

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

Martin Kadlec

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Brzdové světlo

Martin Kadlec

Bakalářská práce

2016

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Kadlec**  
Osobní číslo: **I13018**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
Název tématu: **Brzdové světlo**  
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je návrh světla pro cyklisty, které by se při brždění rozsvěcelo, aniž by bylo mechanicky propojeno s brzdou, pouze na základě změny vektoru zrychlení.

Teoretická část práce rozebere možnosti detekce a snímání zrychlení a možnosti filtrace a vyhodnocení měřených dat pro danou aplikaci.

Praktická část práce pak bude obsahovat naměření vzorových dat a návrh rozhodovacího algoritmu. Na základě výsledků bude proveden návrh, konstrukce a realizace brzdového světla s ověřením parametrů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- [1] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN technická literatura, 2003. 336 s. ISBN 978-80-7300-083-0.
- [2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN technická literatura, 2003. 216 s. ISBN 978-80-7300-102-0.
- [3] VLACH, J. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 978-80-86056-66-X.
- [4] BRTNÍK, B. Základní elektronické obvody. Praha: BEN technická literatura, 2011. 156s. ISBN 978-80-7300-408-8.
- [5] RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Rozsival**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

**15. prosince 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**13. května 2016**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2016

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 9. 12. 2016

Martin Kadlec

## **PODĚKOVÁNÍ**

Mé poděkování patří vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Rozsivalovi za rady a připomínky v průběhu zpracování bakalářské práce.

Poděkování patří také mé nejbližší rodině za dosavadní podporu během studia.

## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce se bude zabývat návrhem automatického brzdového světla pro cyklisty. Teoretická část práce rozebere možnosti detekce a snímání zrychlení a možnosti filtrace a vyhodnocení měřených dat pro danou aplikaci. Praktická část práce pak bude obsahovat naměření vzorových dat a návrh rozhodovacího algoritmu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Akcelerometr, zpomalení, brzdění, decelerace, mikrokontrolér

## **TITLE**

Brake light

## **ANNOTATION**

This thesis describes the design of an automatic brake light for cyclists. The theoretical part describes options for detection and sensing acceleration and filtering and evaluation of measured data for a practical application. Practical part includes data sample from measurement and a decision algorithm draft.

## **KEYWORDS**

Accelerometer, braking, deceleration, microcontroller

# OBSAH

Úvod.....	13
1. Úvod do problematiky .....	14
1.1 Cyklistická brzdová světla dostupná na trhu.....	14
1.1.1 Lupine rotlicht.....	14
1.1.2 See.sense .....	15
1.1.3 Brilliant wireless sensor brake .....	15
1.2 Očekávaný výsledek této práce .....	16
2. Akcelerometry .....	17
2.1 Piezoelektrické akcelerometry .....	17
2.2 Piezoresistivní akcelerometry .....	18
2.3 Tepelné akcelerometry .....	18
2.4 Kapacitní akcelerometry .....	19
2.4.1 MEMS technologie .....	20
3. Zdroje Světla pro nízké napětí .....	21
3.1 Žárovky .....	21
3.2 Polovodičové LED diody.....	22
4. Detektory optického záření.....	24
4.1 Fotorezistory .....	24
4.2 Fotodiody .....	25
4.3 Fototranzistory .....	26
5. Hardwarová část .....	28
5.1 Mikrokontrolér .....	28
5.2 Zdroj osvětlení a detektor optického záření.....	30
5.2.1 LED Piranha Super Flux (RED).....	30
5.2.2 Fotorezistor VT83N4.....	31
5.3 Proudový zdroj NSI45020AT1 .....	31



5.4	Akcelerometr ADXL345.....	32
6.	Chyby akcelerometru a jejich korekce.....	33
6.1	Chyba offsetu .....	33
6.2	Vysokofrekvenční šum a možnosti filtrace.....	34
6.2.1	Průměr.....	35
6.2.2	Jednoduchý plovoucí průměr.....	36
6.2.3	Odhad plovoucího průměru .....	38
6.2.4	Kalmanův filtr.....	39
7.	Praktická část .....	41
7.1	Řídicí program .....	41
7.1.1	Inicializace .....	43
7.1.2	Získávání a převedení dat .....	43
7.1.3	Filtrace dat .....	43
7.1.4	Rozhodovací algoritmus pro indikaci brzdění .....	44
7.1.5	Rozhodovací algoritmus pro indikaci slabého osvětlení .....	46
7.2	Návrh desky plošných spojů .....	46
7.3	Návrh fyzické konstrukce .....	47
	ZÁVĚR .....	49
	Použitá literatura .....	50
	Přílohy.....	52

## SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 - Lupine rotlicht (2) .....	14
Obrázek 2 - See.Sense (3).....	15
Obrázek 3 – Brilliant.....	15
Obrázek 4 - Princip piezoelektrických akcelerometrů.....	17
Obrázek 5 - Princip piezoresitivního akcelerometru .....	18
Obrázek 6 - Princip tepelného akcelerometru (5).....	19
Obrázek 7 - Princip a uspořádání kapacitního akcelerometru (2) .....	19
Obrázek 8 - Uspořádání hřebenového kapacitního akcelerometru (5) .....	20
Obrázek 9 - Příklady mechanických prvků MEMS - ozubená soukolí (vpravo), pružný element (vlevo) (7) .....	20
Obrázek 10 - Elektromagnetické spektrum .....	21
Obrázek 11 - Druhy žárovek pro nízké napětí .....	22
Obrázek 12 - Schématická značka a druhy provedení LED diod .....	22
Obrázek 13 – Vnitřní struktura LED (10).....	23
Obrázek 14 - Schématická značka fotorezistoru a druhy provedení .....	24
Obrázek 15 - Závislost odporu fotorezistoru na osvětlení (11) .....	25
Obrázek 16 - Schématická značka fotodiody a druhy provedení .....	25
Obrázek 17 - V-A charakteristika fotodiody (11).....	26
Obrázek 18 - Schématická značka a druhy provedení fototranzistorů .....	27
Obrázek 19 - Výstupní charakteristika fototranzistoru (11) .....	27
Obrázek 20 - Blokové schéma brzdového světla.....	28
Obrázek 21 - ATmega328 v pouzdře TQFP (12).....	28
Obrázek 22 – LED Piranha Super Flux (13).....	30
Obrázek 23 - Fotorezistor VT83N4 (14) .....	31
Obrázek 24 - NSI45020AT1 (15) .....	31
Obrázek 25 - Blokové schéma ADXL345 (16) .....	33
Obrázek 26 – Grafické znázornění průměru.....	36
Obrázek 27 - Grafické znázornění plovoucího průměru .....	37
Obrázek 28 – Grafické znázornění odhadu plovoucího průměru .....	39
Obrázek 29 – Grafické znázornění 1D - Kalmanova filtru.....	41
Obrázek 30 - Vývojový diagram hlavní části programu.....	42
Obrázek 31 - Vývojové diagramy externího přerušení.....	42

Obrázek 32 - Zašuměná data z akcelerometru .....	44
Obrázek 33 - Graf vyfiltrovaných dat z akcelerometru $K=30$ .....	44
Obrázek 34 - Analýza grafu osy Z .....	45
Obrázek 35 - Finální DPS .....	47
Obrázek 36 - Úprava pouzdra .....	48
Obrázek 37 - Konečný vzhled .....	48
Tabulka 1 - Měření offsetu ADXL345 .....	34

## **SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK**

MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
DPS	Deska Plošných Spojů
LED	Light-Emitting Diode
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
RISC	Reduced Instruction Set Computing

## ÚVOD

Výsledkem této bakalářské práce bude návrh brzdového světla pro cyklisty, které by se při brzdění rozsvěcelo pouze na základě změny vektoru zrychlení. Pro snímání vektoru zrychlení, bude použit akcelerometr propojený s mikrokontrolérem, ten bude zpracovávat data z akcelerometru a rozhodovat o rozsvěcení, či zhasínání brzdového světla.

Zmiňované osvětlení bude realizováno pomocí dvou vysoko svítivých LED diod. Celé zařízení bude mít velikost malého DPS, aby se vešlo do připravené krabičky od běžně dostupného cyklistického blikátka.

Dalším cílem je zajistit celkovou jednoduchost, robustnost, a také co nejnižší cenu zařízení. Pro co nejjednodušší ovládání, bude světlo vybaveno světelným senzorem, který se bude starat o automatické zapnutí výstražného blikání při jízdě v noci, či za sníženého osvětlení. Napájení bude obstarávat dvojice mikrotužkových baterií. Kvůli absenci mechanického vypínače je potřeba zajistit automatické přepínání do režimu spánku, z důvodu co nejnižší spotřeby celého zařízení.

Vznik tohoto zadání byl iniciován myšlenkou zvýšení bezpečnosti cyklistů, kteří si zapomínají zapínat osvětlení svých kol za špatné viditelnosti.

# 1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Osvětlení je pro většinu dopravních prostředků pohybujících se po veřejných komunikacích povinně dané zákonem. V neposlední řadě se také jedná i o brzdové osvětlení, to má za úkol upozornit ostatní účastníky silničního provozu na zpomalování, či brzdění našeho vozidla a tím i zabránění případné srážce. Cyklisti, jakožto nejvíce ohrožení účastníci silničního provozu, jsou povinni, mít jízdní kolo vybaveno pouze odrazkami. Při jízdě za snížené viditelnosti také základním osvětlením. To se skládá z přední svítilny bílé barvy a zadní barvy červené, které může být nahrazeno svítilnou s přerušovaným světlem červené barvy. (1) Jelikož je jízdní kolo lehce přehlédnutelným dopravním prostředkem, je velmi důležité, aby byl cyklista co nejvíce vidět. Při zpomalování či brzdění cyklisty nemáme jakožto řidiči vozidla jedoucím za ním, v podstatě žádné možnosti detekce tohoto manévru. Proto by mělo být brzdové světlo integrované do základní výbavy jízdního kola, vítaným doplňkem pro všechny členy silničního provozu.

## 1.1 Cyklistická brzdová světla dostupná na trhu

Existují různé možnosti detekce zpomalování, od čistě mechanických až po plně elektronická řešení. Jelikož je základem této bakalářské práce použití akcelerometru, uvedu příklady pouze sériově vyráběných světel, která používají tento princip detekce. Česká republika nemá tento artikl na svém trhu zastoupený, proto uvádím pouze zahraniční značky.

### 1.1.1 Lupine rotlicht

Cyklistická brzdová světla německého výrobce, jsou kvalitně zpracovaná. Napájej se pomocí vestavěné baterie. Cyklista může zvolit čtyři režimy blikání (2)

Cena: 82€



Obrázek 1 - Lupine rotlicht (2)

### 1.1.2 See.sense

Výrobek See.Sence se prezentuje jako inteligentní, s možností spárování se s chytrými telefony. Mimo schopnosti upozornit na brzdění cyklisty, obsahuje také alarm, detekci pádu a automatické přivolání pomoci s případným místem nehody. O napájení se stará vestavěná baterie. Světlo je také vybaveno automatickým vypnutím po uplynutí nastaveného času. (3)

Cena: 73€



Obrázek 2 - See.Sense (3)

### 1.1.3 Brilliant wireless sensor brake

Světlo čínského výrobce neoplývá skvělým zpracováním, ale cena a funkční výbava jistě zaujme. K dispozici je 7 módů blikání, detekce dne/noci. Světlo obsahuje i automatické probuzení při detekci pohybu. Napájení obstarávají dvě tužkové baterie.

Cena: 35€



Obrázek 3 – Brilliant

## **1.2 Očekávaný výsledek této práce**

Očekávaným cílem této práce je návrh brzdového světla pro cyklisty, které by se při brzdění rozsvěcelo, aniž by bylo mechanicky propojeno s brzdou, pouze na základě změny vektoru zrychlení. Dalším cílem je zajistit celkovou jednoduchost, robustnost, a také co nejnižší cenu zařízení. Pro snímání vektoru zrychlení se jeví, jako nejvhodnější prostředek akcelerometr propojený pomocí sběrnice SPI s mikrokontrolérem, který bude zpracovávat data z akcelerometru a rozhodovat o rozsvěcení, či zhasínání brzdového světla. To bude realizováno pomocí dvou vysoko svítivých LED diod. Celé zařízení bude mít velikost malého DPS, aby se vešlo do připravené krabičky. Napájení bude obstarávat dvojice mikrotužkových baterií. Z tohoto důvodu je také třeba dbát na co nejnižší spotřebu celého zařízení.

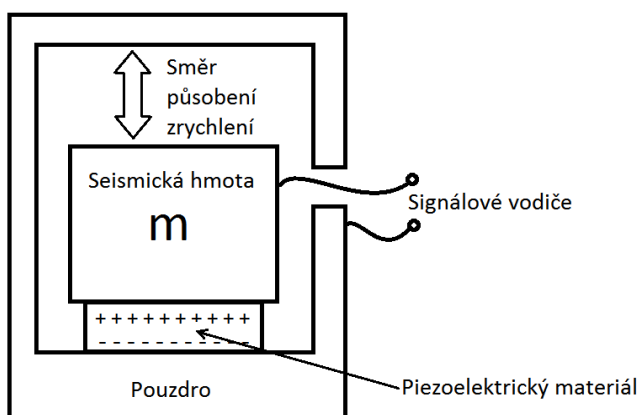


## 2. AKCELEROMETRY

Jsou elektromechanické součástky pro měření statických nebo dynamických sil. Statickými silami myslíme gravitační (tíhové) zrychlení Země, které působí na všechny objekty na Zemi. Toto zrychlení má hodnotu přibližně:  $g = 9,81 \text{ m/s}^{-2}$ . Při měření statického zrychlení, můžeme zjistit úhel vychýlení vůči zemskému povrchu. Dynamickými silami máme na mysli, pohyby či vibrace samotného akcelerometru. Ty jsou tvořeny jak ze samotného pohybu tělesa, tak i z gravitačního zrychlení Země. V zásadě se podle principu činnosti rozdělují do tří základních skupin: piezoelektrické akcelerometry, piezoresistivní akcelerometry a akcelerometry s proměnnou kapacitou.

