

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Automatické vypínání směrových světel pro motocykl

Jakub Frankl

Bakalářská práce
2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Frankl**
Osobní číslo: **D15187**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Název tématu: **Automatické vypínání směrových světel pro motocykl**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

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

- Vytvořte prototyp modulu pro automatické vypínání směrových světel motocyklu po dokončení odbočovacího manévru. Pro tvorbu prototypu doporučuji platformu Arduino.
- Doporučený postup:
1. Provedte rešerši podobných zařízení dostupných na trhu.
 2. Stanovte funkce zařízení a algoritmus, kterým je budete realizovat.
 3. Vyberte vhodný snímač pro detekci odbočení/náklonu.
 4. Vytvořte hardware i software zařízení.
 5. Ověřte funkci zařízení.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Smart Turn System - self-canceling turn signal system [online]. 2016 [cit. 2016-09-28]. Dostupné z: <http://www.safer-turn.com/>
2. RIPKA, Pavel: Senzory a převodníky, 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 9788001046968.
3. Arduino. [online]. 2014 [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: www.arduino.cc.
4. HEROUT, Pavel: Učebnice jazyka C 4., přeprac. vyd. České Budějovice: Kopp, 2004, 271, viii s. ISBN 8072322206.
5. PLÍVA, Zdeněk: EAGLE prakticky: řešení problémů při běžné práci, 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010, 184 s. ISBN 9788073002527.
6. Podklady poskytnuté vedoucím práce.
7. Datasheety výrobců komponent.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Mašek, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce:

27. listopadu 2018

Termín odevzdání bakalářské práce:

24. května 2019

doc. Ing. Libor Svadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. března 2019

Prohlašuji:

Tuto práci jsem 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.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Jakub Frankl

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Zdeňkovi Maškovi, Ph.D. za vedení této práce, jeho vstřícnost a ochotu mi vždy se vším poradit. Velké dík patří též mé rodině za jejich morální podporu nejenom při psaní této práce, ale i po celou dobu studia.

ANOTACE

Tato práce se zabývá návrhem prototypu automatického vypínání směrových světel motocyklu po dokončení odbočovacího manévru. První část práce je věnovaná stručnému přehledu podobných zařízení dostupných na trhu a popisu funkce použitých senzorů. Nechybí ani teoretická možnost řešení prototypu, kterým se tato práce zabývá. Druhá část práce se věnuje návrhu prototypu, a to jak softwarové, tak hardwarové části. Závěr práce je věnován testování výsledného zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Automatické vypínání směrových světel motocyklu po dokončení odbočovacího manévru, prototyp, software, hardware, ověření funkce.

TITLE

Self-canceling turn signal system for motorcycle

ANNOTATION

This treatise of mine concerns with the design of the self-cancelling turn signal system of motorcycle after turning is being finished. The first section of the treatise is dedicated to the concise review of similar devices available at the market and the description of the applied sensors. There is a missing version of the prototype of the treatise concerns. The second section of the treatise deals with the design of the prototype regarding its hardware and software part. The final section of my treatise is dedicated to testing the completed device.

KEYWORDS

Self-canceling turn signal system of motorcycle after turning is being finished, prototype, software, hardware, function verification.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR SOUČASNÉ SITUACE.....	10
1.1 Časová relé.....	10
1.2 Produkt STS (Smart Turn System)	11
1.3 Systém založený na snímání rychlosti předního a zadního kola	14
1.4 Systém u motocyklů BMW	14
2 PRINCIPY FUNKCÍ INERCIÁLNÍCH SNÍMAČŮ.....	15
2.1 Gyroskop.....	15
2.2 Akcelerometr.....	18
2.2.1 Piezoelektrické akcelerometry	19
2.2.2 Piezorezistivní akcelerometry	19
2.2.3 Akcelerometry s proměnnou kapacitou.....	20
2.2.4 MEMS akcelerometry	21
2.3 Magnetometr	21
3 TEORETICKÉ ŘEŠENÍ.....	23
3.1 Požadavky kladené na automatické vypínání směrových světel.....	23
3.2 Rozpoznání ukončení odbočovacího manévru.....	24
3.3 Rozpoznání stání motocyklu	25
3.3.1 Výpočet rychlosti ze zrychlení.....	26
3.3.2 Rozpoznání stání pomocí vibrací	27
4 VÝBĚR HW KOMPONENT	28
4.1 Mikrokontrolér	28
4.2 Pohybový snímač	28
4.2.1 Kalibrace jednotlivých snímačů v BNO055.....	30
4.3 Rozhraní pro ukládání dat	32
5 NÁVRH A VÝROBA ROZHRANÍ PRO PŘIPOJENÍ ZAŘÍZENÍ NA MOTOCYKL	34
5.1 Rozbor jednotlivých částí rozhraní	34
5.1.1 Napájecí část	34
5.1.2 Část pro signalizaci provozních stavů.....	36
5.1.3 Část pro ovládání směrových světel.....	36
5.1.4 Část pro ovládání logování dat.....	40

5.1.5	Část pro připojení přepínače ukazatele směru.....	40
5.1.6	Napojení rozhraní k Arduinu a ostatním shieldům	41
5.2	Vlastní návrh a výroba DPS.....	41
6	UMÍSTĚNÍ ZAŘÍZENÍ NA MOTOCYKLU.....	42
6.1	Orientace 9 axes motion shieldu vzhledem k motocyklu.....	44
6.1.1	Popis os jednotlivých snímačů.....	44
6.1.2	Vysvětlení Eulerových úhlů.....	46
7	POPIS FUNKCE FIRMWARE.....	51
7.1	Identifikace ukončení odbočovacího manévru.....	54
7.1.1	Filtrace dat.....	55
7.1.2	Popis algoritmu pro rozpoznání ukončení odbočovacího manévru	57
7.1.3	Vývojový diagram.....	63
7.1.4	Seznam konstant pro nastavení algoritmů detekce ukončení odbočení	66
7.2	Rozpoznání stání motocyklu pomocí dopočítané rychlosti.....	67
7.3	Rozpoznání stání motocyklu pomocí měření vibrací.....	68
7.3.1	Vývojový diagram.....	71
7.3.2	Seznam konstant pro nastavení algoritmu detekce stání	73
7.4	Struktura Arduino projektu	73
8	PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ FUNKCE.....	74
8.1	Ověření funkce algoritmu vyhodnocení stání motocyklu	74
8.2	Ověření funkce algoritmu rozpoznání ukončení odbočovacího manévru.....	76
	ZÁVĚR.....	79
	POUŽITÁ LITERATURA.....	80
	SEZNAM TABULEK.....	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	84
	SEZNAM GRAFŮ.....	86
	SEZNAM PŘÍLOH.....	87

ÚVOD

Již po mnoho let má většina silničních vozidel, především osobních automobilů, automatické vypínání směrových světel, avšak u motocyklů tomu tak často nebývá. Ale proč tomu tak je? Důvodem je poměrně složité určení okamžiku ukončení odbočovacího manévru zapříčiněné rozdílným uspořádáním řízení oproti automobilům. Při projíždění motocyklu zatáčkou nehraje roli pouze natočení řídítek ale i náklon motocyklu. Projetí zatáčky může být uskutečněno i s velmi malým, popřípadě žádným natočením řídítek, pouze s pomocí náklonu motocyklu, kterého je docíleno správným přenesením váhy jezdce. Z uvedeného je patrné, že zde úplně není možné uplatnit podobný systém jako u automobilů, kde je vypnutí směrových světel zajištěno návratem volantu po projetí zatáčkou, kdy řidič srovnává kola do přímého směru. Na tento systém není na motorce ani místo. Z těchto důvodů většina dnešních motocyklů žádným systémem automatického vypnutí směrových světel nedisponuje, popřípadě je řešen jednoduše pomocí časovače, který po uplynutí určitého času automaticky vypne příslušná směrová světla. U některých motocyklů BMW je systém řešen kombinací časovače a měření ujeté vzdálenosti, kdy k vypnutí směrových světel dojde buď vypršením časovače nebo ujetím určité vzdálenosti.

Avšak u některých novějších motocyklů se můžeme setkat s takovým systémem, který skutečně rozezná ukončení odbočovacího manévru a vypne směrová světla. Příkladem může být motocykl Honda CRF 1000 Africa Twin ročník 2018, který disponuje systémem založeným na snímání a porovnávání rychlostí předního a zadního kola. Z těchto informací je systém schopný vyhodnotit ukončení odbočovacího manévru. Touto cestou se ale prototyp zařízení, kterým se zabývá tato práce, nevydá.

Dalším řešením, které je dnes dostupné, je produkt firmy Movalyse d.o.o s názvem STS (Smart Turn System), jehož princip vyhodnocení ukončení odbočovacího manévru spočívá ve snímání a následném zpracování vibrací, zrychlení, sklonu a natočení motocyklu. A právě cílem této práce je vyvinout podobný systém, který bude též založen na snímání aktuální polohy motocyklu pomocí gyroskopu, akcelerometru a magnetometru.

První část práce se zabývá bližším popisem současné situace, teoretickým způsobem vyhodnocení ukončení odbočovacího manévru za pomoci výše zmíněných senzorů a popisem principu funkcí jednotlivých senzorů. Druhá část práce je zaměřena na vlastní realizaci prototypu, návrh softwaru a hardwaru a testování.

1 ROZBOR SOUČASNÉ SITUACE

Z průzkumu trhu, který jsem provedl, vyplývá, že jsou zde v zásadě čtyři možnosti řešení systému automatického vypínání směrových světel. A to: časovače (časová relé), produkt STS a systémy automatického vypínání směrových světel u motocyklů Honda a BMW.

1.1 Časová relé

Tyto produkty nereagují na skutečné ukončení odbočovacího manévru, ale obsahují jednoduchý časovač, který po uplynutí daného času vypne směrová světla. Lze se setkat se dvěma variantami, a to s pevně daným časem nebo proměnlivým. U produktů s pevně daným časem nemůžeme během jízdy měnit délku sepnutí ukazatele směru, oproti tomu u produktů s proměnlivým časem máme určitou omezenou volbu.

- **Produkty s pevně daným časem mají dvě varianty:**

- **Programovatelné** – u nich lze nastavit dobu sepnutí směrových světel. Příkladem je produkt SignalMinder od firmy Kisan Electronics, u kterého můžeme zvolit časy 10, 20 nebo 30 s. Podle typu produktu se nastavení provádí buď pomocí DIP přepínače (produkty SM – 1 až 4) nebo pomocí přepínače ukazatele směru (produkty SM – 5 a 6), kdy pro nastavení se přepínač podrží v levé, pravé nebo středové poloze a provede se nastartování motocyklu, tím se nastaví daný čas. Pro okamžité vypnutí směrového světla stačí opětovně sepnout přepínač na příslušnou stranu. [1] [2]

Produkt SignalMinder má i další funkce:

- funkce pro změnu pruhu, kdy při podržení voliče dojde k pěti zablikání,
- brzdová funkce, kdy při brždění dojde k chvilkovému (2 s) sepnutí obou směrových světel (lze vypnout),
- funkce, která umožňuje nepřetržité blikání při čekání na křižovatce, po uvolnění brzdy dojde k opětovnému spuštění časovače, atd.

Tento produkt nahrazuje přerušovač. V některých případech je nutný zásah do přepínače ukazatele směru – musí se upravit tak, aby se při každém sepnutí jezdec přepínače automaticky vrátil do středové polohy. To se zajišťuje pěnoučkou nebo pružinkou. Cena se pohybuje kolem 2 500 Kč. [1] [2]

- **Neprogramovatelné** – doba sepnutí směrových světel je pevně daná výrobcem, není možnost volby. Příkladem je produkt ATS-03-B firmy Badlands pro motorky Harley-Davidson, který automaticky vypne směrová světla po uplynutí 11 s. Při opětovném stlačení tlačítka přepínače ukazatele směru se restartuje 11 s časovač. Cena kolem 1 500 Kč. [3]
- **Produkty s proměnlivým časem** – u těchto produktů je možné délkou sepnutí přepínače ukazatele směru ovlivňovat čas blikání směrových světel. Příkladem je produkt Self-Canceling Turn Signal Module 01501 firmy Signal Dynamics Corporation, který má tyto módy:
 - Mód 1: přidržení odbočovacího tlačítka na 1 s zapne směrová světla na 7 s.
 - Mód 2: přidržení tlačítka na 2 s zapne směrová světla na 20 s.
 - Mód 3: přidržení tlačítka na 4 s zapne směrová světla na 75 s.
 - Mód 4: Výstražný mód – stisknutí obou tlačítek najednou po dobu 1 s zapne obě sady směrových světel (doleva i doprava), jako výstrahu. Světla blikají, dokud nedojde k vypnutí opětovným stisknutím obou tlačítek. [4]

Mód 1 až 3 lze zrušit (zastavit) opětovným stisknutím příslušného směrového tlačítka. V některých případech je opět nutný zásah do přepínače ukazatele směru. Produkt nahrazuje dosavadní přerušovač. Cena přibližně 1 900 Kč. [4]

1.2 Produkt STS (Smart Turn System)

Na rozdíl od výše zmíněných časových relé tento systém skutečně detekuje ukončení odbočovacího manévru a vypne příslušná směrová světla.

Tento produkt mi velice pomohl při vývoji mého prototypu. Inspiroval jsem se jím při návrhu rozhraní a jeho připojení na motocykl a funkcemi, kterými by měl systém disponovat. Proto provedu jeho podrobnější rozbor.

Zařízení vyvinula slovinská firma Movalyse d.o.o, jeho vývojem se zabývala několik let. Systém měří sklon, natočení, zrychlení a vibrace motocyklu. Měření provádí pomocí gyroskopu a akcelerometru. Každou jednu sekundu zařízení odebere 300 datových vzorků ze všech snímačů a z těchto dat inteligentní algoritmus vyhodnotí ukončení odbočovacího manévru a dá povel k vypnutí příslušného směrového světla. [5]

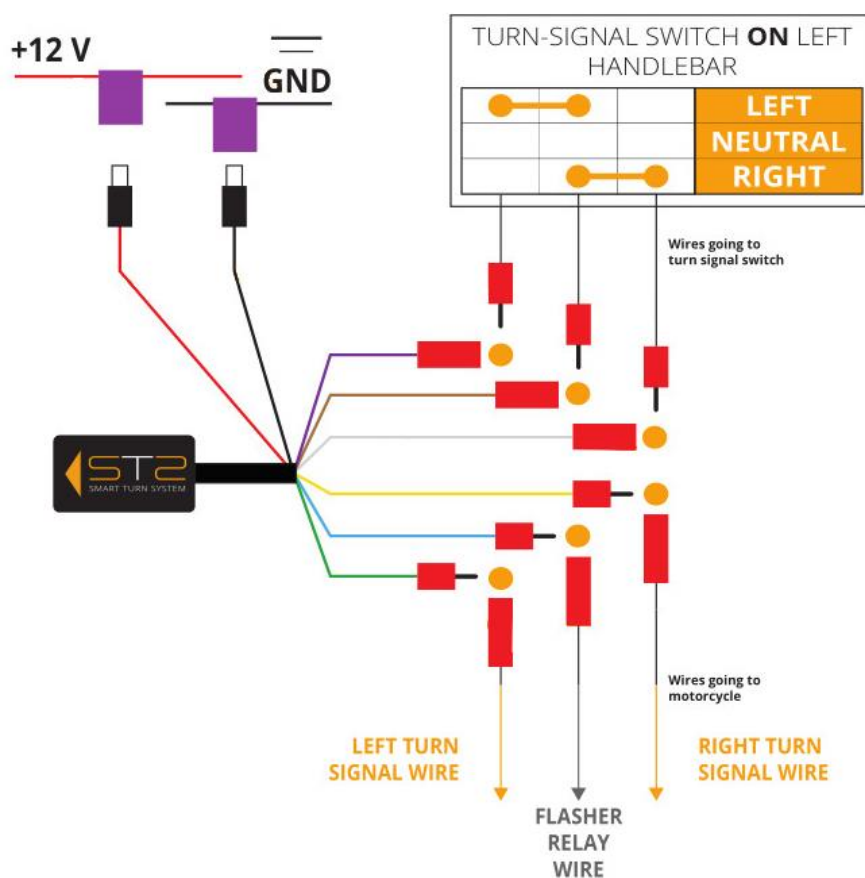


Obrázek 1 Modul STS [6]

Klíčové vlastnosti:

- Napájení 12 V DC.
- Spotřeba 250 mW.
- Dokáže detekovat:
 - odbočení vlevo nebo vpravo,
 - přejíždění z pruhu do pruhu a
 - kruhový objezd.
- Při stání, například na křižovatce, nevypne směrová světla.
- Jestliže nedojde k detekci odbočení, modul vypne směrová světla po 15 s jízdy.
- Opětovným (druhým) zmáčknutím přepínače ukazatele směru dojde k vypnutí směrových světel.
- Možno použít u velkého množství značek motocyklů.
- Cena kolem 2 500 Kč.

[5] [7]



Obrázek 2 Napojení STS na motocykl [7]

Pro funkci zařízení je nutné jeho správné umístění na motorce. Modul musí být pevně připevněn stahovací páskou nebo oboustrannou lepící páskou na co nejvíce horizontální, plochou a nepohyblivou část motocyklu. Logo na modulu musí směřovat vzhůru a šipka musí ukazovat ve směru jízdy. U většiny motocyklů je opět nutný zásah do přepínače ukazatele směru. [7]

Tento výrobek má velmi kladné uživatelské hodnocení. Z dohledaných videí s testováním se jeví STS velice spolehlivé při určení místa ukončení odbočovacího manévru. Při porovnání s výše zmíněnými produkty je z mého pohledu STS nejlepší volba. Jeho cena není příliš vysoká na to, co dokáže, dokonce je srovnatelná s cenou programovatelného časového relé, které je jen obyčejný časovač s přídatnými funkcemi.

