

Mikroelektromechanické systémy a možnosti jejich využití v průmyslu komerční bezpečnosti

Microelectromechanical systems and possibilities of its utilization in the commercial security industry

Daniel Vrána

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Daniel VRÁNA**
Osobní číslo: **A08680**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Mikroelektromechanické systémy a možnosti jejich využití v průmyslu komerční bezpečnosti**

Zásady pro vypracování:

1. Vysvětlete princip zařízení mikroelektromechanických systémů.
2. Sestavte přehled oblastí použitelnosti těchto zařízení.
3. Z dostupných zdrojů vypracujte aktuální přehled zařízení využívajících MEMS v oblasti bezpečnostních technologií.
4. Navrhněte další možnosti využití zařízení MEMS v oblasti bezpečnostních technologií.
5. Provedte praktické zkoušky s vybraným zařízením, výsledky diskutujte.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. HUSÁK, Miroslav. Mikrosenzory a mikroaktuátory. 1. vydání. Praha : Academia, 2008. ISBN 80-200-1478-8.
2. GAD-EL-HAK, Mohamed. The MEMS handbook. 1st edition : CRC PRESS, 2002. ISBN 0-8493-0077-0.
3. L. HARTZELL, Allyson; G. DA SILVA, Mark; R. SHEA, Herbert. MEMS Reliability. 1st edition : Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-6017-7.
4. BEEBY, Stephen; ENSELL, Graham ; KRAFT, Michael . MEMS Mechanical Sensors. 1st edition : Artech House, 2004. ISBN 1-58053-536-4.
5. K. VARADAN, Vijay; VINOY, K. J.; GOPALAKRISHNAN, S. Smart Material Systems and MEMS. 1st edition : John Wiley & Sons Ltd, 2006. ISBN 978-0-470-09361-0.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lubomír Macků, Ph.D.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

25. února 2011

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Bakalářské práce pojednává o principech mikroelektromechanických systémů (MEMS) a jejich využitelnosti.

Teoretická část objasňuje principy a výrobní technologie MEMS systémů. Dále je zde rozebráno jejich obecné použití.

Praktická část práce se zabývá využitím systémů v průmyslu komerční bezpečnosti, kde všude lze tyto systémy nalézt a další možné aplikace, které mohou sloužit pro bezpečnostní průmysl. Závěrečná část práce obsahuje výsledky praktického měření s konkrétním čidlem MEMS, a to akcelerometrem. Podrobně je rozebrán postup měření a provedeno vyhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova:

MEMS, mikroelektromechanické systémy, mikrosystém, akční člen, mikrovýroba, mikroaktuátory, mikrosenzory, mikrostruktura, akcelerometr.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to explain the principles of microelectromechanical systems (MEMS) and indicate the applicability of these systems.

The theoretical part explains the principles and manufacturing technology of MEMS systems. There is also stated their general use. The practical part deals with using of these systems in the commercial security industry and where can be all these systems found. There are stated other possible applications that can be used for the security industry too. The final part of this thesis contains results of practical measurement with MEMS sensor, an accelerometer. There is analyzed measurement procedure and evaluation of achieved results in detail.

Keywords:

MEMS, microelectromechanical systems, microsystem, actuator, microproduction, microactuator, microsensors, microstructure, accelerometer.

PODĚKOVÁNÍ

Úvodem mé bakalářské práce bych chtěl tímto poděkovat všem, kteří se podíleli na jejím dokončení a také za podněty, návrh a nápady, které byly pro mne inspirací. Především děkuji mému vedoucímu práce, panu Ing. Lubomíru Macků, Ph.D. za jeho ochotu, vedení a spolupráci při řešení problémů spojených s tvorbou bakalářské práce a firmě MEAS Prog. s.r.o za umožnění odměření praktické části bakalářské práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

PODĚKOVÁNÍ	5
ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 OBECNÁ DEFINICE MEMS SYSTÉMŮ	12
2 POPIS MEMS TECHNOLOGIE	13
3 STRUKTURA MEMS ZAŘÍZENÍ	14
3.1 MIKROSENZORY	14
3.1.1 Druhy mikrosenzorů	14
3.2 MIKROAKTUÁTORY	15
3.3 MIKROELEKTRONIKA	15
3.4 MIKROSTRUKTURY	16
4 MATERIÁLY A VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	17
4.1 MATERIÁLY	17
4.1.1 Polovodiče	17
4.1.2 Kovy	17
4.1.3 Keramika	18
4.1.4 Polymery	18
4.2 VÝROBNÍ TECHNOLOGIE	18
4.2.1 Povrchové mikroobrábění	18
4.2.2 Objemové mikroobrábění	19
4.2.3 LIGA	20
4.2.4 Galvanizace	20
4.2.5 Mikroobrábění excimerovým laserem	21
5 OBLASTI POUŽITELNOSTI MEMS ZAŘÍZENÍ	22
5.1 OPTICKÉ MEMS (MOEMS)	22
5.2 BIOMEMS	22
5.3 RF- MEMS	23
6 VYBRANÉ NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ MEMS SENZORY	24
6.1 TLAKOVÉ SENZORY	24
6.2 INERCIÁLNÍ SENZORY	24
6.2.1 Akcelerometry	25
6.2.2 Gyroskopy	26
6.2.3 Rozdíl mezi MEMS gyroskopem a akcelerometrem	27
6.2.4 Senzor vibrací	27
6.3 SNÍMAČE PRŮTOKU	27
7 DALŠÍ POTENCIONÁLNÍ OBLASTI VYUŽITÍ MEMS SYSTÉMŮ	28
II PRAKTICKÁ ČÁST	31
8 PŘEHLED ZAŘÍZENÍ VYUŽÍVAJÍCÍ MEMS V OBLASTI BEZPEČNOSTNÍCH TECHNOLOGIÍCH	32

8.1	GPS SYSTÉM.....	32
8.2	MIKROFONY.....	33
8.3	MEMS SYSTÉMY PRO DETEKCI CHEMICKÝCH SLOUČENIN.....	34
8.4	MEMS AKUSTICKÉ SENZORY PLYNU.....	35
8.5	AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL	36
9	NÁVRH DALŠÍCH MOŽNOSTÍ VYUŽITÍ MEMS ZAŘÍZENÍ V BEZPEČNOSTNÍCH TECHNOLOGIÍCH	38
10	PRAKTICKÉ ZKOUŠKY	39
10.1	ÚVOD MĚŘENÍ.....	39
10.2	MEMS AKCELEROMETR ADXL 203	39
10.3	EAGLE	41
10.4	NÁVRH SCHÉMATU A DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	42
10.5	MĚŘENÍ AKCELEROMETRU.....	44
10.5.1	Postup měření.....	44
10.6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	47
10.6.1	Nenaklápěná osa.....	47
10.6.2	Naklápěná osa	48
10.7	ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	53
	ZÁVĚR	55
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	56
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	61
	SEZNAM TABULEK	62
	SEZNAM GRAFŮ.....	63

ÚVOD

Nutnost měřit a regulovat obecné fyzikální a biologické veličiny je známá velmi dlouho. Již Galileo Galilei řekl: „Měřit vše, co je měřitelné, a co není měřitelné, měřitelným učinit“. Postupně se vyvíjely různé mechanismy využívající ve své době dostupné technické poznatky. S rozvojem elektrotechniky a později elektroniky se čím dál tím více tyto systémy začaly vybavovat jednotkami pro zpracování elektrického signálu. [1]

Z počátku rozvoje elektroniky a elektrotechniky bylo zapojení na elektrický obvod poměrně jednoduché. K jednoduchým sensorům na vstupu systému se připojovala jednoduchá elektronika, která umožňovala měření fyzikálních, biologických nebo chemických signálů a následně dokázala signály zpracovávat. S rozvojem integrované elektroniky se i v této oblasti začala integrace uplatňovat, a postupně vznikaly integrované systémy s převodníky a elektronikou v jednom kompletním pouzdře. Koncem 80. let 20. století se objevil zcela nový obor, který spojil různé technické obory, jako např. mechaniku, optiku a elektroniku. Celý tento kompletní systém se začal nazývat mikrosystémy.

Jelikož stále dochází v této oblasti k vývoji, přechází postupně technologie z mikrosystémů na nanosystémy. Po celém světě se stále více diskutuje o snižování rozměrů celého výrobku a zvyšování integrace prvků na jeden čip. I samotné součástky je tendence co nejvíce zmenšovat. Jejich funkčnost však musí zůstat zachována. Je tedy logické, že vývoj se musí posouvat dopředu a dochází k tomu, že nezbytnou technologií pro náš život se stávají nanosystémy. Nanosystémy se v práci nezabývám, jelikož jsou zatím na počátku svého vývoje a v tuto chvíli nelze s jistotou říci, kdy budou uvedeny na trh. Je však možné, že právě tyto systémy budou stát u zrodu příští průmyslové revoluce.

Díky mikrosystémové technologii, která umožňuje zmenšování elektronických obvodů a miniaturizaci mechanických obvodů, se tyto dvě oblasti mohly sjednotit a vznikly mikroelektromechanické systémy (MEMS). Právě problematika MEMS systémů je popsána v této bakalářské práci.

V teoretické části je uvedena obecná definice MEMS systémů, jejich vývoj a popis funkčnosti těchto systémů. Následně je popsáno z jakých materiálů se tyto systémy vyrábějí, jakými metodami lze při výrobě postupovat a v jakých oblastech jsou využitelné.

MEMS systémy jsou ve většině případů složeny ze čtyř hlavních celků:

- mikrosenzor,
- mikroaktuátor,
- mikroelektronika,
- mikrostruktura.

Všechny tyto části jsou v bakalářské práci popsány.

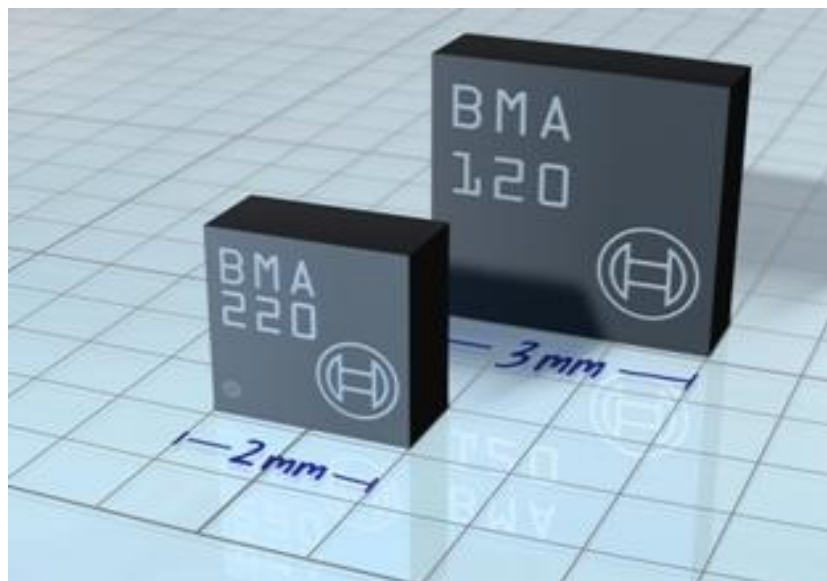
V praktické části bakalářské práce je uvedeno, kde všude je možné MEMS systémy využít, především v oblasti bezpečnostní technologie. Dále jsou zde uvedena měření MEMS akcelerometru a výsledky, kterých bylo dosaženo.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBECNÁ DEFINICE MEMS SYSTÉMŮ

Zkratka MEMS znamená mikroelektromechanické systémy, která byla vytvořena ve spojených státech v 80. letech. Přibližně ve stejných letech začali Evropané používat výraz mikrosystémové technologie. Zatímco v některých jiných částech se jim říká „mikrosystémové technologie“ nebo „mikroobráběcí zařízení“, MEMS je vhodnější termín, poněvadž se týká konkrétně mechanického (mikro) zařízení a zahrnuje i širší oblasti. Obrázek (Obr. 1) znázorňuje velikost snímače zrychlení v porovnání s milimetrovým papírem. Pojem mikrosystém může zahrnovat například: [4]

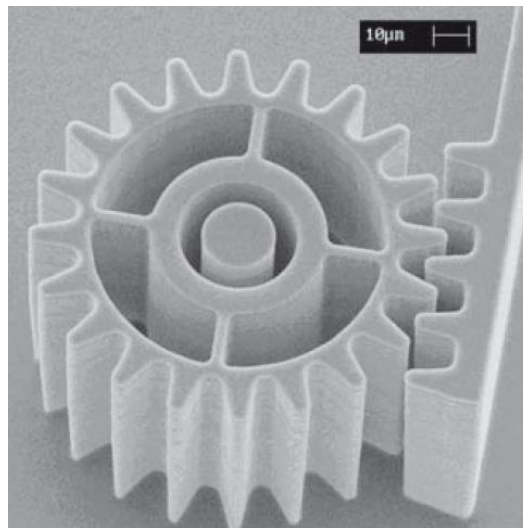
- čidlo, které přivádí zjištěné informace do systému,
- elektronický obvod pro úpravu signálu z čidla,
- akční člen, který reaguje na elektrické signály generované v obvodu.



Obr. 1 Miniaturní MEMS snímač zrychlení od firmy Bosch [15]

2 POPIS MEMS TECHNOLOGIE

Mikroelektromechanické systémy, nebo-li MEMS jsou technologie, které v jejich nejobecnější podobě mohou být definovány jako miniaturní mechanické a elektro-mechanické prvky, které jsou vyrobeny za použití techniky tzv. mikrovýroby. Kritické fyzické rozměry zařízení MEMS se mohou pohybovat od jednoho mikronu níže na dolním konci rozměrového spektra, až po několik milimetrů. Podobné typy zařízení MEMS se liší od relativně jednoduchých konstrukcí bez pohyblivých prvků, až po velmi složité elektromechanické systémy s několika pohyblivými částmi pod kontrolou integrované mikroelektroniky. Jedním z hlavních kritérií MEMS označují to, že existují alespoň některé prvky, které mají mechanické funkčnosti, proto se tyto prvky mohou pohybovat, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 2). [6]



Obr. 2 Převodový mechanismus MEMS zařízení [16]

Funkční prvky v MEMS zahrnují senzory, mikroaktuátory a mikroelektroniku. Nejpozoruhodnějšími prvky jsou mikrosenzory a mikroaktuátory. Mikrosenzory a mikroaktuátory jsou vhodně klasifikovány jako "převodníky", které jsou definovány jako zařízení, přeměňující energii z jedné formy na jinou. V případě mikrosenzorů, přístroj obvykle převádí měřený mechanický signál na signál elektrický. [6]

3 STRUKTURA MEMS ZAŘÍZENÍ

3.1 Mikrosenzory

Od klasických senzorů se liší především menšími rozměry a technologií výroby. Rozměry mikrosenzorů se posunují až do milimetrové oblasti. K výrobě se používají technologické procesy vyvinuté pro výrobu integrovaných obvodů. Díky křemíkové technologii se mikrosenzory mohou vyrábět ve formě integrovaných obvodů. V této souvislosti vznikla možnost vyvíjet malé senzory – mikrosenzory.

