

Žilinská univerzita v Žiline
Fakulta elektrotechniky a informačných technológií
Katedra mechatroniky a elektroniky

28260620201010

**Návrh využitia záznamového zariadenia na báze
prvkov MEMS v mechatronike**

2020

Erik Šlank

**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMAČNÝCH TECHNOLOGIÍ**

Návrh využitia záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS v mechatronike

BAKALÁRSKA PRÁCA

Študijný program:	Elektrotechnika
Študijný odbor:	5.2.9 Elektrotechnika
Školiace pracovisko:	Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, Katedra mechatroniky a elektroniky
Školiteľ:	Doc. RNDr. Juraj Pančík, CSc.

Žilina, 2020

Erik Šlank



KATEDRA MECHATRONIKY A ELEKTRONIKY

Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina
tel.: 041/5131601 fax: 041/5131524 e-mail: kme@fel.uniza.sk



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Meno: **Erik ŠLANK**

Študijný program: Elektrotechnika

Názov bakalárskej práce:

**Návrh využitia záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS
v mechatronike**

Pokyny pre vypracovanie bakalárskej práce:

1. Vymedzenie pojmov v predmetnej oblasti
2. Analýza nasadenia MEMS snímačov pre mechatronické aplikácie
3. Popis kalibrácie snímačov na báze MEMS prvkov
4. Popis a overenie funkčnosti vybraného záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS a vyhodnocovacieho softvéru

Predpokladaný rozsah práce - počet strán textu: max. 40

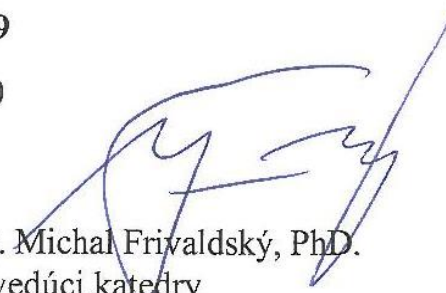
počet strán grafických príloh: max. 10

Školiteľ bakalárskej práce: doc. RNDr. Juraj Pančík, CSc.

Konzultant bakalárskej práce :

Dátum zadania bakalárskej práce: **31. 10. 2019**

Dátum odovzdania bakalárskej práce: **12. 5. 2020**


doc. Ing. Michal Friwaldský, PhD.
vedúci katedry

Abstrakt

ŠLANK, Erik: Návrh využitia záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS v mechatronike. [Bakalárska práca]. Žilinská univerzita v Žiline. Fakulta elektrotechniky a informačných technológií; Katedra mechatroniky a elektroniky. Vedúci práce: Doc. RNDr. Juraj Pančík, CSc. Obhajoba: Žilina, 2020. 65s.

Práca sa venuje senzorickým záznamovým zariadeniam na báze mikro-elektro mechanických systémov (MEMS). Opisuje základné pojmy v predmetnej oblasti, ako sú mechatronické systémy, snímače MEMS, inerciálne meracie jednotky (IMU), záznamové zariadenia a internet vecí (IoT). Práca analyzuje nasadenie MEMS snímačov pre mechatronické aplikácie. Obsahuje stručné informácie o kalibrácii MEMS snímačov. Práca overuje funkčnosť vybraných záznamových zariadení s operačným systémom OS Windows 10 ako aj kompatibilitu s príslušnými softvérmi. Vizualizuje získané dáta a informuje o možnostiach využitia záznamových zariadení.

ANOTAČNÝ ZÁZNAM - BAKALÁRSKA PRÁCA

Názov práce: Návrh využitia záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS v mechatronike

Fakulta elektrotechniky a informačných technológií
Katedra mechatroniky a elektroniky

Priezvisko a meno: Šlank Erik
Akademický rok: 2019/2020

Počet strán: 66

Počet obrázkov: 34

Počet tabuliek: 1

Počet grafov: 0

Počet príloh: 6

Použitá literatúra: 56

Anotácia v slovenskom jazyku:

Bakalárska práca sa bude zaoberať mechatronickými prvkami, spojzdením a overením vybraného záznamového zariadenia na báze snímačov MEMS (akcelerometer, gyroskop, magnetometer) spolu so softvérom pre spracovanie údajov. Otestuje sa zariadenie a navrhnu sa využitia záznamového zariadenia pre budúce použitia.

Anotácia v anglickom jazyku:

The bachelor thesis deals with mechanical components, making and verifying chosen recording device on the basis of MEMS sensors (accelorometer, gyroscope, magnetometer) along with data processing software. The device is tested and utilization of the recording device is suggested for the next use.

Kľúčové slová:

mechatronika, MEMS, MST, snímače, senzory, akcelerometer, gyroskop, magnetometer, IMU, IoT, kalibrácia, MCU, FRDM

Vedúci bakalárskej práce: Doc. RNDr. Juraj Pančík, CSc.

Recenzent: _____

Dátum odovzdania práce: 12.mája 2020

Obsah

Úvod

1 Vymedzenie pojmov v predmetnej oblasti	1
1.1 Mechatronické systémy a mechatronické veličiny	1
1.2 Snímače	2
1.3 Prvky MEMS/MST	6
1.3.1 Akcelerometer	8
1.3.2 Gyroskop	11
1.3.3 Magnetometer	13
1.4 Inerciálna meracia jednotka (IMU)	18
1.5 Technológie IoT	19
1.6 Priemyselné záznamové zariadenia pre zber údajov v mechatronike	20
1.7 Slovník pojmov:	22
2 Analýza využitia záznamových zariadení pre zber údajov v mechatronike....	23
2.1 Analýza nasadenia MEMS snímačov v mechatronike	23
2.2 Prípadové štúdie využitia MEMS snímačov	25
2.3 Kalibrácia snímačov na báze MEMS prvkov	30
2.3.1 Kalibrácia MEMS akcelerometra.....	32
2.3.2 Kalibrácia MEMS gyroskopu	34
2.3.3 Kalibrácia MEMS magnetometra	36
3 Popis a overenie funkčnosti vybraného záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS	39
3.1 Popis vybraného záznamového zariadenia a vyhodnocovacieho softvéru.....	39
3.2 Overenie vybraného záznamového zariadenia a vyhodnocovacieho softvéru	50
3.3 Diskusia k overeniu vybraného záznamového zariadenia a vyhodnocovacieho softvéru	63

Záver

Zoznam použitej literatúry

Zoznam obrázkov

Obrázok 1.1 mechatronický diagram (Pavlásek, 2019, prevziate a upravené z predmetu mechatronika).....	2
Obrázok 1.2 postupnosť krokov pri výbere vhodného senzora	6
Obrázok 1.3 prehľad technológie mikrosystémov a prvkov čipu MEMS (Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan, Osama O. Awadelkarim, 2001)	8
Obrázok 1.4 model akcelerometra (Nihtianov S., Luque A., 2014)	9
Obrázok 1.5 schematický pohľad zhora so zjednodušeným znázornením napätia (Nihtianov S., Luque A., 2014).....	12
Obrázok 1.6 geometria Hallovho efektu (Vetelino J., Reghu A., 2011)	15
Obrázok 2.1 štruktúra mikro GNC založeného na senzoroach MEMS (Huang Z. J., Fang J. C., 2005)	26
Obrázok 2.2 šikmá plocha	33
Obrázok 2.3 reakcia MEMS gyroskopu na jeho preddefinované otáčanie v osi (Looney, 2010).....	34
Obrázok 2.4 Allan Varianceho krivka (Looney, 2010)	36
Obrázok 3.1 FRDM-K22F vývojová platforma (NXP Semiconductors, 2020)	40
Obrázok 3.2 FRDM-K64F blokový diagram (NXP Semiconductors, 2020)	41
Obrázok 3.3 FRDM-STBC-AGM01 Shield Board a FRDM-K64F-AGM01 Demo Kit (NXP Semiconductors, 2020)	41
Obrázok 3.4 FRDM-KL25Z vývojová platforma (NXP Semiconductors, 2020)	42
Obrázok 3.5 program NXP Sensor Fusion Toolbox bez pripojeného zariadenia.....	43
Obrázok 3.6 program Freedom Sensor Toolbox s prednastaveným 9-osím demom.....	48
Obrázok 3.7 program Freedom Sensor Toolbox s prednastaveným 9-osím demom, senzorická časť	49
Obrázok 3.8 zapojenie micro USB do dosky FRDM-K64F	51
Obrázok 3.9 nastavenie zákazu pridávania pamäte na vymeniteľné disky.....	52
Obrázok 3.10 Pemicro stránka (Pemicro, 2020).....	53
Obrázok 3.11 vkladanie kódu pre prácu so zariadením FRDM-K64F v aplikácii NXP Sensor Fusion Toolbox.....	54

Obrázok 3.12 zapojené zariadenie FRDM-K64F a FRDM-STBC-AGM01 v aplikácii NXP Sensor Fusion Toolbox	55
Obrázok 3.13 meracie dosky FRDM položené na reproduktor	55
Obrázok 3.14 provizórne vibračné zariadenie	56
Obrázok 3.15 vizualizácia orientačných hodnôt zrýchlenia akcelerometra, doska K64F so Shield Boardom, hmotnosť 55g, budiaca frekvencia 48Hz	57
Obrázok 3.16 stav hodnôt na začiatku merania dosky FRDM-K64F	57
Obrázok 3.17 vizualizácia orientačných hodnôt zrýchlenia akcelerometra, doska KL25Z, hmotnosť 19g, budiaca frekvencia 48Hz	58
Obrázok 3.18 vizualizácia orientačných hodnôt zrýchlenia akcelerometra, doska KL25Z, hmotnosť 61g, budiaca frekvencia 48Hz	59
Obrázok 3.19 vizualizácia orientačných hodnôt zrýchlenia akcelerometra, doska KL25Z, hmotnosť 61g, budiaca frekvencia 148Hz	59
Obrázok 3.20 vizualizácia orientačných hodnôt akcelerometra na osiach X a Y, doska K64F so Shield Boardom, budiaca frekvencia 48Hz, Freedom Sensor Toolbox	60
Obrázok 3.21 vizualizácia orientačných hodnôt osi Z, doska K64F so Shield Boardom, sbudiaca frekvencia 48Hz, Freedom Sensor Toolbox.....	61
Obrázok 3.22 vizualizácia orientačných hodnôt zrýchlenia pri upravenej stupnici, doska K64F so Shield Boardom, budiaca frekvencia 48Hz, Freedom Sensor Toolbox	62
Obrázok 3.23 architektúra operačného systému Mbed (MbedOS architektúra png, 2020)	64
Obrázok 3.24 práca s programom Freedom Sensor Toolbox, ukladanie údajov a bitovej mapy.....	65

Zoznam Tabuliek

Tabuľka 1 LED status a jeho význam (Semiconductors, 2020).....	50
--	----

Zoznam skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
MEMS	Micro-electro-mechanical system	Mikroelektromechanické systémy
MST	Micro systems technology	Technológia mikrosystémov
LORAN	Long range navigation	Navigácia na veľké vzdialenosti
SQUID	Superconducting quantum interference device	Supravodivé kvantové rušiacie zariadenie
GMR	Giant magnetoresistance	Obrovská magnetorezistencia
AMR	Anisotropic magnetoresistance	Anizotropná magnetorezistencia
MTJ	Magnetic tunnel junction	Senzory magnetických tunelov
OpenSDA	Open-standard serial and debug adapter	Open-standard serial a debug adaptér
HAST	Highly accelerated stress test	Vysoko zrýchlený záťažový test
DUT	Device under test	Skúšané zariadenia
DPS	Printed circuit board	Doska plošných spojov
LQFP	Low Quad Flat Package	-
MCU	Microcontroller unit	Mikrokontrolér
IDE	Integrated Development Environment	Vývojové prostredie
RTOS	Real-time operating system	Operačný systém reálneho času
GNC	Guidance, navigation, control	Navádzanie, navigácia, riadenie
AHRS	Attitude Heading Reference System	Referenčný systém zamerania polohy
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor	-

Zoznam symbolov

Symbol	Jednotka	Význam symbolu
$\hat{V}_{out}$	V	amplitúda výstupného signálu prevodníka
$\hat{a}_T$	m/s ²	amplitúda zrýchlenia v smere testovania.
S_T	V*s ² /m	priečna citlivosť akcelerometra
a_{ref}	m/s ²	zrýchlenie v smere pohybu
V_x	V	spektrálna amplitúda výstupného signálu osi x

Pod'akovanie

Týmto by som chcel pod'akovať konzultantovi mojej bakalárskej práce pánovi Doc. RNDr. Jurajovi Pančíkovi, CSc. za tému, ktorej spracovanie ma bavilo. Za všetky cenné rady, niekoľko hodín konzultácií a čas, ktorý mi bol venovaný. Chcem sa taktiež pod'akovať pánovi Ing. Marekovi Paškalovi, PhD za poskytnutie vývojovej platformy, ktorú som využil na realizáciu mojej práce.

Úvod

Každý deň sa stretávame s nespočetným množstvom mechatronických zariadení prispôbených na merania pomocou zabudovaných MEMS (mikro-elektro-mechanický systém) senzorov. Či už to sú airbagy v autách, snímače pohybu v bezpečnostných systémoch, zariadenia na snímanie tepla v saune, či rôzne senzory zrýchlenia v mobiloch, tieto zariadenia sa stali v modernej dobe súčasťou našich životov.

Predmetom bakalárskej práce je navrhnúť využitie záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS v mechatronike. Hlavným cieľom práce je demonštrovať činnosť tohto zariadenia.

V prvej kapitole sa nachádza opis základných pojmov v predmetnej oblasti, kde sa opisujú mechatronické systémy ako aj MEMS snímače, ktoré tvoria v dnešnej dobe základ modernej elektroniky. Medzi MEMS snímače patrí akcelerometer, gyroskop a magnetometer. V kapitole je popísaná funkčnosť a použitie vybraných MEMS snímačov. V prvej kapitole sa nachádza aj vysvetlenie skratky IMU (inerciálna meracia jednotka), základné informácie o záznamových zariadeniach, načo slúžia, kde sa dajú využiť a sú tu vysvetlené možnosti IoT (internet vecí) technológií.

V druhej kapitole sa analyzuje nasadenie MEMS snímačov pre mechatronické aplikácie, ako príklad sú použité bežné aplikácie v automobilovom priemysle ako sú airbagy, trochu netradičné použitie MEMS snímačov je v MEMS inerciálnych senzoroch pre navádzanie, navigáciu a riadenie (GNC) autonómneho bezpilotného lietadla (UAV), ktoré sa používa v armáde.

V tretej kapitole sú popísané niektoré spôsoby kalibrácie snímačov na báze prvkov MEMS pri akcelerometri, gyroskope a magnetometri.

V štvrtej kapitole je overená funkčnosť vybraného záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS a vyhodnocovacieho softvéru. Popísaný postup zapojenia a sprístupnenia zariadení FRDM-K22F, FRDM-K64F, FRDM-KL25Z s ich takzvaným „Shield Boardom“ FRDM-STBC-AGM01. A ako vyhodnocovací softvér je použitá aplikácia NXP Sensor Fusion Toolbox a aplikácia Freedom Sensor Toolbox. Práca je završená otestovaním akcelerometrov dvoch zariadení a dvoch aplikácií na vyhodnotenie raw výsledkov, pomocou upraveného reproduktora pre nízke tóny (subwoofer).

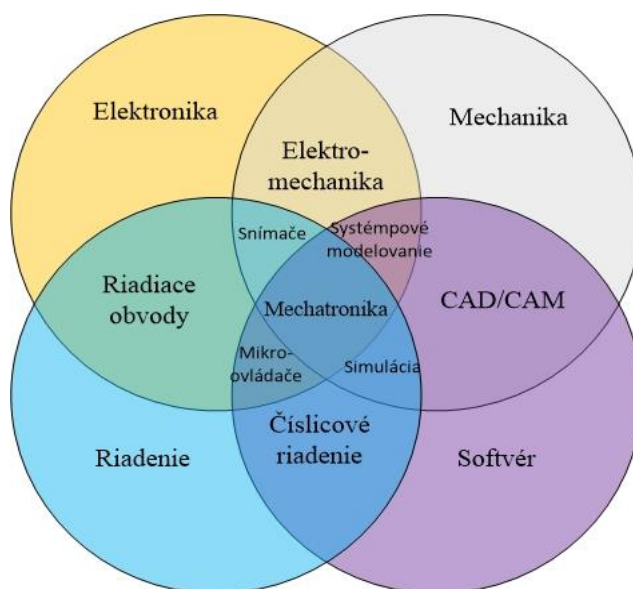
1 Vymedzenie pojmov v predmetnej oblasti

Predmetná oblasť sa bude venovať mechatronickým systémom ako aj MEMS snímačom, ktoré tvoria v dnešnej dobe základ modernej elektroniky. Medzi MEMS snímače sa zaradia akcelerometer, gyroskop a magnetometer. Zistia sa ich základné vlastnosti a funkcie. Priblíži sa spôsob komunikácie medzi snímačmi a prístrojmi. Taktiež sa spomenie zber dát z MEMS snímačov, ako aj ich spracovanie. Nakoniec sa v tejto časti napíšu informácie o rôznych záznamových zariadeniach pre mechatronické systémy.

1.1 Mechatronické systémy a mechatronické veličiny

„Názov mechatronika bol „vynájdený“ Japonským inžinierom v roku 1969, ako kombinácia „mecha“ z mechanizmu a „tronika“ z elektroniky.“ (Bolton, 2015, str. 3). Základom mechatroniky je synergia uplatňovania mechaniky, elektroniky, ovládacích prvkov a počítačového inžinierstva. Nato aby sme vytvorili plne hodnotný mechatronický systém, budeme potrebovať multidisciplinárny prístup pre jeho modelovanie, návrh, vývoj a implementáciu. Tradičným spôsobom elektromechanického systému je návrh mechanických, elektrických komponentov samostatne a následné integrovanie s inými komponentami hardvéru a softvéru. Avšak pri mechatronike sa na postup pozeráme ako na celok, a teda za účasti multidisciplinárneho tímu inžinierov a iných odborníkov dosahujeme vyššiu úroveň výkonnosti a efektivity. Hlavným dôvodom, prečo je mechatronický postup lepší ako tradičný spôsob elektromechanického systému, je získanie lepšej zhody a kompatibility medzi funkciami komponentov skrz integrovaného a unifikovaného prístupu k projektovaniu a vývoju. Všeobecne platí, že mechatronický produkt bude efektívnejší, cenovo prístupnejší, presnejší, spoľahlivejší, menej mechanicky komplikovaný, bezpečnejší a viac šetrný voči životnému prostrediu ako nemechatronický produkt. Mechatronické výrobky a systémy zahŕňajú inteligentné domácnosti, automobily, lietadlá, domáce spotrebiče, lekárske roboty, automatizačné zariadenia a mnoho ďalšieho. „Oblasti použitia mechatroniky sú početné a zahŕňajú oblasti, ktoré sa týkajú viacdoménových (zmiešaných) systémov a najmä elektromechanických systémov.“ (Silva, 2010, str. 10). „Dôležitosť mechatronických zariadení pri použití elektromagnetických a zároveň aj elektromechanických zariadení v priemysle a ich vplyv na vznikajúce technológie v posledných rokoch dramaticky

vzrástol.“ (Pawlak, 2007, str. Preface). Najväčší pokrok môžeme pozorovať najmä v automobilovom priemysle, kde sa mechanický a hydraulický systém presunul do mechatronického systému založeného na elektromagnetických a elektromechanických zariadeniach.



Obrázok 1.1 mechatronický diagram (Pavlásek, 2019, prevziate a upravené z predmetu mechatronika)

1.2 Snímače

Každý objekt komunikujúci s vonkajším prostredím systému si vymieňa informácie o procese alebo funkcii svojho záujmu pre zisťovanie situácie alebo stavu, v ktorom sa nachádza. To je všetko možné vďaka meraniu alebo detegovaniu rôznych fyzikálnych a chemických vlastností, ktoré sú charakterizujúce pre proces alebo subjekt. Jednotkou, ktorá poskytuje tieto informácie, možno nazvať snímačom a jeho citlivú časť môžeme nazvať senzorom. Sensory môžeme chápať ako neodlúčiteľnú časť bežného života, keď si predstavíme v širšom poňatí senzory sluchu, čuchu, chuti, zraku a hmatu, ktoré sa považujú za najstaršie a najdokonalejšie senzory vôbec. V dnešnej dobe senzory môžeme chápať ako prevody signálu snímanej informácie pre technické použitie v meracích zariadeniach či regulačných alebo informačných systémoch. Prvé senzory začali vznikať až na konci 19. storočia, kedy fyzika zaznamenala značný rozvoj. „S rozvojom elektrotechniky a elektroniky sa postupne uprednostňovali senzory s elektrickým výstupným signálom.“ (Guldan, 1988, str. 15). V skutočnosti sa senzory používajú tak všeobecne, že ich berieme ako samozrejmosť, tak ako berieme za samozrejmosť počítače

alebo autá. Je to hlavne preto, lebo senzory a akčné členy menšieho rozsahu nie sú také viditeľné ako iné zariadenia. Hlavným dôvodom je, že sú obvykle integrované do väčších systémov, a teda činnosť senzora alebo ovládača je za normálnych okolností nepriamo pozorovateľná. To znamená, že senzor alebo aktuátor (ovládač) môže zriedka pracovať samostatne, ale skôr je súčasťou väčšieho systému, ktorý môže zahŕňať veľa senzorov, ovládačov a prvkov spracovania, ako aj pomocné komponenty, ako sú napájacie zdroje a mechanizmy pohonu. Z tohto dôvodu prichádzajú ľudia do styku so snímačmi a aktuátormi iba nepriamo. Napríklad auto môže obsahovať desiatky senzorov a akčných členov odvodených z rôznych disciplín, ale takmer nikdy sme neprišli do priameho kontaktu so žiadnym z nich. Airbagy v autách zachraňujú životy a znižujú zranenie skôr, ako vodičova hlava narazí do volantu. Je to možné pomocou jedného alebo viacerých akcelerometrov (snímače zrýchlenia), ktoré detegujú náhlu zmenu spomalenia vozidla pri nehode, aktivácia výbušného náboja (ovládača), ktorý naplní vak plynom. Medzi senzormi a ovládačom je procesor, ktorý rozhoduje či došlo k nehode na základe nastavených parametrov snímania. Ďalším príkladom je automatické nastavenie teploty v dome, čím sa aktivuje ovládač na prevádzku pece (ohrievača) alebo klimatizácie. To je možné vďaka snímačom uloženým na rôznych miestach v priestore, vďaka čomu sa reguluje teplota v miestnosti na predom určenú teplotu. „Celkovo sa odhaduje, že v každodennom živote človek prichádza do styku s niekoľkými stovkami senzorov a akčných členov v domácnosti, v doprave, v práci a pri zábave, hoci spravidla o nich väčšina ľudí nevie.“ (Ida, 2014, str. 2).

Kvôli množstvu senzorov, ktoré existujú sa môže zdať ich rozdelenie náročné. Sensory a akčné členy sa môžu klasifikovať rôznymi spôsobmi. Klasifikácia môže byť založená na fyzikálnych zákonoch upravujúcich ich fungovanie, na ich uplatňovaní alebo na nejaký iný vhodný rozdiel medzi nimi. „Neexistuje žiadna jediná všeobecná metóda klasifikácie, ktorá by zahŕňala všetky typy a preto existujú rôzne klasifikácie, ktoré sa používajú na rôzne účely.“ (Ida, 2014, str. 13). Určité rozdiely medzi triedami senzorov a akčnými členmi môžu byť užitočné. Napríklad môžeme rozlišovať medzi aktívnymi a pasívnymi senzormi.

1. Aktívne (generátorové), kedy sa snímač pôsobením neelektrickej veličiny správa ako zdroj elektrickej energie a teda nepotrebuje pomocný napájací zdroj.

- Fotoelektrické,
- Termoelektrické,
- Piezoelektrické,
- Indukčné (meranie mechanických veličín)
 - elektrodynamické (prietokomer)
 - elektromagnetické (snímanie otáčok)

2. Pasívne (parametrické), kedy sa pri pôsobení neelektrickej veličiny mení elektrický parameter (kapacita, odpor, indukčnosť, frekvencia a podobne). To znamená, že potrebujú pomocný napájací zdroj.

- Odporové
 - Tenzometrické
 - Teplotné
 - Odporové
- Kapacitné (meranie výšky hladiny),
- Optoelektronické,
- Indukčnosťné

(Paškala, 2019, prednáška z predmetu mechatronická a autotronická senzorika)

„Senzor je svojou podstatou buď aktívnym alebo pasívnym zariadením, ktoré slúži ako srdce meracieho systému.“ (Vetelino J., Reghu A., 2011, str. 14). Ďalšie rozdelenie, ktoré je možné urobiť, je medzi kontaktnými a nekontaktnými senzormi. Napríklad tenzometre sú kontaktné senzory. Malo by sa však chápať, že rovnaký snímač sa niekedy môže použiť v oboch režimoch (napríklad pri meraní termistora), kedy teplota motora je kontaktným senzorom, ale pri meraní okolitej teploty v aute ku kontaktu nedochádza. Niekedy máme dokonca na výber, ako môže byť senzor namontovaný. Ostatné senzory je možné používať iba v jednom režime. Senzory sú niekedy

klasifikované ako absolútne alebo relatívne. Absolútny senzor reaguje na podnet vo vzťahu k absolútnej stupnici.

Príkladom je termistor. Jeho výstup je absolútny. To znamená, že jeho odpor sa vzťahuje na absolútnu teplotu. Podobne je na tom aj kapacitný senzor približenia ako absolútny senzor, jeho zmeny kapacity sú spôsobené fyzickou vzdialenosťou od polohy snímania.

Výstup relatívneho snímača závisí od relatívnej stupnice. Napríklad výstup termočlánku závisí od teplotného rozdielu medzi dvoma spojeniami. Zaznamenané (namerané) množstvo je skôr teplotný rozdiel ako absolútna teplota. Ďalším príkladom je snímač tlaku. Všetky snímače tlaku sú relatívnymi snímačmi. Snímač relatívneho tlaku sníma tlakový rozdiel medzi dvoma tlakmi, ako napríklad tlak v sacom potrubí spaľovacieho motora a atmosférický tlak. Sensory môžu byť klasifikované aplikáciou, použitými fyzikálnymi javmi, metódou detekcie, špecifikáciami senzorov a mnohými ďalšími.

Napríklad, keď sa zvažujú špecifické aplikácie použitia, je možné senzory rozdeľovať skrz nízku alebo vysokú teplotu, nízku alebo vysokú frekvenciu, nízku alebo vysokú presnosť a podobne. Je tiež bežné klasifikovať senzory podľa použitých materiálov. Dá sa teda hovoriť o polovodičových (kremíkových) senzoroch, biologických senzoroch a ďalších. Ako metóda klasifikácie sa niekedy používa dokonca aj fyzická veľkosť (miniatúrne senzory, mikrosenzory, nanosenzory). Mnohé z týchto kvalifikácií sú relatívne a závisia od oblasti použitia. Miniaturný senzor v automobile nemusí byť v rovnakom rozsahu ako miniatúrny senzor v prenosnom počítači alebo mobilnom telefóne. Napríklad systém nafúknutia airbagu používa akcelerometre, rovnako ako mobilné telefóny, aby pri otočení telefónu otočili displej. Je pravdepodobné, že tieto dva senzory budú mať výrazne odlišnú veľkosť. Klasifikácia aktuátorov (ovládačov) je trochu odlišná v tom, že ovládače sú (vo väčšine prípadov) chápané tak, že vytvárajú pohyb, vyvíjajú silu alebo vytvárajú efekt. Pri výbere správneho senzora hrá úlohu viacero faktorov ako je vidieť na Obrázku 1.2. Sensory a ovládače takmer nikdy nepracujú samostatne. Častejšie sú súčasťou zložitejších systémov a fungujú v rámci týchto väčších systémov. Je to skutočne zriedkavý prípad, keď technické parametre senzorov alebo akčných členov zodpovedajú potrebám systému. Preto je potrebné väčšinu senzorov a akčných členov pripojiť so systémom, v ktorom pracujú. Senzor býva pripojený k „procesoru“, ktorý sníma fyzikálnu vlastnosť, napríklad teplotu. Ovládač, tiež spojený s procesorom, určitým

spôsobom reaguje na snímanú teplotu, napríklad zobrazením teploty, zatvorením ventilu, zapnutím ventilátora pri vopred stanovenej teplote alebo niektorou z mnohých ďalších možných funkcií. „Na procesor sa tu pozerá ako na nejaký ovládač, ktorým môže byť mikroprocesor alebo jednoduchší obvod, ktorý zavádza potreby systému.“ (Ida, 2014, str. 16).



Obrázok 1.2 postupnosť krokov pri výbere vhodného senzora

1.3 Prvky MEMS/MST

V Spojených štátoch je táto technológia známa ako mikro-elektro-mechanický systém (MEMS), v Európe sa nazýva technológia mikrosystémov (MST). Najviac zaužívané je pomenovanie MEMS.

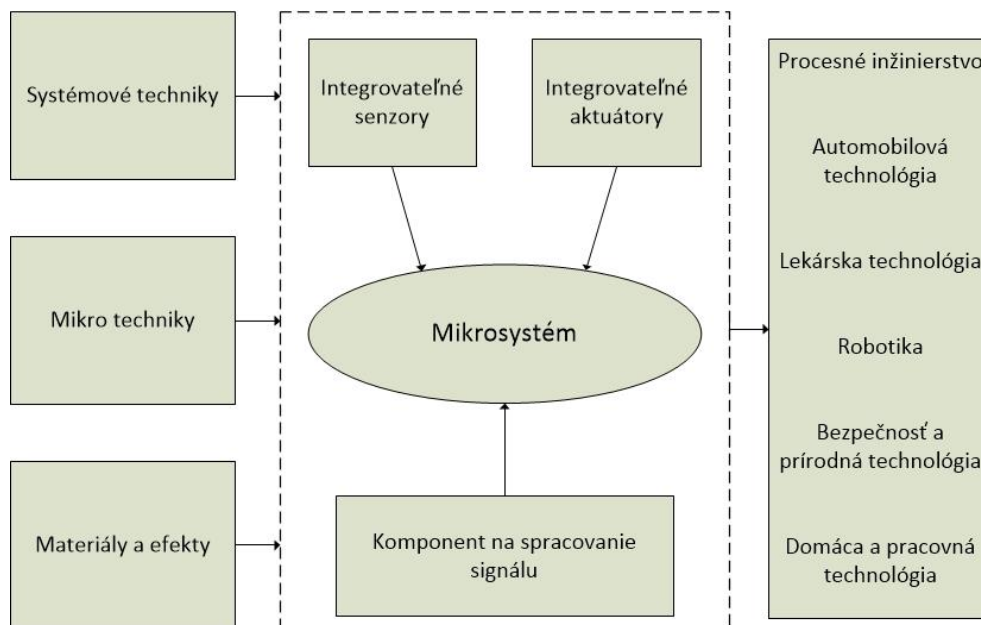
Oblasť MEMS sa vyvinula z priemyslu integrovaných obvodov. Mikroelektromechanické systémy alebo MEMS sú technológie, ktoré sa vo svojej najbežnejšej podobe môžu definovať ako miniaturizované mechanické a

elektromechanické prvky, ktoré sa vyrábajú pomocou mikrofabrikácie. Technológia mikrofabrikácie je základom funkčnej integrácie a miniaturizácie elektroniky. Kritické fyzikálne rozmery zariadení MEMS sa môžu líšiť od jedného mikrónu na spodnom konci rozmerového spektra až po jeden milimeter. Podobne sa typy MEMS zariadení môžu meniť od relatívne jednoduchých štruktúr bez pohyblivých prvkov až po mimoriadne zložité elektromechanické systémy s viacerými pohyblivými prvkami pod kontrolou integrovanej mikroelektroniky. Jedným z hlavných kritérií MEMS je to, že existujú aspoň niektoré prvky, ktoré majú určitý druh mechanickej funkčnosti. „Materiály MEMS sa dajú rozdeliť do piatich hlavných typov: kovy, polovodiče, keramika, polyméry a kompozity.“ (Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan, Osama O. Awadelkarim, 2001, str. 35).

Pokrok v oblasti metrologie a technológie vyústil do rýchleho rastu dostupného sortimentu integrovaných snímačov a MEMS s novými funkciami. Na základe týchto zariadení boli vyvinuté technicky zložité zostavy a zoskupené výrobky. Tieto konfigurácie obsahujú stovky alebo dokonca tisíce zabudovaných snímacích zariadení. „Veľké množstvo vstavaných senzorov a MEMS vyžaduje výrazné zvýšenie ich funkčnej spoľahlivosti vrátane metrologickej spoľahlivosti.“ (Nihtianov S., Luque A., 2014, str. 4).