1.3 Systém založený na snímání rychlosti předního a zadního kola

Tento systém je založen na porovnání rychlosti předního a zadního kola. Na základě těchto informací systém rozhodne, zda je možné směrová světla již vypnout či nikoliv. Rychlost kol je získávána z ABS modulu. Tímto systémem jsou vybaveny některé sériově vyráběné motocykly Honda, například Honda CRF 1000 Africa Twin (ročník 2018) nebo Honda VFR 800 (ročník 2015). Nejedná se o produkt, který by byl dostupný i pro jiné motocykly, je pevně vázaný na daný typ. [8]

1.4 Systém u motocyklů BMW

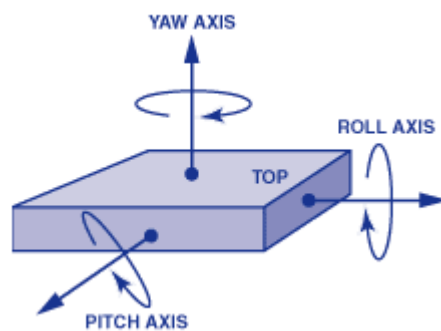
Tento systém je založen na kombinaci časovače a ujeté vzdálenosti. Směrová světla se vypnou buď po přibližně 10 s nebo po ujetí vzdálenosti zhruba 300 m. Tento systém nedetekuje skutečné ukončení odbočení. Tímto systémem například disponuje motocykl BMW R1200 GS. [9]

2 PRINCIPY FUNKCÍ INERCIÁLNÍCH SNÍMAČŮ

Vyvinuté zařízení používá gyroskop, akcelerometr a magnetometr pro vyhodnocení ukončení odbočovacího manévru, a proto je zde popsána funkce těchto inerciálních snímačů.

2.1 Gyroskop

Slouží pro měření a určování natočení daného předmětu, ke kterému je gyroskop připevněn. Měří úhlovou rychlost ve $^{\circ}/s$ vzhledem k jedné ze tří os X, Y, Z, někdy označované jako svislá (kolmá) osa (yaw axis), příčná osa (pitch axis) a podélná osa (roll axis). Dříve bylo možné použít pouze mechanické, popřípadě optické provedení gyroskopů. Dnes již jsou gyroskopy v provedení klasických integrovaných součástek (MEMS), obsahující kromě vlastního snímače i vyhodnocovací obvody a logiky. Výstup je buď analogový nebo digitální. Tyto MEMS gyroskopy, pracující na principu **Coriolisovy síly**. [10]



Obrázek 3 Osy gyroskopu [10]

MEMS technologie

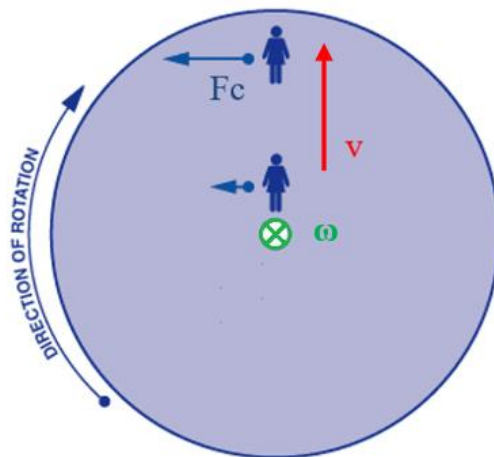
Jedná se o výrobní technologii integrovaných zařízení, kombinující mechanické a elektrické součásti, odtud zkratka MEMS – mikroelektromechanické systémy (Micro-electromechanical systems). Výsledné zařízení je složeno z mikrokomponentů, o velikosti 0,001 mm až 0,1 mm. Tyto komponenty jsou vyrobeny ze silikonů, polymerů, kovů a keramik. Zařízení obvykle obsahuje i vlastním mikrokontrolér. [10], [11]

Tato technologie má uplatnění nejenom u gyroskopů, tedy u měření úhlové rychlosti, ale i u akcelerometrů měřících zrychlení, a u magnetometrů. Dále se používá i pro výrobu jiných zařízení (například v lékařství pro měření krevního tlaku).

Coriolisova síla

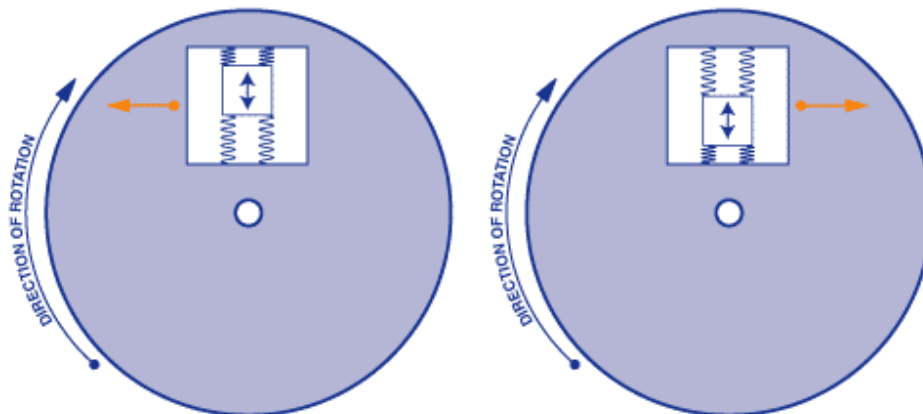
Pro pochopení principu funkce gyroskopů je nutné si alespoň stručně připomenout, co to je tzv. Coriolisova síla. „Coriolisova síla je tzv. **virtuální síla**, která působí na libovolný hmotný předmět či objekt, který se pohybuje rychlostí \mathbf{v} v soustavě rotující kolem osy rotace úhlovou rychlostí $\boldsymbol{\omega}$ ($F_c = -2 * m * \mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$, kde \times je vektorový součet).“ [10]

Nejlépe lze tuto sílu pochopit z následujícího obrázku, na kterém se postava pohybuje po rotujícím disku od středu směrem k okraji, a tedy na ní působí Coriolisova síla. Stejná síla působí i na všechny hmotné objekty na Zemi, protože i ona se otáčí kolem své osy. [10]



Obrázek 4 Příklad působení Coriolisovy síly (vektor $\boldsymbol{\omega}$ směřuje do obrázku) [10]

„Stejného účinku se pak využívá i v mechanických gyroskopech. Zde při pohybu objektu, upevněného na pružinách uvnitř rámu, směrem ven (k okraji rotujícího kotouče) na něj působí Coriolisova síla směrem doleva, při opačném směru pohybu objektu pak doprava (viz obrázek níže). Protože velikost a směr této síly je úměrný i rychlosti a směru otáčení, lze tento systém snadno využít pro měření velikosti úhlové rychlosti., [10]

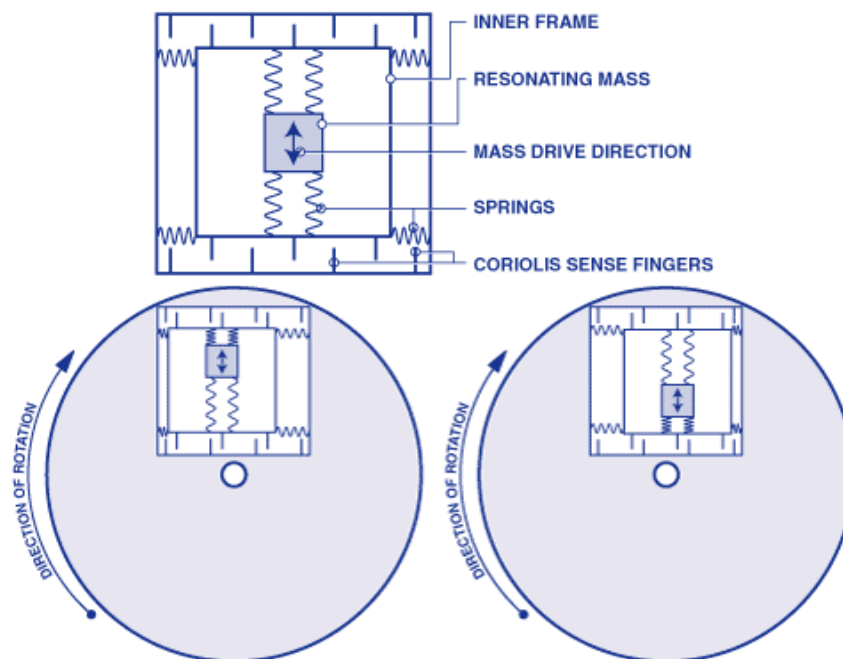


Obrázek 5 Působení Coriolisovy síly na hmotný objekt mechanického gyroskopu (vyznačeno oranžovou šipkou) [10]

Princip funkce MEMS gyroskopů

Princip funkce spočívá v periodicky se pohybujícím objektu dané hmotnosti umístěného pomocí pružin v rámu. Směr pohybu objektu je vždy kolmý ke směru otáčení. Na tento pohybující se objekt působí Coriolisova síla, která je úměrná úhlové rychlosti otáčení. Tato síla způsobí boční posun vnitřního rámu (inner frame), který zapříčiní posuv elektrod vzduchového kondenzátoru (coriolis sense fingers), a tedy změnu jeho kapacity. Výsledná kapacita je úměrná úhlové rychlosti. [10]

Různí výrobci MEMS gyroskopů sice používají odlišné struktury, ale základní princip je vždy podobný. [10]

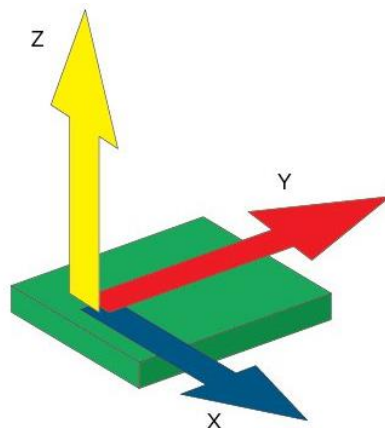


Obrázek 6 Zjednodušený princip funkce MEMS gyroskopů [10]

2.2 Akcelerometr

Slouží pro měření statického nebo dynamického zrychlení v m/s^2 , vibrací, odstředivých sil, popřípadě k určování pozice tělesa. [12]

Senzory měřící dynamické zrychlení (akcelerace/decelerace) neměří přímo změnu rychlosti v čase, ale sílu, která díky změně rychlosti vzniká. Při měření statického zrychlení, tedy zrychlení daného gravitací Země, opět měříme vzniklou sílu působením této gravitace. Vychází se z Newtonova 2. pohybového zákona – $F = m * a$, kde m je hmotnost tělesa a a je zrychlení. Při známé hmotnosti a změřené síle lze dopočítat výsledné zrychlení. [13]



Obrázek 7 Osy akcelerometru [14]

Podle technologie výroby lze akcelerometry dělit na tyto základní typy:

- **piezoelektrické akcelerometry (PE)** – „využívají piezoelektrický krystal (přírodní nebo keramiku), který generuje náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí na každý objekt“ [12]
- **piezorezistivní akcelerometry (PR)** – „využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu“ [12]
- **akcelerometry s proměnnou kapacitou (VC)** – „využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně kapacity“ [12]

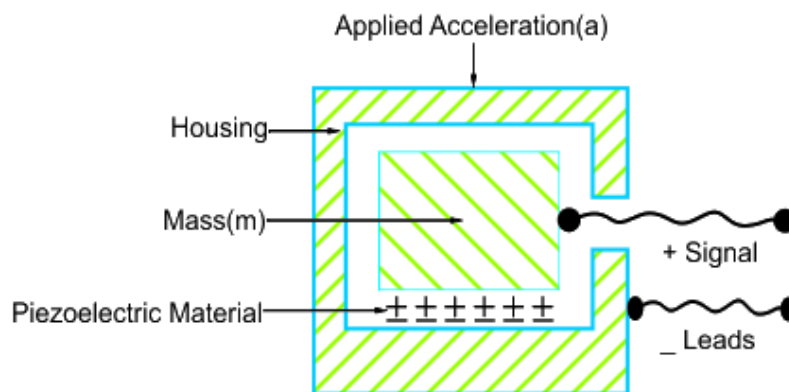
Existují i další typy akcelerometrů, jako jsou například tepelné akcelerometry, využívající rozdílného přenosu tepla v plynech při klidném nebo pohybujícím se topném tělísku, akcelerometry s proměnnou indukčností atd. [15]

2.2.1 Piezoelektrické akcelerometry

„Využívají piezoelektrický materiál, který generuje elektrický náboj úměrný mechanickému namáhání vzniklému působící akcelerací.“ [12] Měření náboje probíhá buď pomocí externí elektroniky nebo častěji se náboj vnitřní elektronikou konvertuje na napěťový výstup. [12]

Piezoelektrický akcelerometr se skládá ze dvou základních částí, a to z **piezoelektrického materiálu** (vlastní snímač) a **seismické hmoty** (seismic mass). Jak už bylo řečeno, generovaný náboj je úměrný síle, není tedy problém z již uvedeného Newtonova 2. pohybového zákona vypočítat výsledné zrychlení. [12]

Výhodami jsou jednoduchá konstrukce a jednoduché vyhodnocení, široký dynamický rozsah, spolehlivost, robustní konstrukce a malá citlivost k rušivým vlivům. Nevýhodami jsou nemožnost měření konstantního zrychlení a velká teplotní závislost piezoelektrického materiálu (nutné kompenzovat). [12], [16]

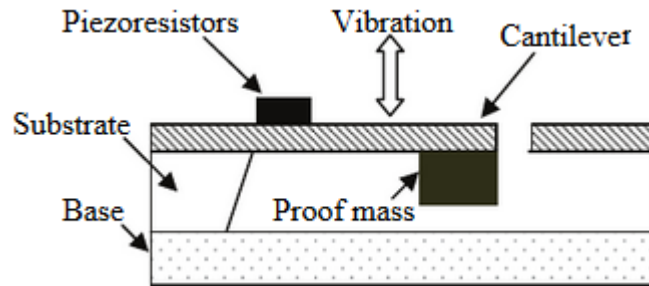


Obrázek 8 Blokové schéma jednoduchého piezoelektrického akcelerometru [17]

2.2.2 Piezorezistivní akcelerometry

„Využívají změny odporu piezorezistivního materiálu při mechanickém namáhání vzniklém působícím zrychlením. Měření odporu probíhá prostřednictvím základního nebo polovičního Wheatsonova můstku.“ [18] Výpočet výsledného zrychlení je obdobný předešlému.

Výhodou oproti piezoelektrickým akcelerometrům je možnost měření konstantního zrychlení. Dalšími výhodami jsou jednoduchá konstrukce, malá náročnost na prostor a jednoduchý vyhodnocovací obvod. Nevýhodou je opět velká závislost výstupu na teplotě. [18], [16]

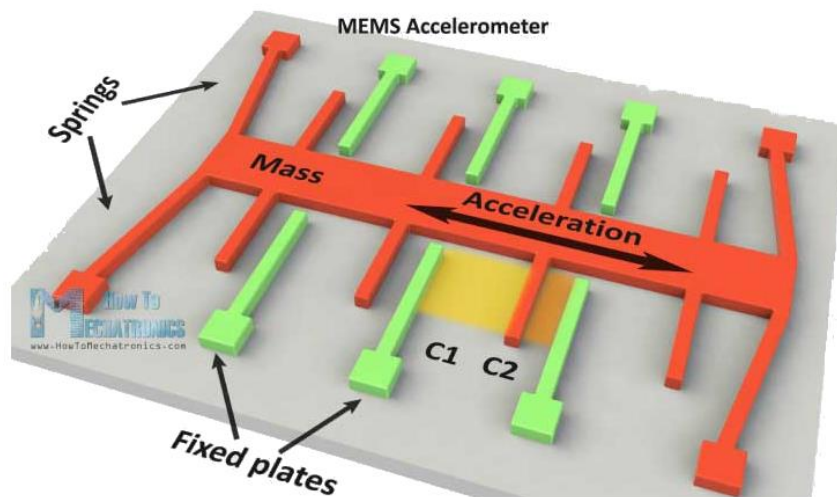


Obrázek 9 Blokové schéma jednoduchého piezorezistivního akcelerometru [19]

2.2.3 Akcelerometry s proměnnou kapacitou

Jsou založeny na snímání změny elektrické kapacity vlivem změny zrychlení. Princip MEMS akcelerometru je zobrazen na obrázku níže, kde je „hmota“ (mass) připevněna k „pružinám“ (springs), které zaručují pohyb pouze v jednom směru. Při aplikaci zrychlení se „hmota“ dá do pohybu a tím dojde ke změně kapacity mezi nepohyblivými deskami (fixed plates) a pohybující se hmotou. Tato změna kapacity odpovídá velikosti působící akcelerace. [11]

Výhodami jsou přesnost a velká citlivost. Nevýhodami jsou velká teplotní a časová odchylka, a vznik elektrostatické síly, která zapříčiňuje chybu měření. [16]



Obrázek 10 Zjednodušený princip funkce kapacitního akcelerometru [11]

2.2.4 MEMS akcelerometry

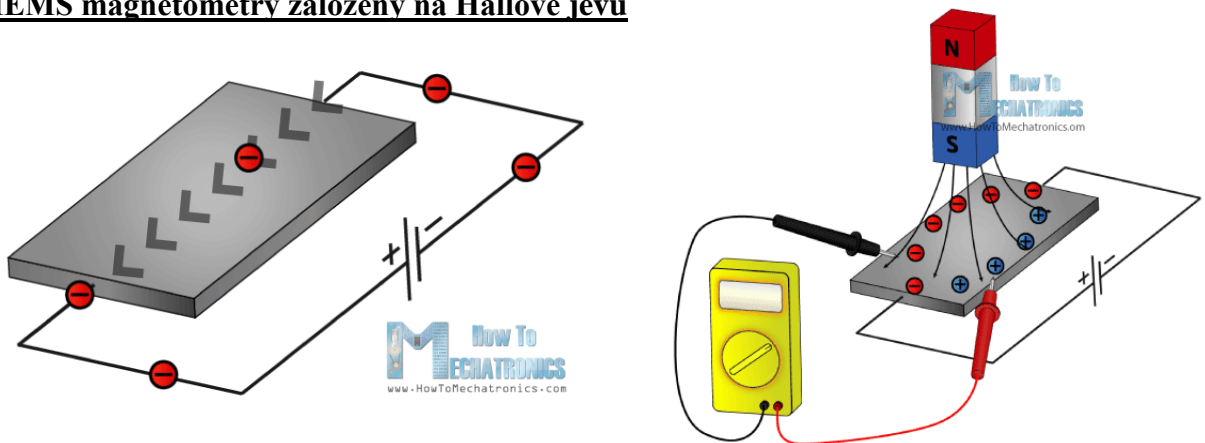
Jak už bylo zmíněno u kapitoly 2.1 Gyroskop, i akcelerometry se vyrábějí technologií MEMS. Touto technologií se nejčastěji vyrábí akcelerometry s proměnou kapacitou, dále se lze setkat i s piezorezistivními akcelerometry atd.