V současné době existuje velké množství mikrosenzorů, které bývají zjednodušeně rozděleny do tří velkých skupin – fyzikální, chemické, biochemické. Toto dělení je ovšem pouze orientační, proto lze mikrosenzory klasifikovat podle různých hledisek např. podle účelů použití (měření tlaku, teploty, atd.), nebo podle fyzikálních principů, či jejich funkcí (kapacitní, optoelektronické, atd.)

3.1.1 Druhy mikrosenzorů

Kapacitní mikrosenzory

Nejjednodušší kapacitní mikrosenzory se skládají ze dvou paralelních kondenzátorů, které umožňují větší lineární snímání. Kapacitní snímání využívá změnu kapacity vyvolanou deformací membrány a dokáže převést sensorické informace (tlak, síla, atd.) na elektrický signál.

Piezoelektrické mikrosenzory

Tyto mikrosenzory jsou založeny na piezoelektrickém jevu. Elektrický náboj je generován při mechanickém namáhání krystalu – při jeho deformování. Piezoelektrické zařízení má několik výhod oproti jiným mikrosenzorům. Protože tento senzor generuje vlastní napětí, nevyžaduje tedy žádné jiné napájení pro provoz.

Optické mikrosenzory

Optické mikrosenzory jsou založeny buď na měření intenzity změny v jednom nebo více světelných paprscích, nebo na měření fázové změny ve světelném paprsku, který je způsoben jejich vzájemným ovlivňováním. Optické senzory využívají rozptylu světla.

Rezonanční mikrosenzory

Rezonanční mikrosenzory jsou založeny na měření rezonanční frekvence mechanického kmitání nosníku nebo membrány. Aplikované napětí způsobuje změny v rezonanční frekvenci, umožňuje měření vstupních veličin, jako jsou tlak, zrychlení, rychlost a teplota.

Polovodičové mikrosenzory

U polovodičových mikrosenzorů se využívají vlastnosti polovodičových součástek. Nejpoužívanějšími jsou tranzistory typu FET. Polem řízené tranzistory spínají protékající proud, změny proudu ovlivní výstup na tranzistoru a může být použit jako snímací mechanismus.

Akustické mikrosenzory

Akustické mikrosenzory fungují na bázi přeměny elektrické energie na akustické vlny. Konfigurace akustických vln jsou využitelné pro různé aplikace. Typy akustických vln závisí hlavně na vlastnostech materiálu.

3.2 Mikroaktuátory

Je to označení pro mikroakční členy, které provádějí funkci opačnou k mikrosenzoru. Mikroakční členy převádějí vstupní energii, která je nejčastěji elektrická na energii působící na jednu nebo více domén (fyzických nebo biochemických). Současné mikrotechnologie umožňují zhotovit mikroakční členy jako jsou např. mikropumpy, mikropřepínače, mikroventily, mikromotory apod. Nejčastěji se jedná o mechanický výstup příslušného mikrosystému. Mikroaktuátory, podobně jako mikrosenzory, pracují na různých fyzikálních, chemických nebo biologických principech. Podle principu činnosti bývají rozdělovány do několika velkých skupin např. elektrická a magnetická energie, tepelná energie, optická energie a další.

3.3 Mikroelektronika

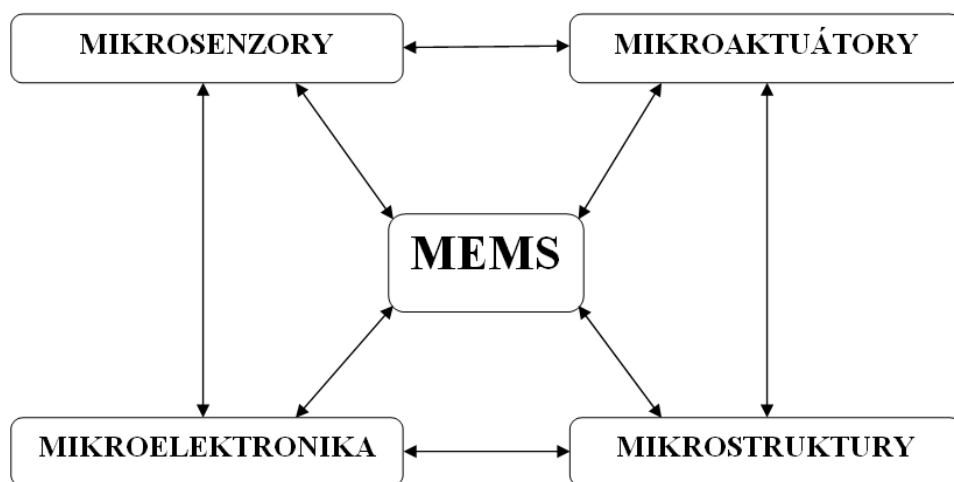
Mikroelektronické obvody jsou „mozkem“ systému MEMS a rozšiřují schopnost ovládat celá zařízení. Mikroelektronika zpracovává informace získané ze senzorů a díky rozhodovacím schopnostem může reagovat na pohyb, polohu, regulaci, čerpání a další

prvky, které systém MEMS provádí. Za pomoci těchto technologií, podle kterých se MEMS vyrábí, je celý systém kompletován na jeden mikročip.

3.4 Mikrostruktury

Mikrostruktury jsou pohyblivé mechanické části MEMS systému. Díky výrobním technologiím lze vyrobit mikrostruktury mnoha typů. Jde především o membrány, mikronosníky, mikromůstky, kanálkové mikrostruktury atd.

Součásti mikroelektromechanických systémů nemusí vždy obsahovat všechny části jejich komponentů. Toto provázání struktury je znázorněno na obrázku (Obr. 3).



Obr. 3 Součásti MEMS systému

Podklady k této kapitole byly čerpány z literatury číslo [1,5,6].

4 MATERIÁLY A VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

4.1 Materiály

MEMS systémy se vyrábí za účelem rychlejšího, účinnějšího, spolehlivějšího a levnějšího zařízení s malou spotřebou elektrické energie. Křemíkově založená mikrovýroba byla hlavním technologickým faktorem pro rychlý vývoj MEMS. V současné době je většina MEMS zařízení vyrobena hromadným mikroobráběním, povrchovým mikroobráběním a technologií LIGA na křemíkové desky. 3D mikrovýrobní procesy zahrnují vrstvy z více materiálů. Mnoho malých zařízení je také vyrobeno s využitím polovodičových technologií nebo pomocí litografie. Znalost příslušných vlastností materiálů je zásadní pro stanovení jejich role v různých zařízeních. Mezi MEMS materiály patří kovy, polovodiče, keramika a polymery.

4.1.1 Polovodiče

Polovodičové podklady jsou důležité pro zhotovení MEMS zařízení. Jejich elektrické vlastnosti jsou základní a nezbytnou stavbou pro elektroniku, zatímco jejich mechanické vlastnosti umožňují zhotovení několika konstrukčních prvků. Nejdůležitějším z těchto prvků je křemík, protože může být upraven několika způsoby. Použití křemíku v elektronice a mikroelektronice vykazuje obrovský růst. Jinými polovodičovými prvky jsou germanium a uhlík. Polovodičové materiály mohou být také vyrobeny kombinací těchto prvků. Název „polovodičové“ je kladen na tyto materiály, protože v některých režimech teplot jsou schopny vystavovat dobré elektrické vlastnosti vedení, zatímco mimo tyto režimy teploty se chovají jako izolátory.

4.1.2 Kovy

Kovy se v MEMS a mikroelektronice používají v důsledku jejich dobré vodivosti a to jak tepelné, tak i elektrické. Kovy jsou silné a tvárné litiny, které při pokojových teplotách udržují dobré vlastnosti a to i při zvýšených stupních teplot. Tenké kovové filmy byly používány pro integrované obvody dlouhou dobu. V současné době se u těchto zařízení využívají tlusté kovové filmy. Tlusté kovové filmy jsou obecně používány jako konstrukční materiály v zařízeních MEMS.

4.1.3 Keramika

Keramika a keramické struktury jsou nezbytné pro MEMS k speciálním aplikacím. Tyto materiály mají obecně lepší tvrdost a vysokou tepelnou pevnost. Díky těmto dobrým vlastnostem byla keramika začleněna do inteligentních systémů, jako jsou MEMS. Funkční mikrosenzory a mikropohony MEMS je možné realizovat pomocí kombinace feroelektrických tenkých filmů, jež mají prominentní snímací vlastnosti.

4.1.4 Polymery

Polymery jsou velké molekuly (makromolekuly), skládající se z mnoha malých molekul. V poslední době je značné úsilí kladeno na použití polymerů v mikroelektronice a mikroelektromechanických systémech. Pro více přístrojů MEMS, musí mít polymery vodivé, piezoelektrické a feroelektrické vlastnosti. Pro použití v MEMS by měli mít polymery tyto vlastnosti:

- silnou mezifázovou přilnavost mezi různými vrstvami polymerů,
- vhodné elastické moduly na podporu deformací požadované v MEMS,
- vynikající celkový rozměr stability,
- dlouhodobou okolní stabilitu.

4.2 Výrobní technologie

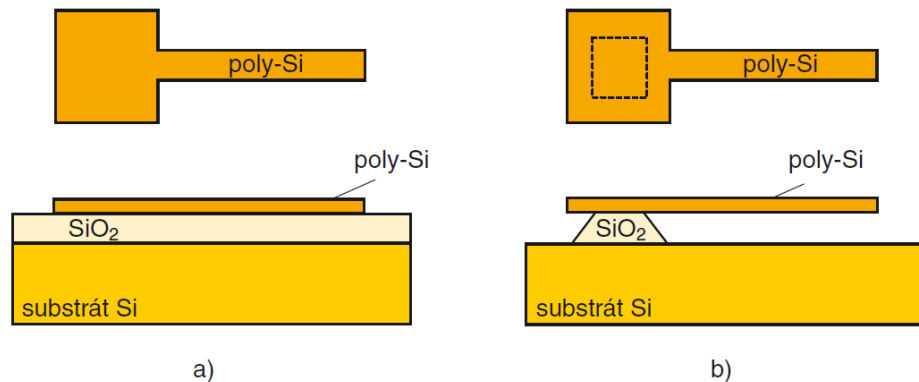
Technologie mikroelektromechanických systémů se odvíjí od vývoje a výroby integrovaných obvodů, což umožňuje výrobu senzorů, akčních členů a řídicích funkcí na křemíkovém čipu. Od doby integrovaných obvodů byl zaznamenán pozoruhodný pokrok ve výrobě MEMS. Tyto snímače a akční členy mohou rovněž tvořit stavební kameny inteligentních systémů.

Mikroobrábění je základní technologií pro výrobu drobných MEMS zařízení. Křemík je nejvhodnější prvek při použití této technologie a byl klíčovým faktorem pro obrovský pokrok MEMS v krátké době.

4.2.1 Povrchové mikroobrábění

Povrchové mikroobrábění je důležitou technologií MEMS, která umožňuje realizaci pohyblivých struktur na povrchu křemíkového substrátu. Hlavní výhodou povrchového

mikroobrábění jsou extrémně malé rozměry realizované struktury. Povrchové mikroobrábění, v nichž jsou mikromechanické vrstvy tvořeny z vrstev a filmů, jsou uloženy na povrchu. Obrázek (Obr. 4) ukazuje technologický postup povrchového mikroobrábění. Dále je relativně jednoduché integrovat mikrostrukturu na jeden čip společně s elektronickými obvody.



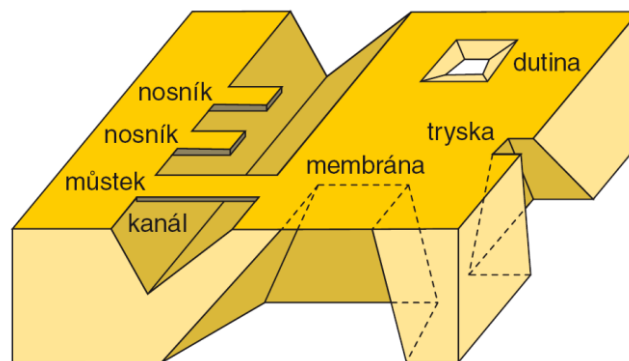
Obr. 4 Technologický postup vytváření mikronosníku povrchovým mikroobráběním: a) výchozí struktura, b) struktura po odleptání [14]

4.2.2 Objemové mikroobrábění

Objemové mikroobrábění používá jako svou hlavní surovinu křemík. Křemík je umístěn ve většině zařízení, které jsou dnes k dispozici. Termín „objemové mikroobrábění“ vychází ze skutečnosti, že tento typ mikroobrábění se používá k realizaci mikromechanických konstrukcí ve velikosti jednoho krystalu křemíku. Mezi objemové mikroobrábění patří především techniky, jako jsou:

- suché leptání,
- mokré leptání, které se dále člení:
 - anizotropní,
 - izotropní.

Obrázek (Obr. 5) znázorňuje geometrické motivy vytvářené objemovým mikroobráběním.



Obr. 5 Geometrické motivy realizované objemovým mikroobráběním [14]

4.2.3 LIGA

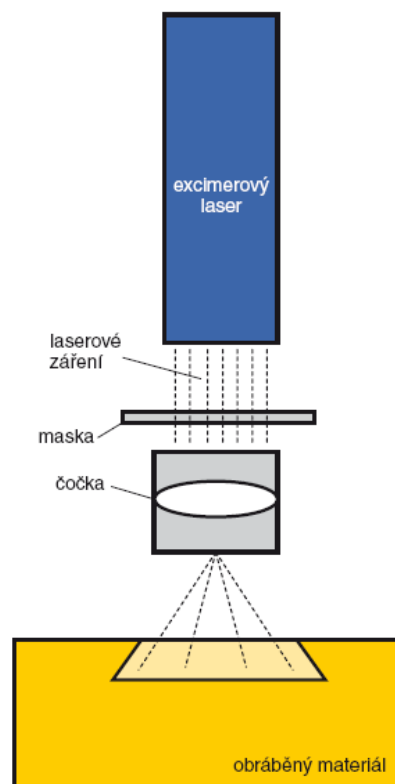
Technologie LIGA umožňuje 3D tvarování kovů, plastů a keramiky. Technologie využívá při výrobě mikrosystémů litografie, galvanické pokování a lisování. Výše uvedená technologie umožňuje realizaci velmi jemných tvarů mikrostruktur. Při výrobě se v prvním kroku používá rentgenová litografie a následuje galvanické pokování materiálu.