### 2.1 Piezoelektrické akcelerometry

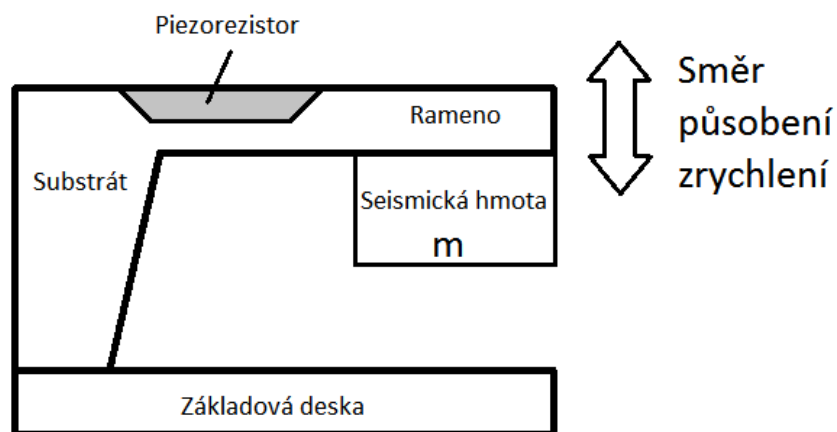
Základem tohoto akcelerometru je piezoelektrický materiál, který je pevně spojen s ochranným obalem a seismickou hmotou, viz Obrázek 4. Ta se může pohybovat pouze v ose působení zrychlení. Síla, vzniklá urychlovanou hmotou působící na piezoelektrický materiál se převádí dle Newtonova zákona:  $F = m \cdot a$  na zrychlení. To je interpretováno jako náboj piezokrystalu. Měření náboje probíhá nejčastěji vnitřní elektronikou senzoru, kde se konvertuje náboj na napěťový výstup s nízkou impedancí. Případně se používá měření pomocí externí elektroniky s vysokou vstupní impedancí. K jeho největším výhodám patří provoz bez nutnosti napájení. Dále se vyznačuje dlouhodobou stabilitou, širokým kmitočtovým a dynamickým rozsahem a linearitou v těchto rozsazích. Dalším znakem je pevná konstrukce a vysoká spolehlivost. Největší nevýhoda tohoto principu je v nemožnosti měření na frekvencích nižších než 0.1 Hz, tedy měření konstantního zrychlení. (4)



Obrázek 4 - Princip piezoelektrických akcelerometrů

## 2.2 Piezoresistivní akcelerometry

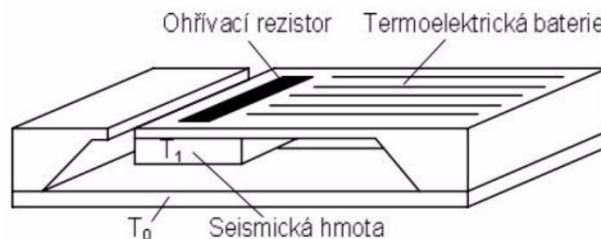
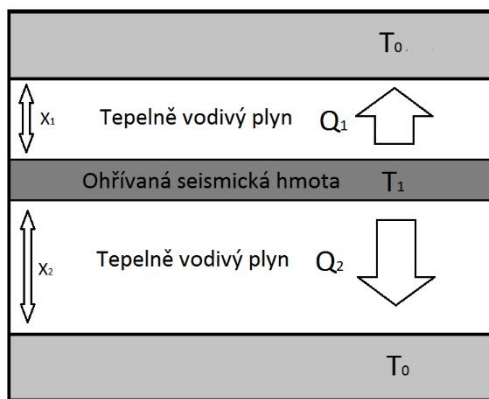
Tyto akcelerometry, mají základ v piezoresistivním jevu. Využívají piezoresistivní materiál, jeho prostřednictvím převádí sílu vzniklou urychlovanou hmotou na změnu odporu, viz Obrázek 5. Při ohybovém namáhání ramena se mění rezistivita piezoresistivních elementů. Obvykle se využívá sítě vyleptaných snímačů uspořádaných do Wheatstoneova můstku. Výhodou piezoresistivního akcelerometru oproti piezoelektrickým je, že mohou měřit i na frekvencích nižších než 0,1 Hz, tudíž dokáží měřit také konstantní zrychlení. Naopak velkou nevýhodou je teplotní závislost, která je daná konstrukcí tohoto typu.



Obrázek 5 - Princip piezoresistivního akcelerometru

## 2.3 Tepelné akcelerometry

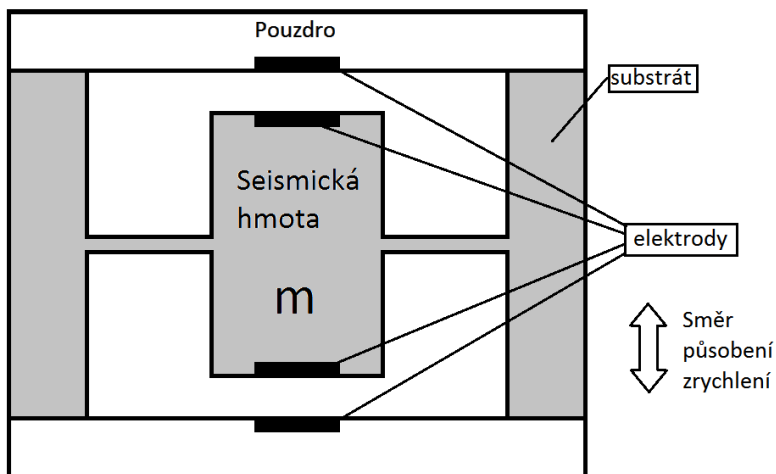
Tepelné akcelerometry využívají fyzikální princip přenosu tepla v plynu a snímání rozložení teplot v okolí zdroje tepla. Mezi dvěma komorami je na tenkém nosníku umístěna seismická hmota. Mezi zmíněnými komponenty je teplotně vodivý plyn. Hmota je zahřívána na určenou teplotu  $T_1$  pomocí ohřívacího rezistoru. Pokud na senzor nepůsobí žádné zrychlení, pak je teplota seismické hmoty a okolních komor v rovnováze. Množství tepla  $Q_1$  a  $Q_2$ , vedené přes plyn od hmoty do komor, je funkce vzdáleností  $x_1$  a  $x_2$ , viz Obrázek 6. Citlivost tohoto akcelerometru je mnohem menší než u kapacitních či piezoelektrických senzorů. Jejich výhodou je malá náchylnost k elektromagnetickému či elektrostatickému rušení. Také neobsahují žádné mechanické pohyblivé součásti, proto jsou tyto sensory velice odolné a spolehlivé. (5, 6)



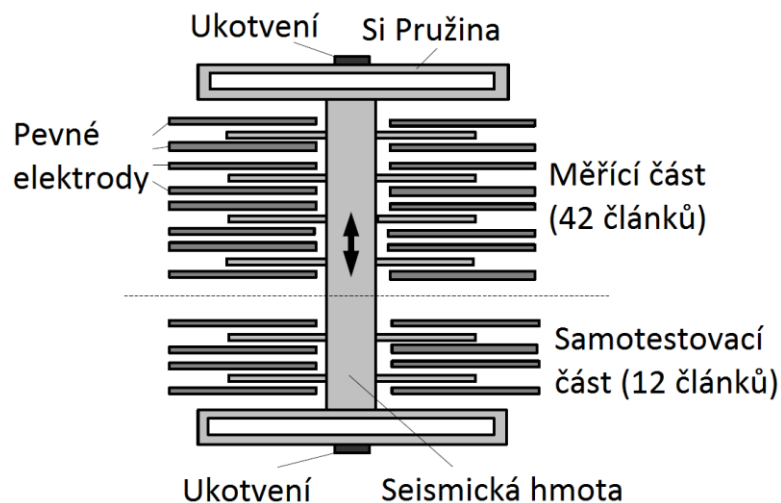
Obrázek 6 - Princip tepelného akcelerometru (5)

## 2.4 Kapacitní akcelerometry

Princip tohoto typu akcelerometru je založený na proměnné kapacitě mezi elektrodami pohybujícími se na pružně uložené seismické hmotě a pevných elektrod. Při pohybu dochází na jedné straně k přiblížování (kapacita klesá) a na druhé straně k oddalování elektrod (kapacita roste). Výsledný rozdíl kapacit se vyhodnocuje a převádí na výsledné zrychlení, viz Obrázek 7. V praxi se pro větší přesnost používá tzv. hřebenové uspořádání s více články, viz Obrázek 8. Tyto akcelerometry jsou velmi přesné a citlivé, ale mají velký teplotní a časový drift, proto jsou vhodné pouze pro nízké dynamické rozsahy zrychlení.



Obrázek 7 - Princip a uspořádání kapacitního akcelerometru (2)

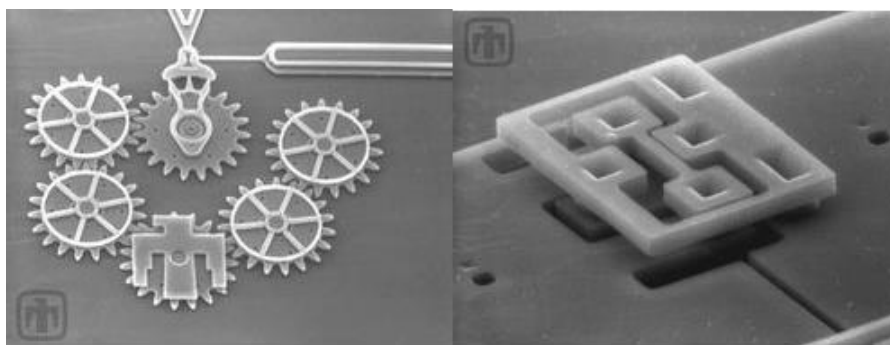


Obrázek 8 - Uspořádání hřebenového kapacitního akcelerometru (5)

Kapacitní akcelerometry jsou obvykle založené na MEMS technologii. Základem tohoto typu je monokrystalický substrát, na kterém je na dvou pružných upevněních zavěšena seismická hmota z polykrystalického křemíku. Každý zub hřebínku představuje střední pohyblivou elektrodu v soustavě diferenčních kapacitních senzorů s proměnnou vzduchovou mezerou a pevnými elektrodami. (7)

#### 2.4.1 MEMS technologie

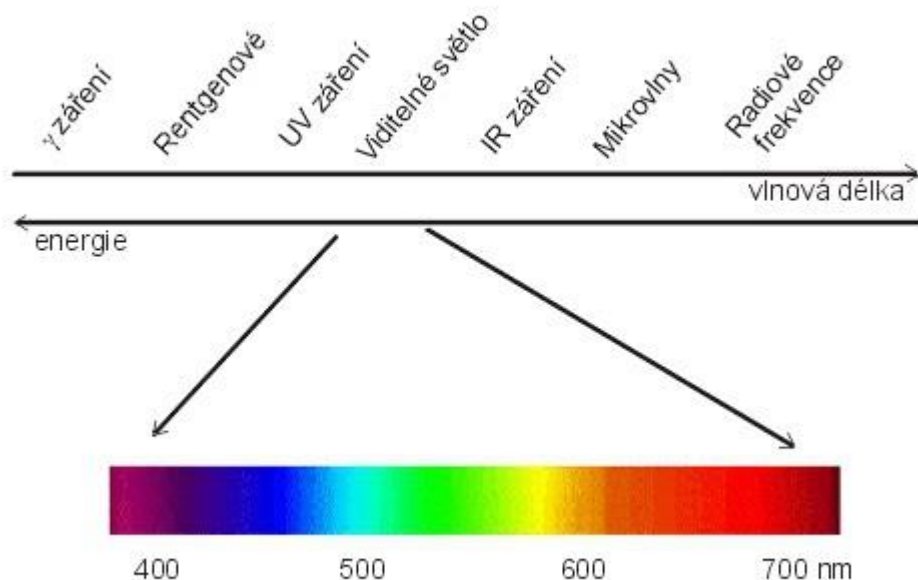
MEMS (Mikro-Elektrické-Mechanické-Systemy) vznikly spojením oborů elektrotechniky a mechaniky za využití mikrominiaturizace a podpory výroby technologiemi, které pracují v rozměrech řádů mikrometrů. Mikromechanické součástky jsou menší, lehčí, rychlejší, a mnohdy přesnější, než jejich makroskopické vzory. Jeden z hlavních důvodů, kvůli kterým došlo k rozšíření nových technologií výroby integrovaných struktur pro mikromechanické systémy, byla velmi nízká cena zhotovení při odběru velkých sérií. V MEMS najdeme pohyblivé mechanické struktury, mikrosenzory či řídicí elektroniku integrovanou do jednoho čipu, viz Obrázek 9. (7)



Obrázek 9 - Příklady mechanických prvků MEMS - ozubená soukolí (vpravo), pružný element (vlevo) (7)

### 3. ZDROJE SVĚTLA PRO NÍZKÉ NAPĚTÍ

Světlo je elektromagnetické vlnění, které jsme schopni vnímat zrakem. Podobně jako jiné druhy vlnění charakterizujeme i elektromagnetické vlnění vlnovou délkou, či frekvencí. Viditelné světlo má vlnovou délku 390 nm až 760 nm. Větší vlnové délky odpovídají infračervenému záření, které jsme schopni vnímat jen jako sálající teplo. Elektromagnetické záření o kratší vlnové délce je UV (ultrafialové) záření. Viditelné světlo má různé barvy. Každá barva odpovídá jiné vlnové délce světla, viz Obrázek 10. Světlo složené ze všech vlnových délek vnímáme jako bílé. Lidské oko obsahuje pouze tři druhy receptorů, z nichž každý je citlivý na jinou barvu. Jeden vnímá červenou, druhý zelenou a třetí modrou barvu. Ostatní barvy pak vnímáme jako směs těchto tří barev v různých poměrech. Stačí tedy smíchat červené, zelené a modré světlo a výsledek lidské oko vnímá jako světlo bílé. (8)



Obrázek 10 - Elektromagnetické spektrum

#### 3.1 Žárovky

Žárovku tvoří skleněná baňka, ve které je stočené tenké vlákno. Toto vlákno je z wolframu a tvoří nejdůležitější součást žárovky, to se průchodem elektrického proudu zahřívá. Princip funkce je založený na vyzařování elektromagnetické záření v infračervené oblasti spektra. Rozžhavené vlákno má teplotu kolem 2500 °C. Aby se zabránilo shoření vlákna žárovky, není uvnitř přítomen kyslík, který je nutný k hoření. Uvnitř baňky je vakuum, pro speciální aplikace jsou také plněny inertními plyny, a tak žárovky mohou dosahovat ještě vyšších teplot, viz Obrázek 11. Maximum vyzařování neleží ve viditelné části spektra, ale nachází se v oblasti

infračervené. Toto záření vnímáme jako teplo. Většina energie tedy není vyzařena jako světlo, ale jako teplo. Na světlo je přeměněno cca 5 % dodané energie, proto jsou žárovky značně neefektivní zdroje světla. Při zvýšení teploty vlákna se dosáhne vyšší účinnosti, ale také se sníží životnost žárovky. Vláknem totiž sublimuje rychleji, až se nakonec úplně přeruší.