2.3 Magnetometr

Magnetometr je zařízení měřící magnetické pole (nejčastěji magnetickou indukci). Jejich uplatnění je například ve stavebnictví (lokalizují předměty z feromagnetických materiálů, například vodovodní ventily), v mobilních telefonech, kde plní funkci kompasu atd. [20]

Téměř většina MEMS magnetometrů dostupných na trhu využívá pro měření magnetického pole Země Hallův jev, zbylé produkty většinou využívají magnetorezistory. Existuje nespočet dalších způsobů měření magnetické pole (magnetickou intenzitu a magnetickou indukci), ty však už většinou nejsou vyráběny MEMS technologií. Já zjednodušeně vysvětlím princip oněch dvou nejčastěji používaných principů u MEMS magnetometrů. [11]

MEMS magnetometry založeny na Hallově jevu



Obrázek 11 Princip měření magnetického pole pomocí Hallova jevu [11]

Máme-li polovodičovou desku, kterou protéká konstantní proud, tak se elektrony přesouvají přímo z jedné strany na druhou, jak je zobrazeno na levém obrázku výše. Při aplikování magnetického pole do blízkosti desky se naruší přímý tok elektronů, a elektrony se odkloní na jednu stranu desky, kde se začnou hromadit. Na druhé straně se naopak začne hromadit kladný náboj. To znamená, že mezi stranami, kde se nahromadily náboje, vzniklo takzvané Hallovo napětí, které závisí na síle magnetického pole a jeho směru. [11]

Nejčastěji používanými materiály v Halloových sondách jsou polovodiče InAs, InSb, GaAs a Si. Nevýhodou je teplotní závislost jejich odezvy. [21]

MEMS magnetometry využívající magnetorezistory

Využívají magnetorezistorů, které jsou citlivé na magnetické pole. Při jejich vystavení magnetickému poli dochází ke změně jejich odporu. „Jakmile známe, jak přesně se chová odpor materiálu pod vlivem magnetického pole, potom měřením velikosti odporu se lehce určí velikost vnějšího magnetického pole. Obecně platí, že odpor materiálu se nelineárně zvětšuje s aplikovaným magnetickým polem a že efekt magnetického pole u magnetorezistoru je větší, když je pole aplikováno kolmo na směr procházejícího proudu.“ [21]

3 TEORETICKÉ ŘEŠENÍ

Jako metodu k vyhodnocení ukončení odbočovacího manévru jsem zvolil snímání polohy pomocí gyroskopu, akcelerometru a magnetometru.

3.1 Požadavky kladené na automatické vypínání směrových světel

Před tím, než se pustíme do samotného rozboru způsobu funkce automatického vypínání směrových světel, je nutné si zodpovědět důležitou otázku, co by takový systém měl umět. Výsledný prototyp by měl s co největší pravděpodobností dokázat určit okamžik, ve kterém došlo k ukončení odbočovacího manévru a vypnout příslušná směrová světla. Za žádných okolností by neměla nastat situace, při které by mohlo dojít k ohrožení jezdce nebo ostatních účastníků silničního provozu, chybným vyhodnocením situace.

Rozeberme si situace, které mohou nastat při odbočování. Nejjednodušší situací je, že motorkář, blížící se k odbočení, zapne směrová světla do příslušného směru a okamžitě, bez zastavení, projede daným odbočením. Systém by měl detekovat ukončení odbočovacího manévru a vypnout příslušná směrová světla.

Druhá situace, která může nastat, je, že motorkář přijíždí k odbočení, zapíná směrová světla, a následně je před vykonáním odbočení nějakým vlivem donucen zastavit, například kvůli červené na světelné křižovatce. Systém musí rozeznat, že se motorkář nepohybuje a nesmí vypnout směrová světla. Při opětovném rozjetí musí po dokončení odbočovacího manévru dojít k automatickému vypnutí příslušných směrových světel.

Další možností, která může nastat je, že motorkář dá například směrovku doleva, ale nakonec neodbočí. Při této situaci je nutné zajistit vypnutí směrových světel. Toho je možné docílit tak, že při neidentifikování odbočení do určité doby dojde k automatickému vypnutí daných směrových světel.

Situací, při které by motorkář zapnul směrová světla například doleva, ale výsledně zahrnul doprava, se nebudeme zabývat, jelikož se jedná o podstatnou chybu motorkáře, nicméně po uplynutí určité doby by zafungovala „časová pojistka“, jako tomu bylo u předešlé situace, a došlo by k automatickému vypnutí směrových světel.

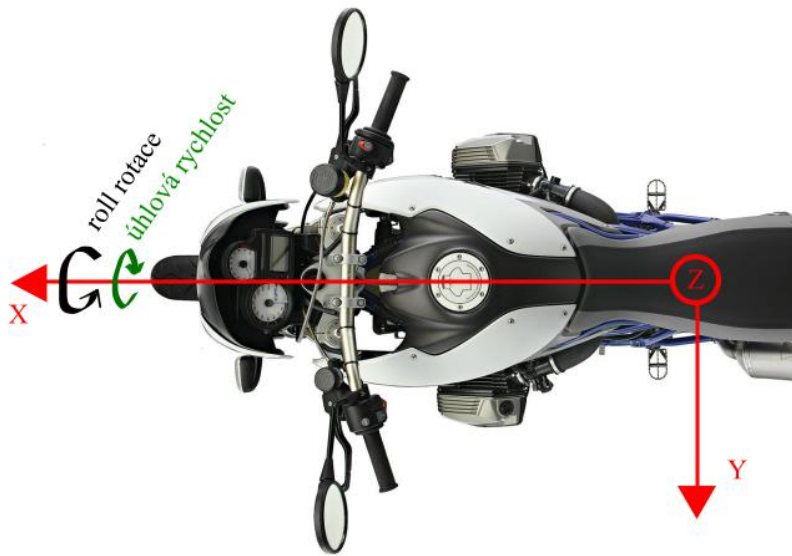
Systém by měl být též schopný detekovat předjíždění/změnu pruhu. Po jeho ukončení musí dojít k automatickému vypnutí směrových světel. Dalšími funkcemi, kterými by měl výsledný prototyp rozhodně disponovat, je možnost vypnutí směrových světel a možnost změny směru odbočení samotným jezdce. Toto jsou základní požadavky, kladené na mnou

navrhovaný prototyp. Bližší popis toho, jak reálně docílíme těchto požadavků, rozeberu později.

Z textu výše je patrné, že na budoucí prototyp jsou kladeny dva základní funkční požadavky:

- detekce ukončení odbočovacího manévru,
- identifikování stání.

3.2 Rozpoznání ukončení odbočovacího manévru



Obrázek 12 Souřadný systém motocyklu (v mém případě) [22]

Legenda k obrázku:

- Šipka u roll rotace a úhlové rychlosti značí kladný směr.
- Úhel roll je ve $^{\circ}$.
- Úhlová rychlost je ve $^{\circ}/s$.
- Osa Z směřuje vzhůru.

V našem případě byl k vyhodnocení odbočovacího manévru a stání zvolen pohybový senzor, který obsahuje gyroskop, akcelerometr a magnetometr a též poskytuje Eulerovy úhly. Následující text nastiňuje teoretickou možnost řešení rozpoznání ukončení odbočovacího manévru právě pomocí tohoto pohybového senzoru.

Při vykonávání odbočení se motorkář i motorka vždy alespoň minimálně nahýbá směrem do zatáčky a po projetí se ve většině případů vrací do výchozí pozice. Tohoto faktu je

teoreticky možné využít pro identifikování ukončení odbočovacího manévru, kdy při vjezdu do odbočení se motocykl začíná naklánět. Tento náklon by se dal detekovat úhlovou rychlostí kolem osy X, kterou poskytuje gyroskop. Náklon lze též detekovat pomocí Eulerových úhlů (vysvětlení Eulerových úhlů je uvedeno v kapitole 6.1.2 Vysvětlení Eulerových úhlů), a to z úhlu roll neboli náklonu kolem osy X, která je ve směru jízdy motocyklu. Při ukončování odbočení se motocykl vrací do výchozí kolmé polohy, tento návrat lze též detekovat pomocí úhlové rychlosti, která bude v protifázi oproti úhlové rychlosti při náklonu do zatáčky. Jakmile se motorka plně vyrovná, tak by úhlová rychlost měla být v okolí nuly. K identifikaci návratu do výchozí polohy by šlo využít i úhlu roll, který by se z maximální hodnoty, která reprezentuje maximální náklon v odbočení, vracel k nulové hodnotě. Při plném vyrovnání motocyklu bude tento úhel v blízkosti nuly.

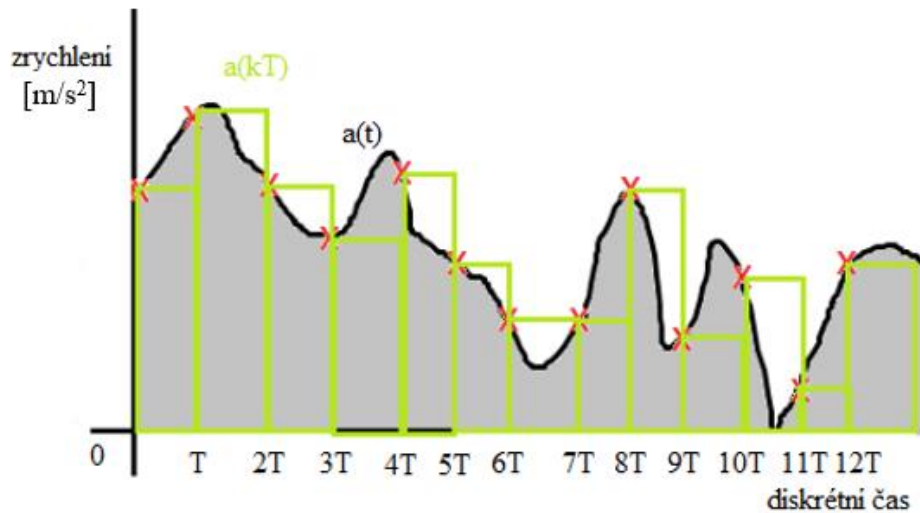
Toto je možný způsob, jak identifikovat ukončení odbočovacího manévru, ke kterému jsem došel. K vyhodnocení lze použít určitě i jiné způsoby, avšak jak už jsem zmínil, mě napadl tento.

3.3 Rozpoznání stání motocyklu

První možností, která by připadala v úvahu, by bylo použití dat z akcelerometru, tedy zrychlení pro výpočet rychlosti jízdy motocyklu, pomocí které bychom mohli určit zastavení. Jelikož vyčítaná data v ose X z akcelerometru nejsou pouze zrychlením ve směru pohybu, tak dopočítávaná rychlost není příliš přesná (viz 7.2 Rozpoznání stání motocyklu pomocí dopočítané rychlosti), proto byly hledány i jiné způsoby vyhodnocení stání. Při hledání dalších možností, se vynořil zajímavý způsob pro rozpoznání pohybu a stání, a tím je měření vibrací pomocí akcelerometru v ose Z, kdy při jízdě je velikost vibrací větší, naopak při stání jsou vibrace mnohem menší, je tedy poměrně jednoduše možné určit, kdy motocykl jede a kdy stojí, a není potřeba dopočítávat rychlost. Pojdme se blíže podívat na tyto dva způsoby.

3.3.1 Výpočet rychlosti ze zrychlení

Pro získání rychlosti ze zrychlení je nutné provést numerickou integraci. Tato metoda spočívá v tom, že sčítáme jednotlivé plochy vzorků zrychlení, a tím přibližně získáme plochu pod křivkou, tedy rychlost. Nejlépe je to vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 13 Grafické zobrazení numerické integrace [23]

Výslednou rychlost získáme tak, že provedeme součet hodnot zrychlení (v obrázku $a(kT)$), které jsou vynásobené časem trvání vzorku (periodou vzorkování T), viz vztah (1). Počáteční hodnotu rychlosti $v(0)$ není možné určit, proto se předpokládá, že pohyb začal z nulové rychlosti.

$$v(k) = T * \sum_{i=0}^{i=k} a(i) \quad (1)$$

Kde:

v je rychlost v m/s

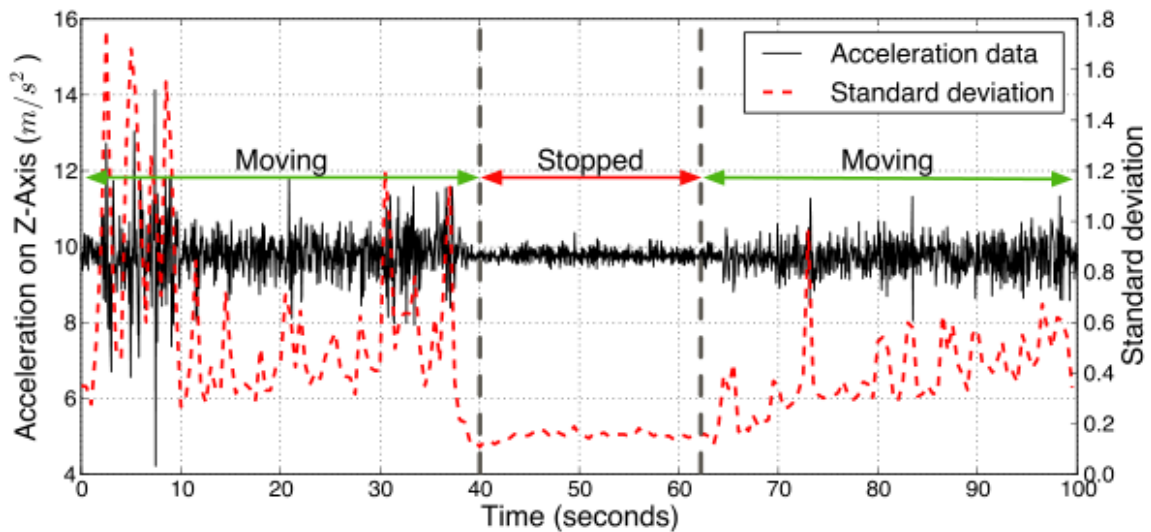
k je číslo vzorku

a je zrychlení v m/s^2

T je perioda vzorkování v sekundách

3.3.2 Rozpoznání stání pomocí vibrací

Jak už bylo zmíněno, tento způsob rozpoznání pohybu/stání je založen na měření vibrací v ose Z pomocí akcelerometru. Při jízdě jsou vibrace mnohem větší než při stání. Vyhodnocení se provádí pomocí směrodatné odchyly (vztah č. 2), která vypovídá o tom, nakolik se od sebe navzájem typicky liší jednotlivé prvky. Jeli malá, jsou si prvky většinou podobné, naopak velká signalizuje velké odlišnosti. Následující obrázek zobrazuje vibrace (akcelerace v ose Z – černý průběh) při stání a jízdě a výslednou směrodatnou odchylku (přerušovaný červený průběh). Uvedený graf není z hodnot naměřených na motocyklu, ale na automobilu, a je vypůjčen z vědecké zprávy (zdroj [24]), ze které jsem čerpal tento způsob vyhodnocení stání. Když vozidlo stojí, je rozkmit vibrací malý (vibrace jsou malé), a tedy směrodatná odchylnka je blízko nuly (např. 0,2), protože si jsou hodnoty akcelerací většinou podobné. Naopak při jízdě je rozkmit vibrací velký (jsou velké vibrace), a je tedy i velká směrodatná odchylnka (př. 0,5). Z toho plyne, že když je směrodatná odchylnka blízko nuly tak vozidlo stojí, při razantně větší odchylce je vozidlo v pohybu. [24], [25]



Obrázek 14 Rozpoznání stání/pohybu pomocí vibrací [24]

Obecný vzorec pro výpočet směrodatné odchyly:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Kde:

- σ je směrodatná odchylnka
- N je počet vzorků
- x_k je hodnota k-tého vzorku
- \bar{x} je průměrná hodnota

4 VÝBĚR HW KOMPONENT

4.1 Mikrokontrolér

Zprvu bylo použito Arduino UNO, ale to se při prvotních testech projevilo jako nedostačující, kvůli malé paměti RAM, proto bylo nahrazeno Arduinem MEGA 2560. Toto Arduino má větší paměť RAM.

Klíčové vlastnosti Arduina MEGA 2560:

- založeno na mikrokontroléru ATmega2560
- 54 digitálních a 16 analogových vstupů/výstupů
- 16 MHz krystalový oscilátor
- 256 kB Flash paměti
- 8 kB SRAM paměti
- 4 kB EEPROM paměti
- 16 bitová datová sběrnice

4.2 Pohybový snímač

Pro měření aktuální polohy motocyklu byl zvolen 9 axes motion shield od firmy Arduino. Shield je postaven na pohybovém čipu BNO055 od firmy Bosch Sensortec. Tento integrovaný obvod obsahuje:

- **3osý 14bitový akcelerometr** (rozsahy ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g), [26]
- **3osý 16bitový gyroskop** (rozsah ± 125 °/s až $\pm 2\ 000$ °/s), [26]
- **3osý senzor magnetického pole** (rozsah $\pm 1\ 3000$ μ T v X,Y ose a $\pm 2\ 500$ μ T v Z ose, rozlišení cca. 0,3 μ T), [26]
- **32 bitový mikro kontrolér.** [26]



Obrázek 15 9 axes motion shield [27]

Poskytuje údaje o zrychlení, úhlové rychlosti a intenzitě magnetického pole, a to ve třech osách. Kromě těchto údajů též poskytuje Kvaternion, Eulerovy úhly, vektor rotace, lineární zrychlení, gravitační vektor a teplotu. Dále obsahuje inteligentní jednotku přerušení, u

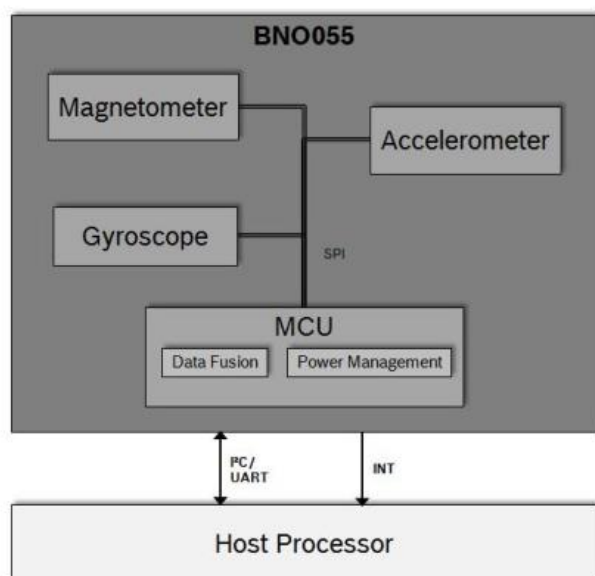
kteře je možné nastavit přerušeni v závislosti na rozpoznání malého nebo žádného pohybu, rozpoznání jakéhokoliv pohybu a detekování většího tíhového zrychlení. [27]

Eulerovy úhly BNO055 določítává. Določet je prováděn pomocí tzv. Fusion modes (v datasheetu BNO055 na straně 22). Podle zvoleného Fusion módu jsou různé způsoby výpočtu. Lze rozlišovat mezi neabsolutní, relativní a absolutní orientací v prostoru. Absolutní orientace je orientace s respektem k Zemi a jejímu magnetickému poli. Jinými slovy absolutní orientační „fusion“ módy zjišťují směr magnetického severního pólu. U relativní a neabsolutní orientace závisí na počáteční poloze BNO055. Pro správu BNO055 používám knihovnu firmy Adafruit (Adafruit_BNO055), ve které je v základu zvolen NDOF Fusion mód. Tento mód določítává absolutní orientaci pomocí dat z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru. Výhody določítávání z dat všech tří senzorů jsou rychlý výpočet, což má za následek vysokou rychlost vyčítání dat, a vysokou odolnost vůči rušení magnetickým polem. V tomto módu je zapnuta tzv. rychlá kalibrace magnetometru. [26]

Data	Jednotky
Zrychlení, lineární zrychlení, gravitační vektor	m/s ²
	mg (mili g)
Síla magnetického pole	μT
Úhlová rychlost	°/s
	rad/s
Eulerovy úhly	°
	rad
Kvaterniony	Quaternion units
Teplota	°C
	°F

Tabulka 1 Jednotky jednotlivých výstupních dat BNO055

Komunikace s Arduinem je zajištěna prostřednictvím sběrnice I2C. Vlastní BNO055 disponuje i sběrnicí UART. Zjednodušené blokové schéma BNO055 je uvedeno na obrázku níže. Host Processor je v našem případě Arduino MEGA 2560.