Ak vidíme technológiu mikrofabrikácie ako súbor všeobecných nástrojov, potom nie je dôvod obmedzovať jej použitie na jeden materiál. Mikroobrábanie bolo skutočne preukázané pomocou kremíka, skla, keramiky, polymérov a zložených polovodičov vyrobených z prvkov III. a V. skupiny periodickej tabuľky prvkov, ako aj rôznych kovov vrátane titánu a volfrámu. Kremík však zostáva najlepším materiálom pre mikroeletromechanické systémy. Táto popularita bezpochyby vyplýva z veľkej dynamiky priemyslu elektronických integrovaných obvodov a z toho vyplývajúcich ekonomických výhod, v neposlednom rade z rozsiahlej priemyselnej infraštruktúry. Technológia použitá na výrobu mikrosystému za použitia integrovaných obvodov sa bežne označuje ako MST. Obrázok 1.3 poskytuje prehľad MST spolu s niektorými oblasťami použitia. „Práce na dosiahnutí tohto cieľa sa začali koncom osemdesiatych rokov a bolo vynaložené obrovské úsilie na výrobu mikroeletromechanických systémov

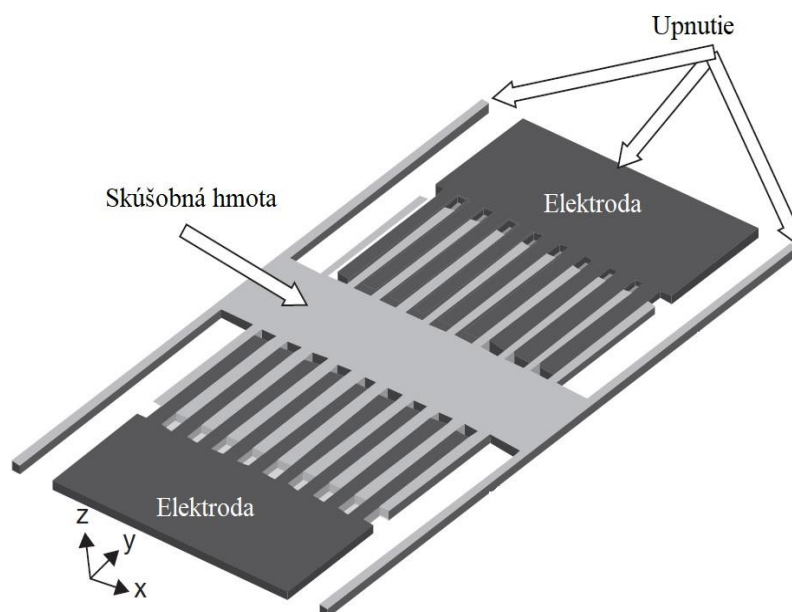
(MEMS) pomocou MST.“ (Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan, Osama O. Awadelkarim, 2001, str. 5).



Obrázok 1.3 prehľad technológie mikrosystémov a prvkov čipu MEMS (Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan, Osama O. Awadelkarim, 2001)

1.3.1 Akcelerometer

„Akcelerometre MEMS sa používajú na snímanie lineárnych zrýchlení v smere osí x, y a z.“ (Nihtianov S., Luque A., 2014, str. 369). Akcelerometre možno ďalej kategorizovať na vibrometre, seizmické monitory, senzory sklonu a senzory pohybu, podľa charakteristík citlivosti a frekvenčnej odozvy. Tieto inerciálne senzory sa môžu použiť na meranie lineárneho zrýchlenia, vibrácií, nárazov a náklonu. Existuje dlhá história vývoja akcelerometra siahajúca do 20. rokov 20. storočia. Prvý kremíkový akcelerometer bol vyrobený na Stanfordskej univerzite Lynnom Roycelandom a profesorom Jamesom Angellom v rokoch 1977 až 1979. Bol vytvorený z monokryštalického kremíka a dopovaný piezorezistorom ako snímacím prvkom. Piezorezistívny snímač využíva pre svoju funkciu zmenu odporu v závislosti od deformácie, ktorá vznikla pôsobením sily pri zrýchlení hmotného prvku snímača. Technologické vytváranie piezorezistívnych snímačov v integrovaných častiach je vytvárané pomocou Wheatstonovho mostíka a uskutočňuje sa v blízkosti ukotvenia mostíka, kde sa nachádza najväčšie mechanické napätie. Na meranie sa využíva ohyb mostíka, ktorý pozostáva z piezorezistívneho kremíkového materiálu ukotveného na jednej strane k rámu a na druhej strane k hmotnému elementu.



Obrázok 1.4 model akcelerometra (Nihtianov S., Luque A., 2014)

Ako je vidieť na obrázku 1.4, tento akcelerometer sa skladá z troch častí: skúšobnej hmoty (proof mass) so štyrmi upnutými zaveseniami a dvoch pevných elektród.

Veľkosť sily ktorá spôsobuje ohyb mostíka je priamoúmerná zrýchleniu. Dôsledkom ohybu mostíka sa mení odpor, ktorý sa prevádza na elektrický signál. Ich hlavnou výhodou je, možnosť merať aj nemenné zrýchlenie pri zmenách od 0 Hz, malá veľkosť, veľká šírka pásma, nízka cena, vysoká presnosť a spoľahlivosť. Nevýhodou je ich teplotná závislosť výstupného signálu na teplote. Vyrobené akcelerometre sa dnes dajú kategorizovať podľa počtu osí (jedna os, dve osi alebo tri osi) a podľa rozsahu zrýchlenia. Rozsah snímania s nízkym obsahom g je menší ako 20 g a zaoberá sa pohybom, ktorý môže generovať aj človek. Akcelerometre s vyšším rozsahom zrýchlenia sa nachádzajú v priemyselných a vojenských aplikáciách. V produktoch akcelerometra dominovali kapacitné a piezorezistívne snímače. Od roku 2010 obzvlášť v spotrebnej elektronike pri pokračovaní vývoja hier, športového vybavenia, notebookoch a netbookoch, prenosných prehrávacích médií, digitálnych fotoaparátov a mobilných telefónoch sa nachádzajú trojosové akcelerometre.

„Všetky akcelerometre zdieľajú základnú štruktúru pozostávajúcu zo zotrvačnej hmoty zavesenej na pružine.“ (Maluf N., Williams K., 2004, str. 97). Líšia sa pri snímaní relatívnej polohy zotrvačnej hmoty, keď sa pohybuje v dôsledku vonkajšieho pôsobenia zrýchlenia. Bežná metóda snímania je pomocou kapacity, pri ktorej hmota vytvára jednu

stranu kondenzátora s dvoma doskami. Tento prístup vyžaduje použitie špeciálnych elektronických obvodov na detekciu drobných zmien kapacity ($<10^{-15}$ F) a ich prevedenie na zosilnené výstupné napätie. Tento snímač umožňuje merať gravitačné aj dynamické zrýchlenie, záporné aj kladné. Snímač pozostáva z mikromechanickej časti skladajúcej sa z nosníka, pružných elementov a kotvenia. Táto časť je vytvorená na základoch kremíkového substrátu a vďaka kremíkovým pružinám je tam pohyblivo uložená. Kremíkové pružiny zároveň kladú mechanický odpor na silu vzniknutú od zrýchlenia. Práve veľkosť posunutia nosníka sa prejaví ako zmena kapacity na diferenciálnom kondenzátore. Ten sa skladá z dvoch dosiek, ktoré sú pripojené k rámu a z jednej dosky kondenzátora, ktorá je upevnená k pohybujúcemu sa nosníku. V inej metóde sa využíva piezoelektrický snímač, ktorý sa skladá z piezoelektrického materiálu, ktorý slúži ako snímač na meranie zrýchlenia a zo seizmickej hmoty, ktorá prevádza hodnotu zrýchlenia na silu. Piezoelektrický materiál sa vloží medzi seizmickú hmotu a pevný rám. Keď je snímač vystavený zrýchleniu, sila, ktorá pôsobí na piezoelektrický materiál od seizmickej hmoty, spôsobí deformáciu materiálu. Vplyvom tejto deformácie sa vygeneruje elektrický náboj. Veľkosť sily je priamoúmerná zrýchleniu a hmotnosti seizmickej hmoty, pričom jej hmotnosť je konštantná. Výhoda piezoelektrických snímačov spočíva v ich jednoduchej konštrukcii, nízkej cene a dostupnosti. Ako nevýhoda sa vyznačuje pomerne výrazná závislosť na pracovnej frekvenčnej oblasti.

V niektorých zriedkavých prípadoch, ako napríklad pri prevádzke pri zvýšených teplotách, je potrebné snímanie polohy optickým vláknom. Primárnymi špecifikáciami akcelerometra sú rozsah, často uvádzaný v g , gravitačné zrýchlenie Zeme ($1 g = 9,81 m/s^2$), citlivosť (V/G), šírka pásma (Hz), priečna citlivosť osi a odolnosť proti nárazom. Požadovaný rozsah a šírka pásma sa výrazne líšia v závislosti od aplikácie. Akcelerometre na snímanie nárazov airbagov sú určené pre celý rozsah $\pm 50 G$ a šírku pásma približne jeden kHz . Naproti tomu zariadenia na meranie klepania alebo vibrácií motora majú dosah približne $1G$, ale musia riešiť malé zrýchlenia ($<100\mu G$) cez veľkú šírku pásma ($> 10 kHz$). Moderné kardiostimulátory obsahujú viac-osové akcelerometre na monitorovanie úrovne ľudskej činnosti a zodpovedajúcu úpravu stimulačnej frekvencie. Hodnoty týchto snímačov sú $\pm 2G$ a šírka pásma menej ako $50 Hz$, ale pre životnosť batérie vyžadujú extrémne nízku spotrebu energie. Akcelerometre pre vojenské aplikácie, pre potrebu detonovania, môžu prekročiť hodnotu $1\ 000 G$. Odolnosť proti

nárazom je dôležitá, ale do istej miery subjektívna špecifikácia na ochranu zariadení počas manipulácie alebo prevádzky. Aj keď by sa dalo očakávať, že špecifikácia bude kvantifikovaná v jednotkách zrýchlenia, namiesto toho je definovaná ako zvláštny, ale praktickejší test, pri ktorom sa zariadenie zhodí z výšky jedného metra na betón môže ľahko dosiahnuť dynamický vrchol 10 000 G. Okrem skúšky pádu sa robia rôzne skúšky rezonancie, ktoré môžu spôsobiť katastrofické zlyhanie. „Správne navrhnutý, nainštalovaný a kalibrovaný akcelerometer by mal mať jednu jasne identifikovateľnú rezonančnú frekvenciu a plochú frekvenčnú charakteristiku, pri ktorej je možné vykonať najpresnejšie meranie.“ (Fraden, 2010, str. 330).

1.3.2 Gyroskop

Gyroskop je zariadenie používané na meranie uhlovej rýchlosti okolo určitej osi otáčania. Pomocou nich dokážeme určiť zmenu polohy natočenia telesa, s ktorým sú pevne pripojené.

Dlho pred príchodom LORAN (Navigácia na veľké vzdialenosti) a satelitného globálneho polohovacieho systému bol gyroskop kritickým navigačným nástrojom používaným na udržiavanie pevnej orientácie s veľkou presnosťou bez ohľadu na rotáciu Zeme. „Bol vynájdený v devätnástom storočí pozostával z rotujúceho zotrvačníka namontovaného v dvoch kardanových závesoch.“ (Maluf N., Williams K., 2004, str. 104). Táto konštrukcia umožňuje pohyb gyroskopu v troch osiach. Presnosť tohto typu gyroskopu je závislá na schopnosti udržania konštantných otáčok zotrvačníka. Veľká uhlová hybnosť zotrvačníka pôsobí proti vonkajšiemu pôsobeniu krútiacich momentov a udržiava orientáciu osi otáčania nezmenenú. Podobný systém využitia gyroskopického momentu od rotujúceho zotrvačníka sa využíva pri stabilizácii kamier, periskopov a ďalekohľadov.

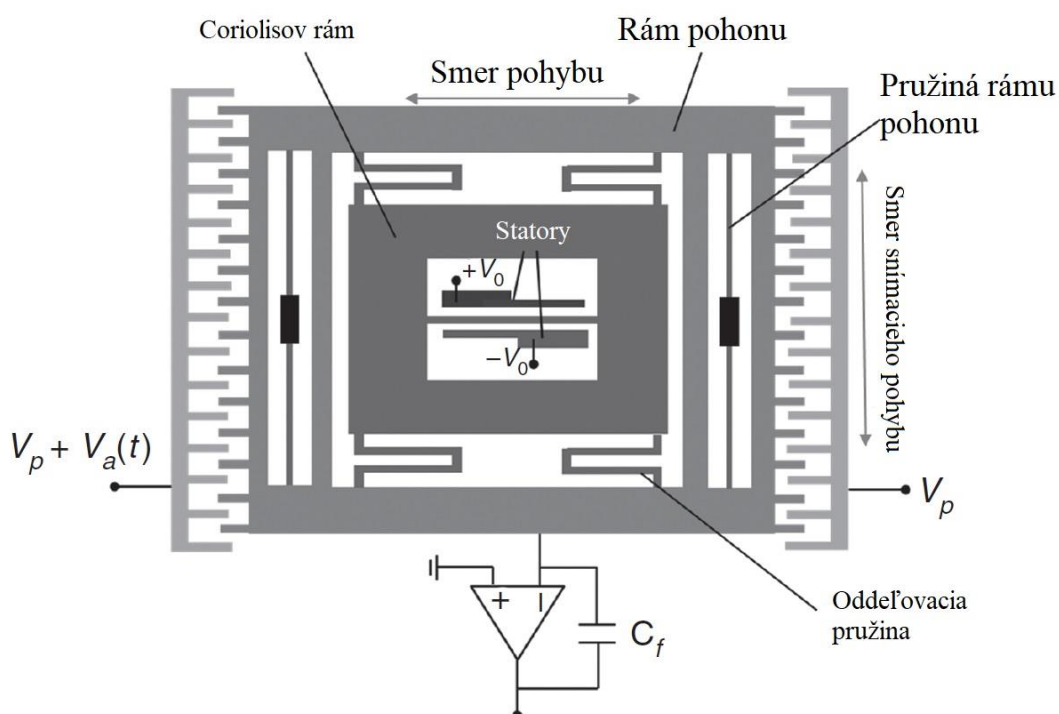
Kremíkové mikroobrábané gyroskopy sa vyrábali na báze viazaných rezonátorov. Základným princípom je, že dochádza k prenosu energie z jedného rezonátora do druhého kvôli Coriolisovej sile. Coriolisova sila je zotrvačná sila pôsobiaca na telesá, ktoré sa pohybujú v rotujúcej neinerciálnej vzťažnej sústave tak, že sa mení ich vzdialenosť od osi otáčania. Coriolisova sila má kolmý smer na spojnicu telesa - os otáčania a spôsobuje stáčanie trajektórie telesa proti smeru otáčania sústavy.

Medzi najpoužívanejšie gyroskopy z MEMS konštrukcií patrí piezoelektrický gyroskop, jeho hlavná výhoda je konštrukčná jednoduchosť. Pozostáva z piezoelektrickej

platne, ktorej šírka a dĺžka je niekoľkokrát väčšia ako hrúbka. Platňa je elektricky pripojená zo všetkých strán a je umiestnená na membráne nad dutinou, ktorá sa vytvorila v základovom kremíkovom zložení. Táto dutina pomáha k voľnosti pre deformáciu piezokryštálu.

Podobne ako ostatné MEMS gyroskopy aj piezoelektrický pracuje na báze využívania vibrujúcej hmoty. V tomto prípade je vibrujúcou hmotou práve piezoelektrická platňa. Ktorá v dôsledku privedeného napätia na riadiace elektródy kmitá v čase, spôsobom, ktorým mení svoju hrúbku. To je možné len vďaka striedavému napätiu, privedenému na navzájom kolmé platne piezokryštálu. Potom piezokryštál bude tvoriť elektromechanický člen a zároveň bude aj vibrujúcou hmotou. Pri otáčaní uhlovej rýchlosti okolo zvislej osi, dôsledkom Coriolisovej sily nastáva deformácia piezokryštálu, a tým aj následné generovanie napätia vo zvislom smere. Generované napätie je úmerné uhlovej rýchlosti. Výhodou je aj postačujúce pomerne nízke napájacie napätie, ako nevýhodou môžeme považovať pomerne nízky výstupný signál.

Príklad gyroskopu MEMS na meranie uhlovej rýchlosti pozdĺž osi z je znázornený na obrázku 1.5



Obrázok 1.5 schematický pohľad zhora so zjednodušeným znázornením napätia (Nihitjanov S., Luque A., 2014)

Jeden z prvých MEMS gyroskopov môžeme považovať Ladičkový (Tuning Fork) gyroskop na princípe ladičky. Skladá sa z dvoch tetív ktoré sú v strede spojené do uzla.

Po vybudení, táto konštrukcia rezonuje v určitej amplitúde. „Ak sa počas vibrácií pootočí ladička okolo osi otáčania určitou uhlovou rýchlosťou, začne pôsobiť Coriolisova sila.“ (Ida, 2014, str. 521). Tá spôsobí vychýlenie vibrujúcich tyčí na ktoré táto sila pôsobí. Sila je následne detegovaná spodnou časťou dvoch tetív, do ktorých sa prenesie len Coriolisova sila. Veľkosť vychýlenia je úmerná veľkosti uhlovej rýchlosti pôsobiacej na ladičku, ktorá je meraná integrovanými kapacitnými snímačmi. Na budenie sa využíva systém na elektromagnetickom, piezoelektrickom alebo elektrostatickom princípe. Disponuje dobrými parametrami výstupného signálu k pomeru signál – šum a dobrou tepelnou stabilitou.

1.3.3 Magnetometer

Magnetometer je tiež známy aj ako magnetický senzor, je to snímač na meranie magnetickej indukcie (intenzity magnetického poľa). „Všeobecne sú magnetometre zariadeniami, ktoré merajú magnetické pole, a preto je možné názov priradiť takmer každému systému, ktorý dokáže merať magnetické pole.“ (Ida, 2014, str.230) Existuje mnoho spôsobov, ako snímať magnetické polia, väčšina z nich je založená na úzkom spojení medzi magnetickými a elektrickými javmi. Magnetometre možno rozdeliť do dvoch základných typov. A to sú skalárne magnetometre merajúce celkovú silu magnetického poľa, ktorému sú vystavené, ale nie jeho smer. A vektorové magnetometre, ktoré majú schopnosť merať zložku magnetického poľa v určitom smere, vzhľadom na priestorovú orientáciu zariadenia. Techniky používané na výrobu oboch typov magnetických senzorov zahŕňajú veľa aspektov fyziky a elektroniky.

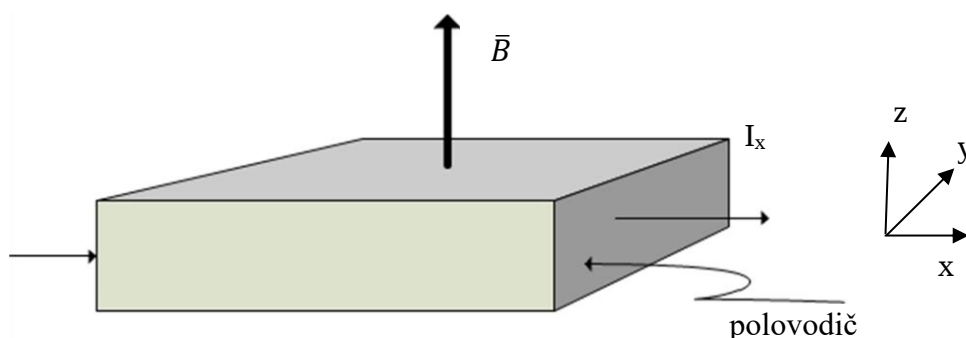
Podľa svojich fyzikálnych účinkov je možné magnetometre tiež rozdeliť na senzory vyrobené podľa Faradayovho zákona o elektromagnetickej indukcii, ktoré sa nazývajú indukčné magnetometre. Magnetometre fungujúce na princípe, kde prúd v magnetickom poli vytvára Lorentzovu silu, sa nazývajú magnetické magnetometre. Magnetorezistívny magnetometer je taký typ snímača, v ktorom sa odpor vodiča mení v magnetickom poli. Magnetometre založené na Faradayovom magneto-optickom účinku sa nazývajú magneto-optické magnetometre, ako je napríklad magnetometer optickej pumpy. Magnetické senzory založené na Josephsonovom efekte sa nazývajú supravodivé kvantové interferenčné zariadenia(SQUID).

Magnetické senzory pomáhajú ľuďstvu kontrolovať a analyzovať tisíce funkcií po mnoho desaťročí, už od roku 1833, kedy bol navrhnutý prvý magnetometer a to

nemeckým vedcom Carlom Friedrichom Gaussom. Počítače majú takmer neobmedzenú pamäť práve pomocou magnetických senzorov v magnetických úložných diskoch a páskových jednotkách. Lietadlá lietajú s vyššou bezpečnosťou vďaka vysokej spoľahlivosti bezkontaktného prepínania s magnetickými snímačmi. Automobily používajú magnetické senzory na určovanie polohy na niekoľkých miestach, ako je napríklad kľukový hriadeľ motora a brzdenie kolies. Továrne majú vyššiu produktivitu kvôli stabilite a nízkym nákladom na magnetické senzory.

Magnetogalvanický mikrosenzor fungujúci na princípe Hallovhovho efektu je široko používaný senzor. Tento senzor využíva fyzikálny jav, ktorý objavil Edwin H. Hall pred viac ako 100 rokmi. Zistil, že sa objavuje rozdiel napätia na tenkom obdĺžniku zlata umiestnenom v silnom magnetickom poli kolmom na rovinu obdĺžnika, keď prechádza po jeho dĺžke elektrický prúd. Na elektrón pohybujúci sa cez magnetické pole pôsobí sila, známa ako Lorentzova sila, ktorá je kolmá tak na smer jeho pohybu, ako aj na smer poľa. Lorentzova sila vo fyzike je sila pôsobiaca na prvok, ktorý vedie prúd vo vnútri magnetického poľa. „Jeho veľkosť sa rovná prúdu vynásobenému hustotou magnetického toku a dĺžkou vodiča.“ (Maluf N., Williams K., 2004, str. 266) Jeho smer je kolmý na magnetické pole a na elektrický prúd. Pri prázdnom náboji sa sila rovná súčinu náboja, rýchlosti a hustote magnetického toku. Je to práve reakcia na túto silu, ktorá vytvára Hallove napätie. Hallov jav je u kovových vodičov veľmi malý, ale pri polovodičoch poskytuje oveľa väčší účinok. Pretože v polovodiči sa nachádza menej vodivých elektrónov. Ak je celkový prúd, ktorý prechádza polovodičom rovnaký ako prúd prechádzajúci cez kov, musia mať elektróny v polovodiči omnoho vyššiu rýchlosť driftu ako elektróny v kovoch. „Hallove senzory sú zvyčajne vyrobené ako monolitické kremíkové čipy a sú zapuzdrené do malých epoxidových alebo keramických obalov.“ (Fraden, 2010, str. 294) Čím rýchlejšie sa elektróny pohybujú, tým silnejšia je sila, ktorú zažívajú, a tým väčšie je Hallovo napätie produkované pri rovnováhe.

„Tento efekt je možné ilustrovať tak, ako je to znázornené Obrázok 1.6, ktorý predstavuje Hallov efekt.“ (Vetelino J., Reghu A. 2011)



Obrázok 1.6 geometria Hallovho efektu (Vetelino J., Reghu A., 2011)

Lacné Hallove senzory sa zvyčajne vyrábajú z kremíka. Citlivejšie senzory môžu byť vyrobené z polovodičov III – V skupiny periodickej tabuľky prvkov, ktoré majú vyššie elektrónové mobility ako kremík. Snímače s Hallovým efektom môžu merať buď konštantné alebo premenlivé pole. V porovnaní s inými metódami vytvára menší výstupný signál a má pomerne nízku citlivosť a teplotnú stabilitu. Je to však relatívne malé zariadenie, rozptyľuje malú silu a je lacné. Citlivosť magnetometra podľa Hallovho efektu je možné zvýšiť pomocou koncentrátora magnetického toku, čo však zvyšuje nepresnosť senzora. Koncentrátor tiež predstavuje potenciálne účinky nelinearity a hysterézy a znižuje použiteľný rozsah magnetického poľa. Jedným problémom spojeným s Hallovým doskovým zariadením je to, že ofsetové napätie sa stáva významným pri nízkej hustote magnetického toku, a preto alternatívou je použitie magnetorezistívneho zariadenia, ktoré má vyššiu citlivosť. Väčšie zmeny magnetorezistencie boli pozorované v rovinných štruktúrach kovov. Tento efekt bol pomenovaný obrovská magnetorezistencia alebo GMR. Vo svojej najjednoduchšej forme sa GMR dosiahne použitím štvorvrstvovej štruktúry, ktorá pozostáva z dvoch tenkých feromagnetov oddelených vodičom. Štvrtá vrstva je anti-feromagnet, ktorý sa používa na zachytenie magnetizácie jednej z feromagnetických vrstiev. Vrstva feromagnetu, ktorá je pripnutá, je medzi vodičom a anti-feromagnetom. Pripnutý feromagnet sa nazýva tvrdý feromagnet a nespútaný feromagnet sa nazýva mäkký feromagnet. Táto štruktúra sa nazýva rotačný ventil. Elektróny sa môžu ľahšie pohybovať buď rovnobežne s vrstvami, alebo kolmo na vrstvy, ak sú magnetizácie dvoch feromagnetov navzájom rovnobežné. Dôvodom je to, že keď sú magnetizácie paralelné, elektróny trpia menším rozptylom pri prechode zo stavu elektronickej pásmovej štruktúry v jednom z feromagnetov do podobného alebo

identického stavu elektronickej pásmovej štruktúry v druhom feromagnete. „Rozdiel v odpore medzi prípadom, keď sú magnetizácie rovnobežné a keď sú antiparalelné, môže byť pri izbovej teplote až 12,8%.“ (Lenz J., 2006). Na optimalizáciu účinku musia byť vrstvy veľmi tenké, približne nanometrové. Aby bola nízka odozva snímača lineárnou funkciou poľa, je potrebné, aby mäkká feromagnetika mala svoju ľahkú os magnetizácie v nulovom poli kolmom na magnetizáciu pripnutého feromagnetu. Odpor sa meria buď v rovine feromagnetik alebo kolmo na túto rovinu. Antiiferomagnetickú pripínaciu vrstvu je možné odstrániť nastavením hrúbky neferomagnetickkej vodivej vrstvy tak, aby boli dva feromagnety spojené antiiferomagneticky. V tomto prípade je odpor maximálny. Ťažkosti s týmto prístupom sú v tom, že senzor je necitlivý a nelineárny. Základnú štruktúru troch alebo štyroch vrstiev je možné opakovať, aby sa vytvorila viacvrstvomá geometria. Táto viacvrstvomá geometria zvyšuje percentuálnu zmenu odporu, pretože zvyšuje pravdepodobnosť rozptylu spinového preklopenia zvýšením počtu rozhraní, v ktorých sa vyskytuje spinový preklopný rozptyl. Je veľmi žiaduce, aby vrstvy boli veľmi hladké, aby sa minimalizovalo spojenie medzi vrstvami. Sensory GMR sa používajú vo väčšine súčasných počítačových čítacích hláv. Pri otočných ventiloch nemusíte používať žiadnu funkciu nastavenia / resetovania, ale majú tendenciu mať viac šumu ako snímače AMR. Súčasné GMR senzory môžu byť použité v poliach od 10 nT pri 1 Hz až po 1 nT. Magnetometrické senzory GMR vykazujú vysokú úroveň citlivosti, produkujú veľké signály, sú vysoko teplotne stabilné a fyzicky malé. Hovorí sa tiež, že majú nízky rozptyl energie. Otázka porovnateľných nákladov je diskutabilná. Z historického hľadiska zahŕňajú magnetometre GMR zložité štruktúry, ktoré je ťažké vyrobiť, a preto sú výrobné náklady vyššie. „Niektoré nedávne práce na tomto princípe však tvrdia, že v porovnaní s inými metódami magnetometra je možné spracovanie s nízkymi nákladmi.“ (Lenz J., 2006).

Senzory magnetických tunelov (MTJ) alebo snímače tunelovania závislé na rotácii (SDT- spin dependent tunneling) boli prvýkrát vyrobené v roku 1995, majú štruktúru podobnú štvorvrstvoméj štruktúre opísanej vyššie v senzoroach GMR. „Štruktúra MTJ pozostáva z dvoch feromagnetov oddelených tenkým izolátorom.“ (Lenz J., 2006, str. 8). Ak je izolačná vrstva dostatočne tenká (zvyčajne niekoľko nanometrov), elektróny môžu tunelovať z jedného feromagnetu na druhý. Zariadenie obsahuje dva elektrické kontakty, dve magnetické vrstvy a jednu bariérovú vrstvu. Priebeh tunela je riadený relatívnou

orientáciou magnetických polí vo voľných a pripnutých magnetických vrstvách. Prúd sa maximalizuje, keď sú polia v obidvoch vrstvách navzájom zarovnané. Minimalizuje sa, keď majú dve polia opačnú polaritu. MTJ v podstate pôsobí ako odpor, ktorý je závislý od magnetického poľa. Metóda MTJ môže produkovať výstražný signál s vysokou citlivosťou a nízkym šumom. Zariadenia založené na MTJ však majú úzku šírku pásma ($\pm 1\,000\,\mu\text{T}$), spotrebúvajú príliš veľa energie a ich ceny sú príliš vysoké.

Anizotropná magnetorezistencia (AMR) je ďalší prístup, ktorý bol zavedený pred niekoľkými rokmi. Táto koncepcia využíva spoločný materiál, permalloy, aby pôsobil ako magnetometer. Permalloy je zliatina obsahujúca približne 80% niklu a 20% železa. Odolnosť zliatiny závisí od uhla medzi metalizáciou a smerom prúdenia. V magnetickom poli sa magnetizácia otáča smerom k magnetickému poľu a uhol rotácie závisí od veľkosti vonkajšieho poľa. „Odpor Permalloy sa znižuje, keď sa smer magnetizácie otáča smerom od smeru prúdenia prúdu, a je najmenší, keď je magnetizácia kolmá na smer prúdenia. Odpor sa mení približne ako druhá mocnina kosínusu uhla medzi metalizáciou a smerom prúdenia.“ (Lenz J., 2006, str. 9). Trvalá zliatina sa naniesie na kremíkovú dosičku a vzoruje sa ako odporový pás. Vlastnosti filmu spôsobujú, že v prítomnosti magnetického poľa sa mení odpor o 2% až 3%. V typickom usporiadaní sú štyri z týchto rezistorov spojené v Wheatstoneovom mostíkovom usporiadaní, aby sa umožnilo meranie veľkosti magnetického poľa v smere osi. Šírka pásma je zvyčajne v rozsahu 1 až 5 MHz. Vlastnosti AMR sa správajú dobre iba vtedy, keď sú magnetické domény filmu zarovnané rovnakým smerom. Táto konfigurácia zaručuje vysokú citlivosť a dobrú opakovateľnosť s minimálnou hysterézou. Počas výroby je fólia uložená v silnom magnetickom poli, ktoré nastavuje preferovanú orientáciu alebo „ľahkú“ os magnetizačného vektora M v Permalloy odporoch. Vektor M je nastavený rovnobežne s dĺžkou odporu a môže byť nastavený tak, aby vo filme ukazoval v ľubovoľnom smere, vľavo alebo vpravo. Hoci princíp AMR dodáva nižšiu úroveň výstupného signálu ako iné konkurenčné prístupy, je dostačujúci. Najnovší vývoj v technológii AMR spôsobil, že AMR bola ešte konkurencieschopnejšia s Hall efektom. AMR má tiež lepšiu citlivosť ako iné metódy a primerane dobrú teplotnú stabilitu.

1.4 Inerciálna meracia jednotka (IMU)

„Inerciálne meracie jednotky (IMU) sa týkajú integrovaných súborov snímačov pohybu s dostatočne vysokou citlivosťou lineárneho zrýchlenia a rýchlosti rotácie na navigačné účely.“ (Liu, 2012, str. 23)

IMU je špecifický typ senzora, ktorý meria uhlovú rýchlosť, silu a niekedy aj magnetické pole. IMU sa skladajú z 3-osového akcelerometra a 3-osového gyroskopu, ktorý sa považuje za 6-osovú IMU. Meracia jednotka môže tiež obsahovať ďalší 3-osový magnetometer, čo vytvorí 9-osovú IMU. Technicky sa pojem „IMU“ týka iba senzora, ale IMU sú často spojené so softvérom na kombináciu dát zo sensorov, ktorý kombinuje údaje z viacerých sensorov, aby poskytol opatrenia na orientáciu a smerovanie. Pri bežnom používaní sa termín „IMU“ môže používať na označenie kombinácie snímačov a softvéru snímača. Táto kombinácia sa označuje aj ako AHRS (Attitude Heading Reference System). Hlavným rozdielom medzi inerciálnou meracou jednotkou (IMU) a AHRS je pridanie doskového systému pre spracovanie dát do AHRS, ktorý poskytuje informácie o polohe a smerovaní. To je rozdiel od IMU, ktorá iba dodáva údaje zo senzora do ďalšieho zariadenia, ktoré počíta postoj a smerovanie.

