

Využití akcelerometrů pro měření náklonu a vibrací

1. Teoretický rozbor řešeného problému:

1.1 Definice zrychlení:

Jak již vyplývá ze samotného názvu, akcelerometry se využívají k měření zrychlení. Zrychlení obecně charakterizuje míru změny rychlosti hmotného bodu či celé soustavy hmotných bodů v čase. Stejně jako rychlost, i zrychlení je vektorová veličina, kterou definujeme takto:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_n + \mathbf{a}_t = d\mathbf{v}/dt \quad (\text{Rov. 1})$$

- \mathbf{a} – vektor okamžitého zrychlení [ms^{-2}]
- \mathbf{a}_n – vektor normálové složky zrychlení [ms^{-2}]
- \mathbf{a}_t – vektor tečné složky zrychlení [ms^{-2}]
- \mathbf{v} – vektor rychlosti [ms^{-1}]
- d/dt – časová derivace

Tečné zrychlení ovlivňuje velikost rychlosti pohybu a normálové zrychlení ovlivňuje jeho směr. Podle podílu obou složek zrychlení definujeme tyto typy pohybů:

Rovnoměrný přímočarý	$\mathbf{a}_t = 0, \mathbf{a}_n = 0$
Nerovnoměrný přímočarý	$\mathbf{a}_t \neq 0, \mathbf{a}_n = 0$
Rovnoměrný křivočarý	$\mathbf{a}_t = 0, \mathbf{a}_n \neq 0$
Nerovnoměrný křivočarý	$\mathbf{a}_t \neq 0, \mathbf{a}_n \neq 0$

Pro samotné měření zrychlení se používá:

- a) Vztahu mezi silou, hmotností a zrychlením, který nazýváme Druhý Newtonův zákon (zákon síly):

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} \quad (\text{Rov. 2})$$

- \mathbf{F} - vektor síly [N]
- m - hmotnost [kg]
- \mathbf{a} - vektor zrychlení [ms^{-2}]

V případě, že je \mathbf{F} způsobena gravitací Země, pak zrychlení nazýváme tíhové a značíme \mathbf{g} .

- b) Třetí Newtonův zákon (zákon akce a reakce): při vzájemném působení hmotných útvarů, prostředí, vznikají vždy vzájemná silová působení, která jsou stejně velká, ale mají vzájemně opačný směr (působí proti sobě). [2]

1.2 Princip činnosti akcelerometrů:

Jak již bylo řečeno v kapitole 1.1, k měření velikosti zrychlení obvykle využíváme 2. a 3. Newtonova zákona. Měřením síly, která působí na hmotný bod o známé hmotnosti lze zjistit zrychlení, které na tento bod působí.

Jedním z nejjednodušších způsobů, jak toto zrychlení měřit je umístění závaží o hmotnosti m na pružinu o tuhosti k . Velikost výchylky (protažení) této pružiny je x , přičemž platí:

$$F=k \cdot x$$

(Rov. 3)

F - vektor síly [N]

k - tuhost pružiny [Nm^{-1}]

x - vektor velikosti (a směru) výchylky hmotného bodu na pružině [m]

Budeme-li uvažovat výchylku pouze v jednom směru (například ve směru osy x), pak ve vztazích můžeme považovat vektory za skalární veličiny. Využitím rovnice 2 a 3 obdržíme výsledný vztah pro velikost zrychlení:

$$a = \frac{k \cdot x}{m}$$

(Rov. 4)

a - zrychlení [ms^{-2}]

k - tuhost pružiny [Nm^{-1}]

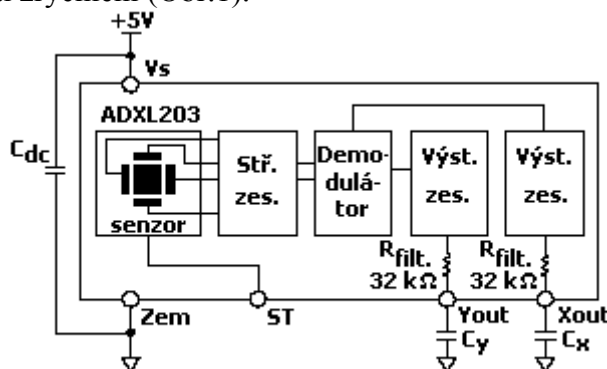
x - velikost výchylky hmotného bodu na pružině [m]

m - hmotnost závaží [kg]

Zrychlení je tedy přímo úměrné velikosti výchylky x .