4.2.4 Galvanizace

Galvanizace je používána v mnoha procesech MEMS k získání silné vrstvy kovu nebo slitiny. Procesy pro uložení různých kovů a slitin byly upraveny pro galvanické pokování na křemík. Je to proces, při němž se kovový film tvoří na povrchu substrátu. Tyto kovové filmy se používají pro vzájemné propojení, jako jsou ohmické kontakty a jiné. Jejich jednotnost a vlastnost povrchu rozhoduje o výkonu celého zařízení.

4.2.5 Mikroobrábění excimerovým laserem

Excimerový laser generuje široký svazek ultrafialového záření. Mikroobrábění je založeno na impulsním odstraňování opracovaného materiálu laserovým paprskem, které je vidět na obrázku (Obr. 6). Množství odstraněného materiálu závisí na délce impulsu, intenzitě záření a vlastnostech materiálu. Počtem impulzů lze přesně řídit hloubku opracovaného materiálu.



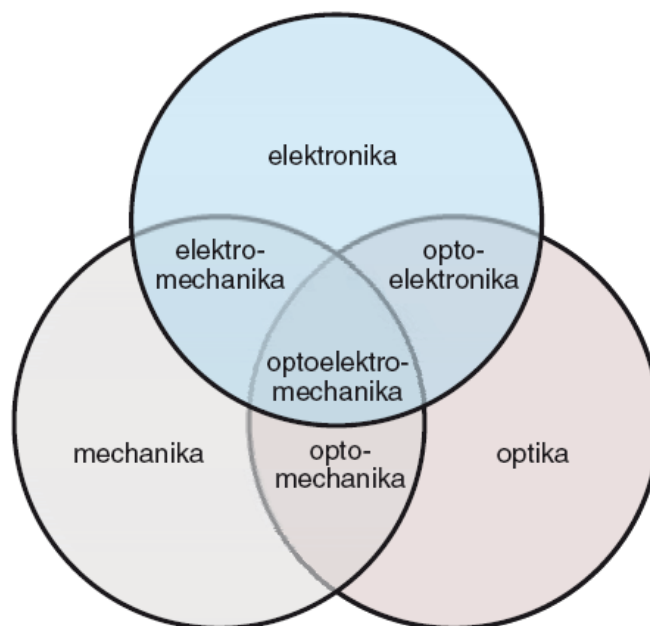
Obr. 6 Mikroobrábění excimerovým laserem [14]

Podklady k této podkapitole byly čerpány z literatury číslo [1,5].

5 OBLASTI POUŽITELNOSTI MEMS ZAŘÍZENÍ

5.1 Optické MEMS (MOEMS)

MEMS senzory s využitím optoelektronických systémů, nazývané také jako MOEMS (mikro-opto-elektro-mechanické systémy), mají velké uplatnění ve spotřební elektronice. Využití těchto snímačů najdeme především v systémech, jako jsou čtečky čárových kódů, optické snímací hlavy CD přehrávačů, optické komunikační systémy, zobrazovací systémy a další. MOEMS jsou tvořeny strukturami, které vznikají kombinací elektrických, mechanických a optických komponentů, viz obrázek (Obr. 7). [1]

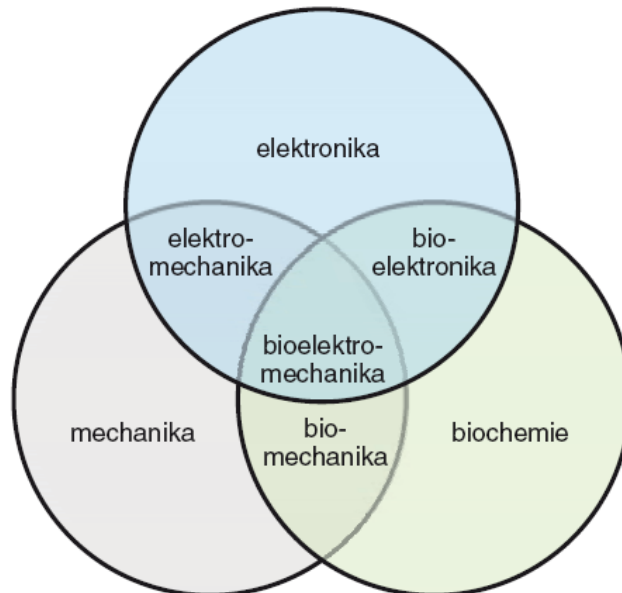


Obr. 7 Složení mikrosystémů MOEMS [14]

5.2 BIOMEMS

MEMS technologie umožňují nové využití i v biotechnologii. Spojením MEMS senzorů a biotechnologie dostaneme nový název zvaný BIOMEMS, který představuje obrázek (Obr. 8). Velmi rozsáhlé použití je u systémů „Lab-on-chip“, které umožní integrovat několik operací na jednom čipu. Využití těchto systémů se výrazně zvyšuje a jejich uplatnění najdeme v komerčních, vojenských a bezpečnostních aplikacích. Aplikace zahrnují například čipy pro chemické a biologické analýzy. Pomocí biosenzorů dokážeme zanalyzovat DNA, krevní tlak, toxické identifikace a další. V současnosti je velká pozornost věnována především vývoji biochemických senzorů pro detekci biologických

bakterií, biochemických či nervových látek. Dále mohou být využity pro ochranu vodních zdrojů a prostorů s velkou hustotou populace (letišť, metro). [1,7]



Obr. 8 Složení mikrosystémů BIOMEMS [14]

5.3 RF- MEMS

RF-MEMS technologie se u vysokofrekvenčních obvodů začala značně využívat ihned od jejich příchodu na trh. Elektrické komponenty jako jsou induktory a laditelné kondenzátory jsou lepší než jejich integrované protějšky, pokud je k výrobě použita technologie MEMS. Díky RF-MEMS technologii a integraci těchto systémů je výkon komunikačních obvodů výrazně lepší, zatímco celková obvodová plocha, spotřeba energie a náklady na výrobu se snížily. RF- MEMS se využívají jako spínače a mají obrovský potenciál v mnoha radio frekvenčních a mikrovlnných obvodech. Spínače mají mnohem lepší parametry než jejich předchůdci. Dále se RF-MEMS mohou uplatňovat v rezonátorech jako mechanické filtry pro komunikační obvody. [6]

6 VYBRANÉ NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ MEMS SENZORY

6.1 Tlakové senzory

Tlakové senzory představují jeden z největších úspěchů v mikroobráběcí technologii. Těžily z vývoje této oblasti a díky výzkumu byly vyvinuty pro různé automobilové, průmyslové a biomedicínské aplikace:

- do automobilového průmyslu patří především tlakové snímače pro rozdělovače motorů, palivové potrubí, výfukové plyny, pneumatiky, sedadla a další komponenty,
- v průmyslových aplikacích tlakové senzory souvisí s monitorováním výrobních procesů. V polovodičovém odvětví v procesních krocích, se využívají pro leptání nebo ukládání chemické depozice, které jsou velmi citlivé na provozní tlak,
- v biomedicínských aplikacích byly navrženy a jsou dále rozvíjeny přístroje pro měření očí, lebečního nebo střevního tlaku a zařízení zabudovaná do cév, která mohou pomoci při postupech rekonstrukce, neboli znovu vytvoření poškozených cév (angioplastika).

Tlakové senzory lze rozdělit do tří hlavních kategorií:

- absolutní senzory tlaku, které jsou ve vztahu k vakuu a musí mít referenční vakuum zabudované do senzoru. Atmosférický tlak je měřen pomocí absolutních senzorů,
- přetlakové senzory měří vztažený tlak k atmosférickému tlaku. Tyto senzory se využívají především při měření krevního tlaku,
- diferenční tlakové senzory měří rozdíl mezi dvěma měřenými tlaky. Specifikace pro taková zařízení je náročná, protože je často žádoucí objevit malé diferenční tlaky, které překrývají velké statické tlaky. [2, 4]

6.2 Inerciální senzory

Mezi MEMS inerciální senzory konkrétně patří akcelerometry a gyroskopy. Inerciální senzory jsou velmi univerzální skupina senzorů, která se využívá v mnoha oblastech. Slouží k měření buď lineárního zrychlení v jedné nebo několika osách, nebo úhlového pohybu taktéž v jedné nebo více osách. Vlastnosti těchto senzorů jsou rozvedeny v níže uvedených podkapitolách.

6.2.1 Akcelerometry

Akcelerometry měří a přeměňují zrychlení (změnu pohybu) na měřitelný elektrický signál.

U akcelerometrů jsou využívány tři hlavní principy:

- piezoelektrické akcelerometry využívají piezoelektrický krystal,
- piezorezistivní akcelerometry využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu,
- teplotní akcelerometry využívají rozdílného přenosu tepla.

Piezoelektrické

Piezoelektrické senzory patří mezi ty, které se vyrábějí nejdelší dobu a mají jednoduchou konstrukci. Tyto senzory se využívají především v průmyslových aplikacích, protože jsou rozměrově větší než jejich protějšky využívající jiné principy.

Piezorezistivní

Tyto akcelerometry patří svými vlastnostmi a schopnostmi mezi špičku v této oblasti senzorů. Jejich výhodou je velká citlivost, nevýhodou je významná závislost výstupu na teplotě.

Teplotní

Svou konstrukcí tyto snímače patří k nejspolehlivějším senzorům zrychlení. Měření pohybu pomocí přenosu tepla prakticky neumožňuje senzor zničit přetížením, to znamená vystavit příliš velké hodnotě zrychlení.

MEMS akcelerometry najdeme v dnešní elektronice téměř ve všech oblastech lidského života. Mají široké uplatnění na nynějším trhu zejména v oblasti:

- zabezpečovacích zařízení,
- navigačních zařízení (elektronický kompas, GPS)
- automatického otáčení obrazu dle natočení v mobilních telefonech či PDA,
- stabilizace obrazu u kamer a fotoaparátů,
- měření náklonu průjezdu vlaků v oblouku,
- řízení pohybu robotů.

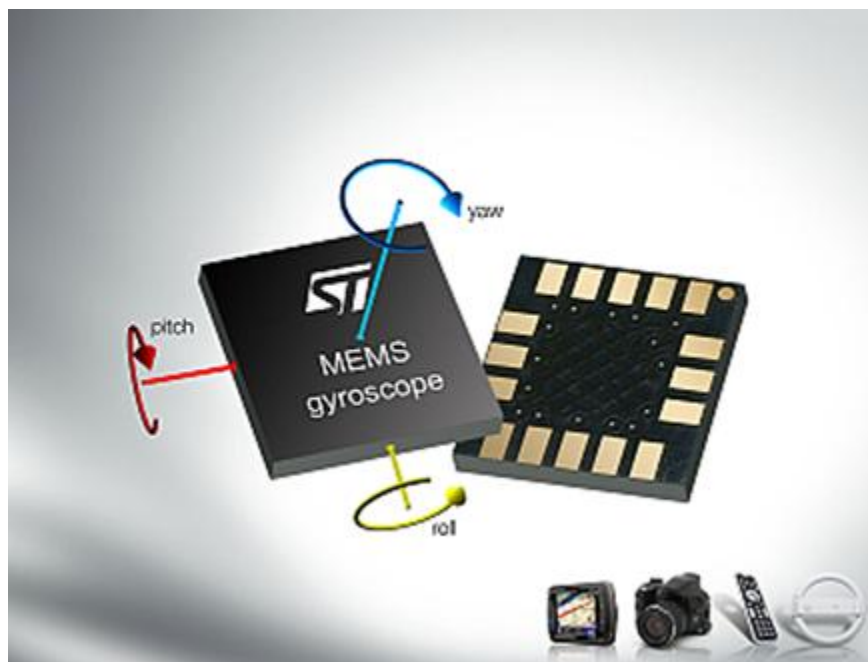
Podklady k této podkapitole byly čerpány z literatury číslo [24].

6.2.2 Gyroskopy

Gyroskopy se již dlouhou dobu využívají pro měření a určování změny polohy nebo natáčení libovolných předmětů. Gyroskopy mimo samotného snímače obsahují i celou řadu vyhodnocovacích obvodů a logiky. Výstup u těchto systémů může být:

- analogový,
- digitální,
- hybridní (analogový i digitální).

Gyroskopy lze použít v běžných aplikacích nejen ve vědě a výzkumu. Díky MEMS technologii tvoří gyroskopy jeden funkční celek spojený s elektrickými i mechanickými mikrosoučástkami. Základním principem je periodicky se pohybující struktura. Směr pohybu musí být vždy kolmý ke směru otáčení, jak znázorňuje obrázek (Obr. 9).



Obr. 9 MEMS gyroskop [22]

Gyroskopy lze již považovat za běžné součástky, které nalezneme v mnoha moderních elektronických zařízeních. V dnešní době se bez nich neobejdou, roboti, navigace, fotoaparáty, kamery a některé mobilní telefony. [22]

Příklady použití gyroskopů:

- detekce měření rotačního pohybu,
- stabilita jízdních vlastností automobilů,
- navádění a řízení raket, robotů, letadel a lodí.

6.2.3 Rozdíl mezi MEMS gyroskopem a akcelerometrem

Základní rozdíl mezi gyroskopem a akcelerometrem je jen jeden, ovšem významný.

- u akcelerometru je pohyblivá struktura volná a hýbe se jen při změně působení síly,
- u gyroskopu je s touto strukturou záměrně periodicky pohybováno.

Oba systémy využívají podobnou pohyblivou koncepci. Rám se snímacími ploškami funguje jako elektrody kondenzátoru, u nichž se při změně pohybu rámu změní kapacita.