Obrázek 11 - Druhy žárovek pro nízké napětí

### 3.2 Polovodičové LED diody

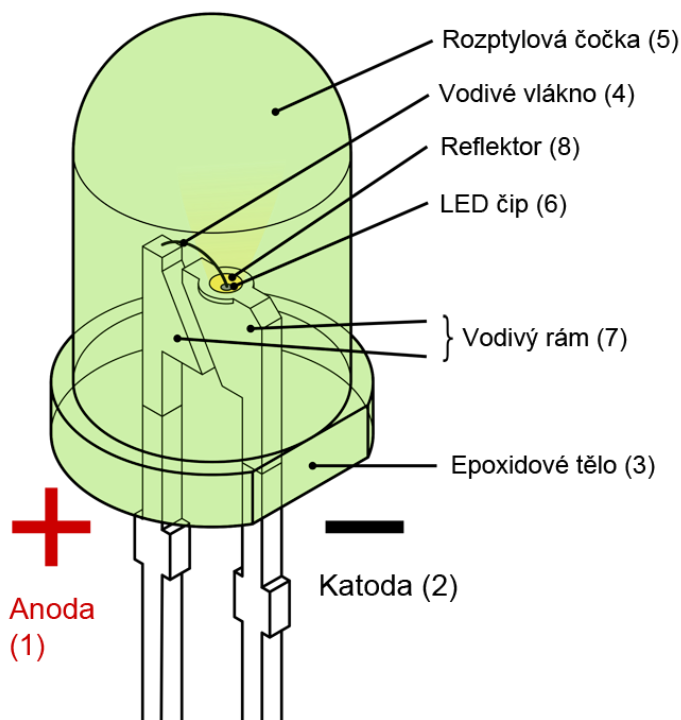
LED dioda je polovodičová součástka, která je tvořena přechodem PN. Pokud tento přechod zapojíme v propustném směru, kde na polovodič typu P přivedeme kladnější napětí než na polovodič typu N, začnou z této oblasti do oblasti P přecházet elektrony. Elektrony v P se začnou rekombinovat s volnými dírami, které prvek P obsahuje. Touto rekombinací se uvolňuje energie v podobě fotonů, které tvoří světlo. (9)



Obrázek 12 - Schématická značka a druhy provedení LED diod

Obrázek 13 obsahuje znázornění vnitřní struktury. Kladný náboj je přiváděn vodičem přes anodu (1) LED diody do vlákna (4). Druhá část diody je zapojena k vodivému rámu (7) vedoucímu z katody (2) k zápornému pólu. O barvě vyzařovaného světla rozhoduje chemické složení LED polovodiče (6). Epoxidová pryskyřice, ve které se celé LED světlo nachází, má tři hlavní funkce. Za prvé je navržena tak, aby dovolila průchod maximálnímu množství světla, dále upravuje úhel, pod kterým se světlo šíří, a chrání LED před vlivy okolí. Díky zapouzdření je LED dioda téměř nezničitelná a neobsahuje žádné volně pohyblivé části. Jako polovodičové zařízení, které reguluje průchod proudu bez zhavení vlákna, je zároveň velice spolehlivé, viz

Obrázek 12. Oproti jiným zdrojům světla, jako jsou například žárovky, výbojky nebo zářivky, pracují LED diody s poměrně malými hodnotami vstupního napětí a proudu. (10)



Obrázek 13 – Vnitřní struktura LED (10)

LED umí vyzařovat jednobarevné světlo jen v rámci daného spektra. Takové světlo je označeno podle maximální vlnové délky měřené v nanometrech (nm). Maximální vlnová délka je určena vlastnostmi materiálu, ze kterého se skládá LED čip. LED prvky jsou vyráběny ze sloučenin galia a zpravidla obsahují jeden, nebo více dalších materiálů (např. fosfor), které zajišťují požadovanou barevnost světla. Rozdíly mezi jednotlivými LED světly se projevují také v intenzitě vyzářeného světla.

Protože není možné z funkčního principu LED emitovat přímo bílé světlo, využívají LED diody tzv. luminoforu. Některé průhledné LED emitující modré světlo obsahují luminofor, který část vyzářovaného modrého světla transformuje přímo na čipu na světlo žluté. Díky kombinaci modré a žluté barvy pak vzniká světlo bílé. Jiné typy bílých LED emitují ultrafialové záření, které je přímo na čipu luminoforem transformováno na bílé světlo.

Svítivost je úměrná procházejícímu proudu LED čipem. Platí, že čím větší množství proudu, tím větší množství produkovaného světla. Pro dosažení maximální životnosti LED diody je třeba dodržovat provozní parametry dané výrobcem. (10)

## 4. DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

Intenzitu světleného záření lze měřit pomocí detektorů optického záření. Ty můžeme rozdělit do dvou základních skupin, na fotovodivostní a fotovoltaické. U fotovodivostních detektorů dopadající záření zvyšuje měrnou vodivost polovodiče. Fotovoltaické přeměňují dopadající záření na elektrické napětí na elektrodách.

Intenzita osvětlení je definovaná jako světelný tok dopadající na jednotku plochy. Její jednotkou je lux [lx] a značí se písmenem E. V místnosti se za běžných podmínek pohybuje hodnota osvětlení v rozmezí od 100 do 2000 lx.

### 4.1 Fotorezistory

Jsou homogenní polovodiče využívající vnitřní fotoelektrický jev. Volné elektrony materiálu absorbují dopadající fotony, které jim dodávají energii potřebnou k přechodu z valenčního pásu do vodivostního. To má za následek zvýšení vlastní vodivosti materiálu. Fotorezistor absorbuje pouze záření o vlnové délce menší, než je jeho optická hrana, která je dána vztahem:

$$\lambda_g = \frac{h \cdot c}{E_g}$$

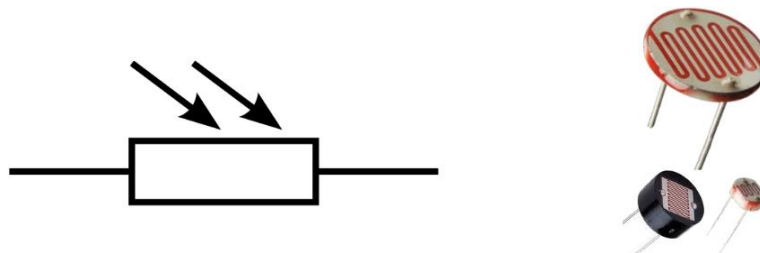
kde,

$h$  – je Planckova konstanta

$c$  – je rychlost světla

$E_g$  – je šířka zakázaného pásu

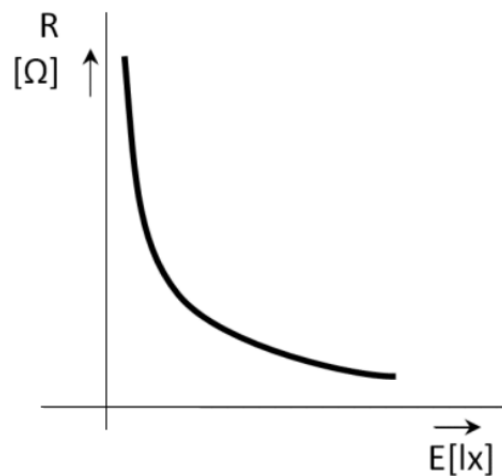
Záření o větší vlnové délce materiálem prochází. Jako materiály pro výrobu fotorezistorů se používají zejména CdS a CdSe, které jsou schopny detekovat viditelné spektrum záření se ziskem okolo  $10^3$  až  $10^4$ . Naopak pro detekci infračerveného spektra se používají materiály PbS nebo PbSe.



Obrázek 14 - Schématická značka fotorezistoru a druhy provedení



Pro dosažení většího odporu součástky má polovodičová vrstva tvar meandru, viz Obrázek 14. Pouzdro je oproti klasickému rezistoru upraveno tak, aby na citlivou vrstvu mohlo dopadat světelné záření. Za temna je odpor součástky velmi vysoký ( $10^4$  až  $10^6 \Omega$ ). Osvětíme-li citlivou vrstvu, dochází ke zmenšení odporu fotorezistoru. Závislost odporu na osvětlení je přibližně logaritmická, viz Obrázek 15. Při osvětlení několika set luxů, je odpor fotorezistoru pouze několik stovek ohmů. Mezi výhody fotorezistorů patří velká citlivost, nízká cena a snadné použití. Naopak mezi nevýhody patří dlouhá doba odezvy, velká teplotní závislost odporu, a také stárnutí fotorezistoru. (11)



Obrázek 15 - Závislost odporu fotorezistoru na osvětlení (11)

## 4.2 Fotodiody

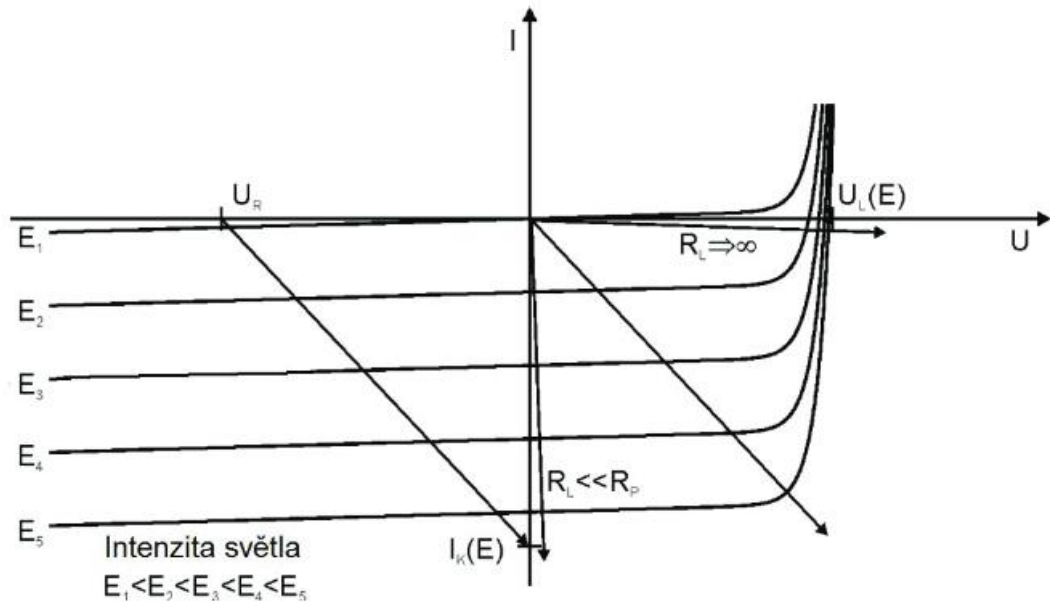
Fotodioda je plošná polovodičová součástka konstruovaná tak, že světelný tok vstupuje rovnoběžně nebo kolmo na přechod PN. Využívá se dopadajícího záření, které generuje elektron-děrové páry. Ty jsou poté zachyceny polem PN přechodu. Fotodioda může pracovat ve dvou základních režimech jak je patrné z V-A charakteristiky, viz Obrázek 17. První kvadrant se pro detekci záření nevyužívá.



Obrázek 16 - Schématická značka fotodiody a druhy provedení

Pokud není přechod fotodiody osvětlen, má voltampérová charakteristika stejný průběh jako klasická dioda. Největší rozdíl mezi osvětleným a neosvětleným stavem pozorujeme při

polarizaci diody ve zpětném směru (3. kvadrant), kdy dochází k téměř lineárnímu růstu proudu při rovnoměrném zvětšování osvětlení. Dioda se v těchto podmínkách chová jako pasivní součástka, jejíž odpor je závislý na osvětlení (odporový režim činnosti diody).



Obrázek 17 - V-A charakteristika fotodiody (11)

Fotodioda reaguje na změny osvětlení velmi rychle. Náběh je řádově  $10^{-6}$  až  $10^{-9}$ s. Zvláštní je konstrukce těchto diod, např. fotodiody PIN, která má mezi vrstvou P a N vloženou vrstvu s vnitřní vodivostí s velkou elektrickou pevností ( $U_{AK}$  je až  $-500$  V), a pracuje proto s velmi vysokými intenzitami elektrického pole v oblasti přechodu, nebo Schottkyho fotodiody (napářená vrstva zlata na křemíku) dosahující náběhu řádově  $10^{-12}$  až  $10^{-13}$  s. Fotodiody se používají k měření osvětlení v hradlovém režimu, viz Obrázek 16. Rychlé fotodiody pracují jako přijímače v optických spojích, opronech apod. (11)

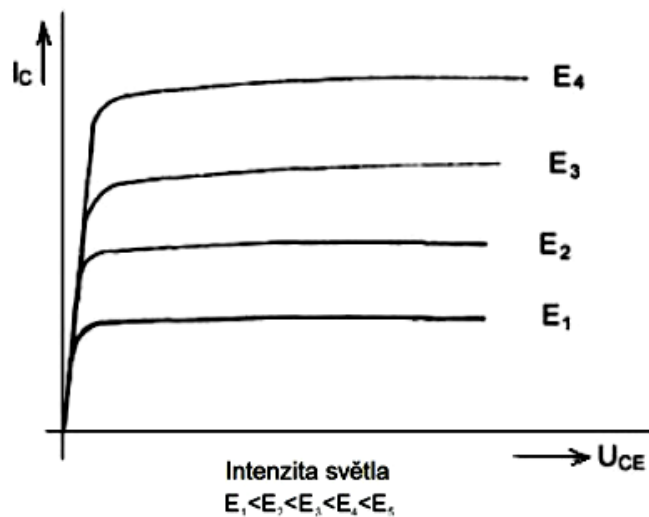
### 4.3 Fototranzistory

Jsou to polovodičové součástky, u kterých namísto vstupního proudu přiváděného do báze bipolárních tranzistorů se k řízení kolektorového proudu fototranzistorů využívá světelné energie. Světlo proniká do oblasti přechodu báze-emitor okénkem v pouzdrů uzavřeném skleněnou/plastovou čočkou, viz Obrázek 18.



