



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

POHYBEM AKTIVOVANÝ MĚŘICÍ MODUL S BEZDRÁTOVÝM ROZHRANÍM

MOTION ACTIVATED MEASUREMENT MODULE WITH WIRELESS INTERFACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Josef Novotný

ID: 230146

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Pohybem aktivovaný měřicí modul s bezdrátovým rozhraním

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Zpracujte průzkum trhu MEMS snímačů mechanického pohybu s velmi nízkou spotřebou energie aktivovaným pohybem nebo změnou polohy.
- 2) Vyberte dostupný vývojový kit s MEMS snímačem aktivovaným pohybem a experimentálně ověřte vlastnosti použitého snímače při různých nastaveních detekce pohybu.
- 3) Zpracujte přehled nízkopříkonových mikrokontrolerů s jádrem ARM Cortex-M4 a integrovaným bezdrátovým rozhraním pracujícím v sub-GHz pásmu a v pásmu 2,4 GHz.
- 4) Otestujte bezdrátový přenos dat protokolem Bluetooth LE mezi vývojovým kitem s mikrokontrolerem STM32WB a vhodným přijímačem.
- 5) Navrhněte, realizujte a ověřte funkčnost měřicí jednotky sestavené z vývojového kitu s mikrokontrolerem STM32WB a vybraného snímače aktivovaného pohybem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Murphy, C. Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application—Part 2. Analog Devices, Inc., 2016. Dostupné online: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/choosing-the-most-suitable-accelerometer-for-your-application-part-2.html>.
- [2] Nilsson, R. Bluetooth Low Energy není jen nová verze standardu Bluetooth. AUTOMA, č.12, str. 40-43, 2013. ISSN 1210-9592. Dostupné online: https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10907.pdf.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá výběrem vhodného MEMS snímače mechanického pohybu s velmi nízkou spotřebou energie. Průzkum trhu se zaměřuje zejména na snímače, které lze aktivovat pohybem. Dále práce obsahuje popis funkce aktivace pohybem u snímače ADXL362. Práce dále obsahuje ověření katalogových údajů snímače ADXL362 pro aktivaci pohybem. Následně obsahuje průzkum trhu mikrokontrolerů s jádrem ARM Cotex M4. Dále je v práci otestován bezdrátový přenos přes Bluetooth a je zde navržena a realizována měřicí jednotka. V závěru práce jsou shrnuty dosažené výsledky.

Klíčová slova

MEMS, zrychlení, aktivace pohybem, ADXL362, NUCLEO WB55RG, Bezdrátový modul

Abstract

This semestral project deals with the selection of a suitable MEMS mechanical motion sensor with very low power consumption. The market research is mainly about sensors that can be activated by motion. Project also contains description of motion activation function of the sensor ADXL362. Project also contains verification of datasheet data of the sensor ADXL362 for the motion activation. Further It also includes a market survey of microcontrollers with ARM Cotex M4 core. Furthermore, the wireless transmission via Bluetooth is tested and a measurement unit is designed and implemented. At the end of the thesis are achieved results summarized.

Keywords

MEMS, acceleration, motion activated, ADXL362, NUCLEO WB55RG, Wireless module

Bibliografická citace

NOVOTNÝ, Josef. *Pohybem aktivovaný měřicí modul s bezdrátovým rozhraním* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151845>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Zdeněk Havránek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Josef Novotný</i>
VUT ID studenta:	<i>230146</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2022/23</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Pohybem aktivovaný měřicí modul s bezdrátovým rozhraním</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňkovi Havránkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 22. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. PRŮZKUM TRHU.....	11
1.1 ADXL362.....	11
1.2 ADXL367.....	12
1.3 BMA400.....	12
1.4 BMA456.....	13
1.5 LIS2DW	13
1.6 LIS3DH	14
1.7 FXLS8962AF	15
1.8 SHRNU TÍ VÝBĚRU.....	16
1.9 VÝVOJOVÝ KIT	17
2. DETEKCE POHYBU ADXL362	18
2.1 FALEŠNĚ POZITIVNÍ VÝSLEDKY	18
2.2 DETEKCE NEČINNOSTI.....	18
3. OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ SNÍMAČE.....	19
3.1 PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ VIBRACÍ.....	19
3.2 MĚŘENÍ VIBRACÍ	20
3.3 AUTOMATIZOVANÉ MĚŘENÍ	22
4. PŘEHLED NÍZKO PŘÍKONOVÝCH MIKROKONTROLERŮ S BEZDRÁTOVÝM ROZHRANÍM.....	25
4.1 PRŮZKUM TRHU	25
4.2 VÝBĚR MIKROKONTROLERU.....	27
5. MĚŘICÍ MODUL	29
5.1 PROPOJENÍ MEMS SNÍMAČE S VÝVOJOVOU DESKOU	29
6. BEZDRÁTOVÝ PŘENOS.....	32
7. NÁVRH A REALIZACE MĚŘICÍ JEDNOTKY	33
7.1 NÁVRH	33
7.2 REALIZACE MĚŘICÍ JEDNOTKY	34
7.3 MĚŘENÍ A POSLÁNÍ DAT	36
7.4 OVLÁDÁNÍ POMOCÍ PŘÍKAZŮ.....	39
8. ZÁVĚR.....	40
LITERATURA.....	42
SEZNAM PŘÍLOH.....	47

SEZNAM OBRÁZKŮ

3.1:	Měřicí pracoviště.....	20
3.2:	Vývojový kit se snímačem ADXL362 na přípravku uchyceném na vibračním budiči	21
3.3:	Porovnání výsledků zesílení z manuálně naměřených dat a automaticky naměřených dat	23
3.4:	Porovnání výsledků zesílení z automatických měření pro různé velikosti prahového registru	24
4.1	NUCLEO WB55RG spodní strana s místem na vložení baterie CR2032	28
5.1	Prostředí STM32MX pro nastavení funkce jednotlivých pinů	30
7.1	Návrh měřicí jednotky.....	33
7.2	Realizace měřicí jednotky s bezdrátovým přenosem dat.....	34
7.3:	Výpis z terminálu na počítači.....	36
7.4:	Naměřené průběhy zrychlení.....	38

SEZNAM TABULEK

1.1: Spotřeba proudu v režimu automatické detekce v závislosti na výstupní četnosti dat.....	15
4.1: Průzkum trhu vývojových sad nízkopříkonových mikrokontrolerů	26

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá zejména MEMS snímači mechanického pohybu, v tomto případě zejména měřením zrychlení. Cílem je sestavit jednoduché bezdrátové potenciálně bateriově napájené zařízení s MEMS akcelerometrem, které bude umožňovat maximálně šetřit energii pomocí specializovaných funkcí. Nejdůležitější je funkce aktivace pohybem „motion activation“ a cílem je této funkce maximálně využít při návrhu a realizaci měřicího bezdrátového modulu sestaveného pro testování z vývojových modulů bezdrátového mikrokontroleru a modulu s akcelerometrem.

Standardní jednotka zrychlení je m/s^2 , ale u snímačů mechanického pohybu se používá spíše jednotka g, která souvisí s tíhovým zrychlením na Zemi. Stanovená střední hodnota tíhového zrychlení je $9,80665 m/s^2$ [1].

Zkratku MEMS můžeme přeložit jako mikro elektromechanické systémy a jak je již obsaženo v názvu, tyto snímače se vyznačují hlavně malými rozměry a tím, že obsahují v jednom pouzdru měřicí část, i část na zpracování dat. Měřicí ústrojí může být elektrické nebo mechanické. [2].

Díky svým rozměrům mají také velmi malou spotřebu energie a k napájení stačí baterie s malou uloženou energií [3]. Spotřebu energie lze ještě snížit tím, že měření bude probíhat pouze v krátkých časových intervalech, kdy snímač detekuje abnormalitu a po většinu času bude ve speciálním režimu, který umožňuje do maximální míry šetřit energii, ale přitom zachovat minimální detekční schopnosti potřebné pro odhalení hodnoty zrychlení, které jsou mimo definovaný rozsah. Tato funkce se často používá u spotřební elektroniky k probuzení například chytrých hodinek nebo jiných zařízení.

Vzhledem k tomu, že se nacházíme na Zemi, tak snímač bude neustále měřit zrychlení o velikosti 1 g, i přesto, že bude v klidu vůči svému okolí. Toto zrychlení je způsobeno tíhovou silou, což znamená, že pro probuzení není vhodné používat změnu absolutní hodnoty zrychlení, protože všechny zrychlení menší než 1 g není možné rozpoznat, anebo je nutné se spoléhat na polohu snímače a měřit pouze v konkrétních osách. Proto je v případě změny zrychlení nutné posuzovat tuto změnu relativně k předchozí naměřené hodnotě zrychlení. Pokud snímač naměří hodnotu 0 g na všech osách, tak to znamená, že je ve stavu beztíže. V běžných podmínkách na Zemi to indikuje volný pád.

Tato bakalářská práce je členěna do 8 kategorií. Kapitola 1 popisuje průzkum trhu s MEMS snímači a výběr vhodného vývojového kitu. Kapitola 2 popisuje podrobně detekci pohybu ve snímači ADXL362. Kapitola 3 obsahuje popis ověřování vlastností snímače a naměřené výsledky. V kapitole 4 se nachází průzkum trhu mikrokontrolerů s jádrem Arm Cortex M4. Kapitola 5 obsahuje implementaci měřicí modulu na vývojovou desku NUCLEO WB55RG a v kapitole 6 je otestován bezdrátový přenos. V kapitole 7 je pak navrhnut a realizován měřicí modul. Kapitola 8 obsahuje závěrečné shrnutí bakalářské práce.

1. PRŮZKUM TRHU

Pro uvažovanou aplikaci hledáme MEMS snímače mechanického pohybu, které se vyznačují zejména velmi nízkou spotřebou energie a poskytují funkci „aktivace pohybem“. Jedním z hlavních hodnotících kritérií bude tedy velikost proudu v režimu, který umožňuje automatické probuzení při pohybu snímače. Vzhledem k předpokladu napájet snímač z baterie bude toto kritérium zásadní. Další kritéria jsou šum, měřicí rozsahy snímače, četnost výstupních dat, šířka měřicího pásma (bandwidth) a cena snímače. Tyto parametry jsou jednotné mezi výrobci, ale co se u různých výrobců odlišuje, tak je označení pro měřicí režimy, které daný snímač používá. Zavedeme si proto jednotné označení, abychom mohli tyto snímače mezi sebou porovnávat, ve funkčně podobných režimech, které se jmenují různě.

- *Režim spánku* je režim, ve kterém snímač neměří žádná data a zároveň se neumí probudit pohybem. Změna režimu probíhá tak, že nadřazený systém pošle požadavek na probuzení a až poté se snímač probudí.
- *Režim automatické detekce*. V tomto případě se bude jednat o režim, ve kterém snímač neměří aktivně, tedy neposílá žádná data na výstup. Snímač v tomto režimu porovnává naměřenou hodnotu zrychlení s hodnotou, jenž je uložena v registrech, a pokud dojde k naměření vyšší než požadované hodnoty, tak se přepne do normálního měřicího režimu či začne vykonávat jinou činnost, například vyšle požadavek na přerušení.
- *Normální měřicí režim*. Jedná se o režim, během kterého probíhá samotné měření. V tomto režimu je možné nastavit četnost výstupních dat a jiné další parametry měření.
- *Speciální měřicí režim*. V rámci funkce je totožný s normálním měřicím režimem, liší se ale například lepšími parametry měření, kdy je možné nastavit režim, ve kterém je měření realizováno s menším šumem. Naměřené hodnoty jsou přesnější, ale snímače má obvykle vyšší spotřebu oproti normálnímu měřicímu režimu.

Uvedená cena je cena jednoho akcelerometru při odběru 1000 ks.

1.1 ADXL362

ADXL362 je MEMS snímač od firmy Analog Devices. Tento snímač je tříosý s velmi nízkou spotřebou energie a byl představen v roce 2012. Obsahuje funkce na probuzení pohybem nebo detekci volného pádu. Měřicí rozsahy jsou ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g. Na každém rozsahu je výsledek měření na 12 bitů (nejvyšší bit je znaménkový, udává směr zrychlení), z čehož vyplývá, že nejmenší rozlišení činí v případě nejmenšího rozsahu (± 2 g) 1 mg. Četnost výstupních dat lze nastavit od 12,5 Hz až po 400 Hz. Šířka pásma lze nastavit na

polovinu nebo čtvrtinu výstupní četnosti dat. V normálním režimu je šum na osách X a Y $550 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ a pro osu Z činí $920 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Je zde i speciální režimy, který potlačují šum, ale zvyšuje spotřebu. Při napájecím napětí 3,5 V lze šum na osách snížit na hodnotu $175 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ na osách X, Y a $250 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ pro osu Z. Spotřeba při normálním měřicím módu je 1,8 μA a při režimu automatické detekce 270 nA. V režimu automatické detekce probíhá vyhodnocení, zda došlo k překročení definované hodnoty zrychlení 6krát za sekundu. Velikost zrychlení, při které chceme začít měřit, se ukládá do prahového registru, který má velikost 11 bitů a ta se porovnává s naměřenými daty. Vzhledem k tomu, že naměřená data mají, jak již bylo dříve zmíněno 12 bitů, tak se porovnává pouze spodních 11 bitů z naměřené hodnoty, čímž nezáleží na směru zrychlení ale pouze na velikosti. [4] Cena je \$3,42 za kus, v přepočtu 77,02 Kč [5]. Uvedené parametry odpovídají napájecímu napětí 2 V a teplotě 25°C.

1.2 ADXL367

ADXL367 je druhým vybraným zástupcem MEMS snímačů od firmy Analog Devices. Jedná se o nástupce modelu ADXL362, který byl představen v roce 2022. Snímač je tříosý a spotřeba energie je nižší než u ADXL362. Měřicí rozsahy zůstaly stejné, tedy $\pm 2 \text{ g}$, $\pm 4 \text{ g}$, $\pm 8 \text{ g}$. Oproti předchůdci měří zrychlení na 14 bitů, což znamená 4 krát větší citlivost než ADXL362 a při rozsahu $\pm 2 \text{ g}$ odpovídá nejnižšímu bitu hodnota 0,25 mg. V případě četnosti výstupních dat nedošlo k žádnému posunu oproti ADXL362 a lze u tohoto snímače nastavit od 12,5 Hz až po 400 Hz. V normální režimu měření (při rozsahu $\pm 2 \text{ g}$ a četnost výstupních dat 100 Hz) je šum na všech osách $370 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Ve speciálním režimu pro potlačení šumu lze dosáhnout intenzity šumu $170 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ na všech osách.

Spotřeba při měření v normálním měřicím režimu činí 890 nA a v režimu automatického probuzení 181 nA. Velikost zrychlení, při kterém chceme přejít do měřicího režimu se ukládá do 13bitového prahového registru. Porovnává se nižších 13 bitů naměřené hodnoty s hodnotou uloženou v registru. Četnost měření při, kterých se porovnává naměřené hodnoty s hodnotou uloženou v prahovém registru lze nastavit na 4 různé frekvence od 1,5 Hz až po 12,5 Hz. Doba po, které jsme schopni dostávat naměřená data z již normálního měřicího režimu je perioda výstupní četnosti dat + 10 ms. Cena je \$3,16 za kus, v přepočtu 71,16 Kč [5]. Uvedené parametry odpovídají napájecímu napětí 2 V a teplotě 25 °C. [6]

1.3 BMA400

BMA 400 je MEMS snímač od firmy Bosch a představen byl na začátku roku 2022. Snímač je tříosý a obsahuje tyto měřicí rozsahy $\pm 2 \text{ g}$, $\pm 4 \text{ g}$, $\pm 8 \text{ g}$, $\pm 16 \text{ g}$. Má mnoho detekčních funkcí např. detekci chůze, běhu a stání na místě. Také má režim automatické detekce pohybu, která nás bude zajímat nejvíce. Výsledek je měřen na 12bitů, z čehož vyplývá, že nejmenší bit odpovídá zrychlení 1 mg v případě rozsahu 2 g. Četnost

výstupních dat lze nastavit od 12,5 Hz až po 800 Hz. Šířka pásma je nastavitelná na 24 % nebo 48 % z nastavené četnosti výstupních dat. Šum je při rozsahu ± 4 g a četnosti výstupních dat 100 Hz 1,93 mg.