Bežné aplikácie pre IMU zahŕňajú určovanie smeru a polohy v systéme GPS, sledovanie pohybu v spotrebnej elektronike, ako sú mobilné telefóny a ovládače videohier, alebo sledovanie pohybov hlavy v systémoch AR (rozšírená realita) a VR (virtuálna realita). Tieto informácie o pohybe a orientácii sa vzťahujú aj na udržanie rovnováhy dronov, zlepšenie smerovania vysávacích robotov a ďalších zariadení internetu vecí a pripojených domácich zariadení.

Na priemyselné použitie sa môže použiť IMU na zarovnanie a meranie polohy zariadení, ako sú antény. IMU sa tiež používajú na pomoc s manévrovacím lietadlom s pilotom a posádkou alebo bez pilota. Budúce aplikácie pravdepodobne uvidia užšiu integráciu a fúziu IMU s technológiami ako GPS (Global Positioning System), RF (Radio Frequency) a LiDAR (Light Detection And Ranging), čo umožní presnú lokalizáciu ľudí, vozidiel a zariadení a to v interiéri aj exteriéri.

IMU poskytuje 2 až 6 DOF (Degrees of freedom), čo predstavuje počet rôznych spôsobov, ktorými sa objekt dokáže pohybovať v 3D priestore. Maximálny možný stupeň je 6 DOF, ktorý by zahŕňal 3 stupne pohybu, kde telo môže voľne meniť polohu ako posun vpred / vzad, hore / dole, vľavo / vpravo a to v troch kolmých osiach, v kombinácii

so zmenami v orientácii otáčania okolo týchto troch kolmých osí, ktoré sa často označujú aj ako vybočenie (normálna os), stúpanie (pričná os) a valenie (pozdlžna os), ktoré zastupujú zvyšné tri stupne pohybu.

Údaje zhromaždené v IMU poskytujú dáta o tom, čo sa deje v okolí, tieto dáta môžu byť ďalej prístupné k ďalšiemu výskumu. Fúzia senzorov je (matematické) umenie kombinovania údajov z každého senzora v IMU, aby sa vytvoril celkový obraz o orientácii a smerovaní zariadenia. Napríklad, pri pohľade na informácie gyroskopu pre rotačný pohyb, môže sa zahrnúť gravitačný zmysel gravitácie a vytvoriť referenčný rámec. Môže sa tiež pridať informácia o zemskom magnetickom poli, aby sa mohol celý senzor zarovnať so zemským rámom.

1.5 Technológie IoT

„Internet of Things (IoT) je tretia vlna internetu a má mať potenciál spojiť do roku 2020 asi 28 miliárd položiek, od náramkov po automobily.“ (B.K.Tripathy; J.Anuradha, 2017, str. 9)

Internet vecí môžeme chápať ako miliardy fyzických zariadení na celom svete, ktoré sú teraz pripojené k internetu, všetky zhromažďujú a zdieľajú údaje. Vďaka príchodu super lacných počítačových čipov a všadeprítomnosti bezdrôtových sietí je možné pripojiť čokoľvek, od niečoho malého ako pilulka na niečo také veľké ako lietadlo, na súčasť internetu vecí. Spojením všetkých týchto rôznych objektov a pridaním senzorov, sa určuje úroveň digitálnej inteligencie zariadení na novú úroveň, čo im umožňuje komunikovať s údajmi v reálnom čase bez potreby zásahu človeka. Internet vecí robí textúru sveta okolo nás inteligentnejšou a pohotovejšou, pretože spája digitálny a fyzický svet. IoT môže napríklad využívať osoba s implantátom srdcového monitora, hospodárske zvieratá s biočipmi na ich sledovanie, automobil, ktorý má vstavané senzory, ktoré upozorňujú vodiča na nízky tlak v pneumatikách, alebo akýkoľvek iný prírodný alebo umelý objekt, ktorému môže byť pridelená adresa internetového protokolu (IP) a ktorý je schopný prenášať údaje cez sieť. Organizácie v rôznych odvetviach čoraz viac využívajú internet vecí na efektívnejšie fungovanie, lepšie porozumenie zákazníkom, aby poskytovali vylepšené služby, zlepšovali rozhodovanie a zvyšovali hodnotu podnikania.

Myšlienka pridania senzorov a inteligencie pre zariadenia k bežnému použitiu sa diskutovala v priebehu 80. a 90. rokov, ale okrem niektorých počiatočných projektov ako napríklad automat pripojený na internet, bol pokrok pomalý jednoducho preto, že

technológia nebola pripravená. Čipy boli príliš veľké, objemné a neexistoval spôsob, akoby objekty mohli medzi sebou efektívne komunikovať.

Boli potrebné procesory, ktoré boli lacné a dostatočne energeticky nenáročné, aj keď len na jedno použitie, dokým sa konečne stalo nákladovo efektívne pripojenie miliárd zariadení pomocou novej techniky. Prijatie značiek „RFID“ teda čipov s nízkou spotrebou energie, ktoré môžu komunikovať bezdrôtovo, vyriešilo niektoré z týchto problémov spolu so zvýšenou dostupnosťou širokopásmového internetu a celulárnych a bezdrôtových sietí. Prijatie protokolu IPv6, čo je vlastne vylepšenie protokolu IPv4 kvôli nedostatku adresného priestoru. Práve preto by mal IPv6 okrem iného poskytovať aj dostatok adries IP pre každé zariadenie na svete, ktoré bude niekedy potrebovať.

„Kevin Ashton“ vytvoril frázu „Internet vecí“ v roku 1999, hoci technológii trvalo najmenej desať rokov, kým dobehla víziu. „Internet vecí spája vzájomnú prepojenosť ľudskej kultúry naše „veci“ s prepojením nášho digitálneho informačného systému „internet“. To je internet vecí.“ (IoT, 2015)

Jedným z prvých aplikácií IoT bolo pridávanie značiek RFID do drahých zariadení, ktoré pomohli sledovať ich umiestnenie. Odvtedy však náklady na pridávanie senzorov a internetové pripojenie k objektom naďalej klesajú a očakáva sa, že cena dosiahne hladinu kedy bude možné prepojiť takmer všetko k internetu.

1.6 Priemyselné záznamové zariadenia pre zber údajov v mechatronike

„Zber údajov je proces vzorkovania signálov, ktoré merajú fyzikálne podmienky v reálnom svete a prevádzajú výsledné vzorky na digitálne číselné hodnoty, s ktorými môže počítač manipulovať.“ (National instruments) Systémy na získavanie údajov, skrátené skratky DAS alebo DAQ, zvyčajne prevádzajú analógové krivky na digitálne hodnoty na spracovanie. Medzi komponenty systémov na získavanie údajov patria:

- Obvody na úpravu signálu na konverziu signálov snímačov do formy, ktorú je možné previesť na digitálne hodnoty.
- Sensory, ktoré prevádzajú fyzikálne parametre na elektrické signály.
- Analógovo-digitálne prevodníky, ktoré prevádzajú upravené signály snímačov na digitálne hodnoty.

(Tod, 2014)

Aplikácie na získavanie údajov sú zvyčajne riadené softvérovými programami vyvinutými s použitím rôznych univerzálnych programovacích jazykov, ako sú napríklad Assembly, BASIC, C, C++, C#, Fortran, Java, LabVIEW, Lisp, Pascal a podobne. Samostatné systémy na získavanie údajov sa často nazývajú dataloggery.

K dispozícii sú tiež softvérové balíky s takzvaným (Open Source) „otvoreným prístupom“, ktoré poskytujú všetky potrebné nástroje na získavanie údajov z rôznych hardvérových zariadení. Tieto nástroje pochádzajú z vedeckej komunity, kde zložitý experiment vyžaduje rýchly, flexibilný a prispôsobivý softvér. Tieto balíčky sú zvyčajne prispôbené na mieru, ale všeobecnejšie balíčky DAQ, ako je napríklad maximálny integrovaný systém získavania údajov sa dá ľahko prispôbiť a používa sa v niekoľkých fyzikálnych experimentoch po celom svete.

Zber údajov sa začína fyzikálnym javom alebo fyzikálnymi vlastnosťami, ktoré sa majú merať. Medzi príklady patrí teplota, intenzita svetla, tlak plynu, prietok tekutiny a sila. Bez ohľadu na typ fyzikálnej vlastnosti, ktorá sa má merať, fyzikálny stav, ktorý sa má merať, sa musí najskôr transformovať do zjednotenej formy, ktorú je možné vzorkovať systémom na zber údajov. Tieto transformácie vykonávajú zariadenia, ktoré nazývame senzory. Systém získavania údajov je zbierka softvéru a hardvéru, ktoré umožňujú merať alebo riadiť fyzické vlastnosti rôznych javov v skutočnom svete. Kompletný systém na zber údajov pozostáva z hardvéru DAQ, snímačov a akčných členov, hardvéru úpravy signálu a počítača so softvérom DAQ.

Senzor, ktorý je typom meniča, je zariadenie, ktoré prevádza fyzikálnu vlastnosť na zodpovedajúci elektrický signál (napr. tenzometer, termistor). Nadobúdací systém na meranie rôznych vlastností závisí od senzorov, ktoré sú vhodné na detekciu týchto vlastností. Úprava signálu môže byť nevyhnutná, ak signál z prevodníka nie je vhodný pre používaný hardvér DAQ. Vo väčšine prípadov môže byť potrebné signál filtrovať alebo zosilňovať. Rôznymi ďalšími príkladmi prípravy signálu môže byť dokončenie mostíka, poskytnutie senzora prúdu alebo napätia, izolácia, linearizácia. Na účely prenosu je možné jednosmerné analógové signály, ktoré sú viac citlivé na šum, konvertovať na diferenciálne signály. Po digitalizácii môže byť signál kódovaný na zníženie a opravu chýb prenosu.

„Hardvér DAQ je to, čo zvyčajne tvorí rozhranie medzi signálom a počítačom.“ (byte paradigm). Môže to byť vo forme modulov, ktoré môžu byť pripojené k počítačovým

portom (paralelné, sériové, USB, ...) Alebo kariet pripojených k zásuvkám (zbernica S-100, AppleBus, ISA, MCA, PCI, PCI-E, ...) na základnej doske. Zvyčajne je priestor na zadnej strane karty PCI príliš malý na všetky potrebné pripojenia, takže je potrebný externý oddeľovací box. Kábel medzi touto skrinkou a počítačom môže byť drahý kvôli mnohým vodičom a požadovanému tieneniu.

Karty DAQ často obsahujú viac komponentov (multiplexor, ADC, DAC, TTL-IO, vysokorýchlostné časovače, RAM). Tieto sú prístupné prostredníctvom zbernice pomocou mikrokontroléra, ktorý môže spúšťať malé programy. Ovládač je flexibilnejší ako pri použití logických zapojení, ale lacnejší ako procesor, takže je možné ho blokovat jednoduchými slučkami. Napríklad: Čakanie na spúšťač, spustenie ADC, vyhľadanie času, čakanie na dokončenie ADC, presunutie hodnoty do RAM, prepnutie multiplexora, získanie TTL vstupu, nechajte DAC pokračovať s rampou napätia.

S hardvérom DAQ sa môže dodávať špecializovaný softvér DAQ. Softvérové nástroje používané na vytváranie rozsiahlych systémov na získavanie údajov zahŕňajú EPICS. Medzi ďalšie programovacie prostredia, ktoré sa používajú na vytváranie aplikácií DAQ, patrí logika rebríkov, Visual C ++, Visual Basic, LabVIEW a MATLAB.

1.7 Slovník pojmov:

Snímač: „Funkčná jednotka (systém) realizujúca snímanie; fyzikálnu veličinu, charakterizujúcu meraný objekt a bezprostredne pôsobiacu na jeho citlivú časť, mení signál, vhodný na ďalšie spracovanie.“ (Guldan, 1988)

Transduktory: „Zariadenie alebo mechanizmus, ktorý prevádza silu jednej formy na silu inej formy.“ (Ida, 2014)

Aktuátory: „Sú zariadenia, ktoré riadia vstupnú premennú v reakcii na signál z ovládača.“ (Dunn, 2006)

Tenzometer: „Je pasívna elektrotechnická súčiastka, ktorá sa používa ako senzor na nepriame meranie mechanického napätia na povrchu pomocou vlastného merania deformácie.“ (ACADEMICA, 1987)

MEMS: „sa vzťahujú na zariadenia, ktoré majú charakteristickú dĺžku menej ako 1 mm, ale viac ako 1 mikrón, ktoré kombinujú elektrické a mechanické komponenty a ktoré sa vyrábajú pomocou technológií na dávkové spracovanie integrovaných obvodov.“ (Gad-el-Hak, 2006)

2 Analýza využitia záznamových zariadení pre zber údajov v mechatronike

Pri pojme záznamové zariadenia ľudom najčastejšie napadne spojenie s kamerami, kde sa nasnímaný obraz nahrá na predom určené dátové úložisko, kde je schopné podľa danej kapacity pamäte zotrvať. Ale v skutočnosti majú záznamové zariadenia oveľa širšie spektrum využitia ako si mnohí z nás uvedomujú. Záznamové zariadenia nezahŕňajú len úložisko pre dáta, ale aj systémy a softvér na zber údajov, ktoré ďalej zahŕňajú prevodníky a meracie systémy, A/D (analóg/digitál) a D/A (digitál/analóg) prevodníky, zosilňovače, úpravu signálov a softvérové inžinierstvo. Systém získavania údajov zachytáva a analyzuje niektoré formy fyzikálnych vlastností z reálneho sveta. Zber údajov (DAQ) je proces merania elektrického alebo fyzikálneho javu ako je napätie, prúd, teplota, tlak alebo zvuk pomocou počítača. Tieto signály poskytujú stimul, takže systém získavania údajov môže merať odozvu. Práve z tohto dôvodu môžeme vidieť nespočetné množstvo možností využiteľnosti pre záznamové zariadenia a ich zber údajov.

2.1 Analýza nasadenia MEMS snímačov v mechatronike

V dnešnej dobe sa MEMS snímače nachádzajú takmer v každom zariadení, na ktoré človek pomyslí. Dôvodom je hlavne miniaturizácia, ktorá poskytuje nové možnosti využitia a aplikácie zariadení, ktorých veľkosť zásadným spôsobom napomáha k ich používaniu. Najčastejšie môžeme MEMS snímače pozorovať v automobilovom priemysle.

Najbežnejšie používanými systémami v automobiloch sú airbagy a kontrola stability vozidla. Technológie založené na MEMS sa všeobecne delia na štyri divízie: akcelerometre, gyroskopy, inklinometre a snímače prietoku a tlaku. Najrozvinutejšie aplikácie sú napríklad zberače energie založené na MEMS, oscilátory, infračervené senzory a podobne.

Dôležitou súčasťou MEMS systémov v automobile je aj zaobstaranie bezpečnosti ľudí. Prevenciu kolízie automobilov zabezpečuje otváranie airbagov v reakcii na rýchlu zmenu zrýchlenia vozidla, čo má široké využitie vo všetkých druhoch vozidiel. Airbagy používané vo vozidlách väčšinou obsahujú vyrobené čipy akcelerometra na báze MEMS. Akcelerometer nepretržite monitoruje zrýchlenie vozidla. Tento mikrofabrikovaný prvok

sa spúšťa, keď je vo vozidle náhle spomalenie, ktoré spôsobuje zmenu kapacity, ktorú čip rýchlo zistí, a vyšle potrebné signály do airbagu.

Gyroskopy založené na MEMS sa najčastejšie používajú vo vozidlách na meranie uhlovej rýchlosti. „Gyroskop meria a udržiava orientáciu na princípoch zachovania hybnosti. Používa sa väčšinou v nákladných vozidlách na detekciu prevrátenia.“ (Piltan A., Piltan M., Ghodsi R., 2011).

Rôzne informatívne senzory ako je aj senzor tlaku vzduchu v pneumatikách v zásade informuje vodiča o únikoch a tiež o znížení tlaku vzduchu, ku ktorému automaticky dochádza v priebehu času. Doteraz si batérie pre senzory vyžadovali výmenu celého balíka, ktorý bol pomerne drahý, ale senzory založené na MEMS v súčasnosti zaujali výrobcov vozidiel. S pokrokom v technológii sa moduly senzora tlaku v pneumatikách stávajú kompaktnejšie a takmer bez potreby použitia batérie. Systém zberu energie založený na MEMS je v súčasnosti začlenený do pneumatík na výrobu modulov s minimálnou veľkosťou.

Elektronická kontrola stability sa v súčasnosti považuje za jeden z najdôležitejších elektronických čipov pre bezpečnosť vozidiel. V skutočnosti pomáha vodičom udržiavať stabilitu a kontrolu nad vozidlami pri náhlom trnutí alebo pohybe. Neustály rast v elektronickom systéme riadenia stability si vyžaduje použitie gyroskopov a akcelerometrov (Piltan A., Piltan M., Ghodsi R., 2011). Toto zariadenie založené na MEMS zvýšilo účinnosť a znížilo veľkosť. Tieto kompaktné zariadenia sú všeobecne vysoko ekonomické.

MEMS hrajú úlohu aj pri ochrane vozidla pred krádežou. Výrobcovia automobilov a priemyselné odvetvia sa v súčasnosti veľmi zaujímajú o zlodejov drahých vozidiel. Predchádzajúce senzory nedokázali detegovať malý sklon vo vozidle, keď boli ťahané za lano alebo reťaz. V súčasnosti sú vo vozidle nainštalované trojsmerové akcelerometre založené na MEMS, ktoré merajú uhol sklonu vzhľadom na zem.

S výnimkou vyššie uvedených aplikácií sa senzory založené na MEMS používajú pre mnoho ďalších aplikácií, ako sú vyrovnávanie svetlometov, tlmenie motora, palivové vedenie, odparovanie paliva, rýchlosť kolesa.

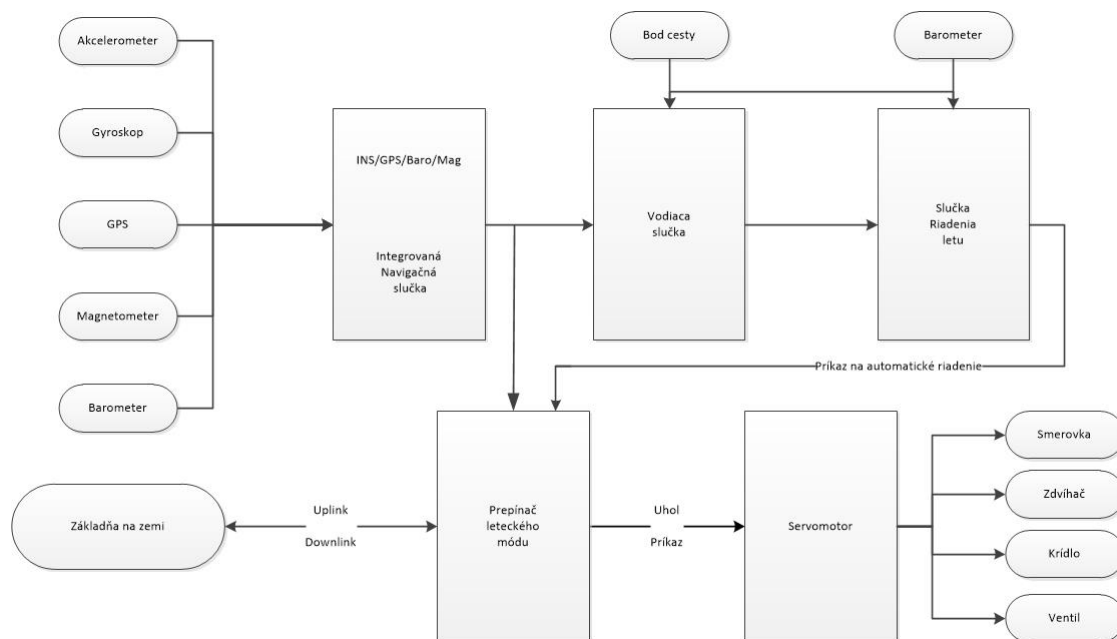
Toto využitie je len jedno z mnohých využití MEMS snímačov v mechatronike, tie novodobejšie a revolučnejšie sa používajú napríklad pre zlepšenie a detekciu zlého spánku, či v rôznych zdravotníckych zariadeniach.

2.2 Prípadové štúdie využitia MEMS snímačov

Ako príklad jednej zaujímavej štúdie sa môže uviesť použitie mikroelektromechanických systémov (MEMS), inerciálnych senzorov pre navádzanie, navigáciu a riadenie (GNC) autonómneho bezpilotného lietadla (UAV). Pričom článok predstavuje praktický prístup aplikácie inerciálneho navigačného systému (INS) pomocou inerciálnych senzorov MEMS, prijímača globálneho pozičného systému (GPS), magnetometra a barometra pre GNC. A jeho hlavným cieľom bol návrh 250g Micro-GNC pre autonómne UAV, kde integrovaná navigačná slučka INS / GPS / Mag / Baro poskytuje nepretržité a spoľahlivé navigačné riešenia pre navádzanie a riadenie letu. Vodiaca slučka počíta príkazy na vedenie zo súčasných stavov UAV, aby splnila požiadavky misie. Slučka riadenia letu generuje riadiace signály ovládača na prenos UAV na požadované miesto. Celý algoritmus GNC bol implementovaný do zabudovaného počítača riadenia letu. „Výsledky týchto letových testov v reálnom čase ukazujú, že UAV môže vykonávať autonómny let spoľahlivo.“ (Huang Z. J., Fang J. C., 2005)

Autor vysvetľuje, ako bol v posledných rokoch bezpilotný vzdušný prostriedok (UAV) navrhnutý pre aplikácie, ako je monitorovanie požiaru, poľnohospodárstvo, ťažba, pátracie a záchranné práce. A aby boli tieto systémy úspešné, musia byť dostupné. Preto je dôležitý výskum smerovania, navigácie a riadenia (GNC) UAV pomocou mikroelektromechanických systémov (MEMS). Pri použití inerciálnych senzorov MEMS sa však stabilita inerciálneho navigačného systému (INS) zníži posunom inerciálnych senzorov MEMS. Z tohto dôvodu sa kvalita a integrita pomocných senzorov stáva pre integrovaný systém zásadnejšou. Globálny pozičný systém (GPS) môže poskytnúť dlhodobú stabilitu s vysokou presnosťou a celosvetovým pokrytím. Pretože výkon lacného mikro GPS prijímača môže byť ľahko degradovaný vo vysoko manévrovacích prostrediach, je potrebné spojiť navigačné dáta s inými senzormi, ako je napríklad magnetometer alebo barometer.

V článku sa predstavuje mikro GNC systém založený na senzoch MEMS, ktorý je úspešne aplikovaný na UAV, ako je znázornené na obr. 2.1. Fyzický systém UAV pozostáva z letovej platformy, palubných systémov, komunikačných spojení a základňou na zemi. Stavby UAV sú downlinkované na základňu na zemi na monitorovanie stavu UAV. Existujú dva režimy riadenia letu. V režime vzdialenej prevádzky pilot na zemi vysiela riadiace signály do pohonu prostredníctvom bezdrôtového uplinkového kanála. V autonómnom režime je navigačný výstup vedený do vodiacej a regulačnej slučky a palubný spínač letového režimu presmeruje vypočítané riadiace výstupy do ovládačov. Celý algoritmus GNC bol implementovaný do zabudovaného počítača riadenia letu „ARM9“. UAV je platforma s pevným krídlom s konfiguráciou tlačného stojana. Je vybavený ďalším snímačom videnia „CMOS“. „Letové testy v reálnom čase ukazujú, že navigačný systém môže poskytnúť presné a spoľahlivé riešenia 3D navigácie a spoľahlivo vykonávať navádzáciu a riadiacu úlohu.“ (Huang Z. J., Fang J. C., 2005)



Obrázok 2.1 štruktúra mikro GNC založeného na senzoch MEMS (Huang Z. J., Fang J. C., 2005)

MEMS inerciálne senzory sú v systéme GNC nanajvýš dôležité. Štruktúra inerciálnych snímačov MEMS, spracovaná pomocou techník Silicon-OnInsulator (SOI), má výhody nízkeho napätia a vysokého pomeru strán. Akcelerometer má opakovateľnosť v rámci 1 mg. Jednotka inerciálneho merania MEMS (IMU) je inerciálna meracia jednotka so šiestimi stupňami voľnosti, ktorá sa skladá z troch ortogonálnych

akcelerometrov MEMS a gyroskopov. Akcelerometre a gyroskopy sú namontované v súradniciach tela a mechanicky sa nepohybujú. Tieto senzory, spojené s vhodným matematickým pozadím, sú schopné detegovať zrýchlenia a uhlové rýchlosti a potom ich transformovať do aktuálnej polohy a orientácie systému. Softvérové riešenie sa používa na sledovanie orientácie vozidla a otáčanie meraní od rámu karosérie po navigačný rámec. Keďže IMU je úplne kompenzovaná, je veľmi vhodná pre nízku presnosť a vysoké dynamické prostredie, kde sa vyžaduje malá veľkosť, nízka hmotnosť a nízka spotreba energie. „IMU môže poskytovať inerciálne dáta až do 400 Hz.“ (Huang Z. J., Fang J. C., 2005)

Navigačná slučka má v systéme GNC kľúčovú úlohu. Jeho navigačné výstupy sa používajú pri navádzaní a riadení a ovplyvňujú výkon UAV. Jadrom navigačnej slučky je viazanie INS pomocou inerciálnych senzorov MEMS a Kalmanovho filtra. „The strap-down“ INS poskytuje spoľahlivú polohu, rýchlosť a postoj s dostatočne vysokými rýchlosťami. Kalmanov filter odhaduje chyby navigácie zmiešaním údajov GPS pozorovania, barometrického výškomeru alebo magnetometra bežiacich ako úloha na pozadí. Vodiaca slučka tvorí vonkajšiu regulačnú slučku v autonómnom režime. Vypočíta požiadavky na usmernenie zo súčasných stavov UAV a ďalšie informácie o trasovom bode, aby prinútilo vozidlo sledovať požadovaný cieľový bod. Slučka riadenia letu tvorí vnútornú slučku riadenia a generuje skutočné riadiace signály, ktoré sledujú ciele navádzania, ako aj stabilizujú polohu UAV a rýchlosť. Monitorovací priemysel využíva údaje o vibráciách už mnoho rokov na predpovedanie poruchy stroja skôr, ako k nemu dôjde. Z dôvodu nákladov sa monitorovanie strojov v minulosti používalo iba pre veľmi drahé stroje a dôležité podniky, ktoré si nemôžu dovoliť neplánované prestoje. Technológia MEMS teraz znížila náklady na senzor na zanedbateľnú úroveň a jediná vec, ktorá stojí v ceste ďalšiemu osvojeniu, je odbornosť pre správne používanie, kalibráciu snímačov a dostupnosť softvéru. Práve spoločnosť Freescale urobila v tomto smere výrazný tlak v oblasti fúzie senzorov a je hlavným dodávateľom senzorov na trhu, ktorý ponúka „open source“ softvér. Len vďaka senzorom je možné nie len modelovať pohyb, ale aj skúmať vzťahy nespracovaných výsledkov senzorov ku každodenným činnostiam a udalostiam. Práve týmto východiskom sa často stávajú nespracované vibračné dáta z akcelerometra, ktoré slúžia na monitorovanie vibrácií strojov.

Jedným takýmto príkladom uvedieme rotačný motor, ktorý je mechanicky spojený s odstredivým čerpadlom. Motor, spojka a čerpadlo sú vystavené rôznym fyzikálnym problémom, ako napríklad: nevyrovnanie hriadeľa, ložiskové poruchy, nevyváženosť zaťaženia, nepresnosť, poruchy prevodovky, poruchy hnacieho remeňa, rezonancie. Je zaujímavé, že všetky z týchto uvedených problémov sa prejavujú ako zmeny vo vibračnom predpise systému.

Tieto zmeny skúmal aj projekt SenSIP v Arizonskej Štátnej Univerzite v Tempe, Arizone. Kde v spolupráci s Freescale FXOS8700CQ2, čo je malé (3 mm x 3 mm) spotrebiteľské šesťosové zariadenie obsahujúce akcelerometer aj magnetometer, sa zaťažil motor pri hrubom zaťažení trenia a bol spustený až do stavu poruchy. Cestou sa zaznamenávali údaje o vibráciách, aby sa určilo, či by boli viditeľné rozdiely v priebehu času. „Z výsledkov vyplýva, že sa často môže predpovedať zlyhanie stroja skôr, ako k nemu naozaj dôjde, jednoducho pohľadom na vibračný podpis stroja.“ (Stanley, 2015).

Ďalším krokom v získavaní údajov o senzoroch je zachytenie nespracovaných údajov o senzoroch a metadát do súboru. Čo umožní experimentovať s algoritmami spracovania signálu a strojového učenia. Freescale na tento účel poskytol inteligentný snímací rámec (intelligent sensor frame) ISF. Táto vstavaná senzorová aplikácia sa zaoberá konfiguráciou zariadenia akcelerometra a vzorkovaním nespracovaných údajov akcelerometra v pravidelných intervaloch pomocou ovládačov I2C ISF, manažéra zbernice (časovač) a adaptérov senzorov. Poskytuje tiež dobre definovaný sériový komunikačný protokol pre hostiteľské zariadenie, v tomto prípade PC, na príjem nespracovaných údajov zo senzora pomocou komponentu interpretácie príkazov ISF . OpenSDA poskytuje adaptér zo sériového na USB na premostenie komunikácie s PC.

Teraz, keď je všetko nakonfigurované na zabudovanej strane, na počítači je potrebné niečo, s čím by užívateľ mohol komunikovať pomocou sériového portu a zapisovať údaje do súboru. Aplikácia sériového terminálu, ako je RealTerm, je vždy užitočná pre počiatočný test, aby sa určilo, že sa port dá otvoriť / zatvoriť, poslať príkaz a prijať odpoveď. Väčšina sériových terminálov sa tiež môže prihlásiť do súboru, ale to nestačilo pre túto aplikáciu údajov o ťažbe senzorov. Preto boli potrebné metadáta. „Metadáta sú údaje o údajoch.“ (Stanley, 2015). Meta je predpona, ktorá vo väčšine použití informačných technológií znamená „základnú definíciu alebo popis.“ Metadáta sumarizujú základné informácie o údajoch, ktoré môžu uľahčiť vyhľadávanie a prácu s

konkrétnymi prípadmi údajov. Získalo sa príliš veľa parametrov na to, aby sa dali jednoducho zapuzdriť do zložitého názvu súboru, takže ich namiesto toho treba zachytiť v súbore XML a spojiť ich so súbormi nespracovaných údajov zo senzorov vo formáte .zip. Na automatizáciu tohto procesu Freescale vyvinuli vlastnú počítačovú aplikáciu pomocou Microsoft Visual Studio a .NET Framework.

Teraz, keď sa zaznamenávajú údaje, stačí vyplniť potrebné polia a kliknúť na „Záznam“. Používateľské rozhranie používa kombinované boxy (dialógové okná obsahujúce kombinácie nastavení), aby sa zabránilo znečisteniu metadát neplatnými hodnotami. Výsledkom je potom súbor .zip obsahujúci nespracované údaje senzora vo formáte CSV a metadáta vo formáte XML.

Dôležitou súčasťou merania je uvedomiť si určité veci a vyhnúť sa tak nezmyselným chybám:

- Nezovšeobecňovať údaje z malých súprav vzoriek.
- Získať veľa údajov.
- Zvážiť všetky premenné, ktoré môžu ovplyvniť náš systém.
- Potreba zaznamenať metadáta pre každý pokus správne.
- Pozrieť sa na údaje z mnohých perspektív. Matlab nám môže dobre dopomôcť, pokiaľ ide o tento druh vizualizácie.
- Uistiť sa, že rozumieme tomu, čo nám hovoria vaše údaje.
- Zvážiť, normalizovanie údajov.
- Uistiť sa, že môžeme zhromažďovať údaje pre všetky očakávané stavy systému.
- Výskum doterajšieho stavu techniky.