Obrázek 18 - Schématická značka a druhy provedení fototranzistorů

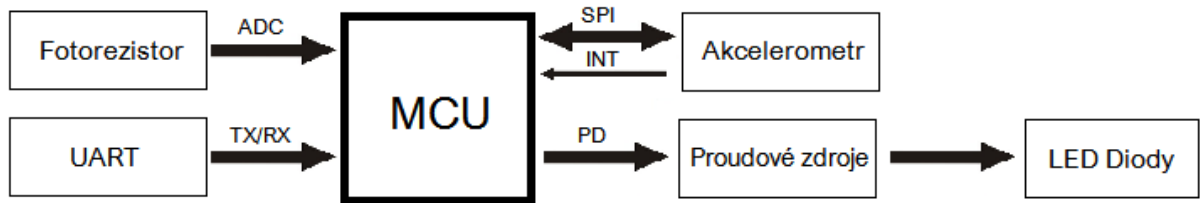
Působením světelného toku na citlivou plochu snímače vzniká na jeho výstupu napětí úměrné osvětlení. Proud vzniklý v důsledku absorpce dopadajícího záření je zesílen tranzistorovým jevem. Konstrukčně je uspořádán tak, aby maximum záření bylo absorbováno v oblasti báze. Proudová citlivost fototranzistorů je o jeden až dva řády větší než u fotodiody, ale mají horší dynamické vlastnosti (doba odezvy je v řádu jednotek až desítek  $\mu\text{s}$ ). Křivka spektrální charakteristiky je obdobná jako u fotodiody, viz Obrázek 19. Fototranzistor je nejběžněji používaný fotoelektrický snímač pro měření světla. V porovnání s fotodiódou jsou fototranzistory citlivější na osvětlení, neboť využívají navíc tranzistorového jevu pro zesílení proudu vyvolaného osvětlením přechodu báze-kolektor. (11)



Obrázek 19 - Výstupní charakteristika fototranzistoru (11)

## 5. HARDWAROVÁ ČÁST

Hardwarová část se zabývá volbou a výběrem a popisem komponent, které budou nakonec použity při samotné realizaci projektu.

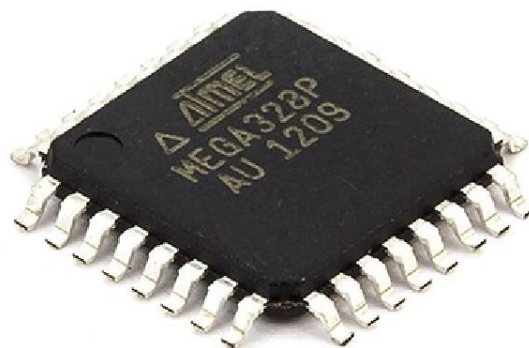


Obrázek 20 - Blokové schéma brzdového světla

Obrázek 20 obsahuje blokové schéma celého brzdového světla. Procesor je programován pomocí sériové linky, proto je fyzicky vyvedený UART port. K mikroprocesoru je pomocí SPI sběrnice připojen akcelerometr, který disponuje také externími výstupy přerušení. Tyto výstupy jsou pak připojeny na vstupy externího přerušení mikroprocesoru. Dále je na jeden analogový vstup připojen na fotorezistor pro snímání intenzity osvětlení. Na digitální piny jsou potom připojeny proudové zdroje a na ně již samotné LED diody.

### 5.1 Mikrokontrolér

Pro konstrukci brzdového světla byl vybrán mikrokontrolér ATmega 328P (viz Obrázek 21) od firmy Atmel a to na základě snadné dostupnosti a dobré kompatibility s platformou Arduino, která byla zvolena pro naprogramování softwarové části. Zvolený model disponuje větší pamětí, protože při volbě ještě nebyly známy nároky programu na paměť a rozdíl v ceně proti slabším modelům byl minimální.



Obrázek 21 - ATmega328 v pouzdře TQFP (12)

### **Vlastnosti mikrokontroléru:**

- AVR 8 bitový mikrokontrolér s RISC architekturou
- Paměť:
  - 32 KB typu flash pro program,
  - 1 KB EEPROM,
  - 2 KB SRAM.
- Periferie:
  - Dva 8bitové čítače/časovače
  - Jeden 16bitový čítač/časovač
  - 8 kanálový, 10bitový ADC
  - USART
  - Master/Slave SPI
- Nízká spotřeba energie
  - Active Mode: 0.2 mA
  - Power-down Mode: 0.1  $\mu$ A
  - Power-save Mode: 0.75  $\mu$ A
- Provozní frekvence:
  - 0 – 4 MHz @ 1.8 - 5.5 V; 0 – 10 MHz @ 2.7 – 5.5 V; 0 – 20 MHz @ 4.5 - 5.5 V (12)

## 5.2 Zdroj osvětlení a detektor optického záření

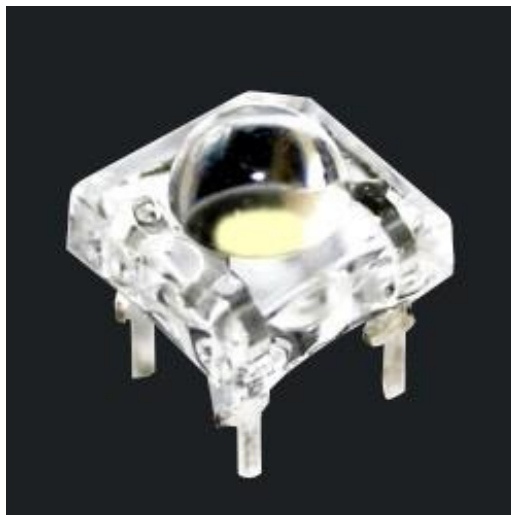
Jako další důležitý prvek pro realizaci této práce je výběr správného zdroje světla z důvodu nízké spotřeby, velkého výběru a nízké ceny byly zvoleny LED diody. Pro detekci byl zvolen fotorezistor, a to z důvodu velké citlivosti, nízké ceně a snadnému způsobu použití.

### 5.2.1 LED Piranha Super Flux (RED)

Vybrané LED diody slibují dobrý poměr mezi cenou, svítivostí, vyzařovacím úhlem a celkovou spotřebou, viz Obrázek 22.

#### Vlastnosti:

- Barva vyzařovaného světla: Červená
- Vlnová délka: 620 nm
- Vyzařovací úhel: 120 °
- Max. propustný proud: 30 mA
- Svítivost: 2000 mcd
- Rozsah napájecího napětí: 1,8 až 2,2 V
- Životnost diody: 50 000-80 000 hodin (při 20 mA)
- Velikost pouzdra: 7,62 x 7,62 x 4,0 mm (13)



Obrázek 22 – LED Piranha Super Flux (13)

### 5.2.2 Fotorezistor VT83N4

Pro tento projekt byl z důvodu nízké ceny a malých rozměrů zvolen fotorezistor VT83N4, viz Obrázek 23.



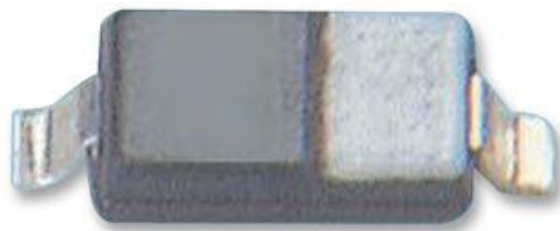
Obrázek 23 - Fotorezistor VT83N4 (14)

#### Vlastnosti:

- Výsledný odpor při úplné tmě:  $2 \text{ M}\Omega$
- Výsledný odpor při osvětlení 10 lux:  $150 \text{ k}\Omega$
- Max. napětí: 200 V
- Max. ztrátový výkon: 175 mW
- Provozní teplota:  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  (14)

### 5.3 Proudový zdroj NSI45020AT1

Aby byl jas LED diod pořád dostatečný i při vybité baterii byl vybrán proudový zdroj NSI45020AT1 od firmy ON SEMICONDUCTOR, viz Obrázek 24. (15)



Obrázek 24 - NSI45020AT1 (15)

**Vlastnosti:**

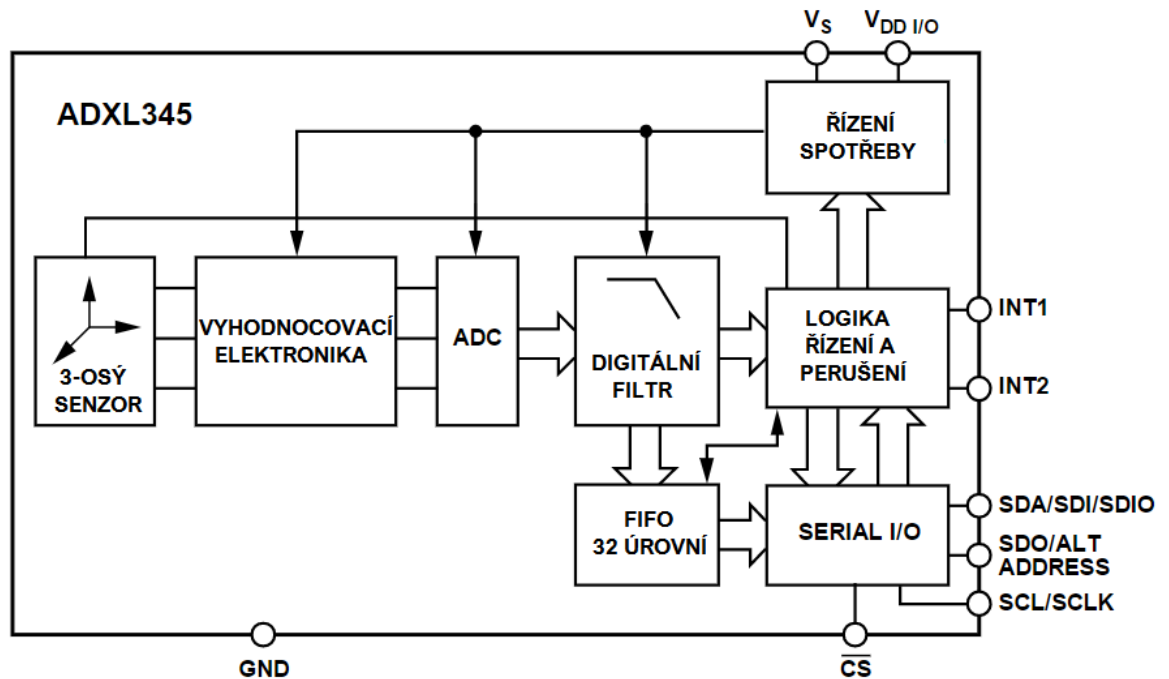
- Výstupní proud: 20 mA
- Druh pouzdra: SOD-123
- Min vstupní napětí: 1,8 V
- Max vstupní napětí: 45 V
- Spínací frekvence: 1 MHz
- Provozní teplota: -55 °C až 150 °C

**5.4 Akcelerometr ADXL345**

Nejdůležitější součástka, byla vybrána po pečlivém zvážení všech kladů a záporů, cenové dostupnosti a požadovaných parametrů. Z celé řady akcelerometrů byl nakonec zvolen tříosý akcelerometr ADXL345 od firmy Analog Devices, který splňuje všechny předpoklady pro tuto práci. Mezi jeho hlavní výhody patří především malá velikost, vysoké rozlišení (13 bitů), schopnost měřit až do  $\pm 16$  G a především malá spotřeba, která je v pracovním stavu pouhých 40  $\mu$ A v režimu spánku dokonce 0.1  $\mu$ A. To je důležité při bateriovém napájení, kde je požadováno, aby výrobek pracoval co nejdéle bez nutnosti výměny baterií. Velikost napájecího napětí je v rozmezí od 2 do 3,6 V, jelikož bude zařízení napájeno dvěma tužkovými bateriemi s maximálním napětím 3V, je tento rozsah dostačující a není potřeba vstupní napětí regulovat. Digitální výstup rovněž patří mezi parametr, který je zásadní a usnadňuje tak další zpracování signálu.

Komunikace s procesorem obstarává tři nebo čtyřvodičové SPI rozhraní, případně I2C sběrnice. V tomto případě je použito SPI rozhraní, kde akcelerometr pracuje vždy v režimu Slave. Vstup SDA (MOSI) slouží pro přenos dat (příkazů) do akcelerometru, výstup SDO má za úkol přenos dat do mikrokontroléru. SCL je taktovací (hodinový) vstup. CS vstup slouží k výběru Slave zařízení na sběrnici SPI (v úrovni LOW). Výstupy INT1 a INT2 jsou použity pro přenos informace z některé ze specifických událostí, které ADXL345 rozeznává. Tyto signály zpracovává přerušovací systém mikrokontroléru. Signály přerušování INT1 a INT2 jsou použity k usnutí a probuzení mikrokontroléru z režimu spánku. (16)





Obrázek 25 - Blokové schéma ADXL345 (16)

Obrázek 25 obsahuje vnitřní blokové schéma akcelerometru. Změnou polohy tří os jde signál přes blok vyhodnocovací elektroniky, která kontroluje změny akcelerací ve všech třech osách a ukládá je v jednotkách LSB/g. Dalším blokem je analogově digitální převodník, který naměřený spojité signál převede na diskrétní hodnoty. Tyto hodnoty jsou poté filtrovány přes filtr typu dolní propust, která je zde z důvodu snížení vlivu krátkodobých změn, což vede ke snížení šumu v signálu. Taková data je pak možno uložit do paměti FIFO, což znamená, že první vzorek, který byl do paměti uložen, bude taky první přečten. Z takto uložených dat je možné jejich odeslání na sériový I/O obvod. Ten rovněž komunikuje s obvody pro přerušení a kontrolní logikou, která spravuje i řízení napájení. (16)

## 6. CHYBY AKCELEROMETRU A JEJICH KOREKCE

### 6.1 Chyba offsetu

Data z akcelerometru obsahují tzv. chybu offsetu. To znamená, že i pokud je senzor v klidu, není výstupní zrychlení nulové, neboť je offset teplotně závislý. V praxi byl změřen offset akcelerometru, na žádné ose se však neprokázal tak velký, aby se musel korigovat, viz Tabulka 1. Během měření se také ukázalo, že závislost offsetu na teplotě není u akcelerometru tak výrazná, a tak lze tuto chybu zanedbat.

**Tabulka 1 - Měření offsetu ADXL345**

Číslo vzorku:	X [LSB/g]	Y [LSB/g]	Z [LSB/g]
1	4,00	-2,00	-129,00
2	7,00	1,00	-127,00
3	6,00	5,00	-128,00
4	5,00	-1,00	-126,00
5	5,00	5,00	-125,00
6	4,00	-5,00	-124,00
7	5,00	-2,00	-119,00
8	6,00	-1,00	-121,00
9	5,00	1,00	-132,00
10	1,00	-6,00	-123,00
11	-5,00	-2,00	-121,00
12	-2,00	-2,00	-121,00
13	8,00	1,00	-123,00
14	6,00	-3,00	-116,00
15	5,00	-3,00	-124,00
16	4,00	1,00	-125,00
17	3,00	1,00	-127,00
18	4,00	-1,00	-127,00
19	2,00	5,00	-127,00
20	6,00	-1,00	-125,00
Průměr [LSB/g]	3,95	-0,45	-124,5
Průměr [g]	0,03	0,00	-0,97

## 6.2 Vysokofrekvenční šum a možnosti filtrace

Dále data obsahují nežádoucí signál na vyšších kmitočtech. Toto rušení je způsobeno několika vlivy. Už z principu své činnosti, je MEMS akcelerometr citlivý na gravitační a pohybové zrychlení. Mezi pohybové zrychlení patří například zrychlení způsobené vibracemi senzoru. V části za senzorem vzniká nejvyšší ovlivnění převodem dat z analogové formy na digitální, které doprovází kvantizační šum. Tyto zdroje produkují obvykle šum na vyšším kmitočtu, než je kmitočet užitečného signálu. Zdrojem rušení je také teplota, ovlivňující mechanickou část akcelerometru.