Spotřeba v režimu automatického probuzení je 850 nA a v normálním měřicím režimu je spotřeba 14,5 μ A. Velikost prahového registru je 8 bitů a porovná se s 8 vyššími bity z naměřené absolutní hodnoty zrychlení, z čehož vyplývá, že nejnižší nastavitelná hodnota v prahovém registru, ze které je snímač schopný zapnout normální měřicí režim je při rozsahu ± 2 g 16 mg. Četnost výstupních dat v režimu automatického probuzení je 25 Hz. Doba potřebná k přepnutí do normálního měřicího režimu odpovídá periodě výstupní četnosti dat. Snímač umožňuje povolit konkrétní osy, na kterých je možné porovnávat naměřenou hodnotu s hodnotou uloženou v registru. Další možností je, že referenční hodnota zrychlení, od které se porovnáva zda došlo ke zrychlení mimo tolerované hodnotu, se může nastavit jednou při vstupu do režimu automatické detekce, anebo se může měnit s každou naměřenou hodnotou. V tomto případě se porovnávají poslední 2 naměřené hodnoty mezi sebou. Při porovnání se snímačem ADXL362 má větší měřicí rozsah. Spotřeba je ovšem větší jak při měření, tak při režimu automatické detekce. [7] Cena snímače je 47,92 Kč [8].

1.4 BMA456

BMA 456 je druhým vybraným zástupcem vhodných MEMS snímačů od firmy Bosch a představen byl v roce 2017. Snímač je tříosý s měřicími rozsahy ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g. Nemá zabudovaný režim na automatickou detekci zrychlení. Data jsou měřena na 16 bitů pro každou osu. Nejnižšímu bitu při rozsahu ± 2 g odpovídá hodnota 0,06 mg. Četnost výstupních dat lze nastavit od 12,5 Hz až po 1600 Hz. Šířka pásma je přibližně 40,5 % z výstupní četnosti dat, ale pro všechny hodnoty není stejná. Pro výstupní četnost dat 400 Hz, 800 Hz, 1600 Hz neodpovídá šířka pásma pro osu Z oproti osám X a Y. Například při výstupní četnosti dat je 1600 Hz je šířka pásma pro osy X a Y 684 Hz, ale pro osu Z jen 353 Hz. Šum je $120 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ při rozsahu ± 4 g. Spotřeba v režimu nízké spotřeby je 14 μ A. Četnost výstupních dat v režimu nízké spotřeby lze nastavit od 0,78 Hz až po 400 Hz. Spotřeba v normálním měřicím módu je 150 μ A. [9] Cena je 35,25 Kč za kus [10].

1.5 LIS2DW

LIS2DW je první zástupce vhodných nízkopříkonových MEMS snímačů od společnosti STMicroelectronics a byl představen v roce 2020. Snímač je tříosý s měřicími rozsahy ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g. Má zabudované funkce na detekci zrychlení nad nastavenou hodnotu, volného pádu, poklepnutí, dvojitého poklepnutí, změny úhlu natočení nebo polohy orientace natočení, kdy pozná převrácení. Výstup ze snímače je 16bitový, ale měření probíhá pouze na 14 bitů, tudíž citlivost při nejnižším rozsahu ± 2 g je 0,244 mg. Četnost výstupních dat je při normálním měřicím režimu od 12,5 Hz do 1600 Hz. V režimu nízké

spotřeby lze nastavit četnost měření od 1,6 Hz do 200 Hz. Nejvyšší dosažitelná šířka pásma je 400 Hz a to při četnosti výstupních dat 800 Hz nebo 1600 Hz. Dále lze nastavit na 1/4, 1/10 nebo 1/20 výstupní četnosti dat.

Při nejnižší výstupní četnosti dat 12,5 Hz by mohla být nastavena šířka pásma 0,625 Hz. Šum je $90 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ na rozsahu ± 2 g, při zapnutém režimu potlačení šumu. Při vypnutí toho režimu není hodnota v katalogovém listu uvedena. V režimu nízké spotřeby lze dosáhnout i hodnoty šumu 1,3 mg pro všechny četnosti výstupních dat, ale opět s aktivním režimem potlačení šumu, který zvyšuje spotřebu. V režimu automatického probuzení se výstupní četnosti dat nastaví automaticky na 12,5 Hz a uvedená spotřeba 1 μA , je při vypnutém režimu potlačení šumu, tudíž hodnota šumu bude vyšší než 1,3 mg. Velikost prahového registru je 6 bitů a nejnižší bit odpovídá 1/64 z nejvyšší na měřitelné hodnoty rozsahu. V případě rozsahu ± 2 g to činí 32 mg. V normálním měřicím režimu činí spotřeba 90 μA . Uvedené parametry odpovídají napájení 1,8 V a teplotě 25 °C. [11]

1.6 LIS3DH

LIS3DH je druhý vhodný zástupce MEMS snímačů od společnosti STMicroelectronics a byl představen již v roce 2016. Snímač je tříosý s měřicími rozsahy ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g. Má zabudované detekční funkce na zrychlení nad stanovenou hodnotu, volný pád, změna úhlu náklonu, poklepnutí a dvojitého poklepnutí. Snímač má kromě normálního měřicího režimu i režim vyššího rozlišení. Režim automatické detekce zde funguje poněkud jinak oproti ostatním snímačům, a proto bude vhodnější název režim nízké spotřeby. Tento režim nízké spotřeby je režim, v kterém je možné plynule měřit a v případě potřeby zapnutí funkce se do něj snímač přepne ze zbylých režimů, ovšem v tom případě v něm nelze měnit parametry. V režimu vysokého rozlišení změní snímač zrychlení na 12 bitů, v normálním měřicím režimu na 10 bitů a v režimu automatického probuzení pouze na 8 bitů. Nejvyšší dosažitelná citlivost při rozsahu ± 2 g je 1 mg v režimu vysokého rozlišení, v normálním měřicím režimu je citlivost 4 mg a v režimu automatického probuzení je nejnižší dosažitelná citlivost 16 mg. Snímač umožňuje povolit k měření pouze určité osy, tudíž se může probouzet pouze na zrychlení v určitém směru. Četnost výstupních dat lze nastavit v normálním měřicím režimu od 1 Hz až po 1,344 kHz. V režimu automatické detekce jsme schopni nastavit výstupní četnost dat až na 5,376 kHz, ale v tomto případě není možná funkce přepnutí do normálního měřicího režimu.

Při přepnutí na režim automatické detekce se výstupní četnost dat nastaví na 10 Hz. Šířka pásma činí v režimu vysokého rozlišení 1/9 výstupní četnosti dat, v případě normálního měřicího módu i režimu automatického probuzení je šířka pásma polovina výstupní četnosti dat. Hodnota šumu je stanovena pro režim vysokého rozlišení s výstupní četností dat 1344 Hz a činí $220 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Spotřeba v režimu automatické detekce při výstupní četnosti dat 10 Hz je 3 μA , v normálním měřicím režimu i v režimu vysokého

rozlišení je spotřeba při 100 Hz výstupní četnosti dat 20 μA . Prahový registr má velikost 6 bitů a nejnižší bit odpovídá při rozsahu ± 2 g hodnotě 16 mg. Nejnižší bit tak vždy odpovídá poměru 1/128 z měřicího rozsahu a nejvyšší nastavitelná hodnota je polovina měřicího rozsahu. Uvedené parametry platí pro napájecí napětí 2,5V a teplotu 25 °C. [12]

1.7 FXLS8962AF

FXLS8962AF je tříosý MEMS snímač od firmy NXP, který byl představen v roce 2016. Snímač má měřicí rozsahy ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g. Také obsahuje funkce na probuzení pohybem, zjištění úhlu natočení, detekce převrácení. Zrychlení je měřeno na 12 bitů, tudíž citlivost při nejnižším rozsahu je ± 2 g je 1 mg. Četnost výstupních dat lze nastavit od 0,781 Hz až po 3200 Hz. Šířka pásma je polovina výstupní četnosti dat, tudíž maximální dosažitelná šířka pásma je 1600 Hz při výstupní četnosti dat 3200 Hz. Šum je v normálním měřicím módu při rozsahu ± 2 g a výstupní četnosti dat 3200 Hz je 280 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. V režimu automatické detekce s výstupní četností dat v rozmezí 0,781 Hz až 200 Hz je rozmezí $16,8 \div 1,1$ $\text{mg}/\sqrt{\text{Hz}}$. Spotřeba v normálním měřicím režimu není závislá na výstupní četnosti dat a činí 150 μA . V režimu automatické detekce jsou uvedeny spotřeby, elektrického proudu pro všechny výstupní četnosti dat. Uvedené spotřeby jsou shrnuty v tabulce 1.1 níže.

Tabulka 1.1: Spotřeba proudu v režimu automatické detekce v závislosti na výstupní četnosti dat

Výstupní četnost dat [Hz]	3200	1600	800	400	200	100	50	25	12,5	6,25	3,125	1,563	0,781
I [μA]	150	75	38	20	11	5,3	3,1	1,8	1,4	1	0,8	0,7	0,65

Výrobce sice umožňuje nastavit výstupní četnost dat až na 3200 Hz, což umožní detekovat i velice rychlé vibrace, avšak spotřeba zůstává stejná jako v normálním měřicím módu. Tento režim s nastavením maximální četnosti dat tedy postrádá svou největší výhodu, která spočívá v nižší spotřebě. Vzhledem k tomu, že signalizování naměřených dat trvá 5 ms, tak výrobce nedoporučuje nastavovat vyšší frekvenci než 100 Hz z důvodu, že poté už není možné zaručit detekci všech vzorků. Vzhledem k tomu, v jakých četnostech měří ostatní akcelerometry v režimu automatické detekce, bychom pro případnou detekci volili výstupní četnosti dat 12,5 Hz nebo 6,25 Hz. V těchto případech se dostáváme na rozumnou úroveň spotřeby 1,4 μA a 1 μA , která je mnohonásobně nižší než spotřeba v běžném měřicím režimu. Velikost prahového registru je 11 bitů, takže je možné nastavit jakoukoli absolutní hodnotu v rozsahu, při které se má přepnout do normálního měřicího režimu. [13]

1.8 Shrnutí výběru

Výše byly popsány parametry z katalogových listů různých akcelerometrů od různých výrobců. Pokud potřebujeme srovnávat více parametrů současně, tak to může být poněkud komplikované, protože výrobci mnohdy uvádí nejlepší možné parametry, kterých se jim podařilo dosáhnout. Pokud bychom chtěli srovnávat více než jeden parametr současně, tak se tyto konkrétní data nemusíme z katalogového listu dočíst. Z tohoto pohledu byl asi nejlépe zpracovaný katalogový list pro akcelerometr FXLS8962AF, který obsahoval množství tabulek, které srovnávaly různé možnosti nastavení. Co se týká akcelerometru BMA 456 tak nesplnil základní kritéria výběru, protože neobsahuje požadovaný režim automatické detekce. Tento snímač je spíše vhodný pro přesnější měření než ostatní akcelerometry, protože má nejvyšší citlivost a zároveň i nejnižší šum. Pro další srovnávání již nebude brán v potaz.

Hlavním srovnávacím kritériem byla spotřeba proudu při měření i v režimu automatické detekce. Z tohoto hlediska je možné dosáhnout nejlepších výsledků u akcelerometrů od firmy Analog Devices, kdy snímač ADXL362 má spotřebu v režimu automatické detekce 270 nA a ADXL367 má spotřebu dokonce 181 nA. Dále by bylo možné uvažovat s akcelerometrem od firmy Bosch, který má spotřebu proudu 850 nA. S dalšími akcelerometry se už dostáváme na spotřebu nad 1 μ A, kromě akcelerometru FXLS8962AF, u něj ovšem musíme měřit s nižší četností výstupních dat a při srovnatelných parametrech se dostáváme také na spotřebu 1 μ A.

Co se týká rozsahu, tak ADXL362 a ADXL367 nemají rozsah ± 16 g. V našem případě, to nemá vliv na výběr, protože i rozsah ± 8 g je pro nás dostatečný. S tímto rozsahem jsme schopni naměřit zrychlení 78,45 m/s^2 což je naprosto dostatečné. Hodnoty vyšší než ± 8 g jsou již tak vysoké, že nepředpokládáme nastavování velikosti prahového registru nad tuto hodnotu. Na nižších rozsazích jsme navíc schopni dosáhnout přesnějších detekcí. V případě nečekaného výskytu velkých zrychlení nebude omezena schopnost akcelerometru takto vysoká zrychlení detekovat. Pouze nebude možné tyto zrychlení přesně změřit.

Velikost prahového registru se u snímačů různě liší. Všechny registry porovnávají absolutní hodnotu čísla. Ve výběru jsou snímače, do kterých lze vložit maximální naměřitelná hodnota na daném rozsahu (velikost registru o 1 bit menší než velikost registru s naměřenou hodnotou). Do této kategorie spadají snímače ADXL362, ADXL367 a FXLS8962AF. Dále jsou ve výběru snímače, které porovnávají pouze část naměřených dat BMA 400, LIS2DW, LIS3DH. V tomto případě, ale nemusí být absence nejnižších bitů až tak zásadní. Například BMA 400 nesrovnává 3 nejnižší naměřené bity, ale vzhledem k velikosti šumu, který se projeví zejména na těchto bitech, se tato nevýhoda v praktickém použití nemusí projevit.

Výstupní četnost dat i šířka pásma je nejnižší u snímačů ADXL362 a ADXL367. Výstupní četnost dat je 400 Hz a s ní související šířka pásma je 200 Hz. Pokud bychom potřebovali lepší parametry, tak je nevhodnější akcelerometr BMA 400. Ten již má

výstupní četnost dat 800 Hz a šířku pásma 384 Hz. Pokud by i přesto pro nás byly tyto parametry nedostatečné, tak můžeme použít například FXLS8962AF, který má výstupní četnost dat až 3200 Hz. V tom případě ale vyšší četnost výstupních dat zásadně zvyšuje spotřebu proudu.

Velikost šumu se mezi snímači srovnává poněkud těžce, protože většina výrobců je udává pouze na jednom konkrétním rozsahu a ten se mezi výrobci liší. U některých snímačů, lze nastavit režim potlačení šumu, ten ale zvyšuje spotřebu proudu.

Celkově lze říci, že nejlépe požadovaná kritéria splňují snímače od firmy Analog Devices ADXL 367 a ADXL362, které mají nejmenší spotřebu. Dále má nejvíce podobné parametry snímač BMA 400 od firmy Bosch.