2.3 Kalibrácia snímačov na báze MEMS prvkov

Pred tým ako sa snímače MEMS správne nakalibrujú, musí sa zabezpečiť ich presnosť a kvalita výroby. To sa zaručí správnym testovaním daných inerciálnych MEMS snímačov. Testovanie zahŕňa

1. testy charakterizácie zariadenia

2. kvalifikačné testy výrobkov

3. výrobné skúšky

4. skúšky výrobkov

5. terénne testy, najmä auto-testy. (Kempe, 2011)

Charakterizačné testy sú zamerané na skúmanie výkonnostných limitov vyvíjaného zariadenia. „Znalosť ich závislosti od výrobných tolerancií, podmienok prostredia a životnosti je potrebná na stanovenie kritérií úspešnosti pri výrobe a kvalifikácii.“ (Kempe, 2011, str. 460) Zahŕňajú napríklad stanovenie odolnosti proti nárazom, charakterizáciu výkonu pri teplotných cykloch, najmä vplyv rôznych typov vibrácií, testy Q-systematickej odchýlky pre gyroskopy pre rôzne nastavenia výrobných parametrov a podobne.

Kvalifikačné testy sú základom kvalifikačných postupov pre rôzne fázy výrobného procesu, komponenty produktu a pre konečný výrobok. Testy kvalifikácie výrobku sú špecifické pre každý jeden daný produkt a vykonávajú sa v súlade so štandardnými požiadavkami pre danú oblasť použitia výrobku. Na základe reprezentatívnych skúšobných postupov by mali zaručiť, že daný výrobok alebo jeho komponent bude testovaný v súlade s daným poradím skúšok a bude fungovať v teréne za určených podmienok prostredia počas stanovenej životnosti s mierou zlyhania. Pre automobilové aplikácie sa zahŕňa okolo 50 štandardizovaných testov, ako sú skreslenie teplotnej vlhkosti alebo test HAST (vysoko zrýchlený záťažový test) so špecifikovaným zaťažením vlhkosťou pri daných teplotách, skúšky teplotným cyklom, napríklad pri 1000 cykloch od -50 do 150 °C a podobne.

Výrobné testy sú zamerané na monitorovanie celého výrobného reťazca. Zahŕňajú hustú sadu parametrických skúšok pre všetky výrobné kroky, ktoré by v ideálnom prípade mali byť nezávislé od povahy vyrobeného výrobku, ale zaručujú opakovateľnosť všetkých výrobných postupov v rámci vopred stanovených tolerancií. Rôzne testovacie zariadenia, ako napríklad štruktúry kontaktného odporu (Kelvinove mosty), rezonátory

lúčov a polia lúčov na monitorovanie napätia, sa testujú počas výrobného toku s cieľom čo najskôr zistiť parametrické odchýlky.

Skúšanie a kalibrácia výrobkov je srdcom konečného výrobného testu. Mal by byť do veľkej miery nezávislý od parametrických výrobných testov. Pomocou kvalifikovanej výrobnéj linky sa testovanie a kalibrácia produktu môžu vykonávať mimo výrobných zariadení. To dáva možnosť predávať a vyrábať výrobky obsahujúce už testované zariadenia bez ďalšej kalibrácie. Presná koordinácia rôznych skúšobných hodnôt a čiastkových testov v rámci výrobných liniek, vrátane zariadenia na balenie, je zložitá úloha a vyžaduje si veľa skúseností s výrobou zariadení MEMS. Testovanie a kalibrácia konečného produktu sa zvyčajne nastavuje v tesnej blízkosti vývojového tímu. Okrem vizuálnej kontroly, elektrických testov jednotky na spracovanie signálu a štandardných testov kontinuity a geometrickej zhody sa zameriavajú na kalibráciu zariadenia a meranie výkonnostných parametrov pri rôznych teplotách a napájacích napätiach. Súčasťou testovania výkonnosti sú aj kontroly funkčnosti samokontrolných postupov. Kalibrácia a testovanie výkonu sú kľúčové postupy v rámci celého testovacieho systému. Mnohokrát sú potrebné napríklad na vykonávanie rôznych kvalifikačných skúšok, pri ktorých sa parametre výkonnosti, ako je citlivosť a zaujatosť, musia porovnávať pred a po rôznych zaťažovacích cykloch.

Inerciálne MEMS vyžadujú špeciálne skúšobné zariadenie na kalibráciu a testovanie výkonu. Subjekt, ktorý sa má zmerať sa musí aplikovať na DUT (skúšané zariadenie) a nie je k dispozícii v širokom spektre mikroelektronických skúšobných zariadení. Špeciálne pre potreby inerciálneho MEMS testovania boli vyvinuté rôzne trepačky a hodnotiace tabuľky. V prípade akcelerometrov s nízkym g zaťažením je niekedy postačujúce vykonať statickú kalibráciu pomocou zemskej gravitácie a jednoducho otočiť zariadenie do dvoch polôh s $\pm g$ zaťažením. Dynamická charakterizácia avšak vyžaduje vibračné platformy, ako sú trepačky, ktoré sú zvyčajne založené na princípe reproduktorovej membrány. Otočné stoly s presnou reguláciou rýchlosti. Zvyčajne nesú starostlivo namontovanú viac testovaciu DPS s veľkým počtom zásuviek / DUT. Otočné stoly sa najlepšie hodia na účely charakterizácie a kvalifikácie. Avšak kvôli dlhým dobám nasiaknutia pri nastavovaní nízkych alebo vysokých testovacích teplôt je priepustnosť pri trojbodovom testovaní teploty nízka. Preklápacie stoly boli vyvinuté špeciálne na prekonanie tejto nevýhody. Hlavy obsahujúce vlastné DUT sa otáčajú okolo svojej

axiálnej (v smere osi) orientácie. Hlavy sa dajú otočiť o 90 °. V tejto polohe môžu tiež testovať gyroskopy s osami citlivými na rovinu. Otočný stôl je obvykle spojený so štandardným mikroelektronickým manipulátorom, ktorý umožňuje plne automatizované nakladanie. Pri vysokých alebo nízkych teplotách miestna mini-klimatická komora zaručuje požadovanú teplotu, zatiaľ čo v záujme malých časov nastavenia sa počas procesu nakladania vykonáva predhrievanie alebo predchladenie.

Elektrické autotesty sa často používajú pri testovaní integrovaných obvodov. Takéto testy by mali čo najviac aktivovať brány logických zariadení alebo stavebných blokov analógových zariadení, aby sa skontrolovala ich funkčnosť. Môžu sa vykonávať v teréne, napríklad po každom zapnutí zariadenia. Najmä v aplikáciách kritických z hľadiska bezpečnosti, ako sú autotesty, ktoré spočívajú v monitorovaní preddefinovaných limitov analógových blokov alebo správnom fungovaní digitálnej logiky, sú povinné, aby sa dosiahla nízka pravdepodobnosť nezistených porúch. V prípade inerciálnych MEMS je autotestovanie mechanických štruktúr sprevádzané vytvorením aktivačných stimulov. Medzi ďalšie možnosti patrí ovládanie snímacích štruktúr mimo oblasti prevádzkovej frekvencie. V prípade gyroskopov, pomalými ovládacími signálmi prekrývajúcimi rýchlo oscilujúce Coriolisove sily. Možno je aj pomocné ovládanie pomocou modulovaných kmitov s modulačnými frekvenciami mimo frekvenčnej oblasti frekvenčných signálov.

2.3.1 Kalibrácia MEMS akcelerometra

„Prvá metóda vychádza z normy (ISO 16063-31, 2009) definuje priečnu citlivosť akcelerometra S_T ako citlivosť na zrýchlenie aplikovanú v pravých uhloch k jeho geometrickej osi. S_T , ktorá zodpovedá špecifickému smeru skúšky, sa vypočíta ako (1), kde $\hat{V}_{out}$ je amplitúda výstupného signálu prevodníka a $\hat{a}_T$ je amplitúda zrýchlenia v testovacom smere. Smer testu je kolmý na os citlivosti.“ (D’Emilia G. ; Gaspari A. ; Mazzoleni F. ; Natale E. ; Schiavi A., 2018).

$$S_T = \frac{\hat{V}_{out}}{\hat{a}_T} \quad (1)$$

„Norma ISO 16063-31 (2009) pojednáva o jedno-osových akcelerometroch excitovaných pozdĺž smerov kolmých na ich citlivé osi.“ (D’Emilia G. ; Gaspari A. ; Mazzoleni F. ; Natale E. ; Schiavi A., 2018) Rozšírením indikácie normy na prípad trojosového akcelerometra sa mohla každá os senzora skúšať použitím známeho zrýchlenia na inú os, s cieľom výpočtu podľa rovnice (1), priečnu citlivosť prvej osi pri excitácii v smere druhej osi. Potom excitáciou každej jednotlivej osi senzora je možné

vypočítať šesť priečných senzitivít, ktoré vyjadrujú účinok zrýchlenia pozdĺž jednej osi vzhľadom na ostatné. Tieto priečne citlivosti sa označia ako S_{xy} , S_{xz} , S_{yx} , S_{yz} , S_{zx} a S_{zy} , kde prvý index označuje os, s ktorou sa počíta citlivosť, a druhý index udáva smer excitácie. Podobný prístup sa používa na určenie rozsahu citlivosti zrýchlenia (S_{xx} , S_{yy} , S_{zz}). Fázové oneskorenie sa považuje za zanedbateľné. Napríklad, keď sú vibrácie podľa osi x , citlivosť sa vypočíta ako rovnica (2), zatiaľ čo priečnu citlivosť S_{yx} a S_{zx} možno hodnotiť ako rovnice (3) a (4), kde V_x , V_y a V_z sú amplitúdy výstupov x , y a z testovaného akcelerometra a a_x je amplitúda referenčného signálu v smere x .

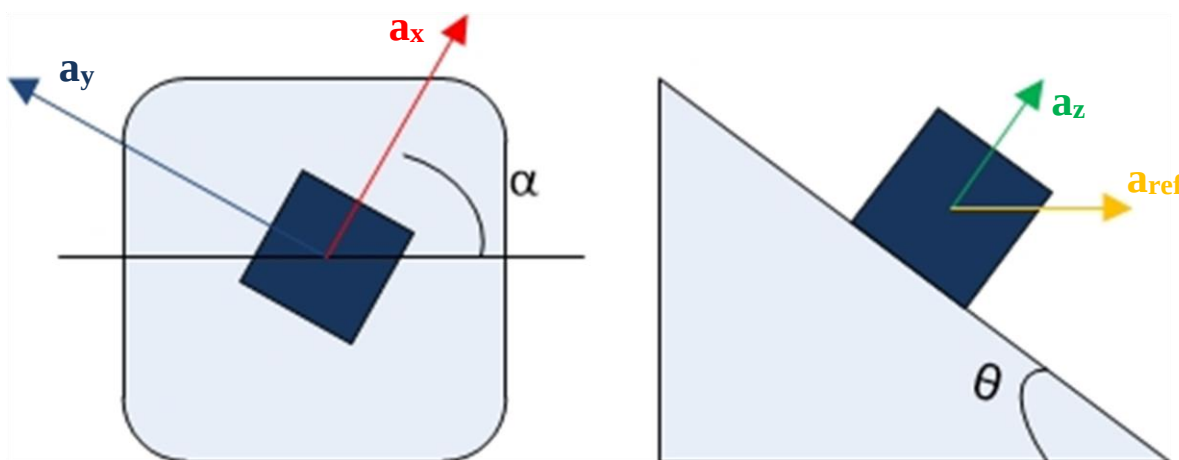
$$S_{xx} = \frac{V_x}{a_x} \quad (2)$$

$$S_{yx} = \frac{V_y}{a_x} \quad (3)$$

$$S_{zx} = \frac{V_z}{a_x} \quad (4)$$

Rovnaký postup sa používa pre ostatné citlivosti, keď sú vibrácie pozdĺž osi y (S_{yy} , S_{xy} , S_{zy}) a osi z (S_{zz} , S_{xz} , S_{yz}).

Druhá metóda zahŕňa súčasnú excitáciu troch osí skúšaného akcelerometra. Za týmto účelom musí byť akcelerometer namontovaný na povrch svorky naklonenej v uhle $\theta = 35^\circ$ vzhľadom na horizontálnu rovinu (obr. 2.2), na ktorej je pohyb realizovaný. Ďalej musí byť akcelerometer rotovaný na zvieracej ploche s uhlom $\alpha = 45^\circ$, aby sa súčasne excitovali tri osi rovnakým spôsobom s jediným horizontálnym sínusovým zrýchlením (obr. 2.2). Týmto spôsobom sú realizované zrýchlenia podobnej amplitúdy pozdĺž troch osí, ktoré môžu byť súčasne kalibrované. Referenčné zrýchlenia pozdĺž týchto troch osí sa dajú získať nasledovne v rovniciach (5), (6) a (7):



Obrázok 2.2 šikmá plocha

$$a_x = -a_{ref} * \cos(\theta) * \sin(\alpha) \quad (5)$$

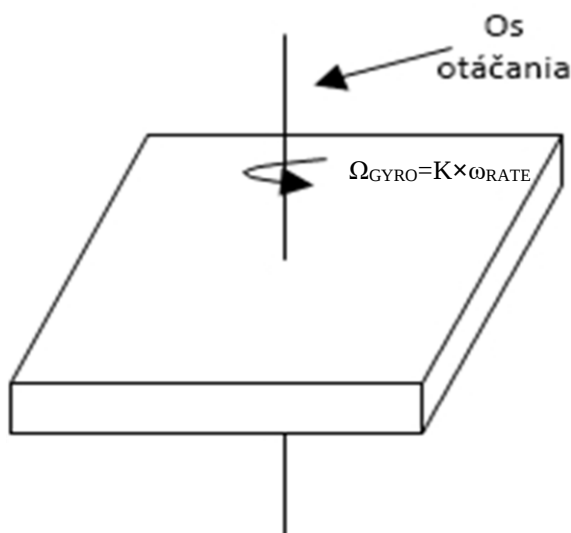
$$a_y = -a_{ref} * \cos(\theta) * \cos(\alpha) \quad (6)$$

$$a_z = a_{ref} * \sin(\theta) \quad (7)$$

kde a_{ref} je zrýchlenie v smere pohybu, merané referenčným snímačom. Výstupný signál a referenčný signál sa analyzujú rýchlou Fourierovou transformáciou v závislosti od kmitočtu kmitania s cieľom vyhodnotiť ich spektrálne amplitúdy. Konštantné termíny, v závislosti od gravitácie, neovplyvňujú výsledky. S_{xx} sa hodnotí podľa rovnice (2.2) kde V_x je spektrálna amplitúda výstupného signálu osi x skúšaného akcelerometra a a_x je spektrálna amplitúda referenčného signálu v rovnakom smere. Rovnaký prístup nám umožňuje vyhodnotiť S_{yy} , respektíve S_{zz} , keď sa vezmú do úvahy ďalšie meracie osi akcelerometra. Tento prístup nám neumožňuje vypočítať priečnu citlivosť, pretože podobné zložky zrýchlenia sa realizujú pozdĺž všetkých osí súčasne, bez možnosti extrahovať účinok priečných senzitivít. „Pre typológiu uvažovaného senzora podľa metódy 1, je potrebné periodické overenie či sú priečne citlivosti zanedbateľné (<5% vzhľadom na hlavné citlivosť).“ (D’Emilia G., Gaspari A., Mazzoleni F., Natale E., 2018)

2.3.2 Kalibrácia MEMS gyroskopu

Ideálny gyroskop MEMS vytvára predvídateľný výstup, keď je vystavený známej rýchlosti rotácie. Nemá žiadny hluk ani posin a má dokonalú linearitu. Dokonalosť nie je zvyčajne dostupná pri ekonomických výrobných procesoch, čo však vytvára potrebu hlbšieho porozumenia chýb gyroskopu MEMS.



Obrázok 2.3 reakcia MEMS gyroskopu na jeho preddefinované otáčanie v osi (Looney, 2010)

„Gyroskop MEMS s otočením ohybu reaguje na pohyb okolo svojej preddefinovanej osi otáčania.“ (Looney, 2010) (obrázok 2.3). Pre gyroskopy MEMS vyjadrujete typickú jednotku merania uhlovej rýchlosti otáčania v stupňoch za sekundu. Pre analógové výstupné produkty sú faktory mierky obvykle v stupňoch za sekundu na volt alebo milivolt. V prípade digitálnych výrobkov sú faktory mierky obvykle v stupňoch za sekundu za bit.

Po pochopení správania gyroskopu MEMS a vzorcov chýb musíte určiť vplyv, ktorý budú mať na fungovanie systému. Pre úspešnú integráciu senzorov je nevyhnutné stanoviť výkonnostné ciele, ktoré podporujú kritické systémové ciele. Niektoré systémy, ako napríklad navigácia a ovládanie platformy, používajú výstupy gyroskopu na určovanie relatívneho posunu uhla pomocou integrácie. Chyby zaujatosti pridávajú opravené chyby k výstupnej odozve senzora a môžu spôsobiť, že zariadenie vyzerá akoby sa stále otáčalo. Čistým výsledkom je konštantná akumulácia chyby merania uhla, ktorá sa rovná súčtu chyby predpätia a akumulácie času. Nasledujúca rovnica ukazuje matematický vzťah pre tento driftový faktor:

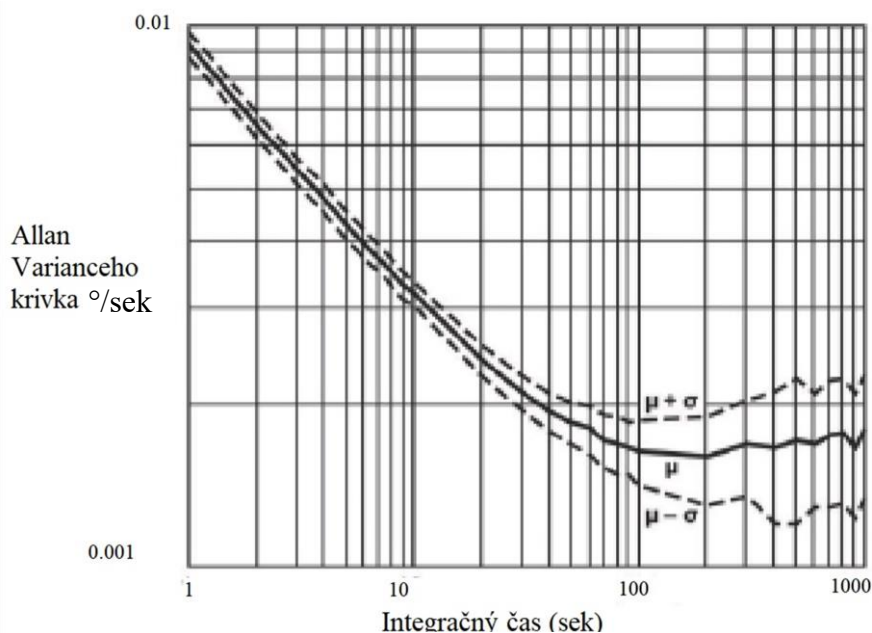
$$\varphi_{BIAS} = \int_0^{t^1} \omega_{BIAS} \times dt = \omega_{BIAS} \times t^1 \quad (8)$$

Chyby mierky prispievajú k chybám merania posunu iba v prípade pohybu. Matematický vzťah pre výslednú chybu je nasledujúci:

$$\varphi_{ESCALE} = \int_0^{t^1} \omega_{RATE} \times K \times \epsilon \times dt = \epsilon \times \int_0^{t^1} \omega_{RATE} \times K \times dt. \quad (9)$$

Šum, ktorý je nepriamo úmerný času integrácie spojenej s meraním, prispieva k meraniu náhodnou chybou. Bežným nástrojom na analýzu tohto vplyvu je metóda Allana Varianceho, ktorá stanovuje odchýlku odhadu systematickej chyby vzhľadom na čas integrácie. „Napríklad presnosť pre integračný čas 6 sekúnd je približne 0,004 %/s (obrázok 2.4).“ (Looney, 2010) Chyby systematického tlaku, šumu a mierky, vrátane linearity, majú výrazný vplyv na systémy, ktoré na meranie uhlového posunu používajú gyroskopy MEMS. „Tieto chyby priamo ovplyvňujú odhady navigačných systémov spolu s presnosťou systému riadenia platformy, ktorý ich používa ako prvok snímajúci spätnú väzbu.“ (Looney, 2010) Spoločným cieľom kalibrácie je zúžiť distribúciu chýb populácie snímača a transformovať túto populáciu na senzorové systémy, ktoré poskytujú predvídateľný výstup pre merané podmienky. Tento postup zahŕňa charakterizáciu jednotlivých prevodníkov za známych podmienok, čím sa poskytujú potrebné údaje pre čiastkové korekčné vzorce. Účelom tohto procesu je ponúknuť jednoduchú kalibráciu. Na

dosiahnutie menej ako 1% zložených chýb bude stačiť prístup lineárnej kompenzácie, ktorý rieši chyby prvého poriadku a chyby faktora mierky. Priemerovanie výstupu gyroskopu MEMS pri držaní zariadenia v konštantnej polohe je jednoduchá metóda na odhad chýb systematickej chyby. Allan Varianceho krivka pre gyroskop pomáha pri analýze kompromisu medzi testovacím časom, dĺžkou priemeru a presnosťou predpätia. (Looney, 2010). Pri tomto prístupe sa gyroskopy MEMS otáčajú známymi rýchlosťami, zatiaľ čo poskytujú výstupné merania. Aj keď je tento prístup efektívny a pravdepodobne potrebný pre neskoršie štádiá vývoja a výroby, existuje jednoduchší prístup. Za predpokladu korekcie chyby vychýlenia poskytuje integrácia gyroskopu MEMS ďalší mechanizmus na pozorovanie mierkového faktora. V tomto prípade je chyba faktora mierky pomerom zmeraného uhla k skutočnému posunu uhla.



Obrázok 2.4 Allan Varianceho krivka (Looney, 2010)

2.3.3 Kalibrácia MEMS magnetometra

Magnetometre sú úžasné prístroje a sú absolútne nevyhnutné na korekciu gyroskopického driftu v aplikáciách, ktoré vyžadujú absolútnu orientáciu prostredníctvom fúzie senzorov. Nevýhodou použitia magnetometra sú ich neideálne povrchové odozvy. Ideálna odozvová plocha pre trojosový magnetometer je guľa sústredená na stred do priestoru 3D. „To znamená, že odozva na vonkajšie magnetické pole, povedzme 400 miliGaussov (mG) v smere z, by bola presne $M_z = 400$ mG, keď boli osi z magnetometrov kolmé na podlahu, $M_y = 400$ mG, keď boli magnetometre y-os bola

kolmá k podlahe a $M_x = 400$ mG, keď os x magnetometra bola kolmá k podlahe.“ (Winer, 2017) Jednoduchšie povedané, ideálnou reakčnou plochou bez ohľadu na orientáciu magnetometra je guľa s polomerom 400 mG zameraná na stred. V praxi sú magnetometre MEMS zriedka tak kalibrované, keď ich dostanete. Na to existujú dobré dôvody. Senzory MEMS sa typicky charakterizujú vo výrobnom závode, ale montáž na dosku PC môže zvyšovať napätie, ktoré môže ľahko viesť k posunu kalibrácie. Výrobcovia okrem toho očakávajú, že používatelia pred použitím kalibrujú svoje senzory, čo znamená, že nákladným prostriedkom na zabezpečenie väčšej stability sa zvyčajne dá vyhnúť, a to najmä pre trh s mobilnými telefónmi, kde sa neočakáva mimoriadna presnosť zvyčajne bez kalibrácie.

Predpätia tvrdého železa sú zvyčajne najľahšie a najčastejšie chyby, ktoré je potrebné napraviť. „Najjednoduchší spôsob, ako ich napraviť, je zaznamenať veľa údajov z magnetometra, keď sa snímač pomaly pohybuje v obrazci ôsmich obrázkov a sleduje minimálne a maximálne pole zmerané v každom zo šiestich hlavných smerov: $\pm M_x$, $\pm M_y$, $\pm M_z$.“ (Winer, 2017) Keď sú známe hodnoty min / max pozdĺž týchto troch osí, priemer sa môže odpočítať od následných údajov, čo predstavuje opätovné centrovanie reakčnej plochy na začiatku.

Polia minimálnej / maximálnej systematickej chyby sú inicializované s najväčšou a najmenšou možnou 16-bitovou hodnotou. Potom sa údaje akumulujú s prihliadnutím na priemernú vzorkovaciu frekvenciu a na získanie primeraného odhadu minimálnych a maximálnych hodnôt. Pre každú os sa vypočíta dostatok údajov na výpočet odchýlky posunu.

Tento postup sa môže vykonať vždy, keď sa zariadenie zapne alebo sa môže vykonať raz a získané hodnoty sa uložia na hostiteľovi v prevádzkovom náčrte alebo mimo senzora na EEPROM na načítanie pri spustení. Funguje to preto, že hodnoty zaujatosti predstavujú vlastné odchýlky snímača v jeho konečnej konfigurácii namontovanej na doske a pri rôznych prostrediach sa príliš nemenia.

Je ešte jedno použitie, na ktoré môžeme vložiť tieto min/max kalibračné údaje, a to pri zmene mierky, aby bola axiálna odozva ešte sférickejšia. „To je korekcia mäkkého železa, o ktorej ľudia hovoria a urobiť to správne, znamená dekonštruovať reakčnú plochu na jej eliptické základné osi a navrhnúť korekčnú maticu 3×3 na transformáciu všeobecnej elipsoidnej reakčnej plochy na sférickú.“ (Winer, 2017)

Ako iný prístup môžeme použiť už vypočítané hodnoty min / max a použijeme ich na zmenu mierky údajov magnetometra na vyrovnanie odozvy pozdĺž troch meracích osí, kde sa miera mierky vypočíta tak, že sa vezme pomer priemernej max - min pozdĺž každej osi a priemeru všetkých troch osí. To znamená, že os, kde je maximálna a minimálna, má svoje magnetické pole zmenšené a os, ktorá meria pole vo vzťahu k ostatným osám, má zvýšené hodnoty magnetického poľa. Je to iba jednoduchá ortogonálna zmena mierky, ktorá je ekvivalentná s diagonalizovanou kalibračnou maticou 3 x 3, ale umožňuje určitú dodatočnú korekciu pre odchýlku stupnice.

Toto jednoduché použitie údajov magnetometra na korekciu chyby posunu a mierky stupnice by malo uspokojiť potreby väčšiny ľudí, ktorí používajú aplikácie fúzie snímačov 9 DoF pre aplikácie absolútnej orientácie. Treba mať na pamäti, že akcelerometre a gyroskopy majú v zásade odchýlky v rozsahu a v mierkach, a vo väčšine prípadov použitia je potrebné ich upraviť. Metódy podobné tým, ktoré sú tu opísané, by mali stačiť aj pre tieto senzory.

Kalibrácia magnetometra je omnoho viac ako to, čo sme práve opísali. Vyskytuje sa otázka korekcie zmien teploty. Existuje dôvod, prečo väčšina snímačov MEMS má zabudovaný snímač teploty. Existuje niekoľko stratégií pre automatickú a nepretržitú kalibráciu všetkých senzorov a niekoľko senzorov využíva prostriedky na charakterizáciu stavu kalibrácie senzorov od spravodlivých po dobre kalibrované, čo používateľom umožňuje ďalšie informácie o tom, do akej miery môžu „dôverovať“ nameraným hodnotám.

3 Popis a overenie funkčnosti vybraného záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS

Práce boli vykonané so staršími vývojovými doskami (ďalej aj MCU dosky Kinetis) osadenými MEMS snímačmi, ktorých výrobcom bola firma Freescale. Tá bola v roku 2015 odkúpená spoločnosťou NXP Semiconductors. Konkrétne sa táto časť práce venovala doskám FRDM-K22F (FRDM-K22F, 2020), FRDM-K64F (FRDM-K64F, 2020), FRDM-KL25Z (FRDM-KL25Z, 2020), a spoločnou nadstavbovou doskou FRDM-STBC-AGM01 (FRDM-STBC-AGM01, 2020). Tiež sa venovala ich zapojeniu s OS Windows 10. Prepojeniu so softvérom poskytnutým spoločnosťou NXP Semiconductors, za použitia dvoch rôznych vyhodnocovacích aplikácií, porovnaniu dosiahnutých výsledkov. Dosky boli položené na nízko tónový reproduktor (subwoofer) a cez aplikáciu „Online Tone Generator“ (Szynalski, 2020), sa nastavovali frekvencie, čím sa vytvárali vibrácie a ich prejavy boli zaznamenávané pomocou senzorických MCU dosiek. Navrhlo sa využitie vývojových dosiek na demonštračné a študijné účely.

3.1 Popis vybraného záznamového zariadenia a vyhodnocovacieho softvéru

NXP Freedom K22F (FRDM-K22F, 2020), je vývojová doska pre MCU KinetisK22. Je kompatibilná s usporiadaním (funkciou a rozmermi) pinov na vývojovej doske Arduino UNOe.

Periférie tejto vývojovej dosky MCu Kinetis umožňujú rýchle skúmanie a nastavovanie MEMS snímačov, vrátane 6-osého digitálneho akcelerometra a magnetometra na vytvorenie funkcií eCompass, trojfarebnej LED diódy a 2 užívateľských tlačidiel na priamu interakciu s používateľom. Doska MCU Kinetis obsahuje aj pripojenie na použitie s modulmi Bluetooth a 2,4 GHz rádiovými prídavnými modulmi.

Driver NXP OpenSDAv2 (Driver NXP OpenSDAv2, 2020), ponúka možnosti dosiek MCU Kinetis pre sériovú komunikáciu, programovanie pamäti typu flash a ladenie riadenia chodu. FRDM-K22F je podporovaná aj platformou Mbed (Mbed, 2020), čo znamená, že sa môžu vytvárať softvérové aplikácie s on-line vývojovými nástrojmi pre procesory ARM (používa sa jazyk C++ a rada bohatých knižníc podporujúcich periférie vrátane MEMS snímačov). Mbed platforma umožňuje prepojenie s internetom a doska MCU sa tak stáva súčasťou IoT s čím poskytuje nespočetne veľa jej ďalších možností

a využití. Platforma mbed poskytuje Free Open Source prístup, vďaka ktorému, môžeme pracovať s rôznymi zdrojovými kódmi a s rôznymi MCU Kinetis doskami s procesormi ARM. Doska MCU typ FRDM-K22F obsahuje snímače typu FXOS8700CQ (FXOS8700CQ, 2020) obsahuje akcelerometer a magnetometer.

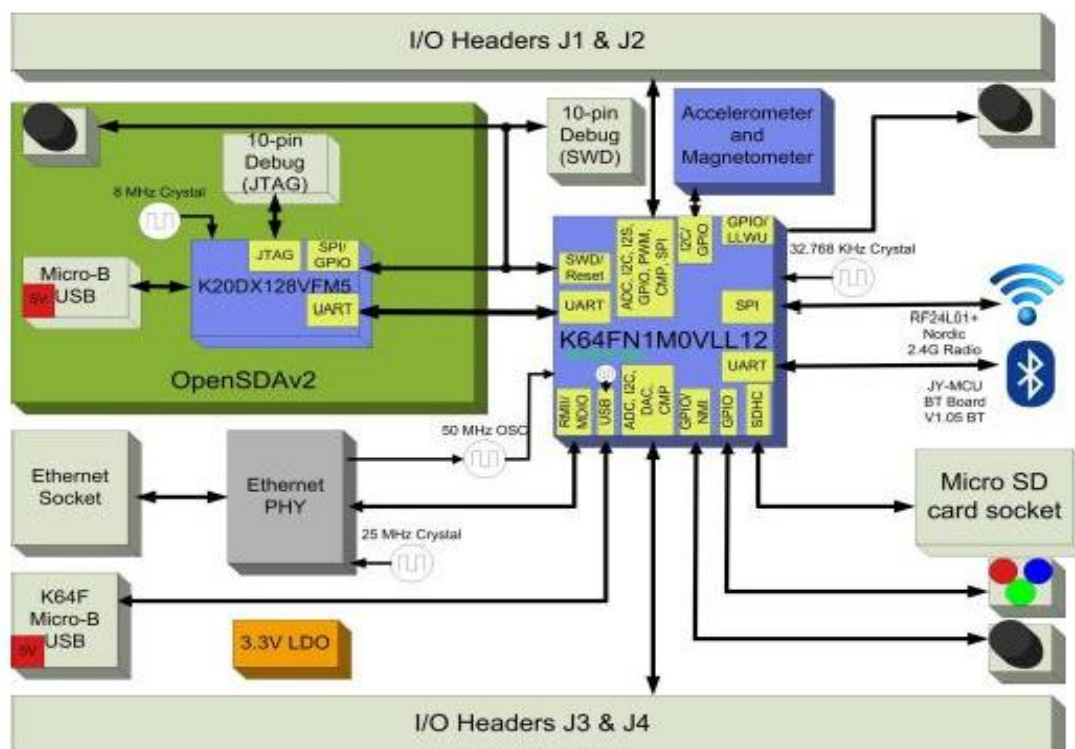
Softvérová podpora a vývoj aplikácií sa ponúka aj prostredníctvom IDE (Integrated Development Environment) určeným na vývoj softvéru s názvom NXP Kinetis SDK (KINETIS-SDK, 2020). Poskytuje rozsiahlu sadu periférnych ovládačov, zásobníkov a middlewaru (middleware je softvér, ktorý poskytuje služby softvérovým aplikáciám nad rámec tých služieb, ktoré sú dostupné z operačného systému, middleware často nahradzuje zdrojové kódy a príklady). „Kinetis SDK v1.x je súbor komplexných softvérových možností pre mikrokontroléry NXP Kinetis, ktoré zahŕňajú spúšťanie systému, periférne ovládače, komíny USB a konektivitu, middleware a jadrá operačného systému v reálnom čase (RTOS).“ (NXP Semiconductors, 2020). Súčasťou Kinetis SDK sú aj informácie o tom, ako začať dokumentáciu API spolu s príkladmi použitia a demo aplikáciami, ktoré sú navrhnuté tak, aby zjednodušili a urýchlili vývoj aplikácií na MCU Kinetis.