Pro filtraci tohoto rušení je použitý akcelerometr již v základu obdařen filtrem typu dolní propusti. Tím se odstraní rušení, které je na vyšších frekvencích než námi požadovaný signál. I přes moderní konstrukci a vylepšení eliminující výše uvedené problémy, jsou data značně znehodnocena. Pro zlepšení odhadu měřené veličiny a správnou interpretaci dat je nutné použití filtrace. Jedině správně vyfiltrovaná data zajistí dobrou odezvu a správnou detekci decelerace.

Pro lepší představu, je zde několik způsobů filtrace popsáno a jejich funkce je graficky znázorněna. Data, pro grafické znázornění jednotlivých funkcí byla získána zaznamenáním výstupu osy Z z výše uvedeného akcelerometru.

### 6.2.1 Průměr

Nejjednodušší možností jak zjistit správnou interpretaci naměřených dat je použitím aritmetického průměru.

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

kde,

$n$  – je počet prvků

$x_i$  – je  $i$ -tý prvek souboru naměřených dat

K tomuto způsobu výpočtu průměru je potřeba znát všechna změřená data, což může představovat při vysoké frekvenci měření problém s uchováním všech dat.

Občas je potřeba postupně průměr zpřesňovat s tím, jak nám přibývají nové hodnoty měření. Počítat v tomto případě celý průměr znovu, by bylo neefektivní a navíc by byly kladeny velké nároky na paměť, kvůli ukládání všech doposud naměřených dat.

Průměr lze počítat i postupně rekurzivním výpočtem.

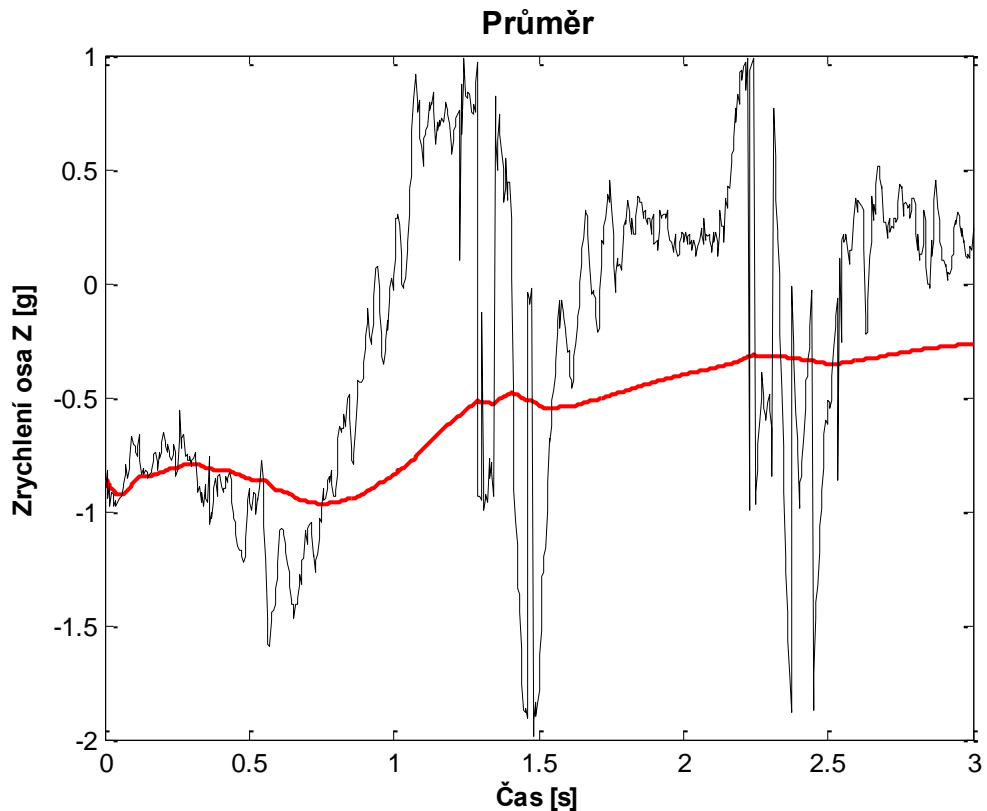
$$x[n] = \bar{x}_n + \frac{x[n] - \bar{x}_n}{n}$$

kde,

$\bar{x}_n$  – je hodnota minulého průměru

$x[n]$  – je aktuální vzorek signálu

Tento výpočet má za následek menší paměťové nároky. Stačí si pamatovat pouze hodnotu předchozího průměru, ale stále se odhaduje pouze konstantní veličina.



Obrázek 26 – Grafické znázornění průměru

Obrázek 26 obsahuje jeho grafické znázornění. Průměr není schopen pružně reagovat na náhlé změny hodnot a výsledný průběh se nepodobá původnímu signálu. Průměr je vhodné použít tam, kde má veličina konstantní hodnotu, nemění se s časem, to ale není případ této práce. (17)

### 6.2.2 Jednoduchý plovoucí průměr

Myšlenka plovoucího průměru je v postupném průměrování. Tedy neprůměruje se celý soubor dat, jako tomu bylo u aritmetického průměru, ale jen několik posledních hodnot. Výpočet hodnoty klouzavého průměru udává vztah:

$$x_p[n] = \frac{1}{k} \sum_{i=n-k}^{n-1} x_i$$

kde,

$n$  – je aktuální pozice prvku

$k$  – je velikost průměrovacího okna

$x_i$  – je  $i$ -tý prvek souboru dat v průměrovacím okně

$k$  – je velikost průměrovacího okna

Složitost výpočtu je lineárně závislá na hodnotě  $k$  a velikosti souboru dat o velikosti  $k$ . Stejně jako u průměru jde i v tomto případě výpočet přepsat na rekurzivní formu.

$$x_{p+1}[n] = \frac{x_p \cdot k + x[n] - x[n - k]}{k}$$

Vzorec lze ještě zjednodušit na tvar:

$$x_{p+1}[n] = x_p + \frac{x[n] - x[n - k]}{k}$$

kde,

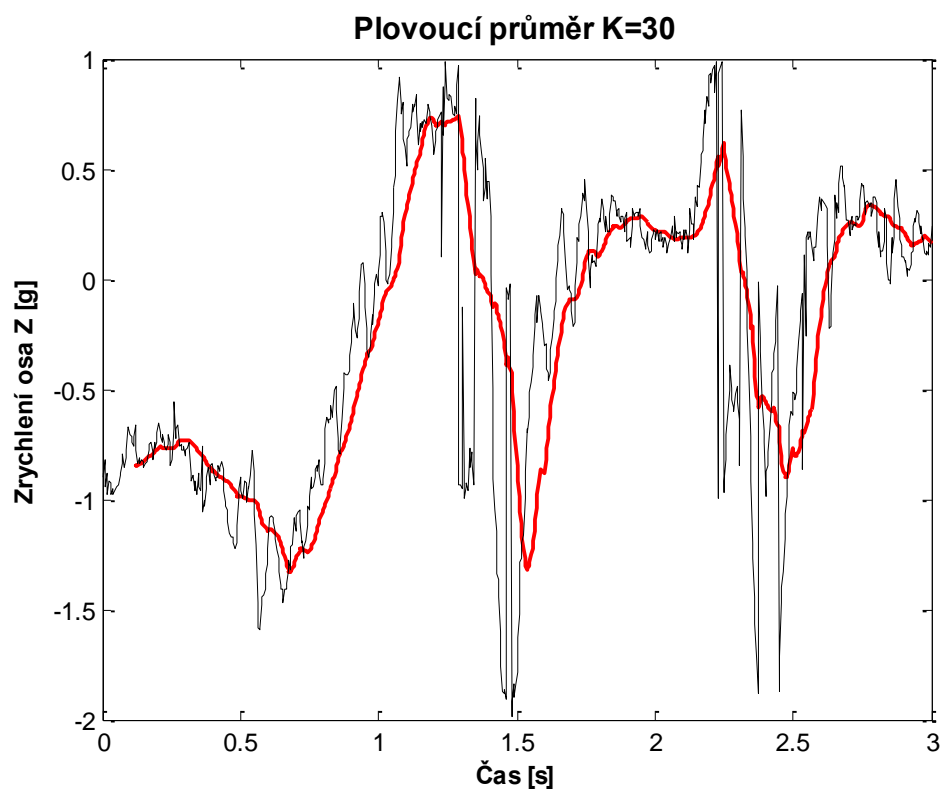
$x_p \cdot k$  – je součet posledních  $k$  hodnot klouzavého průměru v minulém kroku

$x[n]$  – je aktuální vzorek  $n$  sledovaného průběhu

$x[n - k]$  – je hodnota průběhu posunutá o index  $k$  doleva

$k$  – je velikost průměrovacího okna

Váha určující vliv korekční složky je nyní konstantní a odpovídá převrácené hodnotě délky průměrovacího okna. Velikost korekce je dána rozdílem nejnovějšího a nejstaršího měření. Použitím vztahu pro rekurzivní výpočet klouzavého průměru, bylo dosaženo snížení náročnosti výpočtu.



Obrázek 27 - Grafické znázornění plovoucího průměru

Obrázek 27 obsahuje graf, znázorňující aplikaci rekurzivního výpočtu klouzavého průměru na znehodnocená data z akcelerometru. Výsledná křivka nyní mnohem lépe popisuje získaná data a filtruje náhodné špičky. Také je zde vidět zpoždění signálu oproti původnímu, a to v závislosti na velikosti průměrovacího okna, v tomto případě o  $k = 30$ . U rekurzivní metody je důležitý první odhad průměru, který je spočítán stejným způsobem jako je tomu u klasické metody výpočtu, tedy průměr prvních  $k$  vzorků. (17)

### 6.2.3 Odhad plovoucího průměru

Pokud z pohledu pozorovatele není možné, například kvůli malé paměti, si pamatovat všechny vzorky z aktuálního průměrovacího okna, je nutné tyto vzorky nějakým způsobem odhadnout. Nejlepší odhad nejstaršího měření se získá, když se použije aktuální hodnota zjišťovaného průměru. Místo vlastního měření, se tedy odečte poslední průměr. Vztah pro výpočet má potom tvar:

$$x_{p+1}[n] = \frac{x_p \cdot k + x[n] - x_p}{k}$$

Vzorec lze ještě zjednodušit na tvar:

$$x_{p+1}[n] = x_p + \frac{x[n] - x[n - k]}{k}$$

kde,

$n$  – je aktuální pozice prvku

$k$  – je velikost průměrovacího okna

$x_i$  – je  $i$ -tý prvek souboru dat v průměrovacím okně

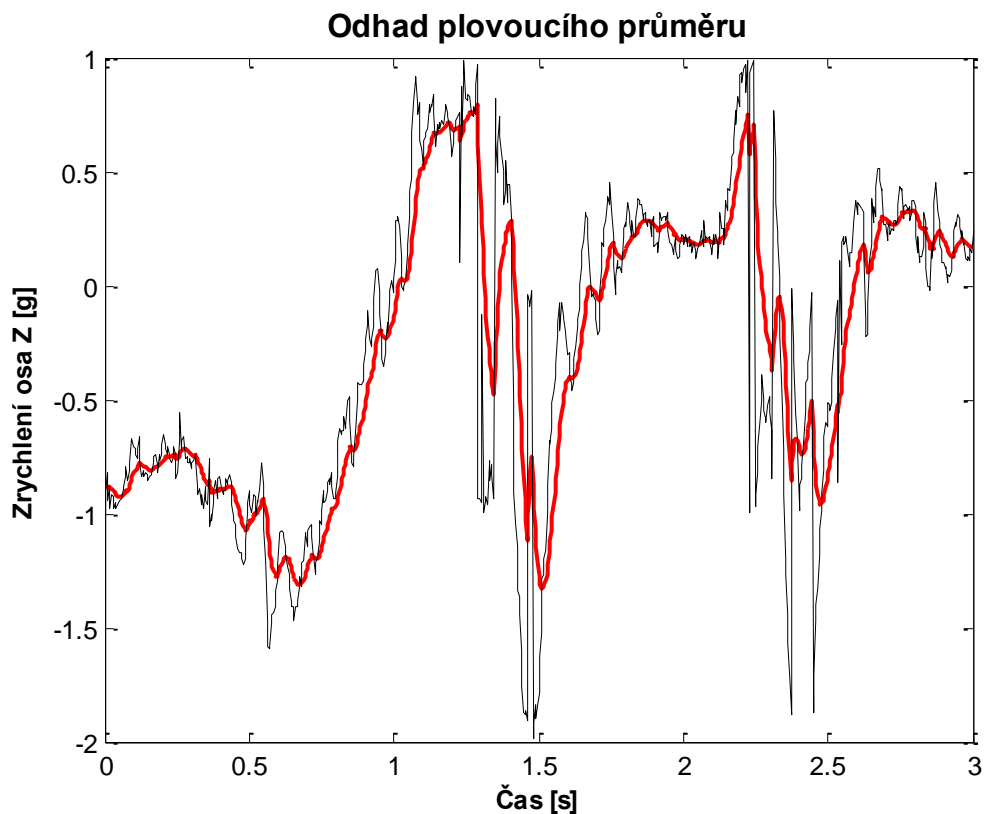
$k$  – je velikost průměrovacího okna

Výsledný vzorec představuje jednoduché a praktické řešení, které bude ve většině případů dostačující. Popisované řešení s použitím aktuálního průměru, při výpočtu, místo prvního prvku ze souboru  $k$  hodnot způsobí, že počítaný průměr obsahuje hodnotu měření v  $x[0]$ . Jeho váha je:

$$\left(\frac{k-1}{k}\right)^n$$

tedy exponenciálně klesá, z tohoto důvodu se tento výpočet klouzavého průměru nazývá také exponenciální. U tohoto průměru není ani nutné zajistit přesnější odhad první hodnoty průměru, protože výpočet je schopen se sám do-konvergovat na správnou hodnotu.