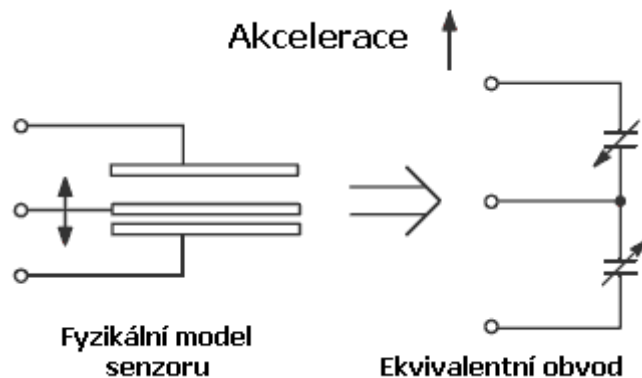
1.3 Konstrukce moderních akcelerometrů:

Výroba moderních akcelerometrů je založena na technologii MEMS (Micro-ElectroMechanical Systems), která umožňuje konstrukci elektronických i mechanických struktur o velikostech jednotek μm na jedné ploše čipu. Tím lze docílit velmi dobré citlivosti, mechanické odolnosti a spolehlivosti těchto součástek. Tyto součástky v sobě obvykle integrují jednak samotný senzor a dále též předzesilovač a teplotní kompenzaci, tudíž manipulace a zapojení s tímto senzorem je pak velmi snadná a výstupní napětí ze senzoru přímo odpovídá velikosti zrychlení (Obr.1).



Obrázek 1: Funkční blokový diagram integrovaného senzoru ADXL 203 [4]

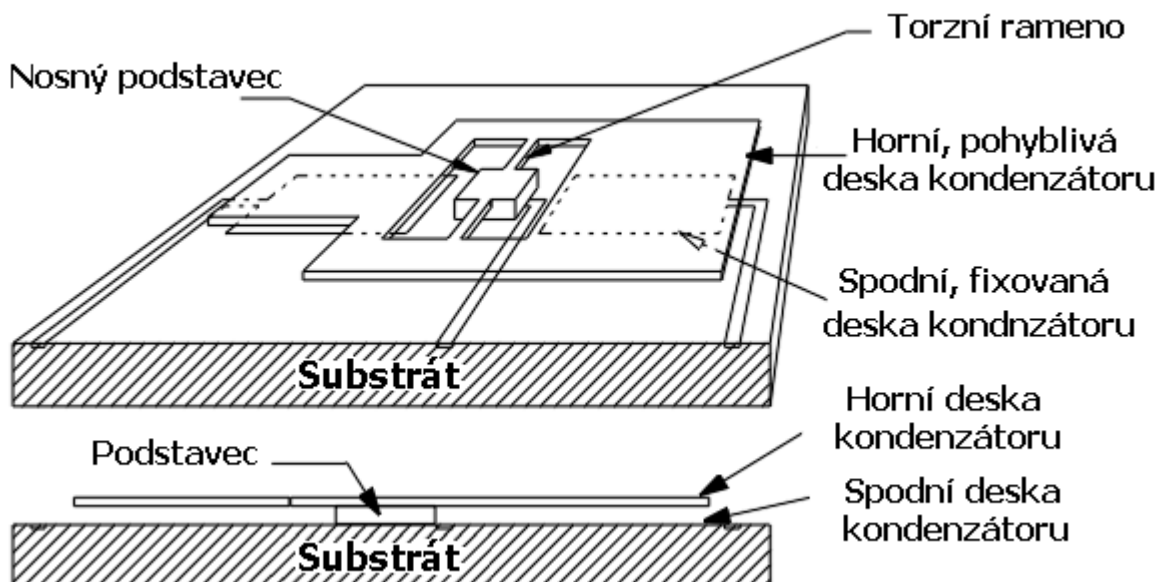
Funkční princip snímacího senzoru je zde opět založen na vyrovnávání síly působící na hmotný objekt v důsledku zrychlení a síly pružiny (v tomto případě torzní). Velikost výchylky je v tomto případě indikována změnou kapacity. Na obrázku 2 je uveden fyzikální model tohoto řešení a příslušný ekvivalentní obvod pro vyhodnocení elektronickou částí senzoru.



