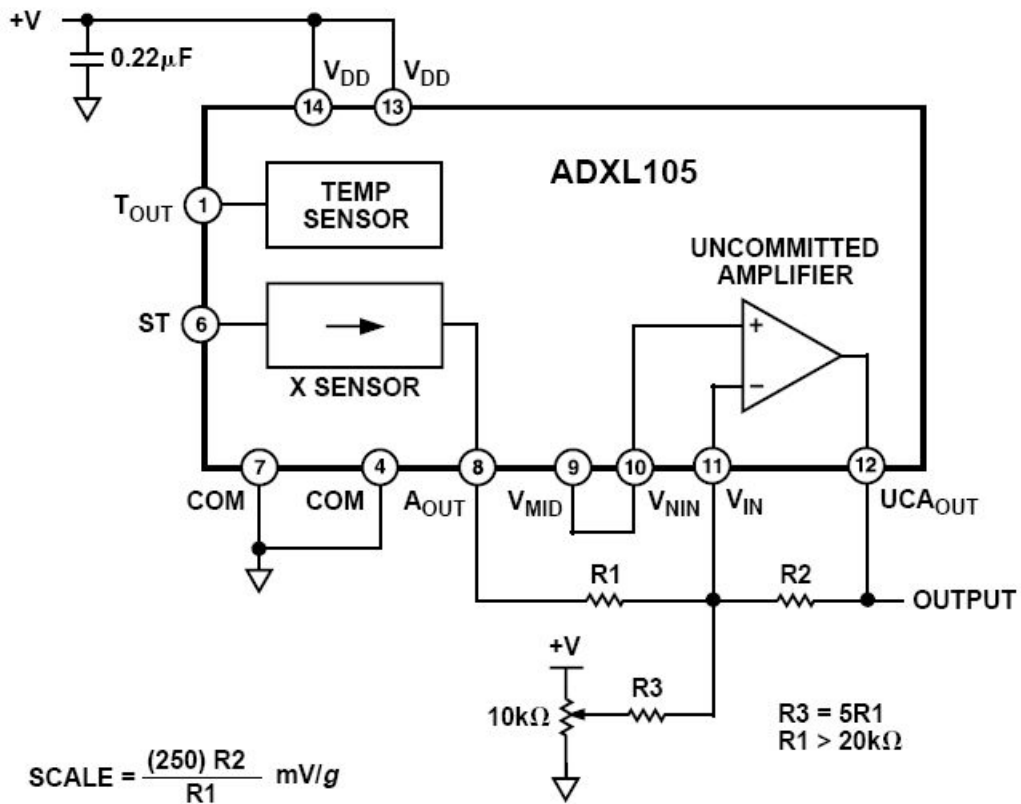
Jedná se o základní akcelerometr s nastavitelným měřicím rozsahem v rozpětí  $\pm 1g$  až  $\pm 5g$ . Výrobce udává horní mezní kmitočet  $f_{max}=4$  kHz, výstup akcelerometru je napěťový. Akcelerometr by tedy byl vhodný pro danou aplikaci, jedná se ovšem o starý typ součástky, který již je na trhu nedostupný a je nahrazený typem ADXL105.

##### 4.1.1.2 ADXL105

Akcelerometr je v podstatě shodný s typem, který nahrazuje. Má lepší šumové parametry, je doplněn o nezávislý operační zesilovač ve stejném pouzdře, který je možno využít pro oddělení dalšího obvodu od vlastního výstupu. Obvod je v běžném keramickém SMD pouzdře QC14., je tedy vhodný i z hlediska jednoduché montáže.

Horní mezní kmitočet se nastavuje na požadovaný jedním kondenzátorem, který tvoří s vnitřím odporem výstupu dolní propust a zabraňuje tak aliasingu v případě vzorkování výstupního signálu.

V pouzdře je navíc naintegrované i čidlo teploty, které umožňuje korekci teplotní závislosti snímače. Akcelerometr je tedy vhodný i pro velmi přesná měření, chyba způsobená teplotou může dosahovat přibližně  $\delta=1\%$  [2].



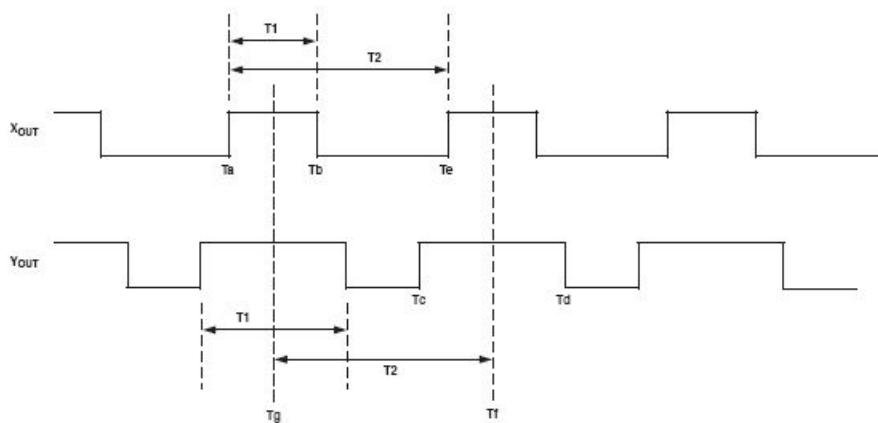
Obr. 12: Doporučené zapojení ADXL105 s nastavením citlivosti [2]

Tento akcelerometr je tedy vhodný pro danou aplikaci, bohužel není momentálně dostupný a je nutné použít jiný typ.

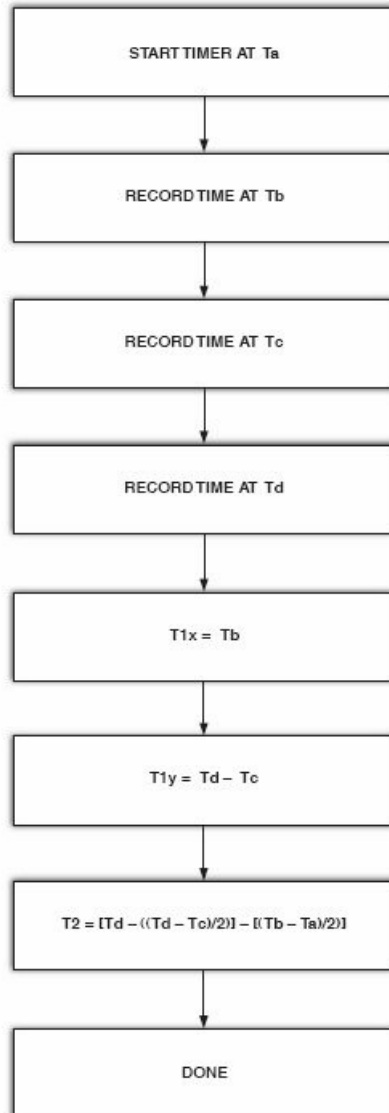
#### 4.1.1.3 ADXL 210 a ADXL202

Jedná se o dvouosé akcelerometry s rozsahem  $\pm 2g$  v případě ADXL202 a  $\pm 10g$  u ADXL210. Jedná se o identické obvody, takže v případě, kdy by se ukázal rozsah akcelerometru ADXL210 jako příliš hrubý, je možné ho jednoduše nahradit snímačem ADXL202.

Snímače mají horní mezní kmitočet  $f_{max}=5$  kHz, oproti předešlým typům jsou doplněny o výstupy s modulací „duty cycle“ neboli PWM. Horní mezní kmitočet modulátoru PWM je závislý na nastavení snímače a jeho mezní hodnota je  $f_{maxpwm}=500$  Hz. Tuto modulaci je možné výhodně využít v mikroprocesorech, kdy jsou k dekódování použity časovače a čítače k jednoduchému odměření časových intervalů mezi hranami signálů (procesor musí mít vstupy pro přerušení řízené hranou) a následným jednoduchým výpočtem. [2]



Obr. 13: PWM modulace pro 2 výstupní signály ADXL210 nebo ADXL202 [9]

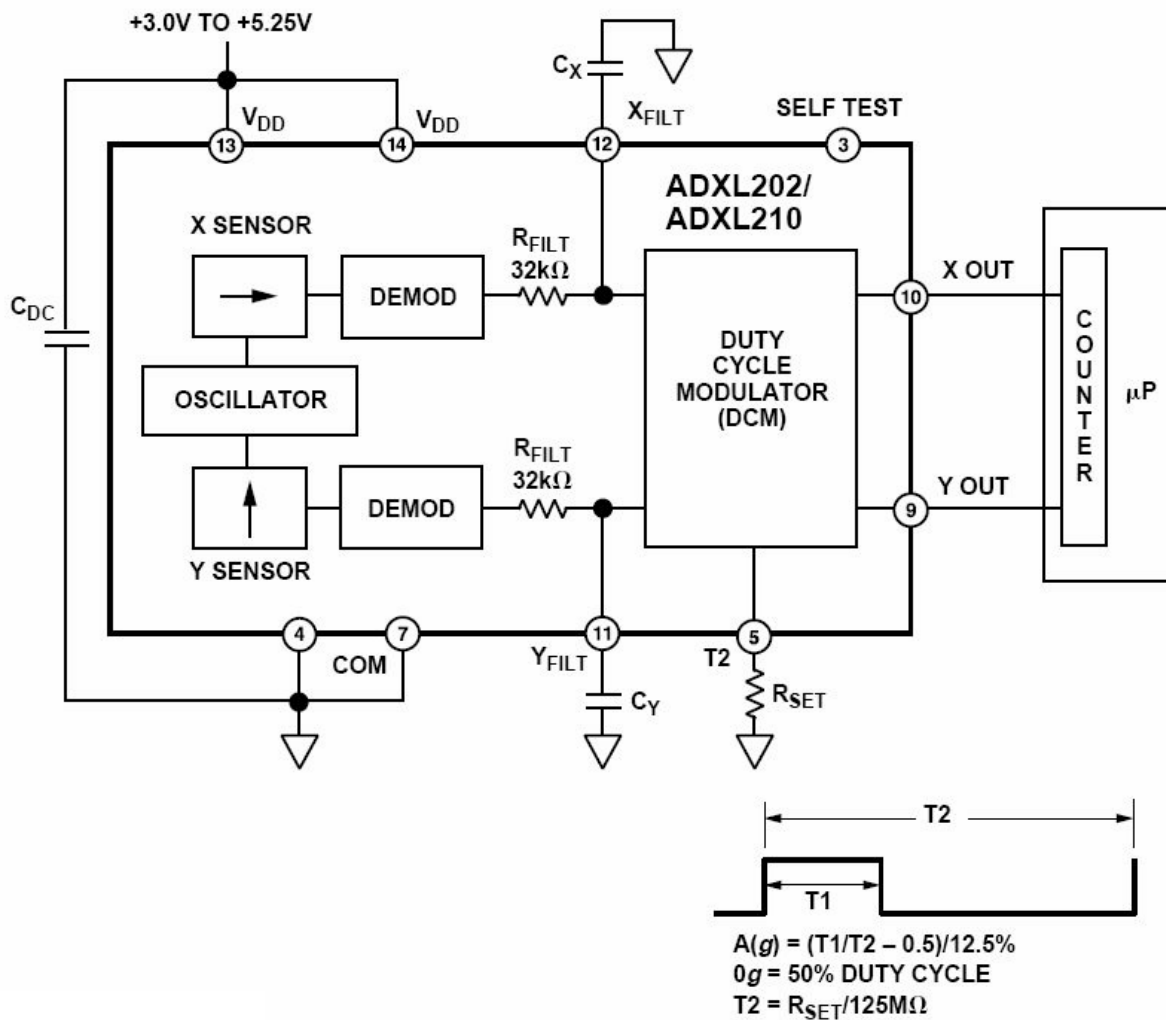


Obr. 14: Dekódovací procedura pro 2 signály PWM

Tato procedura by umožnila vysokorychlostní dekódování obou kanálů akcelerometru najednou. Perioda signálu je v tomto případě snímána pouze z jednoho z průběhů, předpokládá se stejná perioda obou výstupních modulovaných signálů. Tato metoda vyžaduje mnoho vstupů pro přerušení dekódujícího  $\mu\text{P}$ , přerušení, schopná reagovat na vzestupnou i sestupnou hranu nebo snímat kanály v multiplexním provozu, případně několik čítačů pracujících v záchytném režimu s možností reakce na vybranou hranu. Vhodnou metodu je potřeba zvolit podle typu dekódujícího mikroprocesoru.

U předchozích typů zmiňovaný analogový výstup zde zůstává zachován (výstupy  $X_{\text{filt}}$  a  $Y_{\text{filt}}$ ) a je možné jej využít například pro zpracování A/D převodníkem. Analogový výstup je možné odebírat přímo ze snímače, ten má ovšem výstupní odpor  $R_{\text{out}}=32 \text{ k}\Omega$ . Je tedy nutné zajistit, aby tento výstup nebyl zatížen.

Analogový výstup je také možné vytvořit z výstupů s modulací PWM (výstupy  $X_{out}$  a  $Y_{out}$ ) zařazením vhodné dolní propusti.



Obr. 15: Doporučené zapojení ADXL210 [9]

#### 4.1.1.4 ADXL321

Jedná se o dvouosý akcelerometr s rozsahem  $\pm 18g$  s analogovým výstupem bez modulace PWM: Akcelerometr je nevhodný z hlediska příliš velkého rozsahu, který by nebyl využit a zbytečně by se tak zvyšovala chyba měření.

Vnitřní zapojení akcelerometru je obdobné jako u předešlého typu.

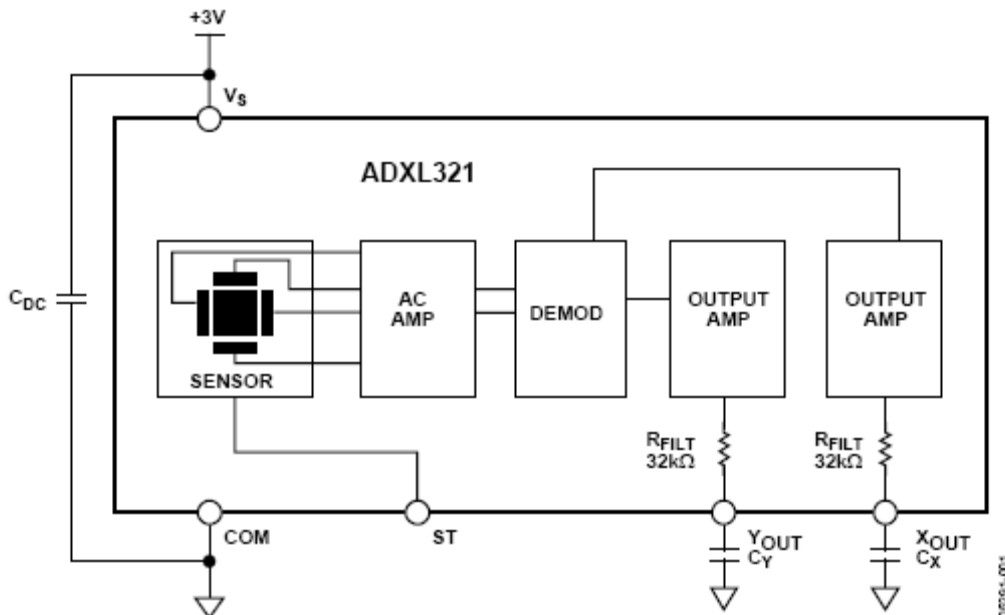
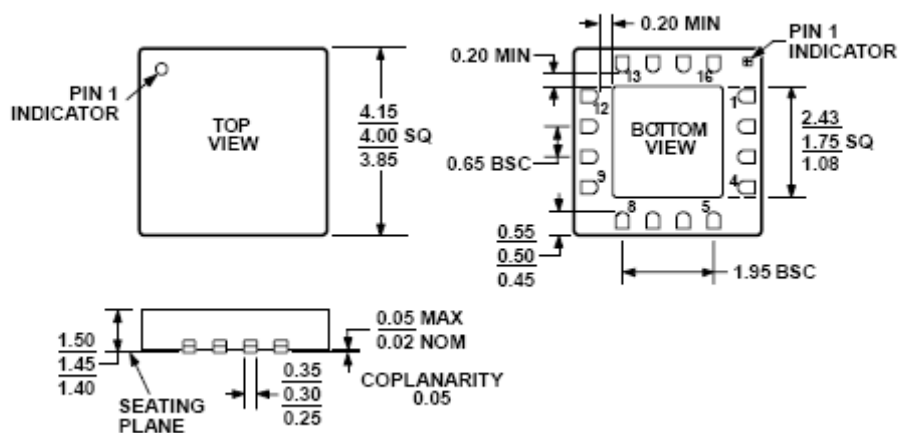


Figure 1.