Obrázek 16 Architektura BNO055 [26]

Důvodem pro použití BNO055, potažmo tohoto shieldu, bylo mimo jiné to, že poskytuje velký počet dat z různých senzorů i fakt, že je tento shield přímo vyvinut firmou Arduino a je tedy s jejími mikro kontroléry kompatibilní. Dalším pozitivem je existence knihovny pro jeho správu, a tedy práce s tímto shieldem/BNO055 je pak velice zjednodušená.

Jak už bylo výše uvedeno, pro správu pohybového senzoru jsem používal knihovnu Adafruit_BNO055 s Adafruit Unified Sensor Driver (Adafruit_Sensor), který je potřeba pro všechny Adafruit knihovny různých senzorů. Adafruit Unified Sensor Driver je kompatibilní s velkou škálou senzorů, vždy jen už stačí stáhnout příslušnou Adafruit knihovnu daného senzoru.

4.2.1 Kalibrace jednotlivých snímačů v BNO055

Pro validní výstupní data je nutné zkalibrování senzorů, při nezkalibrování mohou být výstupní data značně odlišná oproti realitě, a proto v pozadí mikro-kontroléru BNO055 běží automatická kalibrace všech tří senzorů (akcelerometru, gyroskopu a magnetometru) a systému, která nelze vypnout. [26]

Kalibrace se automaticky provádí pokaždé, když je senzor zapnut (přivedeno napětí) nebo resetován.

Akcelerometr a gyroskop jsou relativně méně náchylné k vnějšímu rušení oproti magnetometru, u nich můžeme získávat relativně validní data již při nízkém stupni kalibrace.

Pohybový snímač BNO055 poskytuje informaci o stavu kalibrace jednotlivých senzorů pomocí tzv. úrovně přesnosti kalibrace, která nabývá hodnot od 0 do 3, čím větší číslo tím přesnější kalibrace. Jinými slovy číslo 0 – senzor není zkalibrován, čísla 1 a 2 – senzor je částečně zkalibrován (samozřejmě č. 2 je vyšší stupeň kalibrace než č. 1) a číslo 3 – senzor je plně zkalibrován. Kromě kalibračního statusu všech tří senzorů lze získat i tzv. systémovou kalibraci, která závisí na kalibračním statusu všech tří senzorů, opět je vyjádřena čísli 0 až 3, stejně jako tomu je u kalibrace senzorů. [26]

Kalibrace gyroskopu

Gyroskop se nejjednodušeji kalibruje ze všech tří senzorů, a pravděpodobně již chvíli po zapnutí (resetování) bude plně zkalibrován. Pro jeho kalibraci stačí zařízení umístit do libovolné stabilní pozice na pár sekund. [26]

Kalibrace akcelerometru

Kalibrace akcelerometru vyžaduje umístit zařízení postupně do šesti stabilních pozic, v každé pozici je nutné setrvat pár sekund. Pohyb při změně pozic by měl být pomalý. Alespoň jednou musí zařízení ležet kolmo k ose X, Y nebo Z. [26]

Kalibrace magnetometru

Důvodem kalibrace magnetometru je především zdroj chyb v podobě působení parazitního magnetického pole, které narušuje měření pole geomagnetického. Zdroje rušení rozdělujeme na dva základní typy: vlivy magneticky tvrdých materiálů a vlivy magneticky měkkých materiálů. Úkon níže kalibruje magnetometr proti chybám vzniklým vlivy magneticky tvrdých materiálů. [28]

Se zařízením udělejte pár libovolných pohybů, nejlépe několikrát ve vzduchu opište číslici osm. Jakékoliv větší kovové předměty v blízkosti BNO055 mohou změnit nebo zpomalit kalibraci. [26], [29]

Kalibrace systému

Kalibrace systému se spustí, jakmile se začínají kalibrovat senzory. Poté, co jsou všechny senzory zkalibrované, nechte zařízení chvíli (pár sekund) ležet na jednom místě, aby se dokončila kalibrace systému. [29]

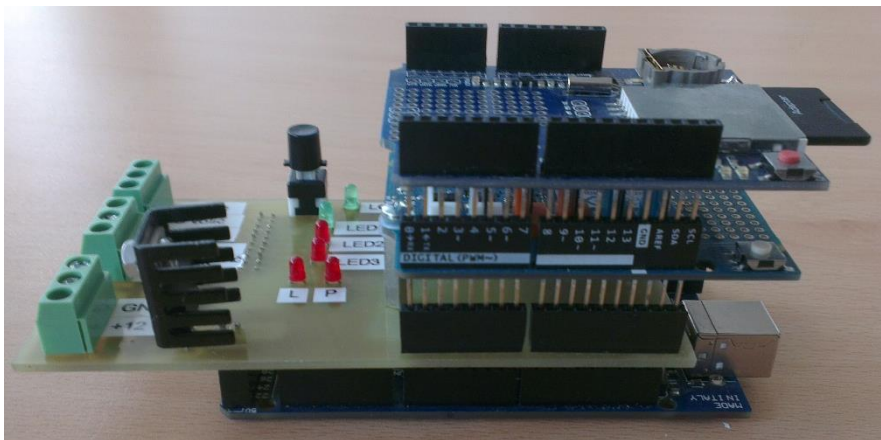
4.3 Rozhraní pro ukládání dat

Aby bylo možné následné vyhodnocení výstupních dat z pohybového snímače, je nutné jejich ukládání. Pro tuto potřebu byl zvolen Data logging shield V1.0 firmy Deek-Robot. Tento shield umožňuje ukládání dat na SD kartu (s formátem FAT16 nebo FAT32). Modul obsahuje i hodiny reálného času (RTC). Komunikace je zajištěna přes sběrnici SPI.



Obrázek 17 Data logger shield [30]

Jelikož byly použity shieldy kompatibilní s Arduino, bylo možné jejich navrstvení na sebe (stohování). Tento fakt zjednodušil propojení jednotlivých rozhraní.



Obrázek 18 Stohování jednotlivých komponentů

Jedinou komplikací, která je spojena s použitím Arduina MEGA 2560 místo Arduina UNO, je jiné umístění pinů SPI sběrnice, a proto je nutné jejich dodatečné propojení.

	Arduino MEGA	9 Axes Motion Shield
MISO	50	12
SCK	52	13
MOSI	51	11

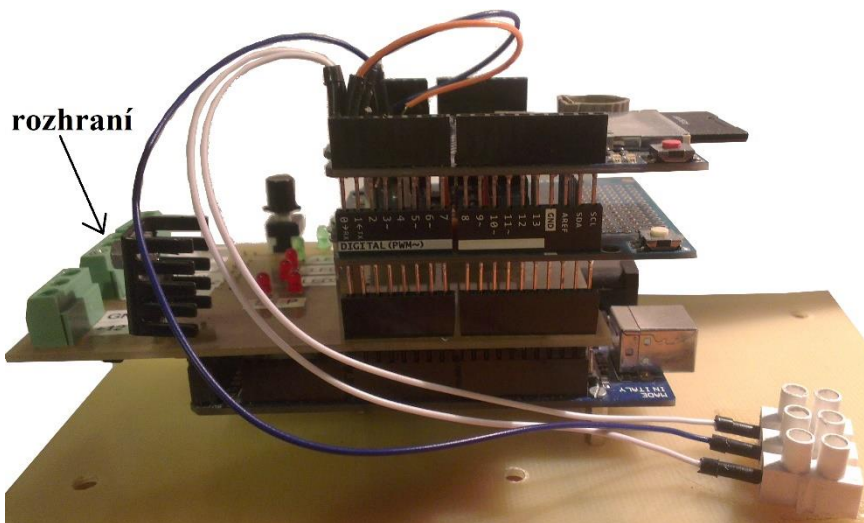
Tabulka 2 Propojení SPI sběrnice Arduina se shieldy

Dalším komponentem je rozhraní pro připojení celého zařízení na motocykl, které zajišťuje ovládání směrových světel a snímání polohy přepínače ukazatele směru. O něm více v kapitole 5 Návrh a výroba rozhraní pro připojení zařízení na motocykl.

5 NÁVRH A VÝROBA ROZHRAŇÍ PRO PŘIPOJENÍ ZAŘÍZENÍ NA MOTOCYKL

Aby bylo možné ovládat jednotlivá směrová světla, zjišťovat polohu přepínače ukazatele směru, napájet celé zařízení, signalizovat důležité provozní stavy a ovládat logování dat na SD kartu, bylo nutné navrhnout a vyrobit příslušné rozhraní.

V následujících podkapitolách je proveden popis jednotlivých částí rozhraní a nastínění vlastního návrhu a výroby DPS.



Obrázek 19 Výsledné rozhraní společně s ostatními komponenty

5.1 Rozbor jednotlivých částí rozhraní

5.1.1 Napájecí část

Tato část slouží pro napájení Arduina a všech ostatních shieldů. Zdrojem energie je 12 V akumulátor motocyklu. Jelikož Arduino pracuje s napájecím napětím 5 V, bylo nutné zajistit jeho snížení. Požadovaného napětí bylo dosaženo pomocí low-drop napěťového regulátoru LM2940-5 (v pouzdru TO220), jehož výstupní stabilizované napětí činí požadovaných 5 V. Proudový odběr celého zařízení bez rozhraní se pohybuje kolem 130 mA, tedy ani zdaleka se neblíží maximálnímu pro daný regulátor, který činí 1 A.

Důvodem použití low-drop napěťového regulátoru byl fakt, že při startu motocyklu může napětí akumulátoru klesnout pod 7 V, použitím klasického napěťového regulátoru, který mívá úbytek napětí cca 2 V, by už nemuselo zajistit požadovaných 5 V na výstupu. Oproti tomu LM2940-5 má úbytek napětí v rozmezí 0,5 až 1 V, je tedy schopné i při sníženém vstupním napětí pod 7 V zajistit stabilních 5 V na výstupu.

Vstupní napětí se pohybuje kolem 13,4 V, a tedy na regulátoru se maří výkon přesahující 1,1 W (viz výpočet 3), který se přeměňuje na teplo. Regulátor se značně hřeje, a proto je nutné použít malý chladič.

Aby byla zajištěna správná funkce LM2940-5 je nutné na vstup umístit keramický kondenzátor 0,47 μF a na výstup polarizovaný kondenzátor s hodnotou alespoň 22 μF . V našem případě jsou použity stejné hodnoty, přičemž se jedná o SMD kondenzátory, jako výstupní polarizovaný kondenzátor byl použit tantalový kondenzátor. Ve schématu se jedná o kondenzátory C1 a C2.

Pro ochranu je sériově ke vstupu zařazena vratná pojistka (PTC) s udržovacím proudem 1,1 A, vypínacím proudem 2,2 A, a s jmenovitým napětím 16 V stejnosměrných. Ve schématu se jedná o pojistku F1. Další ochranou je paralelně ke vstupu připojený transil (ve schématu D1) s maximálním závěrným napětím 18 V, který regulátor chrání před přepětím (napěťovými špičkami). Oba ochranné prvky jsou v provedení SMD.

Výpočet mařeného výkonu na LM2940-5:

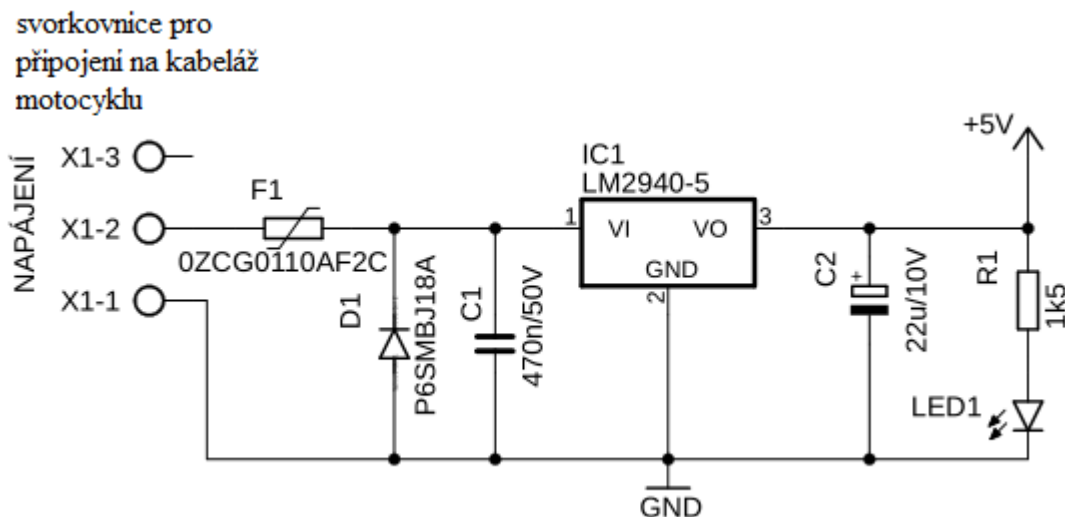
$$P = (U_{in} - U_{out}) * I = (13,4 - 5) * 130 * 10^{-3} = 1,1 \text{ W} \quad (3)$$

Kde:

U_{in} je napětí přivedené na vstup LM2940-5

U_{out} je napětí na výstupu LM2940-5

I je proudový odběr celého zařízení



Obrázek 20 Schéma napájecího bloku

5.1.2 Část pro signalizaci provozních stavů

Aby bylo možné pouhým pohledem získat některé základní informace, je rozhraní vybaveno sadou sedmi LED diod.

Diody informují o těchto stavech:

- LED signalizující přítomnost napájení (LED1),
- dvě LED diody informující o směru – vlevo/vpravo (LED6/LED7),
- dioda signalizující stav logování (ON/OFF) – LED2,
- a zbylé tři diody (LED3,4,5) sloužící pro signalizaci například stavu kalibrace senzorů, ale lze je použít i pro jiné účely.

Kromě LED1, která je zařazena přímo přes předřadný rezistor k výstupnímu napětí ze stabilizátoru, jsou všechny ostatní diody připojeny přes předřadný rezistor k digitálním pinům Arduina (piny 38, 40, 42, 44, 46, 48). Diody jsou zapojeny tak, že mají společnou zem.

Byly použity 3 mm LED diody s proudem $I_{LED} = 2 \text{ mA}$ a úbytkem napětí $U_{LED} = 1,8 \text{ V}$. Předřadné rezistory byly použity v SMD variantě.

Výpočet předřadného rezistoru pro LED:

Použity 3 mm LED, s $I_{LED} = 2 \text{ mA}$ a $U_{LED} = 1,8 \text{ V}$.

$U_{nap} = 5 \text{ V}$

$$R_{předřadný} = \frac{U_{nap} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5 - 1,8}{2 \cdot 10^{-3}} = 1\,600 \, \Omega \quad (4)$$

Hodnota předřadného rezistoru byla zvolena na **1,5 k Ω** .

Kde:

I_{LED} je proud LED diodou

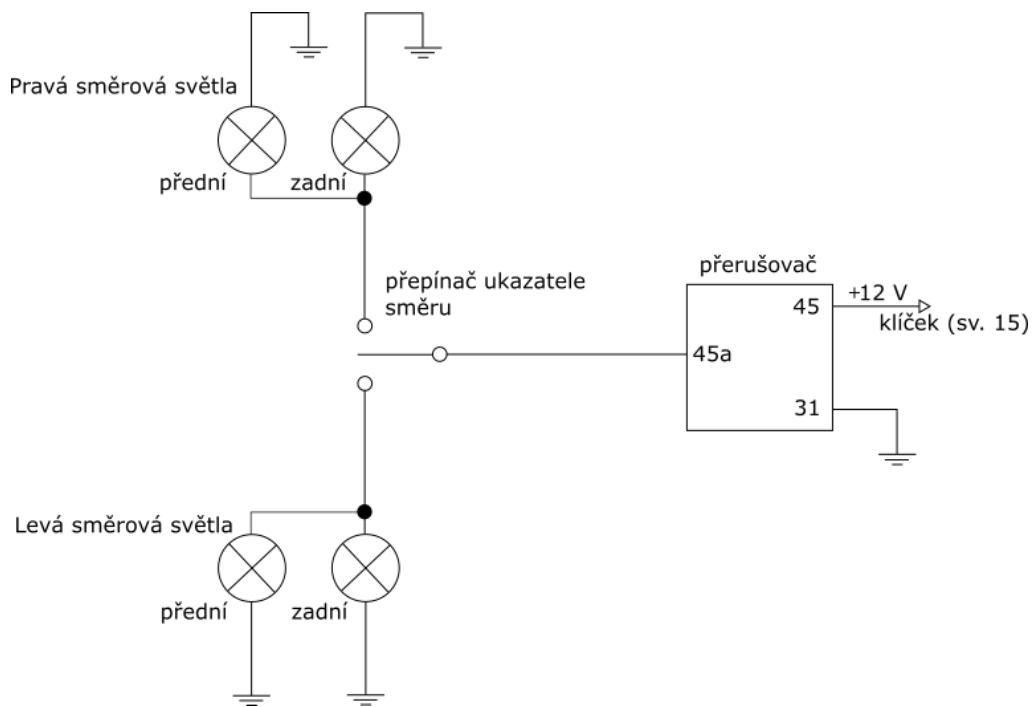
U_{LED} je úbytek napětí na LED diodě

U_{nap} je napájecí napětí (výstupní napětí z pinů Arduina)

$R_{předřadný}$ je předřadný rezistor pro LED diodu

5.1.3 Část pro ovládání směrových světel

Abychom při zaznamenání požadavku na odbočení (sepnutí přepínače ukazatele směru) a pro rozpoznání ukončení odbočovacího manévru byly schopni zapnout nebo vypnout příslušná směrová světla, je nutné zajistit jejich ovládání. Za normální situace je na motorce zajištěné přerušované svícení pomocí přerušovače, jehož signál je přes přepínač ukazatele směru přiveden na příslušnou sadu směrových světel (viz obrázek níže). Směrová světla mají společnou zem.