1.9 Vývojový kit

Primárně se zaměřím na vývojové kity pro snímače ADXL367 a ADXL362, které nejlépe vyhovují předpokládané aplikaci. Pro ADXL367 je dostupný vývojový kit EVAL-ADXL367-SDP [14]. Tento kit se skládá ze tří částí a jeho cena činí 6 920,25 Kč [15]. Pro ADXL362 se vývojový kit skládá ze dvou samostatných částí, které se prodávají samostatně. První část EVAL-ADXL362-ARDZ obsahuje samostatný MEMS senzor a displej, na kterém můžeme zobrazovat aktuální zrychlení. Druhá část EVAL-ADICUP360 obsahuje vývojovou desku s mikrokontrolerem ADUCM360, která umožňuje nahrání aplikačního programu do kontroleru a komunikaci s počítačem. [16] Cena senzoru a desky EVAL-ADXL362-ARDZ činí 1491,75 Kč a cena druhé desky EVAL-ADICUP360 činí 1491,75 Kč [17] [18]. Dohromady tak cena za celý vývojový kit činí 2983,5 Kč.

Vývojový kit se vyrábí i pro snímač BMA400 od firmy BOSCH. Ten se skládá ze základní vývojové desky Application Board 3.0, která je společná na všechny vývojové sady pro akcelerometry od této firmy a následně se dokupují další moduly s příslušnými akcelerometry. Pro ověření snímače BMA400 by tedy bylo nutné zakoupit modul BMA400 Shuttle board 3.0. Cena této sady činí 2501,25 Kč za Application Board 3.0 a 833,75 Kč za BMA400 Shuttle board 3.0, což dohromady činí 3335 Kč [19] [20]. Vzhledem k tomu, že tento vývojový kit je dražší než vývojový kit ke snímači ADXL362, který má lepší parametry, tak nemá smysl o koupi tohoto kitu uvažovat.

Cena vývojového kitu pro senzor ADXL362 je o více než polovinu levnější než kitu pro ADXL367 a navíc tato vývojová sada umožňuje zobrazovat přehledně naměřené hodnoty přímo na zabudovaném displeji. Proto byl po konzultaci s vedoucím práce zakoupen vývojový kit se snímačem ADXL362.

2. DETEKCE POHYBU ADXL362

Tato kapitola obsahuje popis fungování detekce pohybu z katalogového listu ADXL362.

Snímač sám dokáže detekovat pohyb a porovnávat tuto hodnotu s hodnotou uloženou v prahovém registru. Detekce vyšší hodnoty, než je uložena v prahovém registru, přepne snímač z wake-up módu do normálního měřicího režimu. Tato detekce také může generovat přerušování. Stav aktivity zařízení je indikován bitem AWAKE.

Snímač umožňuje porovnávat hodnotu zrychlení jako absolutní nebo jako rozdíl od určité referenční hodnoty (referenced). V případě absolutní hodnoty se zjišťuje, zda aktuální hodnota zrychlení překračuje uživatelem definovanou hodnotu v registrech po určitou dobu. Absolutní hodnota však nemusí být vhodná pro všechny aplikace, protože se zde projevuje vliv tíhového zrychlení 1 g. Tuto hodnotu akcelerometr detekuje, i když je v klidu. Proto v podstatě nemá ani téměř smysl nastavovat absolutní hodnotu na hodnotu menší než 1 g, protože to způsobí okamžitou detekci pohybu. Pokud zvolíme detekci na základě rozdílu od referenční hodnoty, tak akcelerometr změří aktuální hodnotu zrychlení a následně zjišťuje, jestli se následující měřené hodnoty odchýlily od této reference. Tímto lze docílit detekce i velmi malých zrychlení. [4]

2.1 Falešně pozitivní výsledky

Cílem je eliminovat šum a drobné nežádoucí pohyby. Toto jde přímo proti citlivosti, kdy požadujeme detekci co nejmenších zrychlení, ale zároveň se snažíme vyfiltrovat šum. Proto obsahuje ADXL362 i vestavěný časovač, který umožňuje nastavit dobu sledování aktuální hodnoty zrychlení od jednoho vzorku až po 20 sekund, kdy k detekci aktivity dojde až při překročení nastaveného prahového zrychlení po celou definovanou dobu. Časovače je možné využít pouze v měřicím režimu. V režimu nízké spotřeby a probouzení pohybem proběhne detekce aktivity po jednom vzorku. [4]

2.2 Detekce nečinnosti

Pokud zrychlení zůstane po určitou dobu pod uživatelem definovanou prahovou hodnotou, tak se ADXL362 může přepnout z normálního režimu zpět do wake-up režimu. Hodnotu nečinnosti lze opět nastavit jako absolutní nebo jako rozdíl aktuální hodnoty k referenční hodnotě. Časování nečinnosti souvisí s aktuálně nastavenou výstupní četností dat. Proto je zde možné nastavovat čas od 2,5 ms, což je jeden vzorek při výstupní četnosti dat 400 Hz, až po 65535 vzorků, což při nejmenší výstupní četnosti dat 12,5 Hz činí 90 minut. Tento rozsah široce rozšiřuje možné použití pro různé aplikace, kdy je důraz na úsporu energie i pro aplikace, kde je důležité změřit veškerá zrychlení. [4]

3. OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ SNÍMAČE

Nejdříve jsem zprovoznil vývojový kit se snímačem ADXL362. Dále jsem nainstaloval program Cross Core Embedded studio, který je určen pro vývoj a nahrávání programu do vývojového kitu. Do tohoto programu bylo nutné stáhnout ovladače pro základní platformu ADICUP360, ale i přesto nebylo možné se úspěšně propojit s hardwarem. Následně se ukázalo, že verze ovladače je zastaralá pro aktuální verzi vývojového prostředí a bylo nutné upravit několik řádků kódu podle návodu na stránce Sysprogs [21]. Poté se mi již podařilo nahrát demo program ze stránky github, který ukazuje možnosti vývoje na tomto kitu [22].

Následně jsem spustil demo program na vývojovém kitu a zkoušel měnit nastavení snímače pro měření. Zejména jsem se zaměřil na nastavení prahového registru a dobu nečinnosti. V prvotním nastavení byla nastavena výstupní četnost dat na výchozí hodnotu 100 Hz na rozsahu 2 g. Při hledání nejnižší možné nastavitelné hodnoty registru jsem se dostal na hodnotu 8 mg, která byla na hranici, kdy se snímač dokázal spustit svým vlastním šumem. Přepočet na skutečnou hodnotu šumu je podle vzorce (3.1) převzatého z webu [23].

$$\text{šum} = \text{intenzita šumu} * \sqrt{\text{šířka pásma} * 1,6} \quad (3.1)$$

Výsledek šumu je skutečná absolutní hodnota šumu na dané šířce pásma.

Podle teoretických výpočtů by při daném rozsahu měl být největší šum 5,82 mg na ose Z, takže námi zakoupený akcelerometr má v tomto případě nepatrně lepší parametry, než udává výrobce. Pro další měření jsem vycházel z tohoto funkčního programu a upravil ho pro další použití.

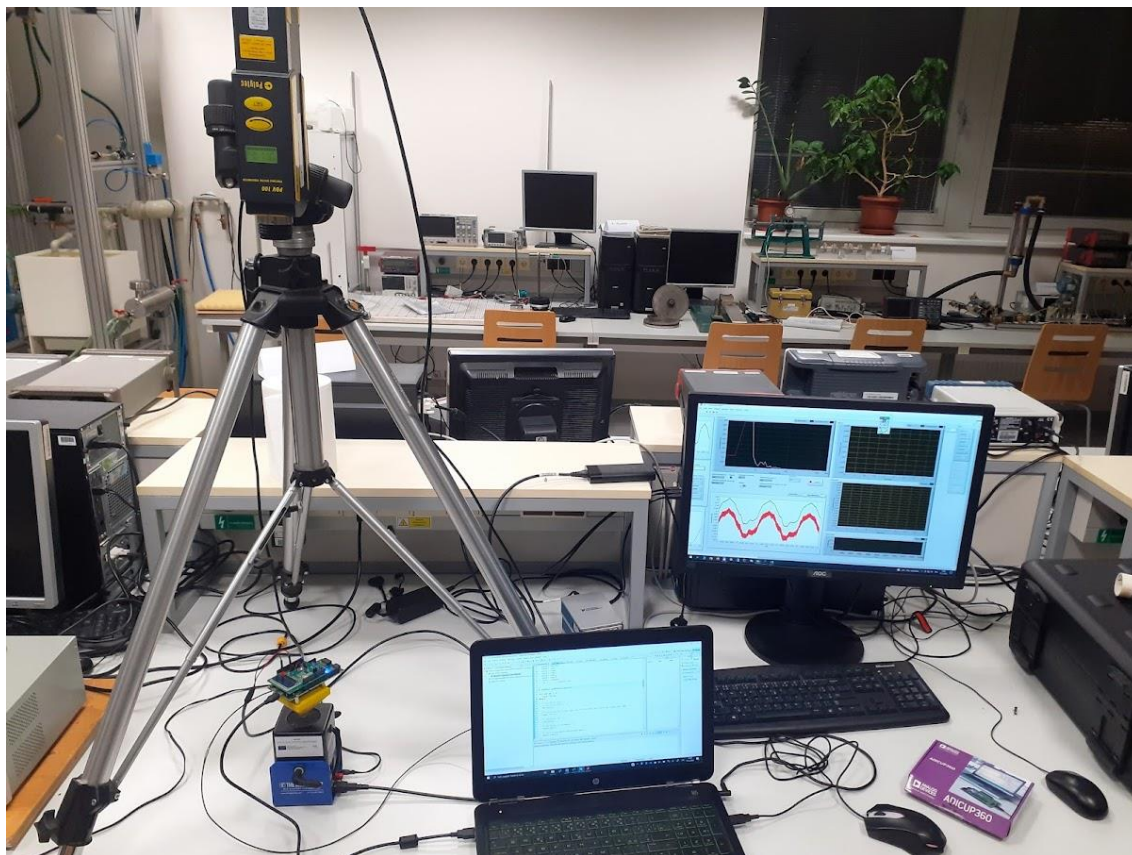
3.1 Příprava na měření vibrací

V rámci komplexního ověření vlastností snímače jsem zrealizoval měření, při kterém jsem určoval hodnoty zrychlení, pro které se akcelerometr přepne do normálního měřicího režimu pro konkrétní kmitočet vibrací v celém zvoleném kmitočtovém rozsahu. Abych mohl proměřit co nejširší kmitočtový rozsah, nastavil jsem výstupní četnost dat na 400 Hz a šířku pásma na polovinu této četnosti. Výchozí šířka pásma je čtvrtina výstupní četnosti dat. Snímač bude připojen tak, že bude kmitat ve svislém směru, takže prakticky veškerá změna zrychlení bude přítomna v ose Z. Vlastní šum snímače a neodstranitelné okolní vibrace spouštěly akcelerometr i při nastavení prahového registru na hodnotu 28÷29 mg. Proto jsem se rozhodl nastavit hodnotu prahového registru na 50 mg, abych snížil vliv šumu na celkový výsledek měření. Celé měření jsem realizoval s využitím vývojového prostředí LabVIEW, kde byl vytvořen jednoduchý program pro nastavování hodnoty vibrací pro vibrační stolek. Při prvotním měření se ukázalo, že místo referenčního snímače vibrací umístěného přímo pod vývojovým kitem, by bylo vhodnější

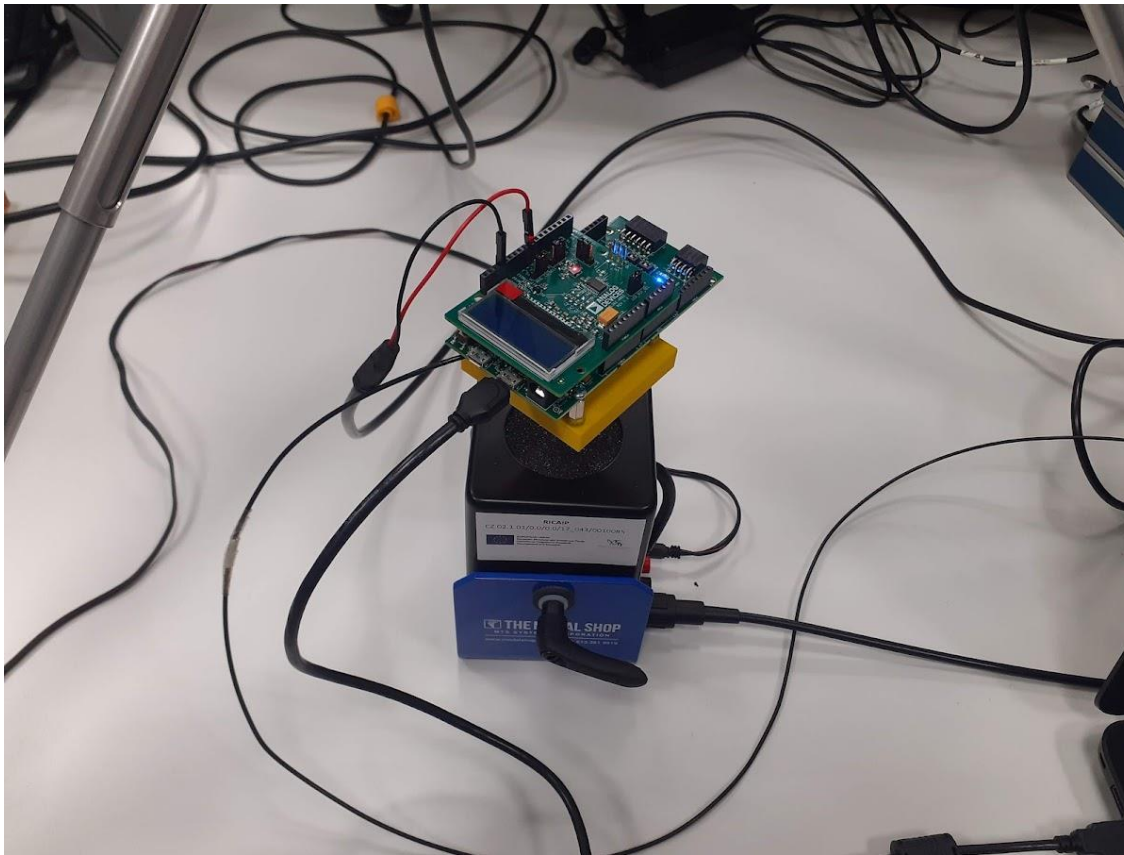
měřit tyto vibrace ještě přímo na pouzdru snímače ADXL362 s pomocí bezkontaktního laserového vibrometru Polytec PDV100. Dalším neočekávaným problémem byly vibrace, které se ve spektru objevily okolo hodnoty 50 Hz. Následně bylo zjištěno, že zdrojem toho rušení je napájecí zdroj k vibračnímu stolku, proto jsem vibrační stůlek následně napájel z laboratorního zdroje napětí. Tímto řešením se podařilo nechtěné vibrace na frekvenci 50 Hz odstranit.

3.2 Měření vibrací

Při měření jsem použil vibrační stůlek Modal Shop K2007E01 s vestavěným zesilovačem a dva referenční snímače na zjištění skutečné hodnoty zrychlení vibrací. Piezoelektrický akcelerometr PCB JTL352B01 byl umístěn ve vyrobeném úchytu přímo na vibračním stolku a druhý bezkontaktní snímač – laserový vibrometr Polytec PDV100 byl umístěn nad přípravkem a měřil velikost rychlosti vibrací přímo na pouzdru snímače ADXL362. Pro určení zrychlení vibrací bylo tedy nutné provést jednoduchou derivací měřených hodnot z laserového vibrometru. Z důvodu zajištění lepšího odrazu laserového paprsku od měřeného povrchu jsem na pouzdro snímače ADXL nalepil odrazku. Celá měřicí aparatura je na obrázku číslo 3.1 a vývojový kit s přípravkem na jeho uchycení na vibrační stůlek je na obrázku 3.2.