Obr. 16: Vnitřní zapojení ADXL321[2]

Tento obvod je pouzřen do pouzdra typu „LFSCP“ o rozměrech 4x4x1,25 mm s vysokou hustotou vývodů, vyvedených z pouzdra pod vlastní obvod. Tato konstrukce v podstatě znemožňuje ruční připájení obvodu. Tato vlastnost naopak může být výhodná při požadavku na extrémní miniaturizaci zařízení.



Obr. 17: Pouzdro akcelerometru ADXL321 o rozměrech 4x4 mm

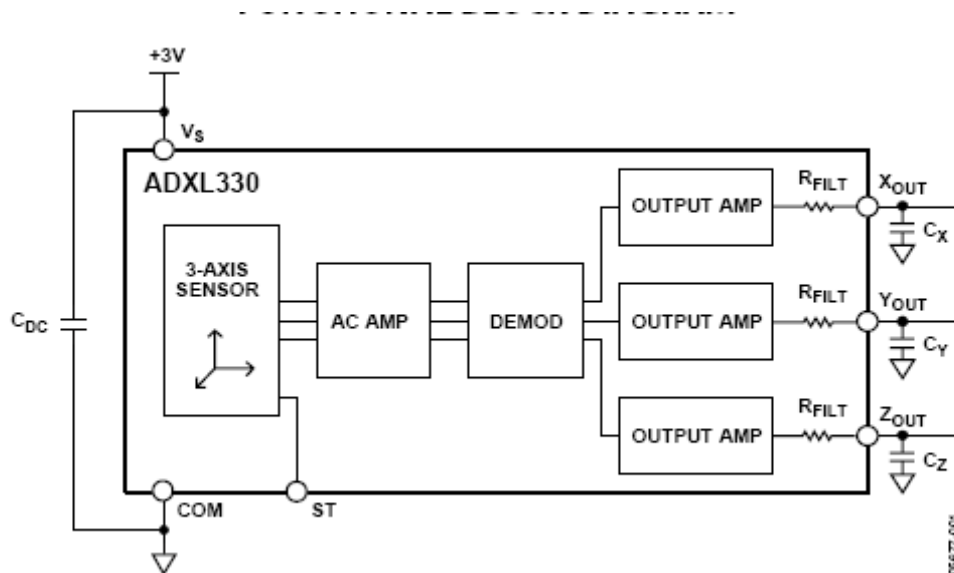
Oproti předchozímu má výhodu v širším rozsahu napájecího napětí, tento obvod je schopen pracovat v rozsahu napájecích napětí 2,4 – 6V. Díky tomu by mohl být napájen z většiny typů vývojových desek jednočipových mikrokontroléru.

Díky extrémně malým rozměrům, které neumožní ruční osazení a absenci výstupu s modulací PWM tento obvod není vhodný.

#### 4.1.1.5 Třfosé akcelerometry

Jejich zástupcem může být akcelerometr ADXL330, který umožňuje měřit zrychlení do 3g ve všech osách. Tyto akcelerometry jsou ve většině případů dostupné pouze v miniaturních pouzdrech. Jsou dostupné s výstupy analogovými, s modulací PWM i s použitím rozhraní I2C nebo SPI.

Vnitřní zapojení je v podstatě shodné s předchozím typem akcelerometru, jen je doplněno o obvody třetí osy.



Obr. 18: Vnitřní zapojení akcelerometru ADXL 330

Použití těchto snímačů je problematické z hlediska nároků na zpracování výstupních signálů v mikroprocesoru, na který kladou vysoké nároky. Je také problém s jejich dostupností v maloobchodní síti. Z těchto důvodů se jimi v této práci nazabývám

#### 4.1.2 Zvolený akcelerometr

Po zvážení všech parametrů snímačů vzhledem k požadovaným parametřům, možností použití a dostupnosti byl jako vhodný zvolen snímač ADXL210 s možnou náhradou citlivějším ADXL202.

Pro tyto snímače budou navržena obvodová řešení i desky plošných spojů.

## 4.2 Volba mikroprocesoru

Mikroprocesor musí splňovat několik požadavků. Především musí být schopen zpracovat signály ze snímače, tedy musí mít buď možnost připojení nebo vestavěný A/D převodník, v případě zpracování signálů PWM jsou zapotřebí alespoň 2 vstupy pro vnější přerušování nebo dva nezávislé čítače pracující v záchytném režimu, které umožní selektivní reakci na vzestupnou i sestupnou hranu signálu. Dalším požadavkem je možnost připojení nebo vestavěný kontrolor sběrnice pro výdej dat. Zde se jedná o požadavek výstupu dat na sběrnici I2C nebo po sériové lince typu UART.

Jako optimální se jeví varianta procesoru s integrovaným programovatelným polem čítačů a kontrolory příslušných sběrnic pro výstup dat.

Nároky na výpočetní výkon jsou značné, protože při zpracování měřených dat bude zapotřebí více než 8bitového rozlišení kvůli snížení kvantizační chyby, při použití signálů PWM se objevuje požadavek na dělení 16bitových čísel, které je velmi časově náročné.

Pro realizaci byl doporučen procesor s jádrem 8051, konkrétně výrobek Silabs C8051F040.

### 4.2.1 Procesor C8051F040

Jedná se o procesor založený na ověřeném 8bitovém jádře s integrovanými komponenty pro vstupy a výstupy. Tento procesor obsahuje periferie vhodné pro zadanou úlohu[7]:

1. 12bitový A/D převodník se 13 multiplexovanými vstupy,
2. Sběrnice SPI
3. Sběrnice I2C
4. 2 seriové linky
5. Programovatelné pole časovačů/čítačů, čítače mohou pracovat v záchytném režimu.

Vstupy a výstupy všech komponentů se připojují pomocí vnitřních softwarově ovládaných přepínačů k některému z 8 vstupně-výstupních portů, a to podle pravidel určených v [7]. Nastavení přepínačů je realizováno pomocí speciálních funkčních registrů (SFR).

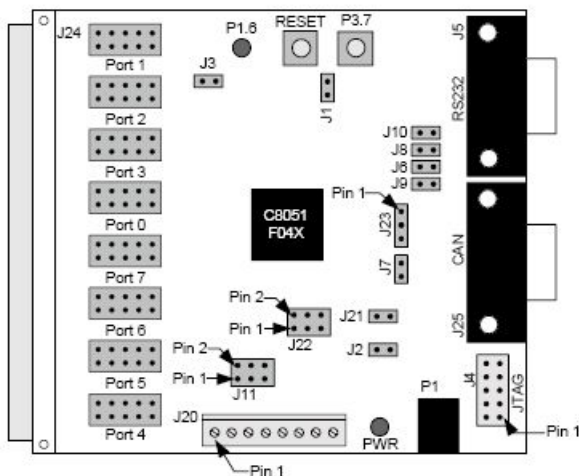
Procesor dále obsahuje 5 16bitových čítačů-časovačů. 64kB paměti FLASH pro program a 4352B paměti RAM.

Taktovací kmitočet procesoru je až 25MHz. Tím je zajištěn dostatečný výpočetní výkon.

Nominální napájecí napětí procesoru je  $U_{nap}=3,3$  V. Všechny vstupně-výstupní linky jsou 5V tolerantní, bez problémů tedy lze procesor spojit s většinou běžných logických obvodů.



integrovaný oscilátor. Veškeré porty a ostatní rozhraní jsou vyvedeny na konektory, systémový 96pinový konektor potom umožňuje přímé spojení s dalším zařízením.



Obr .21: Vývojová deska Cygnal C8081F040 [7]

## 5 Návrh zapojení a desek plošných spojů

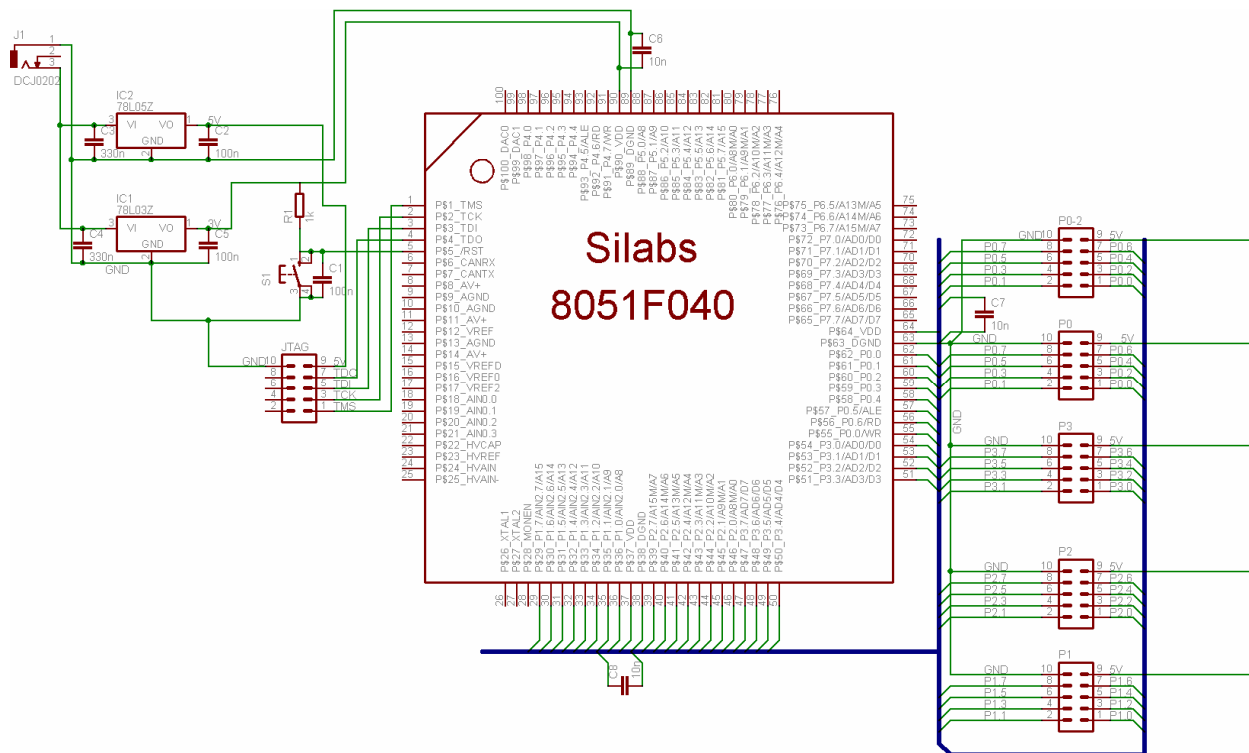
Vzhledem k požadavku na modularitu systému jsou jednotlivé navržené komponenty na samostatných deskách plošných spojů. Hlavním požadavkem je rozměrově malá soustava, schopná měřit zrychlení a změřené hodnoty odesílat po komunikačním rozhraní k dalšímu zpracování. Pro tyto účely vznikla deska akcelerometru a deska sériového rozhraní. Deska s akcelerometrem je samostatná z důvodu potlačení nežádoucích vibrací, malá deska je méně náchylná k rezonanci než velká, společná pro více zařízení. Dále vznikla deska s LCD modulem a několika tlačítky.

Při připojení části s LCD displejem a tlačítky se soustava chová jako běžný měřicí přístroj, kterému stále zůstává možnost rychlého odesílání dat. Část s tlačítky a displejem však není vyžadována pro provoz a může být za provozu odpojena i připojena, inicializaci displeje je možné vyvolat příslušným povelům z klávesnice a je tak možné například bez pomoci počítače hrubě prohlédnout data za určité období měření.

Vše je připojeno k procesorové desce, která zajišťuje zpracování dat a napájení jednotlivých komponent.

### 5.1 Obvodové řešení

Obvodové řešení všech částí přípravku je jednoduché. Vesměs se jedná o pouhé propojení všech částí a zajištění jejich napájení.



Obr. 22: Schéma zapojení procesorové desky

Zapojení procesorové desky obsahuje obvody pro zajištění napájení, filtrační kondenzátory, tlačítko reset pro případ, že bude nutné vyvolat restart mikrokontroléru, konektory pro připojení periférií a samotný mikrokontrolér. Procesorovou desku je možné díky použití stabilizátorů 78LXX napájet napětím 7-35V. Tyto hodnoty jsou dány minimálním napájecím napětím obvodu 78L05 a maximem pro oba obvody podle maximálního napájecího napětí obvodů této řady.

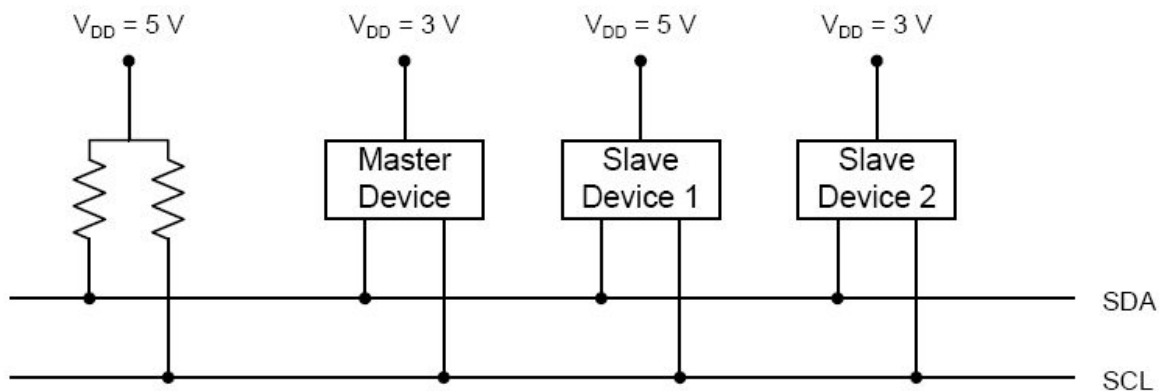
Tato část přípravy má kromě zpracování dat za úkol i napájení ostatních částí zařízení. Proto jsou na konektory periférií vyvedeny i vodiče GND a +5V.

Procesor je připojen pouze nejn nutnějšími vývody, tedy vývody pro napájecí napětí, blokovány proti zemi kondenzátory s malou kapacitou, vývody portů pro připojení periférií a rozhraním JTAG pro upload programu.

Krystalový oscilátor není nutný, procesor má vlastní integrovaný oscilátor s kmitočtem nastavitelným pomocí SFR registrů.