Obrázek 2: Fyzikální model a ekvivalentní obvod senzoru typu MMA firmy Motorola [5]

Střední elektroda je zároveň hmotou, která v důsledku zrychlení mění svou polohu vůči dvěma deskám kondenzátoru, a to vždy v opačném smyslu. Tím lze sestavit citlivý vyhodnocovací můstek a měřit tak velikost zrychlení v daném směru.

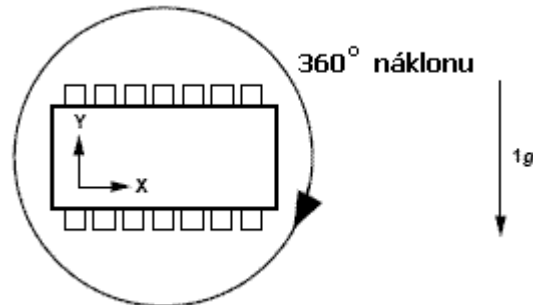
Jedno z možných uspořádání takového elektro-mechanického systému je na obrázku 3.



Obrázek 3: Reálné uspořádání mechanických prvků integrovaného akcelerometru [3]

Citlivým elementem je v tomto případě plochá niklová deska, která se skládá ze dvou nestejně velikých křídel. Uprostřed je tento objekt ukotven pomocí dvou torzních ramen (torzní pružina) k nosnému podstavci. Za normálních okolností je systém vyvážen a obě křídla desky jsou v jedné rovině. Díky asymetrii této desky se však situace mění v případě, že na systém začne působit zrychlení kolmé k rovině křídel. Širší křídlo má totiž větší hmotnost, proto podle rov. 2 na tuto stranu desky bude působit větší síla než na stranu druhou a v důsledku toho se celá deska nakloní podle osy torzních ramen. Pod každým křídlem je umístěna kovová elektroda, která spolu s plochou křídla tvoří deskový kondenzátor. Při náklonu desky se tedy jedno křídlo přiblíží k substrátu (kapacita roste) a druhé křídlo se odkloní (kapacita klesá). Tento systém je ekvivalentní náhradnímu modelu podle obrázku 2. Příklad reálné velikosti tohoto objektu je $1000\mu\text{m}$ na délku desky, $600\mu\text{m}$ na šířku křídla, $5\mu\text{m}$ mezera mezi křídlem a substrátem. Při těchto rozměrech se kapacita tohoto kondenzátoru pohybuje v relacích okolo $0,1\text{ pF}$.

Uvedený příklad akcelerometru vyhodnocuje zrychlení ve směru osy Z, tedy ve směru kolmém na plochu čipu. Podobná uspořádání se používají u akcelerometrů které vyhodnocují zrychlení ve směrech os X a Y. Tyto typy akcelerometrů budeme používat i v našich úlohách. Na obrázku 4 je uveden příklad použití senzoru pro měření náklonu, včetně vyznačených směrů os X a Y.



Obrázek 4: Využití akcelerometru k měření náklonu ve dvou osách X a Y [6]

1.4 Reálné vlastnosti akcelerometrů:

Pro každý senzor definujeme určitý soubor vlastností a limitací, které vymezují oblast využitelnosti daného senzoru. Nejdůležitější informace o senzoru jsou:

- 1) Rozsah měřitelných hodnot (ADXL203: ± 1.7 g; MMA32001: ± 40 g)
- 2) Mezní hodnoty – Kritická velikost napájení (5,25V) a zrychlení (až 2000g), které daný senzor ještě nezničí
- 3) Frekvenční odezva mechanické soustavy uvnitř senzoru na skokovou změnu zrychlení. Tato frekvence je potlačena vysoce efektivními filtry aby se docílilo maximální přesnosti při snímání vibrací

Pro každý senzor definujeme jeho citlivost na budící veličinu. Tu nám udává výrobce. Pro konkrétní aplikace, kde nás zajímá jiná veličina než samotné zrychlení je nutno si danou citlivost odvodit nebo změřit. Například pokud použijeme akcelerometr k měření náklonu a výstupní veličinou z tohoto senzoru je napětí, pak citlivost definujeme:

$$s = \frac{\partial U}{\partial \alpha}$$

(Rov. 5)

s - citlivost senzoru náklonu [mV/°]