Obrázek 3.1: Měřicí pracoviště



Obrázek 3.2: Vývojový kit se snímačem ADXL362 na přípravku uchyceném na vibračním budiči

První měření probíhalo následovně. Nastavil jsem prahový registr na hodnotu 50 mg a následně jsem proměřil pro vybrané frekvence, jak velká musí být amplituda zrychlení vibrací, aby se snímač přepnul do normálního měřicího režimu. Nastavování velikosti amplitudy zrychlení vibrací probíhalo manuálně v LabVIEW a bylo důležité, aby se snímač dokázal probouzet pravidelně na danou hodnotu. Při nastavování velikosti vibrací se poměrně často stávalo, že při změně velikosti vibrací v LabVIEW prvotní kmit vibračního stolku dokázal snímač detekovat, ale následné vibrace už neměly dostatečnou velikost, aby je snímač detekovat dokázal. Naměřené hodnoty, které jsou zapsány v příloze A.1, odpovídají hodnotám, na kterých opakovaně docházelo k přepínání mezi režimem automatické detekce a normálním měřicím režimem.

Budič signál, který byl přiveden na vstup vibračního stolku, byl sinusového průběhu, a tedy změna zrychlení v rámci jedné periody (hodnota špička-špička) odpovídá dvojnásobku naměřené amplitudy zrychlení vibrací referenčními snímači (piezoelektrický akcelerometr a laserový vibrometr). Zároveň je možné si všimnout, že piezoelektrický snímač zrychlení umístěný na přípravku udává jinou hodnotu zrychlení

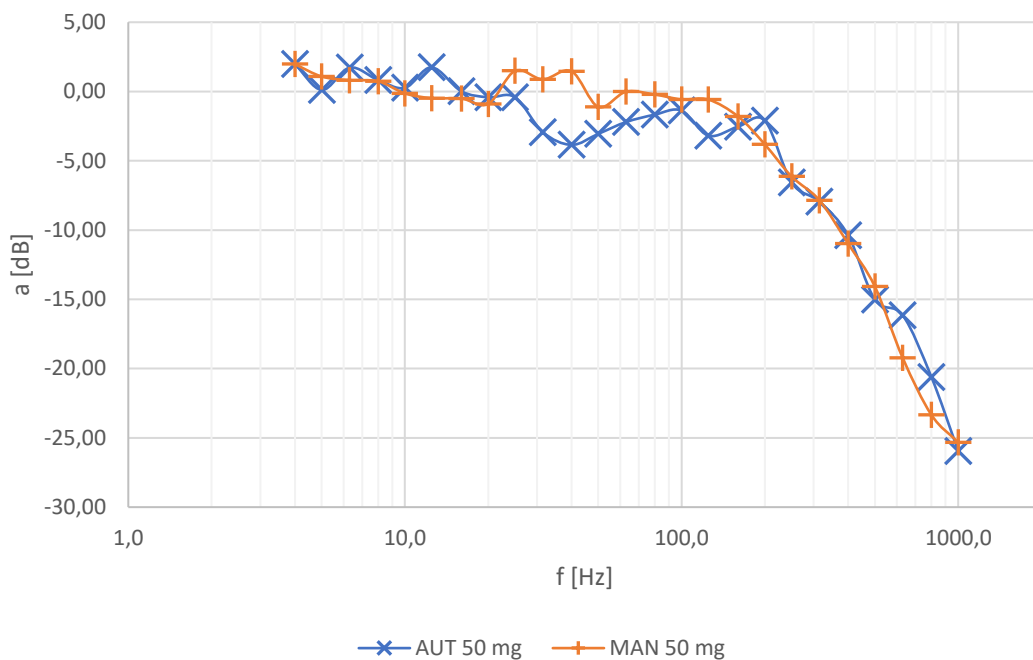
na vyšších frekvencích než je změřena laserovým vibrometrem Polytec přímo na pouzdru snímače ADX362. Toto je patrně zejména od kmitočtu 315 Hz výše a je způsobeno celkovou mechanickou konstrukcí přípravku s vývojovým kitem a jeho uchycením k vibračnímu stolku, kdy nedochází k ideálnímu přenosu vibrací z budiče na vlastní pouzdro ověřovaného snímače.

3.3 Automatizované měření

Pro úsporu času, jsem celé měření následně zautomatizoval. Využil jsem toho, že při probouzení se rozsvítí obrazovka na vývojovém kitu, která je napájena z pinu P0_5. Při přechodu do normálního režimu se zapne obrazovka, na které se zobrazují aktuálně měřené údaje. Připojil jsem tedy tento pin na měřicí kartu do počítače a v programu LabVIEW jsem tento pin použil jako signalizaci probuzení. Abych zamezil nesprávné detekci, která často nastávala při změnách frekvence a méně často při změnách amplitudy zrychlení vibrací nastavil jsem v LabVIEW následující podmínky. Pokud nastane signalizace probuzení ihned po změně frekvence kmitů, tak se tyto vzorky nebudou uvažovat. Ke správné detekci musí probuzení proběhnout 6krát. Z důvodu urychlení celého měření, jsem vždy na následující frekvenci vibrací nastavil jejich amplitudu na 70 % předchozí amplitudy zrychlení generované vibračním stolem, protože bylo zbytečné předpokládat detekci při výrazně nižších hodnotách zrychlení než na předchozí frekvenci. Zároveň, ale se vzrůstající frekvencí vibrací docházelo při stejné amplitudě pro vyšší frekvence k vyšší hodnotám zrychlení, protože stejně velkých amplitud musel dosáhnout vibrační stolek za kratší čas. Nakonec se 70 % ukázalo jako dobrý kompromis mezi rychlostí a včasnou detekcí. Velikost kroku amplitudy zrychlení vibrací, se kterou jsem přidával její hodnotu, závisela na velikosti prahové hodnoty v registru, pro které měření probíhalo. Pro měření s nejnižší velikostí prahové hodnoty detekce jsem zvyšoval amplitudu budicího napětí do vibračního stolku s krokem 0,001 V a pro měření s prahovou hodnotou 200 mg s krokem 0,01 V. Následně jsem tento měřicí program spustil pro hodnoty prahového registru 50 mg, 100 mg, 150 mg, 200 mg. Naměřené výsledky z těchto měření jsou v přílohách A.2, A.3, A.4, A.5.

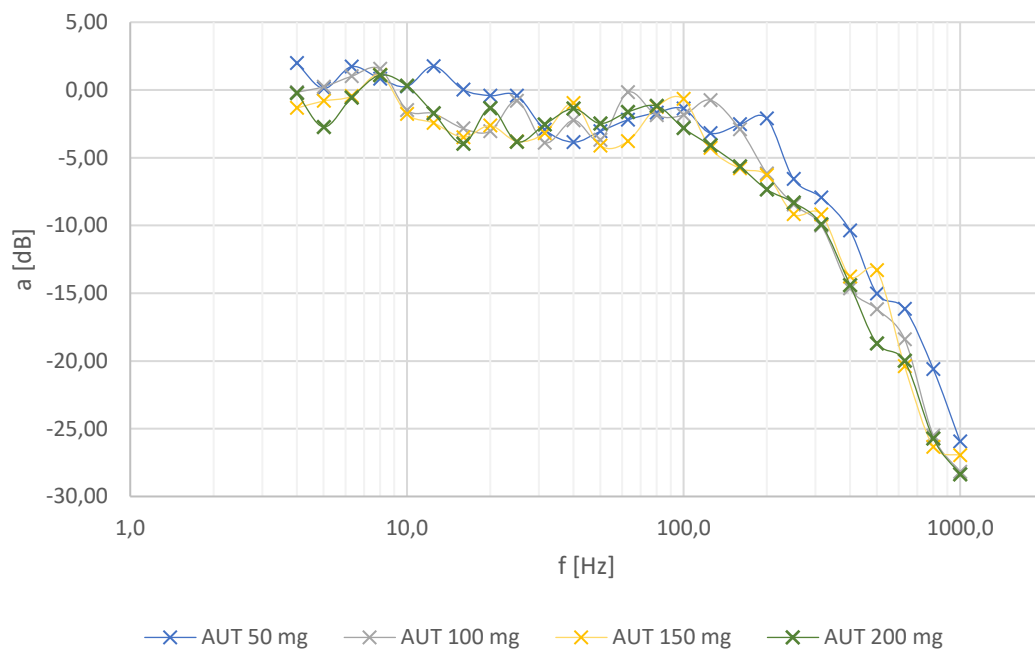
Pokud porovnam naměřené hodnoty z manuálního a automatizovaného měření, tak z obrázku 3.3 vyplývá, že automatizovaně získaná data mnohem méně odpovídají trendu, který bychom očekávali. U dat z automatizovaného měření by bylo vhodné toto měření opakovat vícekrát a získané hodnoty zprůměrovat, aby došlo k potlačení náhodných vlivů, např. šumu.

Co se týká zhodnocení výsledků měření, tak bylo ověřeno, že zlom v kmitočtové charakteristice snímače je v blízkosti kmitočtu 200 Hz, který uvádí výrobce snímače.



Obrázek 3.3: Porovnání výsledků zesílení z manuálně naměřených dat a automaticky naměřených dat

Při porovnání hodnot získaných z automatizovaného měření pro různé hodnoty frekvence a prahové úrovně je možné vidět, že nejlepší detekce nastává pro hodnoty řádově v jednotkách Hz. Zde je možné detekovat zrychlení i pod nastavenou hodnotu generovaných vibrací. Svůj vliv zde ale může mít i použitá měřicí metoda, kdy na nižších frekvencích se amplituda zvyšuje pomaleji než na vyšších frekvencích, a tudíž, pokud se pomaleji blížíme k požadované hodnotě, tak na snímač působí vibrace v blízkosti nastavené prahové úrovně pro probuzení snímače delší časový úsek, a tedy v průběhu šesti požadovaných detekcí se amplituda zrychlení zvýší méně. Z hlediska délky měření celého uvažovaného kmitočtového rozsahu trvalo nejdéle měření nízkých frekvencí, protože velikost zrychlení se zvyšovala pomaleji než na frekvencích řádově desítky až nižší stovky Hz, na kterých proběhlo měření nejrychleji. Na vysokých frekvencích sice zvýšení hodnoty zrychlení probíhalo rychle, ale vzhledem k šířce pásma bylo zapotřebí dosáhnout vysokých hodnot zrychlení, tudíž změření těchto hodnot probíhalo pomaleji než v případě frekvencí uprostřed spektra.



Obrázek 3.4: Porovnání výsledků zesílení z automatických měření pro různé velikosti prahového registru

Hodnoty zesílení při, kterých došlo k detekci jsou zobrazené v obrázku 3.4, vypočtená data jsou v příloze A.6.

4. PŘEHLED NÍZKO PŘÍKONOVÝCH MIKROKONTROLERŮ S BEZDRÁTOVÝM ROZHRAŇÍM

V zadání je uvedeno, že průzkum má být zaměřen na nízkopříkonové mikrokontrolery s jádrem ARM-CORTEX-M4 a bezdrátovým rozhraním pracujícím v sub-GHz pásmu a pásmu 2,4 GHz. Z toho vyplývá zaměření na komunikační protokoly Bluetooth, Wi-fi a LoRa. U některých mikrokontrolerů se ještě objevuje bezdrátový komunikační protokol NFC, ten je ovšem pouze na frekvenci 13,56 MHz a jeho dosah je velmi krátký [24]. Komunikační protokol Bluetooth vysílá na frekvenci 2,402 GHz až 2,480 GHz. Pásmo Bluetooth se dělí na 79 kanálů. Dále se může lišit ve standardu, který se zapisuje ve formě čísla s tečkou například Bluetooth 4.2. Čím vyšší Bluetooth standard tím obecně lze očekávat, vyšší rychlost přenosu dat a větší dosah oproti nižším standardům Bluetooth. [25] Speciálním standardem mimo tuto řadu je pak standard Bluetooth Low Energy označovaný zkratkou BLE, mezi jehož hlavní přednosti patří nízká spotřeba energie a možnost komunikace s mnoha zařízeními najednou [26].

Komunikační protokol Wi-fi může využívat frekvence 2,4 GHz a 5 GHz. U wi-fi se využívají standardy IEEE 802.11 s doplňujícím písmenem například IEEE 802.11 b, které se liší právě posledním vloženým písmenem. Mezi jednotlivými standardy dochází hlavně ke zlepšení množství přenosové rychlosti, ale i nejpomalejší wi-fi je rychlejší než Bluetooth, a u bezdrátového měřicího modulu nebudeme přenášet příliš mnoho dat. [27] LoRa je komunikační bezdrátový protokol určený k přenosu dat na dlouhé vzdálenosti. Vysílá na frekvenci v sub-GHz pásmu konkrétně v Evropě se používá pásmo 868 MHz. Používá se pro komunikaci v rámci internetu věcí. [28]

4.1 Průzkum trhu

Oproti průzkumu trhu MEMS snímačů v kapitole 1. je průzkum trhu u vývojových kitů s mikrokontrolery složitější. Katalogové údaje jsou často zkráceny na pár stránek a výrobce udává v tomto přehledu pouze vybrané parametry a případně možnosti použití této vývojové desky. Přehled je v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Průzkum nízkopříkonových mikrokontrolerů

Vývojový modul	MCU	Wifi pásma [GHz]	Bluetooth	RAM	FLASH paměť	Periferie	Jiné
PSoC 62S2 Wi-Fi BT Pioneer Kit [29]	Infineon CY8C624ABZLS2D44	2,4/5	5.0 BLE	1 MB SRAM	2 MB	Arduino Uno V3, SPI, UART	slot micro SD
B-L4S5I-IOT01A [30]	ST Microelectronics STM32L4	2,4	4.1	640 KB	2 MB	Arduino Uno V3, Pmod, SPI, UART, I2C	NFC
AES-EVB-BCM4343W-G [31]	STM32F411	2,4	4.1	128 KB	512 KB	I2C, SPI, UART	
MAX32665EVKIT [32]	MAX32665	není	5.0 BLE	560 KB	1 MB	I2C, SPI, UART	slot micro SD
QN9090DK [33]	QN9030T [34]	není	5.0 BLE	88 KB SRAM	320KB	USART/SPI/I2C	128 ROM
ESP32-DEVKITC [35]	ESP 32 [36]	2,4/5	4.2	520 KB SRAM		SPI/I2c/I2S/UART	448 ROM
EK-RA4W1 [37]	RA4W1	není	5.0 BLE	96 KB	512 KB	PMOD(SPI, UART, I2C)	
NUCLEO-WL55JC [38]	ST Microelectronics STM32WL55	není	není	64 KB	256 KB	SPI, UART, CAN, I2C, Arduino Uno V3	LORA
NUCLEO-WB55RG [39]	ST Microelectronics STM32WB55	není	5.2BLE	256 KB	1 MB	Arduino Uno V3, SPI, UART, CAN, I2C	
CC3220SF-LAUNCHXL [40]	TI CC3220SF	2,4	BLE	256 KB	1 MB	I2C, SPI, UART	