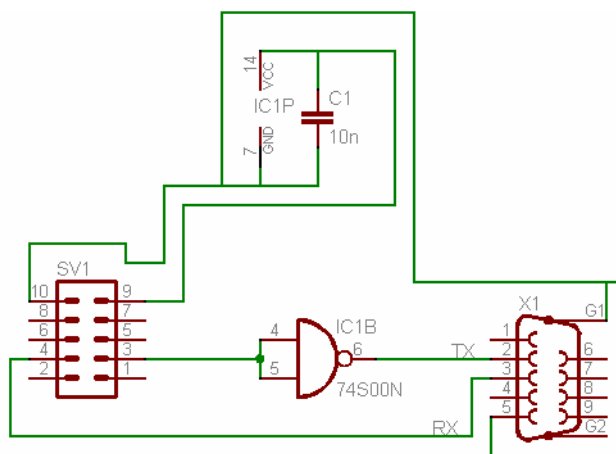
Místo zde nastíněné procesorové desky byla pro konstrukci využívána vývojová deska od výrobce Silabs. Tato část vykazovala oproti navržené některé rozdíly. Hlavní rozdíl spočíval ve výstupním napětí napájecích pinů na konektorech pro periférie, které zde bylo 3V namísto uvažovaných 5V. Periférie tedy musely být přizpůsobeny pro nižší napájecí napětí, případně byly napájeny jinak.

Pro výstup dat z mikrokontroléru může být použita sběrnice I2C, případně seriové rozhraní.



Obr. 23: Typické zapojení I2C sběrnice [7]

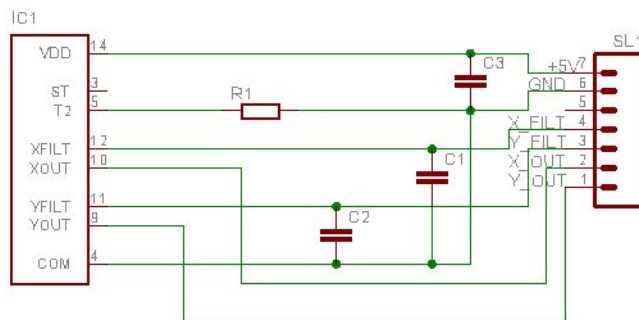
Použitý jednočipový mikrokontrolér obsahuje integrované rozhraní pro komunikaci po sběrnici I2C. na Obr. 20 je znázorněna topologie zapojení více zařízení na sběrnici I2C. Rezistory připojené na napájecí napětí je zde však možné vynechat v případě, že budou v procesoru pomocí SFR registrů povoleny tzv. „Weak pull-up“ rezistory. Použití rozhraní I2C sběrnice je z obvodového hlediska bezproblémové.



Obr. 24: Schéma zapojení sériového rozhraní

Mikrokontrolér také obsahuje rozhraní sériové linky. Vnější rezistory opět nejsou třeba v případě povolení rezistorů vnitřních. Jediný požadavek pro korektní funkci sériové linky je inverze výstupních úrovní. Tato inverze je realizována obvodem 7400, který je běžně dostupný. Použitý obvod je v nízkonapěťové verzi a je napájen z procesorové desky.

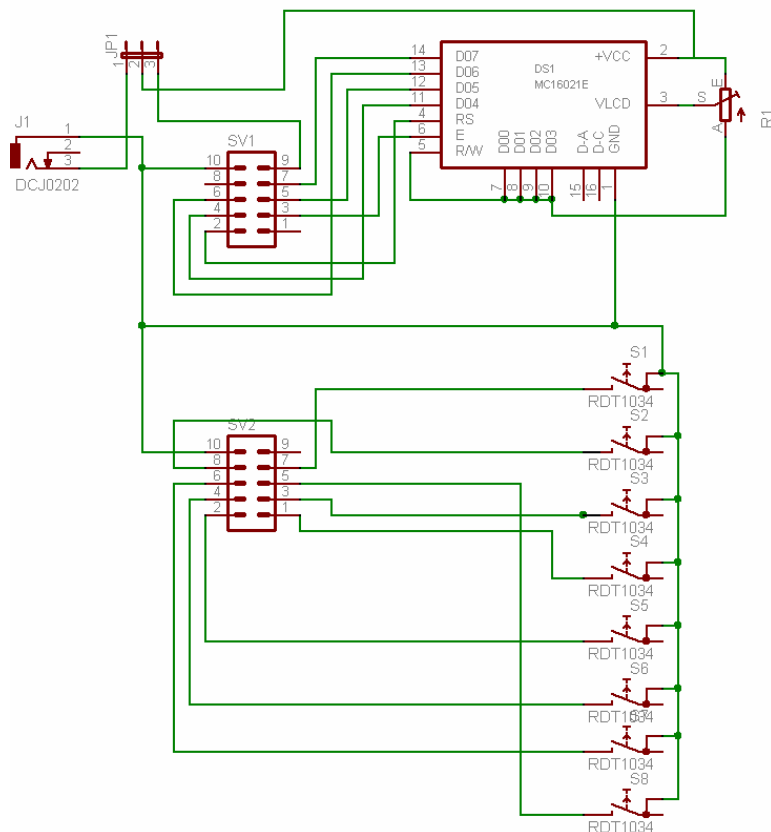
Další částí je deska akcelerometru.



Obr. 25: Schéma zapojení desky akcelerometru

Tato deska vychází ze zapojení, doporučeného výrobcem. [9]. Kondenzátory na vývodech X\_FILT a Y\_FILT jsou součástí filtru dolní propusti a určují horní mezní kmitočet měřiče zrychlení. Tato část vznikla již dříve za účelem změření charakteristik snímače, proto není připravena na možnost napájení jinou cestou, než z procesorové desky. Napájení bylo tedy řešeno odbočkou z kabelu k systémové desce.

Pro interpretaci změřených dat a ovládání přípravku slouží následující část.



Obr. 26: Zapojení desky LCD a tlačítek

Tato část je opět v souladu s předepsanými zapojeními. LCD displej je připojen podle [8]. Vzhledem k nevelkému počtu tlačítek jsou připojeny přímo k jednotlivým vývodům příslušného portu.

Napájení LCD displeje je možné buď ze systémové desky a nebo v případě, že systémová deska poskytuje jiné napájecí napětí (vývojový modul Silabs) je možné pomocí jumperu přepnout napájení LCD na napětí, přivedené pomocí napájecího konektoru. Napájecí napětí je 5V. Napájecí napětí pro LCD není nijak stabilizováno, musí tedy být dodrženo.

## 5.2 Desky plošných spojů

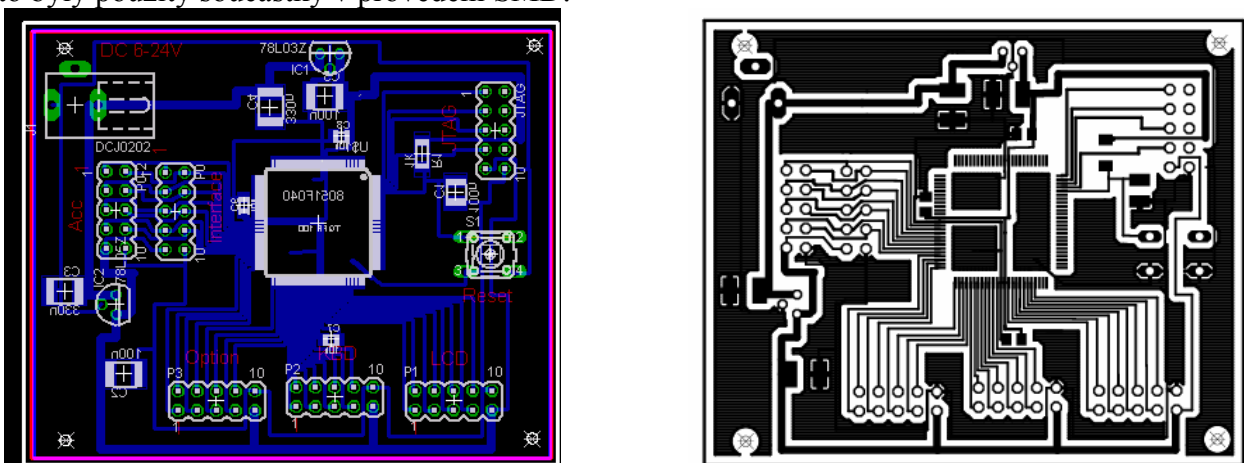
Desky plošných spojů jsou navrženy v návrhovém systému Eagle. Za tímto účelem vznikly knihovny akcelerometru, procesoru C8051F040 a LCD modulu.

Desky byly pro jednoduchost navrženy jako jednovrstvé, deska snímače je navržena pro povrchovou montáž všech součástek. Nevyužití vývody na konektorech jsou zamýšlené jako chybějící, tedy jako klíč zabráňující připojení konektoru naopak a tím alespoň částečně vyloučit chybu při zapojování. Deska procesoru je pro omezení rušení z horní strany pokovena polygonem.

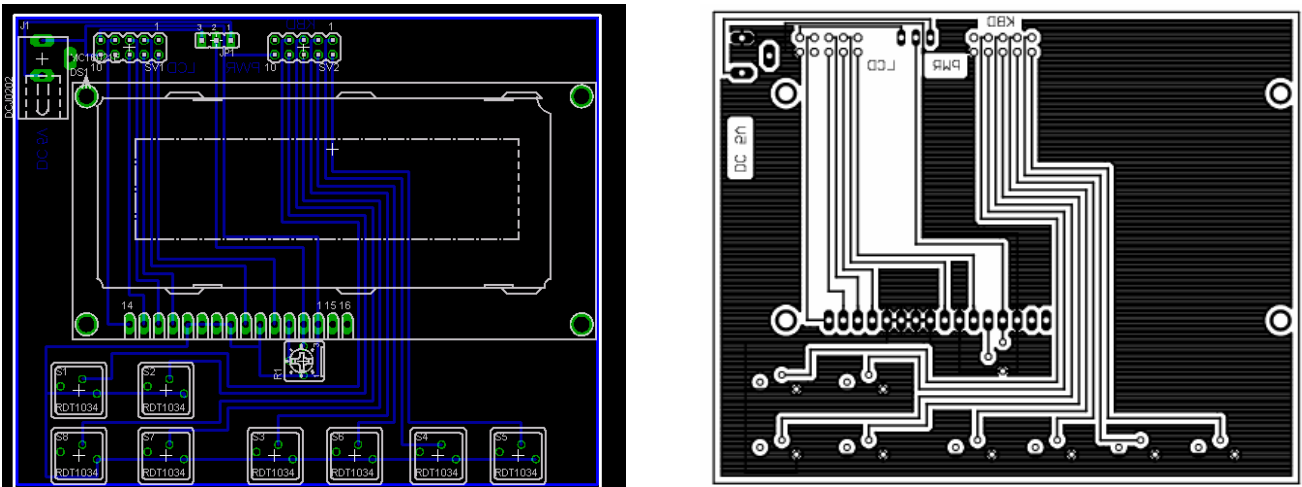


Obr. 27: Návrh desky akcelerometru

Tato deska byla navržena již dříve pro účely měření charakteristik snímače. Byl zde kladen důraz na malé rozměry a nízkou hmotnost, aby hmota desky neměla sklony rezonovat a tak znehodnotit měření. Proto byly použity součástky v provedení SMD.

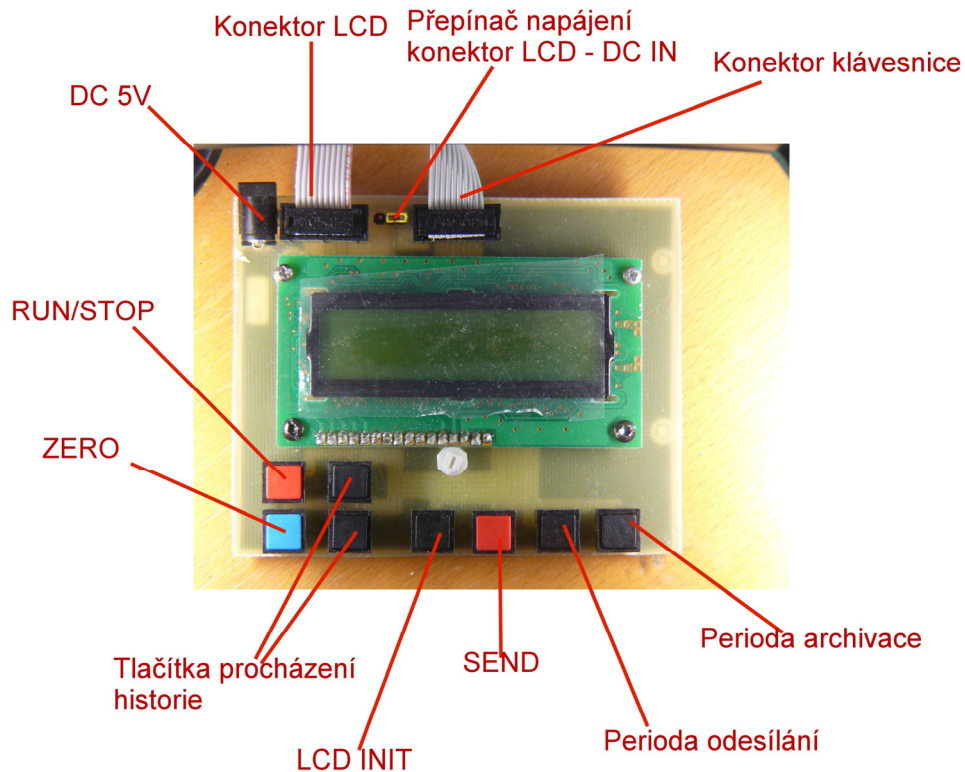


Tato deska nebyla realizována z důvodu velké hustoty vodičů v okolí jednočipu, která způsobila nemožnost výroby ve školní dílně.



Obr. 29: Návrh desky LCD a tlačítek

Deska displeje a tlačítek obsahuje jen nejnútnejší součástky. Pro vytvoření byla použita vlastní knihovna LCD displeje. Potenciometr umístěný v blízkosti LCD slouží k nastavení kontrastu zobrazovače.



Obr. 30: Popis desky displeje a tlačítek

Výsledná podoba desky LCD a tlačítek je na následujícím obrázku. Funkce jednotlivých tlačítek byly přiřazeny tak, aby ovládání bylo pokud možno intuitivní.

## 6 Měření charakteristik akcelerometru ADXL210

Vzhledem k dostupnému přístrojovému vybavení byly měřeny pouze statické převodní charakteristiky snímače.

Statické zrychlení bylo vytvořeno jako zrychlení odstředivé, kdy za pomoci otočného stolku byl vhodně uchycený akcelerometr roztočen na vhodně dlouhém rameni.

Rameno bylo při prvním měření použito délky 1,69 m, Tato délka se ukázala jako zbytečně velká, navíc rameno mělo při vyšších otáčkách tendence vibrovat a jinak kmitat a tím znehodnocovalo výsledky měření pro vyšší hodnoty zrychlení. Proto bylo pro další měření zkráceno na délku 1,2 m. Snížila se tím přesnost nastavení zrychlení, protože zrychlení je úměrné druhé mocnině úhlové rychlosti, která je při kratším ramenu vyšší a její nárůst je tedy mezi jednotlivými vzorky menší a tedy hůře rozlišitelný.

Pro přenos měřených veličin z akcelerometru do stacionárních přístrojů byla použita přechodka v rotačním stole. Přechodka pravděpodobně pracuje na principu pružných kontaktů, dotýkajících se rotujícího kruhového kontaktu.

### 6.1 Měření statických charakteristik akcelerometru ADXL210

V první fázi musely být vypočteny hodnoty rychlosti otáčení a tedy i doby jedné otáčky pro všechny měřené hodnoty zrychlení a pro použité délky ramen.

Pro měření s ramenem délky 1,69 m bylo možno měřit v celém rozsahu udávaném výrobcem, při vyšších hodnotách docházelo k nadměrným parazitním vibracím.