U - výstupní napětí ze senzoru [mV]

α - úhel naklonění [°]

1.5 Praktické využití akcelerometrů:

Akcelerometry nalézají uplatnění v mnoha oblastech:

- měření náklonu: využívají se nejcitlivější senzory, schopné indikovat velikost tíhového zrychlení v daném směru. Pokud je tíhové zrychlení přesně v ose vyhodnocování, pak je odezva senzoru maximální, pokud je senzor natočen, pak výstupní signál odpovídá:

$$U_{\text{výst}} = U_{\text{výst max}} \cdot \sin(\alpha), \text{ respektive } U_{\text{výst}} = U_{\text{výst max}} \cdot \cos(\alpha)$$

(Rov. 6)

Podle toho, v jakém směru osy dané zrychlení sledujeme.

- Senzor vibrací: Akceleraci jsme si definovali jako derivaci rychlosti daného hmotného bodu (Rov. 1). Budeme-li tedy sledovat odezvu senzoru, který je mechanicky pevně spojen s kmitajícím objektem, pak je tato odezva úměrná derivaci průběhu okamžité výchylky kmitajícího objektu.
- Dvojitou integrací signálu z akcelerometru lze určit vzdálenost, kterou urazil určitý bod za danou dobu.

$$x = \int_0^t v(\tau) \cdot d\tau = \int_0^t \int_0^t a(\tau) \cdot d\tau \cdot d\tau$$

(Rov. 7)

x – výchylka [m]
v – rychlost [ms^{-1}]
a – zrychlení [ms^{-2}]
t – čas [s]

Použitelné například k ovládání počítače (náhrada myši). Případně v kombinaci s gyroskopy to lze využít pro automatický záznam dráhy objektu v prostoru.

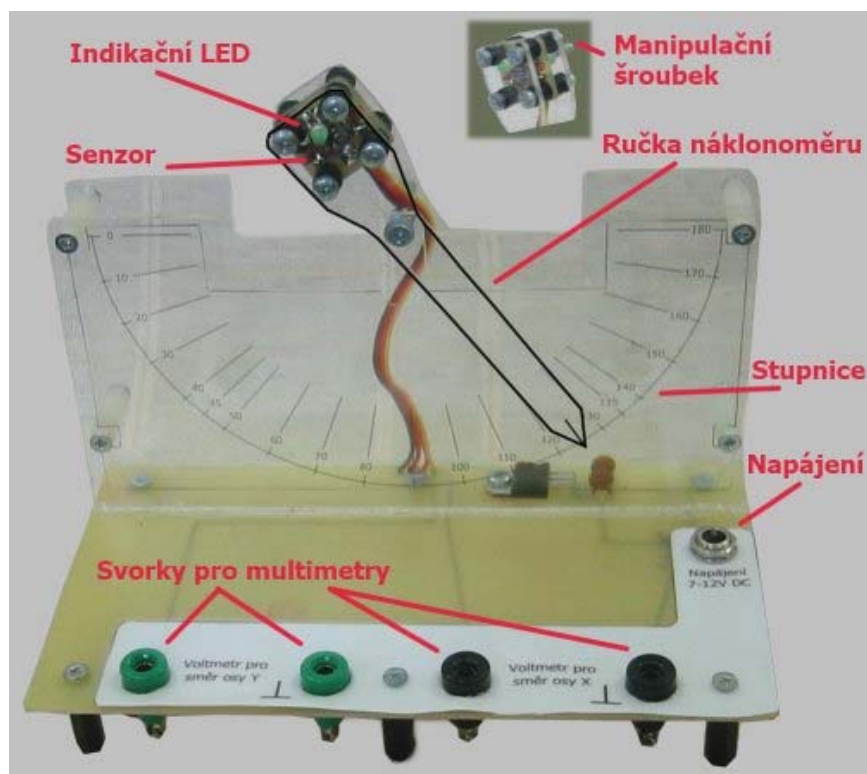
- Indikace velikosti zrychlení je též velmi důležitá v bezpečnostní a zabezpečovací technice (spouštění airbagů při nárazu, detekce otřesů v alarmech pro auta, ...)