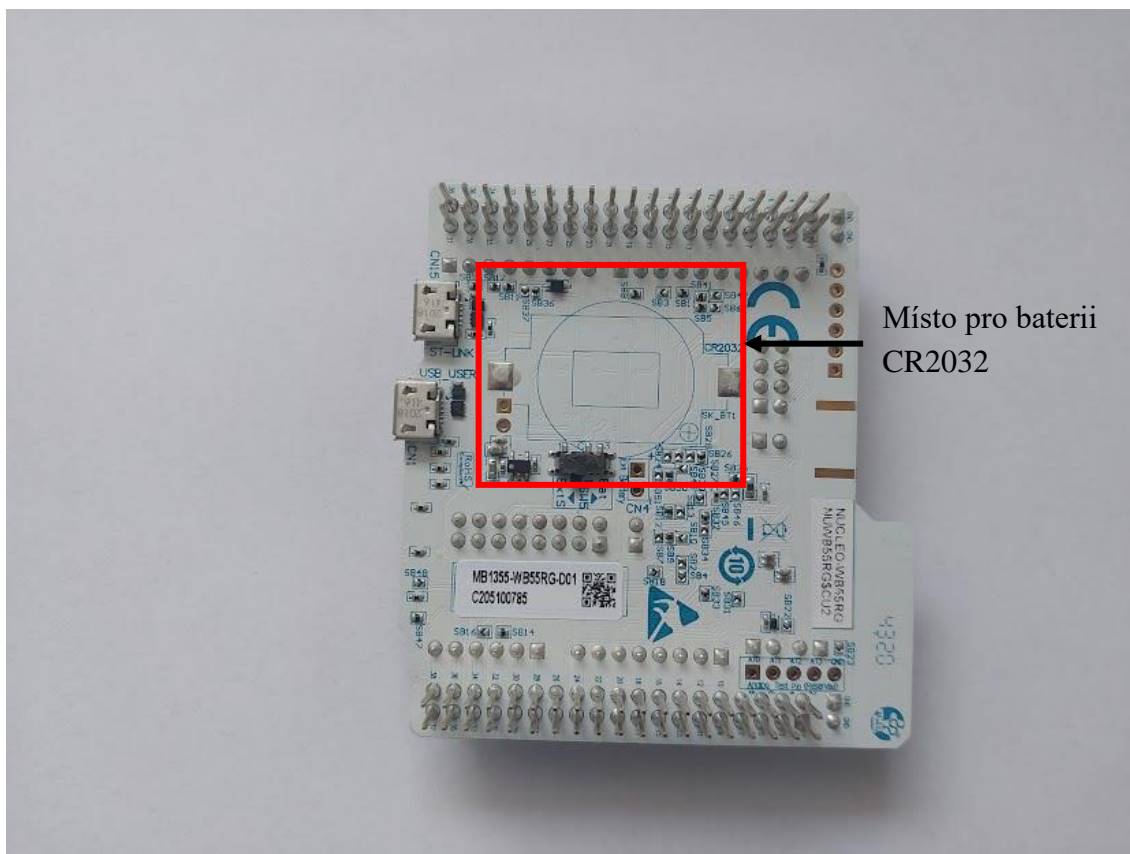
Z průzkumu vyplývá, že nejvíc je zastoupený komunikační protokol Bluetooth se standardem Bluetooth Low Energy. Bluetooth zde neobsahuje pouze jediný mikrokontroler NUCLEO WL55JC, který ovšem jako jediný umožňuje komunikaci pomocí protokolu LORA. Pokud mikrokontroler obsahuje wifi modul, tak nejběžnější používaná frekvence je 2,4 GHz. Frekvence 5 GHz u wifi nesplňuje frekvenční rozsah požadovaný v zadání, ale je zde uvedena pro úplnost. ESP32 je velice rozšířeno, ale neobsahuje jádro ARM cortex M4. Místo něj obsahuje mikroprocesor Xtensa LX6. [36]

Velikosti pamětí RAM jsou různé na jednotlivých mikrokontrolerech. Dále jsou některé doplněny pamětí ROM případně pamětí FLASH. Všechny desky jsou vybaveny základními komunikačními standardy SPI, I2C, UART. Některé jsou navíc uspořádány v pořadí konektorů Arduino Uno. Dva mikrokontrolery navíc disponují slotem na SD kartu.

V kontextu celé práce je ještě zajímavý vývojový modul B-L4S5I-IOT01A s mikrokontrolerem STM32L4+. Ten totiž obsahuje MEMS snímač LSM6DSL. Jedná se o 3-osý akcelerometr a 3-osý gyroskop. Výsledné zrychlení je měřeno na 16 bitů, tudíž hodnota nejnižší bitu odpovídá při rozsahu $\pm 2g$ hodnotě 0,061 mg. Spotřeba je závislá na výstupní četnosti dat a pouze se zapnutým akcelerometrem při výstupní četnosti dat 12,5 Hz činí 9 μA a při výstupní četnosti dat 208 Hz je spotřeba 85 μA . V porovnání s akcelerometrem ADXL362, kde spotřeba v měřicím režimu činí 920 nA a při režimu automatické detekce jen 270 nA, což je v porovnání s LSM6DSL výrazně méně. [30] Vzhledem k tomu, že se výrazně odlišují ve spotřebě, nebudu provádět další srovnání parametrů se snímačem ADXL362.

4.2 Výběr mikrokontroleru

Na základě zpracovaného průzkumu trhu a po konzultaci s vedoucím práce byl vybrán vývojový kit NUCLEO-WB55RG od výrobce STMicroelectronics, který obsahuje mikrokontroler STM32WB55RGV6U. Tento mikrokontroler obsahuje kromě požadovaného procesoru s jádrem ARM-CORTEX M4 ještě další procesor s jádrem ARM-CORTEX M0+. Tento druhý procesor je určen pro zajišťování bezdrátového přenosu, v tomto případě Bluetooth Low Energy 5.0 se standardem IEEE 802.15.4. Maximální udávaná přenosová rychlost přes Bluetooth je u toho mikroprocesoru 1Mb/s a lze nastavit několik úrovní vysílacího výkonu vysílače, podle vzdálenosti druhého Bluetooth zařízení. Snížení vysílacího výkonu nám umožňuje snížit spotřebu elektrického proudu a tím prodloužit provoz na baterii. Na spodní straně vývojové kitu je nachystáno místo na knoflíkovou baterii CR2032. Pro tento vývojový kit by ale bylo zapotřebí pro připojení baterie CR2032 napájet na desku modul, do kterého se baterie vloží. Celá spodní strana vývojového kitu je na obrázku 4.14.1.



Obrázek 4.1 NUCLEO WB55RG spodní strana s místem na vložení baterie CR2032

Dále je STM32WB55 vybaveno FLASH pamětí o velikosti 1 MB a 256 KB paměti RAM. Pro komunikaci s ostatními zařízeními lze využít rozhraní USART, SPI, I2C a USB. Dále navíc obsahuje stejně rozmístěné konektory s Arduino UNO, což usnadňuje propojení s ostatními vývojovými sadami. [39]

5. MĚŘICÍ MODUL

Původní měřicí modul složený z vývojového kitu EVAL-ADICUP360 a modulu s MEMS snímačem EVAL-ADXL362-ARDZ neumožňoval bezdrátový přenos dat a proto bylo nutné nahradit EVAL-ADICUP360 za vybranou vývojovou desku NUCLEO-WB55RG s mikrokontrolerem STM32WB55.

Nejdříve jsem provedl prvotní spuštění podle přiloženého návodu, který měl jednoduše ukázat možnosti použití této vývojové desky. Stáhnul jsem si do mobilu aplikaci ST BLE Sensor. Poté stačilo připojit vývojovou desku k napájení přes USB port a v mobilu se k ní přes Bluetooth připojit. Aplikace umožňovala zobrazení síly bezdrátového signálu při přenosu a blikat LED diodou.

Dále bylo nutné nainstalovat na počítač doporučený software od ST Microelectronics k ovládní desky. Programování kódu do vývojové desky se provádí ve vývojovém prostředí STM32CubeIDE a pro zjednodušení nastavení základních parametrů desky slouží program STM32MX.

5.1 Propojení MEMS snímače s vývojovou deskou

Pro správnou funkci modulu EVAL-ADXL362-ARDZ bylo nutné zjistit, přes které konkrétní piny komunikoval s původní deskou EVAL-ADICUP360, která byla k vývoji tohoto snímače doporučena přímo od výrobce Analog Devices. Základní datová komunikace přímo s MEMS snímačem ADXL362 probíhá přes SPI. Dále se vedle snímače na modulu nachází LCD displej, který komunikuje také přes SPI. Dva výstupní piny slouží jako chip select pro rozlišení komunikace se snímačem a displejem. Pro komunikaci s displejem se používají ještě další 2 výstupní piny. První slouží k zapínání podsvícení a druhý určuje, zda se jedná o řídicí instrukci nebo o data. Jeden vstupní pin je připojen přímo na ADXL362 a ten se používá pro rozlišení režimu aktivního měření nebo režimu nízké spotřeby.

Modul EVAL-ADXL362-ARDZ má rovněž stejné rozmístění konektorů, jako Arduino UNO. Díky tomu, že desky mají stejné rozmístění konektorů, tak byla vývojová deska se snímačem zasunuta do konektorů na vývojové desce NUCLEO-WB55RG. V případě propojení desek pouze krátkými vodiči by se muselo navrhnout pevné spojení, které by drželo desky spolu. V tomto případě je, ale propojení konektorů velmi pevné, takže desky jsou dokonale spojeny k sobě bez nutnosti dalších opatření.

K vývojové desce NUCLEO-WB55RG je dodána celá řada předpřipravených programů [41]. Proto byl zvolen program obsahující komunikaci pomocí SPI. Tento program je již předem vytvořený a dá se upravovat ve vývojovém prostředí STM32CubeIDE. Do této šablony bylo nutné doplnit kód z programu, který běžel na ADICUP360. Hlavní struktura kódu zůstala stejná, bylo ale nutné změnit funkce, které

do bufferu se ukládaly hodnoty při odesílání adresy paměťového místa. Bylo tedy nutné zajistit, aby byl SPI buffer před zahájením komunikace prázdný. Problém s SPI bufferem byl tedy vyřešen a poté již komunikace s displejem i ADXL362 fungovala správně.

Snímač se ale zdánlivě, nedokázal přepínat mezi měřícím režimem a režimem nízké spotřeby. Nejdříve byly zkontrolovány řídicí registry u ADXL362 a dále byla zkontrolována poloha P7 na desce se snímačem. Vyčtením z registru STATUS se nakonec zjistilo správného přepínání mezi režimy uvnitř ADXL362. Přesto na mikrokontroleru byla pořád čtena na pinu hodnota 0. Nakonec se ukázalo, že nebyla zapsána hodnota do registru INT1 a tím nebyl tento AWAKE status ze snímače namapován na jeho výstupní pin.

6. BEZDRÁTOVÝ PŘENOS

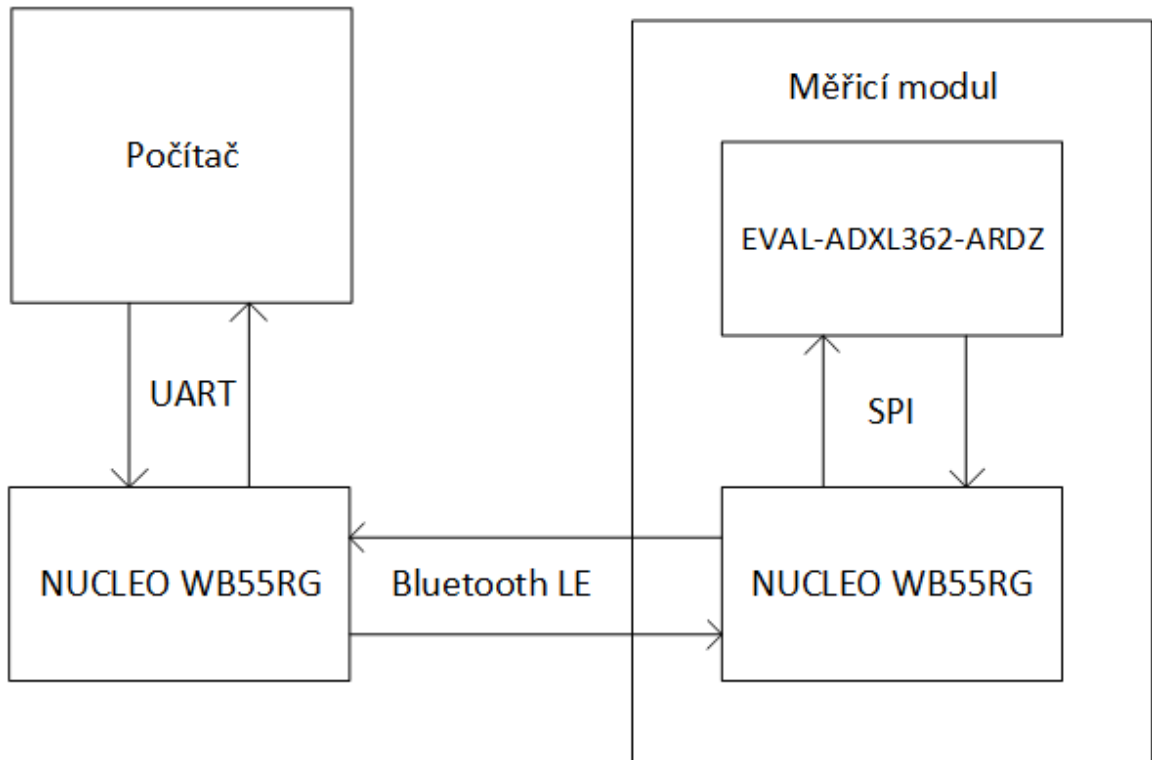
Pro bezdrátový přenos bylo nutné vybrat přijímač. Nakonec byla zvolena opět vývojová deska NUCLEO WB55RG, která zachytí Bluetooth komunikaci a zprávu pošle přes UART dále do počítače. V příkladech od ST Microelectronics se nachází příklad s názvem BLE_LLD_Chat, který je určen pro komunikaci přes Bluetooth mezi dvěma NUCLEO deskami [41]. Jakmile zachytí zprávu tak ji přes UART pošle do počítače.

K počítači tedy byly postupně připojeny 2 vývojové desky NUCLEO-WB55RG a nahrán do nich program BLE LLD Chat. Kompilace proběhla v pořádku, ale přenos dat mezi deskami neprobíhal. V readme.txt byl návod na zprovoznění tohoto příkladu. Postupně byly tedy zkontrolovány všechny propojky až nakonec jsem zjistil, že se musí na desky nahrát soubor stm32wb5x_BLE_LLD_fw.bin. Následně jsem tedy našel požadovaný soubor na internetových stránkách STMicroelectronics [41]. Zjistil jsem, že je nutné aktualizovat firmware u obou desek. K tomu je zapotřebí další program od STMicroelectronics s názvem STM32CubeProgrammer. Bylo tedy zapotřebí do tohoto programu vložit firmware stm32wb5x_BLE_LLD_fw.bin a zjistit počáteční adresu v paměti z příloženého release_note. Poté byl firmware aktualizován na obou deskách a následně se podařilo spustit běh programu BLE LLD Chat.

Program BLE LLD Chat funguje následovně. Ukládá si znaky, které jsou přijaty přes UART a stisknutím klávesy enter pošle tyto znaky na druhou desku, která je přes UART vypíše. V případě, že deska nevysílá data, tak neustále data očekává. Maximální množství odeslaných dat najednou je 255 B, takže je možné poslat 255 ASCII znaků. Ve výchozím režimu očekává po odeslání dat potvrzení, od druhé strany, že tyto data zaregistrovala. Pokud toto potvrzení neobdrží, vypíše přes UART na počítač chybu.