Obrázok 3.1 FRDM-K22F vývojová platforma (NXP Semiconductors, 2020)

NXP Freedom-K64F je vývojová doska pre MCU Kinetis K64, K63 a K24.

Doska FRDM-K64F (FRDM-K64F, 2020), je podobná doske FRDM-K22F, odlišnosť môžeme pozorovať v rozdielnom mikrokontroléry, ktorý má zväčšenú flash pamäť z 512kB na 1 MB a taktiež pamäť RAM zo 128 kB na 256 kB obsahuje tiež 100 LQFP (Quad Flat Package- je povrchovo integrovaný balík s integrovanými obvodmi s vodičmi siahajúcimi od každej zo štyroch strán) a možnosť pripojenia cez Ethernet.

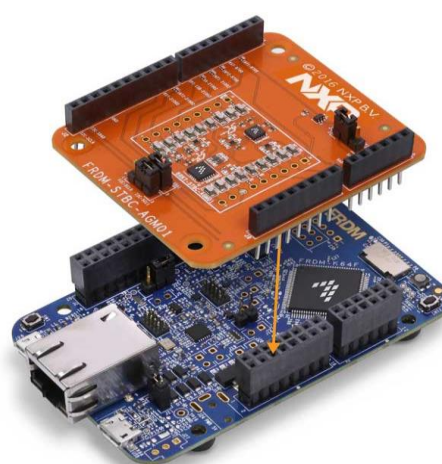


Obrázok 3.2 FRDM-K64F blokový diagram (NXP Semiconductors, 2020)

FRDM-STBC-AGM01 je takzvaný „shield board“ (FRDM-STBC-AGM01, 2020), ktorý môže byť jednoducho pripojený do pinov podporovaných vývojových dosiek, v našom prípade sú to obidve FRDM-K22F a FRDM-K64F s kompatibilným softvérom. Je to 9-osová vývojová doska, ktorá poskytuje 3-osový gyroskop FXAS21002C a 6-osový integrovaný e-kompas obsahujúci lineárny akcelerometer a magnetometer FXOS8700C.



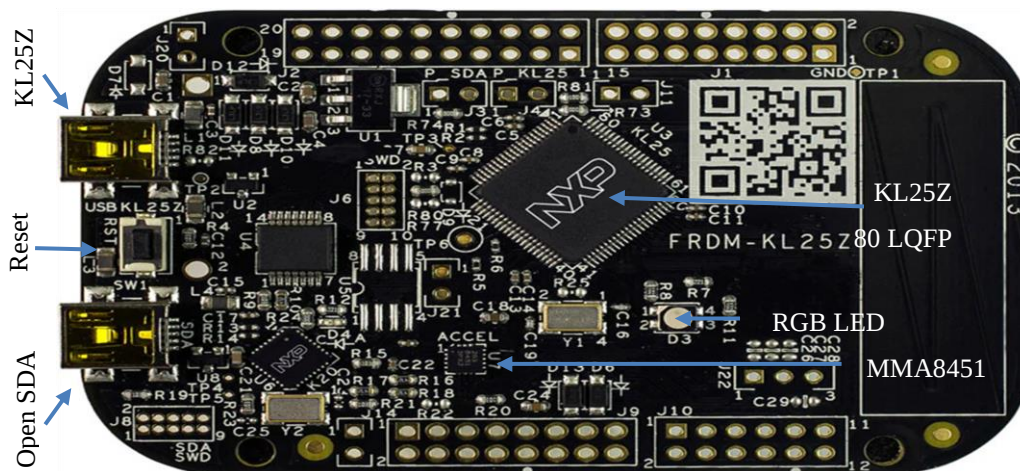
FRDM-STBC-AGM01



FRDM-K64F-AGM01

Obrázok 3.3 FRDM-STBC-AGM01 Shield Board a FRDM-K64F-AGM01 Demo Kit (NXP Semiconductors, 2020)

FRDM-KL25Z je vývojová doska MCU Kinetis (FRDM-KL25Z, 2020), ktorej cena je nižšia ako pri vyššie spomenutých vývojových doskách. Patrí do série KL1x (KL14 / 15) a KL2x (KL24 / 25) s mikrokontrolérom MKL25Z128VLK4 (MKL25Z128VLK4, 2020), ktorý pracuje na 48MHz, má 128 KB pamäť flash, 16 KB pamäť SRAM a 80 LQFP.



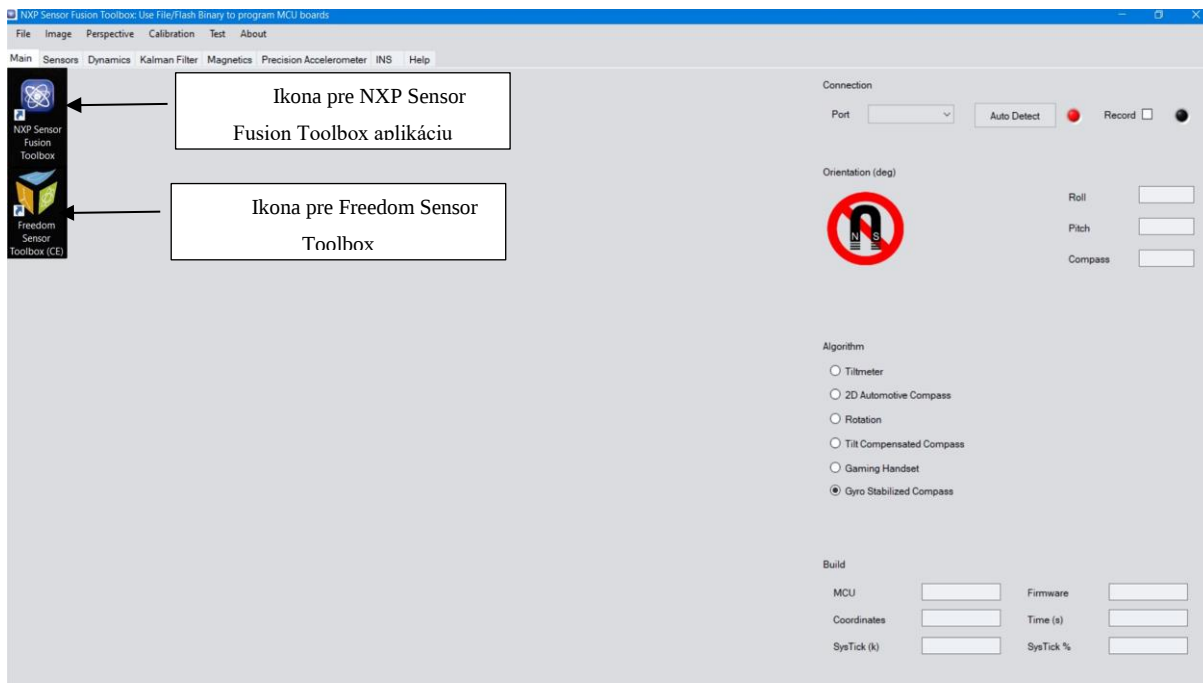
Obrázok 3.4 FRDM-KL25Z vývojová platforma (NXP Semiconductors, 2020)

Čiže disponuje nižšími špecifikáciami, čím sa ale kompenzuje cena výrobku.

Používa MMA8451Q akcelerometer (MMA8451Q, 2020), ktorý je hodnotami podobný FXOS8700CQ akcelerometru a magnetometru, bez možnosti merať magnetometrom.

Ako software sa bude používať „Freedom Sensor Toolbox“ (Freedom_Sensor_Toolbox, 2020) a „NXP Sensor Fusion Toolbox od NXP Semiconductors“ (Toolbox, 2006-2020). Na Obrázku 3.5 je vidieť spustenú aplikáciu pre druhý spomenutý software a jeho ikonu na ploche počítača po nainštalovaní tohto produktu, bez pripojenia zariadenia. Pri aplikácii Freedom Sensor Toolbox, nie je možné sa dostať do hlavného menu skôr, ako pripojíme zariadenie. Najprv musí prebehnúť rozpoznanie dosky softvérom. Tieto programy sú veľmi jednoduché na používanie, nakoľko obsahujú databázu niekoľkých dosiek, ktoré sú kompatibilné s týmto softvérom a nevyžadujú kódovanie. Ako príklad môžeme uviesť naše dosky s ktorými budeme pracovať, ale taktiež aj dosku FRDM-KE06Z (FRDM-KE06Z, 2020), ktorej cena je výrazne nižšia a taktiež sa dá napojiť so Shield Boardom FRDM-STBC-AGM01 (FRDM-STBC-AGM01, 2020). Avšak používanie týchto aplikácií je len jedna z mnohých možností ako získať dáta z dosiek. Niektoré ďalšie možnosti sa naskytú

v nasledujúcej časti, kde sa bude rozoberať postup pripojenia NXP dosiek k počítaču až k prepojeniu týchto dosiek k aplikácii a zaznamenávanie a spracovanie získaných výsledkov.



Obrázok 3.5 program NXP Sensor Fusion Toolbox bez pripojeného zariadenia

Hlavné menu je základnou obrazovkou aplikácie NXP Sensor Fusion Toolbox. Centrálna grafika, zobrazená na obrázku 3.12, zobrazuje orientáciu dosky MCU pomocou jedného z množstva obrázkov. Pre správnu orientáciu kompasu bola potrebná počiatočná fyzická rotácia dosky MCU obrázkom, aby sa získali merania geomagnetického poľa potrebného na magnetickú kalibráciu dosky snímačov.

Časť Connection (spojenie) zobrazuje informácie o sériovom porte a dátových paketoch prijímaných z dosky MCU. Rozbaľovacia ponuka Port umožňuje manuálny výber rôznych portov. Toto môže byť užitočné, ak vieme, ktorý port COM je priradený k našej MCU a doske snímača. Tlačidlo Auto Detect (Automatické zistenie) spustí automatickú detekciu portu COM priradeného doske MCU. Ak je počítač pripojený k portu COM správne, svieti kontrolka LED pripojenia na modro. Červená, ak počítač nie je pripojený k portu COM. Tlačidlo Record umožňuje zaznamenávať na disk súbor údajov prijatých z dosky MCU. Pri nahrávaní bliká susedná dióda LED, čo ukazuje, že prebieha nahrávanie údajov. Súbor disku je vo formáte CSV, hodnoty oddelené čiarkami, vo formáte, ktorý umožňuje ľahký import do tabuľky programu Excel.

Časť Orientation (deg) zobrazuje stav magnetickej kalibrácie a uhly orientácie dosky senzora. Grafika zeleného pruhu magnetickej kalibrácie zobrazuje kvalitu kalibrácie takzvaného „*hard*“ (tvrdého) a „*soft*“ (mäkkého) železa zo senzora magnetometra. „Hodnoty Roll, Pitch a Compass ukazujú orientačné uhly dosky MCU v stupňoch vzhľadom k horizontále (pri obracaní a kolísaní), vzhľadom k magnetickému severu (v prípade určenia kompasu). Štítky rušenia zrýchlenia a magnetického rušenia, označujú stupeň rušenia zisteného Kalmanovým filtrom.“ (NXP_Sensor_Fusion_Toolbox_app, 2016)

Časť tlačidiel Algorithm (algoritmus) vyberá, ktoré údaje algoritmu sa zobrazia na počítači. Všetky algoritmy sú vykonávané paralelne na doske MCU a prepínanie medzi algoritmiami jednoducho dáva doske MCU pokyn na prenos údajov pre vybraný druh algoritmu. Napravo od algoritmov (tak ako to je zobrazené na obrázku 3.12) vidíme aktívny stav rôznych senzorov, ktorých dáta aktuálne aplikácia prijíma. Ak doska Kinetis dostane od aplikácie požiadavku na prenos výsledkov z algoritmu, ktorý doska nepodporuje, nezmení algoritmus a vyznačené senzory, zostanú nezmenené.

Časť Build zobrazuje údaje o softvéri a hardvéri MCU. Pole MCU, zobrazuje aktuálne pripojenú MCU dosku. Pole Firmware, ukazuje číslo vydania firmvéru bežiaceho na doske MCU. Pole Coordinates, zobrazuje súradnicový systém, ktorý sa používa na definovanie osí x, y a z, smeru a osí orientačných uhlov. Predvolené zostavenia používajú súradnicový systém Aerospace, ktorý budeme využívať. Hodnota Time (s) je čas, ktorý uplynul od zapnutia dosky MCU. Hodnota SysTick (k) ukazuje počet hodinových tickov μC (v tisícoch) použitých v jednom úseku vybraného algoritmu fúzie snímača. „Na poskytovanie časových služieb, ako sú časové oneskorenia, časové limity a časovače, systémy založené na μC , sa spoliehajú na prítomnosť časového zdroja nazývaného hodinový tick alebo systémový tick.“ (Documentation, 2020) 48MHz μC má k dispozícii 48 miliónov hodinových tickov za sekundu a 120MHz μC má k dispozícii 120 miliónov hodinových tickov za sekundu. Hodnota SysTick% ukazuje percento dostupných tickov MCU hodín potrebných na vykonanie jedného prechodu zvoleného algoritmu.

Sensors Menu (snímačov)

Časť akcelerometra (g) uvádza a zobrazuje tri kalibrácie meraných osí akcelerometra v jednotkách zrýchlenia gravitácie g. Je tu tiež zobrazená odchýlka modulu meracieho vektora, ktorá poskytuje mieru kvality kalibrácie akcelerometra. Ak nedôjde k akcelerácii, modul merania akcelerometra by sa mal presne rovnať 1g.

Časť snímačov magnetometra (μT) uvádza a ukazuje merania magnetometra (v súradnicovom rámci snímača magnetometra) v jednotkách μT (micro Tesla) po korekcii pre kompenzáciu dosky plošných spojov a úpravu takzvaného hard iron offsetu a soft iron gain. Rozdiel medzi hodnotami nekalibrovaných a kalibrovaných magnetometrov je možné zistiť pomocou príkazu File / Reset na resetovanie magnetickej kalibrácie.

Časť Gyroskop (Snímačový rámec) uvádza a vynesie merania troch osí gyroskopu (v súradnicovom rámci snímača gyroskopu) v jednotkách deg / s .

Ak algoritmus vybraný v skupine Algoritmus nepoužíva žiadny snímač, jeho výstup sa zobrazí ako nula. Napríklad, ak je zvolený algoritmus Tiltmeter, zobrazia sa hodnoty magnetometra a gyroskopu ako nula.

Dynamics Menu

Časť Orientation (deg) and Quaternion (orientácia a quaternion) zobrazuje a tiež vykresľuje uhly Roll, Pitch a Compass z Hlavného menu. Polia quaternion q_0 , q_1 , q_2 a q_3 ukazujú orientáciu vo formáte quaternionov. Štvorrozmerný vektorový priestor založený na jednom reálnom čísle a troch imaginárnych jednotkách.

Časť Angular Velocity Sensor Frame (deg / s) (snímačov uhlovej rýchlosti) vykresľuje a zobrazuje uhlovú rýchlosť v stupňoch / s okolo troch osí dosky MCU. Keď vybraný algoritmus fúzie senzora používa gyroskopický senzor, potom sa uhlová rýchlosť vypočíta z gyroskopického senzora upraveného na posun nulovej rýchlosti. „Uhlová rýchlosť sa tiež počíta v tých algoritmoch, ktoré nepoužívajú gyroskopický senzor a to z rozdielu v rotácii medzi po sebe nasledujúcimi odhadmi orientácie.“ (NXP_Sensor_Fusion_Toolbox_app, 2016).

Časť Acceleration Global Frame (g) zobrazuje a vykresľuje fyzikálne zrýchlenie dosky MCU, získané odstránením vektora rotovanej gravitácie z merania akcelerometra a otočením späť do globálneho (pozemského) referenčného rámca. V globálnom referenčnom rámci súradnic systému Windows 10 sú osi x orientované na východ, osi y smerujú na sever a osi z hore. Pretože zrýchlenie sa počíta v globálnom referenčnom

rámci, pri použití úplného algoritmu stabilizovaného kompasu Gyro je zobrazené zrýchlenie necitlivé na orientáciu dosky senzora.

Kalman Menu

Údaje na karte Kalman sú nenulové, iba ak je algoritmus vybraný v skupine Algorithm buď Gaming Handset alebo Gyro Stabilized Compass, ktoré sú jedinými dvoma algoritmami používajúcimi Kalmanov filter. Kalmanove filtre v týchto algoritmoch stabilizujú odhad orientácie získaný integráciou gyroskopu k fixným referenčným vektorom poskytnutým gravitačným vektorom a (pre gyroskopom stabilizovaný kompas) geomagnetickým vektorom.

Prvý riadok grafov ukazuje namerané chybných orientácií quaternionov voči referenčným gravitačným a geomagnetickým vektorom. Presnosť týchto odhadov chýb sa líši v závislosti od stupňa rušenia spôsobeného zrýchlením alebo magnetickým rušením.

Kalmanov filter odhaduje kvalitu nameraných chybových quaternionov a vypočítava korekčné quaterniony, ktoré sa majú použiť. Tieto sú zobrazené a vykreslené v druhom riadku grafov.

Vektor Gyro Offset $b + (\text{deg} / \text{s})$ v treťom riadku zobrazuje a vykresľuje vektor offsetu nulovej rýchlosti gyroskopu. Skupina Delta $+ (\text{deg})$ Geomagnetic Inclination Delta $+ (\text{deg})$ vykresľuje a zobrazuje odhadovaný geomagnetický uhol sklonu v stupňoch.

Magnetics Menu

Časť „Hard Iron Offset Vector (μT)“ a „Inverse Soft Iron Gain Matrix“ vyznačujú podmienky magnetickej kalibrácie vypočítaných doskou MCU a použitých pre nespracované namerané magnetické dáta. Calibrated Display tlačidlo určuje, či sa v grafoch v Buffer (μT) časti, zobrazia nekalibrované alebo kalibrované merania. Magnetické merania by mali ležať na povrchu myslenej gule predstavujúcej meranie geomagnetického vektora v rôznych uhloch, ale v praxi sú kompenzované interferujúcim poľom hard ironu. „Kalibrácia hard ironom odhaduje toto pole a odpočítava ho, čím znovu centruje meranie na začiatok. Jemnejšia korekcia je pomocou Soft iron gain matrix, ktorá aplikuje omnoho menšiu korekciu pre rôzne zosilnenia kanálov a zosilnenia naprieč osami v magnetometrických senzorochoch.“ (NXP_Sensor_Fusion_Toolbox_app, 2016).

Časť „Magnetic calibration“ (magnetickej kalibrácie) poskytuje ďalšie informácie o kvalite magnetickej kalibrácie. Hodnota Measurements zobrazuje počet meraní

v Magnetic buffery. Všeobecne platí, že kvalita magnetickej kalibrácie sa zvyšuje so zvyšujúcim sa počtom meraní. Fit Error% (chyba prispôsobenia) a príslušná ikona (bez kalibrácie alebo s kalibračnou kvalitou 1 až 5 barov) poskytujú numerickú hodnotu pre kvalitu kalibrácie. Kvalita magnetickej kalibrácie sa zvyšuje so znižovaním chyby pri prispôbovaní a zvyšovaním počtu zelených pruhov. „Hodnota Geomagnetic field (μT) (geomagnetického poľa) zobrazuje odhadovanú hodnotu lokálneho geomagnetického poľa a zvyčajne má hodnotu od $40\mu\text{T}$ do $55\mu\text{T}$. Hodnota Inclination Delta (deg) (sklonu Delta) ukazuje uhol lokálneho geomagnetického poľa smerom dole od horizontály.“ (NXP_Sensor_Fusion_Toolbox_app, 2016). Táto hodnota vyžaduje, aby vo fúznom algoritme boli prítomné magnetometrický aj akcelerometrický senzor, v opačnom prípade by program vypísal nulu. Tlačidlo Save umožňuje zapísať magnetické kalibračné koeficienty a prvky magnetickej vyrovnávacej pamäte do súboru na disku spolu so súbormi Matlab a Mathematics plot.

Časť „Magnetic Buffer (μT)“ ukazuje dvojrozmerné projekcie trojrozmerného magnetického meracieho buffera. Projekcia X-Y vynesie hodnoty x proti hodnotám y, projekcia Y-Z vynesie hodnoty y proti Z a projekcia Z-X vynesie hodnoty z proti x. Ak nie je začiarknuté tlačidlo Kalibrovaný displej, sú vynesené hodnoty nekalibrované merania magnetometra a ak je tlačidlo začiarknuté, sú kalibrované.

Precision Accelerometer Menu

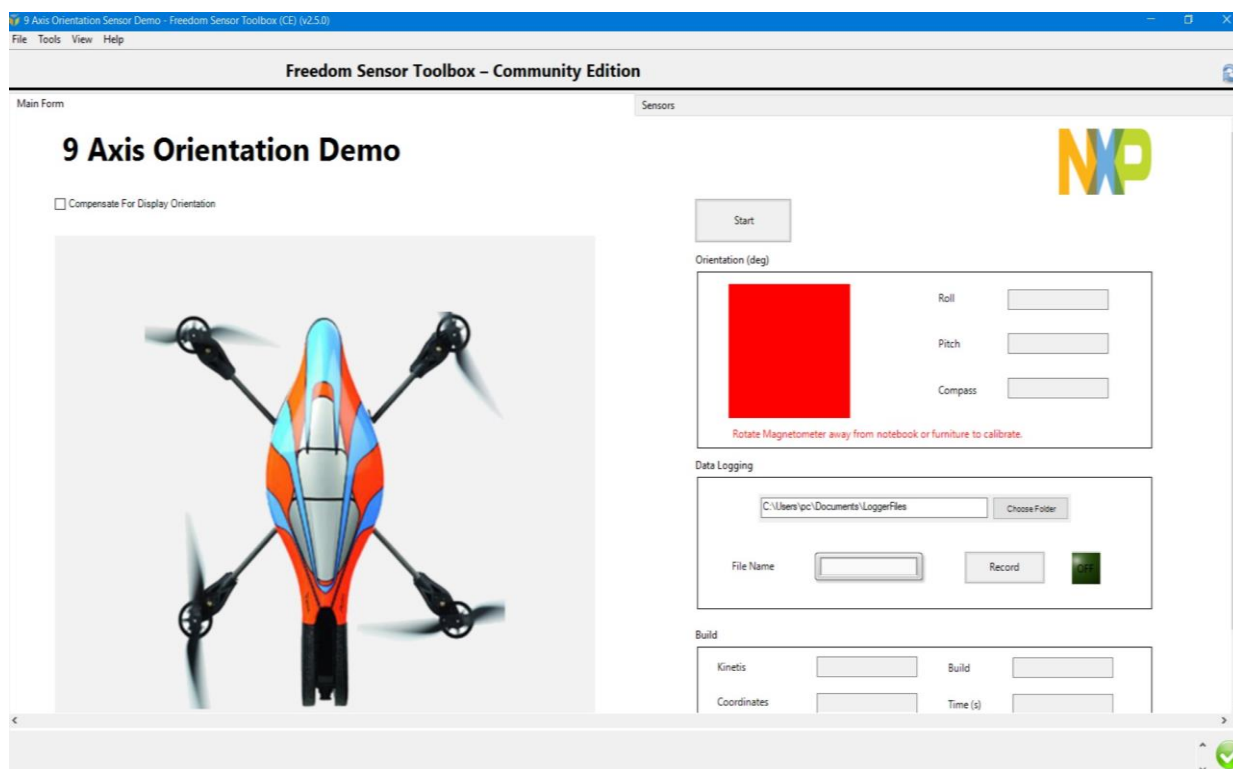
Časť „Uncalibrated Accelerometer Measurements Sensor Frame (g)“ (merania nekalibrovaného akcelerometra) umožňuje užívateľovi zaznamenávať merania akcelerometra v rôznych pozíciách, aby bolo možné vypočítať kalibráciu akcelerometra s vysokou presnosťou. Merania sa musia vykonávať v maximálne odlišných orientáciách a na akcelerometer nesmie pôsobiť žiadne zrýchlenie ani vibrácie. Pri vykonávaní týchto meraní by sa preto MCU a doska snímača mali umiestniť na vibračný izolačný povrch, napríklad na látku. Všeobecne platí, že čím viac meraní sa vykonáva, tým je výsledná kalibrácia presnejšia, pretože v prípade dostatočného množstva meraní sa používajú stále sofistikovanejšie kalibračné algoritmy. Tlačidlo s Instruction (pokyny) zobrazujú okno so stručnými pokynmi.

Meranie s označením 0 Flat je zvláštne tým, že sa predpokladá, že zodpovedá MCU a doske snímača položenej na stole a používa sa na výpočet korekčnej matice rotácie tak, že táto orientácia presne zodpovedá nulovému uhlu sklonu.

Akonáhle je dosiahnutá uspokojivá kalibrácia, môže byť uložená do pamäte Flash MCU pomocou príkazov ponuky Calibration / Save to MCU Flash.

Freedom Sensor Toolbox (CE) (v2.5.0)

Aplikácia je k prístupu priamo na stránke NXP (Freedom_Sensor_Toolbox, 2020) s odkazom v bibliografických zdrojoch. Zariadenie sa pripojí a vyhľadá sa v možnostiach pripojená MCU v prvom okne výberu, prídavný Shield Board v druhej možnosti výberu a v konečnej fáze sa vyberie jeden z troch možných Demo programov, ktoré aplikácia nainštaluje do MCU dosky Kinetis a spustí vybraný program. Po otvorení 9 Axis Orientation Demo sa spustí program ako na obrázku 3.6, nachádzajú sa tam len dve hlavné okná, ktoré sú k dispozícii.



Obrázok 3.6 program Freedom Sensor Toolbox s prednastaveným 9-osím demom

Hlavné menu

je základnou obrazovkou aplikácie Freedom Sensor Toolbox. Main form, zobrazená na obrázku 3.6, zobrazuje orientáciu dosky MCU pomocou obrázka drona. Pre správnu orientáciu kompasu bola potrebná počiatočná fyzická rotácia dosky MCU obrázkom, aby sa získali merania geomagnetického poľa potrebného na magnetickú kalibráciu dosky snímačov tak ako tomu bolo v predchádzajúcej aplikácii.

Časť „Orientation (deg)“ zobrazuje stav magnetickej kalibrácie a uhly orientácie dosky senzora. Grafika zeleného pruhu magnetickej kalibrácie zobrazuje kvalitu kalibrácie Hard Iron a Soft Iron zo senzora magnetometra. Hodnoty Roll, Pitch a Compass ukazujú orientačné uhly dosky MCU v stupňoch vzhľadom k horizontále (pri obracaní a kolísaní), vzhľadom k magnetickému severu (v prípade určenia kompasu).

Časť „Data Logging“ umožňuje nahrávať a ukladať všetky informácie zo senzorov priamo do súboru Excel alebo poznámkového bloku.

Časť „Build“ zobrazuje údaje o softvéri a hardvéri MCU. Pole Kinetis, zobrazuje aktuálne pripojený MCU. Pole Build, ukazuje číslo vydania firmvéru bežiaceho na doske MCU. Pole Coordinates, zobrazuje súradnicový systém, ktorý sa používa na definovanie osí x, y a z, smeru a osí orientačných uhlov. Predvolené zostavenia používajú súradnicový systém Aerospace, ktorý budeme využívať. Hodnota Time (s) je čas, ktorý uplynul od zapnutia dosky MCU. Hodnota SysTick (k) ukazuje počet hodinových tickov μC (v tisícoch) použitých v jednom úseku vybraného algoritmu fúzie snímača. Tak ako tomu bolo v predchádzajúcej aplikácii.

Sensors Menu

Časť „akcelerometra (g)“ zobrazuje tri kalibrácie meraných osí akcelerometra v jednotkách zrýchlenia g.



Obrázok 3.7 program Freedom Sensor Toolbox s prednastaveným 9-osím demom, senzorická časť

Časť snímačov magnetometra (μT) ukazuje merania magnetometra (v súradnicovom rámci snímača magnetometra) v jednotkách μT . Časť Gyroskopu uvádza a vykresľuje merania troch osí gyroskopu (v súradnicovom rámci snímača gyroskopu) v jednotkách deg / s .

Na obrázku 3.7 je vidieť ako ľavá časť programu, pri vizualizácii dát je nulová a nevykazuje žiadne hodnoty, bez možnosti opravy programu. Os Z sa nachádza na mierke 8,628k gravitačného zrýchlenia pri voľne položenej FRDM doske. Pri meraní sa bude konštatovať, že hodnota dát z osi Z, teda 8,6k bude rovná 1. Takže ak sa os X posunie o hodnotu zrýchlenia 1 g, na stupnici sa posunie o 8,6k g zrýchlenia.

3.2 Overenie vybraného záznamového zariadenia a vyhodnocovacieho softvéru

Pre overenie záznamového zariadenia sa použila doska FRDM-K64F. Keďže je s doskou FRDM-K22F podobná, tak postup zapájania a testovania zariadení bude rovnaký. Zariadenie MCU Kinetis sa pripája k notebooku pomocou USB a micro USB, ktoré sa zapoja do SDA USB portu na vybranom zariadení, tak ako je znázornené na obrázku 3.8. Po pripojení zariadenia na počítač s operačným systémom Windows 10, systém vyhodí informačné okno, ktoré informuje užívateľa o nerozpoznaní zariadenia. Pri opakovanom pripájaní sa stav oznámenia nezmenil a dokonca sa na zariadení najprv zmenila frekvencia blikania LED diódy, čo značilo chybu v programe a pri ďalšom opätovnom pripojení, už LED dióda prestala blikáť úplne.

OpenSDA Mód	Popis stavu	LED svietenie
Bootloader	Pred pripojením USB	Off
Bootloader	Beží normálne bez chýb	Bliká: 500ms zapnutá, 500ms vypnutá
Bootloader	Chyba	2 sekundy vypnuté a 88 rýchlych vypnutí a zapnutí
Aplikácia	Pred pripojením USB	Off
Aplikácia	Beží normálne bez chýb	On
Aplikácia	USB aktivita	Bliká
Aplikácia	Chyba	2 sekundy vypnuté a 88 rýchlych vypnutí a zapnutí

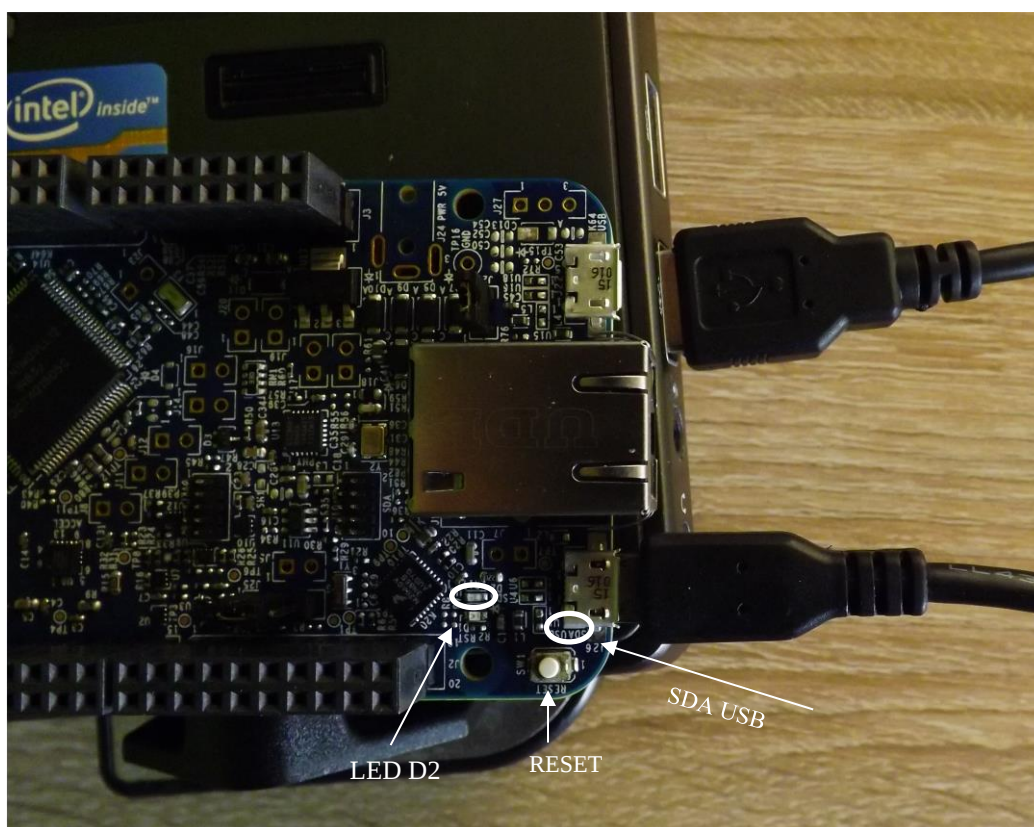
Tabuľka 1 LED status a jeho význam (Semiconductors, 2020)

V tomto momente sa FRDM doska dostala do takzvaného „Bricked“ stavu, alebo inak „zablokovaný stav“. Zariadenie sa považuje za nefunkčné. Doska sa odpojila a znova zapojila pre Bootloader mód. Ten sa otvorí pomocou stlačenia RESET tlačidla a vsunutia

micro USB do portu SDA USB ako pri normálnom zapájaní na Obrázku 3.8.