Akcelerometr měří hodnotu vychýlení vnitřní struktury, zatímco gyroskop zjišťuje rotační pohyb. [22]

6.2.4 Senzor vibrací

MEMS senzory vibrací umožňují velmi rychlé, slabé ale naopak i silné chvění, nebo mohou detekovat probíhající pád ještě před tvrdým dopadem. Díky sensorům vibrací lze s předstihem zjistit vadu materiálu nebo mechanické opotřebení stroje. Senzoru vibrací je využito při pádu notebooku, kdy dochází k vypnutí harddisku. Z tohoto důvodu lze minimalizovat ztrátu dat z harddisku, případně nemusí dojít ani k žádnému poškození. [23]

6.3 Snímače průtoku

Snímače průtoku se používají pro průtok plynů nebo kapalin. Měřenými veličinami může být množství hmoty (hmotnost za sekundu), pohyb vzdálenosti (v metrech za sekundu), nebo objem pohybu (objem za sekundu). Aplikace a typy průtokoměrů pokrývají velice široký rozsah použití, protože měření průtoku je důležitý parametr v průmyslu. Existuje celá řada snímačů pro měření průtoků. Především jsou to mechanické, teplotní, ultrazvukové, magnetické, oscilátorové a další průtokoměry. [1, 4]

7 DALŠÍ POTENCIÁLNÍ OBLASTI VYUŽITÍ MEMS SYSTÉMŮ

Rozvoj mikrotechnologií umožnil výrobu mikrosoučástí a mikrosystémů využitelných v komerční sféře, zejména v průmyslu, spotřební elektronice nebo biomedicině. Pro realizaci koncových systémů, např. akcelerometrů, gyroskopů, mikromanipulátorů nebo optických přepínačů, jsou používány různé typy mikrostruktur a mikrokomponentů. Uplatnění v průmyslu nalézají především jako tiskové hlavy, optické přepínače, křemíkové piezorezistivní senzory tlaku, kapacitní senzory tlaku. K dalším způsobům použití mikrosystémových výrobků lze zařadit senzory chemických veličin, senzory přítomnosti a koncentrace plynů, IR senzory. Mikropřístroje a mikromanipulátory jsou používány pro posuv a přesné nastavování polohy objektů s mikrorozměry. Příkladem jsou stojany pro rastrovací tunelovací mikroskopy STM, nebo mikroskopy pracující s atomárními silami AFM. [14]

Podle mne se mikroelektromechanické systémy do budoucna budou využívat především v oblasti robotiky, jelikož tato věda má rychlý vývoj a největší potenciál. Robot, sám o sobě, je elektro mechanický stroj, proto mohou být MEMS systémy jeho užitečnou součástí. Těchto systémů lze využít v mnoha oblastech našeho života. Od těžkého průmyslu počínaje, přes automobilový průmysl, až po lékařský či spotřebitelský průmysl, který nám usnadní a zlepší každodenní život. Již v dnešní době jsou roboti testováni k využití na pomoc v domácnosti lidem se zdravotním postižením či seniorům. Dovedou za nás také operovat, a to přesněji než lidská ruka. Také v kosmickém výzkumu jsou pro nás roboti nepostradatelní, především pro zkoumání planet, kde vědci nedovedou dopředu určit, jaké přírodní podmínky na daném místě působí. Roboti nám tak mohou na dálku předat potřebné informace, zda člověk může vůbec určité místo navštívit. Z hlediska bezpečnosti lze roboty využít např. pro hledání a deaktivování výbušnin. Pomocí robotů mohou být výbušniny zneškodněny na dálku, kdy robot je člověkem pouze ovládán, člověk se však nedostane do přímého kontaktu s trhavinou.

Můžeme tedy předpokládat, že v budoucnu dojde k ještě lepšímu využití robotů, kteří budou daleko univerzálnější a budou nám schopni pomáhat v oblastech, ve kterých to v současné době zatím není možné.

Nejčastější využití mikrosystémů a MEMS struktur:

- Biomedicína:
 - manipulace s buňkami
 - buněčná syntéza
 - manipulace s biomolekulami
 - inteligentní tablety
 - podávání léků
 - analýza krve
 - mikrochemický reaktor

- Regulace kapalin:
 - mikrochloupě
 - inteligentní chloupě
 - mikropumpy
 - chromatografie plynů a kapalin
 - kapalinový zesilovač
 - kapalinové prvky

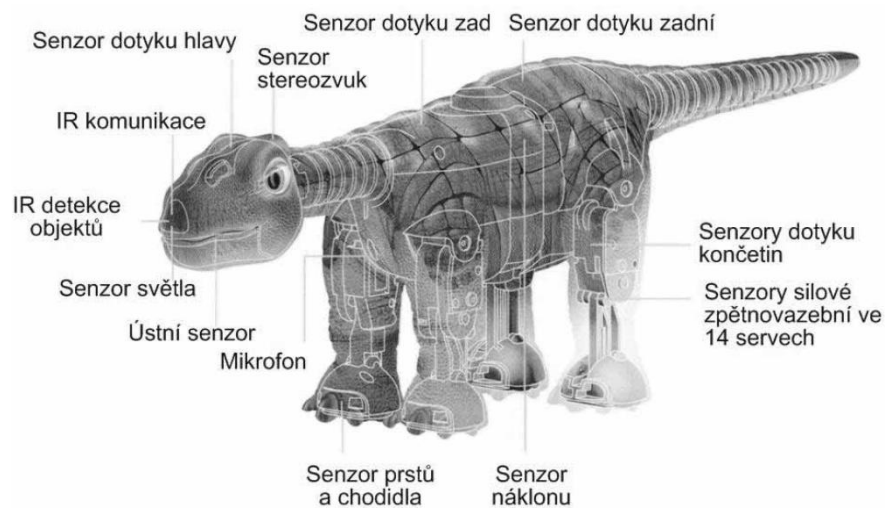
- Mikrooptika:
 - manipulace s vlákny
 - optické vyrovnání
 - snímání
 - modulace
 - interferometr
 - optická hlava
 - optomechanické integrované obvody

- Mikrosondy:
 - STM (skenování tunelovacího mikroskopu)
 - AFM (mikroskop atomových sil)
 - pole tunelových sond

- Počítač:
 - magnetická hlava
 - tisková hlava
 - laserový skener
 - mikromechanická paměť

- Biosnímánání a stimulace:
 - detekce pulsu v mozku nebo nervu
 - stimulace nervu
 - distribuované snímání přes kůži

- Robotika:
 - mikroroboti
 - mikroteleoperátoři
 - pohyblivé senzory
 - mikrotelemetričtí roboti



Obr. 10 Příklad MEMS senzorů s využitím pro robotiku

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 PŘEHLED ZAŘÍZENÍ VYUŽÍVAJÍCÍ MEMS V OBLASTI BEZPEČNOSTNÍCH TECHNOLOGIÍCH

8.1 GPS systém

Navigační systémy GPS (Global Positioning System) jsou v dnešní době velmi často využívány k běžnému použití. Navigační systémy najdou využití především v automobilech, pěší navigaci a navigaci letadel. V současné době najdeme GPS i v PDA a mobilních telefonech. Činnost navigačních systémů nalezneme i v oblasti bezpečnostních technologií. Příklady využití GPS v oblasti bezpečnostních technologií:

- přeprava hotovostí a cenností,
- zjišťování polohy pachatele při sledování v prostoru,
- sledování polohy ukradeného vozidla,
- sledování polohy přepravovaných prostředků.

Výkon navigačních systémů je velmi závislý na přesnosti GPS. GPS signály mohou mít v určitých místech velmi slabý nebo žádný signál, jedná se především o tunely a podzemní garáže. Slabý signál může být i v hustě zastavěné městské oblasti. V takovém případě může být přesnost GPS nižší, než je požadována.



Obr. 11 Družicový GPS signál

K využití vyššího výkonu v prostředí se slabým signálem a při přerušení GPS signálu se využívá MEMS čidel, jako jsou akcelerometry a gyroskopy. Integrovaný systém se skládá ze dvou samostatných systémů – inerciálního navigačního systému (akcelerometry,

gyroskopy) a satelitního navigačního systému. Oba systémy mají dobré doplňující vlastnosti a tím zajišťují dobrou součinnost celého integrovaného systému.

Inerciální navigace je proces, při kterém se za pomoci inerciálních senzorů, provádí měření, jehož hodnoty slouží pro výpočet postupného pohybu zařízení (vozidel, letadel) v rámci vnitřního inerciálního systému souřadnic.

Inerciální navigační systém se skládá z měřicí jednotky a navigačního počítače, který vyhodnocuje data z měřících zařízení. Na rozdíl od všech ostatních navigačních systémů je inerciální navigace zcela soběstačná a nezávislá na okolním prostředí. To znamená, že systém nepotřebuje vnější objekty, jako například družice a je odolný vůči vnějším vlivům, jako je počasí, magnetické poruchy, elektronické rušení a zkreslení signálu.

Přijímač GPS je závislý na okolním prostředí, které mu znemožňuje či zkresluje přijetí signálu z družic, které jsou znázorněny na obrázku (Obr. 11). Ovšem k těmto chybám při dobrém signálu z družic nedochází a nevyskytuje se nárůst chyb. [8,9,10]

8.2 Mikrofony

Princip mikrofону spočívá v převádění akustického signálu na signál elektrický. Mikrofony se využívají ve spoustě zařízení, najdeme je především v kamerách, fotoaparátech, mobilních telefonech či diktafonech. V bezpečnostních aplikacích mají mikrofony široké uplatnění především u odposlechových zařízení. Současné mikrofony jsou již i tak malých rozměrů, že se vejdu například i do propisky. Na obrázku (Obr. 12) jde vidět porovnání MEMS mikrofónu s jedním euro centem. V současné době, kdy je trend vyvíjet a zmenšovat veškerá elektrotechnická zařízení, se díky MEMS technologii rozměry mikrofónu výrazně snížily.

Pod označením MEMS mikrofony se ukrývají miniaturní křemíkové mikrofony vyráběné v provedení jedné integrované součástky (CMOS čipu). Díky přítomnosti křemíku na jednom čipu mikrofony obsahují i řadu rozšířených možností jako například potlačení šumu a odfiltrování zdroje šumu. Vynikajícího výkonu je navíc možno dosáhnout integrací většího počtu mikrofónů do jedné aplikace. Větší počet mikrofónů vytvoří mikrofónní pole, které dokáže efektivně vyhodnocovat okolní zvukové vlny a provádět filtrování. Nejčastěji využívané mikrofony jsou kapacitní mikrofony, ale využívá se i piezoelektrických a piezorezistivních principů.



Obr. 12 Miniaturní MEMS mikrofony [11]

Mikrofony se dělí do dvou základních kategorií:

- analogový MEMS mikrofon, dokáže převést akustický vstupní tlak na analogové napětí,
- digitální MEMS mikrofon, dokáže převést akustický vstupní tlak na digitální výstupní signál.

Nejnovější MEMS mikrofony již mohou obsahovat i integrovaný A/D převodník a celkový výstup může být v plně digitální podobě.

MEMS kapacitní mikrofony jsou vyráběny jedno substrátovou technologií, která kombinuje objemové a povrchové mikroobráběcí technologie. Díky těmto vlastnostem jsou výrazně menší a přizpůsobitelnější. Hlavní výhodou těchto mikrofonů je monolitická integrace na jeden společný křemíkový CMOS čip s elektronickými analogovými a digitálními obvody. [11,12,13]

8.3 MEMS systémy pro detekci chemických sloučenin

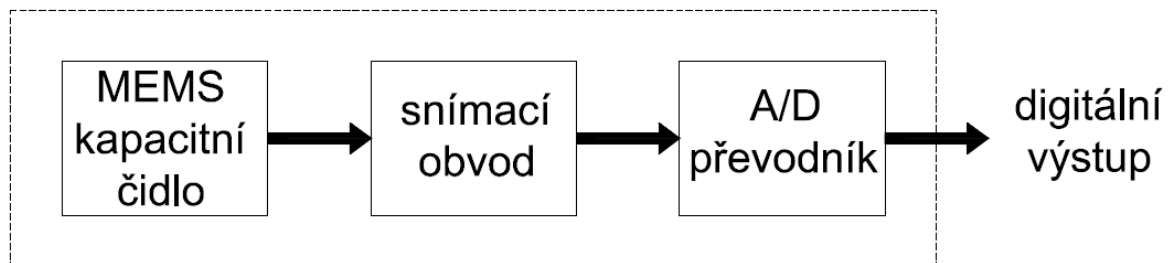
Chemické senzory jsou široce využívány pro monitorování životního prostředí, průmyslového nebezpečí, odhalení a snímání bojových chemických látek. V oblasti bezpečnostních technologií je detekce chemického složení látek jednou z velmi významných oblastí. Do této problematiky se dá zahrnout:

- ochrana před teroristickými útoky,
- zabránění výroby a distribuce drog,
- detekce úniku výbušných a vznětlivých plynů.

Technologie mikroelektromechanických systémů umožnila konstrukci miniaturních a plně integrovaných chemických senzorů. Hlavním úkolem těchto senzorů je:

- určení přítomnosti dané skupiny látek,
- určení typu látky,
- určení koncentrace, případně vlastnosti látek.

Kapacitní snímače MEMS zjistí analýzu takovým způsobem, že dojde ke změně kapacity. Na obrázku (Obr. 13) je znázorněno blokové schéma kapacitního snímače, které se skládá z kapacitního čidla, snímacího obvodu a A/D převodníku. Snímací obvod převádí změny kapacity na napěťový signál. Tento signál je pomocí převodníku převeden do digitální podoby, což je výstup ze zpracovaných dat.



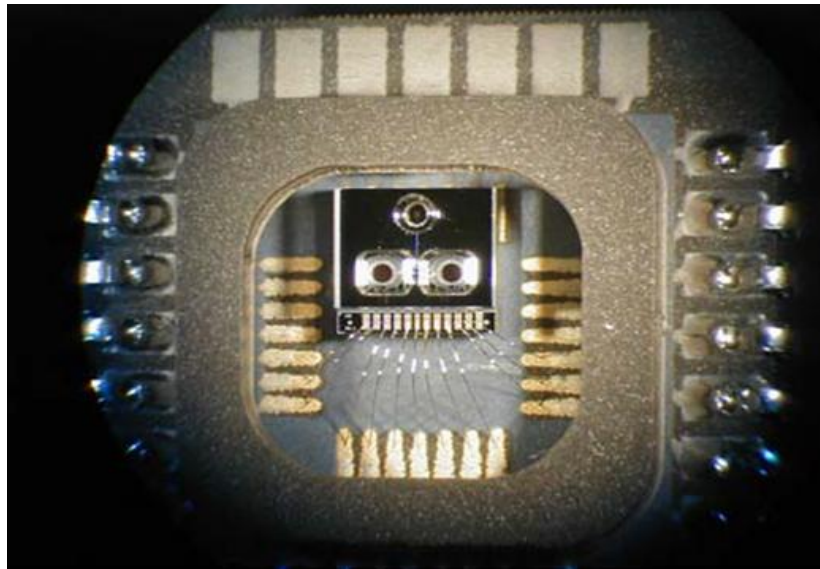
Obr. 13 Blokové schéma chemického senzoru [17]

Kapacitní čidlo je složeno z překrývajících se vrstev kovu s chemicky citlivým polymerem, který je použit jako dielektrikum. Pokud je senzor vystaven k analyzování sloučeniny, probíhá absorpce z plynné fáze do polymeru a výsledkem je zvýšení dielektrické permitivity. Snímače tohoto typu jsou vyrobeny za použití CMOS technologie. [17]

8.4 MEMS akustické senzory plynu

Akustické senzory plynu jsou z hlediska bezpečnosti užitečné především v průmyslových zařízeních. Díky technologii MEMS systémů, která má malé rozměry, nízké náklady a rychlou odezvu se tyto senzory uplatňují v automobilovém průmyslu, v klimatizačních systémech a v neposlední řadě i v lékařských aplikacích (respirační diagnostika).