7. NÁVRH A REALIZACE MĚŘICÍ JEDNOTKY

7.1 Návrh



Obrázek 7.1 Návrh měřicí jednotky

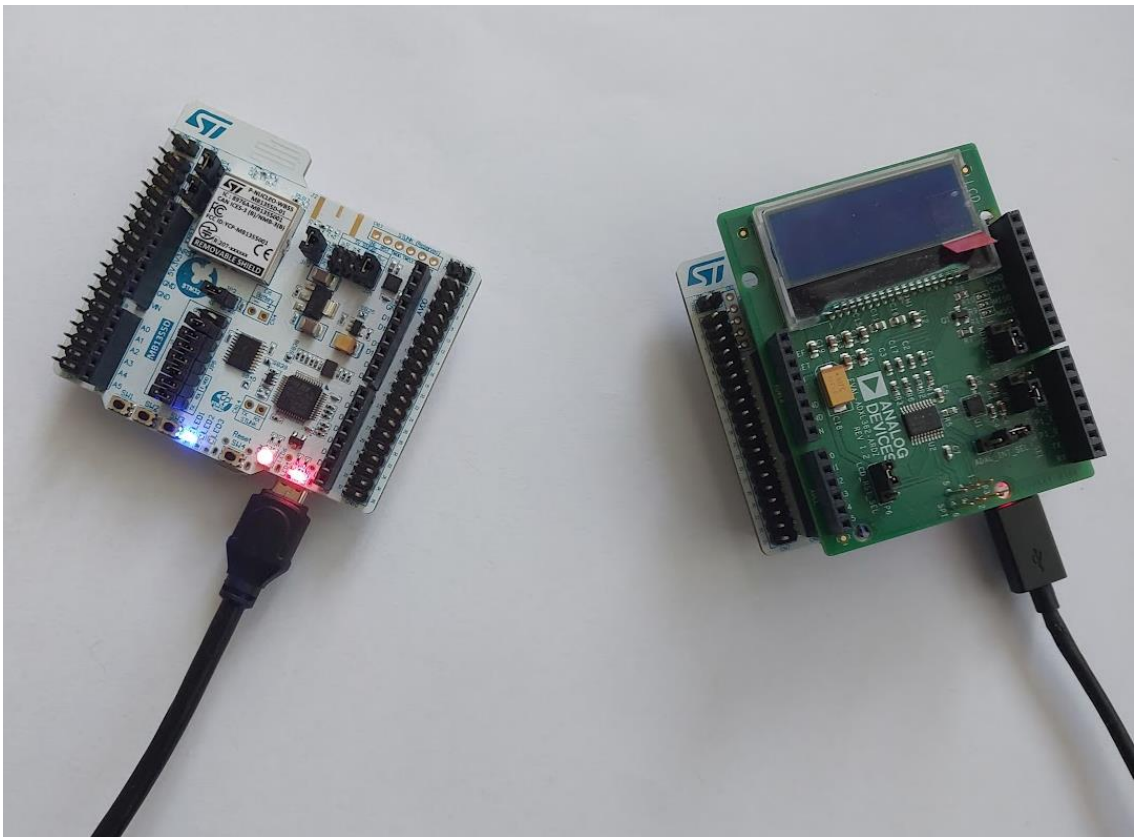
Na obrázku 7.1 je znázorněna koncepce měřicí jednotky. Pro přenos by měla využívat dvě vývojové desky NUCLEO WB55RG, které mezi sebou komunikují prostřednictvím Bluetooth. Jedna vývojová deska bude připojena k počítači, na který se budou přenášet změřená data. Druhá vývojová deska bude připojena k vývojovému kitu EVAL-ADXL362-ARDZ na kterém se nachází snímač zrychlení. Tato deska bude schopná detekovat změnu pohybu a následně posílat naměřená data přes Bluetooth Low Energy do druhé vývojové desky.

Ovládání měřicí jednotky by mělo být umožněno posíláním příkazů z počítače. Slovem START by se povolilo měření a slovem STOP by se měření ukončilo. Slovem CONFIG by bylo možné nastavit velikost prahového registru a dobu než se snímač přepne do režimu nízké spotřeby. Velikost hodnoty v prahovém registru a velikost času by se zapisovaly za slovo CONFIG například CONFIG 50, 1000 by nastavilo velikost prahové hodnoty v registru na 50 mg a dobu do vypnutí snímače na 1 sekundu.

7.2 Realizace měřicí jednotky

Pro realizaci měřicí jednotky byly tedy potřeba 2 samostatné funkční programy. Pro vývojovou desku připojenou k počítači, bylo možné použít již výše zmíněný BLE LLD Chat pouze s drobnými úpravami kódu ohledně výpisu dat na počítač.

Pro druhou desku, ke které je připojena deska EVAL-ADXL362-ARDZ s akcelometrem bylo nutné nejdříve spojit již existující 2 programy (BLE LLD Chat a program zajišťující komunikující s EVAL-ADXL362-ARDZ). Vzhledem k mnohem větší složitosti programu BLE LLD Chat, se jevila jednodušší varianta použít tento kód jako základní a do něho vložit zbývající kód, zajišťující komunikaci s akcelerometrem. Realizace měřicí jednotky s druhou vývojovou deskou zajišťující příjem dat je na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2 Realizace měřicí jednotky s bezdrátovým přenosem dat

V prvotní fázi bylo nejdříve nutné, pracovat na změně programové části týkající se odesílání dat přes Bluetooth. Nejdříve bylo zapotřebí zjistit, kde se v programové části předávají data z UART na Bluetooth. Nalezl jsem soubor chat_app.c, ve kterém se nacházejí funkce, které toto zajišťují. Po získání znaku přes UART je tento znak uložen do pole uartRxBuf o velikosti 255 znaků. Jakmile přijde přes UART znak na nový řádek (`\n`), tak se na poslední hodnotu pole vloží 0. Poté se zavolá funkce, která zajistí odeslání všech vložených znaků.

Abych si ověřil odesílání dat přes Bluetooth, upravil jsem funkci, která v původním programu ukončila komunikaci přes Bluetooth a její spuštění se vyvolalo stisknutím tlačítka na desce. Zde jsem dal do bufferu pro odeslání dat slovo „ahoj“ zakončené znakem \0, abych definoval konec. Po nahrání programu na jednu vývojovou desku jsem nahrál na druhou vývojovou desku nezměněný program BLE LLD Chat a pokusil se otestovat funkci. Možnost komunikace mezi deskami zůstala zachována a po stisknutí tlačítka se na druhé desce vypsal slovo „ahoj“.

Vzhledem k tomu, že jsem už věděl, jak se budou odesílat data přes Bluetooth, pokračoval jsem dále ve spojení programu zajišťujícího měření s projektem BLE LLD Chat. Postupně jsem vložil do projektu zdrojové soubory s funkcemi a doplnil hlavičkové soubory. Ve vývojovém prostředí STM32CubeIde bylo nutné definovat cestu ke složce, ve které se tyto soubory nacházely, jinak je kompilátor nebyl schopný najít. Kromě souborů, které byly pouze v programu pro ADXL362 bylo nutné změnit soubory, které se vyskytovaly v obou projektech.

Základním souborem je v tomto případě hlavičkový soubor `stm32wbxx_hal_conf.h`. V tomto souboru se totiž definují makra a v závislosti na tom, zda jsou definovány, se vkládají hlavičkové soubory, které následně umožňují obsluhu hardwaru. V tomto konkrétním případě bylo nutné umožnit vkládání hlavičkových souborů pro obsluhu SPI, protože v BLE LLD Chat nebylo SPI používáno. Prohlédl jsem tedy totožný soubor u programu pro obsluhu ADXL362 a provedl tak vložení všech souborů, které dosud nebyly v projektu BLE LLD Chat definovány. Tyto hlavičkové soubory se ani nenacházely v adresáři projektu, takže je bylo nutné vložit a definovat k nim cestu.

Při pokusu o kompilaci projektu ale nastala chyba inicializace u datového typu k sběrnici SPI. Následně jsem zjistil, že není definováno makro, které umožňuje použití low level funkcí. Začal jsem hledat, kde je tato definice v programu pro komunikaci se snímačem ADXL362. Nakonec jsem zjistil, že tato definice není uvedena v kódu, ale někde v nastavení šablony, na které celý program pro obsluhu ADXL362 vznikl.

Nakonec se mi povedlo najít místo a definoval jsem klíčové slovo `USE_FULL_LL_DRIVER` v nastavení celého projektu. Tímto byl vyřešen tento problém, ale vzápětí při kompilaci vzniklo mnohem více chyb. Nejčastěji se objevovaly chyby, že datový typ není definován. V rámci vývojového prostředí se ale po kliknutí na otevření deklarace dalo na danou definici datového typu dostat.

Nakonec jsem celou situaci vyřešil tak, že jsem postupně zkopíroval všechny ovladače od vývojové desky a vložil je do adresáře projektu. Předtím byly vloženy pouze zástupci na ovladače, které byly potřeba pouze pro vytvořený projekt BLE LLD Chat. Když jsem vložil absolutní cestou pouze ovladače, které nebyly součástí projektu BLE LLD Chat, ale byly používány u projektu pro obsluhu SPI, tak pravděpodobně vznikla tato chyba. Poté co již byly všechny ovladače a soubory vloženy do projektu správně, začal celý program fungovat.

7.3 Měření a poslání dat

Celý program BLE LLD Chat je postaven na sekvenci funkcí. Pokud je daná funkce potřeba, tak se u ní zvýší priorita a tím je zavolána. Je zde funkce `UTIL_SEQ_Idle`, která se spustí, pokud neprobíhá žádná jiná. A právě do této funkce bylo vloženo čtení dat ze snímače v případě, že se snímač probudí. Tyto hodnoty jsou uloženy do pole a jakmile je změřeno 7 hodnot, tak se zavolá funkce, která z nich vytvoří řetězec znaků, který se následně odešle přes Bluetooth na druhou vývojovou desku. Vzhledem k tomu, že funkce zajišťující přenos přes Bluetooth je konstruována na přenos ASCII znaků, tak jsou tyto hodnoty rovnou převedeny na řetězec, který se vypíše na počítači. V případě posílání naměřených dat by nastal problém v případě, že by se rovnaly 0, protože by se ukončil přenos dat. Změřené hodnoty jsou potom zobrazeny na terminálu na počítači. Snímek z terminálu je na obrázku 7.3.

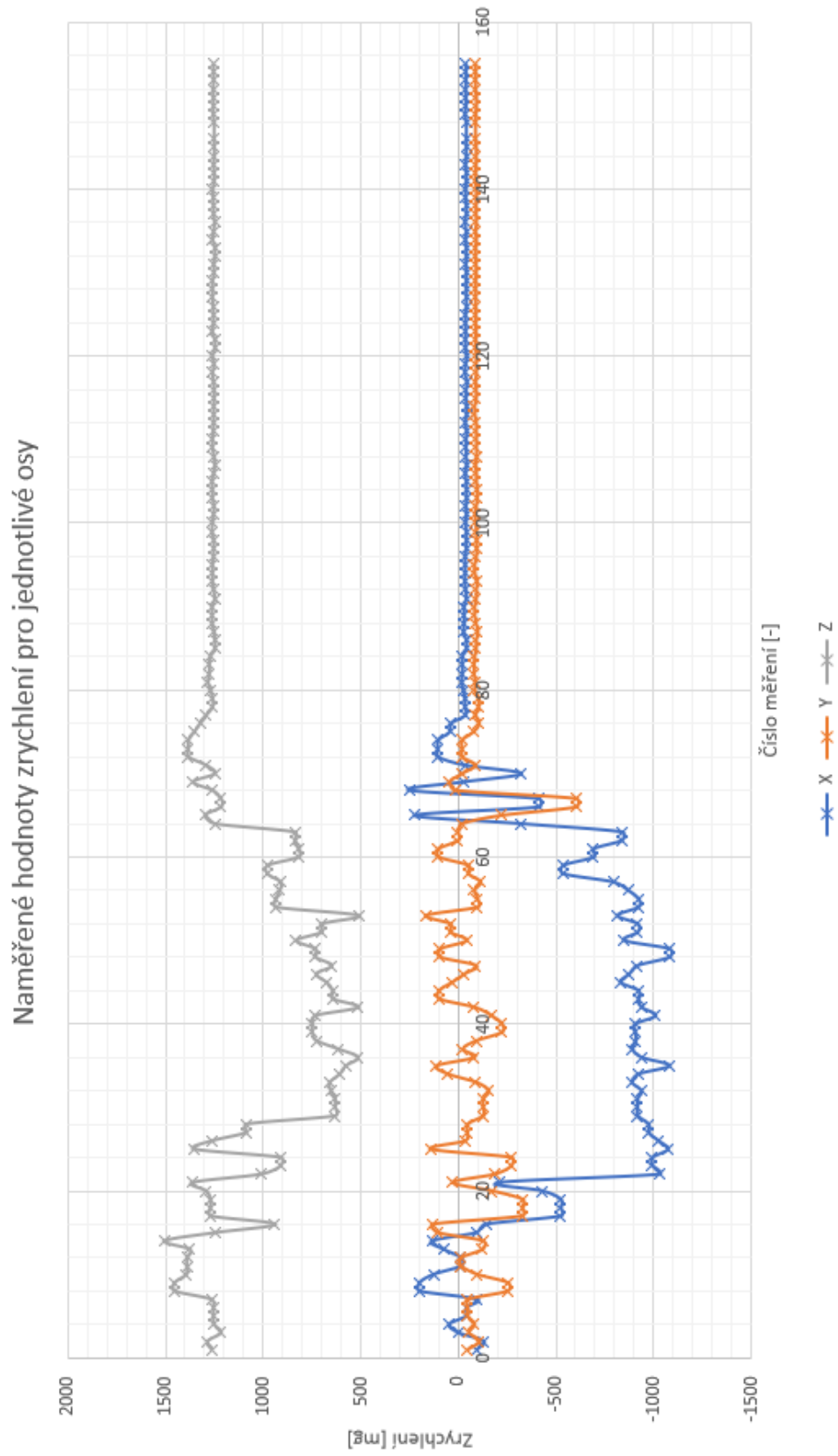
```
mereni, X, Y, Z
1, -61, -173, 1223
2, -65, -124, 1231
3, -61, -98, 1223
4, -57, -122, 1230
5, -66, -100, 1231
6, -66, -100, 1231
7, -45, -96, 1232
8, -50, -128, 1228
9, -56, -141, 1224
10, -52, -127, 1228
11, -64, -148, 1231
12, -64, -148, 1231
13, -57, -124, 1231
14, -72, -113, 1217
15, -61, -141, 1231
16, -57, -136, 1222
17, -60, -128, 1244
18, -60, -128, 1244
19, -66, -125, 1223
20, -49, -124, 1230
```

Obrázek 7.3: Výpis z terminálu na počítači

Pro správné zobrazení bylo nutné nastavit rychlost přenosu dat na 115200 Baud a vybrat port, na kterém byla vývojová deska připojena k počítači. V případě detekce pohybu se nejdříve odešle 1. řádek, který slouží jako hlavička tabulky. Jakmile je naměřeno 7 hodnot dat, jsou tyto vzorky poslány na výstup odděleny čárkou. Data jsou posílány do doby než akcelerometr ADXL362 přestane detekovat zrychlení a přepne se do režimu nízké spotřeby. Takto naměřená data lze vložit ve formátu csv do excelu a dále

je zpracovávat. Grafické zobrazení naměřených dat je na obrázku 7.4. Detekce pohybu byla vyvolána nadzvednutím měřicí jednotky ze stolu. Naměřená data jsou uvedena v příloze B. V levé části grafu si můžeme všimnout, že je zde změna zrychlení, která přepnula snímač do měřícího režimu. V pravé části grafu je naopak změna zrychlení téměř nulová, což má za následek přepnutí snímače do režimu nízké spotřeby.