Keďže sa pracuje s Windows 10 a so staršími doskami, ktoré majú ešte v sebe zabudovaný starý bootloader, nie je možné pracovať s touto doskou, bez updatu bootloadera a firmvéra. Rovnaký problém riešilo mnoho ľudí a odpoveď poskytol zamestnanec ARMmbed (Corrado, 2017). Tu sa pracuje s dvomi možnosťami ako docieľiť update. Prvá, keď sa zariadenie pripojí na operačný systém Windows 7 a starší, kde sa jednoducho otvorí bootloader mód, updatuje sa na novšiu verziu a rovnako tak sa nainštaluje nový firmvér.

Alebo druhá možnosť, v ktorej jednoducho pomocou kláves (Windows tlačidlo + R) sa otvorí spustenie programov, vpíše sa **gpedit.msc**, stlačí sa tlačidlo ok a systém otvorí súbor s názvom „Local Group Policy Editor“ – ďalej v sekcii **Politika Lokálny počítač**, sa rozklikne **Konfigurácia počítača/Administratívne Templates/ Windows Components/ Search**. Kde sa dojklikom otvorí **Do not allow locations on removable drives to be added to libraries** a označí sa možnosť „Enable“. Potvrdením tlačidla „Apply“, už bude dochádzať k rozpoznaní USB zapojenia a takisto nedôjde k nadmernej komunikácii medzi Windows 10 a zapojenou FRDM doskou.

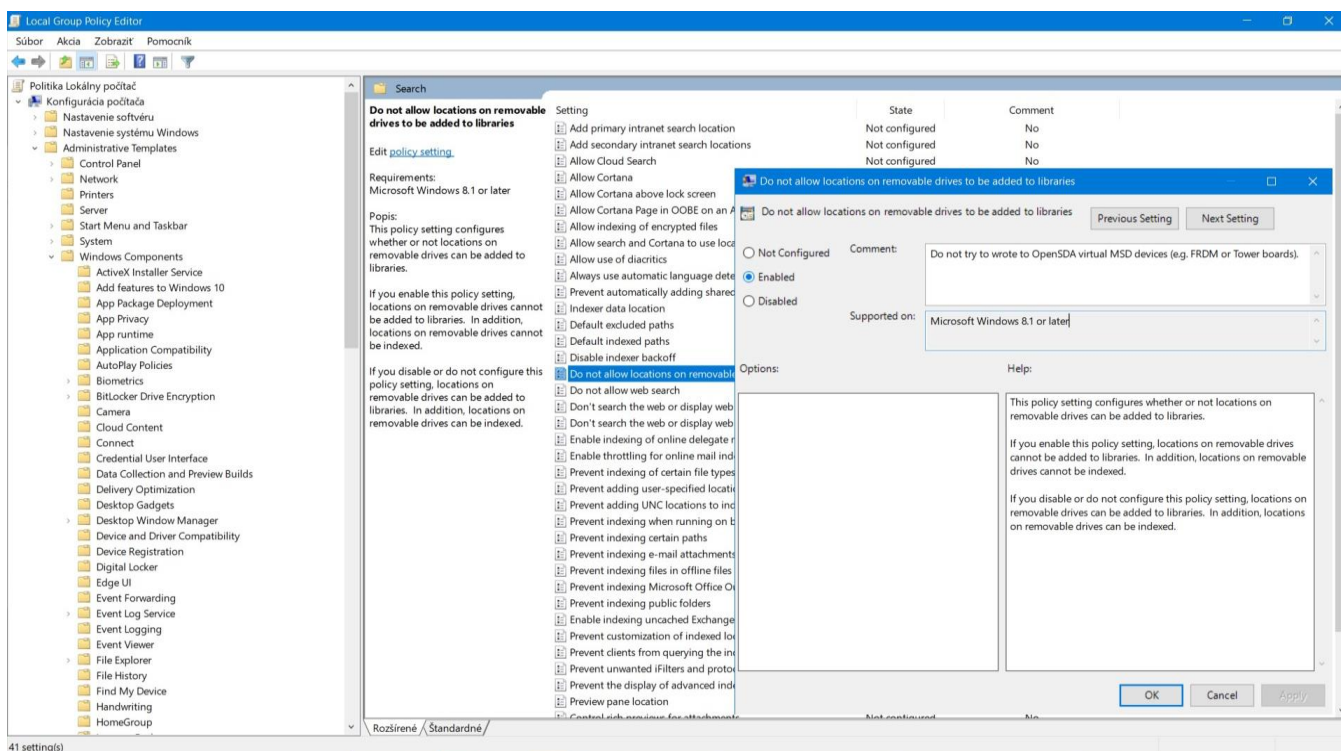


Obrázok 3.8 zapojenie micro USB do dosky FRDM-K64F

Nadmernou komunikáciou sa rozumie, Windows 8 a vyššie operačné systémy, ktoré získavajú informácie o nosiči, teda sa pokúšajú indexovať a katalogizovať pamäťové zariadenie.

„V tomto prípade sa uskutočnil zápis rôznych typov súborov do pamäte zariadenia, kým sa pamäť nezahltila úplne a nedošlo k zablokovaniu dosky.“ (Styger, 2016).

Keď už je zariadenie pripravené na update, otvorí sa Bootloader priečinok a vloží sa novšia verzia bootloadera a firmvér. To sa urobí za pomoci stránky (Pemicro, 2020) ako je na obrázku 3.10, ktorá je priamo určená na updaty pre NXP OpenSDA debug/programming interface. Tam sa stiahne zip súbor „Firmware Apps.zip“, ktorý obsahuje OpenSDA Firmware (MSD & Debug) ďalej sa stiahne a nainštaluje „PEDrivers_install.exe“, ovládač, ktorý slúži na pridelenie COM portu pre dosku. Čím sa umožní aplikáciám komunikácia cez MCU UART priamo s používaným zariadením. Je dôležité aby bolo počas spúšťania driveru, zariadenie MCU Kinetis pripojené k počítaču.

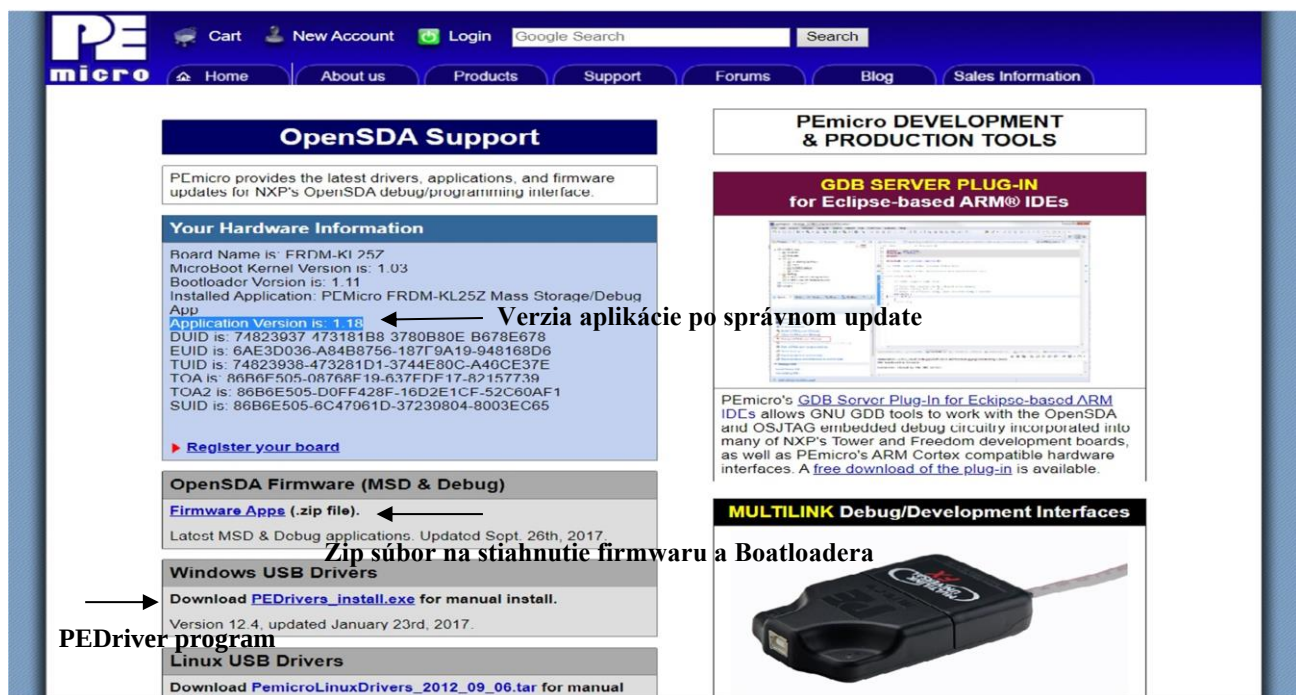


Obrázok 3.9 nastavenie zákazu pridávania pamäte na vymeniteľné disky

Po rozbalení stiahnutého zip súbor, sa v ňom nachádza jeden zip súbor s názvom „OpenSDA_Bootloader_Update_App_v111_2013_12_11.zip“, ktorý je potrebné rozbaľiť a vložiť do Bootloader priečinka. Po vložení sa počká pár sekúnd, vytiahne sa

micro USB a znova sa vloží do SDA USB portu bez stlačenia RESET. Týmto updatom nastala viditeľnosť zariadenia ako vysúvacie veľkokapacitné zariadenie pre Windows 10. Znova sa doska odpojí a pripojí sa na Bootloader mód. Tentokrát sa prekopíruje súbor „MSD-DEBUG-FRDM-K64F_Pemicro_v114.bin“ (v prípade sa podľa názvu zvolí aktuálna vývojová doska) do Bootloader priečinka, opäť je potrebné počkať pár sekúnd, kým sa súbor načíta a odpojíme zariadenie. Teraz sa môže zariadenie pripojiť bez stlačenia RESET a v počítači sa zobrazí názov pripojenej dosky MCU Kinetis ako pamäťové zariadenie USB.

To znamená, že doska bola úspešne odblokovaná. Pri pripojení dosky FRDM-KL25Z, je možnosť skontrolovať informácie o nainštalovanej verzii firmvéru pomocou odkazu SDA_INFO priamo na stránke (Pemicro, 2020), ako je znázornené na obrázku 3.10.

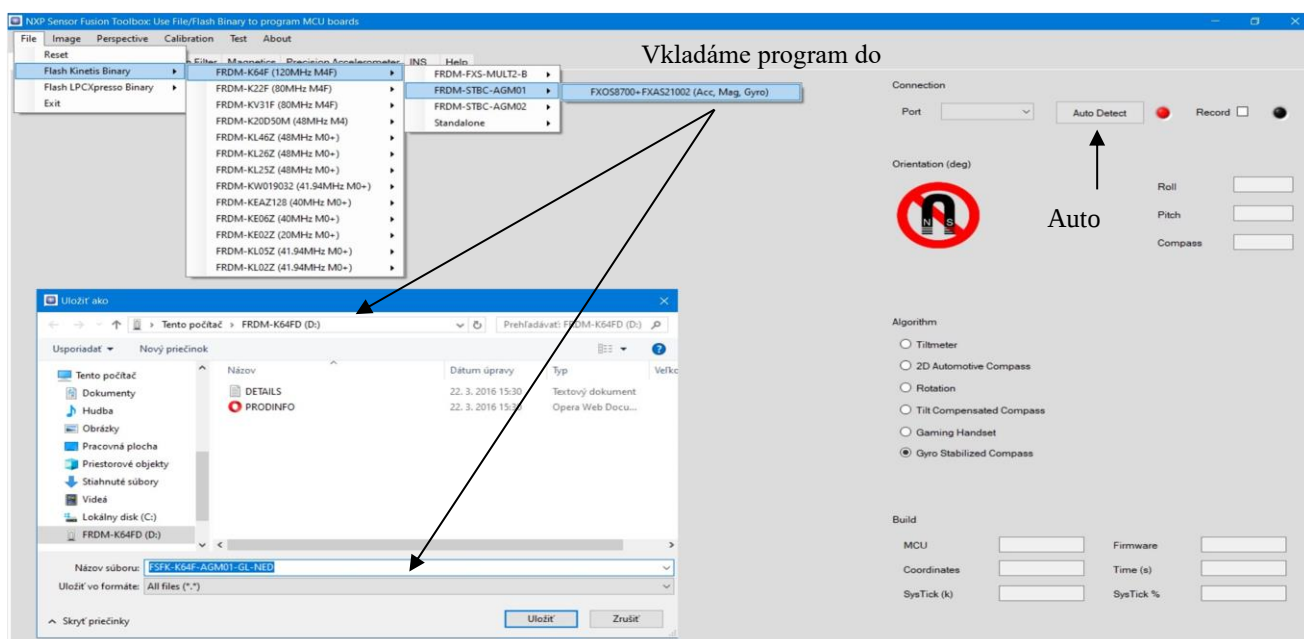


Obrázok 3.10 PEmicro stránka (Pemicro, 2020)

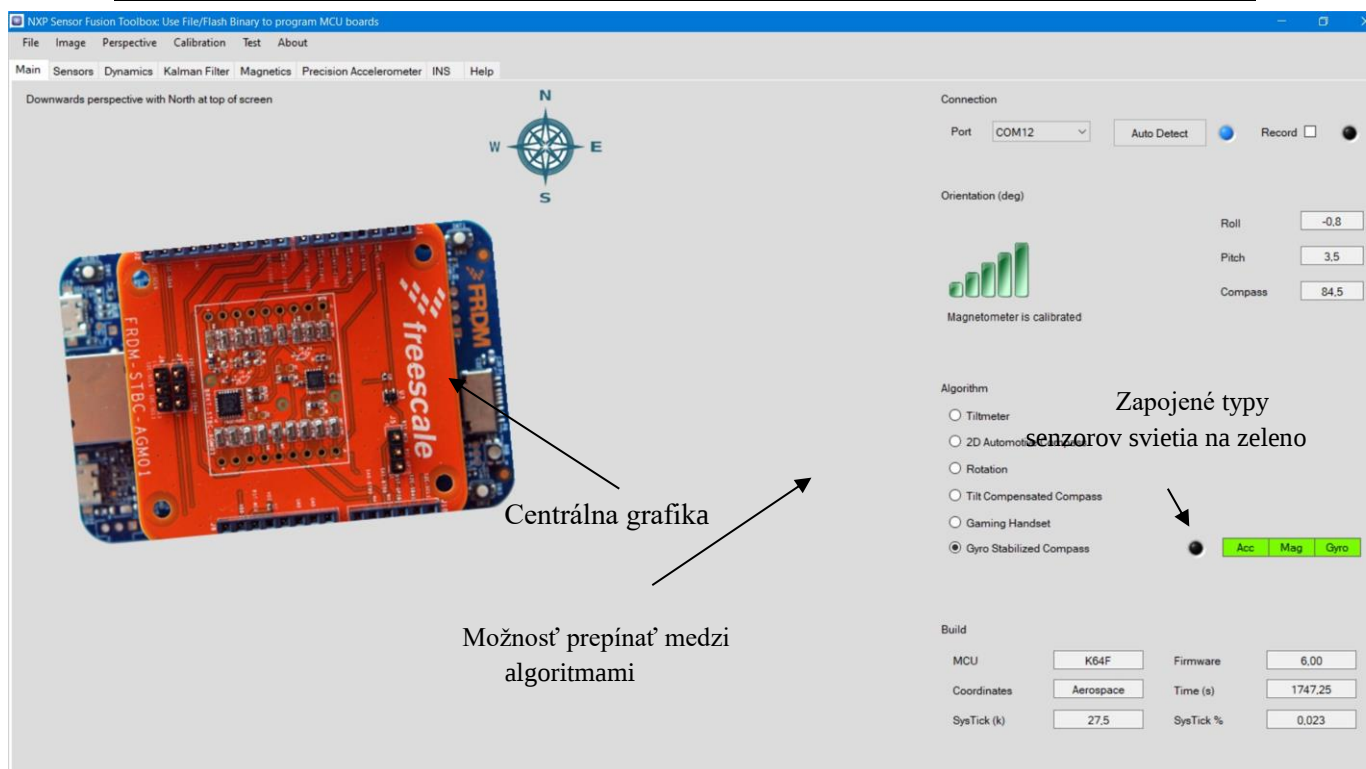
Keď už je doska MCU Kinetis pripravená, je potrebné stiahnuť a nainštalovať aplikáciu Sensor Fusion Toolbox priamo zo stránky výrobcu MCU dosiek FRDM (Toolbox, 2006-2020). Tu je potrebná registrácia, ktorá je zadarmo. Vypíšu sa osobné údaje a v poličku Full Company Name sa vyhladá inštitúcia v ktorej sa užívateľ nachádza. Po úspešnej registrácii sa otvorí prístup, k rôznym softvérom, datasheetom, aplikáciám a podobne. Zapojí sa FRDM-STBC-AGM01 Shield Board do FRDM-K64F

Bakalárska práca

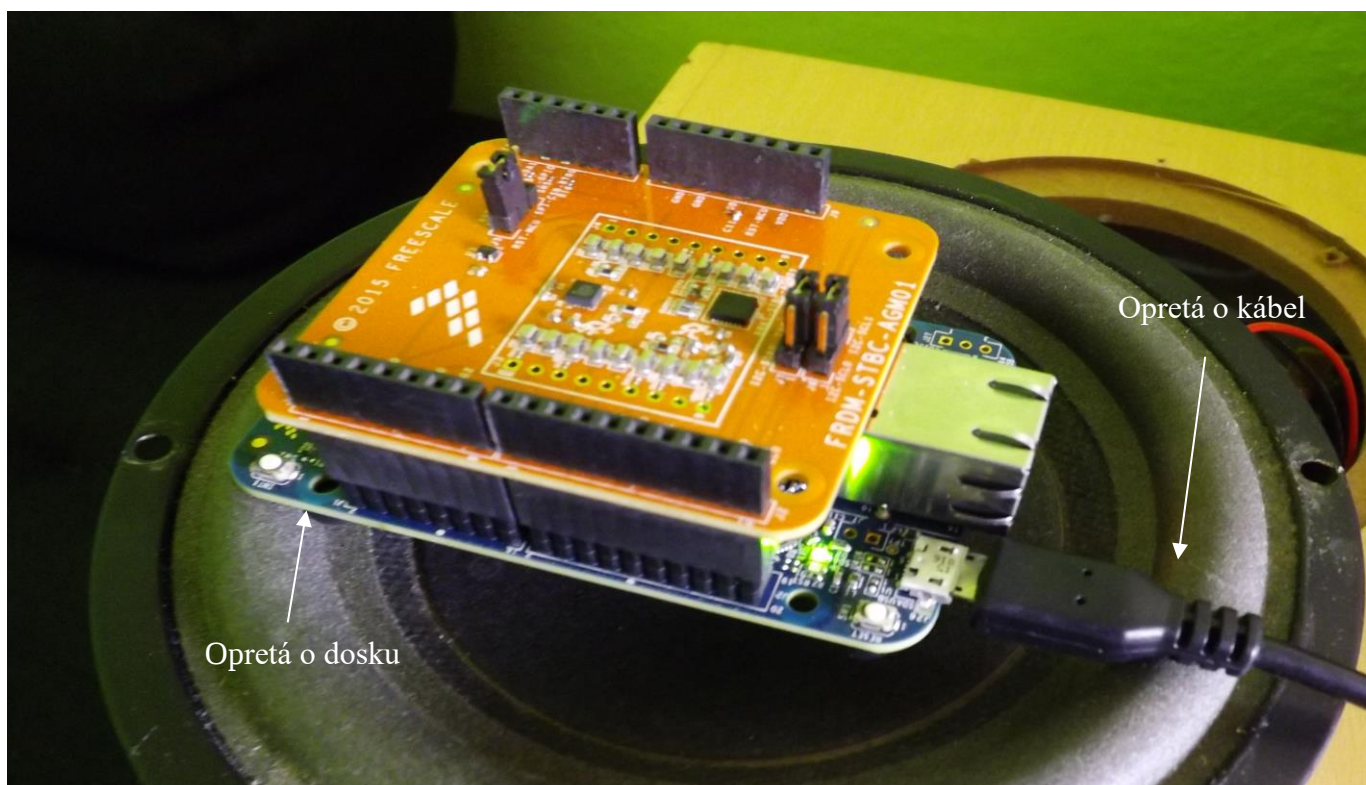
MCU Kinetis dosky a zapoja sa do počítača cez SDA USB. Otvorí sa nainštalovaná aplikácia a postupuje sa podľa obrázka 3.11, kde sa musí najprv vložiť do zariadenia predom spracovaný program, s ktorým bude aplikácia pracovať. Po vložení programu, vyskočí upozornenie o úspešnom spracovaní údajov. Klikne sa na Auto Detect tlačidlo, aplikácia vyhľadá Port COM v ktorom sa nachádza pripojené MCU zariadenie a automaticky ho pripojí. Zobrazí sa okno ako je na obrázku 3.12. Teraz je možné plnohodnotne pracovať s aplikáciou. Pri tejto aplikácii sa ako základ bude používať funkcia Record, čím sa budú zaznamenávať hodnoty MEMS senzorov do textového súboru a tie sa následne spracujú do grafu v programe Excel. Ako testovacie zariadenie sa použije nízkofrekvenčný reproduktor (subwoofer), do ktorého sa bude nahrávať sínusový frekvenčný tón o veľkosti 20-250 Hz, na ktorý je určený. Doska FRDM-K64F spolu so Shield Boardom FRDM-STBC-AGM01 sa položí na reproduktor, ako je znázornené na obrázku 3.13 Tým sa ale oprel kábel a doska o reproduktor, čo môže spôsobiť skreslenie a nepresné opakované vizualizácie. Nakoľko pri vibráciách spôsobených pustením tónov o veľkosti niekoľko stoviek Hz, sa zariadenie začalo posúvať.



Obrázok 3.11 vkladanie kódu pre prácu so zariadením FRDM-K64F v aplikácii NXP Sensor Fusion Toolbox

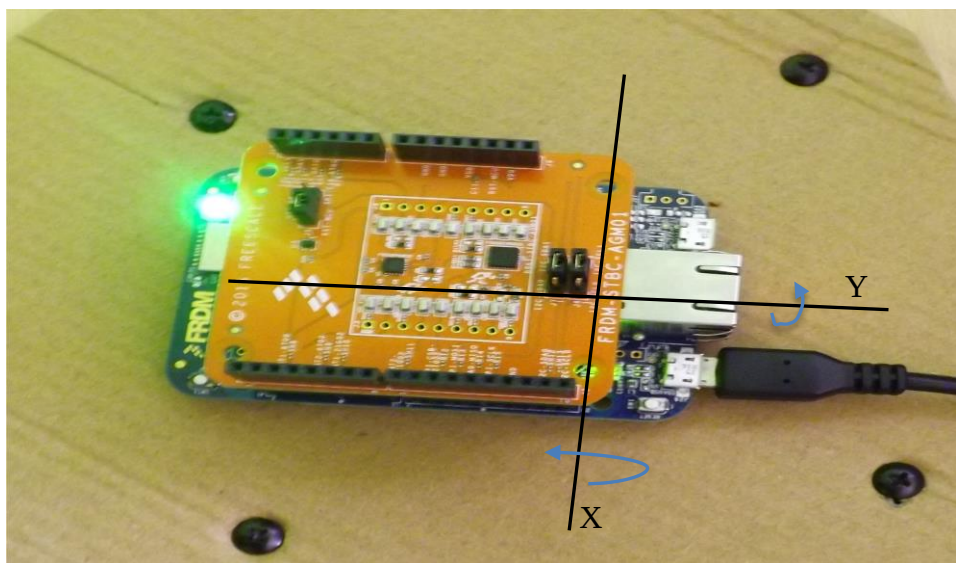


Obrázok 3.12 zapojené zariadenie FRDM-K64F a FRDM-STBC-AGM01 v aplikácii NXP Sensor Fusion Toolbox



Obrázok 3.13 meracie dosky FRDM položené na reproduktor

Tento problém sa vyriešil primontovaním kartónového papiera, čím sa zariadenie stalo stabilnejším.



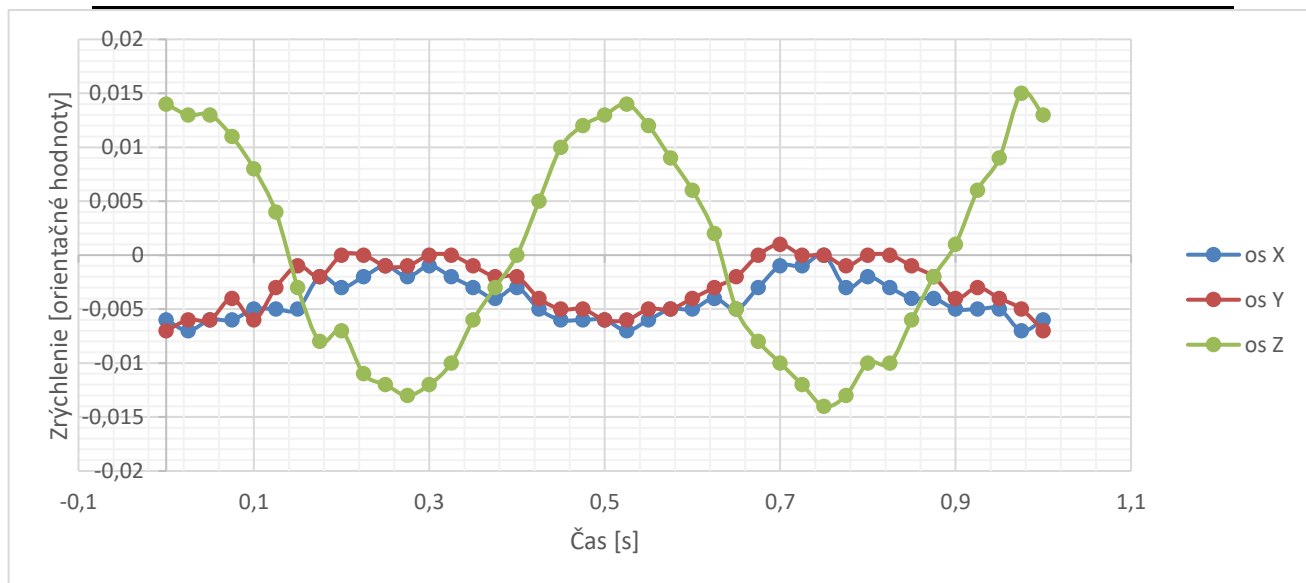
Obrázok 3.14 provizórne vibračné zariadenie

Zvolila sa frekvencia o veľkosti 48 Hz. Pri MCU doske FRDM-K64F sa získané hodnoty vložili do aplikácie Excel, kde sa museli ešte pripočítať k počiatočným hodnotám vynásobeným -1. (10), (11), (12). Tieto počiatočné hodnoty sa vyskytli na použitej vibračnej doske, keďže hodnoty akcelerometra neboli rovné 0, ako je tomu na obrázku 3.16. Konečné hodnoty sa preniesli pomocou Excel aplikácie do obrázku 3.15, kde sa pozoruje sínusový priebeh. Najvýraznejšie zmeny nastali pri meraní osi Z, čo môže byť spôsobené subwooferom, ktorý na výrobu zvukových vln a teda aj frekvencií využíva pohyb v osi Z. Podľa grafu tiež pozorujeme, že vznikol fázový posun medzi osami Z a X,Y presne o 180°. To znamená, že sa zariadenie od osi Y otáčalo smerom doprava a od osi X smerom doľava, tak ako je znázornené na obrázku 3.14. Tabuľku k obrázku 3.15, je možné vidieť v prílohe A.