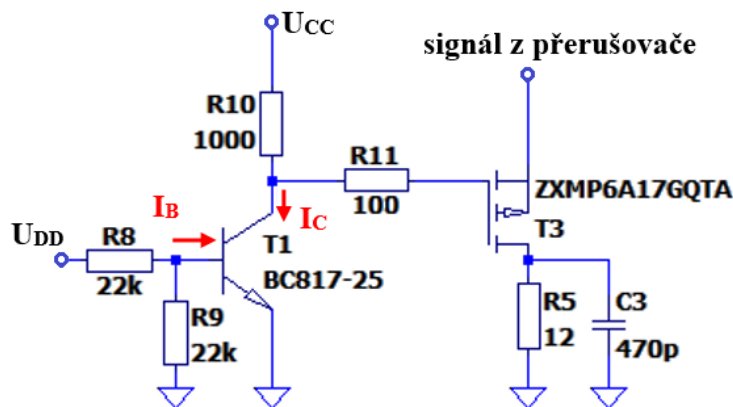


Obrázek 21 Zapojení směrových světel na motocyklu Jawa 125 Dandy

Vhodným spínacím prvkem musíme zajistit přivedení signálu z přerušovače na příslušná směrová světla. Pro tento účel byl zvolen MOSFET s pozitivním kanálem. Tento tranzistor je spínán pomocí bipolárního tranzistoru z Arduina. Celý spínací celek se na rozhraní nalézá dvakrát, jednou je zde pro pravá směrová světla a jednou pro levá. Pro zvolení správného unipolárního tranzistoru bylo nutné zjistit spínaný proud, tedy proud tekoucí z přerušovače přes tranzistor do směrových světel. Tento proud činí přibližně 1,6 A, zvolený tranzistor by měl mít maximální spínaný proud alespoň 3 A. Důležité je též správné zvolení maximálního spínaného napětí (U_{DS}), v našem případě by toto napětí mělo být minimálně 30 V, ale lépe více. Pro zajištění plného otevření tranzistoru je potřeba správně zvolit spínací napětí (U_{GS}). Jelikož se jedná o MOSFET s P kanálem, tak jeho otevření docílíme připnutím svorky G (Gate) na zem. Byl zvolen MOSFET s maximálním spínacím napětím (U_{GS}) ± 20 V. Prahové spínací napětí ($U_{GS(th)}$) tohoto MOSFETU je -1 V. Neméně důležitým parametrem je odpor v sepnutém stavu (bývá řádově desítky $m\Omega$), na kterém vzniká úbytek napětí, o který je spínané napětí menší. U bipolárního tranzistoru, který spíná unipolární tranzistor (P MOSFET) je nutné správně zvolenými rezistory zajistit plné otevření tak, aby při sepnutí došlo k připnutí řídicí elektrody (Gate) unipolárního tranzistoru na zem, a tedy k jeho otevření. Celá spínací část byla ozkoušena v simulačním softwaru LTspice.

Výpočet odporů pro bipolární tranzistor:

Výpočet odporů (R8, R9 a R10) pro bipolární tranzistor (T1) byl proveden na prvotním základním schématu. Toto schéma bylo následně upraveno do finální podoby, jak ho vidíme na obrázku 23 Finální zapojení spínací části rozhraní. Hodnoty odporů zůstaly stejné, pouze byl nahrazen bipolární tranzistor BC817-25 tranzistorem BC817-40, který má odlišný proudový zesilovací činitel ($h_{FEmin} = 250$). Na výsledné funkci to avšak nic nemění. Jako unipolární tranzistor (T3) byl použit P MOSFET ZXMP6A17GQTA ($U_{GS} = \pm 20$ V; $U_{DS} = 60$ V; $I_{DS} = 3,5$ A; $P_D = 2$ W; $R_{DS(ON)} = 125$ m Ω).



Obrázek 22 Základní schéma spínací části rozhraní

$$h_{FEmin} = 160$$

$$U_{BE} = 0,7 \text{ V}$$

$$U_{CC} = 12 \text{ V}$$

$$U_{DD} = 5 \text{ V}$$

Odpor R_{10} byl zvolen tak, aby proud kolektorem byl malý. $\Rightarrow R_{10} = 1 \text{ k}\Omega$

$$I_C = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{12}{1000} = 12 * 10^{-3} \text{ A} \quad (5)$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FEmin}} = \frac{12 * 10^{-3}}{160} = 75 * 10^{-6} \quad (6)$$

Pro zajištění dostatečné saturace je vhodné I_B zvýšit. $\Rightarrow I_B = 160 \mu\text{A}$

$$R_8 = R_9 = \frac{U_{DD} - 2 * U_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 2 * 0,7}{160 * 10^{-6}} = 22500 \Omega \Rightarrow \text{Zvolena hodnota } 22 \text{ k}\Omega. \quad (7)$$

Kde:

h_{Femin} je proudový zesilovací činitel

U_{BE} je úbytek napětí báze-emitor

U_{cc} je napětí akumulátoru motocyklu

U_{DD} je spínací napětí z Arduina

R_{10} je kolektorový odpor

I_c je proud kolektorem

I_B je proud báze

R_8 a R_9 tvoří odporový dělič pro nastavení proudu báze

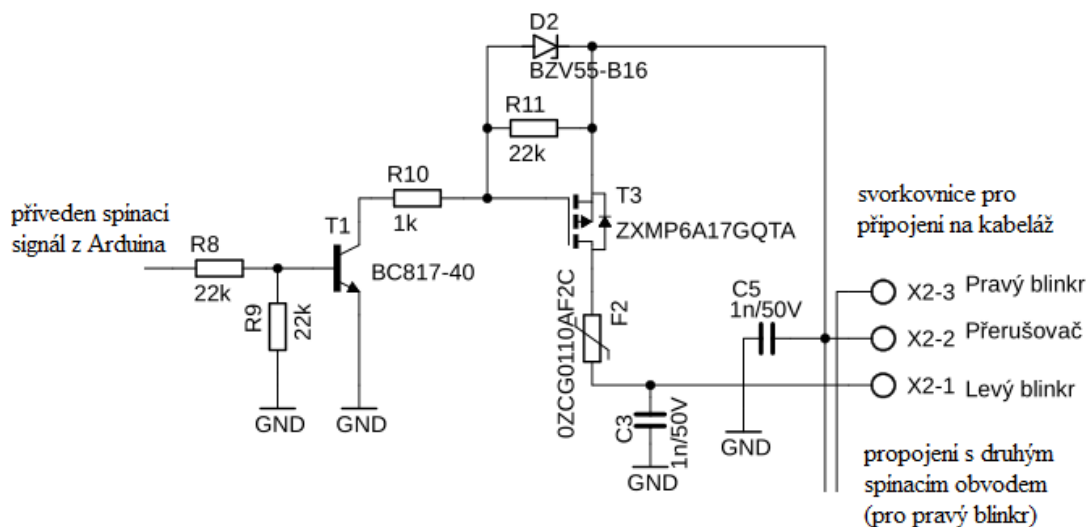
R_5 simuluje žárovku

R_{11} slouží pro snížení strmosti při spínání

C_3 slouží jako ochrana MOSFETU proti elektrostatickému výboji.

Výsledné zapojení spínací části

Zapojení se oproti původnímu (viz výše) liší zejména tím, že bipolární tranzistor (T1) spíná napětí přivedené z přerušovače, a ne napětí přímo z akumulátoru. Zapojení je ještě doplněno o několik ochranných prvků, jako jsou kondenzátory C3 a C5, které slouží jako ESD ochrana MOSFETu. Vratná pojistka (F2) slouží jako ochrana MOSFETu proti zkratovému proudu. Zenerova dioda D2 slouží pro ochranu MOSFETu před napětím menším než -16 V. Rezistor R11 zajišťuje, že MOSFET bude uzavřen, když tranzistor T1 nebude sepnutý. Pro propojení s kabeláží motocyklu slouží svorkovnice (X2). Veškeré součástky byly použity v SMD variantě. Tranzistory jsou spínány z pinů A0 (pro spínání levých směrových světel) a A1 (pro spínání pravých směrových světel) Arduina MEGA 2560.



Obrázek 23 Finální zapojení spínací části rozhraní

5.1.4 Část pro ovládání logování dat

Tato část rozhraní slouží pro zapínání/vypínání logování dat na SD kartu. Jedná se pouze o tlačítko, které je jedním pinem připojeno k zemi a druhým k 53. digitálnímu pinu Arduina. Na pinu je zapnutý interní pull-up rezistor, aby zapojení nemuselo obsahovat vnější pull-up rezistor. Pro informování o stavu logování je na rozhraní, hned vedle tlačítka, umístěna LED dioda (viz podkapitola 5.1.2 Část pro signalizaci provozních stavů).

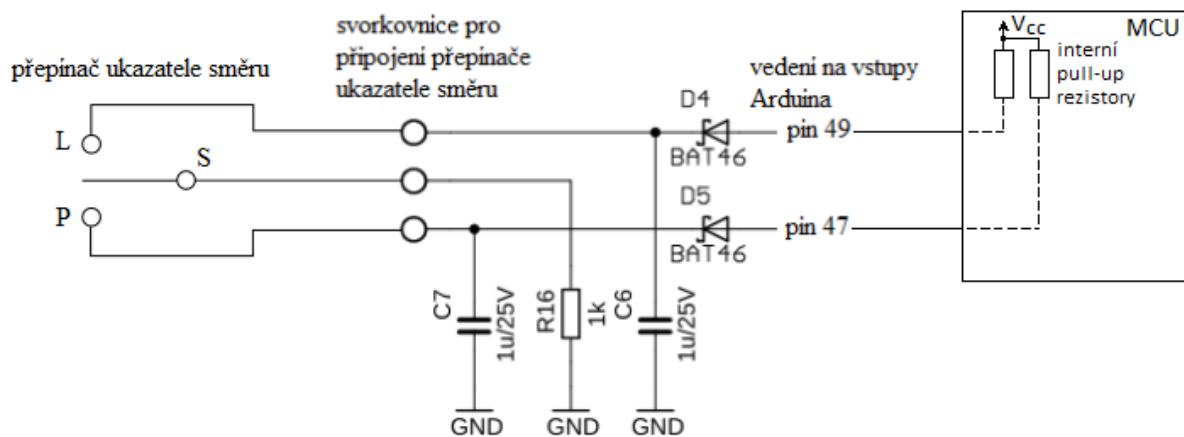
5.1.5 Část pro připojení přepínače ukazatele směru

Tato část slouží pro připojení přepínače ukazatele směru k Arduinu. Původní přepínač ukazatele směru na motocyklu byl nahrazen kolébkovým přepínačem s návratem do vypnuté polohy (viz obrázek níže). Přepínač je napojen na digitální piny (Arduina) 47 a 49, na kterých jsou aktivovány interní pull-up rezistory.



Obrázek 24 Umístění kolébkového přepínače na řídítkách

Středový kontakt přepínače je přes odpor (R16) uzemněn společně s kondenzátory C7 a C6, které jsou připojeny mezi zem a spínané piny přepínače, tvoří hardwarové ošetření proti zákmitům tlačítek. Jinými slovy, slouží pro překlenutí doby zakmitávání po změně stavu tlačítka. Jejich hodnotu zvolil podle svých zkušeností pan Ing. Ph.D. Zdeněk Mašek. Z výše uvedeného je patrné, že přepínač je spínán k zemi. Zapojení je ještě doplněno o Schottkyho diody, které chrání vstup mikrokontroléru proti zkratu na napětí akumulátoru. Všechny použité součástky jsou v SMD provedení. Zapojení tohoto bloku je uvedeno na obrázku níže.



Obrázek 25 Blok přepínače ukazatele směru

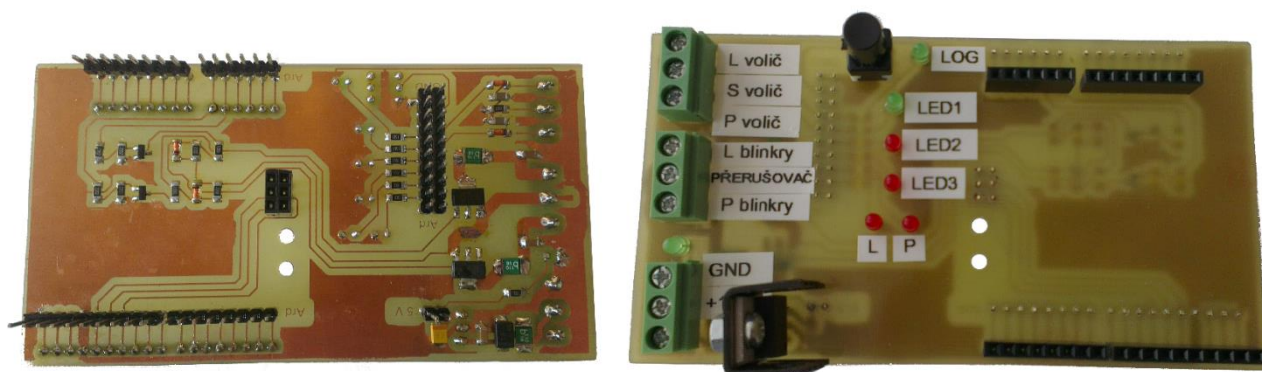
5.1.6 Napojení rozhraní k Arduino a ostatním shieldům

Celé rozhraní spolu s konektory bylo navrženo tak, aby bylo možné stohování s ostatními shieldy a Arduinem. Nejlépe je to vidět na obrázku č. 19.

Celé zapojení bylo ještě doplněno o propojení SPI sběrnice Arduina s ostatními shieldy (viz tabulka 2).

5.2 Vlastní návrh a výroba DPS

Nákres schéma i návrh desky plošných spojů (DPS) byl proveden v softwaru Eagle. Vlastní zhotovení DPS a osazení bylo uskutečněno ve školní laboratoři. Kompletní schéma je uvedeno v příloze (Příloha A). Kresba DPS je též uvedena v příloze (Příloha B)



Obrázek 26 Výsledné rozhraní

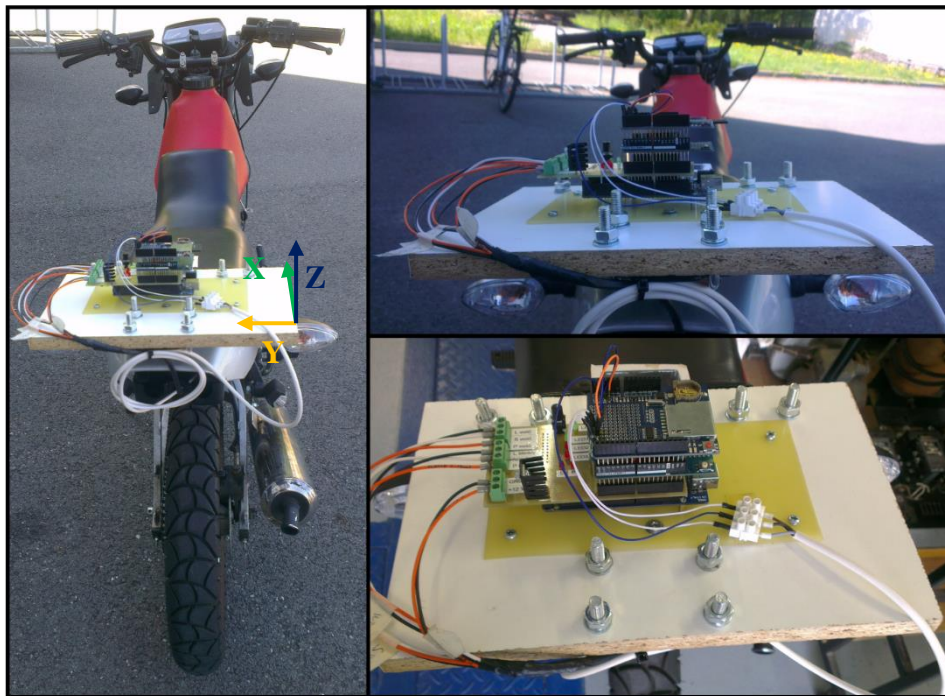
6 UMÍSTĚNÍ ZAŘÍZENÍ NA MOTOCYKLU

Jak už bylo zmíněno v kapitole č.4 (Výběr HW komponent) veškeré komponenty (shieldy, rozhraní, mikro-kontrolér) jsou stohovány na sebe, tvoří jakýsi „sendvič“. Ve spodní vrstvě je umístěno Arduino MEGA 2560, které je přišroubováno pomocí distančních sloupků k základové kuprexitové desce, která slouží pro namontování celého kompletu na motocykl. Nad ním je umístěno vytvoření rozhraní (pro napájení, ovládání směrových světel, čtení stavu polohy přepínače ukazatele směru atd.), které je pomocí distančního sloupku pevně spojeno s Arduinem. Následuje 9 axes motion shield, který je též prostřednictvím distančního sloupku spojen s rozhraním tak, aby byla zajištěna jeho stabilní poloha, protože jakýmikoliv nežádanými pohyby se do měřených dat zanáší rušení. V posledním „patře“ je umístěn Data logging shield. Ten bohužel nelze pevně spojit s ostatními vrstvami, drží tedy jen pomocí konektorů, avšak uchycení se zdá být dostačující. Jeho nežádoucí pohyby nejsou tak kritické jako tomu je u pohybového shieldu.