Tab 1 : Výpočet otáček pro délku ramene 1,69m

		$l_{\text{ramene}}=1,69 \text{ m}$													
a	[g]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	
a	[m/s]	0	4,91	9,81	14,7	19,6	24,5	29,4	34,3	39,2	44,1	49,1	54	58,9	
$\omega$	[rad/s]	0	1,7	2,41	2,95	3,41	3,81	4,17	4,51	4,82	5,11	5,39	5,65	5,9	
$\omega$	[°/s]	0	97,6	138	169	195	218	239	258	276	293	309	324	338	
f	[Hz]	0	0,27	0,38	0,47	0,54	0,61	0,66	0,72	0,77	0,81	0,86	0,9	0,94	
T	[s]		3,69	2,61	2,13	1,84	1,65	1,51	1,39	1,3	1,23	1,17	1,11	1,06	

a	[g]	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
a	[m/s]	63,8	68,7	73,6	78,5	83,4	88,3	93,2	98,1
$\omega$	[rad/s]	6,14	6,37	6,6	6,81	7,02	7,23	7,43	7,62
$\omega$	[°/s]	352	365	378	390	402	414	425	437
f	[Hz]	0,98	1,01	1,05	1,08	1,12	1,15	1,18	1,21
T	[s]	1,02	0,99	0,95	0,92	0,89	0,87	0,85	0,82

Pro rameno délky 1,2 m byla měření použitelná až do hodnoty  $a=12 \text{ g}$ , kdy došlo k výpadku výstupní modulace PWM.

Tab 2: Výpočet otáček pro délku ramene 1,2m

$l_{\text{ramene}}=1,2 \text{ m}$

a	[g]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
a	[m/s]	0	4,91	9,81	14,7	19,6	24,5	29,4	34,3	39,2	44,1	49,1	54	58,9
$\omega$	[rad/s]	0	2,02	2,86	3,5	4,04	4,52	4,95	5,35	5,72	6,07	6,39	6,71	7
$\omega$	[°/s]	0	116	164	201	232	259	284	306	328	348	366	384	401
f	[Hz]	0	0,32	0,46	0,56	0,64	0,72	0,79	0,85	0,91	0,97	1,02	1,07	1,11
T	[s]	---	3,11	2,2	1,79	1,55	1,39	1,27	1,17	1,1	1,04	0,98	0,94	0,9

a	[g]	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12
a	[m/s]	63,8	68,7	73,6	78,5	83,4	88,3	93,2	98,1	103	108	113	118
$\omega$	[rad/s]	7,29	7,56	7,83	8,09	8,34	8,58	8,81	9,04	9,26	9,48	9,7	9,9
$\omega$	[°/s]	418	433	449	463	478	491	505	518	531	543	556	567
f	[Hz]	1,16	1,2	1,25	1,29	1,33	1,37	1,4	1,44	1,47	1,51	1,54	1,58
T	[s]	0,86	0,83	0,8	0,78	0,75	0,73	0,71	0,69	0,68	0,66	0,65	0,63

Vlastní měření probíhalo pro každou osu ve dvou fázích, tedy pro „kladné“ a „záporné“ zrychlení, tedy pro zrychlení v kladném případě záporném směru dané osy.

Pro popis v tabulkách byly použity symboly:

$T_{ax}$  pro dobu, kdy je výstupní signál osy X v hodnotě H

$T_{ay}$  pro dobu, kdy je výstupní signál osy Y v hodnotě H

T pro periodu výstupního signálu s modulací střídy

$x_{\text{filt}}$  a  $y_{\text{filt}}$  pro analogové napěťové výstupy.

Tab 3: Měření charakteristik v kladném směru osy X

$f_{\text{max}}=500 \text{ Hz}$   $U_{\text{nap}}=5 \text{ V}$   $l_{\text{ramene}}=1,2 \text{ m}$

a	[g]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
$x_{\text{filt}}$	[V]	2,51	2,46	2,4	2,35	2,3	2,26	2,2	2,16	2,11	2,06	2	1,95	1,9
$y_{\text{filt}}$	[V]	2,51	2,52	2,51	2,51	2,52	2,51	2,52	2,51	2,51	2,51	2,51	2,5	2,51
$T_{ax}$	[ $\mu\text{s}$ ]	553	585	605	630	655	668	696	715	740	764	784	812	835
$T_{ay}$	[ $\mu\text{s}$ ]	550	548	548	545	544	540	550	542	548	548	545	550	547
T	[ $\mu\text{s}$ ]	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116
střída	[%]	49,6	52,4	54,2	56,5	58,7	59,9	62,4	64,1	66,3	68,5	70,3	72,8	74,8
$a_{\text{merene}}$	[g]	-0,1	0,6	1,05	1,61	2,17	2,46	3,09	3,52	4,08	4,61	5,06	5,69	6,21

a	[g]	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12
$x_{\text{filt}}$	[V]	1,85	1,8	1,75	1,7	1,65	1,6	1,55	1,49	1,45	1,4	1,35	1,31
$y_{\text{filt}}$	[V]	2,52	2,52	2,5	2,51	2,51	2,49	2,49	2,5	2,5	2,51	2,5	2,49
$T_{ax}$	[ $\mu\text{s}$ ]	856	884	900	925	945	972	995	1020	1050	1066	1090	---
$T_{ay}$	[ $\mu\text{s}$ ]	550	546	555	561	550	558	545	560	560	555	559	540
T	[ $\mu\text{s}$ ]	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116	1116
střída	[%]	76,7	79,2	80,6	82,9	84,7	87,1	89,2	91,4	94,1	95,5	97,7	---
$a_{\text{merene}}$	[g]	6,68	7,3	7,66	8,22	8,67	9,27	9,79	10,3	11	11,4	11,9	---

Tab 4: Měření charakteristik v záporném směru osy X

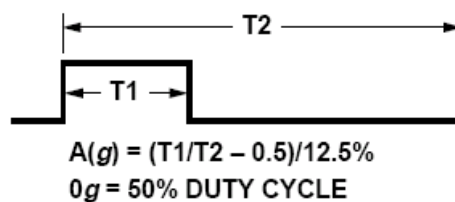
$f_{\max}=500$  Hz  $U_{\text{nap}}=5$  V  $l_{\text{ramene}}=1,69$  m

a	[g]	0	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-3,5	-4	-4,5	-5	-5,5	-6
$x_{\text{filt}}$	[V]	2,54	2,58	2,63	2,68	2,73	2,78	2,83	2,88	2,95	2,98	3,03	3,08	3,14
$y_{\text{filt}}$	[V]	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54	2,55	2,54	2,54	2,55	2,54	2,53	2,53	2,54
$T_{ax}$	[ $\mu$ s]	545	526	506	490	466	436	404	368	352	332	322	306	284
$T_{ay}$	[ $\mu$ s]	545	548	540	546	548	548	544	548	544	544	550	550	548
T	[ $\mu$ s]	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115
střída	[%]	48,9	47,2	45,4	43,9	41,8	39,1	36,2	33	31,6	29,8	28,9	27,4	25,5
$a_{\text{merene}}$	[g]	-0,3	-0,7	-1,2	-1,5	-2,1	-2,7	-3,4	-4,2	-4,6	-5,1	-5,3	-5,6	-6,1

a	[g]	-6,5	-7	-7,5	-8	-8,5	-9	-9,5	-10
$x_{\text{filt}}$	[V]	3,17	3,24	3,3	3,35	3,41	3,44	3,48	3,55
$y_{\text{filt}}$	[V]	2,53	2,53	2,53	2,51	2,51	2,47	2,45	2,54
$T_{ax}$	[ $\mu$ s]	252	236	212	196	164	144	100	80
$T_{ay}$	[ $\mu$ s]	550	550	552	544	548	544	544	550
T	[ $\mu$ s]	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115	1115
střída	[%]	22,6	21,2	19	17,6	14,7	12,9	8,97	7,17
$a_{\text{merene}}$	[g]	-6,8	-7,2	-7,7	-8,1	-8,8	-9,3	-10	-11

Tato charakteristika byla měřena jako jediná s ramenem délky 1,69 m, Oproti ostatním vykazuje větší rozptyl hodnot při vyšších hodnotách zrychlení, zvláště v ose Y, která nebyla objektem tohoto měření.

Hodnoty zrychlení  $a_{\text{merene}}$  bylo vypočítáno z hodnot na výstupu s modulací PWM podle doporučení výrobce



Obr. 31: Doporučení výrobce pro demodulaci PWM [2]

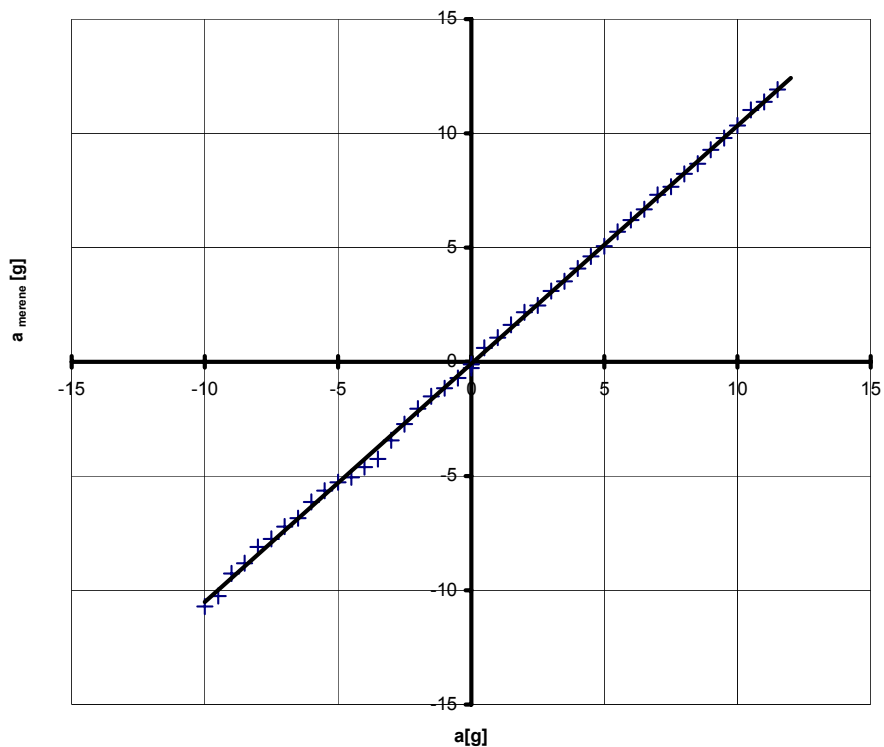
Hodnota 12,5% na obr. 27 je pro akcelerometr ADXL202, pro měřený akcelerometr je tato hodnota 4%.

Vzorec pro výpočet je tedy následující:

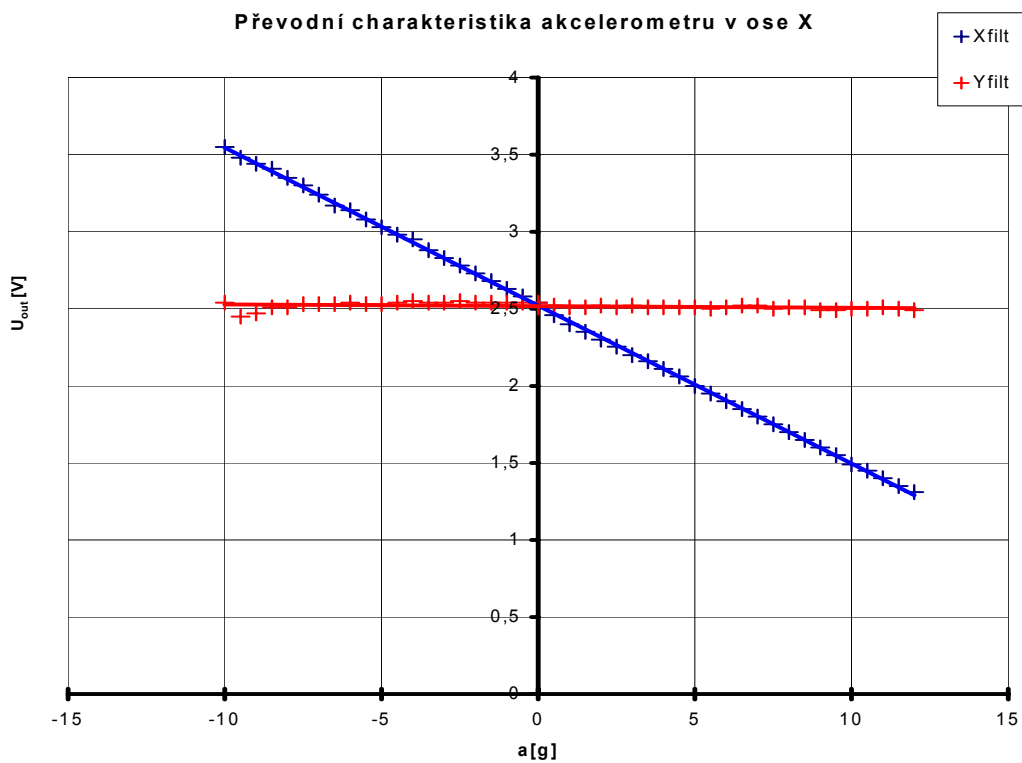
$$a[g] = \left( \frac{T_{ax}}{T} - 0,5 \right) / 0,04 \quad (5.11)$$

pro zrychlení v ose X. obdobně pro osu Y.

Převodní charakteristika akcelerometru v ose X



Obr. 32: Převodní charakteristika akcelerometru ADXL210 v ose X na PWM výstupu



Obr. 33: Převodní charakteristika akcelerometru ADXL210 v ose X na analogových vstupech

Tab 5: Měření charakteristik v kladném směru osy Y

$f_{\max}=500$  Hz  $U_{\text{nap}}=5$  V  $l_{\text{ramene}}=1,2$  m

a	[g]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
$x_{\text{filt}}$	[V]	2,51	2,53	2,53	2,51	2,52	2,51	2,52	2,51	2,51	2,51	2,51	2,54	2,53
$y_{\text{filt}}$	[V]	2,52	2,47	2,41	2,36	2,31	2,26	2,22	2,17	2,12	2,06	2,02	1,97	1,92
$T_{\text{ax}}$	[ $\mu\text{s}$ ]	548	545	545	545	544	540	550	542	548	548	545	550	548
$T_{\text{ay}}$	[ $\mu\text{s}$ ]	551	576	612	642	675	690	706	716	738	766	786	807	825
T	[ $\mu\text{s}$ ]	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120
střída	[%]	49,2	51,4	54,6	57,3	60,3	61,6	63	63,9	65,9	68,4	70,2	72,1	73,7
$a_{\text{merene}}$	[g]	-0,2	0,36	1,16	1,83	2,57	2,9	3,26	3,48	3,97	4,6	5,04	5,51	5,92

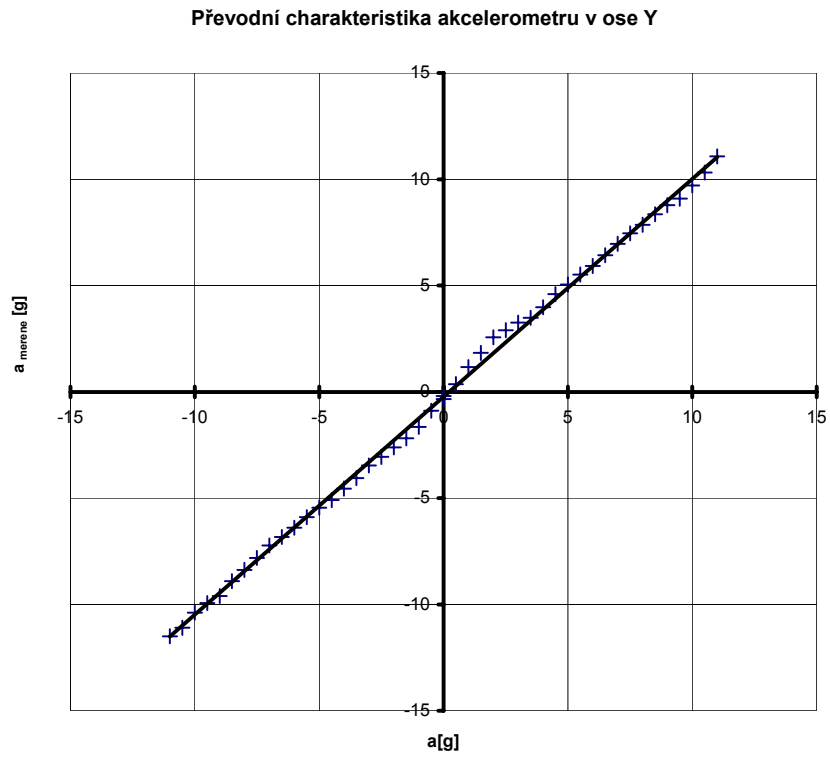
a	[g]	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12
$x_{\text{filt}}$	[V]	2,54	2,53	2,53	2,53	2,51	2,49	2,49	2,5	2,5	2,51	2,5	2,49
$y_{\text{filt}}$	[V]	1,87	1,83	1,77	1,72	1,67	1,63	1,57	1,53	1,46	1,42	1,38	1,35
$T_{\text{ax}}$	[ $\mu\text{s}$ ]	550	550	552	561	550	558	545	550	558	545	560	560
$T_{\text{ay}}$	[ $\mu\text{s}$ ]	848	872	894	912	934	953	967	995	1022	1056	nemeritelne	
T	[ $\mu\text{s}$ ]	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120
střída	[%]	75,7	77,9	79,8	81,4	83,4	85,1	86,3	88,8	91,3	94,3	---	---
$a_{\text{merene}}$	[g]	6,43	6,96	7,46	7,86	8,35	8,77	9,08	9,71	10,3	11,1	---	---