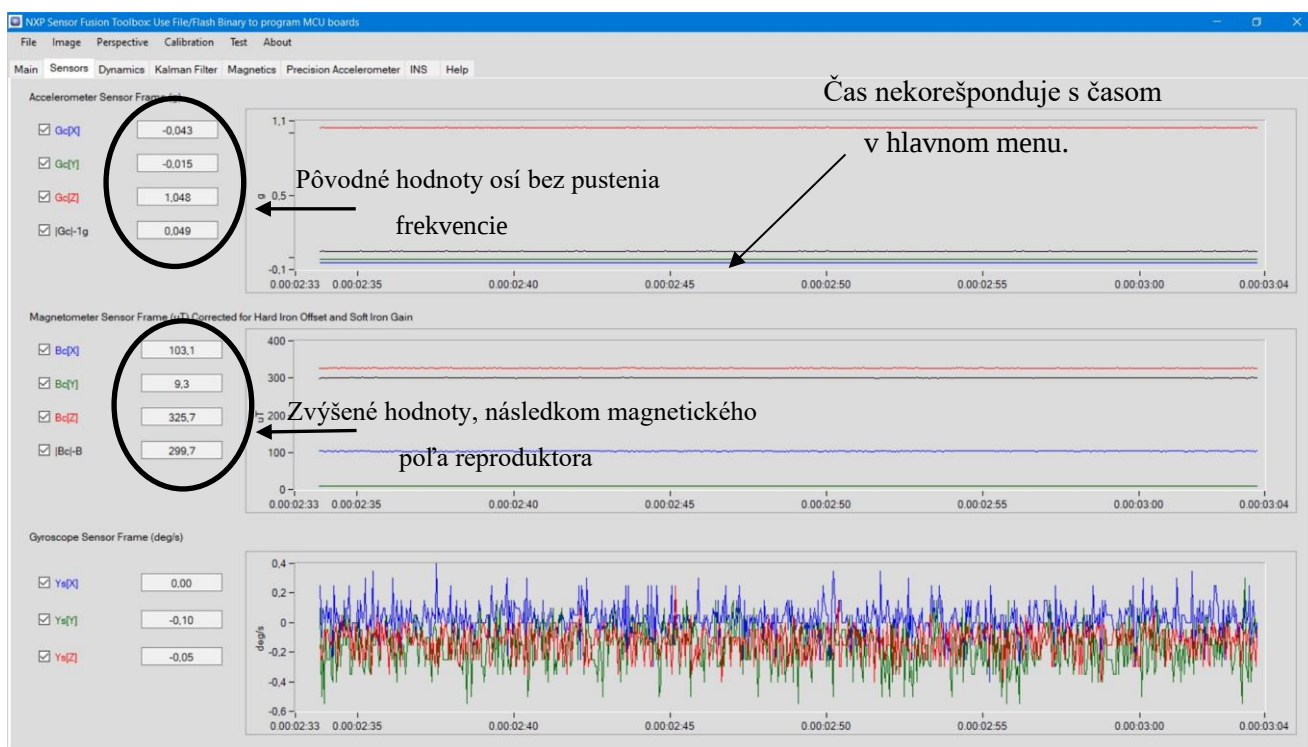
$$-X_{\text{pôvodné}} + X_{\text{namerané}} = X_{\text{finálne}} \Rightarrow -(-0,043) + (-0,049) = -0,006 \quad (10)$$

$$-Y_{\text{pôvodné}} + Y_{\text{namerané}} = Y_{\text{finálne}} \Rightarrow -(-0,015) + (-0,022) = -0,007 \quad (11)$$

$$-Z_{\text{pôvodné}} + Z_{\text{namerané}} = Z_{\text{finálne}} \Rightarrow -(1,048) + (1,062) = 0,014 \quad (12)$$



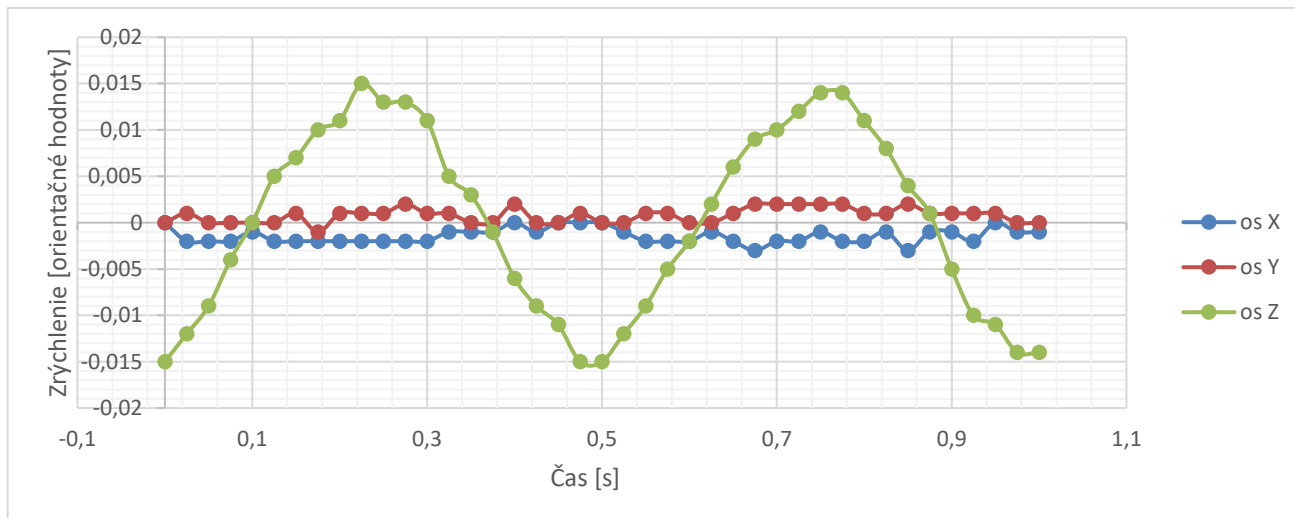
Obrázok 3.15 vizualizácia orientačných hodnôt zrýchlenia akcelerometra, doska K64F so Shield Boardom, hmotnosť 55g, budiaca frekvencia 48Hz



Obrázok 3.16 stav hodnôt na začiatku merania dosky FRDM-K64F

Pre porovnanie orientačných hodnôt sa použila doska FRDM KL25Z so základným zabudovaným akcelerometrom. Postup je rovnaký ako pri predchádzajúcom MCU zariadení od NXP. Zariadenie sa zapojí do počítača, skopíruje sa do zariadenia program z aplikácie, stlačí sa „Auto Detect“, spustí sa rovnaká frekvencia, MCU Kinetis doska sa položí na rovnaké miesto a zaznamenávajú sa údaje pomocou funkcie „Record“. Získané

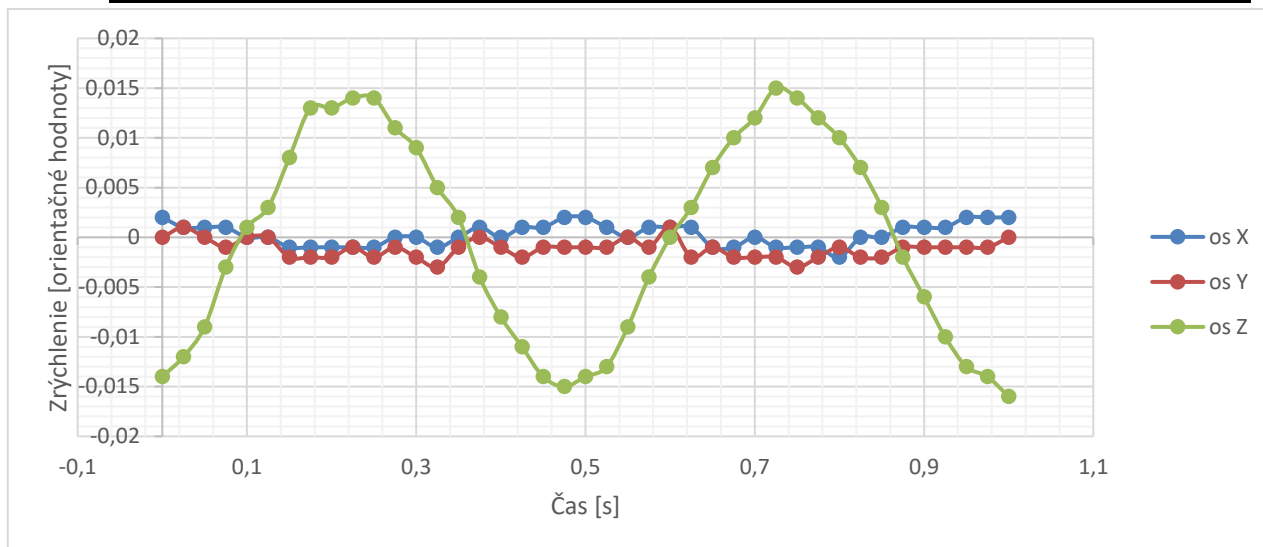
hodnoty sa prepíšu do Excel aplikácie, odčítajú sa pôvodné získané hodnoty pri nulovej frekvencii a prepočítané orientačné hodnoty sa vložili do obrázka 3.17.



Obrázok 3.17 vizualizácia orientačných hodnôt zrýchlenia akcelerometra, doska KL25Z, hmotnosť 19g, budiaca frekvencia 48Hz

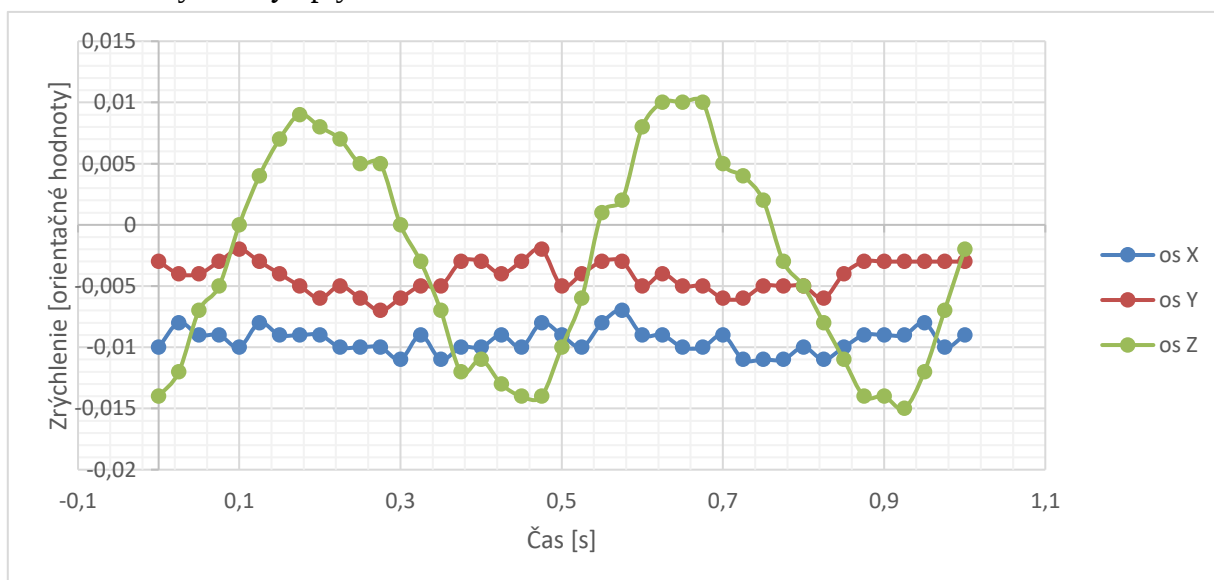
Tabuľka pre obrázok 3.17 sa nachádza v prílohe B. Keď sa porovnávajú hodnoty Z osí z dvoch grafov, ich hodnoty dosahujú takmer rovnaké maximá a minimá. To znamená, že presnosť týchto dvoch akcelerometrov je naozaj podobná, hoc zariadenie FRDM-KL25Z je lacnejší produkt, čo je možno vidieť pri získavaní hodnôt pri osiach X a Y. Preto sa vykonala ešte jedna vizualizácia s týmto zámerom a MCU doskou FRDM KL-25Z, nakoľko ich váha, ktorá pôsobila na vibračnú dosku nebola rovnaká, čo mohlo viesť k výraznému skresleniu výsledkov pri pohybe MCU. Presnejšie doska K64F má s prídavným Shield Boardom STBC-AGM01 váhu 55 gramov a doska KL25Z len 19 gramov. Po zaťažení a zväžení mala doska KL25Z pre nové meranie 61 gramov. Výsledok je nižšie v obrázku 3.18. Tabuľka pre obrázok 3.18 sa nachádza v prílohe C.

Opäť je vidno ako sa maximálne hodnoty osi Z, pohybujú okolo hodnoty zrýchlenia 0,0015g zrýchlenia s chybou merania $\pm 0,0001g$. Percentuálne to vychádza na 6,667%. Pričom podľa Datasheetu (FXOS8700CQ_datasheet, 2017) má snímač zrýchlenia v Shield Boarde FXOS8700CQ danú senzitivitu v rozmedzí od 0.244 mg/LSB do 0.976 mg/LSB, s presnosťou senzitivity $\pm 2,5\%SEN_{ACC}$. Podobne je na tom aj snímač zrýchlenia MMA8451Q avšak s presnosťou senzitivity o niečo menej $\pm 2,64\%SEN_{ACC}$. (MMA8451Q_datasheet, 2017). To znamená, že aj pri snímaní pomerne nízkych vibrácií ako bolo ukázané je možné dostať priaznivé výsledky.



Obrázok 3.18 vizualizácia orientačných hodnôt zrýchlenia akcelerometra, doska KL25Z, hmotnosť 61g, budiaca frekvencia 48Hz

Nestabilita a skreslenie zrýchlenia v osiach X a Y je pravdepodobne spôsobené nedostatočným zrýchlením a teda zrýchlením, ktoré sa nenachádza v rozmedzí senzitivity použitého snímača. Samozrejme, neberie sa do úvahy mnoho ďalších faktorov, ako je napríklad teplota miestnosti, prechod vibrácií cez kábel, schopnosti nízko tónového zariadenia a podobne. Magnetické pole nízkofrekvenčného zariadenia nemá na merané hodnoty žiadny vplyv.



Obrázok 3.19 vizualizácia orientačných hodnôt zrýchlenia akcelerometra, doska KL25Z, hmotnosť 61g, budiaca frekvencia 148Hz

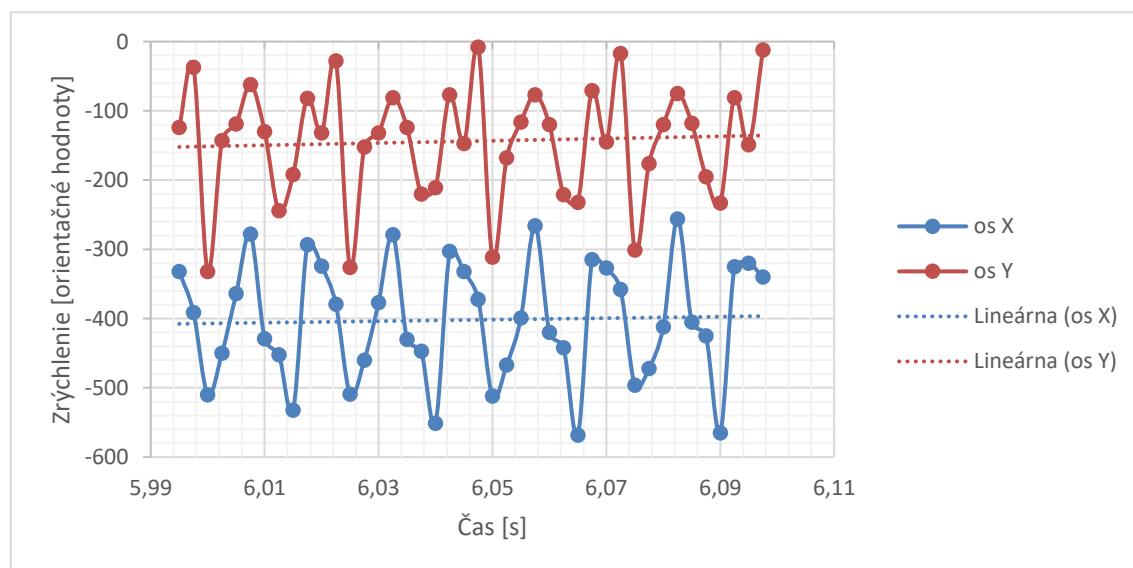
Ďalej sa otestovali frekvencie, pri ktorých by bola aplikácia schopná zaznamenávať vyššie zrýchlenie. Uskutočnilo sa ešte jedno demonštračné zaznamenávanie, tentokrát pri frekvenciách 148Hz pri zariadení FRDM-K64F so Shield Boardom. Pri tejto demonštrácii,

sa znížila hlasitosť na vibračnej doske. Výsledky sú spracované v obrázku 3.19 a v tabuľke v prílohe D.

V obrázku 3.19 je vidieť nepresnosti a skreslenia. Pri zvýšenej frekvencii, by sa očakávalo zvýšenie spracovaných hodnôt z akcelerometra. Avšak zrýchlenie orientačných hodnôt sa znížilo v dôsledku zníženia hlasitosti zvuku. Takže veľkosť maximálnej amplitúdy ovplyvňuje hlasitosť a dynamika, zatiaľ čo tvar krivky ako aj počet periód je určený frekvenciou signálu zvuku.

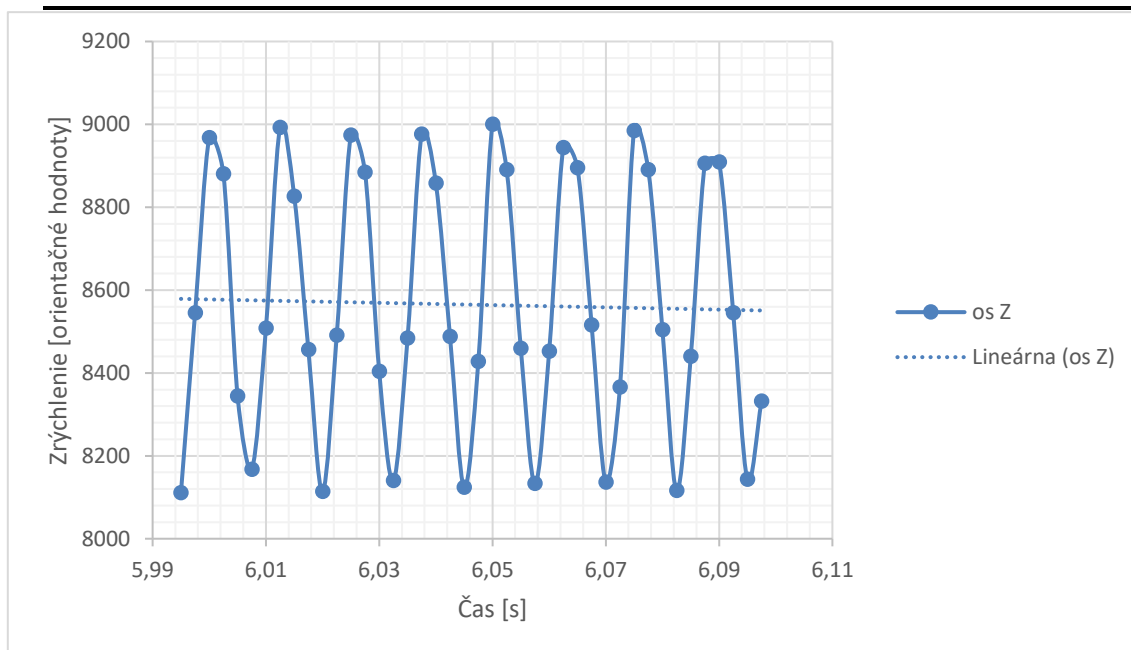
Ďalšia demonštrácia prebehla pomocou MCU dosky FRDM-K64F so Shield Boardom FRDM-STBC-AGM01 a tentokrát pomocou aplikácie Freedom Sensor Toolbox. Postupovať sa bude pri rovnakých podmienkach a frekvencii 48Hz. Zariadenie sa zapojí do počítača, otvorí sa aplikácia a zvolí sa program pre 9-osú orientáciu. MCU doska sa pootočí v niekoľkých osiach, čím sa vložia vstupné údaje pre magnetometer a stlačením tlačidla Start, získavame hodnoty z dosky MCU.

Po spustení subwoofera a nahrávania dát, sme preniesli nasledujúce hodnoty do obrázka 3.20.



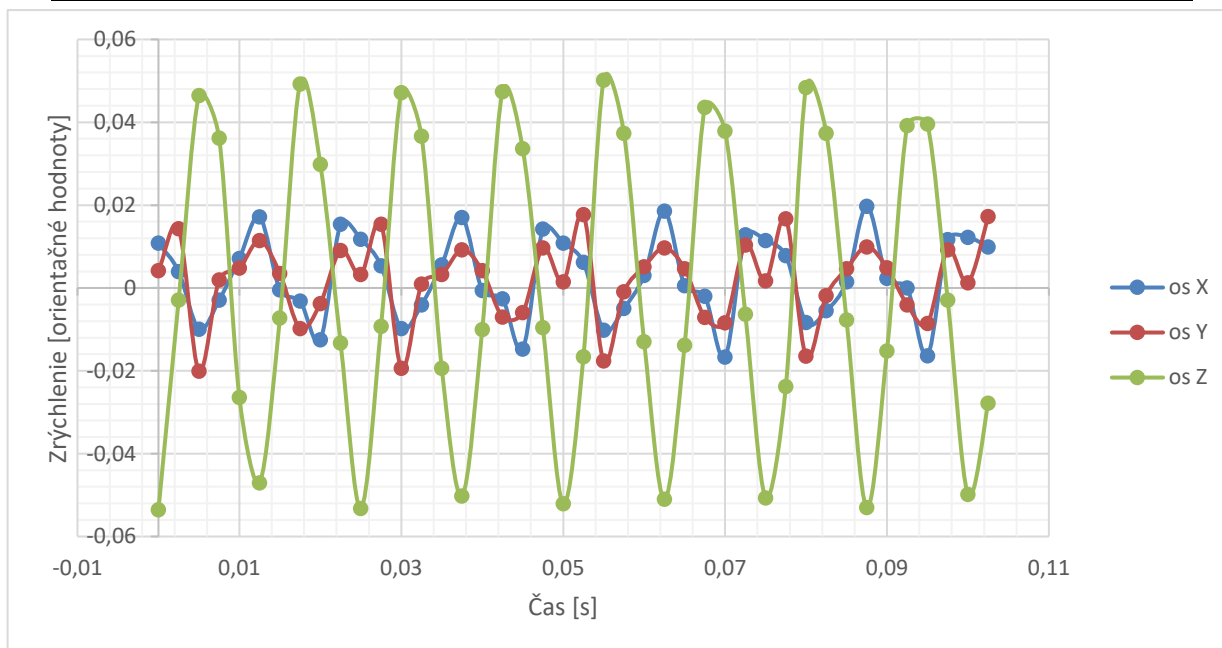
Obrázok 3.20 vizualizácia orientačných hodnôt akcelerometra na osiach X a Y, doska K64F so Shield Boardom, budiaca frekvencia 48Hz, Freedom Sensor Toolbox

V obrázku 3.20 sú vynesené skreslené hodnoty z merania osí X a Y, ktoré majú stúpajúcu tendenciu ako ukazuje lineárna priamka. Zatiaľ čo v obrázku 3.21 má os Z klesajúci charakter sínusoidy. Taktiež pozorujeme veľký rozdiel v posunutí stupnice, ktorý nemôžeme ovplyvniť v aplikácii. Pravdepodobne, je v aplikácii zapnutý nejaký modul, ktorý posúva stupnicu o určitú hodnotu.



Obrázok 3.21 vizualizácia orientačných hodnôt osi Z, doska K64F so Shield Boardom, sbudiaca frekvencia 48Hz, Freedom Sensor Toolbox

Najprv sa upraví získané hodnoty tak, ako pri predchádzajúcich prípadoch v rovniciach 10,11 a 12. Následne sa predelia pôvodnou hodnotou zrýchlenia na osi Z, s veľkosťou 8570g, čo predstavuje zrýchleniu 1g. Dostaneme skreslenú vizualizáciu obrázka 3.22. Pri porovnaní s obrázkom 3.15 je vidieť viacero zmien. Zatiaľ čo aplikácia NXP Sensor Fusion Toolbox vykonala a zapísala 40 hodnôt za jednu sekundu, tak aplikácia Freedom Sensor Toolbox vykonala a zapísala 40 hodnôt za 10ms. Čo je o 6-násobne viac. Maximálne hodnoty všetkých osí pri aplikácii Freedom Sensor Toolbox dosahujú vyššie zrýchlenia ako pri meraní pôvodnou aplikáciou. Teoreticky sa získavali zo zariadenia rovnaké hodnoty, len v iných mierach. To je spôsobené nízkou hlasitosťou a teda nízkym zrýchlením, skreslenými výpočtami, posunutou mierkou aplikácie a prenosom veľkej časti vibrácií cez pripojený kábel. Pričom by najlepšie bolo využiť funkciu Bluetooth. Avšak na tento postup nebol dostatok času a ani rozsah. Musíme pripomenúť, že cieľom tejto úlohy nebolo presné spracovanie údajov, ale poukázanie na rozdiely medzi rôznymi zariadeniami a aplikáciami ako aj overenie ich funkčnosti a použitie. Nakoľko pri situácii pandémie COVID-19 nebol prístup k lepšiemu zariadeniu.



Obrázok 3.22 vizualizácia orientačných hodnôt zrýchlenia pri upravenej stupnici, doska K64F so Shield Boardom, budiaca frekvencia 48Hz, Freedom Sensor Toolbox

MCU doska FRDM-K22F sa ťažko zablokovala pri prechádzaní medzi openSDA a mbed módom, keď sa kopírovali správne firmvéry.

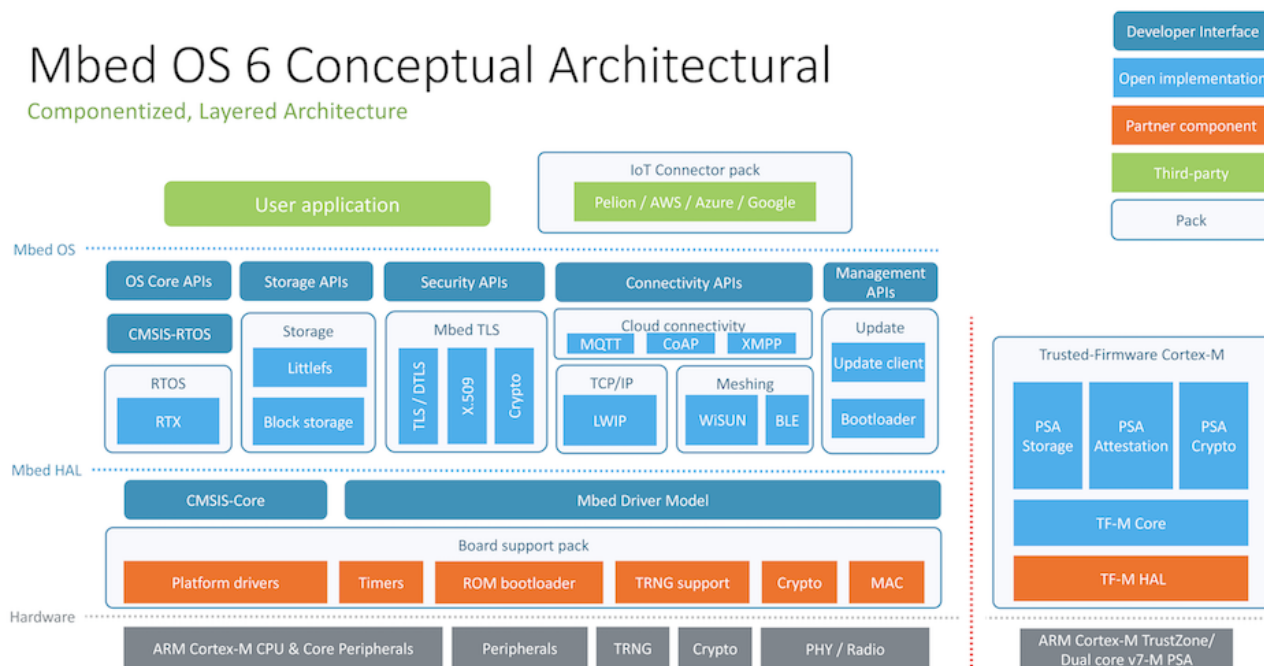
Kedy došlo k neočakávanému odpojeniu zariadenia z USB, pri prenose dát. Či je odpojenie spôsobené systémom Windows 10 alebo už nesprávnym nainštalovaním novšieho boot loadera by si vyžadovalo hlbší dohľad. Pri ťažkom zablockovaní MCU dosky, nie je jednoduché riešenie a je potrebné odblokovať zariadenie cez výstup JTAG alebo SWD. Na tento problém poukazuje (Styger, 2016). Jedna možnosť ponúka odblokovať zariadenie pomocou pripojenia ďalšieho zariadenia na ktorom je nový boot loader systém cez JTAG alebo SWD výstup. Tento postup si nevyžaduje JTAG debugger. Použitie JTAG debuggera je druhá možnosť pre odblokovanie lenže pri danej situácii a cene tohto zariadenia, to nie je prístupné. Hoc, pri viacerých doskách by sa JTAG debugger rozhodne oplatil. Nefunguje totiž to len na odblokovanie bricked stavu ale aj na programovanie, ktoré by sme si radi pri dostatku času vyskúšali. Prvá možnosť sa teda javí ako najlepší nápad, hlavne ak máme k dispozícii viacero MCU dosiek s novým boot loaderom. Problém nastáva v nedostupnosti a cene JTAG prepojovacích káblov. Potom by sme jednoducho postupovali do zablockovaného zariadenia priamo, cez funkčné zariadenie nakoľko sú dosky dostatočne kompatibilné.

3.3 Diskusia k overeniu vybraného záznamového zariadenia a vyhodnocovacieho softvéru

Overili sa dve záznamové zariadenia s MEMS snímačmi a dva vyhodnocovacie softvéry. Po ťažkom zablokovaní dosky FRDM-K22F sa s ňou ďalej nemohlo pracovať, ale do budúcnosti, keď bude možnosť a prístup k potrebným súčiastkam, dostatku času a JTAG Debuggeru, bude sa dať túto dosku odblokovať a úspešne spojzdať, pomocou jedného z postupov spomenutých v praktickej časti. Práca s doskou FRDM-K64F bola jednoduchá, hodnoty pomerne presné aj pri viacerých pokusoch merania. Aj keď sa môže zdať problém s kompatibilitou medzi staršími zariadeniami od spoločnosti NXP Semiconductors a Windowsom 10 banálny, predstavuje riziko pre ľudí, ktorí nedisponujú staršími operačnými systémami a používajú staré MCU FRDM dosky. Spôsob odomknutia MCU pre Windows 10 bol opísaný podrobne a nemal by nastať problém s updatom Boot Loadera, čím sa zviditeľní zariadenie. Pokúšali sme sa spojzdať zariadenie na operačnom systéme Windows 10 pomocou virtuálneho prostredia „Oracle VM Virtual Box“ (Oracle, 2020) s nainštalovaným operačným systémom Windows 7, pričom by starší systém nemal mať problém so spustením vývojových dosiek. Po nainštalovaní a spojzdení virtuálneho prostredia sme prišli na problém, kedy bolo treba pripojiť najprv zariadenie vo Windows 10, kde by ho operačný systém musel najprv rozpoznať a až potom by sa dalo pracovať so zariadením vo Windows 7. Kvôli nedostatku času, sme boli nútení tento nápad dočasne zavrhnúť.

Stretli sme sa s dvoma spôsobmi zablokovania zariadenia, teda bricked stav. Jedno zablokovanie, ľahšie, pri ktorom sa stačí dostať do Boot Loader módu a vložiť binárny kód nového firmvéru. Druhý, ťažký stav zablokovania, z ktorého sa nepodarilo dostať, bez pomocných zariadení. Dosky FRDM ponúkajú veľa možností interakcie a nespočetné množstvo využití. Aj keď sa nedajú použiť na vedecké účely, ako študijné materiály, by dokonale postačovali. Schopnosť pracovať s aplikáciami, takmer hneď po pripojení zariadenia je výborná pre začiatočníkov, ktorí sa zoznamujú s MEMS snímačmi a záznamovými zariadeniami. Rovnako tak by sa táto kombinácia dala využiť pri meraní akcelerometrom, gyroskopom či magnetometrom v laboratóriách, vyhodnocovaní chýb a následnom spracovaní údajov. Pre pokročilejšie predmety, kde by dochádzalo k programovaniu dosiek je tu možnosť funkcie firmvéru od spoločnosti arm Mbed, ktorý otvára ďalšie možnosti programovania a pracovania s doskami FRDM od NXP. Ako je

znázornené na obrázku 3.23. Je vidieť prepojenie s IoT, kde je možné prepojiť dosku s internetom a programovať kódy na internete pomocou Mbed online kompilera Mbed studio, vytvárať programy a vkladať ich do MCU dosky, ktorá pracuje s MbedOS operačným systémom.

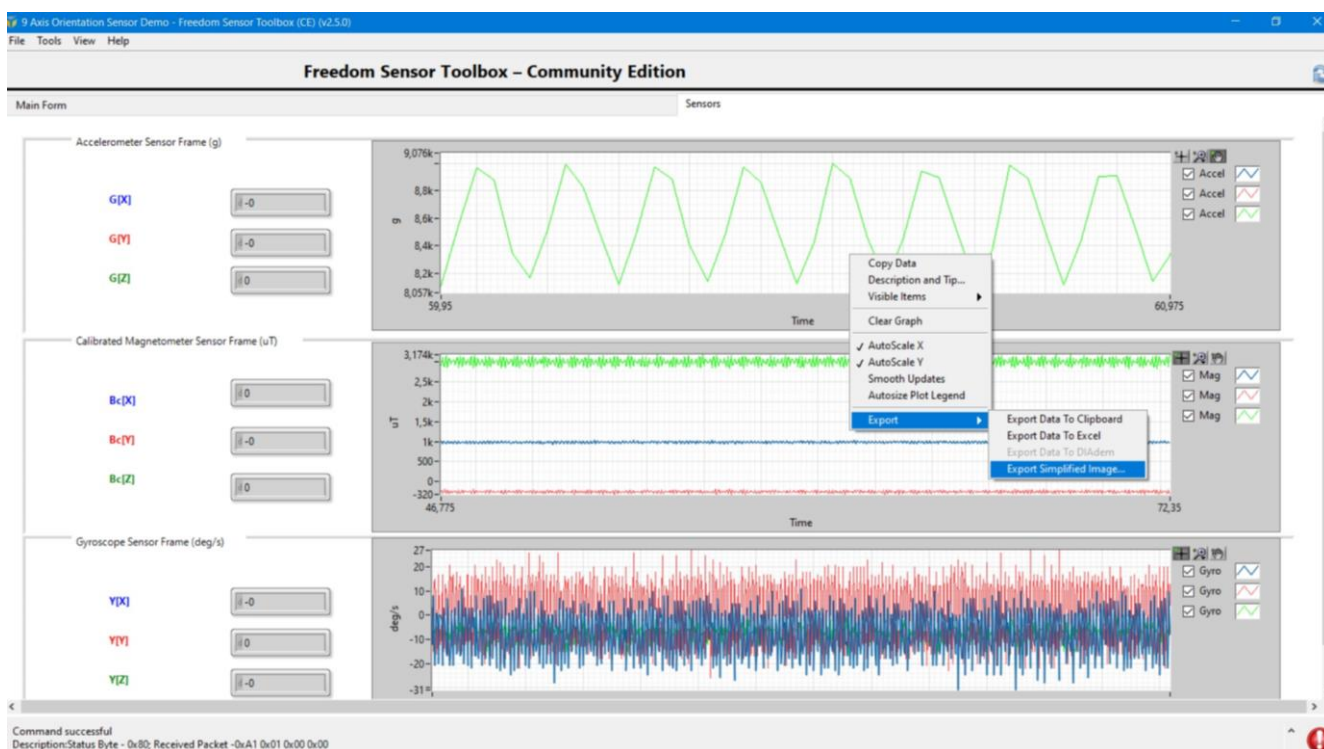


Obrázok 3.23 architektúra operačného systému Mbed (MbedOS architektúra png, 2020)

Taktiež poskytuje ochranu údajov šifrovaním a mnoho ďalších funkcií. Je to rýchly a lacný spôsob k prístupu programovania dosiek, bez zbytočných programov a zahlcovania dát v počítači. Okrem mbed sa môže pracovať vo vývojovom prostredí priamo od výrobcu NXP s názvom MCUExpresso, ktorý pracuje na báze ECLIPSE. Výhodou týchto dosiek je cena, ktorá sa pri doske FRDM-KL25Z pohybuje len okolo 15 eur. Pri práci s doskami sa zistilo, že sú pomerne spoľahlivé aj keď sa demonštrovali testovania s nižšími zrýchleniami. Horšia spoľahlivosť sa vyskytla pri práci s aplikáciami. NXP Sensor Fusion Toolbox aplikácia fungovala takmer bez problémov. Problém nastal pri ručnom vypisovaní, potrebných zaznamenaných dát jednotlivo z textového súboru. Časové údaje, ktoré sa používajú pri zapisovaní údajov do textového súboru nekorešpondujú s časovými údajmi použitými pri ich spracovaní. Rozdiely v časoch sa dajú pozorovať na hlavnej strane menu (obrázok 3.12) a pri porovnaní s

Bakalárska práca

vizuálnou časťou grafického priebehu na obrázku 3.16. Pri aplikácii Freedom Sensor Toolbox bol oveľa menší výber voliteľných MCU dosiek, dokonca nebolo možné pripojiť MCU k aplikácii bez pripojeného Shield Boardu. Ďalší problém nastal pri meraní dát a teda v mierke, kedy aj v pokojnom stave dosahovala hodnota zrýchlenia g pri osi Z, niekoľko tisíc. Pri porovnávaní síce dokázala spracovať táto aplikácia viac dát za jednotku času, avšak hodnoty sa pomerne dosť líšili aj po prepočítaní mierky, nakoľko hodnoty pri niekoľkých tisícoch sa ťažko priemerovali a zaokrúhľovali, vznikli veľké rozdiely a tým aj väčšie skreslenia. Ako veľká výhoda tejto aplikácie sa dá považovať jej možnosť zastaviť čas. Pričom sa mohlo pracovať so získanými hodnotami, ukladať si presné časové úseky, či si dokonca uložiť vykreslené hodnoty do „bmp.“ súboru ako je možné pozorovať na obrázku 3.24.