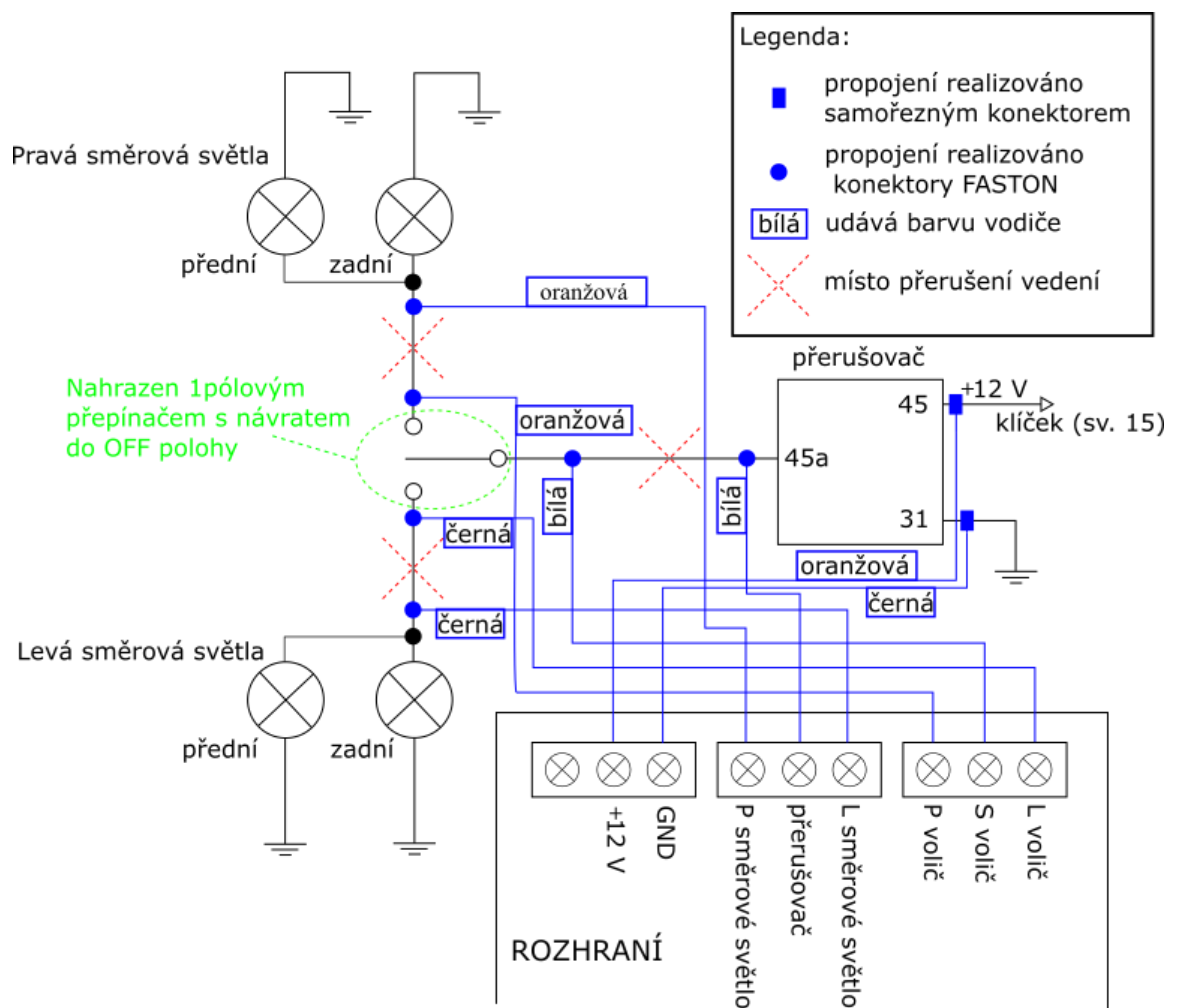
Pro validní data je nutné, aby celý komplet byl umístěn na nepohyblivé části motocyklu, a byl s motocyklem pevně spojen, protože, jak už bylo výše zmíněno, jakékoliv nežádoucí pohyby kompletu zanášejí do měřených dat rušení.

Celý tento komplet je pomocí základové kuprexitové desky uchycen prostřednictvím šesti vrtů k podkladové dřevotřískové desce, která je upevněna pomocí čtyř „U“ šroubových svorek k zadnímu nosiči zavazadel na motocyklu. Vše je nejlépe vidět na obrázku 27. Jiné umístění na motocykl nebylo možné kvůli nemalé velikosti zařízení.

Napojení rozhraní na kabeláž motocyklu je realizováno prostřednictvím svorkovnice umístěné na kraji rozhraní. Vlastní schéma připojení je vidět na obrázku 28 Schéma připojení rozhraní na kabeláž motocyklu.



Obrázek 27 Umístění zařízení na motocyklu



Obrázek 28 Schéma připojení rozhraní na kabeláž motocyklu

6.1 Orientace 9 axes motion shieldu vzhledem k motocyklu

Pohybový shield je na motocyklu umístěn tak (viz. Obrázek níže), že osa x směřuje ve směru jízdy, y směřuje vlevo ve směru jízdy a osa z vzhůru.

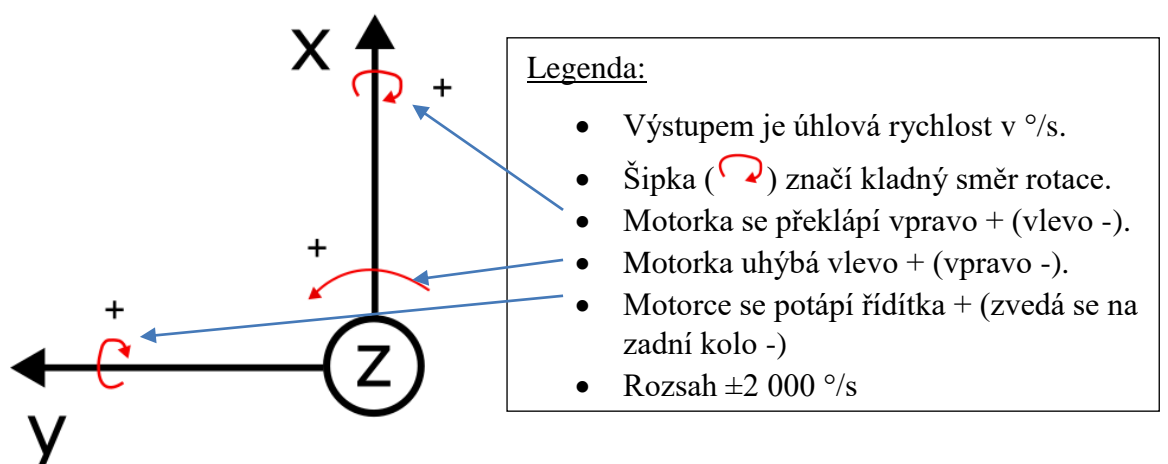


Obrázek 29 Osy motocyklu [22]

6.1.1 Popis os jednotlivých snímačů

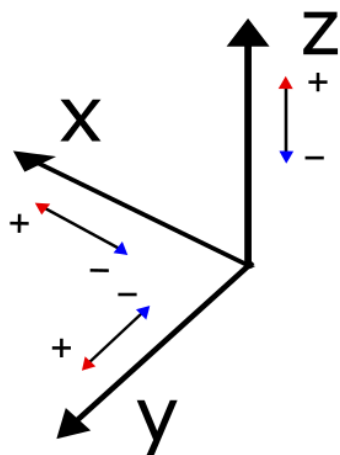
Následuje popis os jednotlivých snímačů vůči poloze BNO055 na motocyklu.

- Gyroskop



Obrázek 30 Osy gyroskop

- Magnetometr
Nelze jednoznačně určit, jakým směrem se bude zvyšovat a jakým klesat, záleží na umístění v prostoru.
Rozsah $\pm 1\,300\ \mu\text{T}$ v X, Y ose a $\pm 2\,500\ \mu\text{T}$ v Z ose.
- Akcelerometr

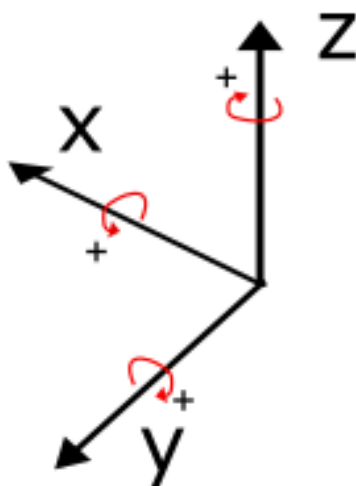


Legenda:

- Výstupem je zrychlení v m/s^2 .
- Rozsah $\pm 4g$

Obrázek 31 Osy akcelerometr

- Euler



Legenda:

- Výstupem je Eulerův úhel ve stupních.
- Úhel okolo osy Z – úhel yaw - (0 až 360°), zaznamenáno jako hodnota x .
- Úhle okolo osy Y – úhel pitch - ($\pm 90^\circ$), zaznamenáno jako hodnota y .
- Úhel okolo osy X – úhel roll - ($\pm 180^\circ$), zaznamenáno jako z .

Obrázek 32 Osy Euler

Zaznamenáno jako hodnota x, y nebo z znamená, že při vycítání dat z BNO055 v programu se pod těmito proměnnými nalézají jednotlivé úhly.

6.1.2 Vysvětlení Eulerových úhlů

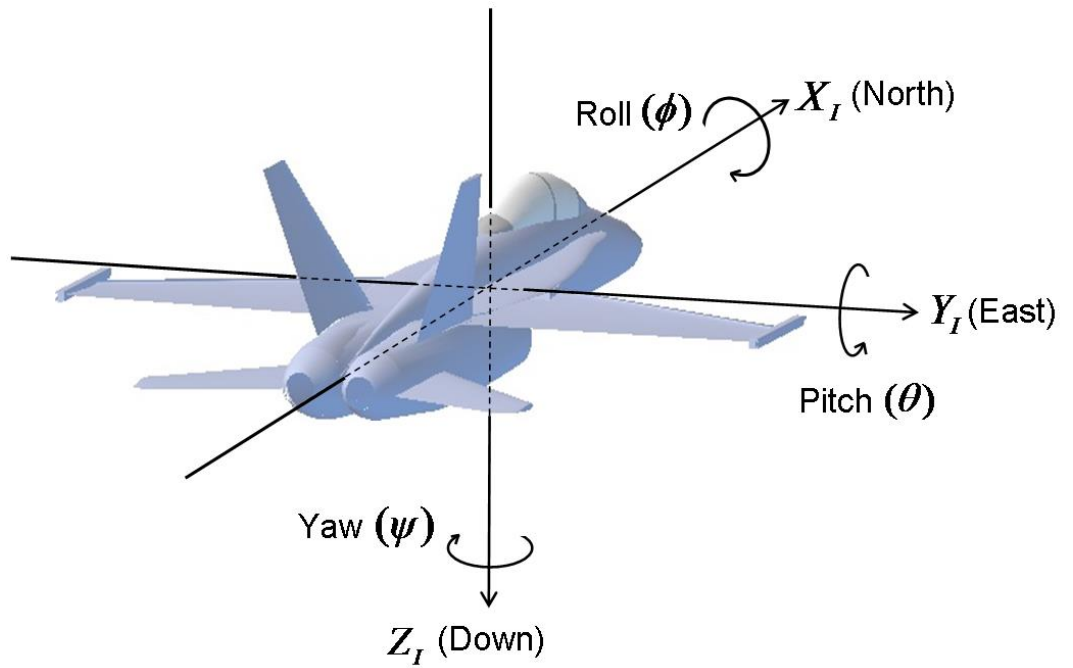
Jedná se o způsob reprezentace 3D orientace objektu pomocí kombinace tří rotací kolem různých os. Pro popis orientace snímače používáme několik souřadnicových soustav, a to tyto: [31]

- „**Inertial Frame**“ (inerciální souřadný systém) - soustava os, která je „pevně ukotvena k Zemi“ a používá se jako nepohyblivá reference. [31]
- „**Body Frame**“ (souřadný systém senzoru) – soustava os, která je pevně spojena se senzorem. [31]
- „**Vehicle Frame 1**“ a „**Vehicle Frame 2**“ (vozidlový souřadný systém 1 a 2) – jsou zprostředkující rámce, ilustrují postup operací, které nás přivádějí od „Inertial Frame“ k „Body Frame“. [31]

V ilustrujících příkladech je snímač namontován na letadle a všechny obrázky ukazují změnu orientace letadla. V případě našeho motocyklu je uspořádání os trochu odlišné (osa Y směřuje doleva a Z vzhůru), ale to nic nemění na vysvětlovaném principu.

Inertial Frame

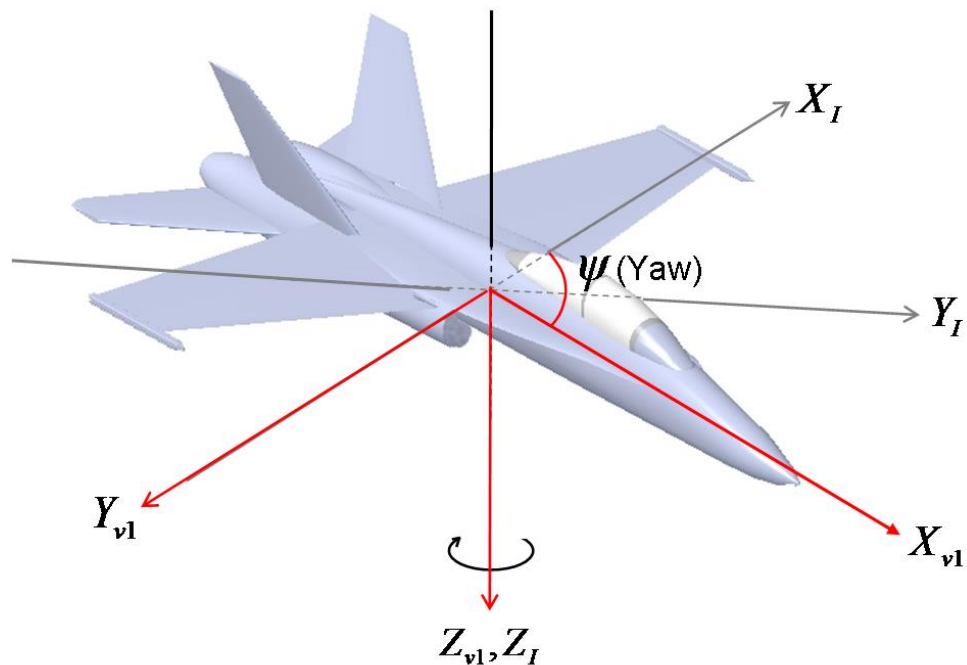
- Osa X_I směřuje na sever (North), Y_I na východ (East) a Z_I dolů (Down). V našem případě osa X_I směřuje na východ, Y_I na sever. [31]
- Sekvence rotací, použité k reprezentaci dané orientace, jsou **yaw**, **pitch** a **roll**. [31]



Obrázek 33 Inerciální souřadný systém [31]

1. Rotace (Yaw rotace)

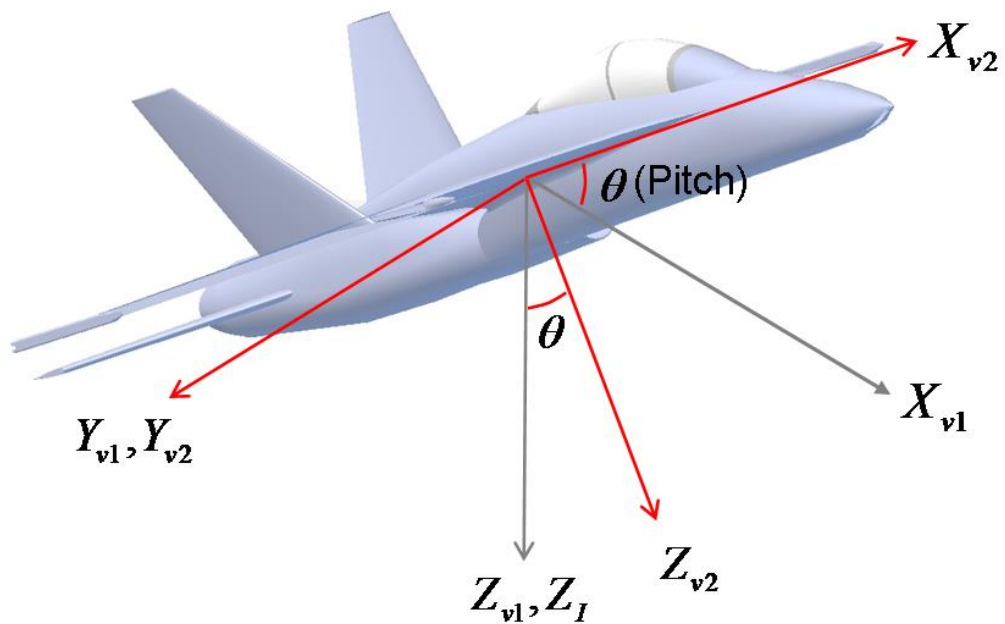
- Jak je zřejmé z obrázku výše, Yaw reprezentuje rotaci kolem osy Z_I inerciálního souřadného systému (inertial frame) o úhel Ψ . [31]
- Yaw rotace vytváří nový souřadný systém a to to souřadný systém vozidla 1 (vehicle frame 1), kde osa Z_{v1} je zarovnaná s osou Z_I inerciálního souřadného systému a osy X_{v1} a Y_{v1} jsou otočeny o yaw úhel Ψ . [31]
- Ψ je úhel mezi osou X_{v1} vozidlového souřadného systému 1 a osu X_I inerciálního souřadného systému. U BNO055 se tento úhel schovává pod hodnotou „x“. [31]
- Orientace vozidlového souřadného systému 1 po yaw rotaci je zobrazena na obrázku níže. Osy vozidlového souřadného systému jsou červené a osy inerciálního souřadného systému šedivé. [31]



Obrázek 34 Yaw rotace [31]