Při měření byla nastavena prahová hodnota pro detekci zrychlení na hodnotu 50 mg a potřebný čas pro vypnutí akcelerometru byl nastaven na 1 sekundu bez relativní detekce pohybu nad prahovou hodnotu. Výstupní četnost dat byla nastavena 100 Hz. Změřená četnost se ale pohybuje přibližně kolem hodnoty 70 Hz. To je způsobeno omezením rychlosti přenosu přes Bluetooth. Vyšší počet přenesených dat už nedokázala vývojová deska zpracovat a tím byla generována chyba, která ukončila provádění dalších instrukcí.



Obrázek 7.4: Naměřené průběhy zrychlení

7.4 Ovládání pomocí příkazů

Bezdrátový měřicí modul měl být podle plánů ovládaný z počítače pomocí klíčových slov. Do funkce, která zpracovává přijatý řetězec znaků byl tedy vložen kód, který hledal definované příkazy. Podle předpokladu by se tato slova vždycky nacházela na začátku přijatého řetězce, takže stačilo porovnávat začáteční znaky, zda se tam dané slovo nevyskytuje. V případě slov START a STOP stačilo detekovat pouze tyto slova a povolit nebo zablokovat probuzení snímače. V případě slova CONFIG bylo ještě nutné načíst poslané parametry. Vzhledem k tomu, že mohou mít čísla různou délku, není přesně definované, kde se mohou dané číslice nacházet. Jakmile tedy program detekoval slovo CONFIG, začal za ním hledat číslice. V případě nalezení první číslice program hledá další číselné znaky, dokud nenalezne jiný znak než číslici. V případě nalezení tohoto znaku si uloží indexy, na kterých se tyto číslice v přijatém poli znaků nacházejí. Následně podle stejného principu nalezne další posloupnost číslic, která odpovídá nastavení času, než dojde k přepnutí akcelerometru do režimu nízké spotřeby. Tento algoritmus byl tedy implementován do programu a fungoval do chvíle, než začaly být odesílány naměřená data přes Bluetooth.

Postupně byly odstraňovány části kódu týkající se odeslání dat přes Bluetooth, aby byla nalezena příčina tohoto problému. Ve chvíli, kdy bylo odstraněno volání funkce pro přenos dat při dosažení 7 naměřených vzorků, začaly být tyto příkazy detekovány. Zároveň byl program schopný při přepnutí do měřicí režimu odesílat krátký řetězec, který slouží jako hlavička pro tabulku u csv souboru. Nabízela se tedy možnost, že vlivem velkého množství dat se nestíhají přijímat nová data. Proto byl pro otestování prodloužen první řetězec a bylo zjištěno, že příjem probíhá i při odesílání většího množství dat. Druhou možností bylo, jestli nemůže být chyba v řetězci, který obsahuje naměřené hodnoty. Na místo naměřených dat byl funkcí posílán první řetězec, což vedlo k úspěšnému přenosu dat do počítače, ale příjem příkazů z počítače se opravit nepodařilo.

V posledním pokusu o nápravu byly po naměření hodnot provedeny pouze stejné instrukce jako při odesílání hlavičky tabulky, ale příjmu příkazů z počítače dosaženo nebylo. Jediný příjem dat, který je deska schopna detekovat je pro obdržení potvrzení po odeslání prvního řádku. Poté již není příslušná funkce pro příjem dat z Bluetooth zavolána ani po delší době od posledního odeslání naměřených dat. Proto je nakonec výsledný program bez ovládání z počítače, aby byl schopen posílat naměřená data přes Bluetooth.

8. ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem se zabýval výběrem vhodného MEMS snímače s velice nízkou spotřebou. Posuzoval jsem, zda obsahují režim nízké spotřeby, ze kterého se mohou přepnout do normálního měřicího režimu detekováním změny zrychlení. Jako nejvhodnější s ohledem na výrobce deklarované parametry spotřeby byly vybrány akcelerometry od firmy Analog Devices ADXL367 a ADXL362, z ostatních výrobců se jim nejvíce blížil snímač BMA400 od výrobce Bosch. Nakonec byl vybrán vývojový kit se snímačem ADXL362, který byl nejlevnější a na rozdíl od zbylých vývojových kitů obsahuje i displej, na kterém se mohou zobrazovat aktuální naměřené hodnoty.

Do počítače jsem nainstaloval vývojové prostředí Cross Core Embedded Studio, které se používá pro tvorbu programu a jeho nahrání do vývojového kitu. Postupně jsem si vyzkoušel různá nastavení detekce - například změny velikosti porovnávané hodnoty v prahovém registru anebo v případě měřicího režimu zapnutí režimu nízké spotřeby.

Na vibračním stolku jsem ověřil velikost hodnoty zrychlení, při které dojde k detekci pohybu. Vyzkoušel jsem si tuto hodnotu nalézt manuálně a také pomocí automatizovaného měření, které postupně zvyšovalo velikost amplitudy zrychlení vibrací, dokud nedošlo k detekování pohybu. Do kmitočtu 200 Hz se detekována hodnota pohybovala přibližně do 3 dB od nastavené prahové hodnoty, na kmitočtu 200 Hz nastal zlom a pro vyšší frekvence bylo nutné zvyšovat velikost amplitudy zrychlení vibrací, aby došlo k probuzení. Toto přibližně odpovídalo údajům od výrobce, kdy mezní kmitočet měl být právě 200 Hz. Co se mi nepodařilo dosáhnout je, že při vyšších hodnotách prahového registru (150, 200 mg) jsme při frekvenci 200 Hz měli zeslabené zrychlení přibližně -6 dB oproti výrobcem udávaným -3 dB. Při nastavené hodnotě 50 mg v prahovém registru a manuálním proměřením vyšlo zeslabení -3,82 dB, což odpovídá výrobcem udávaným údajům. Pro dosažení lepších výsledků u automatizovaného měření by bylo vhodnější proměřit charakteristiku vícekrát, abychom snížili vliv chybných detekcí.

Dále jsem provedl průzkum trhu mikroprocesorů s jádrem ARM Cortex M4 a pro další pokračování práce byl vybrán vývojový kit NUCLEO WB55RG. Na tento vývojový kit jsem následně upravil program z desky ADICUP-360, který umožňoval měření ze snímače ADXL362.

Následně jsem otestoval bezdrátový přenos dat přes Bluetooth mezi deskami NUCLEO WB55RG pomocí programu BLE LLD Chat. Tento program umožňoval základní textovou komunikaci. Nakonec jsem navrhl koncepci bezdrátové měřicí jednotky a tuto měřicí jednotku zrealizoval. Měřicí jednotka je schopna odesílat naměřená data, ale vzhledem k omezené rychlosti přenosu přes Bluetooth zvládne odeslat pouze přibližně 70 vzorků za sekundu. Pro dosažení většího množství přenesených dat by bylo nutné upravit funkci pro odesílání dat, aby nemohl být řetězec ukončen hodnotou 0. Poté by se nemuseli naměřené hodnoty převádět na znaky a tím by bylo možné snížit celkový

přenos dat pro jedno měření. Měřená data jsou odesílána ve formátu csv a lze je snadno převést do tabulkového editoru. Vyzkoušel jsem vyvolání detekce pohybu pohybem s měřicí jednotkou a změřená data uložil do počítače. Následně jsem tyto data graficky zpracoval a vložil do Příloha B -. Ovládání měřícího modulu pomocí příkazů se mi současně s odesláním naměřených dat implementovat nepodařilo. Měřicí jednotka po odeslání naměřených dat, přestala reagovat na příjem dat přes Bluetooth. Proto výsledná měřicí jednotka pouze odesílá naměřené hodnoty.

LITERATURA

- [1] Gravitační zrychlení. In: *Wikipedia* [online]. 2021 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Gravita%C4%8Dn%C3%AD_zrychlen%C3%AD
- [2] MEMS. In: *Wikipedia* [online]. 2021 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/MEMS>
- [3] MEMS - díl 1. - Co to je a jak to vypadá ?. In: *HW server* [online]. Česká republika: HW server, 2022 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/clanek/2006111901>
- [4] Micropower, 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g Digital Output MEMS Accelerometer: Data Sheet ADXL362. In: *Analog Devices* [online]. Spojené státy americké: Analog Devices, 2019 [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl362.pdf>
- [5] Accelerometers. In: *Analog Devices* [online]. Spojené státy americké: Analog Devices, 2022 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/parametricsearch/11175#/>
- [6] ADXL367: Micropower, 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g Digital Output MEMS Accelerometer. In: *Analog Devices* [online]. Spojené státy americké: Analog Devices, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl367.pdf>
- [7] BMA400: 3-axes ultra-low power accelerometer. In: *Bosch Sensortec* [online]. Německo: Bosch Sensortec, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bma400-ds000.pdf>
- [8] BMA400. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Bosch-Sensortec/BMA400?qs=f9yNj16SXrKBoguHUc32eQ%3D%3D>
- [9] BMA456 – Data Sheet: Digital, triaxial acceleration sensor. In: *Bosch Sensortec* [online]. Německo: Bosch Sensortec GmbH, 2021 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bma456-ds000.pdf>

- [10] BMA456. In: *Mouser Electronics* [online]. Mouser Electronics [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Bosch-Sensortec/BMA456?qs=HXFqYaX1Q2wJz6UBQvRc5g%3D%3D>
- [11] LIS2DW: MEMS digital output motion sensor: high-performance, ultra-low-power 3-axis "femto" accelerometer. In: *STMicroelectronics* [online]. STMicroelectronics, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis2dw.pdf>
- [12] LIS3DH: MEMS digital output motion sensor: ultra-low-power high-performance 3-axis "nano" accelerometer. In: *STMicroelectronics* [online]. STMicroelectronics, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis3dh.pdf>
- [13] FXLS8962AF: 3-Axis Low-g Accelerometer. In: *NXP* [online]. NXP, 2022 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/FXLS8962AF.pdf>
- [14] EVAL-ADXL367-SDP: ADXL367 Customer Evaluation System. In: *Analog Devices* [online]. Analog Devices [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-adxl367-sdp.html#eb-overview>
- [15] EVAL-ADXL367-SDP. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Analog-Devices/EVAL-ADXL367-SDP?qs=sGAEpiMZZMuqBwn8WqcFUipNgoezRlc415FbXesRtlVPXXxS9Sbs8Q%3D%3D>
- [16] Analog Devices Inc. EVAL-ADXL362 Evaluation Boards. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/new/analog-devices/adi-eval-adxl362/>
- [17] EVAL-ADXL362-ARDZ. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Analog-Devices/EVAL-ADXL362-ARDZ?qs=XflvcvBPbgWy5J5QRM4pgQ%3D%3D>
- [18] EVAL-ADICUP360. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Analog-Devices/EVAL-ADICUP360?qs=UrfqKgNwc7Q8kk98mnSCgw%3D%3D>
- [19] Application Board 3.0: Bosch. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Bosch-Sensortec/Application-Board-3.0?qs=QNEbhJQKva38VDiVm63cA%3D%3D>

- [20] BMA400 Shuttle Board 3.0. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/Bosch-Sensortec/BMA400-Shuttle-Board-3.0?q=s=Wj%2FVkw3K%252BMBdDa1zYrteLA%3D%3D>
- [21] Resolving the -chain-position error with OpenOCD. In: *Sysprogs OÜ* [online]. Sysprogs OÜ, © 2012-2023 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://visualgdb.com/support/chainposition/>
- [22] Analogdevicesinc / EVAL-ADICUP360: ADICUP360_ADXL362_Project. In: *GitHub, Inc.* [online]. GitHub, Inc., 2023 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: https://github.com/analogdevicesinc/EVAL-ADICUP360/tree/master/projects/ADICUP360_ADXL362_Project
- [23] Accelerometer Specifications - Quick Definitions. In: *Analog Devices* [online]. Spojené státy americké: Analog Devices [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/landing-pages/001/accelerometer-specifications-definitions.html>
- [24] Co je NFC a k čemu je dobré ho použít?. In: *Svět Androida* [online]. 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.svetandroida.cz/co-je-nfc-k-cemu-je-dobre-ho-pouzit/>
- [25] Bluetooth. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
- [26] Bluetooth Low Energy není jen nová verze standardu Bluetooth. In: *Automa* [online]. 2013 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/bluetooth-low-energy-neni-jen-nova-verze-standardu-bluetooth-2013_12_0_10907/
- [27] IEEE 802.11. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- [28] LoRa. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/LoRa>
- [29] CY8CKIT-062S2-43012: PSoC 62S2 Wi-Fi BT Pioneer Kit Guide. In: *Infineon* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-CY8CKIT-062S2-43012_PSoC_62S2_Wi-Fi_BT_Pioneer_Kit_Guide-UserManual-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7d0d8da4017d0f01c8f11927
- [30] STMicroelectronics STM32L4+ Series Microcontrollers. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/new/stmicroelectronics/stm-stm32l4-microcontrollers>

- [31] BCM4343W IoT Starter Kit. In: *Avnet* [online]. [cit. 2023-05-19].
Dostupné z: <https://www.avnet.com/opasdata/d120001/medias/docus/53/AES-EVB-BCM4343W-G%20IoT%20StarterKit%20-%20Hardware%20User%20Guide%20rev.1.0.pdf>
- [32] MAX32665/MAX32666. In: *Analog Devices* [online]. [cit. 2023-05-19].
Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max32665-max32666.pdf>
- [33] Development platform for QN9090/30(T) wireless MCUs. In: *NXP* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/products/wireless/bluetooth-low-energy/development-platform-for-qn9090-30t-wireless-mcus:QN9090-DK006>
- [34] QN9090(T)/QN9030(T): Bluetooth Low Energy 5.0 wireless MCU. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/302/QN9090_T_QN9030_T_-1713806.pdf
- [35] Espressif Systems ESP32-DevKitC Development Boards. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/new/espressif/espressif-esp32-devkitc-boards/>
- [36] Espressif Systems ESP32 Dual-Core Wi-Fi® Dual-Mode BLUETOOTH® SoCs. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/new/espressif/espressif-esp32-soc/>
- [37] Renesas Electronics EK-RA4W1 Evaluation Kit for RA4W1 MCU. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/new/renesas/renesas-ekra4w1-eval-kit>
- [38] STMicroelectronics STM32WL Nucleo-64 Board. In: *Mouser Electronics* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/new/stmicroelectronics/stm-stm32wl-nucleo-64/#Bullet-2>
- [39] NUCLEO-WB55RG. In: *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2023-05-19].
Dostupné z: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-wb55rg.html>
- [40] CC3220SF-LAUNCHXL. In: *Texas Instruments* [online]. [cit. 2023-05-19].
Dostupné z: <https://www.ti.com/tool/CC3220SF-LAUNCHXL>
- [41] STM32CubeWb: STM32Cube MCU Package. In: *STMicroelectronics* [online]. 2023 [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/embedded-software/stm32cubewb.html>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - PŘÍLOHA A-NAMĚŘENÉ HODNOTY	48
PŘÍLOHA B - NAMĚŘENÉ HODNOTY-ODESLANÉ PŘES BLUETOOTH	