Akustické senzory plynu fungují na principu tepelné vodivosti senzorů a na základě infračervené spektroskopie. Senzor tvoří tři části sklo-křemík-sklo, jež se vyrábí hromadným mikroobráběním, který je uzavřen v keramickém pouzdře viz. obrázek (Obr. 14).[18]



Obr. 14 Akustický plynový senzor v keramickém pouzdře [18]

8.5 Automobilový průmysl

Inerciální senzory mají vysoké uplatnění v bezpečnosti automobilového průmyslu. Akcelerometry se používají v bezpečném řízení především při aktivaci airbagů, detekci převrácení vozidel, elektronické kontroly stability, zabezpečení vozidel a aktivního odpružení automobilů. Využití všech senzorů představují na obrázku (Obr. 15). Gyroskopy jsou především použity v systémech kontroly stability a GPS navigačních systémech.

Klíčovým faktorem růstu využití MEMS zařízení v automobilovém průmyslu je implementace kontroly elektrické stability (ESC). Tyto systémy používají tři inerciální senzory – gyroskop, akcelerometr a senzor k úhlu natočení volantu. Hlavním úkolem elektronické kontroly stability při řízení vozidel je:

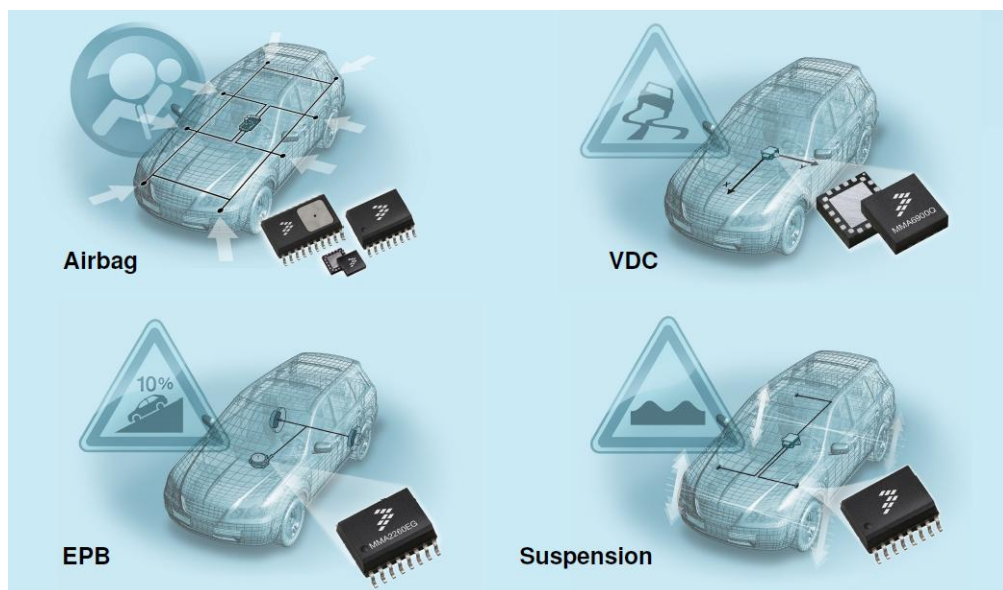
- elektronická kontrola stability (ESC), která pomáhá řidiči v kritických jízdních situacích,
- ESC porovnává rozdíly mezi natočením volantu řidiče a skutečným pohybem vozidla,

- při zjištění nestability vozidla ESC automaticky použije brzdy na jednotlivá kola a může také snížit točivý moment motoru, který pomůže udržet vozidlo ve správné dráze řízení.

System ESC spoléhá na snímání vstupů z těchto senzorů:

- snímače úhlu volantu,
- snímače rychlosti kol,
- tlakových senzorů,
- senzoru stupně vychýlení.

ESC představuje další zlepšení u bezpečnosti vozidel, především u bezpečné jízdy automobilu. Základní funkcí stability ESC je spojení anti-blokovacího brzdového systému (ABS) a trakčního kontrolního systému (TCS). Spojení těchto prvků je navrženo především pro lepší ovládání při zatáčení na povrchu silnic s nízkým třením.



Obr. 15 Využití MEMS v automobilech [21]

ESC v posledních letech prokazuje své schopnosti a má obrovskou sílu v bezpečnosti řízení vozidla. Bylo prokázáno, že díky ESC se výrazně snížil počet dopravních nehod a může dojít k záchraně tisíce životů ročně. [19,20,21]

9 NÁVRH DALŠÍCH MOŽNOSTÍ VYUŽITÍ MEMS ZAŘÍZENÍ V BEZPEČNOSTNÍCH TECHNOLOGIÍCH

Z důvodu provedeného měření s MEMS akcelerometrem v závěru praktické části práce, byl tento prvek vybrán i k řadě využití v bezpečnostních systémech. Za pomoci prvků MEMS akcelerometrů, gyroskopů a senzorů vibrací (které mají schopnosti, jako např. detekování snímaného zrychlení, vibrací, nárazů a natáčení), se nabízí možnost vývoje celé řady bezpečnostních aplikací.

Využití těchto senzorů by mohlo nalézt uplatnění především v předmětové a plášťové ochraně.

Předmětová ochrana:

- signalizuje napadení nebo neoprávněnou manipulaci s chráněnými předměty,
- poplach vyhlásí při manipulaci se střeženým předmětem.

Předmětovou ochranou je možno zajistit střežení a ochranu uměleckých děl a předmětů v případě jejich manipulace. Především díky akcelerometru, který dobře detekuje náklon, by tento prvek mohl vyhlásit poplach při pohybu chráněného předmětu. Akcelerometru by mohlo být využito k bezpečné přepravě křehkých věcí, kdy je nutné hlídat náklon nebo pohyb při uvolnění bezpečnostních popruhů.

Plášťová ochrana:

- zajišťuje ochranu pláště objektu, jako jsou vstupní prostory, zdi a střechy.

U tohoto typu ochrany by mohlo být využito senzoru vibrací. Senzor vibrací dokáže detekovat velmi jemné chvění, čehož je možno využít k hlídání průrazu stěn u stavebních konstrukcí, případně ke střežení narušení trezorových skříní. Pachatel otvíráním trezoru nebo poškozením stavební konstrukce vyvolá jemné chvění, které tento detektor zaznamená.

Senzoru by mohlo být využito i u střežení vstupních prostor, především oken. Okenní tabulky při nárazu do skla vytvářejí chvění, proto by tento senzor byl vhodný k signalizaci narušení objektu. Pokud by byl senzor umístěn přímo na povrchu skla, mohl by detekovat i případné řezání skla. Ovšem v tomto případě by záleželo na citlivosti daného detektoru.

10 PRAKTICKÉ ZKOUŠKY

10.1 Úvod měření

Pro měření praktické části bylo nutné vyrobit plošný spoj, který bude sloužit v praxi k měření náklonu kolejí v oblouku. Měření probíhalo proto, abychom mohli zjistit, jak je MEMS akcelerometr stabilní při naklápěné i nenaklápěné ose a jaké odchylky má při opakovatelnosti měření. Nejprve byl vytvořen návrh plošného spoje v programu Eagle, u kterého však bylo nutné docílit toho, aby rozměry plošného spoje byly co nejmenší. Po jeho výrobě jej bylo nutné osadit elektronickými součástkami a jednou MEMS součástkou, akcelerometrem. Jakmile byly všechny tyto součásti připraveny, mohlo proběhnout samotné měření na kalibrované základní desce sklonu, která byla podkládána Johanssonovými měrkami. Měření nenaklápěné i naklápěné osy probíhalo současně. Při měření se na voltmetrech z výstupů obou os sledovala hodnota napětí, která byla zapisovaná do tabulek. Výsledky měření jsou zpracovány a vyhodnoceny v tabulkách a grafech. Měření probíhalo v místnosti o teplotě $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Při praktické zkoušce se postupovalo dle následujících bodů:

1. návrh elektronického schématu,
2. osazení výrobku elektronickými součástkami,
3. připevnění uhlových podložek ke kalibru sklonu,
4. připevnění výrobku k úhlovým podložkám,
5. vyvážení kalibru sklonu,
6. odečítání hodnot z voltmetrů při naklápěné i nenaklápěné ose,
7. opakovatelnost měření ve všech úhlech třikrát za sebou,
8. vyhodnocení všech výsledků měření.

Všechny popsané body jsou podrobněji rozebrány níže.

10.2 MEMS akcelerometr ADXL 203

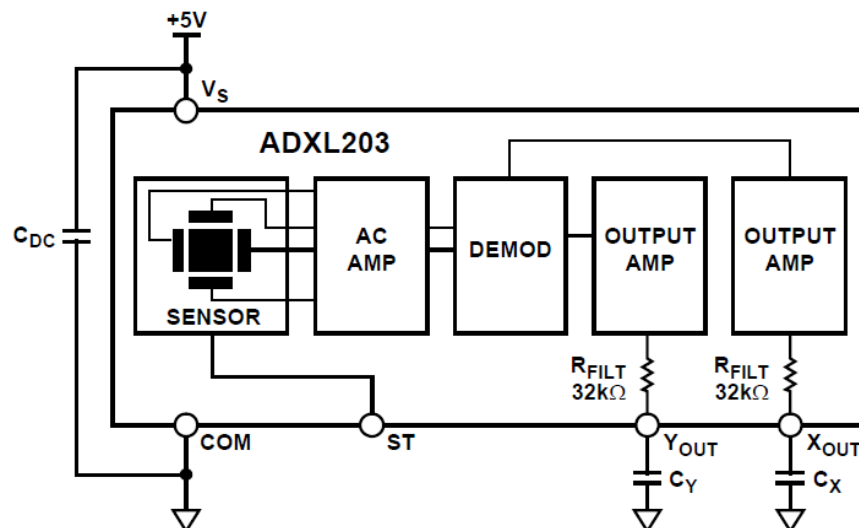
MEMS akcelerometr ADXL 203 je dvouosý akcelerometr s nízkou spotřebou, vysokou přesností a stabilizujícím napěťovým výstupem. Blokové schéma akcelerometru je znázorněno na obrázku (Obr. 16). Výstupním signálem je analogové napětí úměrné zrychlení. ADXL je schopný měřit jak kladné, tak i záporné zrychlení. Akcelerometr může

měřit statické síly zrychlení, jako je gravitace, což umožňuje používat senzor jako senzor naklonění.

Snímač je vyroben povrchové mikroobráběním a jeho struktura je vytvořena na křemíkové desce.

Využití akcelerometru najde uplatnění především v oblasti:

- navigace,
- alarmu a detektoru pohybu,
- platformy vyrovnávací stabilizace,
- elektrické řízení podvozku.



Obr. 16 Blokové schéma akcelerometru ADXL203

Základní vlastnosti akcelerometru (Tab. 1):

typ výstupu	analogový
šířka pásma	2,5kHz
napájecí napětí	3 – 6V
rozsah	+/- 1,7g
počet os	2
citlivost	+/- 4%
teplotní rozsah	-40 až +125°C

Tab. 1 Vlastnosti akcelerometru

10.3 Eagle

Pro změření vlastností akcelerometru bylo navrženo schéma zapojení v programu Eagle, což je editor elektronických schémat a plošných spojů.

Uživatelské rozhraní programu Eagle se skládá ze dvou základních částí zobrazených v nezávislých oknech:

- schématu,
- editoru desky plošného spoje.

Schéma je modul určený pro kreslení schematického zapojení. Součástí této položky je i knihovna, která má předdefinovanou řadu elektronických součástek. Námi požadované MEMS zařízení ADXL 203 se v knihovně Eaglu nevyskytuje, proto bylo nutné doplnit knihovnu daty akcelerometru ADXL 203 ručně.

Při vytváření knihovny bylo nutno nejprve vytvořit značku, která prezentuje součástku při kreslení elektrického schématu. V programu Eagle je tato značka tvořena buď čarou, nebo kolečkem, ale nemá vliv na elektrické parametry. Dále byly vytvořeny a rozmístěny piny podle výrobce, jelikož každý pin má jinak definovanou funkci. Proto bylo nutné postupovat podle parametrů výrobce a musely být zachovány přesné rozměry, aby piny součástky přesně kopírovaly vytvořený plošný spoj. Po zhotovení značky a rozmístění pinů bylo nutné vytvořit pouzdro MEMS akcelerometru ADXL 203. Pouzdro musí odpovídat přesné velikosti součástky, protože pokud přepneme na editor plošného spoje, máme ohraničenou přesnou velikost součástky s vyvedenými piny. Posledním krokem při zhotovení knihovny bylo vytvoření samotné součástky, která spojuje schematický symbol součástky a vytvořené pouzdro.

Samotné schéma provádí kontrolu zapojení. Pokud máme zároveň spuštěn editor desky plošných spojů a schéma, změny, které provedeme ve schématu, se ihned projeví v editoru desce plošných spojů. U jednotlivých součástek umístěných do schématu či editoru desky plošných spojů z předdefinované knihovny se zároveň zobrazuje jejich popis, který vidíme na obrazovce.

Samotný editor plošných spojů umožňuje kompletní návrh desky plošných spojů. Editor provádí kontrolu dodržovaných pravidel návrhu desky plošných spojů. Dále je v programu možné libovolné natáčení součástek pod určitým úhlem, lomení cest pod určitým úhlem nebo jejich zakulacení, případně vyplňování měděných ploch a další vlastnosti.

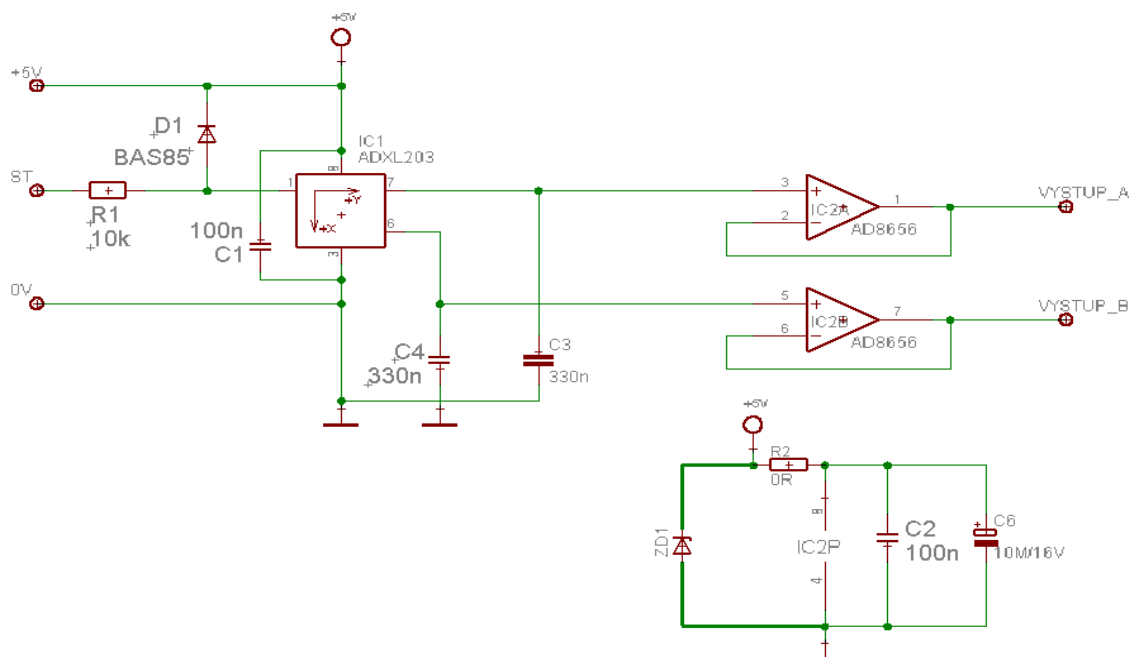
10.4 Návrh schématu a desky plošných spojů

Při návrhu vytváření modulu ADXL do knihovny bylo nutno počítat pro návrh plošného spoje s delšími pájecími plochami pro součástku z důvodu snadnějšího pájení. Poněvadž má akcelerometr na své spodní části kovové plochy, nemohla v návrhu procházet žádná vodivá cesta pod touto součástkou. V návrhu bylo počítáno s pevným uchycením výrobku, proto bylo nutné nechat na tištěném spoji otvor pro šroub o průměru 3,2 mm. Kolem otvoru pro šroub bylo nutné vytvořit ochranné pásmo, které mělo průměr 7mm, a to z důvodu působení rušivých vlivů.