Tab 6: Měření charakteristik v kladném směru osy Y

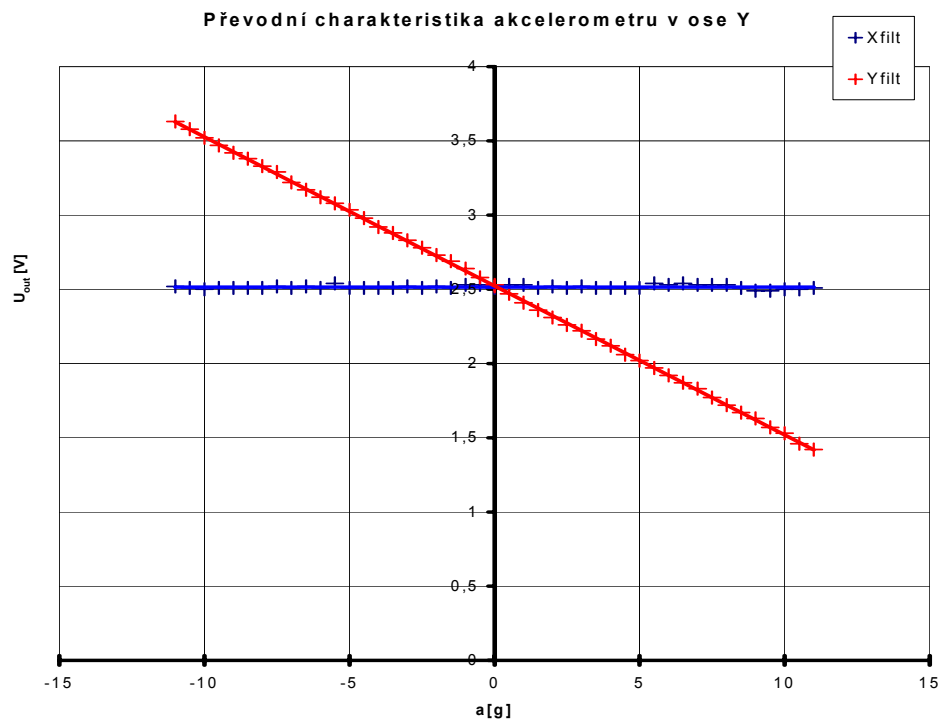
$f_{\max}=500$  Hz  $U_{\text{nap}}=5$  V  $l_{\text{ramene}}=1,2$  m

a	[g]	0	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-3,5	-4	-4,5	-5	-5,5	-6
$x_{\text{filt}}$	[V]	2,51	2,53	2,53	2,51	2,52	2,51	2,52	2,51	2,51	2,51	2,51	2,54	2,51
$y_{\text{filt}}$	[V]	2,53	2,58	2,64	2,69	2,73	2,78	2,83	2,88	2,92	2,98	3,04	3,08	3,12
$T_{\text{ax}}$	[ $\mu\text{s}$ ]	540	550	542	548	548	545	550	547	550	546	555	544	540
$T_{\text{ay}}$	[ $\mu\text{s}$ ]	545	520	486	462	443	423	405	378	356	332	316	296	274
T	[ $\mu\text{s}$ ]	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120
střída	[%]	48,7	46,4	43,4	41,3	39,6	37,8	36,2	33,8	31,8	29,6	28,2	26,4	24,5
$a_{\text{merene}}$	[g]	-0,3	-0,9	-1,7	-2,2	-2,6	-3,1	-3,5	-4,1	-4,6	-5,1	-5,4	-5,9	-6,4

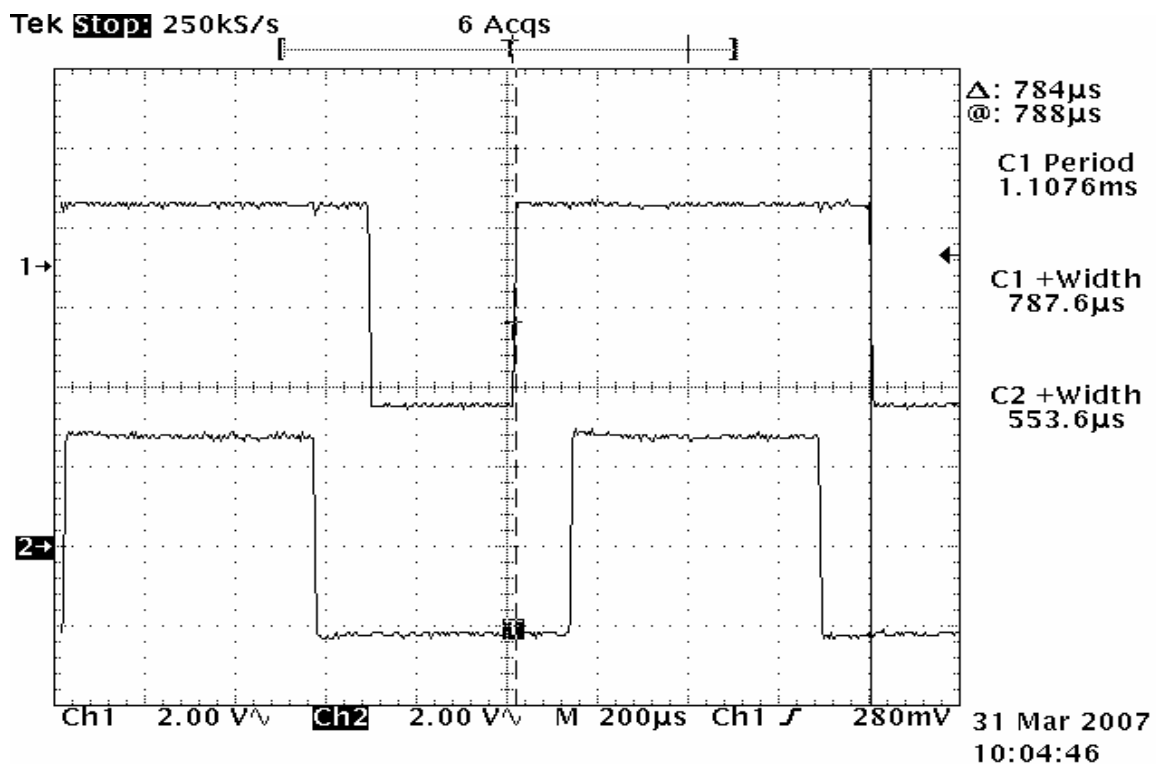
a	[g]	-6,5	-7	-7,5	-8	-8,5	-9	-9,5	-10	-11	-11,5	-12	-12,5
$x_{\text{filt}}$	[V]	2,52	2,51	2,52	2,51	2,51	2,51	2,51	2,5	2,51	2,52	2,49	2,5
$y_{\text{filt}}$	[V]	3,17	3,22	3,29	3,33	3,38	3,42	3,47	3,52	3,58	3,63	3,68	3,73
$T_{\text{ax}}$	[ $\mu\text{s}$ ]	550	542	548	548	545	550	548	550	550	558	545	550
$T_{\text{ay}}$	[ $\mu\text{s}$ ]	254	236	210	185	161	130	115	95	63	45	nemeritelne	
T	[ $\mu\text{s}$ ]	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120	1120
střída	[%]	22,7	21,1	18,8	16,5	14,4	11,6	10,3	8,48	5,63	4,02		
$a_{\text{merene}}$	[g]	-6,8	-7,2	-7,8	-8,4	-8,9	-9,6	-9,9	-10	-11	-11		



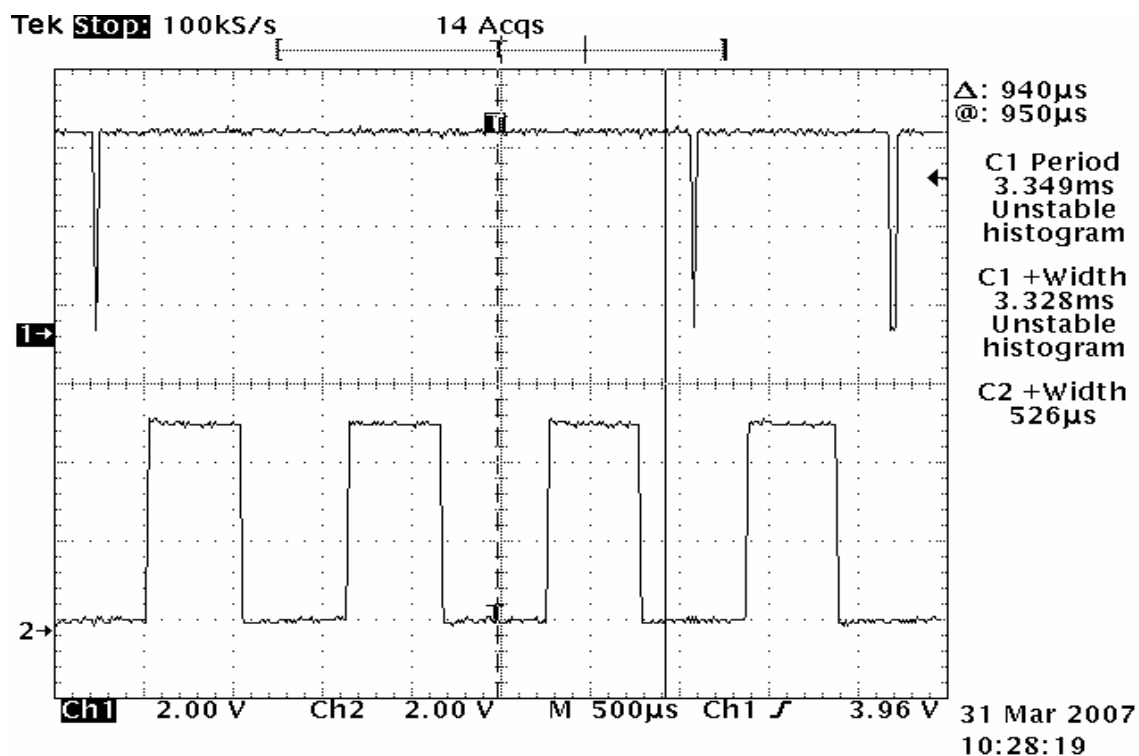
Obr. 34: Převodní charakteristika akcelerometru ADXL210 v ose Y na PWM výstupu



Obr. 35: Převodní charakteristika akcelerometru ADXL210 v ose Y na analogových vstupech



Obr. 36: Skutečné průběhy na výstupu akcelerometru ADXL210 při zrychlení 4 g v prvním kanále



Obr. 37: Skutečné průběhy na výstupu akcelerometru ADXL210 při výpadku PWM modulace

## **6.2 Zhodnocení měření**

Akcelerometr má lineární charakteristiky v celé oblasti udané výrobcem. Při použití výstupu s modulací PWM je rozsah omezen touto modulací. Analogové výstupy mají lineární charakteristiku i při překročení udávaného rozsahu o 20%. Pravděpodobně by byly lineární i dále ale vzhledem k riziku poškození systému součástky a zařízení pracoviště vysokými otáčkami měření nebylo provedeno.

Obr. 29 a Obr. 23 zobrazují závislosti zrychlení a výstupní veličiny v ose X. V záporné části těchto grafů je možné vidět poměrně silné ovlivňování osy Y vibracemi ramene.

Snímače v ose X i Y vykazují posun nulové hodnoty, obě osy přibližně o 0,3 g. Při praktickém použití bude potřeba tento posuv korigovat. Vzhledem k linearitě celé charakteristiky je korekce proveditelná jednoduchým součtem nebo rozdílem.

Ovlivňování snímačů v ose X a Y je minimální, změřené oscilující hodnoty v ose kolmé na osu měření jsou pravděpodobně následkem vibrací samotného rotačního stolu a deformací ramene s akcelerometrem.

## 7 Software pro mikrokontrolér

Software pro mikrokontrolér byl napsán v jazyce C pro mikrokontroléry. Bylo použito vývojové prostředí Keil  $\mu$ Vision 3.0 v plné verzi. Toto prostředí bylo také využito pro simulace běhu částí programu. Bohužel toto prostředí nepracuje korektně s procesory 8051F04x. Při spuštění simulace nejsou dostupné periférie. Proto byly veškeré simulace prováděny na procesorech řady 8051F02x, které mají nejvíce podobné parametry a hlavně téměř totožné pole SFR pro nastavení periférií. Prostředí Keil  $\mu$ Vision dále nebylo schopné pracovat s hlavičkovými soubory od výrobce jednočipového mikrokontroléru a z nepochopitelných důvodů nezapisoval do některých SFR. Také nebyl schopen uploadu programu do mikrokontroléru. Proto byl pro další vývoj nahrazen vývojovým prostředím Silabs IDE.

Vývojové prostředí Silabs IDE je firemním vývojovým prostředím pro vývojové desky Cygnal. Prostředí je standardně dodáváno s vývojovou deskou, avšak pouze v demonstrační verzi s omezeným rozsahem kódu. Používá však stejné kompilátory jako prostředí Keil  $\mu$ Vision a jeho nastavení umožňují přesměrování požadavku na překlad na vnější překladače. Při použití překladačů prostředí Keil  $\mu$ Vision již nenastává žádný problém.

Toto prostředí je navrženo pro použití ve spolupráci s mikrokontrolérem, připojeným přes rozhraní JTAG. Běh programu již není simulován, ale je spouštěn na vlastním mikrokontroléru a umožňuje lepší odladění programu..