Obrázek 28 obsahuje graf, znázorňující aplikaci výpočtu odhadu klouzavého průměru na znehodnocená data z akcelerometru. V porovnání s jednoduchým klouzavým průměrem bylo zjištěno, že průběh je více vyhlazen a zároveň bylo dosaženo lepších výsledků při menší paměťové náročnosti, nedochází zde ani ke zpoždění o  $k$  vzorků, jako tomu bylo u plovoucího průměru. (17)



Obrázek 28 – Grafické znázornění odhadu plovoucího průměru

#### 6.2.4 Kalmanův filtr

Zjednodušeně se dá říci, že Kalmanův filtr je takový „vylepšený“ odhad plovoucího průměru. Toto vylepšení spočívá v rozdělení algoritmu do dvou kroků. Na predikci nového stavu a korekci integrací nového měření.

V případě odhadu plovoucího průměru, je predikce stavu pro následující krok velmi jednoduchá. Předpokládá se, že se nemění:

$$x_p = x_p$$

Dále je zapotřebí reprezentovat zapomenutí nejstaršího měření. Toho se dosáhne zapamatováním míry nedůvěryhodnosti odhadu. S každou další predikcí se sníží důvěryhodnost odhadu:

$$P = P + Q$$

Pro korekci nového stavu je nutné znát Kalmanovo zesílení. Jedná se o určitou váhu (u plovoucího průměru se používala převrácená hodnota délky průměrovacího okna) Kalmanův filtr definuje  $K$  jako:

$$K = \frac{P}{(P + R)}$$

Korekce nově predikovaného stavu se provede pomocí nového měření:

$$x_p = x_p + K \cdot (x[n] - x_p)$$

Kalmanovo zesílení je vždy menší než 1 tzn., že filtr filtruje. Pokud  $R = 0$  má měření důvěru 100%, proto se aplikuje celá korekce. Jinak se aplikuje vždy pouze jen její část, která je dána poměrem nedůvěryhodnosti odhadu stavu a měření.

Po korekci vlastního stavu je potřeba opravit i jeho aktuální míru nedůvěryhodnosti. Tato korekce je definována jako:

$$P = (1 - K) \cdot P$$

kde,

$P$  – je aktuální míra nedůvěryhodnosti

$R$  – je míra nedůvěryhodnosti měření nebo také množství šumu

$Q$  – je úprava predikce k větší nedůvěře

$K$  – je Kalmanovo zesílení

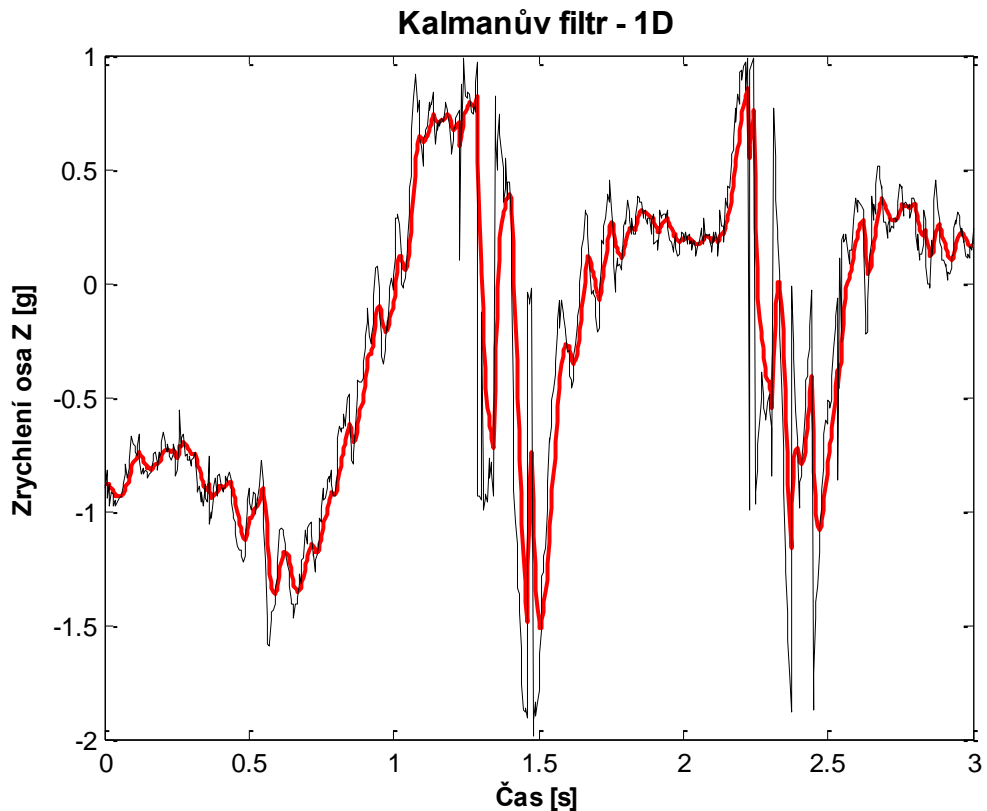
Tento vztah lze interpretovat tak, že pokud jsme použili jednu desetinu z korekce stavu, zmenšila se nedůvěryhodnost našeho odhadu na devět desetin.

Vnitřní fungování a důvody, proč filtr funguje, jsou již svou komplexností nad rámec této práce. Proto popis sahá jen na úroveň potřebnou k pochopení chování a implementaci filtru pro konkrétní užití.

Obrázek 29 obsahuje graf, znázorňující aplikaci výpočtu Kalmanova jednodimenzionálního filtru na znehodnocená data z akcelerometru. V porovnání s jednoduchým klouzavým



průměrem a odhadem plovoucího průměru bylo zjištěno, že průběh je u tohoto typu filtru nejvíce vyhlazen. Jako jediný dokáže opravdu pružně reagovat na náhlé změny v signálu a jak je zřejmé ze samotné funkce filtru, nedochází zde ani ke zpoždění za původní signálem. (17)



Obrázek 29 – Grafické znázornění 1D - Kalmanova filtru

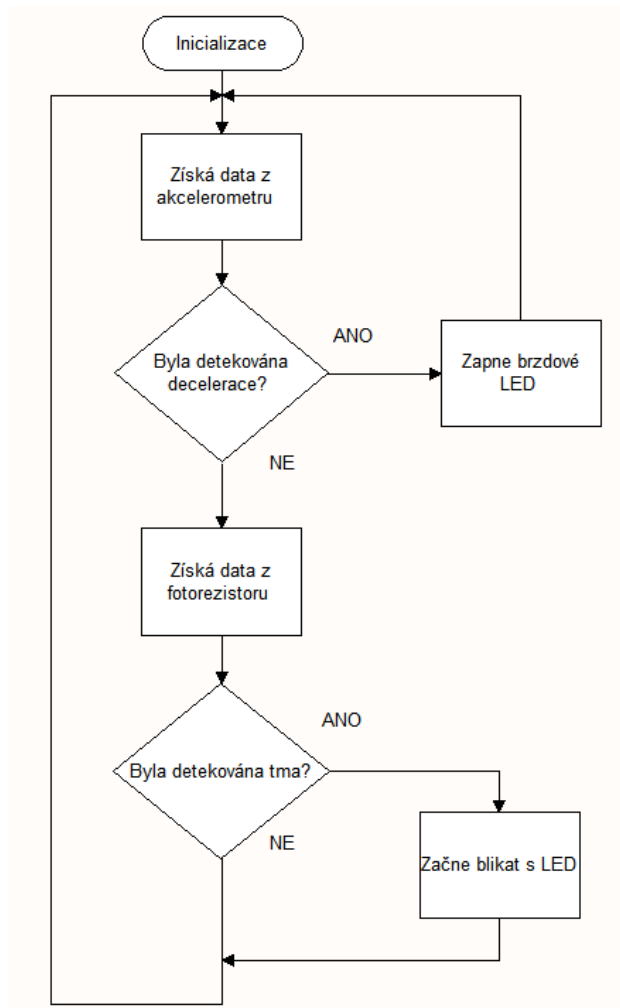
## 7. PRAKTICKÁ ČÁST

Tato část se bude zabývat softwarovou částí, návrhem desky plošného spoje a celé konstrukce.

### 7.1 Řídicí program

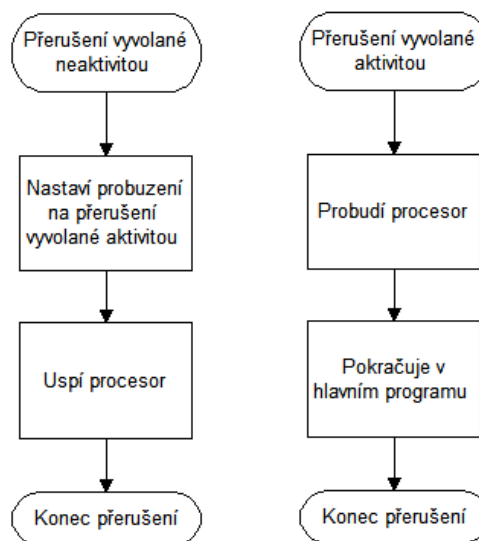
Program pro mikrokontrolér je napsán v jazyce Wiring. K vývoji programu bylo použito vývojové prostředí Arduino IDE, které firma je nabízí k volnému použití.

Při startu programu jsou nejdříve inicializovány všechny potřebné periferie. Dále jsou získána data z akcelerometru. Následuje podmínka, zda bylo detekováno brzdění. Pokud ano, program rozsvítí LED diody a zároveň testuje, zda je pořád detekováno brzdění, teprve až když tato podmínka skončí, LED se vypnou a program pokračuje dál. Získají se data z fotorezistoru a na jejich základě se rozhodne, zda je osvětlení dostačující, či je potřeba zapnout výstražné blikání. Poté se program vrátí zpátky na začátek, viz Obrázek 30.



Obrázek 30 - Vývojový diagram hlavní části programu

Další části jsou vyvolané pomocí přerušení, a to aktivitou či neaktivitou akcelerometru, viz Obrázek 31.



Obrázek 31 - Vývojové diagramy externího přerušení

Přerušeni vyvolané neaktivitou v první řadě nastaví přerušeni, které zase procesor probudí, v tomto případě to bude přerušeni vyvolané aktivitou akcelerometru. Poté už jen uspí procesor.

Druhé přerušeni je vyvolané pomocí aktivity akcelerometru, po vyvolání probudí procesor, který pokračuje dále v průběhu hlavní části programu.

### **7.1.1 Inicializace**

Inicializace začíná nastavením vstupních a výstupních pinů. Dále inicializací sběrnice SPI a nastavením povolení přerušeni. Jako poslední je inicializován senzor ADXL345. Měřicí rozsah akcelerometru se nastaví na  $\pm 4$  G, rychlosti vzorkování na 200 Hz. Nastavení externích přerušeni na portech INT1 je aktivní při vyvolání aktivity a INIT2 se aktivuje při delší neaktivitě. Nakonec je akcelerometr přepnut do měřicího módu.

### **7.1.2 Získávání a převedení dat**

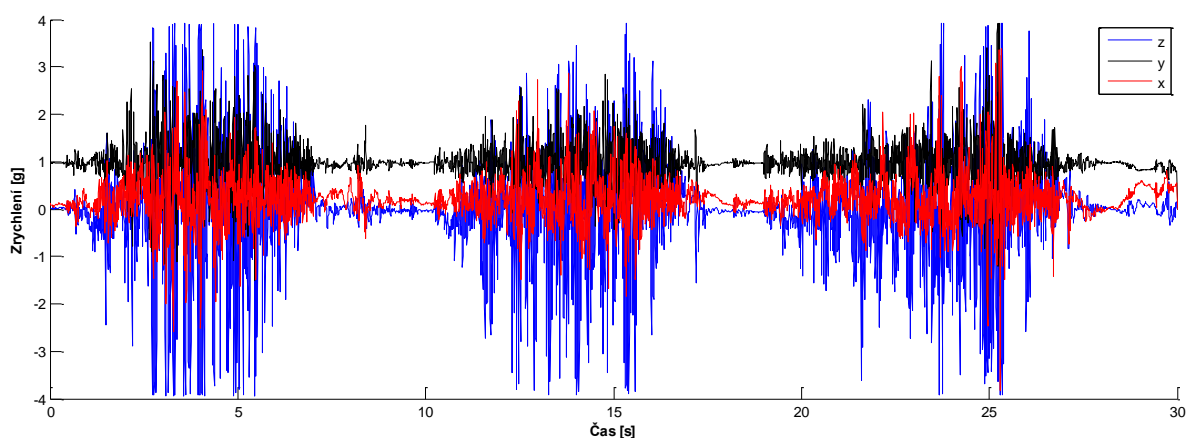
Akcelerometr zapisuje výsledná data do 6ti 8-bitových registrů, ty jsou určeny jenom pro čtení. Každá osa má tedy dispozici 16 bitů, ale využito je jen 10 bitů, proto je potřeba přečíst oba, výsledná data jsou v jednotkách LSB/g. Z dokumentace se dá vyčíst, že hodnota 256 LSB/g při maximálním rozlišení a pro každou osu odpovídá velikosti 3,9 mg/LSB. Jednoduchým vynásobením těchto dvou čísel dostaneme hodnotu 998,4 mg, neboli 0,9984 g. Z tohoto pak lze vyjít při přepočtu na  $\text{m/s}^{-2}$ , neboli  $1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^{-2}$ . Pro přehlednější zobrazení naměřených dat se používá přepočet. Pokud budeme pracovat s menšími hodnotami g, bude tomu přizpůsoben i ADC převodník. V našem případě je měřicí rozsah zrychlení nastaven do  $\pm 4$  g, s 10-bitovým rozlišením. Naměřené hodnoty dosahují maximální hodnoty 128 LSB/g, čemuž odpovídá hodnota 7,8 mg/LSB. Vynásobením těchto hodnot dostaneme výsledek v jednotkách g. V našem případě dostaneme výsledek 0,9984 g. Z tohoto pak lze vyjít při přepočtu na  $\text{m/s}^{-2}$ , neboli  $1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^{-2}$ , což se rovná tíhovému zrychlení Země, viz kapitola 2. (16)

### **7.1.3 Filtrace dat**

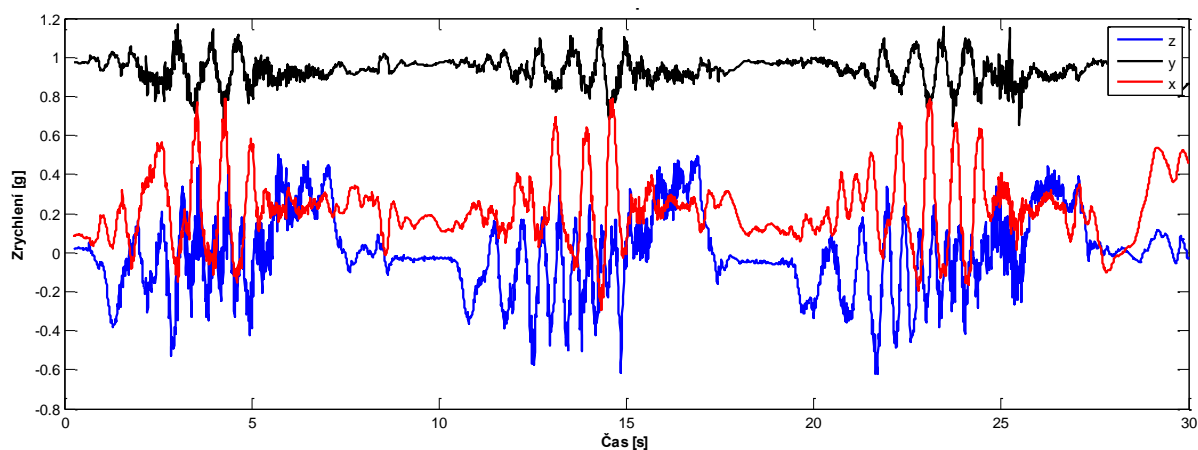
K filtraci dat byl zvolen filtr typu plovoucího průměru, zejména kvůli jeho jednoduchosti a snadné implementaci do řídicího programu. V tomto případě příliš nevádí menší zpoždění za původním signálem, jelikož samotný vyhodnocovací algoritmus má implementované také určité zpoždění. V rámci indikace brzdění však není zpoždění v řádu několika stovek milisekund žádnou překážkou. Při testování bylo zjištěno, že pro potřebnou aplikaci bude nejlepší zvolit velikost průměrovacího okna 30 vzorků.