2. Rotace (Yaw a Pitch rotace)

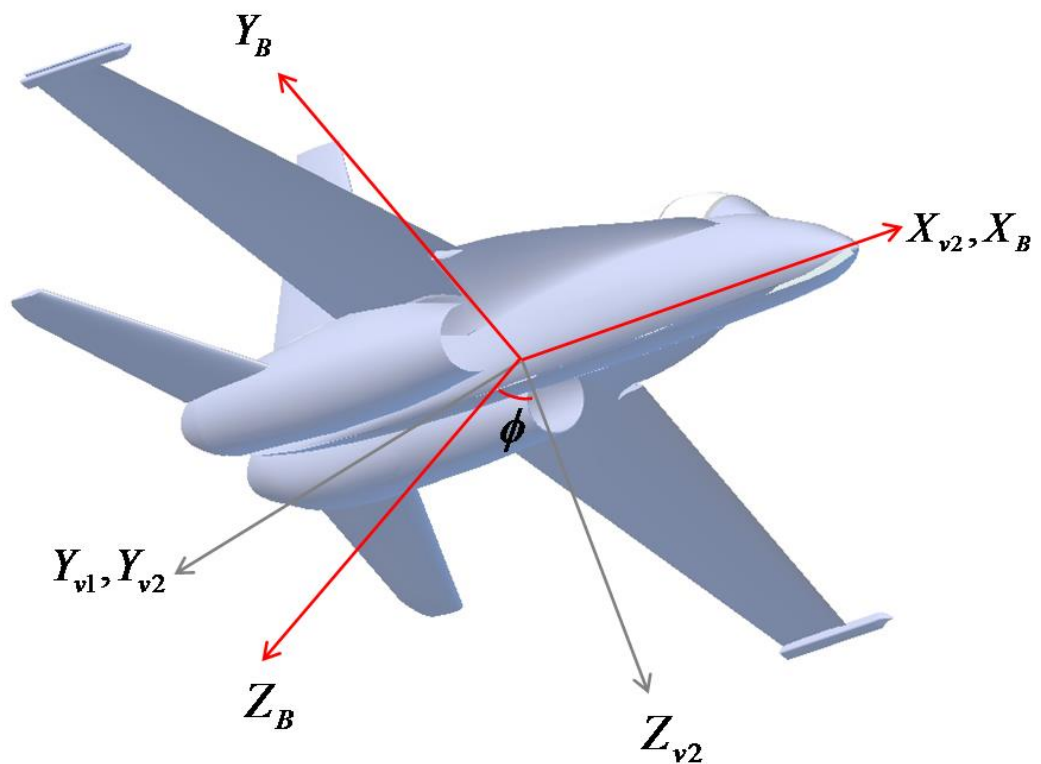
- Pitch (sklon) reprezentuje rotaci kolem osy Y_{v1} vozidlového souřadného systému 1 (vehicle frame 1) o úhel θ . [31]
- Rotace pitch **není** okolo osy Y_I inerciálního souřadného systému! [31]
- U BNO055 se tento úhle θ (pitch) schovává pod hodnotou „y“.
- Osy vozidlového souřadného systému jedna jsou šedivé, osy vozidlového souřadného systému dva jsou červené. [31]



Obrázek 35 Aplikovaná rotace pitch a yaw [31]

3. Rotace (Yaw, Pitch a Roll rotace)

- Souřadnicový systém zarovnaný k senzoru. [31]
- Na letadle obvykle osa X_B směřuje od nosu dopředu, osa Y_B směřuje od trupu doprava a osa Z_B směřuje od břicha dolů. Jak už bylo řečeno, v našem případě je orientace trochu odlišná. [31]
- Roll rotace se získá otočením o úhel Φ kolem osy X_{v2} vozidlového souřadného systému 2. [31]
- U BNO055 se tento úhel Φ schovává pod hodnotou „z“. V této práci je úhel Φ nazván jako úhel roll.
- Osy vozidlového souřadného systému dva jsou šedivé, osy souřadného systému senzoru (Body Frame) jsou červené. [31]



Obrázek 36 Aplikovaná rotace Yaw, Pitch a Roll [31]

7 POPIS FUNKCE FIRMWARE

Výsledné zařízení dokáže automaticky vypnout směrová světla po dokončení odbočovacího manévru. Při stání, například na světelné křižovatce, nedojde k vypnutí směrových světel. Pokud jezdec nevykoná odbočení dojde k automatickému vypnutí směrových světel po uplynutí 30 sekund. Neméně důležitou funkcí zařízení je možnost samotným jezdce vypnout příslušná směrová světla opětovným stlačením přepínače ukazatele směru. Jezdec také může přepnout směrová světla do opačného směru pouhým stlačením přepínače ukazatele směru do nově zvoleného směru. Zařízení dokáže rozpoznat nejenom odbočení doleva či doprava, ale i změnu pruhu.

Vytvořený kód běží ve funkcích `setup()` a `loop()`, které Arduino IDE standardně nabízí. Kromě těchto dvou funkcí obsahuje kód ještě funkci pro četní stavu přepínače ukazatele směru (`AktualniPolohaVolice`).

Pro časování je použita knihovna Arduino funkce `millis()`. Pro obsluhu 9osého pohybového shieldu a SD shieldu jsou používány knihovny třetích stran. Výpis ladících hlášek je zajištěn pomocí rozhraní UART (výpis do sériového monitoru v Arduino IDE).

Funkce setup()

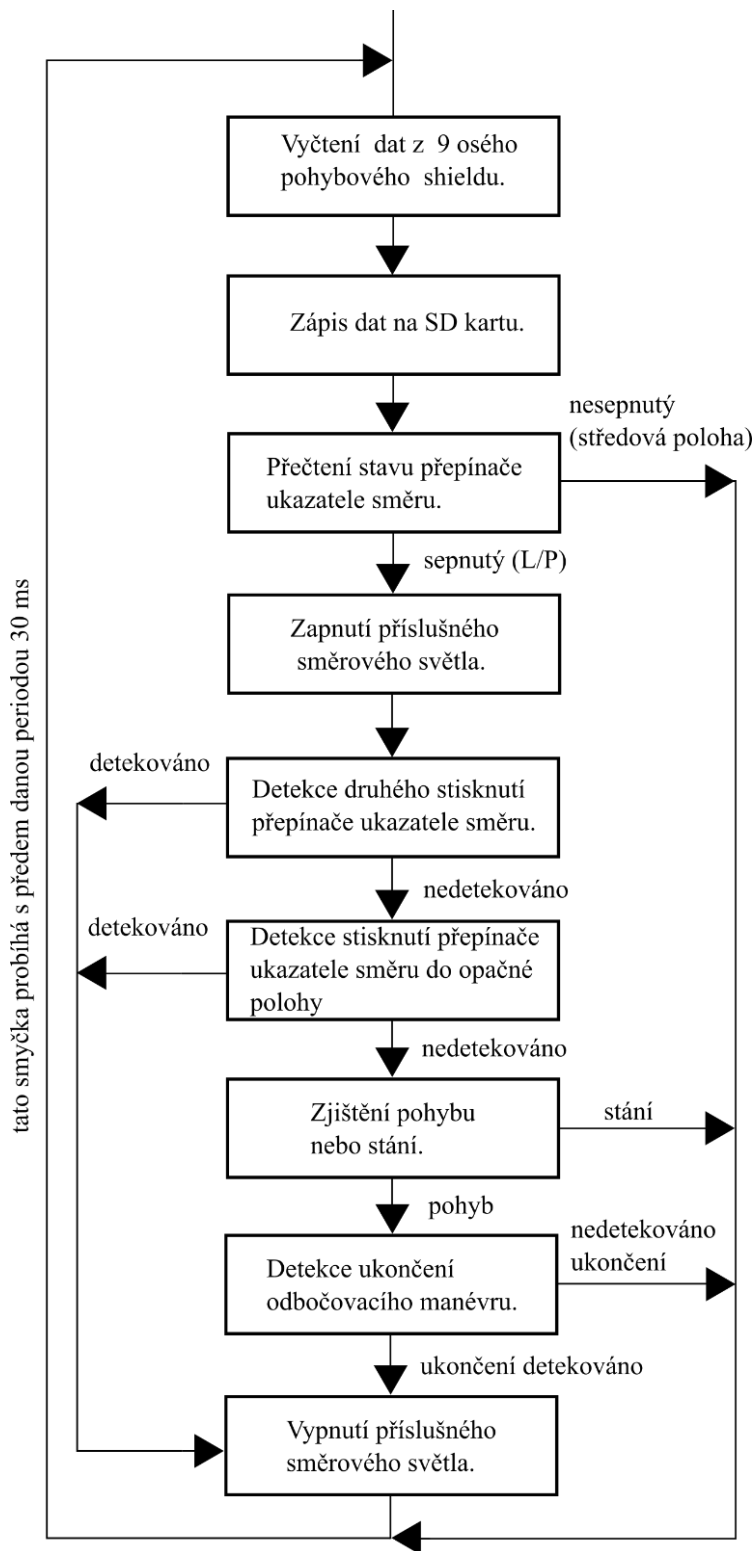
V této funkci se provádí:

- Nastavení používaných pinů (output/input)
- Výchozí nastavení výstupních pinů
- Inicializace ošetření zákmitů tlačítek (použita knihovna Bounce)
- Inicializace SD karty, kontrola její přítomnosti
- Inicializace BNO055

Funkce loop()

V této funkci probíhá s pevně danou periodou celá smyčka operací, která je uvedena na obrázku níže. Perioda byla stanovena na 30 ms. Nižší perioda není možná vzhledem k časové náročnosti kódu.

Kód bez vyčítání hodnot z BNO055 trvá zhruba 15 ms, ale jednou za přibližně 10 s dojde k nárůstu periody na několik set ms, důvodem je zápis na SD kartu. Vlastní vyčítání dat z BNO055 trvá přibližně 7,5 ms.



Obrázek 37 Funkce firmware – blokově

Funkce AktualniPolohaVolice

Tato funkce slouží pro přečtení stavu přepínače ukazatele směru. Nepřebírá žádnou hodnotu. Vrací informaci o poloze přepínače, kdy „0“ středová poloha, „1“ pravá poloha (odbočení do pravého směru) a „-1“ levá poloha (odbočení do levého směru).

Struktura souboru pro logování dat

Aby bylo možné pozdější vyhodnocení dat, je nutné jejich ukládání do textového souboru na SD kartu. Textový soubor s daty je v takovém formátu, aby ho bylo možné nahrát do excelu a data pohodlně zpracovat. Jednotlivé datové prvky jsou od sebe odděleny středníkem. V prvním řádku textového souboru je hlavička, která slouží pro rozlišení dále zaznamenaných dat. Každou vzorkovací periodu jsou na nový řádek zapsány data z BNO055 a další užitečné informace (pozice přepínače ukazatele směru, stav směrového světla, ...).

Struktura hlavičky je takováto:

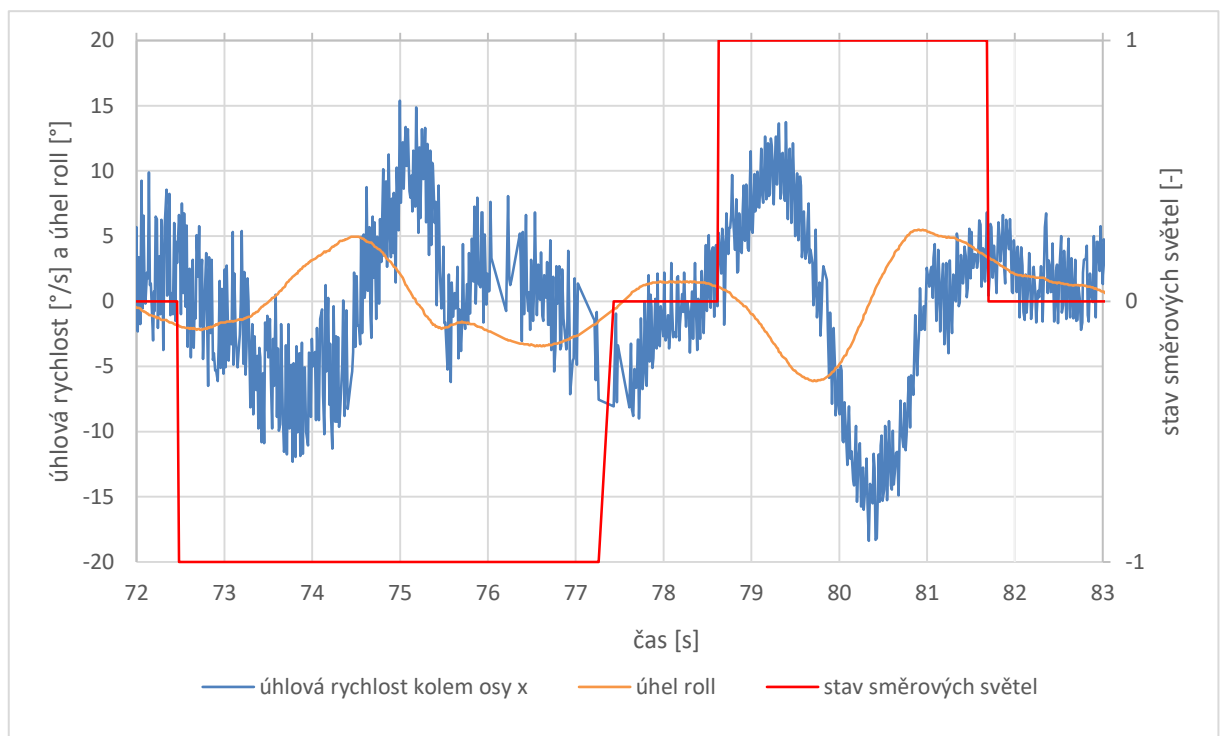
LogTime;SwStat;RawGyroX;FgyroX;RawGyroZ;FgyroZ;RawAccX;FaccX;RawAccY;FaccY;RawAccZ;FaccZ;PrumerAccZ;SmerodatnaOdchylkaAccZ;RawEulerX;RawEulerZ;CalSys;CalGyro;CalAcc;CalMag;Detekce;StavBlinkru;NepresnostVypnuti;PriznakStani.

Význam jednotlivých popisků v hlavičce:

- LogTime – relativní čas odebrání vzorků v ms (měří se od zapnutí záznamu).
- SwStat – poloha přepínače ukazatele směru (0 – střed, 1 – vpravo, -1 - vlevo).
- Popisky začínající na „Raw“ nebo „F“ jsou pro jednotlivá data z BNO055, kde „Raw“ znamená, že se jedná o nevyfiltrovaná data, „F“ vyfiltrovaná data, a velké písmeno na konci značí osu. Veškeré hodnoty jsou ukládány s přesností na dvě desetinná místa.
 - Data z gyroskopu (gyro) jsou ve °/s.
 - Data z akcelerometru (acc) jsou v m/s².
 - Eulerovy úhly jsou ve stupních (°).
- PrumerAccZ – aktuální průměr z hodnot zrychlení v ose Z.
- SmerodatnaOdchylkaAccZ – aktuální hodnota směrodatné odchylky počítané z vyfiltrovaného zrychlení v ose Z. Její jednotkou jsou m/s².
- Cal... - stav kalibrace, nabývá hodnot od 0 do 3 (tři je největší stupeň kalibrace).
- Detekce – stav vyhodnocení odbočení. Nabývá hodnot od 0-5 (viz 7.1.2 Popis algoritmu pro rozpoznání ukončení odbočovacího manévru).
- StavBlinkru – stav směrových světel (0 – neaktivní, 1 – doprava, -1 - doleva)
- NespravnostVypnuti – signalizování brzkého/zpožděného vypnutí směrového světla algoritmem (1- zpožděné, -1 – brzké). Tuto informaci signalizuje jezdec prostřednictvím dvou tlačítek.
- PriznakStani – informace o stání (1 – motocykl stojí, 0 – motocykl jede).

7.1 Identifikace ukončení odbočovacího manévru

Pojďme si ověřit mé teoretické předpoklady na reálných výstupních datech z 9 axes motion shieldu. Na následujícím grafu vidíme zaznamenaná data z gyroskopu a pohybovým senzorem (BNO055) dopočítávané Eulerovy úhly z testovací jízdy motocyklu. V grafu jsou uvedena pouze data, která jsou použita pro vlastní vyhodnocení ukončení odbočovacího manévru.



Graf 1 Průjezd motocyklu zatáčkou

Popis grafu:

- Stav směrových světel reprezentuje vypnutá nebo sepnutá příslušná směrová světla, kde 0 – směrová světla vypnutá, 1 – směrová světla doprava a -1 – směrová světla doleva. Směrová světla byla zapnuta jezdce před nájездem do zatáčky a vypnuta jezdce po projetí zatáčkou.
- Úhel roll je natočení kolem osy X, která je ve směru jízdy (viz. Eulerovy úhly) a udává nám naklonění motocyklu.
- Data z BNO055 jsou vyčítána a zaznamenávána na SD kartu tak rychle, jak to dané shieldy zvládají. Občas se stává, že SD shieldu trvá záznam podstatně déle, a tedy výrazně prodlouží čas do dalšího vzorku dat, proto jsou v průbězích časové skoky (například u první vzestupné hrany průběhu reprezentujícího stav směrových světel).

Při prvním pohledu na graf je hned patrná první komplikace, značná oscilace hodnot úhlové rychlosti. Úhlové rychlosti kolem zbývajících os jsou stejně zašuměné. Aby bylo možné provést vyhodnocení okamžiku ukončení odbočovacího manévru zařízením, je nutné průběh vyhladit (zbavit šumu). Toho jde docílit použitím vhodné filtrace, ale o tom později.

První odbočení je provedeno doleva. Motorkář se společně s motocyklem nahýbá do odbočení, což je patrné z klesající úhlové rychlosti do záporných hodnot. Úhlová rychlost je záporná, protože náklon doleva je rotací do záporného směru (viz podkapitola 6.1.1 Popis os jednotlivých snímačů). O náklonu doleva nás informuje i do kladna rostoucí úhel roll. Po průjezdu vrcholovým bodem odbočení se začíná motocykl vracet do přímé pozice. Tento návrat je patrný z kladné půlplny úhlové rychlosti a z klesajícího úhlu roll k nule. Ukončení odbočovacího manévru je signalizováno vypnutím směrového světla. Je vidět, že k němu dojde přibližně v době, kdy se úhlová rychlost i úhel roll nalézají v okolí nuly, tedy při vyrovnání motocyklu. Tento poznatek je více patrný u druhého odbočovacího manévru (doprava). Okamžik vypnutí směrového světla je závislý na zvyku jezdce. Někdo jej vypne o pár sekund dříve, někdo později, a proto k vypnutí dochází v různých okamžicích po narovnání motocyklu. Je patrné, že můj teoretický předpoklad byl správný. Algoritmus prototypu je založen na tomto teoretickém předpokladu, který se ukázal být správným.

Druhý odbočovací manévr (odbočení vpravo) nebudu popisovat, protože je principiálně shodný s odbočením vlevo. Rozdíl je pouze v tom, že se motocykl naklání vpravo, a tedy úhlová rychlost a úhel roll mají opačnou polaritu oproti odbočování vlevo.