### 7.1 Základní princip měření

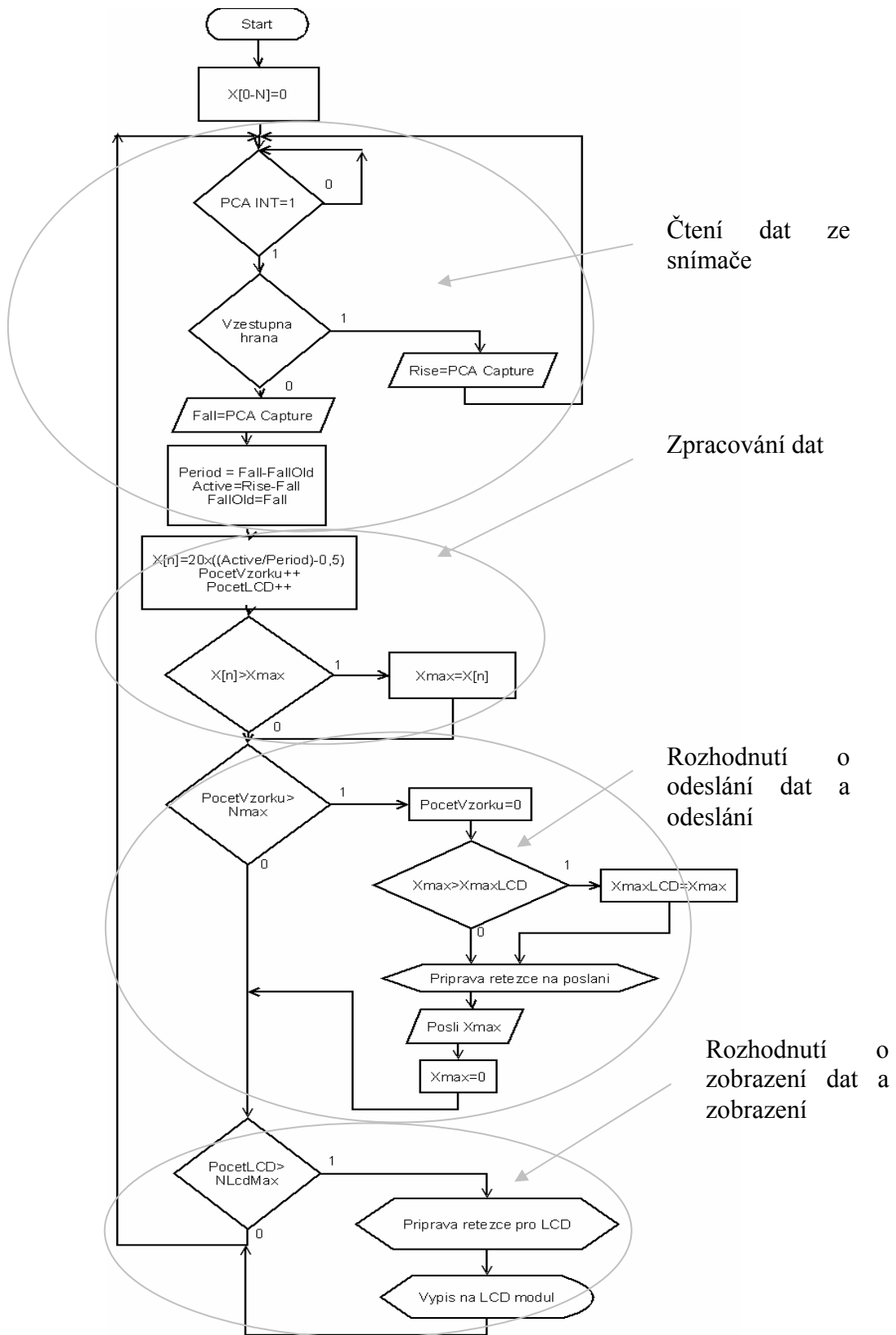
Na mikrokontrolér je kladeno několik požadavků, týkajících se základního zpracování dat. Mikrokontrolér musí:

- načíst data ze snímače
- zpracovat načtená data
- rozhodnout o možnosti odeslání dat a data odeslat
- rozhodnout o možnosti zobrazit data a data zobrazit
- rozhodnout o uložení dat do vnitřní paměti a data uložit.

Tyto základní procesy budou dále popsány.

Princip činnosti základní části programu je nejsnadnější popsat za pomoci vývojového diagramu výsledného programu.

V tomto vývojovém diagramu je pro jednoduchost zachycena pouze základní část programu. Další části programu, jako například obsluha klávesnice, budou popsány pouze slovně.



Obr. 37: Vývojový diagram základního programu

### 7.1.1 Čtení dat ze snímače

Jak již bylo dříve uvedeno, akcelerometr poskytuje signál s pulzně-širokovou modulací. Pro čtení takového signálu v mikrokontroléru se nabízí využití čítačů, pracujících v záchytném režimu. Čítač pracující v záchytném režimu má dva páry pracovních osmibitových registrů, ze kterých je jeden pár pracovní a jeden tzv. záchytný. Při příchodu vnějšího impulsu je obsah pracovních registrů přepsán bez zastavení čítače do registrů záchytných. Volitelně je vygenerováno přerušení.

Čítače obsažené v programovatelném poli čítačů (PCA) umožňují záchytný režim, kdy reagují na hranu přicházejícího signálu. Navíc lze softwarově zvolit, jestli bude záchytný režim reagovat na vzestupnou (RISE) nebo sestupnou (FALL) hranu signálu. Tím se jako nejlepší metoda čtení PWM signálu jeví střídavá selektivní reakce na vstupnou a sestupnou hranu, kdy se po každém čtení záchytných registrů změní nastavení čítače tak, aby reagoval na hranu opačnou. Vše je obsluhováno přerušeními, které PCA generuje při každém zachycení hrany. Další obsluha je již jednoduchá a je realizována jednoduchými podmínkami, které se vztahují k SFR pole PCA.

### 7.1.2 Zpracování zachycených dat

Výše uvedeným způsobem získáme znalost časových okamžiků, ve kterých přichází hrany signálu. Pro výpočet podle [9] je třeba znát periodu signálu a dobu trvání vysoké úrovně signálu. Obě veličiny snadno určíme ze změřených veličin. Dobu trvání úrovně H signálu jako rozdíl času sestupné a vzestupné hrany, periodu potom jako rozdíl časů dvou hran náběžných. Z toho vyplývá nutnost dočasně ukládat jednu hodnotu času pro náběžnou hranu pro výpočet periody. Pak už je možné podle vztahu (5.11) vyčíslit hodnotu zrychlení. Při zavedených hodnotách pro dostavení nuly jsou od těchto hodnot odečteny. Ve výpočtu je zavedena saturace, která je podle předchozích měření nastavena na  $\pm 15$  g. Vyšší hodnoty nemají smysl, PWM modulace již v při těchto hodnotách nepracuje.

Další zpracování hodnot spočívá v přípravě k odeslání po komunikačním rozhraní, přípravě pro zobrazení na displeji a archivaci hodnot do vnitřní RAM paměti mikrokontroléru, od kud je možné data odeslat, nebo procházet za pomoci kláves a displeje.

Rozhodnutí o odeslání dat a jejich odeslání:

Pro komunikační rozhraní může být vybrán každý vzorek (500 vz/s), nebo v případě požadavku na pomalejší odesílání dat maximální hodnota z daného počtu vzorků. Při volbě každého vzorku jsou data přímo připravena do řetězce funkcí SPRINTF, jeho délka je zkrácena na 2 desetinná místa a data jsou odevzdána obsluze linky rozhraní. Při požadavku na nižší datový tok je při každém dokončeném výpočtu inkrementováno počítadlo a v případě, že hodnota počítadla nedosahuje požadovaného počtu vzorků, je vzorek srovnán s paměťovým místem pro uložení maxima a v případě, že je jeho hodnota větší, je zapsán do tohoto místa. Teprve po dosažení zvoleného počtu vzorků je maximum předáno proceduře pro odeslání.

Přesnost dat pro odeslání je stanovena na 2 desetinná místa (3 platné číslice). Zavádění většího počtu desetinných míst nemá smysl, další místa již mají téměř náhodný charakter.

Rozhodnutí o zobrazení dat na LCD:

Zpracování hodnot pro LCD displej je obdobné, jen s tím rozdílem, že neběží synchronně s čtením dat, ale je řízeno přerušením časovače TM0. Při pokusu o synchronní běh jsou volány časově náročné procedury výpisu na LCD částí programu s nejvyšší prioritou přerušení, výpis na LCD pak není možné opět přerušit. Tím vznikne velká časová prodleva mezi jednotlivými běhy čtení dat a může dojít k promeškání čtení.

Maximum pro LCD displej je vytvářeno vždy zároveň s maximem pro odeslání dat a to tak, že při odesílání dat je případné maximum propsáno do maxima pro výpis. Tím je zajištěno, že bude zobrazeno vždy absolutní maximum za daný časový úsek. Interval obnovení LCD displeje je přibližně 0,5 s, výpis na displej je obsluhován funkcí PRINTF, která využívá proceduru PUTCHAR. Tato je přeměrována na rutinu obsluhy LCD. Výsledky jsou zobrazovány s přesností na 2 desetinná místa.

Rozhodnutí o uložení dat do vnitřní paměti:

Tato část již není zachycena ve vývojovém diagramu, protože by neúměrně narůstala jeho velikost.

Hodnoty pro archivaci jsou vybírány opět jako maximum. Intervaly archivace jsou navázány na časovač TM0 s vhodně nastaveným kmitočtem, který umožní přesné odměření zvolených časů v rozsahu 0,1-60 s. Po těchto časových úsecích je zapisováno maximum do pole hodnot, které je cyklicky přepisováno. Velikost tohoto pole je omezena pamětí jednočipu na 450 vzorků. Je tedy možné zapsat do paměti 45 s-7,5 h záznamu, samozřejmě s odpovídajícím rozlišením v čase.

### 7.1.3 Odesílání dat

Pro odeslání dat je možné podle verze software využít sériovou linku typu UART nebo I2C sběrnici.

Sériová linka využívá integrovaný kontrolor UART1, pro kterou jsou nastaveny parametry:

115,2 kbd, 8 datových bitů, bez parity, 1 start bit, 1 stop bit.

Data pro sériovou linku jsou zpracována funkcí SPRINTF do bufferu, který je následně znak po znaku odesílán. Délka odesílaného řetězce je proměnná podle charakteru odesílaných hodnot, jednotlivé hodnoty jsou odděleny mezerou, řetězec je zakončen symboly „;“ a symboly „0A,0D“ které mají význam konce řádku pro snadné oddělení jednotlivých vzorků. Sériová linka je obsluhována přerušovacím systémem.

Pro synchronní sběrnici I2C je nastaven hodinový kmitočet na 100 kHz. Sběrnice opět využívá periférii procesoru, sběrnice pracuje v režimu „Master Transmitter“ a očekává slave zařízení na adrese 0000001. Parametry odesílaného řetězce jsou stejné jako pro UART, periférie je opět řízena přerušením. Kontrolor I2C sběrnice má oproti UARTu stavový registr, podle jehož stavu je nutné vyvolat náležitou akci. Stav registru jsou obslouženy jednoduchým přepínačem typu CASE. V době dokončení této práce bohužel nebyla možnost zjistit, zda je odesílání dat po této sběrnici funkční, je tedy možné, že je v této části programu skrytá chyba.

#### 7.1.4 Obsluha klávesnice a displeje

Obsluha klávesnice je řízena impulzy časovače TM0. V těchto intervalech je čten stav portu P3, kam je klávesnice připojena. Stav portu je srovnáván přepínačem typu CASE s definovanými stavy a podle nich je vyvolána příslušná akce.

Obsluha LCD displeje je svěřena upravené obslužné rutině z CD přiloženému k [8]. Obsluha je tedy volána způsobem definovaným v literatuře.

##### Obsluha klávesnice

Jednotlivá tlačítka klávesnice jsou obsluhována následujícím způsobem:

##### STOP/RUN

Při hodnotě přečtené z portu, odpovídající stisku tohoto tlačítka je nastaven/vynulován příznak STOP. Dále jsou povoleny/zakázány přerušování od programovatelného pole čítačů a časovače, který řídí ostatní běh programu.

Při nastavení příznaku STOP jsou zároveň vypočítány některé hodnoty, nutné pro korektní práci procházení historie změřených dat a pro odeslání paměti, konkrétně se jedná o zjištění aktuální pozice posledního zapsaného čísla v kruhově přepisované oblasti paměti. Bez znalosti této hodnoty by nebylo možné vypsat data v chronologické souvislosti

##### ZERO

Toto tlačítko slouží zarovnání nuly. Akcelerometr vykazuje jistou odchylku od nulové hodnoty i při nulovém zrychlení, pro korektní měření je potřeba tuto hodnotu kompenzovat. Dále je tato vlastnost využitelná při umístění snímače v poloze, kdy jedna (nebo obě) osa není kolmo ke svislici a je tedy ovlivněna gravitací Země. Tlačítko je možné použít jak režimu RUN, kdy se jako korekce vezme poslední změřená hodnota, tak v režimu STOP, kdy se vezme poslední hodnota výpisu na displej, protože poslední změřená hodnota bývá kvůli zastavení měření často nekorektní.

Experimentálně bylo zjištěno, že nulování lépe pracuje, když je hodnota korekce před zavedením do výpočtu násobena hodnotou o málo menší než 1. V programu je použita hodnota 0,95, která poskytuje nejlepší výsledky. Přesné vynulování však není možné, snímač vykazuje jistou míru šumu, který přesné vynulování znemožní.

##### Tlačítka procházení historie

Těmito tlačítky je možné v režimu STOP procházet cyklicky přepisovanou paměť a vypisovat její hodnoty na displej. Tlačítka využívají znalost poslední zapsané hodnoty, při výpisu je tedy vždy zobrazen nejaktuálnější výsledek měření jako vzorek s nejvyšším číslem. Vše je ošetřeno jednoduchými podmínkami.

##### LCD INIT

Toto tlačítko je použitelné v libovolném režimu a slouží ke spuštění inicializační procedury LCD displeje při jeho pozdějším připojení, případně při ztrátě komunikace mezi přípravkem a LCD, ke které může dojít při vnějším rušení. Tento skutek není jednoduše postižitelný. Tlačítko bylo přidáno po pokusu o měření vibrací elektromotoru (viz dále), který při spínání produkoval velice silné rušení.

Tlačítko spouští inicializační proceduru podle [8], odkud je celá část pro obsluhu displeje přejata.

SEND

Tlačítko použitelné v režimu STOP, sloužící k odeslání obsahu kruhově prepisované paměti po komunikačním rozhraní. Využívá znalosti stejných číselných hodnot jako procházení historie, samotné odesílání je řízeno přerušením daného rozhraní.

Při použití sériové linky a přenosu do počítače je potřeba mít spuštěný kvalitně zpracovaný terminál, programy, které nejsou stavěny na tak silný příliv dat se pod vahou přijatých hodnot ochotně zhroutí.

Tlačítka pro nastavení intervalu odesílání dat a intervalu zápisu do paměti

Tato tlačítka nastavují cyklicky hodnoty intervalů výpisu na komunikační rozhraní a zápisu do paměti, které byly zmíněny již dříve. Hodnoty jsou cyklicky nastavovány přepínačem typu CASE.

Při prvním stisku tlačítka se hodnota nezmění, při každém dalším je nastavena následující hodnota. Příznaky prvního stisku jsou nastaveny při vyvolní režimu STOP a také při stisku všech ostatních tlačítek.

### 7.1.5 Problémy při realizaci

Základním problémem, který doprovází všechny aplikace, běžící synchronně s vnějšími událostmi jsou časové poměry. V tomto případě byl problém kritický, protože perioda měření akcelerometru je krátká ( $f_m=500$  Hz) a v této periodě je potřeba realizovat 2x dělení dvou 16bitových čísel (jedno pro každý kanál). Tento problém sahá tak daleko, že je potřeba část programu řídit jinak, než přerušeními z PCA, aby se tyto části nechaly přerušit právě čtením ze snímače. V opačném případě dochází k pomalé reakci na přerušení a tím ke znehodnocení měřeného údaje přepsáním hodnot v záchytných registrech. Problém narůstá se zrychlením, působícím na snímač, protože se přibližují hrany signálu. Tím samozřejmě narůstají požadavky na rychlost převzetí dat ze záchytných registrů. Problémy také působí rychlé odesílání dat, kdy obsluha odesílání zasáhne do obsluhy čtení nebo naopak. Přerušení musí být důsledně blokovány a znovu povolovány. V opačném případě opět dochází ke znehodnocování vzorků, případně k rozpadu komunikace s rozhraním.

## 8 Měření

Některé základní parametry byly uvedeny už dříve v popisu programu. Pro lepší orientaci v nich zde budou uvedeny parametry, které mohou ovlivnit místo a účel nasazení přípravku

### 8.1 Základní parametry přípravku

Mezi základní parametry přípravku patří rozsah měření, kmitočtové omezení měřené veličiny a také přesnost, udaná nejlépe třídou přesnosti..