Obrázek 32 obsahuje grafické znázornění naměřených dat z testovací jízdy na kole. Jak je vidět samotný signál je velice silně zašuměný a mimo jiné obsahuje hodně špiček vzniklých v rámci nedokonalosti vozovky, rázům do rámu kola a také vibracemi, které při jízdě na kole vznikají. Takto znehodnocený signál není možné využít pro vyhodnocení decelerace.

Obrázek 33 obsahuje grafické znázornění již vyfiltrovaných předchozích dat pomocí filtru plovoucího průměru při  $K = 30$ . Z tohoto grafu je již decelerace celkem dobře patrná, a takto vyčištěná data jsou již použitelná pro další zpracování.



Obrázek 32 - Zašuměná data z akcelerometru

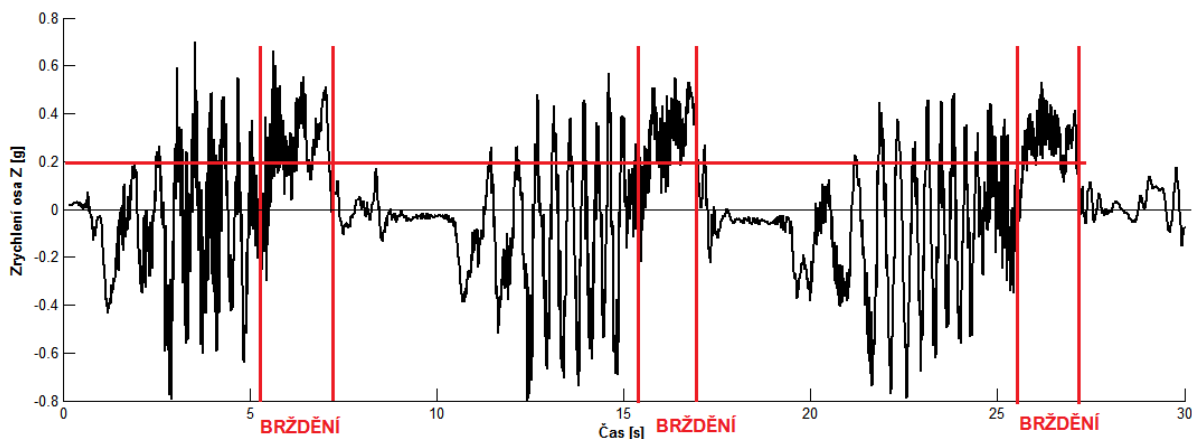


Obrázek 33 - Graf vyfiltrovaných dat z akcelerometru  $K=30$

#### 7.1.4 Rozhodovací algoritmus pro indikaci brzdění

U rozhodovacího algoritmu, starajícího se o samotné vyhodnocení brzdění, se vycházelo hlavně z naměřených vyfiltrovaných dat. Při jejich analýze bylo zjištěno, že na ose Z je decelerace nejlépe zjistitelná. Na ostatních osách již není tak patrná, je to logické vzhledem k tomu, že jediná osa Z je ve směru jízdy kola, a tudíž na ní působí největší vektor zrychlení.

Obrázek 34 obsahuje grafické znázornění vyfiltrovaných dat z osy Z, a také znázorněné časové úseky, na kterých bylo brzdění detekováno. Jak je z grafu patrné jedná se o úseky, které mají skoro po celou dobu brzdění hodnotu zrychlení vyšší než 0,2 g.



Obrázek 34 - Analýza grafu osy Z

S tímto výsledkem bylo dále nakládáno v samotném vyhodnocovacím algoritmu, kde plní funkci rozhodovací úrovně pro detekci decelerace. Při měření vzorových dat byl akcelerometr otočený, proto je ve skutečnosti používána záporná hodnota zrychlení, tedy  $-0,2g$ .

Algoritmus funguje na principu podmínky. Tedy, pokud je zrychlení v ose Z větší než  $-0,2g$  rozsvítí se brzdové světlo. Poté se začne testovat, zda je pořád hodnota zrychlení větší. Toto řešení má za následek, že světlo svítí po celou dobu brzdění a nejen na jeho začátku. V rámci testování, bylo zjištěno, že je tato podmínka nedostačující a brzdění se detekuje i při náhodném projeví nerovnostmi či nedokonalostmi silničního povrchu. Proto byla přidána podmínka, která po detekci vyčká 100 milisekund a pokud je hodnota zrychlení po celou dobu větší než udaná hodnota zrychlení, připustí program k dalšímu kroku. U toho řešení se stávalo, že ani při razantním brzdění na nerovném povrchu nebyla decelerace správně vyhodnocena a brzdové světlo zůstávalo zhasnuto. Následně byla tedy přidána ještě jedna podmínka, která připouští v rámci čekání na vyhodnocení stavu třikrát snížit hodnotu zrychlení pod danou mez, aniž by to zabránilo správnému vyhodnocení. Po této úpravě již algoritmus funguje bezproblémově.

Rozhodování jen na základě jedné osy má nežádoucí problém, a to tíhové zrychlení země. Toto zrychlení, jak již víme z předchozích kapitol, má hodnotu  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  a je indikováno v každé ose akcelerometru. Proto při náklonu akcelerometru směrem dolů začne osa Z indikovat toto zrychlení, pokud jeho hodnota překročí rozhodovací úroveň, vyhodnotí ho procesor jako brzdění. Tento problém se nepodařilo vyřešit i přes různé experimentování pomocí požití

dalších os. Na druhou stranu, se tento problém v praxi projeví akorát při jízdě z prudkého kopce, kde je lepší viditelnost kola při vyšší rychlosti žádaná.

### **7.1.5 Rozhodovací algoritmus pro indikaci slabého osvětlení**

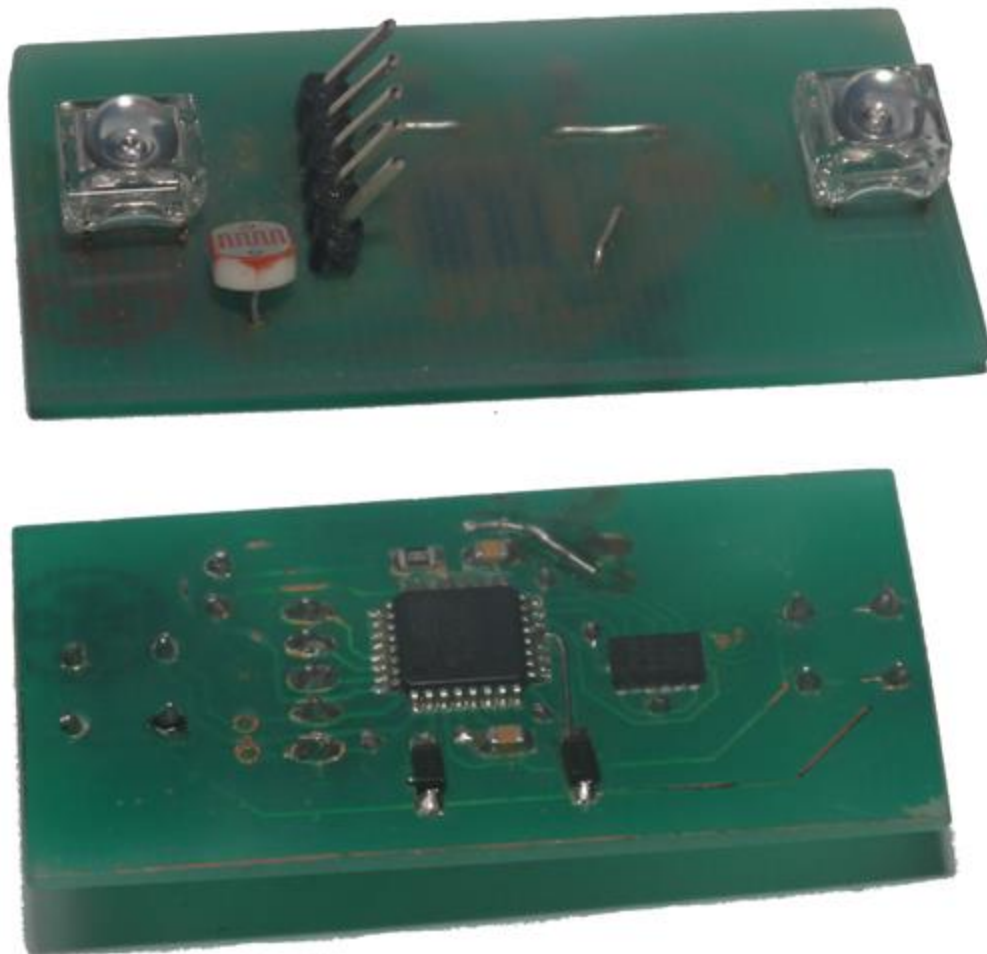
Tento algoritmus je založený na jednoduché podmínce. Jelikož není potřeba měřit hodnotu v každém průběhu smyčky je nastavený čas 8s, po jehož uplynutí proběhne jedno měření a vyhodnocení naměřených dat. Pro snížení spotřeby je do fotorezistoru pouštěno napětí jen po dobu snímání osvětlení. Po naměření dat je podle vyhodnocovací úrovně buďto zapnuto, nebo naopak vypnuto výstražné blikání LED diod, které má nastavený interval blikání 200ms. Vyhodnocovací úroveň byla nastavena na šero, což podle empirického měření vyšlo na cca 5 luxů.

Vlivem chyby při návrhu DPS, byl fotorezistor umístěn těsně vedle LED diody. Občas měření začínalo přesně v momentě, kdy byla LED dioda rozsvícena. Tím bylo měření ovlivněné chybou, a i když byla tma, výstražné blikání se samo vypínalo. Proto byla do programu přidána podmínka, která spustí měření jen tehdy, pokud jsou LED diody zhasnuté. Po této úpravě již program funguje bezchybně.

## **7.2 Návrh desky plošných spojů**

Všechny komponenty se vešly na jednu oboustrannou desku plošných spojů o velikosti 50x25mm. Vzhledem ke složité výrobě oboustranné desky v domácích podmínkách, bylo přistoupeno k výrobě jednostranné desky a pro správné propojení všech spojů byly použity drátové propojky, viz Obrázek 35. Pro zvýšení mechanické a chemické odolnosti byla spodní vrstva opatřena nepájivou maskou, vytvořenou také v domácích podmínkách. Výrobní data jako schéma zapojení a návrh DPS jsou uvedena v příloze A.

Na desce je vyvedený sériový port UART. Přes který je mikroprocesor programován, zároveň slouží ke komunikaci s PC. Dva krajní piny slouží také k samotnému napájení brzdového světla.

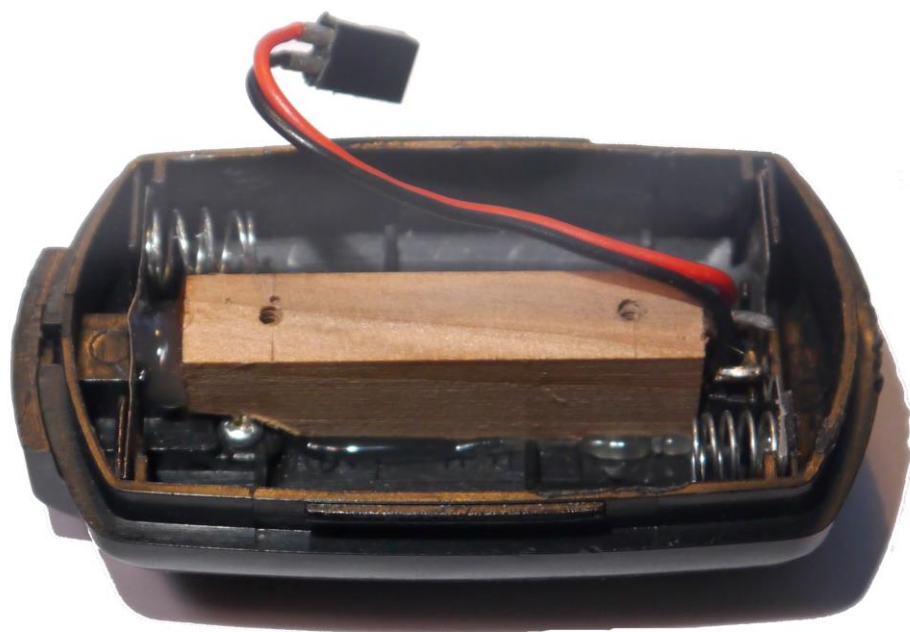


Obrázek 35 - Finální DPS

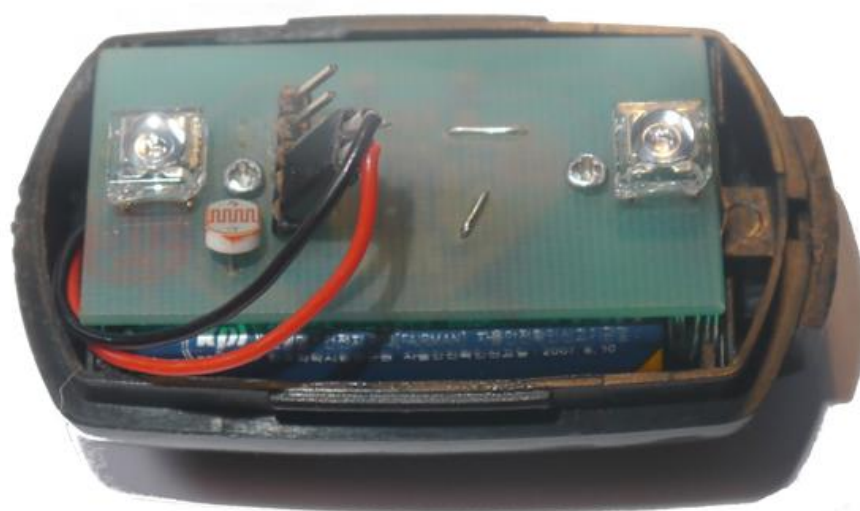
### 7.3 Návrh fyzické konstrukce

Konstrukce brzdového světla byla zvolena s ohledem na velikost krabičky, která vychází z běžně dostupné cyklistické blikačky. Krabička je vybavena pouzdem pro dvě AAA baterie.