Celkové napájení obvodu bylo stabilizováno Zenerovou diodou. Operační zesilovač byl použit dvojitý, typu AD 8656. Zapojení akcelerometru i operačního zesilovače bylo provedeno dle doporučení výrobce:

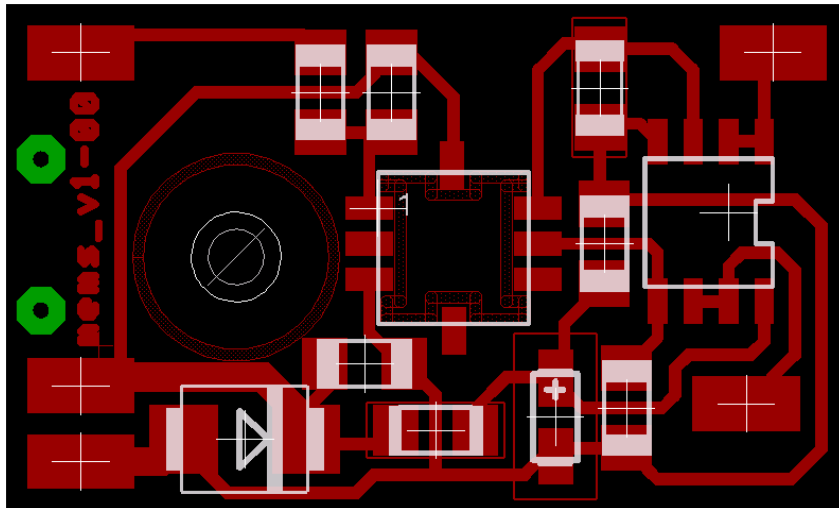
- napájení ADXL je přímo u pouzdra filtrováno kondenzátorem 100nF,
- napájení operačního zesilovače je filtrováno kondenzátorem 100nF,
- přívodní kabel je filtrováno tantalovým kondenzátorem +10 μ F/16V.

Napájení u pouzder MEMS akcelerometru i operačního zesilovače bylo filtrováno, aby napětí, které vstupuje do zesilovače i akcelerometru nemělo přepěťové špičky a bylo stabilní. Pro ADXL jako externí kondenzátory byly použity keramické kondenzátory s kapacitou 330nF na 16V. Všechny použité součástky byly typu SMD. Schéma zapojení viz. obrázek (Obr. 17).



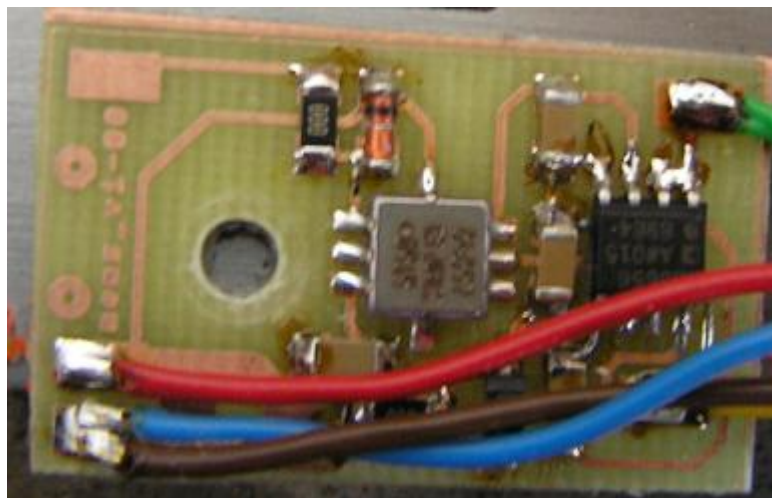
Obr. 17 Schéma zapojení

Na obrázku (Obr. 18) je zobrazen návrh plošného spoje, při kterém bylo využito vlastností programu Eagle, které jsou uvedeny v bodu 10.2. Při návrhu byl kladen důraz na to, aby celková deska plošného spoje byla co nejmenší, jelikož tento výrobek bylo nutné umístit do co nejmenšího pouzdra. Ve finále se všechny součástky podařilo dostat na plochu 30 mm x 18 mm.



Obr. 18 Návrh desky plošného spoje

K osazení výrobku byla použita mikropájka s nastavitelnou pájecí teplotou, která umožňuje jemné a přesné pájení. Akcelerometr MEMS byl pájen pomocí pájecí pasty, která zaručuje čisté pájení a materiál zůstává neutrální. Osazený výrobek znázorňuje obrázek (Obr. 19).



Obr. 19 Osazený výrobek plošného spoje

10.5 Měření akcelerometru

Měřený objekt:

Snímač zrychlení-akcelerometr MEMS ADXL203 dvouosý

Zapojení:

Viz schéma (Obr. 17), plošný spoj (Obr. 18)

Použité měřicí přístroje:

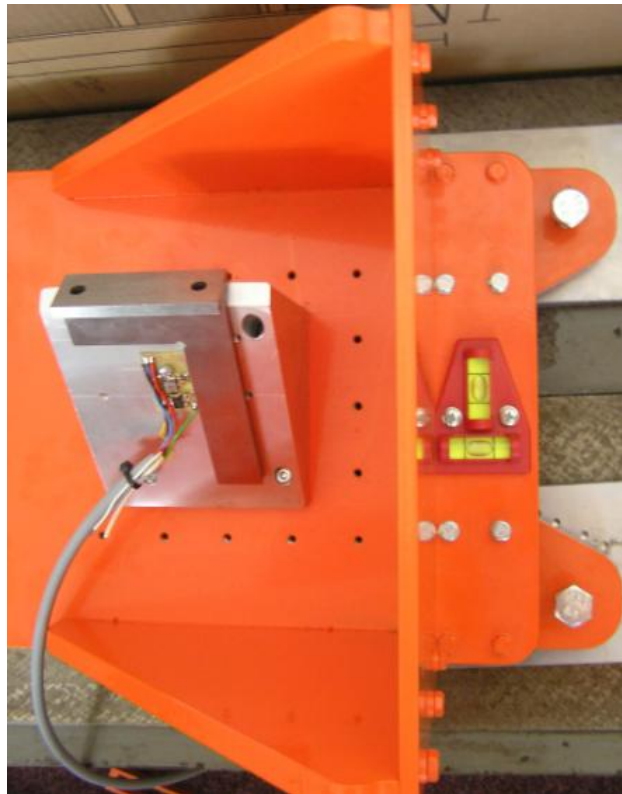
- Digital multimeter Hewlett – Packard 3466A 1716A-6585,
- Voltmetr Metra MIT 330 111164,
- Stabilizovaný napájecí zdroj 5V/1A,
- KLS01 kalibr sklonu, výrobní číslo 091228-KLS01,
- Úhlové podložky,
- Sada Johanssových měrek Somet A4-48527.

Použitá měřicí metoda:

Statické naklápění na principu sinového pravítka na kalibrované základní desce. Naklápěcí úhel je úměrný hodnotám naklápěcích měrek.

10.5.1 Postup měření

Měřený snímač zrychlení byl umístěn na úhlové podložky, které měly sklon 15, 30 a 45 stupňů. Úhlu 0 stupňů bylo dosaženo uložením bez úhlových podložek a uchycením přímo na kalibru sklonu (kalibrované základní desce). Ke stabilizaci výrobku a k tomu, aby nedošlo k pohybu snímače při jeho měření, byl výrobek připevněn k úhlovým podložkám šroubem, a ze spodní části plošného spoje byla nalepena oboustranná lepicí páska. Při uchycení celého výrobku musel být brán zřetel na to, aby byl výrobek v pravém úhlu vůči úhlovým podložkám. Toho bylo docíleno přiložením přesného úhelníku s úhlem 90 stupňů. Kalibr sklonu se vyvážil pomocí vodováhy, jak je vidět na obrázku (Obr. 20), aby celé měření probíhalo ve vodorovné poloze. Vyvážení kalibru se provádělo za pomoci dvou šroubů umístěných na konci kalibru sklonu. Všechny úhlové podložky byly pevně přišroubovány ke kalibru sklonu.



Obr. 20 Vyvažování kalibru sklonu

Měření začalo od hodnoty nula stupňů až po sklon 45 stupňů. U snímače byly měřeny vždy dvě osy, osa x a y. První měření probíhalo tak, že výrobek byl umístěn vodorovně a při druhém měření byl svisle přišroubován k úhlům sklonu. Osa y byla posunuta oproti prvnímu měření o 90 stupňů. Opět musel být celý výrobek přichycen na úhlové podložce šroubem a přilepen lepicí páskou. Při uchycení musel být výrobek opět vyrovnán přesným úhelníkem s úhlem 90 stupňů vůči úhlové podložce.



Obr. 21 Měřicí souprava

Při měření byl kalibr sklonu v přední části podkládán Johanssonovými měrkami, které jsou s kalibrem zobrazeny na obrázku (Obr. 21). Johanssonovy měřky jsou přesné ocelové hranoly s velkou výrobní přesností. Přichystaný a vyvážený kalibr je zobrazen na obrázku (Obr. 22).



Obr. 22 Kalibr sklonu

Měření začalo od nuly a hodnoty podložek se stupňovaly po desítkách milimetrů až po hodnotu 100 milimetrů. Byla testována výchylka snímače. V ose y byla výchylka snímače nulová, pouze díky chybám měření by mohlo i u této osy dojít k minimálnímu posunu. Na obrázcích (Obr. 23, Obr. 24) je vidět podkládání kalibračního vozíku měrkami 50 mm na sklonové podložce 30 stupňů a měrkou 100 mm na sklonové podložce 15 stupňů.



Obr. 23 Podkládání kalibru sklonu Johanssonovými měrkami



Obr. 24 Podkládání kalibru sklonu Johanssonovými měrkami

Na kalibru sklonu, například na obrázku (Obr. 23), je jasně vidět ze spodní části kalibrační kulička. V pevné části kalibru (na nenaklápěné ploše) byl umístěn čtyřhran, jehož úhel se podle potřeby přizpůsoboval konkrétní Johanssonově měrce natočením. Johanssonova měrka se umísťovala na střed čtyřhranu a na střed kalibrační kuličky, což znázorňují obrázky (Obr. 23, Obr. 24). Jelikož ne vždy bylo možné Johanssonovy měrky umístit přesně na střed čtyřhranu i kalibrační kuličky, došlo k částečné chybě měření.

10.6 Výsledky měření

Jakmile byly všechny hodnoty naměřeny, byly zpracovány do tabulek a grafů. Následně byly vybrány výsledky jednoho měření, které jsou uvedeny v tištěné formě bakalářské práce. Z důvodů velkého množství dat jsou ostatní výsledky ve všech úhlech sklonu i ve všech polohách přiloženy v příloze na CD.

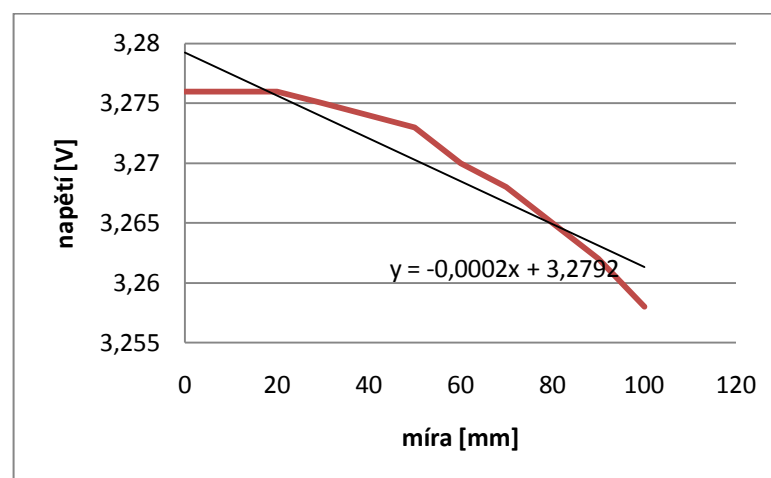
10.6.1 Nenaklápěná osa

Měření při nenaklápěné ose bylo opakováno postupně třikrát za sebou. V tabulce (Tab. 2) je vidět, že se hodnoty v opakovaném měření neměnily. Tímto se otestovala chyba opakovatelnosti měření. Výsledky ve všech třech měřeních jsou stejné. Z toho vyplývá, že v nenaklápěné ose má akcelerometr stabilní vlastnosti i při stálém opakování měření.

1. měření		2. měření		3. měření	
míra [mm]	napětí [V]	míra [mm]	napětí [V]	míra [mm]	napětí [V]
0	3,276	0	3,276	0	3,276
10	3,276	10	3,276	10	3,276
20	3,276	20	3,276	20	3,276
30	3,275	30	3,275	30	3,275
40	3,274	40	3,274	40	3,274
50	3,273	50	3,273	50	3,273
60	3,270	60	3,270	60	3,270
70	3,268	70	3,268	70	3,268
80	3,265	80	3,265	80	3,265
90	3,262	90	3,262	90	3,262
100	3,258	100	3,258	100	3,258

Tab. 2 Naměřené hodnoty nenaklápěné osy

Graf (Graf 1) znázorňuje linearitu nenaklápěné osy. V grafu je pomocí Microsoft Office Excel zobrazena lineární regrese, která udává proloženou přímku všech nejbližších bodů měření.