#### Rozsah měření

Rozsah měření je dán použitým akcelerometrem. Přípravek je navržen pro použití s akcelerometry ADXL210, po úpravě konstant s akcelerometrem ADXL202. Tím je rozsah plně definován.

Pro akcelerometr ADXL210 je rozsah  $\pm 10$  g se saturací na hodnotě  $\pm 15$  g, kdy absolutní hodnoty v rozsahu 10-15 g mohou být zjištěny, ale jejich přesnost není zaručena. Tyto hodnoty lze brát pouze jako orientační. Pro vyšší hodnoty zrychlení než  $\pm 15$  g již není možné hodnoty odečíst ze snímače, navíc hrozí jeho poškození.

#### Frekvenční rozsah

Frekvenční rozsah je dán množstvím čtených dat. Výrobce akcelerometru udává periodu výstupního signálu s modulací střídou 500/s. Z této hodnoty vyplývá maximální frekvenční rozsah přípravku, kdy podle Shannonova vzorkovacího teorému může být maximální zpracovávaný vstupní signál nejvýše o kmitočtu 250Hz.

### 8.2 Přesnost a chyby měření

#### Přesnost měření

Přesnost měření je dána schopností přesně zjišťovat okamžiky náběžných a sestupných hran signálu z akcelerometru. V tomto principu spočívá základní zdroj chyb měření. Kromě chyb systematických, které jsou následkem šumů. Objevují se i chyby nahodilé, způsobené v největší míře silným impulsním rušením a případně zvlnění napájecího napětí. Snímač také není zcela lineární, takže je nutno uvažovat chybu linearitu. Chyby hrubé jsou díky počítačovému zpracování téměř vyloučeny.

#### 8.2.1 Chyby systematické

Při čtení modulace PWM je soustava citlivá na chyby určení času. Čas je určován tak, že vstupní signál přichází na komparátor, který při dosažení určité úrovně napětí vyše impuls, který spustí proces odečtení času. V době průchodu signálu konečnou hranou i malá hodnota napětí přičtená k signálu způsobí chybu v odečtu. Tato chyba omezuje rozlišení soustavy na 2 desetinná místa. Při požadavku na vyšší přesnost by musely být provedeny vhodné konstrukční úpravy. V nejnepríznivějším případě je „šum“ takto vyvolaný přibližně

$$\Delta_s = 0,2\%$$

z rozsahu.

### 8.2.2 Chyba linearity

Chyba linearity je, jak vyplývá z měření akcelerometru, velká hlavně v oblasti kolem nulových hodnot. Chyba kolem počátku souřadnic dosahuje jednotek procent měřícího rozsahu.

$$\Delta_{lin} = 4\%$$

Při vyšších hodnotách zrychlení (nad 0,5g) je chyba linearity zanedbatelná.

Chyba se bude lišit při použití jiného kusu akcelerometru.

### 8.2.3 Chyby nahodilé

Tyto chyby jsou převážně způsobeny neočekávanými vnějšími vlivy, jako například sepnutím indukční zátěže v blízkosti měřidla, zvlnění napájecího napětí akcelerometru a podobně.

Vliv rušivé špičky způsobené sepnutím indukční zátěže, superponované na výstupní signál způsobí „nepravou hranu“ v signálu. Velikost potřebné intenzity elektrického pole pro vznik této chyby nebylo možné zjistit. Teoretická velikost chyby takto způsobené je až 100%. V krajním případě způsobí (při zasažení mikrokontroléru) až restart nebo zablokování soustavy.“

Vliv nestabilního napájecího napětí akcelerometru je obdobný jako vliv šumu. Nestabilní napájecí napětí způsobí opět úrovní výstupního signálu, se stejným vlivem na hranu konečné délky jako šum. Velikost chyby je úměrná zvlnění napájecího napětí. Relativní chyba je v pozorovaném nejnepříznivějším případě:

$$\Delta_{napMax} = 4\%$$

Tato chyba však byla způsobena snížením napájecího napětí pod hodnotu minimálního napájecího napětí doporučené výrobcem. Při dodržení konstrukčních zásad a hodnot předepsaných výrobcem je chyba způsobená zvlněním napájecího napětí přibližně

$$\Delta_{nap} = 0,2\%$$

Výsledná chyba je kombinací všech chyb. Některé chyby se vzájemně kompenzují, jiné mají zcela náhodný charakter a působí v měření šum. Výsledná chyba se může v aktivní části rozsahu (tj při zrychlení nad 0,5g v libovolném smyslu, působící na měřící soustavu akcelerometru) při dodržení konstrukčních zásad pohybovat pod:

$$\Delta = 0,5\%$$

rozsahu.

Výsledná třída přesnosti přípravku by byla 0,5 nebo 1.

### 8.3 Provedená měření

Bylo provedeno několik experimentálních měření, a to jak se samostatným přípravkem, tak ve spojení s počítačem.

#### 8.3.1 Měření tíhového zrychlení

Tíhové zrychlení bylo měřeno samostatným přípravkem. Změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách. Hodnoty byly měřeny bez nastavení i s nastavením nuly. Toto měření je ekvivalentem k měření při zrychlení 1g. Hodnoty označené „a“ jsou bez korekce nuly, hodnoty „a<sub>0</sub>“ mají zavedenu korekci nulové hodnoty.

Tab.6 : měření tíhového zrychlení

	X+	X-	Y+	Y-
a[g]	0,99	-0,74	1,02	-0,64
a <sub>0</sub> [g]	0,85	-0,83	0,83	-0,84

Z tabulky je vidět, že hodnoty naměřené při měření na rotačním stole jsou identické. Počáteční nelinearita snímače zde způsobuje chybu měření.

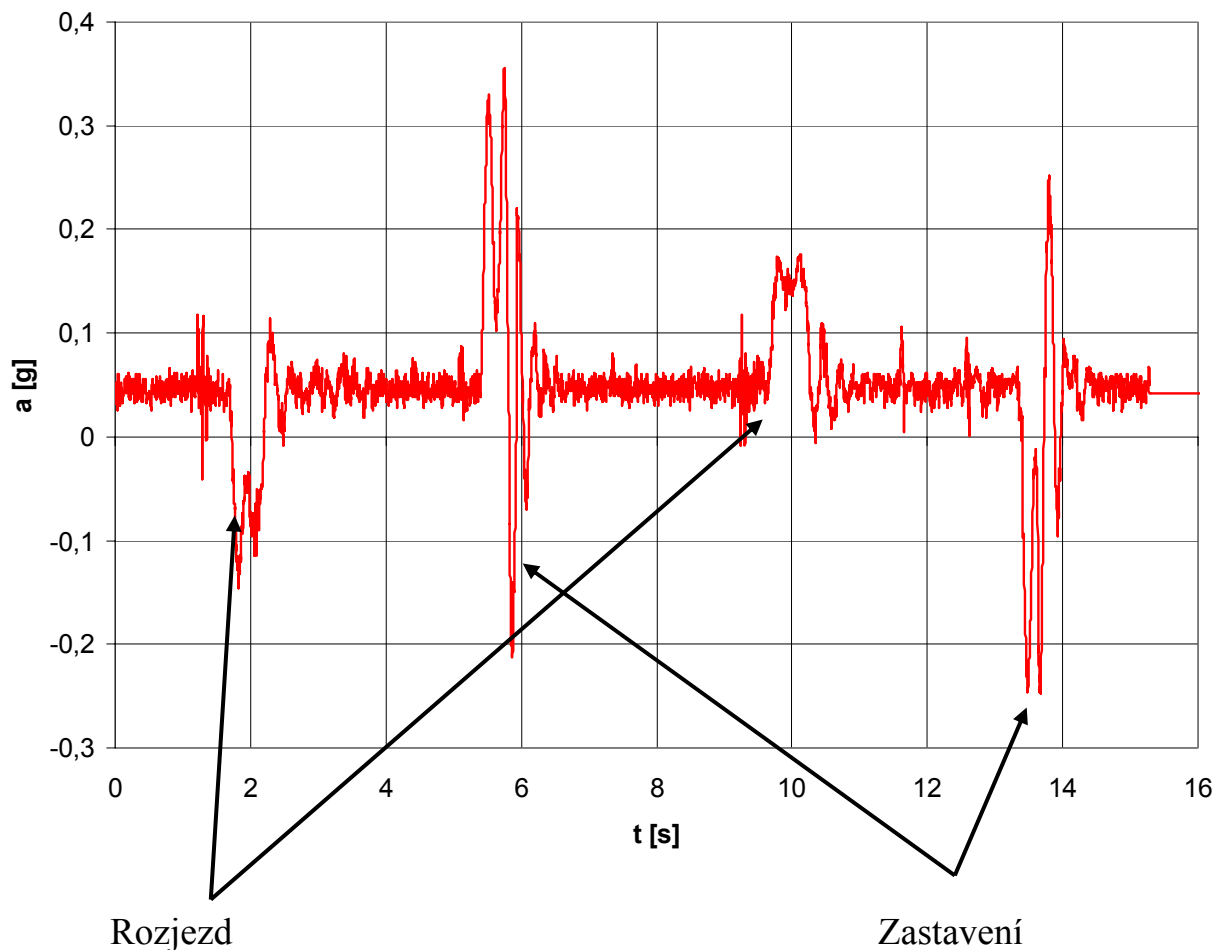
Při zavedení korekce nulové hodnoty se výsledky vystředí kolem počátku souřadnic. Tato korekce bohužel nepostihuje počáteční nelinearitu snímače, změřené tíhové zrychlení je menší, pravděpodobně díky silám, nutným k překonání tření v měřící soustavě akcelerometru. Změřené tíhové zrychlení je tedy ve všech osách přibližně o 0,15 g menší, než reálné. Toto tvrzení vychází z předpokladu, že na našem území je tíhové zrychlení v normálních mezích.

#### 8.3.2 Praktická měření zrychlení a vibrací

Pro praktická měření bylo využito možnosti připojit měřící přístroj k počítači. Sběr dat byl prováděn jednoduchým terminálem, který četl sériovou linku počítače.

Jako první byl měřen dvojnásobný rozjezd výtahů v panelovém domě. Oba výtahy byly měřeny pro jízdu nahoru i dolů, jízda proběhla mezi 2. a 3. patrem 12patrového domu. Výtahy byly zatíženy jednou osobou, to odpovídá u osobního výtahu přibližně 0,25 a u nákladního 0,18 maximální zátěže. Je uváděna vždy pouze ta osa, ve které je očekáváno zrychlení, tedy osa svislá.

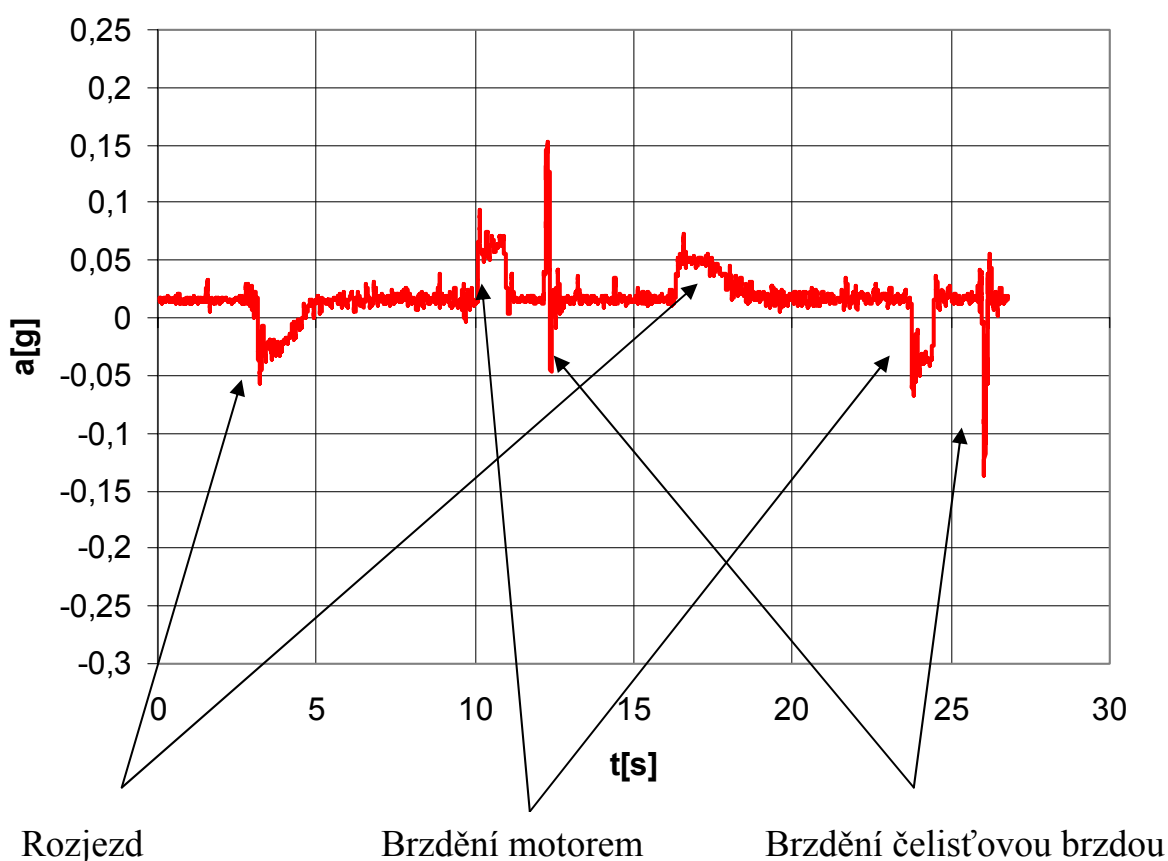
### Zrychlení osobního výtahu při rozjezdu a zastavení



Obr. 38: Rozjezd a zastavení osobního výtahu

U tohoto výtahu je vidět, že se jeho konstruktéři nesnažili rázy vzniklé změnou pohybu výtahové kabiny příliš řešit. V průběhu zrychlení jsou vidět záškuby při rozjezdu i při zastavení, které jsou způsobeny pružností dlouhých výtahových lan, prudkým rozběhem motoru a také prudkým brzděním, a to zároveň čelistovými brzdami a motorovou brzdou. U výtahu tohoto typu se evidentně nepředpokládá doprava těžších nákladů.