Pouzdro bylo upraveno tak, aby bylo možné pevně upevnit výsledné DPS se součástkami. Úprava spočívala ve vlepení dřevěného špalíčku na místo původního DPS a tím vytvoření plochy pro upevnění DPS, viz Obrázek 36. Zároveň byly připájeny napájecí vodiče spolu s konektorem pro připojení napájení. Obrázek 37 obsahuje konečný vzhled brzdového světla. Více pohledů na fyzickou konstrukci této práce je uvedeno v příloze B.



Obrázek 36 - Úprava pouzdra



Obrázek 37 - Konečný vzhled



## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byl návrh brzdového světla pro cyklisty, které by se při brzdění rozsvěcelo, aniž by bylo mechanicky propojeno s brzdou, tedy pouze na základě změny vektoru zrychlení.

V teoretické části byly popsány použité komponenty, dále zde byly dopodrobna rozebrány možnosti detekce vektoru zrychlení pomocí akcelerometru. V hardwarové části byl řešen výběr samotných komponent použitých při realizaci této práce s popisem jejich vlastností. Samostatná část byla věnována chybám akcelerometrů, jejich korekci a možnosti filtrace výstupních dat. Nakonec i vyhodnocení naměřených dat pro danou aplikaci.

Praktická část se zabývá popisem funkce programu pro mikrokontrolér, naměřením vzorových dat a jejich rozebráním. Dále pak reálným aplikováním algoritmu plovoucího průměru pro filtrování naměřených dat a jejich analýzou. Z výsledku analýzy byla získána rozhodovací úroveň a základní náhled na návrh rozhodovacího algoritmu, který byl dále upravován až do konečné podoby. Byla zde řešena také otázka způsobu snímání okolního osvětlení a jeho vyhodnocení. Z důvodu chyby při návrhu desky plošných spojů, se tato část zabývá také řešením problému se špatně umístěným fotorezistorem. V další části se práce zabývá samotným návrhem zařízení, a to schématem zapojení a deskou plošných spojů. Nakonec i nutnou úpravou připraveného pouzdra, do které se celé zařízení mělo vejít.

Na závěr lze konstatovat, že všechny body práce byly splněny. Výsledkem je funkční automatické brzdové světlo pro cyklisty. Navíc je světlo dovybaveno automatickým rozsvěcením varovného blikání za snížené viditelnosti, automatickým přechodem do režimu spánku s nízkou spotřebou a automatickým probuzením na základě detekce pohybu brzdového světla. Toho všeho bylo dosaženo s využitím minimálního množství součástek a za zlomek ceny komerčních výrobků.

## POUŽITÁ LITERATURA

1. SIMOPT, S R O-INTERNETOVÁ AGENTURA. *Povinná výbava jízdního kola* [online]. [vid. 2016-11-04]. Dostupné z: <http://www.ibesip.cz/cz/cyklista/bezpecne-jizdni-kolo/povinna-vybava-jizdniho-kola>
2. *2017 Lupine Rotlicht 160 Lumen Waterproof Day Night Rear Light Brake Light* [online]. [vid. 2016-11-04]. Dostupné z: <http://lupinelights.co.uk/2017-lupine-rotlicht-160-lumen-waterproof-day--night-rear-light--brake-light-26540-p.asp#>
3. SEE.SENSE. *See.Sense ICON Rear Light. See.Sense* [online]. [vid. 2016-11-04]. Dostupné z: <https://seesense.cc/products/see-sense-icon-rear-light>
4. VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů - 1. díl - Piezoelektrické | Automatizace.HW.cz* [online]. [vid. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
5. HUSÁK, Miroslav. *Akcelerometry* [online]. [vid. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://readgur.com/doc/172537/08-akcelerometry.pdf>
6. VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů - 3. díl - Tepelné akcelerometry MEMSIC | Automatizace.HW.cz* [online]. [vid. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2007040901>
7. *MEMS - díl 1. - Co to je a jak to vypadá ? | Vývoj.HW.cz* [online]. [vid. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/clanek/2006111901>
8. *FyzWeb - Jak funguje žárovka a zářivka* [online]. [vid. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=109>
9. *LED* [online]. [vid. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://pandatron.cz/?605&led>
10. *Co jsou to LED diody - parametry LED diod | LED Solution.cz* [online]. [vid. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://eshop.ledsolution.cz/led-diody-technicke-udaje>
11. MAŤÁTKO JAN. *Elektronika*. B.m.: Idea servis, 2007. ISBN 978-80-85970-64-7.
12. ATMega328P SMD. *Naylamp Mechatronics - Perú* [online]. [vid. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.naylampmechatronics.com/atmel/262-atmega328p-smd.html>
13. *100 5mm Piranha Super Flux Wide LED [5mm-Piranha]* [online]. [vid. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://www.ledssuperbright.com/100-5mm-piranha-super-flux-wide-led-p-229>
14. *VT83N4 - GM Electronic* [online]. [vid. 2016-12-03]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/vt83n4>
15. *NSI45020AT1G - ON SEMICONDUCTOR - Led Driver, Linear, PWM Dimming, 0V-45V in, 1MHz switch, 20mA out, SOD-123-2 | Farnell element14 česká republika* [online]. [vid. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/on-semiconductor/nsi45020at1g/ic-led-driver-45v-0-02a-sod123/dp/1794973>

16. *ADXL345 Datasheet and Product Info | Analog Devices* [online]. [vid. 2016-11-30].  
Dostupné  
z: <http://www.analog.com/en/products/mems/accelerometers/adxl345.html#product-overview>
17. *Měření rychlosti (Robotika.cz > Guide)* [online]. [vid. 2016-12-02]. Dostupné  
z: <http://robotika.cz/guide/filtering/en>

## **PŘÍLOHY**

Příloha A – *Návrh brzdového světla*

Příloha B – *Fotky výsledného brzdového světla*

Příloha C – *Obsah CD*

Příloha A – Návrh brzdového světla

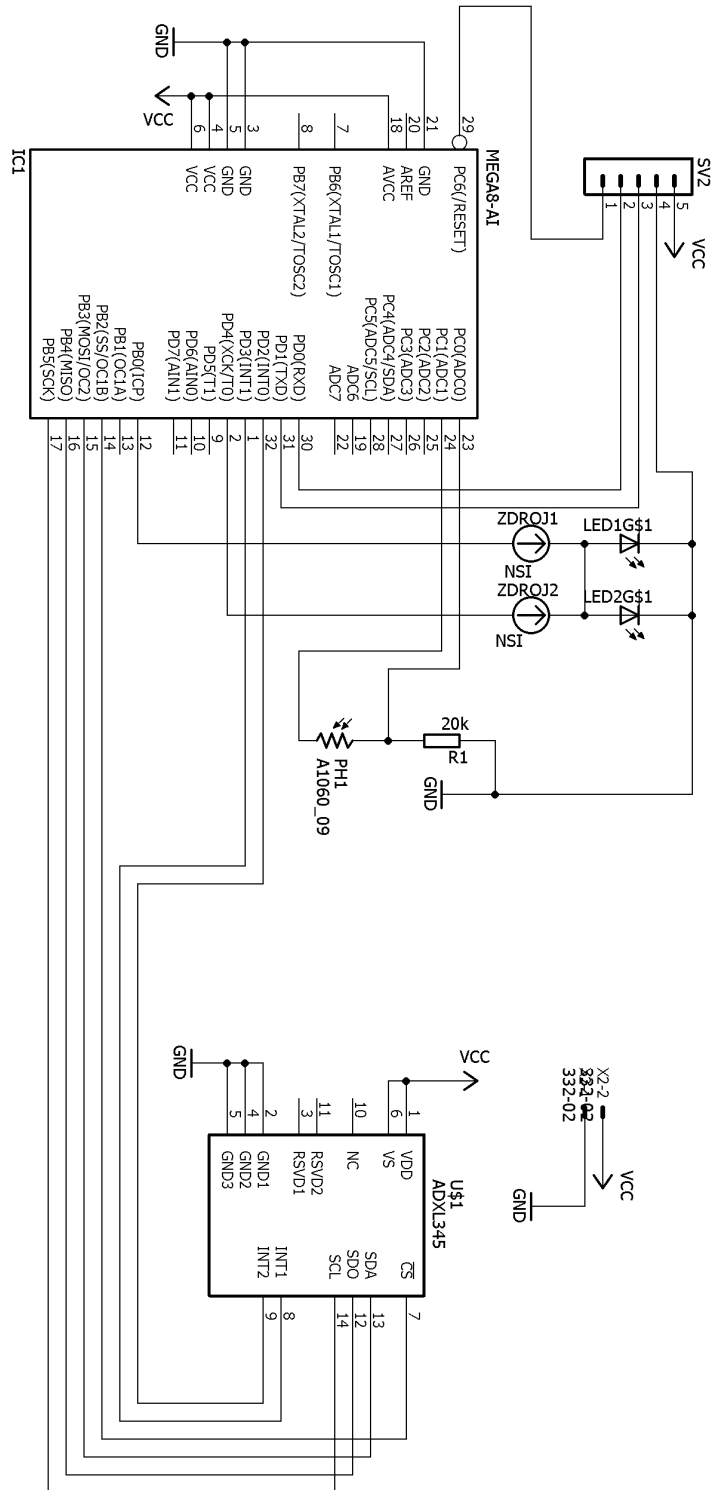
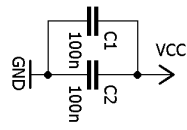
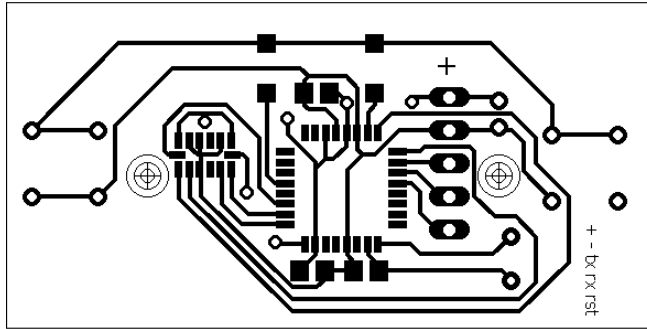
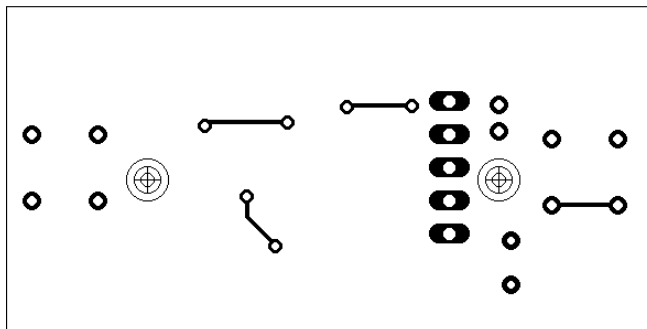


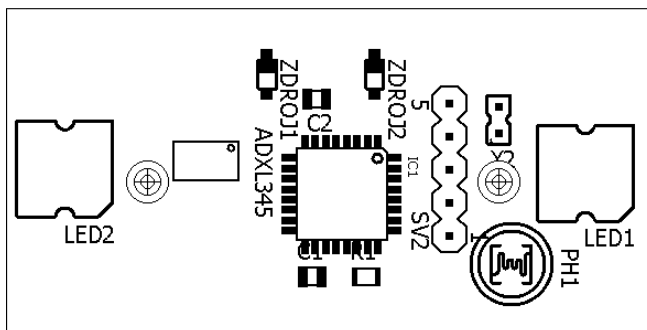
Schéma zapojení brzdového světla



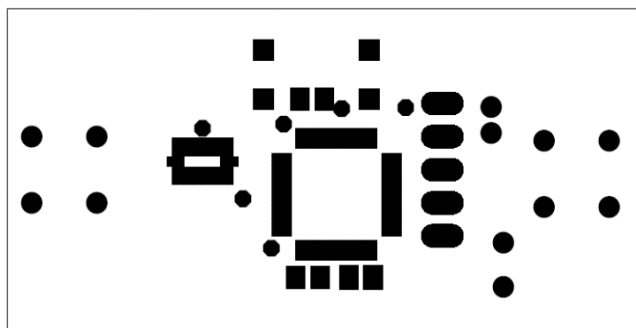
DPS – spodní část



DPS – vrchní část



DPS – rozložení součástek



DPS – šablona nepřívě masky

## Rozpis součástek

Pořadové číslo	Označení součástky	Název/hodnota	Pouzdro
1	C1	100n	805
2	C2	100n	805
3	IC1	ATmega328p	TQFP32-08
4	LED1	Piranha Super Flux	
5	LED2	Piranha Super Flux	
6	PH1	VT83N4	T0-46
7	R1	20k	805
8	SV2	PIN X5	
9	ADXL345	ADXL345	LGA14
10	X2	PIN X2	
11	ZDROJ1	NSI45020AT1	SOD123
12	ZDROJ2	NSI45020AT1	SOD123

Příloha B – *Fotky výsledného brzdového světla*



Celkový pohled z vrchu



Celkový pohled zespod





Kompletní sada včetně uchycení



Rozložené brzdové světlo a všechny jeho součásti

Příloha C – *Obsah CD*

**DPS\_BP** – Návrhy DPS

**MCU** – Zdrojové kódy pro MCU

**MATLAB** – Zdrojové kódy PC aplikace

**KadlecM\_BrzdoveSvetlo\_2016.pdf** – Vlastní text práce

**TEST** – Ukázkové video z testovací jízdy