Graf 1 Linearita nenaklápěné osy

10.6.2 Naklápěná osa

U testované osy probíhalo taktéž měření třikrát za sebou, a to z důvodu chyby opakovatelnosti. V tabulce (Tab. 4) jsou výsledky naměřeného napětí ve voltech. Dále je zde uveden výpočet přímky, který vyplývá z lineární regrese přímky, ta je zobrazena v grafu (Graf 2). Lineární regrese vychází ze základního vzorce pro lineární funkci přímky:

$$y = k \cdot x + q \quad (10.5.2.1)$$

Regresní hodnoty přímky pro hodnotu k a q jsou zobrazeny v tabulce (Tab. 3). Hodnota x ve vzorci (10.5.2.1) je udávána jako velikost délek Johanssonových měrek.

hodnota pro k	hodnota pro q
0,002435455	2,506045455

Tab. 3 Regresní hodnoty přímky

Výsledky uvedené v tabulce (Tab. 4) vychází ze vzorce pro přímku. V tabulce (Tab. 4) je uvedena i odchylka měření, která je vypočtena ze vztahu:

$$\text{odchylka} = \frac{\text{naměřená hodnota} - \text{skutečná hodnota (přímka)}}{\text{skutečná hodnota (přímka)}} \quad (10.5.2.2)$$

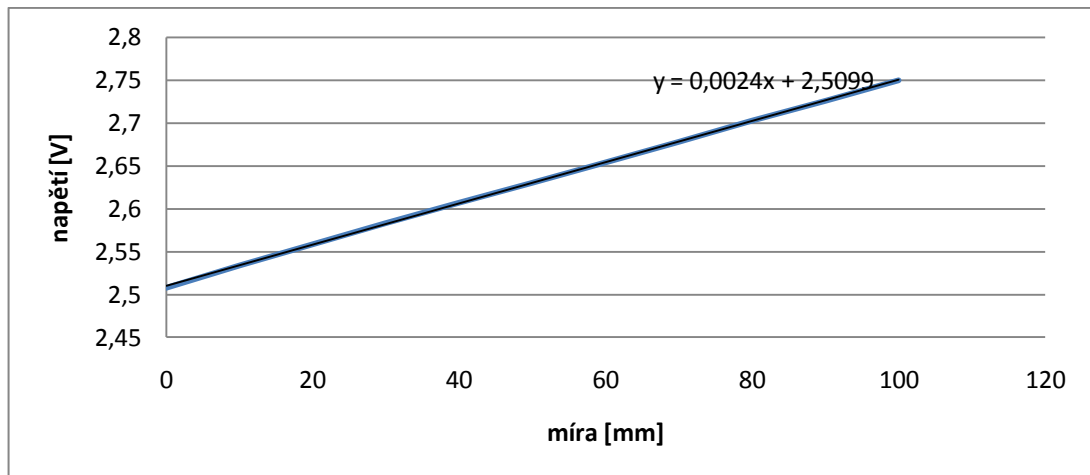
Hodnoty odchylek jsou udávány v %.

1. měření

1. měření	naměřená hodnota	přímka	odchylka
míra [mm]	napětí [V]	[-]	[%]
0	2,508	2,509863636	-0,0743
10	2,534	2,533927273	0,0029
20	2,559	2,557990909	0,0394
30	2,583	2,582054545	0,0366
40	2,607	2,606118182	0,0338
50	2,630	2,630181818	-0,0069
60	2,654	2,654245455	-0,0092
70	2,678	2,678309091	-0,0115
80	2,703	2,702372727	0,0232
90	2,726	2,726436364	-0,0160
100	2,750	2,7505	-0,0182

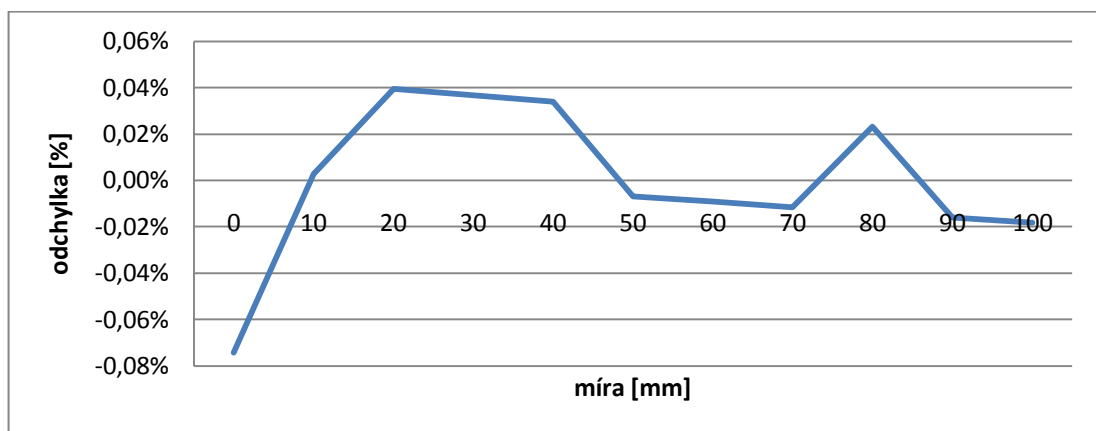
Tab. 4 Naměřené hodnoty pro 1. měření naklápěné osy

V grafu (Graf 2) je zobrazena linearita akcelerometru při prvním měření opět s regresní přímkou. Na ose x jsou míry Johanssonových měrek, stupňované od nuly po sto milimetrů. Na ose y jsou vyneseny naměřené hodnoty napětí ve voltech.



Graf 2 Linearita akcelerometru

Graf (Graf 3) znázorňuje hodnoty odchylek v kladné i záporné hodnotě. Maximální hodnota kladné odchylky byla 0,0393% a maximální hodnota záporné odchylky měla hodnotu -0,0743%.



Graf 3 Odchylky měření

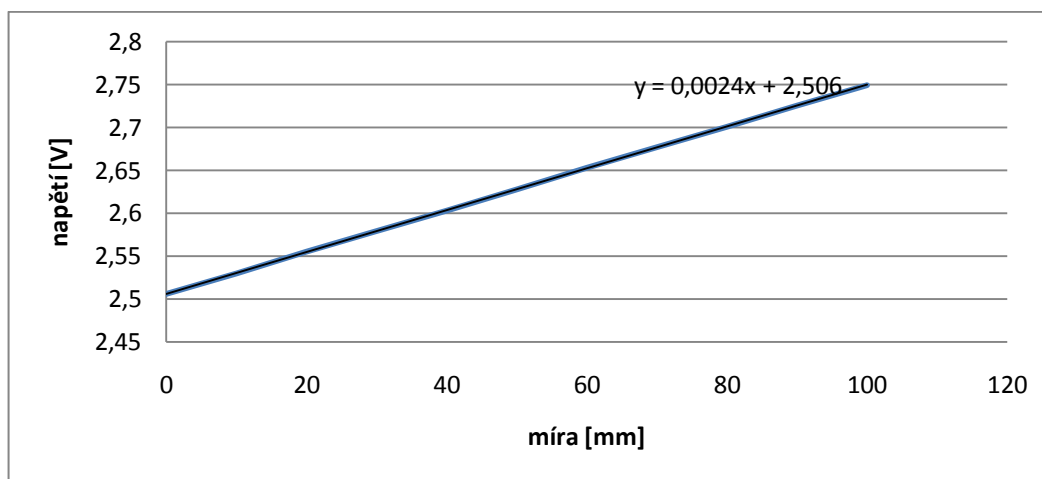
Druhé měření probíhalo stejným způsobem jako první, z důvodu chyby opakovatelnosti měření. U měření byla vypočítána přímka a odchylka měření, za pomoci vzorců uvedených výše.

2. měření

2. měření	naměřená hodnota	přímka	odchylka
míra [mm]	napětí [V]	[-]	[%]
0	2,506	2,506045455	-0,0018
10	2,530	2,5304	-0,0158
20	2,555	2,554754545	0,0096
30	2,579	2,579109091	-0,0042
40	2,603	2,603463636	-0,0178
50	2,628	2,627818182	0,0069
60	2,653	2,652172727	0,0312
70	2,677	2,676527273	0,0177
80	2,701	2,700881818	0,0044
90	2,725	2,725236364	-0,0087
100	2,749	2,749590909	-0,0215

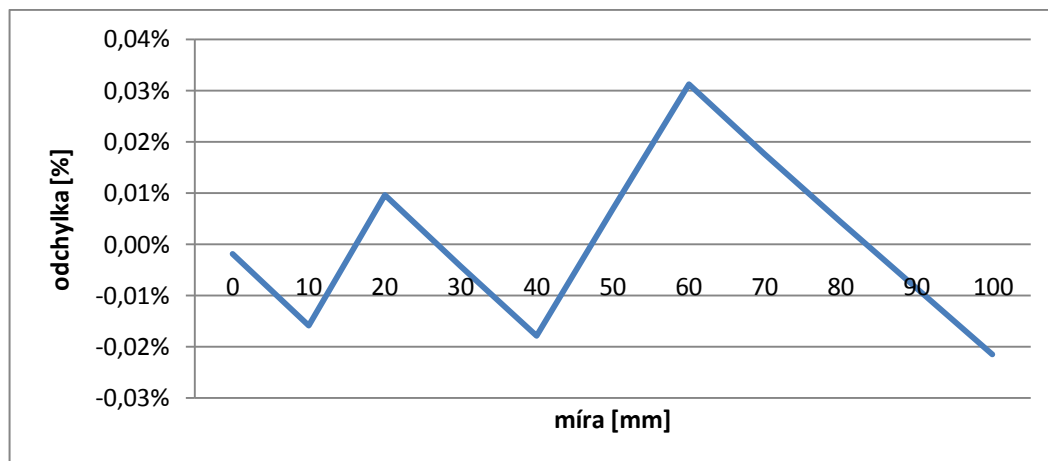
Tab. 5 Naměřené hodnoty pro 2. měření naklápěné osy

Graf (Graf 4) opět znázorňuje linearitu MEMS akcelerometru u druhého měření. Je zde znázorněna i lineární regrese přímky, která se vůči prvnímú měření téměř neliší.



Graf 4 Linearita akcelerometru

Při druhém opakovatelném měření byl výsledek rozdílný především v odchylce měření. Vůči prvnímú měření se odchylka výrazně lišila při maximální záporné hodnotě, jak ukazuje tabulka (Tab. 5) a graf (Graf 5) odchylky měření.



Graf 5 Odchylky měření

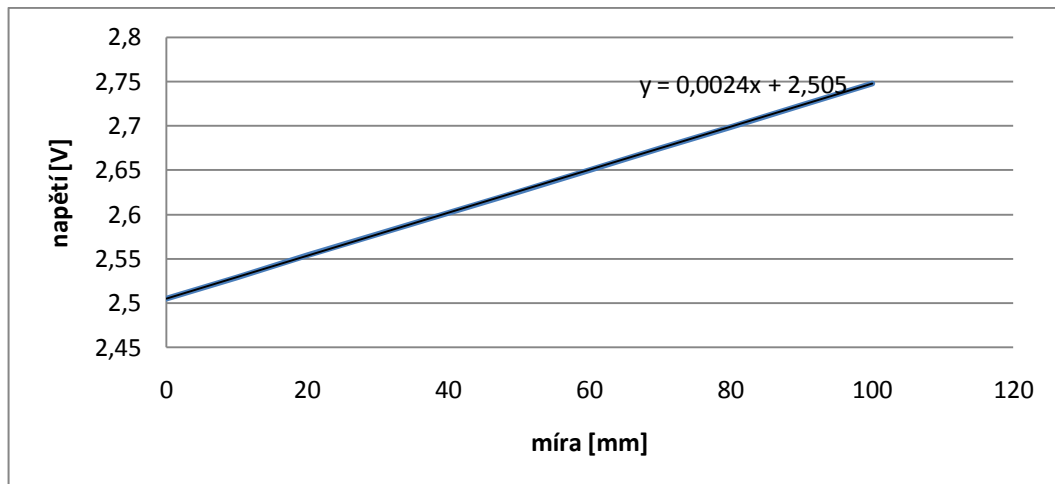
Abychom zjistili, jaké chyby vzniknou při opakovatelnosti měření, byla opakovatelnost měřena třikrát za sebou přičemž byla vždy podkládána stejnou délkou Johannsonových měrek, to znamená od hodnoty 0 milimetrů po hodnotu 100 milimetrů. Tabulka (Tab. 6) zobrazuje naměřené a vypočtené hodnoty přímky a odchylky.

3. měření

3. měření	naměřená hodnota	přímka	odchylka
míra [mm]	napětí [V]	[-]	[%]
0	2,505	2,505	0,0000
10	2,529	2,529254545	-0,0101
20	2,554	2,553509091	0,0192
30	2,578	2,577763636	0,0092
40	2,602	2,602018182	-0,0007
50	2,626	2,626272727	-0,0104
60	2,650	2,650527273	-0,0199
70	2,675	2,674781818	0,0082
80	2,699	2,699036364	-0,0013
90	2,723	2,723290909	-0,0107
100	2,748	2,747545455	0,0165

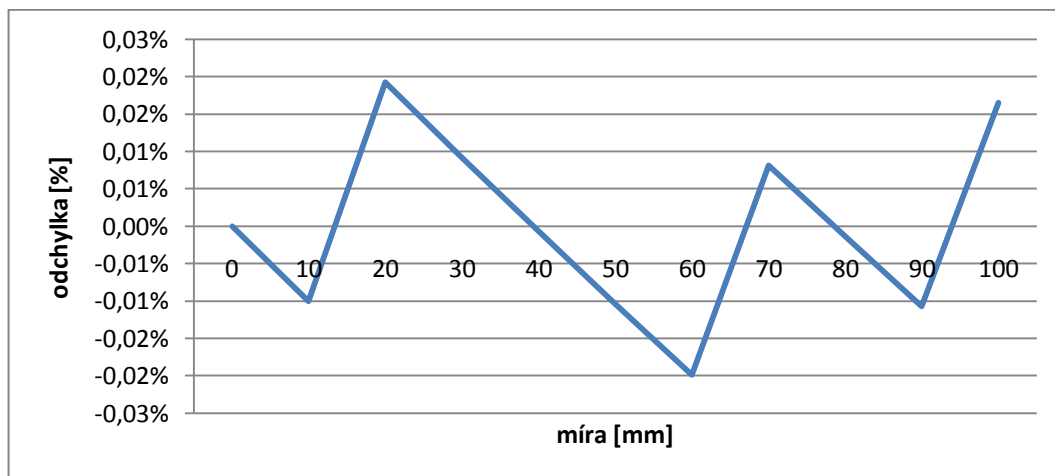
Tab. 6 Naměřené hodnoty pro 3. měření naklápěné osy

Linearita MEMS akcelerometru u třetího opakovatelného měření je znázorněna na grafu (Graf 6). Přímka i u třetího měření má takřka stejnou hodnotu jako dvě předešlá měření a proto lze říci, že při opakovatelnosti nevznikly velké rozdíly mezi měřeními.



Graf 6 Linearita akcelerometru

Třetí měření ukázalo odchylku, která je zobrazena grafem (Graf 7). Mělo nejmenší rozptyl ze všech. Odchylka v maximální kladné i maximální záporné hodnotě nepřekročila výpočtem dvě setiny procenta.