Příloha A - Příloha A-Naměřené hodnoty

A.1 Tabulka naměřených hodnot-manuální měření

Frekvence vibrací [Hz]	Naměřené zrychlení		Vypočteno		
	laser [mg]	Čidlo [mg]	zrychlení _i [mg]	Δ zrychlení _i [mg]	δ zrychlení _i [%]
4	19,92	19,83	39,84	-10,16	20,32
5	22,07	22,06	44,14	-5,86	11,72
6,3	22,76	22,72	45,52	-4,48	8,96
8	22,96	22,75	45,92	-4,08	8,16
10	25,40	25,46	50,80	0,80	1,60
12,5	26,42	26,54	52,84	2,84	5,68
16	26,50	27,15	53,00	3,00	6,00
20	27,72	27,56	55,44	5,44	10,88
25	21,04	20,53	42,08	-7,92	15,84
31,5	22,61	21,61	45,22	-4,78	9,56
40	21,13	20,08	42,26	-7,74	15,48
50	28,41	27,15	56,82	6,82	13,64
63	25,03	24,04	50,06	0,06	0,12
80	25,64	25,36	51,28	1,28	2,56
100	26,70	26,14	53,40	3,40	6,80
125	26,73	25,57	53,46	3,46	6,92
160	30,76	28,72	61,52	11,52	23,04
200	38,80	35,10	77,60	27,60	55,20
250	50,68	47,76	101,36	51,36	102,72
315	61,73	51,64	123,46	73,46	146,92
400	88,53	68,63	177,06	127,06	254,12
500	126,54	86,65	253,08	203,08	406,16
630	228,70	108,60	457,40	407,40	814,80
800	367,10	59,35	734,20	684,20	1368,40
1000	461,59	112,94	923,18	873,18	1746,36

A.2 Tabulka naměřených hodnot- automatizované měření (50 mg)

Frekvence vibrací [Hz]	Naměřené zrychlení		Vypočteno		
	laser [mg]	Čidlo [mg]	zrychlení _i [mg]	Δ zrychlení _i [mg]	δ zrychlení _i [%]
4,0	19,9149	20,1307	39,83	-10,17	20,34
5,0	24,6847	25,0354	49,37	-0,63	1,26
6,3	20,4908	20,6928	40,98	-9,02	18,04
8,0	22,7257	23,0361	45,45	-4,55	9,10
10,0	24,2516	24,6723	48,50	-1,50	2,99
12,5	20,4513	20,7586	40,90	-9,10	18,19
16,0	24,9519	23,7459	49,90	-0,10	0,19
20,0	26,2353	25,9096	52,47	2,47	4,94
25,0	26,216	25,481	52,43	2,43	4,86
31,5	35,0196	35,7582	70,04	20,04	40,08
40,0	38,9397	37,75	77,88	27,88	55,76
50,0	35,5425	34,0845	71,09	21,09	42,17
63,0	32,2205	30,7565	64,44	14,44	28,88
80,0	30,3087	29,9447	60,62	10,62	21,23
100,0	29,2952	28,3163	58,59	8,59	17,18
125,0	36,0807	34,6646	72,16	22,16	44,32
160,0	33,4778	31,2772	66,96	16,96	33,91
200,0	31,8596	28,6522	63,72	13,72	27,44
250,0	53,2939	49,9184	106,59	56,59	113,18
315,0	62,4213	53,3898	124,84	74,84	149,69
400,0	82,5455	63,4365	165,09	115,09	230,18
500,0	141,061	96,6518	282,12	232,12	464,24
630,0	160,452	76,3161	320,90	270,90	541,81
800,0	268,072	42,1519	536,14	486,14	972,29
1000,0	495,454	155,771	990,91	940,91	1881,82

A.3 Tabulka naměřených hodnot- automatizované měření (100 mg)

Frekvence vibrací [Hz]	Naměřené zrychlení		Vypočteno		
	laser [mg]	Čidlo [mg]	zrychlení _i [mg]	Δ zrychlení _i [mg]	δ zrychlení _i [%]
4,0	50,96	52,09	101,92	1,92	1,92
5,0	48,63	49,24	97,26	-2,74	2,74
6,3	44,51	45,13	89,01	-10,99	10,99
8,0	41,83	42,38	83,65	-16,35	16,35
10,0	59,27	59,88	118,53	18,53	18,53
12,5	61,12	62,35	122,24	22,24	22,24
16,0	69,37	65,09	138,74	38,74	38,74
20,0	70,92	70,14	141,85	41,85	41,85
25,0	54,82	53,62	109,65	9,65	9,65
31,5	78,27	79,80	156,53	56,53	56,53
40,0	64,68	61,84	129,36	29,36	29,36
50,0	76,41	73,23	152,82	52,82	52,82
63,0	51,00	48,39	102,00	2,00	2,00
80,0	62,01	61,49	124,03	24,03	24,03
100,0	61,89	60,05	123,78	23,78	23,78
125,0	54,49	52,23	108,99	8,99	8,99
160,0	69,80	65,24	139,59	39,59	39,59
200,0	101,58	91,63	203,16	103,16	103,16
250,0	132,31	123,85	264,62	164,62	164,62
315,0	158,44	134,66	316,88	216,88	216,88
400,0	270,23	207,20	540,47	440,47	440,47
500,0	321,92	220,89	643,83	543,83	543,83
630,0	415,66	197,79	831,32	731,32	731,32
800,0	943,17	147,43	1886,35	1786,35	1786,35
1000,0	1283,42	366,41	2566,84	2466,84	2466,84

A.4 Tabulka naměřených hodnot- automatizované měření (150 mg)

Frekvence vibrací [Hz]	Naměřené zrychlení		Vypočteno		
	laser [mg]	Čidlo [mg]	zrychlení _i [mg]	Δ zrychlení _i [mg]	δ zrychlení _i [%]
4,0	87,42	88,35	174,84	24,84	16,56
5,0	82,33	83,18	164,67	14,67	14,67
6,3	79,01	79,97	158,02	8,02	8,02
8,0	66,04	66,88	132,08	-17,92	17,92
10,0	91,91	92,92	183,81	33,81	33,81
12,5	99,32	100,89	198,63	48,63	48,63
16,0	112,07	107,03	224,14	74,14	74,14
20,0	101,48	100,12	202,96	52,96	52,96
25,0	116,10	112,73	232,20	82,20	82,20
31,5	108,34	109,66	216,69	66,69	66,69
40,0	83,79	80,78	167,59	17,59	17,59
50,0	120,23	115,47	240,45	90,45	90,45
63,0	115,86	109,82	231,71	81,71	81,71
80,0	86,59	85,82	173,19	23,19	23,19
100,0	81,02	78,68	162,04	12,04	12,04
125,0	122,76	117,59	245,53	95,53	95,53
160,0	146,14	136,52	292,28	142,28	142,28
200,0	154,54	138,00	309,07	159,07	159,07
250,0	215,44	199,39	430,88	280,88	280,88
315,0	215,90	183,45	431,80	281,80	281,80
400,0	365,84	280,19	731,68	581,68	581,68
500,0	346,62	236,33	693,23	543,23	543,23
630,0	784,17	376,76	1568,35	1418,35	1418,35
800,0	1555,36	243,89	3110,72	2960,72	2960,72
1000,0	1672,20	544,43	3344,40	3194,40	3194,40

A.5 Tabulka naměřených hodnot- automatizované měření (200 mg)

Frekvence vibrací [Hz]	Naměřené zrychlení		Vypočteno		
	laser [mg]	Čidlo [mg]	zrychlení _i [mg]	Δ zrychlení _i [mg]	δ zrychlení _i [%]
4,0	87,42	88,35	174,84	24,84	16,56
5,0	82,33	83,18	164,67	14,67	14,67
6,3	79,01	79,97	158,02	8,02	8,02
8,0	66,04	66,88	132,08	-17,92	17,92
10,0	91,91	92,92	183,81	33,81	33,81
12,5	99,32	100,89	198,63	48,63	48,63
16,0	112,07	107,03	224,14	74,14	74,14
20,0	101,48	100,12	202,96	52,96	52,96
25,0	116,10	112,73	232,20	82,20	82,20
31,5	108,34	109,66	216,69	66,69	66,69
40,0	83,79	80,78	167,59	17,59	17,59
50,0	120,23	115,47	240,45	90,45	90,45
63,0	115,86	109,82	231,71	81,71	81,71
80,0	86,59	85,82	173,19	23,19	23,19
100,0	81,02	78,68	162,04	12,04	12,04
125,0	122,76	117,59	245,53	95,53	95,53
160,0	146,14	136,52	292,28	142,28	142,28
200,0	154,54	138,00	309,07	159,07	159,07
250,0	215,44	199,39	430,88	280,88	280,88
315,0	215,90	183,45	431,80	281,80	281,80
400,0	365,84	280,19	731,68	581,68	581,68
500,0	346,62	236,33	693,23	543,23	543,23
630,0	784,17	376,76	1568,35	1418,35	1418,35
800,0	1555,36	243,89	3110,72	2960,72	2960,72
1000,0	1672,20	544,43	3344,40	3194,40	3194,40

A.6 Vypočítané hodnoty detekce zrychlení v dB

Měření	manuální	automatizované			
Nastavená hodnota	50 mg	50 mg	100 mg	150 mg	200 mg
frekvence vibrací [Hz]	a [dB]	a [dB]	a [dB]	a [dB]	a [dB]
4,0	1,97	1,98	-0,17	-1,33	-0,24
5,0	1,08	0,11	0,24	-0,81	-2,73
6,3	0,82	1,73	1,01	-0,45	-0,56
8,0	0,74	0,83	1,55	1,10	1,09
10,0	-0,14	0,26	-1,48	-1,77	0,30
12,5	-0,48	1,74	-1,74	-2,44	-1,72
16,0	-0,51	0,02	-2,84	-3,49	-3,97
20,0	-0,90	-0,42	-3,04	-2,63	-1,34
25,0	1,50	-0,41	-0,80	-3,80	-3,83
31,5	0,87	-2,93	-3,89	-3,19	-2,55
40,0	1,46	-3,85	-2,24	-0,96	-1,38
50,0	-1,11	-3,06	-3,68	-4,10	-2,47
63,0	-0,01	-2,20	-0,17	-3,78	-1,62
80,0	-0,22	-1,67	-1,87	-1,25	-1,18
100,0	-0,57	-1,38	-1,85	-0,67	-2,82
125,0	-0,58	-3,19	-0,75	-4,28	-4,10
160,0	-1,80	-2,54	-2,90	-5,79	-5,65
200,0	-3,82	-2,11	-6,16	-6,28	-7,35
250,0	-6,14	-6,57	-8,45	-9,17	-8,31
315,0	-7,85	-7,95	-10,02	-9,18	-9,92
400,0	-10,98	-10,38	-14,66	-13,76	-14,40
500,0	-14,09	-15,03	-16,18	-13,30	-18,72
630,0	-19,23	-16,15	-18,40	-20,39	-20,00
800,0	-23,34	-20,61	-25,51	-26,34	-25,72
1000,0	-25,33	-25,94	-28,19	-26,96	-28,38

Příloha B - Naměřené hodnoty-odeslané přes Bluetooth

B.1 Tabulka naměřených hodnot 1. část

měření	Zrychlení			měření	Zrychlení		
	X [mg]	Y [mg]	Z [mg]		X [mg]	Y [mg]	Z [mg]
1	-96	-47	1265	31	-916	-124	631
2	-129	-106	1284	32	-935	-153	654
3	-1	-52	1216	33	-888	-89	659
4	48	-80	1252	34	-920	56	608
5	-40	-45	1256	35	-1079	113	576
6	-40	-45	1256	36	-936	-80	513
7	-96	-47	1265	37	-889	-20	615
8	199	-250	1454	38	-908	-90	727
9	199	-250	1454	39	-904	-221	748
10	127	-93	1393	40	-904	-221	748
11	-13	-13	1390	41	-1009	-167	734
12	-13	-13	1390	42	-936	-80	513
13	76	-122	1376	43	-921	102	643
14	135	-125	1504	44	-921	102	643
15	-92	108	1244	45	-829	35	676
16	-141	134	940	46	-874	-29	729
17	-524	-325	1270	47	-916	-88	647
18	-524	-325	1270	48	-1079	95	732
19	-524	-325	1270	49	-1079	95	732
20	-429	-170	1292	50	-849	-40	831
21	-207	32	1363	51	-917	44	700
22	-1028	-183	1011	52	-917	44	700
23	-993	-269	910	53	-813	167	511
24	-993	-269	910	54	-921	-96	935
25	-1072	142	1350	55	-921	-96	935
26	-1023	-33	1263	56	-868	-79	915
27	-973	-44	1087	57	-793	-112	911
28	-973	-44	1087	58	-535	-48	979
29	-916	-124	631	59	-535	-48	979
30	-916	-124	631	60	-692	103	819

B.2 Tabulka naměřených hodnot 2. část

měření	Zrychlení			měření	Zrychlení		
	X [mg]	Y [mg]	Z [mg]		X [mg]	Y [mg]	Z [mg]
61	-692	103	819	91	-40	-88	1248
62	-837	3	839	92	-37	-89	1255
63	-837	3	839	93	-32	-92	1260
64	-322	-16	1248	94	-34	-80	1260
65	224	-221	1299	95	-34	-80	1260
66	-409	-601	1216	96	-34	-89	1256
67	-409	-601	1216	97	-40	-90	1254
68	248	19	1259	98	-40	-90	1254
69	-25	48	1359	99	-40	-88	1263
70	-322	-16	1248	100	-36	-87	1260
71	-36	-84	1292	101	-40	-82	1256
72	104	-16	1383	102	-39	-88	1252
73	104	-16	1383	103	-41	-93	1260
74	104	-16	1383	104	-41	-93	1260
75	44	-74	1353	105	-40	-88	1263
76	39	-104	1324	106	-34	-89	1254
77	-36	-84	1292	107	-42	-84	1248
78	-33	-100	1259	108	-39	-90	1252
79	-33	-100	1259	109	-39	-89	1260
80	-25	-81	1271	110	-39	-89	1260
81	-16	-84	1283	111	-42	-88	1257
82	-20	-77	1276	112	-34	-89	1254
83	-20	-77	1276	113	-41	-80	1254
84	-20	-80	1272	114	-41	-80	1254
85	-40	-88	1248	115	-39	-88	1252
86	-40	-88	1248	116	-39	-88	1252
87	-26	-97	1252	117	-44	-84	1255
88	-29	-87	1262	118	-32	-89	1260
89	-29	-80	1262	119	-37	-88	1252
90	-29	-80	1262	120	-42	-89	1260

B.3 Tabulka naměřených hodnot 3. část

měření	Zrychlení			měření	Zrychlení		
	X [mg]	Y [mg]	Z [mg]		X [mg]	Y [mg]	Z [mg]
121	-36	-85	1248	151	-39	-89	1256
122	-36	-85	1248	152	-36	-84	1257
123	-37	-87	1262	153	-39	-84	1254
124	-36	-85	1255	154	-39	-84	1255
125	-36	-85	1255	155	-39	-84	1255
126	-41	-85	1257				
127	-40	-84	1260				
128	-40	-84	1260				
129	-40	-84	1260				
130	-40	-88	1252				
131	-39	-87	1254				
132	-40	-84	1248				
133	-40	-84	1248				
134	-36	-89	1259				
135	-40	-84	1255				
136	-32	-89	1249				
137	-40	-87	1255				
138	-40	-87	1255				
139	-37	-88	1257				
140	-36	-89	1259				
141	-40	-84	1252				
142	-40	-84	1251				
143	-36	-87	1255				
144	-40	-88	1251				
145	-40	-88	1251				
146	-40	-84	1252				
148	-40	-84	1252				
149	-33	-85	1257				
150	-39	-89	1256				
121	-36	-85	1248				