2. Popis měřících přípravků:

2.1 Měření náklonu:

Přípravek na obrázku 5 se skládá z otočné ručky, která obsahuje integrovaný akcelerometr ADXL203 firmy Analog Devices. Nakláněním této ručky se mění směr tíhového zrychlení, které působí na senzor ve směrech X a Y. Pomocí dvou multimetrů lze toto tíhové zrychlení pro oba směry měřit a příslušný úhel odečíst ze stupnice.

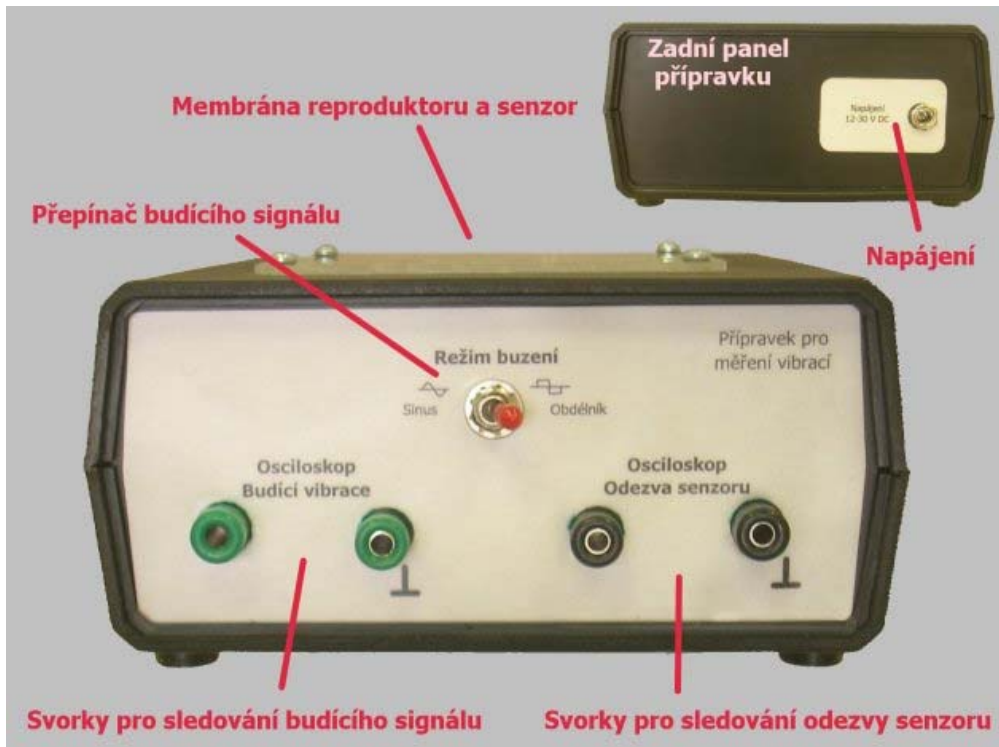
Přípravek je napájen ze zdroje napětí o velikosti 7-12V.



Obrázek 5: Popis přípravku pro měření náklonu

2.2 Měření vibrací:

Přípravek na obrázku 6 obsahuje integrovaný akcelerometr MMA3201D firmy Motorola. Tento senzor je pevně spojen s membránou reproduktoru, kterou budíme různými vibracemi. Volbu režimu buzení provádíme přepínačem. Budicí signál a odezvu senzoru lze sledovat na stínítku osciloskopu. K tomuto účelu jsou na přípravku vyvedeny příslušné svorky. Při připojování těchto svorek je nutno respektovat zapojení zemního vodiče z osciloskopu, aby nedošlo ke zkratování výstupu. Svorka pro připojení země je označena obráceným písmenem „T“.



Obrázek 6: Popis přípravku pro měření vibrací

3. Úkol měření:

- 3.1 Změřte závislost výstupního napětí ze senzoru na úhlu náklonu integrovaného akcelerometru ADXL203 firmy Analog Devices pro směry os X a Y.
- Změřené závislosti vyneste do jednoho grafu
 - Spočítejte a vyneste do grafu průběh citlivosti pro osy X a Y podle rov. 5
 - Odhadněte, jaký vztah platí mezi průběhem napětí pro směr osy X a pro směr osy Y
- 3.2 Pomocí přípravku pro měření vibrací zobrazte na stínítku osciloskopu průběh budícího signálu a odezvy senzoru MMA3201D firmy Motorola na toto buzení
- Zakreslete buzení a odezvu senzoru pro sinusový signál, respektujte při tom fázové posuny a pokuste se odhadnout jaký je mezi těmito signály vztah.
 - Zakreslete buzení a odezvu senzoru pro obdélkový signál, odečtěte periodu vlastních kmitů mechanické soustavy, tvořené membránou reproduktoru a odhadněte tak rezonanční frekvenci reproduktoru (vliv senzoru zanedbejte).