Graf 7 Odchylky měření

10.7 Závěr měření

Při měření MEMS akcelerometru ADXL bylo hlavním úkolem zjistit stabilní lineární charakteristiku a chybu opakovatelnosti měření tohoto zařízení. Závěrem lze říci, že díky grafům, které vyšly z měření, má MEMS akcelerometr stabilní lineární charakteristiku. O snímači lze po měření prohlásit, že má vysokou přesnost při opakovatelnosti. V tabulce

(Tab. 7) jsou zobrazeny průměry všech tří po sobě se opakujících měření naklápěné osy. Tabulka obsahuje průměr naměřených hodnot, které byly odčítány z voltmetrů, a dále zprůměrované výpočty přímek a odchylek měření. Při měření, byla díky Microsoft Office Excel počítána i hodnota korelačního koeficientu. Tabulka (Tab. 8) udává koeficient pro všechna tři opakovatelná měření.

Při měření se mohly vyskytnout i chyby měření důsledkem nedodržení přesné kolmosti plošného spoje vůči úhlům sklonu. Další chyby měření mohly vzniknout při podkládání kalibru sklonu Johanssonovými měrkami, které měly být pokládány přesně na střed kalibrační kuličky naklápěné plochy kalibru sklonu a na střed otočného čtyřhranu, umístěného na pevné části kalibru sklonu.

U ostatních měření nevyšla nenaklápěná osa vždy přesně při opakovatelných měřeních, jak u tohoto případu. Hodnoty se ovšem lišily pouze v tisícinách procent. I přesto lze říct, že v nenaklápěné ose má snímač také při opakovatelnosti měření vysokou přesnost.

V příloze na CD je vyhodnoceno kompletní měření v úhlech 0, 15, 30, 45 stupňů sklonu.

průměr naměřená [V]	průměr přímka [-]	průměr odchylek [%]
2,506333333	2,506969697	-0,0254
2,531	2,531193939	-0,0077
2,556	2,555418182	0,0228
2,58	2,579642424	0,0139
2,604	2,603866667	0,0051
2,628	2,628090909	-0,0035
2,652333333	2,652315152	0,0007
2,676666667	2,676539394	0,0048
2,701	2,700763636	0,0087
2,724666667	2,724987879	-0,0118
2,749	2,749212121	-0,0077

Tab. 7 Průměry hodnot naklápěné osy

korelace	hodnota
1. měření	0,999979843
2. měření	0,999966409
3. měření	0,999949199

Tab. 8 Korelace měření

ZÁVĚR

Bakalářská práce je věnována Mikroelektromechanickým systémům a možnostem jejich využití v průmyslu komerční bezpečnosti. V teoretické části jsou uvedeny všechny informace, týkající se daného tématu, které byly nutné pro vytvoření praktické části práce. Shromáždit materiály k tomuto tématu však bylo velmi obtížné, jelikož je tento obor, mikroelektromechanické systémy (MEMS), poměrně mladý a většina literatury byla dostupná pouze v odborných publikacích v anglickém jazyce. Bylo tedy nutné materiály nejprve přeložit a posléze mohly být zpracovány. Praktická část práce pojednává o využití MEMS systémů v průmyslu komerční bezpečnosti. Podklady k této kapitole byly získány z publikací zahraničních univerzit. Dále jsou zde zmíněny možnosti dalšího využití MEMS systémů v bezpečnostním průmyslu. Závěr praktické části tištěné verze práce popisuje výsledky měření MEMS akcelerometru a ukazuje výsledky zpracování měření pouze pod úhlem 45-ti stupňů. Zbylá měření jsou uvedena v elektronické podobě na přiloženém CD z důvodu velkého množství dat.

Při měření v praxi bylo zjištěno, že při naklápěné i nenaklápěné ose, pro něž se snímač chystal, má tento snímač velmi dobré vlastnosti, a to jak při lineární stabilní charakteristice, tak i při opakovatelnosti měření. Jelikož při měření byly zjištěny velmi dobré výsledky s minimálními odchylkami, bude tento výrobek plošného spoje využit v praxi. K praktickému využití však bylo žádoucí navrhnout tento plošný spoj v co nejmenším rozměru, a to se také podařilo. Rozměry výrobku jsou 30 x 18 milimetrů.

Snímač náklonu bude využit v praxi v železniční dopravě při náklonu vlakové soupravy projíždějící obloukem větší rychlostí. Pomocí snímače se proměří daný oblouk a z vyhodnocených měření vznikne projekt, který stanoví z celkové délky oblouku jeho maximální náklon.

Z fyzikálního hlediska vyplývá, že pokud jsou koleje v oblouku natočeny pod určitým úhlem, je možné toto místo projet rychleji, než když jsou koleje položeny v místě oblouku kolmo k povrchu. Pomocí snímače uvedeného v této bakalářské práci se tedy může zefektivnit a zrychlit vlaková doprava a zvýšit její bezpečnost při projíždění kritických míst.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

This thesis deals with Microelectromechanical systems and their possible use in the commercial security industry. In the theoretical part there are stated all information which relates to the topic and which are need for creation of the practical part. To collect materials for this topic was very difficult because the Microelectromechanical systems (MEMS) is a relatively young field and many of the literature is only in the English language. It was necessary to translate these materials first and then work with them. The practical part deals with use of MEMS systems in the commercial security industry. Documents necessary to creation this part were taken from publications of foreign Universities. In this part of my thesis there are stated other possible utilization of these systems in the security industry. The conclusion of practical part in the printed version describes results of accelerometer measurements and presents results only at 45 degree angle. Other measurements are given in electronic form on the CD because of large amount of data.

By measuring in practice it was found that on tilting and untilting axis has sensor very good qualities both in the linear stability characteristic as well as the repeatability. There were found very good results with minimal variations so the product – printed conductor – can be used in practice. For practical use it was necessary to design it in the minimum size. Product dimensions are 30 x 18 mm.

Tilt sensor will be used in practice at the railway traffic when the rail will be faster through passing the curve. With this sensor we could measure the curve and from the results of measurement it will be created the project which states the maximum tilt from the whole length of the arc.

From the physical point of view we can say that if tracks on the arc are layed up under special angle it is possible to pass this place faster than when tracks laid at the arc perpendicular to the surface. This sensor can be usefull to speed up travelling by the train and the train traffic can be more effective and safe.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HUSÁK, Miroslav. Mikrosenzory a mikroaktuátory. 1. vydání. Praha : Academia, 2008. ISBN 80-200-1478-8.
- [2] GAD-EL-HAK, Mohamed. The MEMS handbook. 1st edition : CRC PRESS, 2002. ISBN 0-8493-0077-0.
- [3] L. HARTZELL, Allyson; G. DA SILVA, Mark; R. SHEA, Herbert. MEMS Reliability. 1st edition: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-6017-7.
- [4] BEEBY, Stephen; ENSELL, Graham ; KRAFT, Michael . MEMS Mechanical Sensors. 1st edition : Artech House, 2004. ISBN 1-58053-536-4.
- [5] K. VARADAN, Vijay; VINOY, K. J.; GOPALAKRISHNAN, S. Smart Material Systems and MEMS. 1st edition : John Wiley & Sons Ltd, 2006. ISBN 978-0-470-09361-0.
- [6] MEMS [online]. MEMSnet. Dostupné z WWW: <<http://www.memsnet.org/>>.
- [7] BASHIR, Rashid; WERELEY, Steve; FERRARI, Mauro. BioMEMS and Biomedical Nanotechnology. New York : Springer, 2006. ISBN 0-387-25566-4.
- [8] STANKOVIČ, Jan. 2009. Inerciální navigace. Dostupné z WWW: <klokan.vsb.cz/vyuka/mgit/inerc.doc>.
- [9] DAVIDSON, Pavel ; HAUTAMÄKI, Jani ; COLLIN, Jussi . In Using Low-Cost MEMS 3D Accelerometer And One Gyro To Assist GPS Based Car Navigation System [online]. Tampere University of Technology, Finland, [cit. 2011-04-20], Dostupné z WWW: <www.tkt.cs.tut.fi/research/nappo_files/Davidson08.pdf>.
- [10] KI WON LEE, Seong Yun Cho, et al. In A Personal Navigation System Using Low-Cost MEMS/GPS/Fluxgate [online]. Kwangwoon University, Korea : [cit. 2011-04-20]. Dostupné z WWW: <http://space.snu.ac.kr/bitstream/10371/10154/1/A%20Personal%20Navigation%20System%20Using%20Low-Cost%20MEMS_GPS_Fluxgate.pdf>.
- [11] VOJÁČEK, Antonín . MEMS mikrofony – obecný popis struktury a funkce. Automatizace.hw.cz [online]. 2010, [cit. 2011-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mems-mikrofony-obecny-popis-struktury-a-funkce>>.

- [12] Mikrofony s technologií MEMS. Elektrotechnický magazín [online]. 2009, [cit. 2011-04-20]. Dostupný z WWW: <pandatron.cz/?1110&mikrofony_s_technologii_mems>.
- [13] LEE, Justin . In MEMS Microphone [online], 2009 [cit. 2011-04-20]. Dostupné z WWW: <http://mech207.engr.scu.edu/SensorPresentations/Lee%20-%20MEMS_Microphone%20Combined.pdf>.
- [14] HUSÁK, Miroslav. MEMS a mikrosystémové technologie. Automa : odborný časopis [online]. 2008, číslo: 11. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38122 >.
- [15] BOSCH [online]. 2008. Dostupné z WWW: <<http://www.bosch-sensortec.com/content/language1/html/index.htm>>.
- [16] HUSÁK, Miroslav. Užití MEMS v průmyslu. Automa : odborný časopis [online]. 2008, číslo: 12. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38277>.
- [17] TODD J. PLUM, Vishal Saxena. In Design and Fabrication of a MEMS Capacitive Chemical Sensor System [online]. Boise State University : Dostupné z WWW: <http://coen.boisestate.edu/sensor/Documents/Public%20Documents/Conference%20Papers/2006/WMED06_MEMS_Sensors.pdf>.
- [18] ANDERS BLÜCKERT, Vegar Dalsrud. In SCALING PROPERTIES AND MEMS IMPLEMENTATION OF ACOUSTIC GAS SENSORS [online]. 2004 Dostupné z WWW: <http://www.hokinstrument.se/nyheter/msw_040304.pdf>.
- [19] VENKATESH, Prashanth. MEMS in Automotive and Consumer Electronics. Sensors [online]. November 1, 2007, [cit. 2011-04-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.sensormag.com/electronics-computers/consumer/mems-automotive-and-consumer-electronics-1427>>.
- [20] REZÉ, Matthieu . MEMS accelerometer to tackle vehicle safety issues. Automotivedesign [online]. January 27, 2011, [cit. 2011-04-26]. Dostupný z WWW: <http://www.automotivedesign-europe.com/en/mems-accelerometer-to-tackle-vehicle-safety-issues.html?cmp_id=71&news_id=222901346>.
- [21] Freescale MEMS Sensors for Automotive Safety Applications. November 2009 Dostupné z WWW:

<http://images.eccn.com/sensor/ASIA%20Sensor%20Expo%20-%20Freescale%20MEMS%20Sensors%20for%20Automotive%20Safety%20Applications-Freescale_Shanghai.pdf>.

- [22] VOJÁČEK, Antonín . Integrované MEMS GYROSKOPY. Automatizace.hw.cz [online]. 11 Říjen, 2009. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>>.
- [23] VOJÁČEK, Antonín . Nový integrovaný senzor vibrací. Automatizace.hw.cz [online]. 15 Srpen, 2008. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/nový-integrovaný-senzor-vibrací-analog-devices-adxl001>>.
- [24] VOJÁČEK, Antonín . Principy akcelerometrů. Automatizace.hw.cz [online]. 14 Leden, 2007. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/merení-a-regulace/ART303-principy-akcelerometru--1-díl--piezoelektrické.html>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MEMS mikroelektromechanické systémy

LIGA Litographie Galvanoformung Abformung

FET field effect transistor

MOEMS mikrooptoelektromechanické systémy

BIOMEMS bioelektromechanické systémy

GPS Global Positioning System

RF rádio frekvenční

IR infračervený

STM scanning tunneling microscope

AFM atomic force microscopy

VLSI Very large scale integration

PDA personal digital assistant

CMOS Complementary metal oxide semiconductor

A/D analogově digitální převodník

ESC elektronická kontrola stability

TSC trakční kontrola systému

ABS Anti lock Brake System

SMD surface mount device

ST self test

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Miniaturní MEMS snímač zrychlení od firmy Bosch [15].....	12
Obr. 2 Převodový mechanismus MEMS zařízení [16].....	13
Obr. 3 Součásti MEMS systému	16
Obr. 4 Technologický postup vytváření mikronosníku povrchovým mikroobráběním: a) výchozí struktura, b) struktura po odleptání [14].....	19
Obr. 5 Geometrické motivy realizované objemovým mikroobráběním [14]	20
Obr. 6 Mikroobrábění excimerovým laserem [14]	21
Obr. 7 Složení mikrosystémů MOEMS [14]	22
Obr. 8 Složení mikrosystémů BIOMEMS [14]	23
Obr. 9 MEMS gyroskop	26
Obr. 10 Příklad MEMS senzorů s využitím pro robotiku	30
Obr. 11 Družicový GPS signál.....	32
Obr. 12 Miniaturní MEMS mikrofony [11].....	34
Obr. 13 Blokové schéma chemického senzoru [17].....	35
Obr. 14 Akustický plynový senzor v keramickém pouzdře [18].....	36
Obr. 15 Využití MEMS v automobilech [21]	37
Obr. 16 Blokové schéma akcelerometru ADXL203	40
Obr. 17 Schéma zapojení.....	42
Obr. 18 Návrh desky plošného spoje.....	43
Obr. 19 Osazený výrobek plošného spoje	43
Obr. 20 Vyvažování kalibru sklonu	45
Obr. 21 Měřicí souprava	45
Obr. 22 Kalibr sklonu	46
Obr. 23 Podkládání kalibru sklonu Johanssonovými měrkami	46
Obr. 24 Podkládání kalibru sklonu Johanssonovými měrkami	47

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vlastnosti akcelerometru	40
Tab. 2 Naměřené hodnoty nenaklápěné osy	48
Tab. 3 Regresní hodnoty přímký.....	49
Tab. 4 Naměřené hodnoty pro 1. měření naklápěné osy	49
Tab. 5 Naměřené hodnoty pro 2. měření naklápěné osy	51
Tab. 6 Naměřené hodnoty pro 3. měření naklápěné osy	52
Tab. 7 Průměry hodnot naklápěné osy	54
Tab. 8 Korelace měření	54

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Linearita nenaklápěné osy	48
Graf 2 Linearita akcelerometru	50
Graf 3 Odchyly měření	50
Graf 4 Linearita akcelerometru	51
Graf 5 Odchyly měření	52
Graf 6 Linearita akcelerometru	53
Graf 7 Odchyly měření	53