## Zrychlení nákladního výtahu při rozjezdu a zastavení



Obr. 39: Rozjezd a zastavení nákladního výtahu

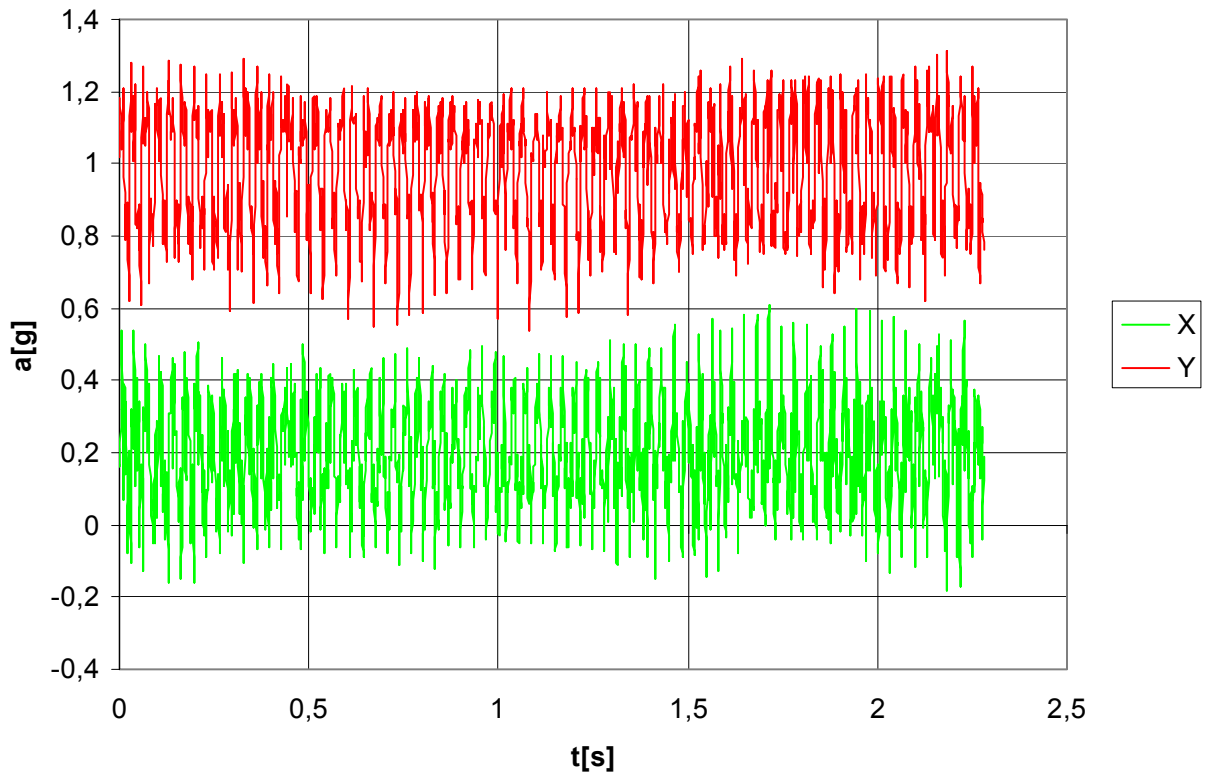
V průběhu zrychlení nákladního výtahu již nejsou zákmity při změně pohybu tak velké jako u výtahu osobního, ale jsou stále patrné. Ve výtazích tohoto typu jsou použity dvourychlostní motory, díky kterým není rozjezd tak razantní jako u předchozího typu. Při brzdění je nižší rychlost motoru použita pro zpomalení výtahové kabiny, zastavení se následně děje použitím čelist'ové brzdy.

Maximální zrychlení obou výtahů odpovídá jejich předpokládanému použití. Maximum naměřené v osobním výtahu je větší než 0,3 g. Tato hodnota je pro osoby přípustná, při dopravě nákladů by však mohla způsobit problémy. Nákladní výtah při svém maximálním zrychlení do 0,15 g vyhoví i při přepravě těžších břemen. Ze zkušenosti je mi známo, že při vyšším zatížení výtahu tato hodnota, dosažená při brzdění čelist'ovou brzdou ještě poklesne.

Bohužel u ani jednoho z výtahů nemohl být zjištěn přesný typ. Tabulky změřených hodnot nejsou pro svou objemnost uvedeny a budou přiloženy na vhodném datovém nosiči.

Pro měření vibrací byly vybrány následující 2 případy.:

### Vibrace stolního ventilátoru Philips HR3236



Obr. 40: Vibrace motoru stolního ventilátoru

Vibrace byly měřeny při nalepení desky akcelerometru na motorovou část stolního ventilátoru PhilipsHR3236. Pro přehlednost nebyl přípravek vynulován, kanál „Y“ je tedy zobrazen s offsetem odpovídajícím nalepení akcelerometru osou „Y“ k zemi v kladném smyslu.

Frekvence vibrací je přibližně

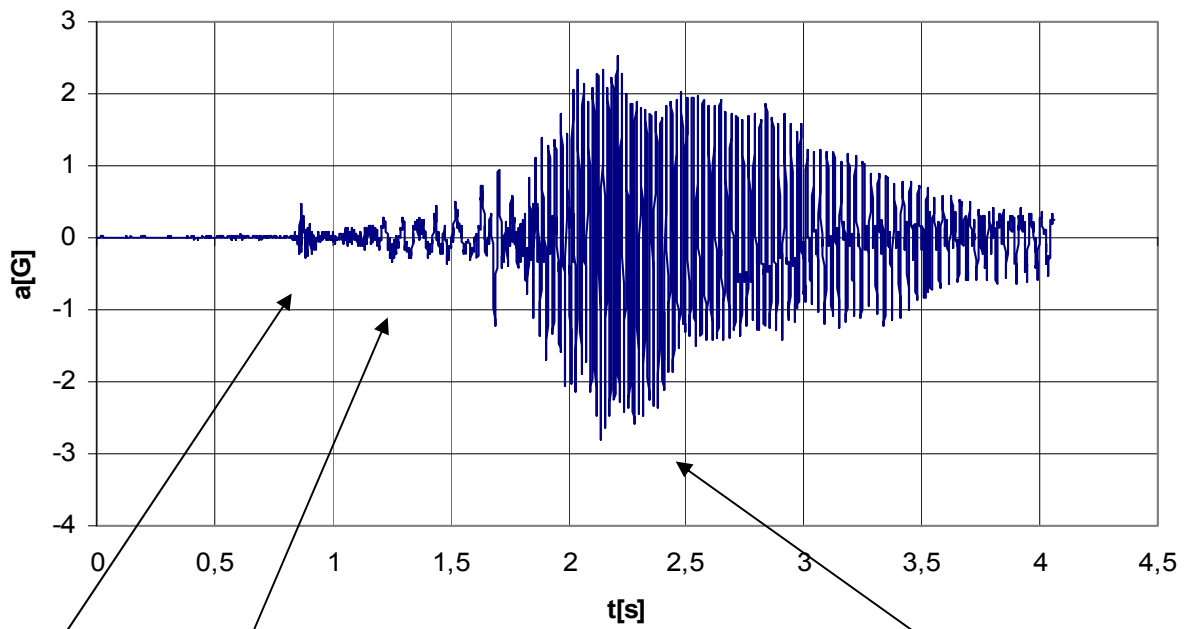
$$f_{\text{vib}}^{\text{ventilátor}} = 30\text{Hz}$$

Což odpovídá otáčkám vrtule ventilátoru, poháněné asynchronním jednofázovým motorem. Z průběhů zrychlení je možné uvážit, že vrtule ventilátoru není dobře vyvážená a z otáček motoru že parametry vrtule jsou vzhledem k motoru dobře navrženy.

Tento ventilátor také při spínání produkoval velké impulsní rušení, které téměř spolehlivě způsobilo restart mikrokontroléru přípravku, v lepším případě pouze nesmyslné hodnoty. Toto se nepodařilo odstranit ani použitím stíněných kabelů a bateriovým napájením celého přípravku.

Jako další zdroj vibrací byl vybrán motor vozidla Trabant 601 při startu. Akcelerometr byl umístěn nad hlavy válců k vstupu chladicího vzduchu (s ohledem na možné tepelné zatížení). Osa „X“ byla totožná s osou motoru, kladný smysl ve směru k řidiči, osa „Y“ směřovala vodorovně a pochopitelně kolmo k ose „X“, kladný smysl osy „Y“ byl směrem do vozidla.

### Start motoru vozidla Trabant 601,osa X

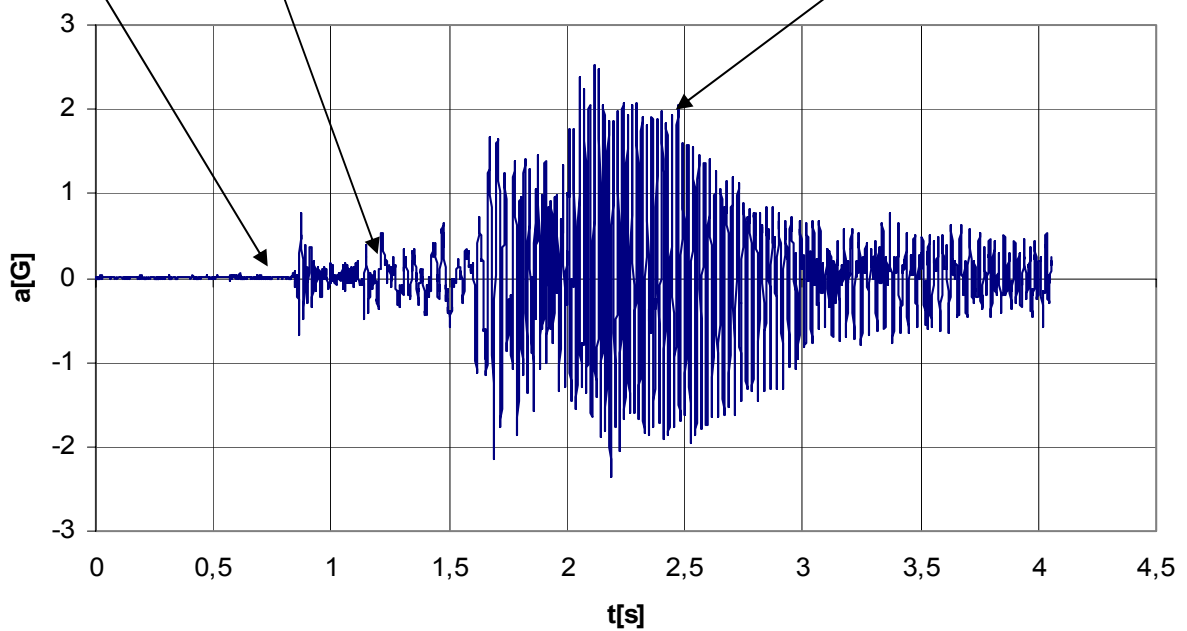


Náraz  
pastorku  
startéru

Otáčení  
startéru

Rozběh motoru

### Start motoru vozidla Trabant 601,osa Y



Obr. 41, Obr. 42: Start motoru vozidla Trabant 601

Na změřených průbězích je vidět několik hlavních částí:

#### Náraz pastorku startéru a otáčení startéru

Pro připojení spouštěče motoru k pohonné soustavě je použit pastorek, ovládaný elektromagnetem. Při připojení je elektromagnetem přitažen do pracovní polohy a umožní motoru spouštěče roztočit soustavu spalovacího motoru. Přitažení pastorku do pracovní polohy není nijak tlumeno. Jeho náraz při dosažení pracovní polohy je tedy velice silný. Vzhledem k tomu, že pohyblivá část je poměrně malá a lehká (cca 0,5 kg) a při nárazu udělí bloku motoru (cca 50 kg) zrychlení téměř 1 g,, musí se tato část pohybovat opravdu velmi rychle.

V další části průběhu je vidět několik téměř sinusových period s nízkou frekvencí. Tyto už jsou způsobeny pohybem soustavy spalovacího motoru, zatím však bez záběru.

#### Rozběh motoru

Vibrace v této části průběhu mají do značné míry náhodný charakter. Projevují se zde všechny aspekty jako vůle v motoru i zkušenost řidiče, neboť tyto motory se startují s lehkým přidáním plynu. Záběr motoru také není okamžitý, několik pracovních cyklů může být bez zapálení směsi. To se opět projeví nepravidelností ve změřeném průběhu. Volnoběžné otáčky byly seřizeny přibližně na 800 min<sup>-1</sup>, což odpovídá frekvenci změřeného průběhu.

#### Stabilní běh motoru

V poslední části změřeného průběhu je vidět průběh vibrací při stabilním běhu motoru při volnoběžných otáčkách.

Při podrobnějším pohledu na změřené průběhy je vidět, že by bylo možné zařízení po jednoduché úpravě software (případně po doplnění vhodným počítačovým zpracováním) použít i jako přesný otáčkoměr. Rozlišení by bylo dostačující teoreticky až pro  $N=15000$  (z mezní frekvence, dané PWM modulací akcelerometru). Podrobnější průběhy zde nebudou uvedeny, soubory změřených hodnot budou opět přiloženy.

Zde bylo ověřeno, že citlivost přípravku vůči rušení není příliš velká. Přípravek dokázal při použití stíněné kabeláže a napájení odděleného od palubní sítě (napájení z USB portu počítače použitého pro sběr dat, napájeno vlastní baterií použitého PC) pracovat v těsné blízkosti zapalovací soustavy automobilu, která je silným zdrojem rušení.

## 9 Závěr

V této práci byl vytvořen přípravek pro měření vibrací a zrychlení. Přípravek je schopen měřit zrychlení v rozsahu  $\pm 10g$  a vibrací s maximální frekvencí  $f_m \cong 250Hz$ . Přípravek je schopen měřit jak samostatně s výstupem na vlastní displej (zde samozřejmě s omezeným frekvenčním pásmem), tak ve spolupráci s počítačem. Přípravek je navržen jako modulární s možností odpojení právě částí, které při konkrétním měření nejsou zapotřebí.

V přípravku je použit moderní digitální akcelerometr s výstupem s modulací PWM a výkonný jednočipový mikrokontrolér pro zpracování dat.

Chyba měření přípravku zjištěná z provedených měření podle možností akcelerometru do 4% z celkového rozsahu v oblasti kolem nuly, kdy je chyba způsobena z hlavní části chybou linearitu snímače, při vyšších hodnotách zrychlení (nad 0,5-1g) se již chyba nelinearity neuplatňuje a chyba klesá až k 0,5%.

Použití přípravku je široké, lze měřit běžné hodnoty zrychlení a nízkofrekvenčních vibrací, po jednoduché úpravě SW nebo doplnění vhodným terminálem v PC by bylo možné zjišťovat i například otáčky spalovacích motorů, ventilátorů a ostatních rotujících hmot, které nejsou zcela přesně vyváženy.

Přípravek je i přes použití stíněných kabelů a filtraci napájecího napětí bohužel citlivý vůči silnému rušení. To je dáno nízkými úrovněmi napětí pro použití v jednočipovém mikrokontroléru a metodou čtení dat ze snímače pomocí pulzně-šířkové modulace. Přípravek tedy nelze provozovat v blízkosti nedokonale odrušených spínaných indukčních zátěží.

## 10 Použitá literatura

[1] BEJČEK, L.: *Měření neelektrických veličin: Skriptum*. Brno: VUT v Brně, 1988.

[2] *Analog devices - Datasheet for ADXL05*.

Dostupné na: [www.analog.com/UploadedFiles/Data\\_Sheets/ADXL05.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADXL05.pdf). [cit. 2007-5-10].

[3] *STmicro-Datasheet for LIS2L02AQ*

Dostupné na: <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/9221.pdf>. [cit. 2008-5-23].

[4] Christopher P. LEWIS, Michael KRAFT: *Simulation of a Digital Accelerometer in SIMULINK and PSPICE*.

Dostupné na: [www.ecs.soton.ac.uk/~mk1/exe\\_pap4.pdf](http://www.ecs.soton.ac.uk/~mk1/exe_pap4.pdf). [cit. 2007-3-10].

[5] P. Avitabile, T. Van Zandt: *Developing a Virtual Model of a Second Order System to Simulate Real Laboratory Measurement Problems.*: 2004.

Dostupné na: <http://macl.caeds.eng.uml.edu/abstract/asme04c.html>. [cit. 2007-3-10].

[6] *Analog devices- Modely*.

Dostupné na: <http://www.analog.com/en/prod/0,2877,ADXL202,00.html>,

Dostupné na: <http://www.analog.com/zh/content/0,2886,764%255F%255F24645,00.html>.

[cit. 2007-3-10].

[7] Cygnal - Katalogový list jednočipového mikrokontroléru 8051F040 .

[PDF soubor, CD-ROM]. CD součástí development kitu.

[8] MATOUŠEK David: *C pro mikrokontroléry: Příklady a aplikace pro C51 ve vývojovém prostředí Keil  $\mu$ Vision3, 6. díl*. Praha: BEN, 2007

[9] *Analog devices- Katalogový list ADXL202/ADXL210*.

Dostupné na: [www.analog.com/en/prod/0%2C2877%2CADXL210%2C00.html](http://www.analog.com/en/prod/0%2C2877%2CADXL210%2C00.html). [cit. 2008-5-23].