Obrázok 3.24 práca s programom Freedom Sensor Toolbox, ukladanie údajov a bitovej mapy

Pôvodný plán testovania MCU dosiek sa mal uskutočniť na vibračnom stole poskytnutom v laboratóriu KME FEIT UNIZA (vibračný stôl Bruel Kjaer Vibration Exciter Type 4809). Avšak kvôli pandémie COVID-19 nebolo možné pracovať v prostredí laboratória KME. Aj napriek tomu sa podarilo nahradiť tento vibračný stôl pomocou nízko frekvenčného zariadenia (subwoofera). Ten síce nedosahoval vysoké

zrýchlenia, ale dostatočné na opakované vizualizácie. Dostali sme pomerne prijateľné hodnoty a vizualizácie, ktoré nám na overenie funkčnosti MCU dosiek a príslušných aplikácií na Windows 10 postačili. V budúcnosti by bolo možné pokračovať v riešení pomocou virtuálneho prostredia. Pracovať s prostredím mbed a debuggovať či programovať MCU Kinetis dosky. Využiť možnosť Bluetooth a vykonať niekoľko druhov meraní pre spracovanie presnosti a chýb merania. Čím by sa vytvorili dostatočné prostriedky pre výučbu s doskami FRDM.

Záver

Predmetom bakalárskej práce bolo navrhnuť využitie záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS v mechatronike. Ako hlavný cieľ práce, bolo spojzdníť zariadenie na báze prvkov MEMS v operačnom systéme Windows 10, čo sa podarilo v kapitole 3.2.

V kapitole 1 sa vymedzili a opísali základné pojmy v predmetnej oblasti, ktoré sa venovali mechatronickým systémom ako aj MEMS snímačom, ktoré tvoria v dnešnej dobe základ modernej elektroniky. Medzi MEMS snímače sa zaradil akcelerometer, gyroskop a magnetometer. Opísali sa záznamové zariadenia, IoT (internet vecí) a jednotka IMU (inerciálna meracia jednotka).

V kapitole 2.1 a 2.2 sa analyzovalo nasadenie MEMS snímačov pre mechatronické aplikácie, kde všade sa vyskytujú a načo sa používajú. Ako príklad sa uviedli bežné aplikácie ako sú airbagy, trochu netradičné použitie MEMS snímačov bolo v mikro-elektromechanických systémov (MEMS) inerciálnych senzorov pre navádzanie, navigáciu a riadenie (GNC) autonómneho bezpilotného lietadla (UAV), ktoré sa používa v armáde, či zisťovanie poruchy zariadení pomocou vibrácií.

V kapitole 2.3 sa popísali spôsoby kalibrácie snímačov na báze prvkov MEMS pri akcelerometri, gyroskope a magnetometri.

V kapitole 3 sa popísali vybrané záznamové zariadenia ako aj softvér na spracovanie údajov. Úspešne sa overila funkčnosť vybraného záznamového zariadenia na báze prvkov MEMS a vyhodnocovacieho softvéru. Práca bola završená otestovaním akcelerometrov dvoch zariadení a dvoch aplikácií na vyhodnotenie raw výsledkov, pomocou nízko-frekvenčného zariadenia. Navrhlo sa použitie týchto zariadení na edukačné účely a možné vylepšenia práce v prípade pokračovania. Domnievam sa, že som hlavný cieľ práce a aj čiastkové ciele práce splnil.

Elektronické prílohy k tejto záverečnej práci sú na priloženom DVD a nachádzajú sa aj na linku na Google Drive :

<https://drive.google.com/drive/folders/1Hkt5yfPw2pk4gRXg1AVDbxfsKjTejdeD?usp=sharing>

Zoznam použitej literatúry

- ACADEMICA. 1987.** *Malá Československá encyklopedie.* Praha : s.n., 1987. 02/76-0605-21-095-87.
- Bolton, W. 2015.** *Mechatronics Electronic control systems in mechanical and electrical engineering.* United Kingdom : Pearson Education Limited, 2015. s. 650. ISBN 978-1-292-07668-3.
- byte paradigm.** [Online] <https://www.byteparadigm.com/products/log-storm/log-storm-advanced-information/>.
- Corrado, Andrea. 2017.** github. *ARMmbed.* [Online] 28. 3 2017. <https://github.com/ARMmbed/mbed-os/issues/4053>.
- D’Emilia G. ; Gaspari A. ; Mazzoleni F. ; Natale E. ; Schiavi A. 2018.** Part 1: comparison among methods. *Calibration of tri-axial MEMS accelerometers in the low-frequency range.* 6. April 2018.
- Documentation, Micrium. 2020.** micrium. [Online] 2020. <https://doc.micrium.com/display/osiiidoc/The+Clock+Tick>.
- Driver NXP OpenSDAv2. 2020.** NXP Semiconductors. [Online] 2020. <https://www.nxp.com/design/microcontrollers-developer-resources/ides-for-kinetis-mcus/opensda-serial-and-debug-adapter:OPENSDA>.
- Dunn, William C. 2006.** *Introduction to Instrumentation, Sensors, and Process Control.* Norwood : ARTECH HOUSE, 2006.
- Fraden, J. 2010.** *Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications.* New York : Springer, 2010.
- FRDM-K22F. 2020.** NXP Semiconductors. [Online] 2020. <https://www.nxp.com/design/development-boards/freedom-development-boards/mcu-boards/nxp-freedom-development-platform-for-kinetis-k22-mcus:FRDM-K22F>.
- FRDM-K64F. 2020.** NXP Semiconductors. [Online] 2020. <https://www.nxp.com/design/development-boards/freedom-development-boards/mcu-boards/freedom-development-platform-for-kinetis-k64-k63-and-k24-mcus:FRDM-K64F>.
- FRDM-KE06Z. 2020.** Semiconductors NXP. [Online] 2020. <https://www.nxp.com/design/development-boards/freedom-development-boards/mcu-boards/freedom-development-platform-for-kinetis-k64-k63-and-k24-mcus:FRDM-KE06Z>.

boards/mcu-boards/freedom-development-platform-for-kinetis-ke06-mcus:FRDM-KE06Z.

FRDM-KL25Z. 2020. NXP Semiconductors. [Online] 2020.
<https://www.nxp.com/design/development-boards/freedom-development-boards/mcu-boards/freedom-development-platform-for-kinetis-kl14-kl15-kl24-kl25-mcus:FRDM-KL25Z>.

FRDM-STBC-AGM01. 2020. NXP Semiconductors. [Online] 2020.
https://www.nxp.com/part/FRDM-STBC-AGM01#./

Freedom_Sensor_Toolbox. 2020. NXP Semiconductors. [Online] 2020.
https://www.nxp.com/design/sensor-developer-resources/sensor-toolbox-sensor-development-ecosystem/freedom-sensor-toolbox-community-edition-sensor-evaluation-and-visualization-software:SENSOR-TOOLBOX-CE?&tab=Design_Tools_Tab.

FXOS8700CQ. 2020. NXP Semiconductors. [Online] 2020.
<https://www.nxp.com/products/sensors/motion-sensors/6-axis/digital-motion-sensor-3d-accelerometer-2g-4g-8g-plus-3d-magnetometer:FXOS8700CQ>.

FXOS8700CQ_datasheet. 2017. NXP Semiconductors. [Online] 25. 4 2017.
<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/FXOS8700CQ.pdf>.

Gad-el-Hak, M. 2006. *MEMS - Introduction and Fundamentals*. Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2006.

Guldan, A. 1988. *Mikroelektronické senzory*. prvá. Bratislava : ALFA, 1988. s. 253.

Huang Z. J., Fang J. C. 2005. Integration of MEMS Inertial Sensor-Based GNC of a UAV. *International Journal of Information Technology*. 2005.

Ida, N. 2014. *Sensors, Actuators, and their interfaces: A Multidisciplinary Introduction*. New Jersey : Edison, 2014. s. 761. 978-1-61353-195-2.

Ashton, K. 2015. *IoT*. 2015, ZDNet.

Julian W. Gardner, Vijay K. Varadan, Osama O. Awadelkarim. 2001. *Microsensors, MEMS, and Smart Devices*. Chichester : JOHN WILEY & SONS, 2001. s. 503. 0-471-86109-X.

Kempe, V. 2011. *Inertial MEMS Principles and Practice*. Cambridge : Cambridge university Press, 2011. 978-0-521-76658-6.

- KINETIS-SDK.** 2020. NXP Semiconductors. [Online] 2020.
<https://www.nxp.com/design/designs/software-development-kit-for-kinetis-mcus:KINETIS-SDK>.
- LED_status.** 2020. NXP Semiconductors. [Online] 2020.
<https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/OPENSDAUG.pdf>.
- Lenz J., Edelstein A.** 2006. Researchgate. *IEEE Xplore*. [Online] Júl 2006.
https://www.researchgate.net/publication/3431560_Magnetic_Sensors_and_Their_Applications.
- Liu, Ch.** 2012. *Foundations of MEMS*. Druhý. New Jersey : Pearson Education, 2012. s. 519-532. 978-0-13-249736-7.
- Looney, M.** 2010. A simple calibration for MEMS gyroscopes. [Online] 2010.
https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/GyroCalibration_EDN_EU_7_2010.pdf.
- Maluf N., Williams K.** 2004. *An introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. Druhý. Norwood : ARTECH HOUSE, 2004. s. 96-116. 1-58053-590-9.
- Mbed.** 2020. [Online] Mbed, 2020. <https://os.mbed.com>.
- MbedOS architektúra png.** 2020. *Arm mbed*. 2020.
- Merriam-Webster.** magnetometer. [Online] <https://www.merriam-webster.com/dictionary/magnetometer>.
- MKL25Z128VLK4.** 2020. NXP Semiconductors. [Online] 2020.
[https://www.nxp.com/part/MKL25Z128VLK4#/.](https://www.nxp.com/part/MKL25Z128VLK4#/)
- MMA8451Q.** 2020. NXP Semiconductors. [Online] 2020.
<https://www.nxp.com/products/sensors/motion-sensors/3-axis/2g-4g-8g-low-g-14-bit-digital-accelerometer:MMA8451Q>.
- MMA8451Q_datasheet.** 2017. NXP Semiconductors. [Online] 10. 3 2017.
<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MMA8451Q.pdf>.
- National instruments.** [Online] <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/>.
- Nihtianov S., Luque A.** 2014. *Smart sensors and MEMS - Intelligent devices and microsystems for industrial applications*. Sawston : Woodhead Publishing Limited, 2014. s. 538. 978-0-85709-929-7.
- NXP_Sensor_Fusion_Toolbox_app.** 2016. NXP Semiconductors. 2016. V6.00.
- Oracle.** 2020. Virtual Box. [Online] 2020. <https://www.virtualbox.org>.

- Paškala, Marek. 2019.** Predmet mechatronická a autotronická senzorika, UNIZA, zimný semester. 2019.
- Pavlásek, Pavel. 2019.** predmet mechatronika, UNIZA, zimný semester. 2019.
- Pawlak, Andrzej M. 2007.** *SENSORS AND ACTUATORS IN MECHATRONICS*. Boca Raton : CRC Press, 2007. s. 376. 978-0-8493-9013-5.
- Pemicro. 2020.** P&E Microcomputer Systems Inc. *Pemicro*. [Online] P&E Microcomputer Systems Inc., 2020. <https://www.pemicro.com/opensda/>.
- Piltan A., Piltan M., Ghodsi R. 2011.** MEMS Technology in Automotive Industry: Trends and Applications. *Researchgate*. [Online] 2011. https://www.researchgate.net/publication/228327686_MEMS_Technology_in_Automotive_Industry_Trends_and_Applications.
- Silva, Clarence W. de. 2010.** *Mechatronics A Foundation Course*. Boca Raton : CRC Press, 2010. s. 866. 978-1-4200-8211-1.
- Stanley, M. 2015.** element14. *Mining sensor data, Part 2*. 7. Máj 2015.
- Styger, Erich. 2016.** Bricking_and_recovering. *mcuoneclipse*. [Online] 1. 8 2016. https://mcuoneclipse.com/2016/08/01/bricking_and_recovering_opensda_boards_in_windows_8_and_10/.
- . **2016.** mcuoneclipseRecover_OpenSDA_Bootloader. *mcuoneclipse*. [Online] 26. 6 2016. <https://mcuoneclipse.com/2016/06/26/how-to-recover-the-opensda-v2-x-bootloader/>.
- Szynalski, T. P. 2020.** Online Tone Generator. [Online] 2020. <https://www.szynalski.com/tone-generator/>.
- Tod, M.D. 2014.** Sensor data acquisition systems and architectures. [aut. knihy] Lynch J.P., Sohn H. Wang M.L. *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*. 2014, s. 23-56.
- Toolbox, Sensor Fusion. 2006-2020.** NXP Semiconductors. [Online] 2006-2020. https://www.nxp.com/design/sensor-developer-resources/nxp-sensor-fusion:XTRSICSNSTLBOXX?&tab=Design_Tools_Tab.
- Tripathy, B.K. a Anuradha, J. 2017.** *INTERNET OF THINGS - Technologies, Applications, Challenges, and Solutions*. Prvá. Boca Raton : CRC Press, 2017. s. 9-13. 9781315269849.
- Vetelino J., Reghu A. 2011.** *Introduction to sensors*. Boca Raton : CRC Press, 2011.

Winer, K. 2017. Simple and Effective Magnetometer Calibration. [Online] 15. 08 2017.
[Dátum: 15. 08 2017.] <https://github.com/kriswiner/MPU6050/wiki/Simple-and-Effective-Magnetometer-Calibration>.

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som zadanú bakalársku prácu vypracoval samostatne, pod odborným vedením vedúceho bakalárskej práce Doc. RNDr. Juraja Pančíka, CSc. a používal som len literatúru uvedenú v práci. Súhlasím so zapožičiavaním bakalárskej práce.

V Žiline dňa 12. 5. 2020

podpis

Prílohová časť

Zoznam príloh

Príloha A: Tabuľka ku obrázku 15 K64F so Shield Boardom, hmotnosť 55g, budiaca frekvencia 48Hz	i
Príloha B: Tabuľka k obrázku 3.17 KL25Z, hmotnosť 19g, budiaca frekvencia 48Hz ...	ii
Príloha C: Tabuľka k obrázku 3.18 KL25Z, hmotnosť 61g, budiaca frekvencia 48Hz ..	iii
Príloha D: Tabuľka k obrázku 3.19 K64F so Shield Boardom, hmotnosť 55g, budiaca frekvencia 148Hz	iv
Elektronická príloha E: Videá.....	v
Elektronická príloha F: Bakalárska práca v elektronickej podobe	v

Príloha A: Tabuľka ku obrázku 15 K64F so Shield Boardom, hmotnosť 55g, budiaca frekvencia 48Hz

Získané hodnoty z aplikácie				f=48Hz	Zrýchlenie os X pôvodné	Zrýchlenie os Y pôvodné	Zrýchlenie os Z pôvodné
čas [s]	Acc os X [g]	Acc os Y [g]	Acc os Z [g]		-0,043	-0,015	1,048
1200	-0,049	-0,022	1,062	čas [s]	Zrýchlenie X os [g]	Akcelerometer Y os [g]	Akcelerometer Z os [g]
1200,025	-0,05	-0,021	1,061	0	-0,006	-0,007	0,014
1200,05	-0,049	-0,021	1,061	0,025	-0,007	-0,006	0,013
1200,075	-0,049	-0,019	1,059	0,05	-0,006	-0,006	0,013
1200,1	-0,048	-0,021	1,056	0,075	-0,006	-0,004	0,011
1200,125	-0,048	-0,018	1,052	0,1	-0,005	-0,006	0,008
1200,15	-0,048	-0,016	1,045	0,125	-0,005	-0,003	0,004
1200,175	-0,045	-0,017	1,04	0,15	-0,005	-0,001	-0,003
1200,2	-0,046	-0,015	1,041	0,175	-0,002	-0,002	-0,008
1200,225	-0,045	-0,015	1,037	0,2	-0,003	0	-0,007
1200,25	-0,044	-0,016	1,036	0,225	-0,002	0	-0,011
1200,275	-0,045	-0,016	1,035	0,25	-0,001	-0,001	-0,012
1200,3	-0,044	-0,015	1,036	0,275	-0,002	-0,001	-0,013
1200,325	-0,045	-0,015	1,038	0,3	-0,001	0	-0,012
1200,35	-0,046	-0,016	1,042	0,325	-0,002	0	-0,01
1200,375	-0,047	-0,017	1,045	0,35	-0,003	-0,001	-0,006
1200,4	-0,046	-0,017	1,048	0,375	-0,004	-0,002	-0,003
1200,425	-0,048	-0,019	1,053	0,4	-0,003	-0,002	0
1200,45	-0,049	-0,02	1,058	0,425	-0,005	-0,004	0,005
1200,475	-0,049	-0,02	1,06	0,45	-0,006	-0,005	0,01
1200,5	-0,049	-0,021	1,061	0,475	-0,006	-0,005	0,012
1200,525	-0,05	-0,021	1,062	0,5	-0,006	-0,006	0,013
1200,55	-0,049	-0,02	1,06	0,525	-0,007	-0,006	0,014
1200,575	-0,048	-0,02	1,057	0,55	-0,006	-0,005	0,012
1200,6	-0,048	-0,019	1,054	0,575	-0,005	-0,005	0,009
1200,625	-0,047	-0,018	1,05	0,6	-0,005	-0,004	0,006
1200,65	-0,048	-0,017	1,043	0,625	-0,004	-0,003	0,002
1200,675	-0,046	-0,015	1,04	0,65	-0,005	-0,002	-0,005
1200,7	-0,044	-0,014	1,038	0,675	-0,003	0	-0,008
1200,725	-0,044	-0,015	1,036	0,7	-0,001	0,001	-0,01
1200,75	-0,043	-0,015	1,034	0,725	-0,001	0	-0,012
1200,775	-0,046	-0,016	1,035	0,75	0	0	-0,014
1200,8	-0,045	-0,015	1,038	0,775	-0,003	-0,001	-0,013
1200,825	-0,046	-0,015	1,038	0,8	-0,002	0	-0,01
1200,85	-0,047	-0,016	1,042	0,825	-0,003	0	-0,01
1200,875	-0,047	-0,017	1,046	0,85	-0,004	-0,001	-0,006
1200,9	-0,048	-0,019	1,049	0,875	-0,004	-0,002	-0,002
1200,925	-0,048	-0,018	1,054	0,9	-0,005	-0,004	0,001
1200,95	-0,048	-0,019	1,057	0,925	-0,005	-0,003	0,006
1200,975	-0,05	-0,02	1,063	0,95	-0,005	-0,004	0,009
1201	-0,049	-0,022	1,061	0,975	-0,007	-0,005	0,015
40 meraní pre 1 sekundu				1	-0,006	-0,007	0,013

Príloha B: Tabuľka k obrázku 3.17 KL25Z, hmotnosť 19g, budiaca frekvencia 48Hz

Získané hodnoty z aplikácie				f=48Hz	Zrýchlenie os X pôvodné	Zrýchlenie os Y pôvodné	Zrýchlenie os Z pôvodné
čas [s]	Acc os X [g]	Acc os Y [g]	Acc os Z [g]		-0,014	-0,037	0,99
čas [s]	Acc os X [g]	Acc os Y [g]	Acc os Z [g]	čas [s]	Zrýchlenie X os [g]	Akcelerometer Y os [g]	Akcelerometer Z os [g]
1482,95	-0,014	-0,037	0,975	0	0	0	-0,015
1482,975	-0,016	-0,036	0,978	0,025	-0,002	0,001	-0,012
1483	-0,016	-0,037	0,981	0,05	-0,002	0	-0,009
1483,025	-0,016	-0,037	0,986	0,075	-0,002	0	-0,004
1483,05	-0,015	-0,037	0,99	0,1	-0,001	0	0
1483,075	-0,016	-0,037	0,995	0,125	-0,002	0	0,005
1483,1	-0,016	-0,036	0,997	0,15	-0,002	0,001	0,007
1483,125	-0,016	-0,038	1	0,175	-0,002	-0,001	0,01
1483,15	-0,016	-0,036	1,001	0,2	-0,002	0,001	0,011
1483,175	-0,016	-0,036	1,005	0,225	-0,002	0,001	0,015
1483,2	-0,016	-0,036	1,003	0,25	-0,002	0,001	0,013
1483,225	-0,016	-0,035	1,003	0,275	-0,002	0,002	0,013
1483,25	-0,016	-0,036	1,001	0,3	-0,002	0,001	0,011
1483,275	-0,015	-0,036	0,995	0,325	-0,001	0,001	0,005
1483,3	-0,015	-0,037	0,993	0,35	-0,001	0	0,003
1483,325	-0,015	-0,037	0,989	0,375	-0,001	0	-0,001
1483,35	-0,014	-0,035	0,984	0,4	0	0,002	-0,006
1483,375	-0,015	-0,037	0,981	0,425	-0,001	0	-0,009
1483,4	-0,014	-0,037	0,979	0,45	0	0	-0,011
1483,425	-0,014	-0,036	0,975	0,475	0	0,001	-0,015
1483,45	-0,014	-0,037	0,975	0,5	0	0	-0,015
1483,475	-0,015	-0,037	0,978	0,525	-0,001	0	-0,012
1483,5	-0,016	-0,036	0,981	0,55	-0,002	0,001	-0,009
1483,525	-0,016	-0,036	0,985	0,575	-0,002	0,001	-0,005
1483,55	-0,016	-0,037	0,988	0,6	-0,002	0	-0,002
1483,575	-0,015	-0,037	0,992	0,625	-0,001	0	0,002
1483,6	-0,016	-0,036	0,996	0,65	-0,002	0,001	0,006
1483,625	-0,017	-0,035	0,999	0,675	-0,003	0,002	0,009
1483,65	-0,016	-0,035	1	0,7	-0,002	0,002	0,01
1483,675	-0,016	-0,035	1,002	0,725	-0,002	0,002	0,012
1483,7	-0,015	-0,035	1,004	0,75	-0,001	0,002	0,014
1483,725	-0,016	-0,035	1,004	0,775	-0,002	0,002	0,014
1483,75	-0,016	-0,036	1,001	0,8	-0,002	0,001	0,011
1483,775	-0,015	-0,036	0,998	0,825	-0,001	0,001	0,008
1483,8	-0,017	-0,035	0,994	0,85	-0,003	0,002	0,004
1483,825	-0,015	-0,036	0,991	0,875	-0,001	0,001	0,001
1483,85	-0,015	-0,036	0,985	0,9	-0,001	0,001	-0,005
1483,875	-0,016	-0,036	0,98	0,925	-0,002	0,001	-0,01
1483,9	-0,014	-0,036	0,979	0,95	0	0,001	-0,011
1483,925	-0,015	-0,037	0,976	0,975	-0,001	0	-0,014
1483,95	-0,015	-0,037	0,976	1	-0,001	0	-0,014

Príloha C: Tabuľka k obrázku 3.18 KL25Z, hmotnosť 61g, budiaca frekvencia 48Hz

Získané hodnoty z aplikácie				f=48Hz	Zrýchlenie os X pôvodné	Zrýchlenie os Y pôvodné	Zrýchlenie os Z pôvodné
čas [s]	Acc os X [g]	Acc os Y [g]	Acc os Z [g]		-0,008	-0,044	0,99
čas [s]	Acc os X [g]	Acc os Y [g]	Acc os Z [g]	čas [s]	Zrýchlenie X os [g]	Akcelerometer Y os [g]	Akcelerometer Z os [g]
459,75	-0,006	-0,044	0,976	0	0,002	0	-0,014
459,775	-0,007	-0,043	0,978	0,025	0,001	0,001	-0,012
459,8	-0,007	-0,044	0,981	0,05	0,001	0	-0,009
459,825	-0,007	-0,045	0,987	0,075	0,001	-0,001	-0,003
459,85	-0,008	-0,044	0,991	0,1	0	0	0,001
459,875	-0,008	-0,044	0,993	0,125	0	0	0,003
459,9	-0,009	-0,046	0,998	0,15	-0,001	-0,002	0,008
459,925	-0,009	-0,046	1,003	0,175	-0,001	-0,002	0,013
459,95	-0,009	-0,046	1,003	0,2	-0,001	-0,002	0,013
459,975	-0,009	-0,045	1,004	0,225	-0,001	-0,001	0,014
460	-0,009	-0,046	1,004	0,25	-0,001	-0,002	0,014
460,025	-0,008	-0,045	1,001	0,275	0	-0,001	0,011
460,05	-0,008	-0,046	0,999	0,3	0	-0,002	0,009
460,075	-0,009	-0,047	0,995	0,325	-0,001	-0,003	0,005
460,1	-0,008	-0,045	0,992	0,35	0	-0,001	0,002
460,125	-0,007	-0,044	0,986	0,375	0,001	0	-0,004
460,15	-0,008	-0,045	0,982	0,4	0	-0,001	-0,008
460,175	-0,007	-0,046	0,979	0,425	0,001	-0,002	-0,011
460,2	-0,007	-0,045	0,976	0,45	0,001	-0,001	-0,014
460,225	-0,006	-0,045	0,975	0,475	0,002	-0,001	-0,015
460,25	-0,006	-0,045	0,976	0,5	0,002	-0,001	-0,014
460,275	-0,007	-0,045	0,977	0,525	0,001	-0,001	-0,013
460,3	-0,008	-0,044	0,981	0,55	0	0	-0,009
460,325	-0,007	-0,045	0,986	0,575	0,001	-0,001	-0,004
460,35	-0,007	-0,043	0,99	0,6	0,001	0,001	0
460,375	-0,007	-0,046	0,993	0,625	0,001	-0,002	0,003
460,4	-0,009	-0,045	0,997	0,65	-0,001	-0,001	0,007
460,425	-0,009	-0,046	1	0,675	-0,001	-0,002	0,01
460,45	-0,008	-0,046	1,002	0,7	0	-0,002	0,012
460,475	-0,009	-0,046	1,005	0,725	-0,001	-0,002	0,015
460,5	-0,009	-0,047	1,004	0,75	-0,001	-0,003	0,014
460,525	-0,009	-0,046	1,002	0,775	-0,001	-0,002	0,012
460,55	-0,01	-0,045	1	0,8	-0,002	-0,001	0,01
460,575	-0,008	-0,046	0,997	0,825	0	-0,002	0,007
460,6	-0,008	-0,046	0,993	0,85	0	-0,002	0,003
460,625	-0,007	-0,045	0,988	0,875	0,001	-0,001	-0,002
460,65	-0,007	-0,045	0,984	0,9	0,001	-0,001	-0,006
460,675	-0,007	-0,045	0,98	0,925	0,001	-0,001	-0,01
460,7	-0,006	-0,045	0,977	0,95	0,002	-0,001	-0,013
460,725	-0,006	-0,045	0,976	0,975	0,002	-0,001	-0,014
460,75	-0,006	-0,044	0,974	1	0,002	0	-0,016

Príloha D: Tabuľka k obrázku 3.19 K64F so Shield Boardom, hmotnosť 55g, budiaca frekvencia 148Hz

Získané hodnoty z aplikácie				f=148Hz	Zrýchlenie os X pôvodné	Zrýchlenie os Y pôvodné	Zrýchlenie os Z pôvodné
čas [s]	Acc os X [g]	Acc os Y [g]	Acc os Z [g]		-0,043	-0,015	1,048
748,1	-0,053	-0,018	1,034	čas [s]	Zrýchlenie X os [g]	Akcelerometer Y os [g]	Akcelerometer Z os [g]
748,125	-0,051	-0,019	1,036	0	-0,01	-0,003	-0,014
748,15	-0,052	-0,019	1,041	0,025	-0,008	-0,004	-0,012
748,175	-0,052	-0,018	1,043	0,05	-0,009	-0,004	-0,007
748,2	-0,053	-0,017	1,048	0,075	-0,009	-0,003	-0,005
748,225	-0,051	-0,018	1,052	0,1	-0,01	-0,002	0
748,25	-0,052	-0,019	1,055	0,125	-0,008	-0,003	0,004
748,275	-0,052	-0,02	1,057	0,15	-0,009	-0,004	0,007
748,3	-0,052	-0,021	1,056	0,175	-0,009	-0,005	0,009
748,325	-0,053	-0,02	1,055	0,2	-0,009	-0,006	0,008
748,35	-0,053	-0,021	1,053	0,225	-0,01	-0,005	0,007
748,375	-0,053	-0,022	1,053	0,25	-0,01	-0,006	0,005
748,4	-0,054	-0,021	1,048	0,275	-0,01	-0,007	0,005
748,425	-0,052	-0,02	1,045	0,3	-0,011	-0,006	0
748,45	-0,054	-0,02	1,041	0,325	-0,009	-0,005	-0,003
748,475	-0,053	-0,018	1,036	0,35	-0,011	-0,005	-0,007
748,5	-0,053	-0,018	1,037	0,375	-0,01	-0,003	-0,012
748,525	-0,052	-0,019	1,035	0,4	-0,01	-0,003	-0,011
748,55	-0,053	-0,018	1,034	0,425	-0,009	-0,004	-0,013
748,575	-0,051	-0,017	1,034	0,45	-0,01	-0,003	-0,014
748,6	-0,052	-0,02	1,038	0,475	-0,008	-0,002	-0,014
748,625	-0,053	-0,019	1,042	0,5	-0,009	-0,005	-0,01
748,65	-0,051	-0,018	1,049	0,525	-0,01	-0,004	-0,006
748,675	-0,05	-0,018	1,05	0,55	-0,008	-0,003	0,001
748,7	-0,052	-0,02	1,056	0,575	-0,007	-0,003	0,002
748,725	-0,052	-0,019	1,058	0,6	-0,009	-0,005	0,008
748,75	-0,053	-0,02	1,058	0,625	-0,009	-0,004	0,01
748,775	-0,053	-0,02	1,058	0,65	-0,01	-0,005	0,01
748,8	-0,052	-0,021	1,053	0,675	-0,01	-0,005	0,01
748,825	-0,054	-0,021	1,052	0,7	-0,009	-0,006	0,005
748,85	-0,054	-0,02	1,05	0,725	-0,011	-0,006	0,004
748,875	-0,054	-0,02	1,045	0,75	-0,011	-0,005	0,002
748,9	-0,053	-0,02	1,043	0,775	-0,011	-0,005	-0,003
748,925	-0,054	-0,021	1,04	0,8	-0,01	-0,005	-0,005
748,95	-0,053	-0,019	1,037	0,825	-0,011	-0,006	-0,008
748,975	-0,052	-0,018	1,034	0,85	-0,01	-0,004	-0,011
749	-0,052	-0,018	1,034	0,875	-0,009	-0,003	-0,014
749,025	-0,052	-0,018	1,033	0,9	-0,009	-0,003	-0,014
749,05	-0,051	-0,018	1,036	0,925	-0,009	-0,003	-0,015
749,075	-0,053	-0,018	1,041	0,95	-0,008	-0,003	-0,012
749,1	-0,052	-0,018	1,046	0,975	-0,01	-0,003	-0,007
				1	-0,009	-0,003	-0,002

Elektronická príloha E: Videá

Názov videa	Formát	Dĺžkazáznamu
Ukazkove_video_k_bakalarskej_praci	.mp4	00:03:32

Elektronická príloha F: Bakalárska práca v elektronickej podobe

Bakalárska práca v elektronickej podobe (formát .pdf)