4. Postup měření:

4.1 Měření náklonu

- 1) Propojte přípravek s multimetry, pracujícími jako voltmetr v rozsahu do 20 V
- 2) Připojte zdroj napětí.
- 3) **Překontrolujte zapojení multimetrů** – vodiče musí být na multimetru zapojeny do svorek pro měření napětí, rozsah nastaven na 20V.
- 4) Zapněte napájecí zdroj do sítě – při správném zapojení se rozsvítí indikační LED
- 5) Pozvolna pohybujte ručkou náklonoměru a pro jednotlivé úhly zapisujte do příslušné tabulky velikosti výstupního napětí pro směry os X a Y. **Pro manipulaci s ručkou používejte manipulačního šroubku.**
- 6) Změřené závislosti vynesete do jednoho grafu.
- 7) Na základě změřených charakteristik a využitím rovnice 5 (kde nahradíte derivaci diferencí) vyplňte tabulku a vynesete graf závislosti citlivosti senzoru pro směry os X a Y.

4.2 Měření vibrací



- 1) Propojte přípravek pro měření vibrací s osciloskopem. Na kanál č. 1 přiveďte budící signál (zelené svorky) a na kanál č. 2 signál ze senzoru (černé svorky). **Při propojování dejte pozor, abyste správně připojili zemnicí vodiče z osciloskopu (přijdou zapojit na svorku označenou obráceným „T“).** Jinak dojde ke zkratování výstupů z přípravku a hrozí jeho poškození!
- 2) Kanál č. 1 přepněte do DC režimu, kanál č. 2 do AC režimu.
- 3) Zesílení pro oba kanály nastavte na maximální rozsah (nejmenší zesílení).
- 4) Přepínač budícího signálu dejte do polohy „Sinus“
- 5) Připojte napájecí adaptér 12V
- 6) Pozvolna zvyšujte zesílení vertikálního zesilovače osciloskopu tak dlouho, dokud na obou kanálech nebude patrný signál. Pomocí ovládacího pro časovou základnu a synchronizaci nastavte na stínítku osciloskopu signály tak, aby jste je mohli snadno obkreslit
- 7) Zaznamenejte průběhy obou signálů z osciloskopu. Respektujte při tom jejich vzájemný fázový posun!
- 8) Přepněte přepínač na přípravku do polohy „Obdélník“ a nastavte na osciloskopu zesílení a časovou základnu tak, aby byl jasně patrný signál ze senzoru i signál budící.
- 9) Zaznamenejte průběhy obou signálů z osciloskopu. Opět respektujte jejich fázi.
- 10) Detailně prostudujte odezvu senzoru v okamžicích náběžné a sestupné hrany buzení – odečtěte frekvenci vlastních kmitů mechanické soustavy, která je tvořena membránou reproduktoru.

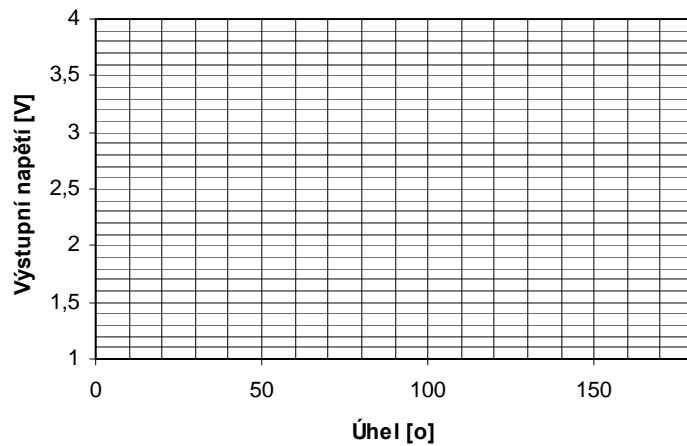
5. Naměřené výsledky:

5.1 Měření náklonu:

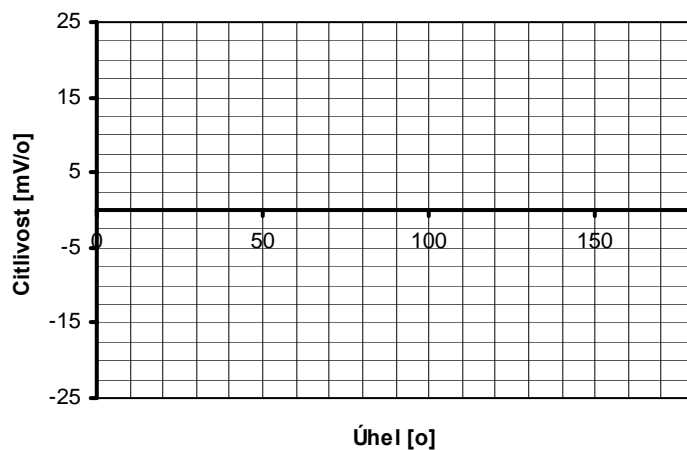
Úhel [°]	Signál pro osu		Úhel [°]	Signál pro osu		Úhel [°]	Signál pro osu	
	X[V]	Y[V]		X[V]	Y[V]		X[V]	Y[V]
0			60			130		
10			70			135		
20			80			140		
30			90			150		
40			100			160		
45			110			170		
50			120			180		

Úhel [°]	Citlivost (podle Rov. 5)		Úhel [°]	Citlivost (podle Rov. 5)		Úhel [°]	Citlivost (podle Rov. 5)	
	X[mV/°]	Y[mV/°]		X[mV/°]	Y[mV/°]		X[mV/°]	Y[mV/°]
0-10			60-70			130-135		
10-20			70-80			135-140		
20-30			80-90			140-150		
30-40			90-100			150-160		
40-45			100-110			160-170		
45-50			110-120			170-180		
50-60			120-130					

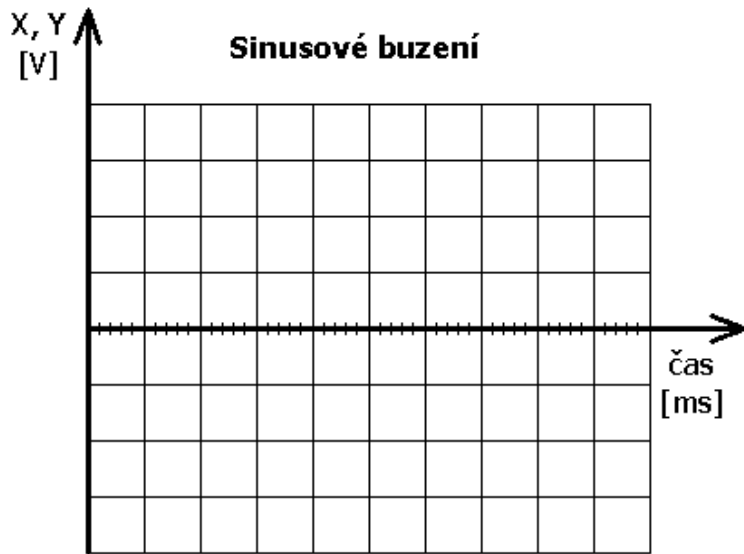
Náклон ve směru osy X a Y



Citlivost ve směru osy X a Y



5.2 Měření vibrací:



Frekvence vlastních kmitů při obdélníkovém buzení:

f =Hz

6. Seznam přístrojů:

1. Přípravek pro měření náklonu
2. Přípravek pro měření vibrací
3. Multimetr 2 ks.
4. Dvoukanálový osciloskop
5. Napájecí adaptér
6. Sada 4 vodičů pro multimetry a dva vodiče k osciloskopu, zakončené banánkem

7. Rozbor a závěr:

Literatura:

- [1] <http://www.roboticsindia.com/modules.php?name=News&file=article&sid=90>
- [2] http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpb/kompendium/biomechanika/dynamika_newton.php
- [3] <http://www.silicondesigns.com/tech.html>
- [4] Datasheet k senzoru ADXL 203 od firmy Analog Devices, <http://www.analog.com/>
- [5] Datasheet k senzoru MMA3201D Motorola, <http://www.freescale.com/>
- [6] Datasheet k senzoru ADXL 202 od firmy Analog Devices, <http://www.analog.com/>