Použití Eulerových úhlů s sebou nese určité omezení, jejich přesnost je významně závislá na stavu kalibrace všech senzorů, jelikož je dopočítávána z dat oněch senzorů. Při nízkém kalibračním statusu (0 a 1) „nula plave“, a tedy vyčítané úhly neodpovídají reálné situaci. Pro zpřesnění vyčítaných úhlů roll je nutné provést offset, protože zařízení není umístěno přesně v rovině motocyklu. Hodnota offsetu je nastavena tak, aby při narovnaném motocyklu (motocykl je kolmo k zemi) byl úhel roll (náklon) nulový.

7.1.1 Filtrace dat

Pro filtraci jsem použil klouzavý průměr s exponenciálním zapomínáním. Výhodou oproti jednoduchému klouzavému průměru je, že si není nutné pamatovat všechny vzorky pro výpočet průměru, stačí pouze nejnovější vzorek a minulá hodnota průměru. Výpočet je ukázán ve vztahu č.9.

Způsob výpočtu:

$$\alpha = \frac{w}{128} \quad (8)$$

$$avg_k = \alpha * x_n + (1 - \alpha) * avg_{k-1} \quad (9)$$

Kde:

α je váha filtru, která nabývá hodnot od 0 do 1

w je zadávaná váha filtru v programu, nabývající hodnot od 0 do 128

avg_k je nový průměr (vyfiltrovaná hodnota)

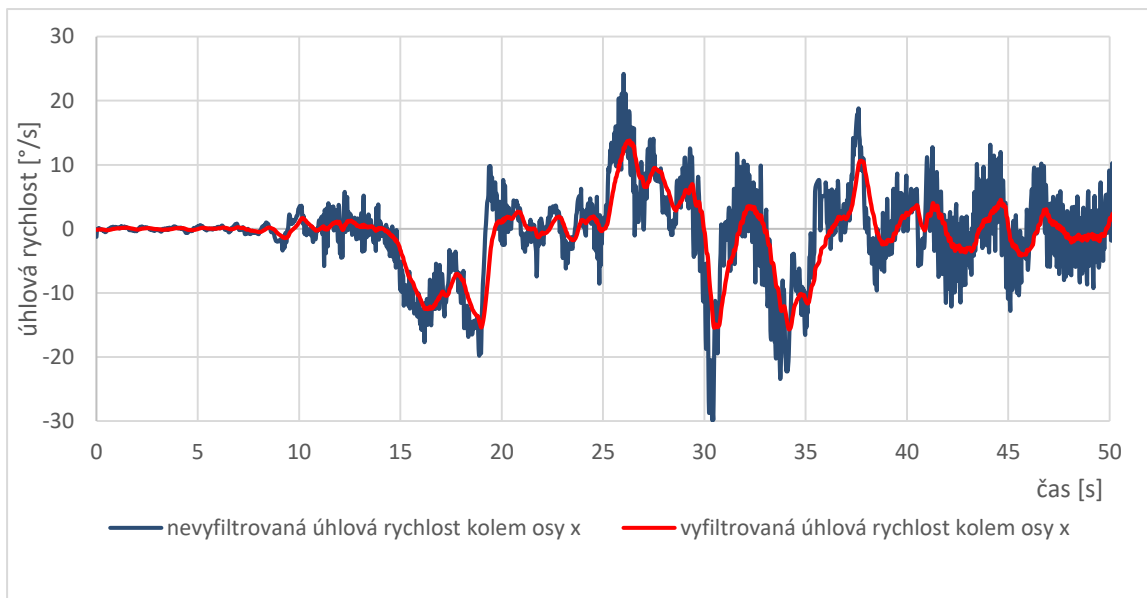
avg_{k-1} je předešlý průměr (předešlá vyfiltrovaná hodnota)

x_k nový vzorek

Čím je větší váha filtru (α , w), tím rychleji reaguje výstup na změny vstupních dat, ale výstup není moc vyhlazen. Při menší váze je výstup více vyhlazen, ale neochotně reaguje na změny vstupních dat. Váha filtru byla stanovena testováním tak, aby data byla dostatečně vyhlazena a zároveň i přiměřeně rychle reagovala na změny. Pro veškeré filtrování dat byla stanovena váha filtru „w“ na hodnotu 9 ($\alpha = 9 / 128$).

V programu je pro filtrování použita knihovna „Filter.h“, která je zahrnutá v balíčku knihoven MegunoLink Arduino Library. Jedná se o knihovnu třetí strany, ne mojí vlastní. Výpočet v knihovně je lehce upraven podle přechozího vztahu (9). Inicializování knihovny zahrnuje váhu filtru (w) a počáteční hodnotu průměru, která je zvolena jako 0.

Na následujícím grafu vidíme porovnání vyfiltrované a nevyfiltrované hodnoty úhlové rychlosti kolem osy X. Je vidět, že vyfiltrovaná hodnota vypadá použitelně pro vyhodnocovací algoritmus.



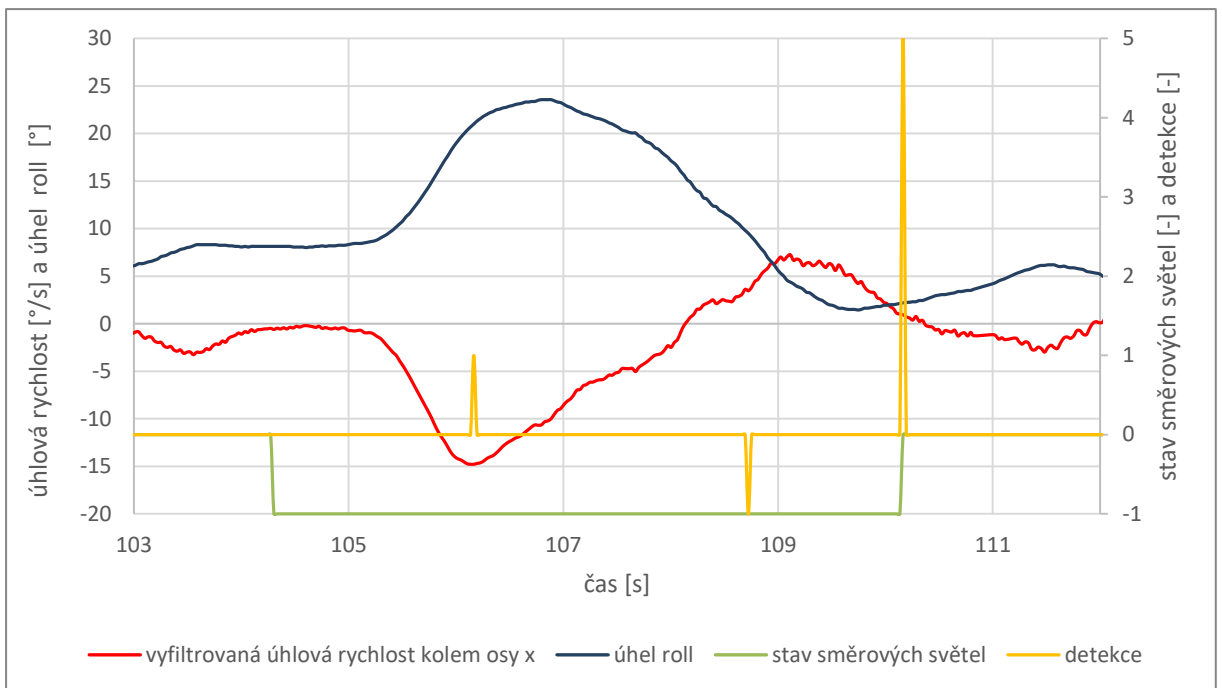
Graf 2 Porovnání vyfiltrované a nevyfiltrované úhlové rychlosti

7.1.2 Popis algoritmu pro rozpoznání ukončení odbočovacího manévru

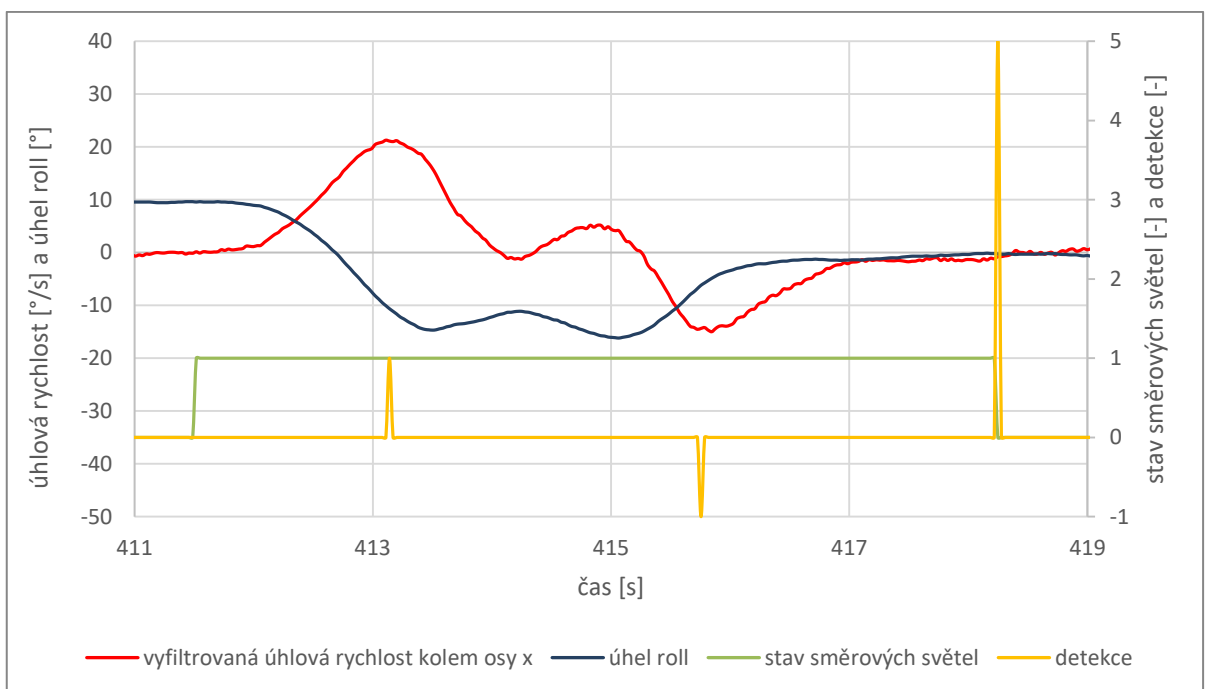
K vyhodnocení rozpoznání ukončení odbočovacího manévru dochází jen tehdy, když jezdec dá povel k zapnutí směrového světla, a když je motocykl v pohybu. Při stání je vyhodnocení vypnuté. Po opětovném uvedení do pohybu je vyhodnocení restartováno a jeho proměnné (nesoucí informaci například o tom, jestli byla detekována maximální úhlová rychlost náklonu do odbočení) jsou resetovány na výchozí hodnoty.

Nejdříve dochází k hledání maximální úhlové rychlosti náklonu do odbočení. Po jejím nalezení se hledá maximální úhel roll, který též značí maximální náklon motocyklu do odbočení, popřípadě jestli jí už nebylo dosaženo. Zároveň probíhá hledání maximální úhlové rychlosti při narovnávání motocyklu. Po identifikování maximálního úhlu roll a maximální úhlové rychlosti při narovnávání motocyklu se čeká na návrat úhlové rychlosti i úhlu roll do okolí nuly. Po jejich návratu je vypnuto směrové světlo, protože s největší pravděpodobností došlo k ukončení odbočovacího manévru. Algoritmus lze používat i bez vyhodnocení úhlu roll. Úspěšnost vyhodnocení ukončení odbočení s a bez použití úhlu roll je zhruba shodná, avšak se snižující se kalibrační senzory klesá i úspěšnost vyhodnocení s použitím úhlu roll.

Algoritmus rozpoznání ukončení odbočovacího manévru je popsán v následujícím textu. Pro názornější vysvětlení jsou níže uvedeny dva grafy vytvořené z dat zaznamenaných při jízdě motocyklu.



Graf 3 Automatické vypnutí směrových světel po odbočení vlevo



Graf 4 Automatické vypnutí směrových světel po odbočení vpravo

Popis grafů:

- Stav směrových světel reprezentuje vypnutá nebo zapnutá příslušná směrová světla. Kde „0“ je vypnutá směrová světla, „-1“ je zapnutá směrová světla doleva a „1“ je zapnutá směrová světla doprava.
- Detekce signalizuje, kdy zařízení rozpoznalo jednotlivé stavy probíhajícího vyhodnocení. Kde „1“ je detekování maximální úhlové rychlosti náklonu do odbočení, „-1“ je detekování maximální úhlové rychlosti při narovnávání motocyklu, a „5“ je detekování návratu úhlové rychlosti do okolí nuly.

Hledání maximální úhlové rychlosti náklonu do odbočení

a) Odbočení vlevo:

Porovnává se, jestli je aktuální hodnota úhlové rychlosti kolem osy X větší než minulá. Jestli-že je, tak bylo dosaženo maximální hodnoty (jedná se o vrchol záporné půlvlny). Podmínkou je, že aktuální hodnota úhlové rychlosti musí být větší než $-2,5 \text{ }^\circ/\text{s}$ (v kódu konstanta *DolniMezGyroX*). Toto omezení (mez) je zde pro zabránění identifikace maximální hodnoty u pomalých pohybů, stejně tomu je i u odbočování vpravo.

b) Odbočení vpravo:

Porovnává se, jestli je aktuální hodnota úhlové rychlosti kolem osy X menší než minulá. Jestli-že je, tak bylo dosaženo maximální hodnoty (jedná se o vrchol kladné půlvlny). Zde je podmínkou, že aktuální hodnota úhlové rychlosti musí být větší než $2,5 \text{ }^\circ/\text{s}$ (v kódu konstanta *HorniMezGyroX*).

Jakmile dojde k nalezení maximální úhlové rychlosti náklonu do odbočení (vrcholu) je zamezeno tomu, aby při dalším průchodu smyčkou došlo k opětovnému vyhodnocování. Na to slouží proměnná (v kódu proměnná *MAX_naklon*) nesoucí informaci o stavu hledání tohoto maxima (true = nalezeno, false = nenalezeno). Při nalezení maxima se též uloží čas jeho detekování (v kódu proměnná *t_MAX_naklon*).

Hledání maximální úhlové rychlosti při narovnávání motocyklu

Toto hledání probíhá až po nalezení maximální úhlové rychlosti náklonu do odbočení.

a) Odbočení vlevo:

Porovnává se, jestli je aktuální hodnota úhlové rychlosti kolem osy X menší než minulá hodnota (úhlové rychlosti). Jestli-že je, tak bylo dosaženo maximální hodnoty

(jedná se o vrchol kladné půlvlny). Podmínkou je, že aktuální hodnota úhlové rychlosti musí být větší než $2,5 \text{ }^\circ/\text{s}$ (v kódu konstanta *HorniMezGyroX*). Tato hranice opět slouží pro zamezení identifikace maximální hodnoty při nízkých úhlových rychlostech.

b) Odbočení vpravo:

Porovnává se, jestli je aktuální hodnota úhlové rychlosti kolem osy X větší než minulá hodnota (úhlové rychlosti). Jestli-že je, tak bylo dosaženo maximální hodnoty (jedná se o vrchol záporné půlvlny). Podmínkou je, že aktuální hodnota úhlové rychlosti musí být menší než $-2,5 \text{ }^\circ/\text{s}$ (v kódu konstanta *DolniMezGyroX*). Funkce této hranice je stejná jako u odbočování doleva.

Po nalezení maximální hodnoty úhlové rychlosti při narovnávání motocyklu, je zamezeno opětovnému hledání při dalších průchodech smyčkou, dokud není hledání znovu povoleno. I zde k tomu, stejně jako v minulém případě, slouží speciální proměnná (v kódu proměnná *MAX_navrat*). Při nalezení maxima se též uloží čas jeho detekování (v kódu proměnná *t_MAX_navrat*).

Nalezení tohoto maxima prototypem (programem) je vidět na uvedených grafech. Z grafu pro odbočení vlevo je vidět, že k nalezení maxima (vrcholu) prototypem nedošlo při skutečné maximální hodnotě. Důvodem je to, že porovnáváme pouze dvě hodnoty, a tedy když dojde k nečekanému poklesu aktuální hodnoty oproti minulé, je tento stav vyhodnocen jako nalezení maxima, i když jím ve skutečnosti není. Tento stav může nastat i při hledání maximální úhlové rychlosti náklonu do odbočení. Testy ukázaly, že tyto mylné detekce nejsou nebezpečné, a tedy nebyly dále řešeny.

Hledání maximálního úhlu roll do odbočení

Spočívá v hledání maximálního náklonu motocyklu do odbočení. K tomuto hledání dochází až po nalezení maximální úhlové rychlosti náklonu do odbočení. Po nalezení maximálního úhlu roll se nastaví příznak nalezení (v kódu proměnná *MAX_naklon_eulerZ*), pomocí kterého je zabráněno opětovnému hledání při dalších průchodech smyčkou, dokud není znovu povoleno.

a) Odbočení vlevo:

Porovnává se, jestli je aktuální hodnota úhlu roll menší než minulá. Musí být splněna i podmínka, že aktuální hodnota úhlu roll je větší než $0,1$ (v kódu konstanta *HorniMezEulerZ*). Tato hranice slouží opět jako ochrana proti špatné identifikaci.

Jestliže je aktuální hodnota menší než minulá a je splněna podmínka s minimální hodnotou úhlu roll, tak bylo dosaženo vrcholu.

b) Odbočení vpravo:

Porovnává se, jestli je aktuální hodnota úhlu roll větší než minulá. Musí být splněna i podmínka, že aktuální hodnota úhlu roll je menší než -0,1 (v kódu konstanta *DolniMezEulerZ*). Tato hranice má stejnou funkci jako u odbočování vlevo. Jestliže je aktuální hodnota větší než minulá a je splněna podmínka s minimální hodnotou úhlu roll, tak bylo dosaženo vrcholu.

Detekce rychlých změn úhlové rychlosti v ose x

Slouží pro resetování celého algoritmu rozpoznání dokončení odbočovacího manévru při příliš rychlém sledu detekování maximální úhlové rychlosti náklonu do odbočení a maximální úhlové rychlosti při narovnávání motocyklu. Tato rychlá změna není způsobena náklonem do odbočení a ani návratem z tohoto náklonu. Může být způsobena například udržováním stability motocyklu jezdce při nízké rychlosti. Tyto rychlé změny nesmí vést k mylnému vyhodnocení ukončení odbočovacího manévru.

Princip funkce je velice jednoduchý. Vypočítá se rozdíl času, kdy došlo k vyhodnocení maximální úhlové rychlosti při narovnávání motocyklu a času nalezení maximální úhlové rychlosti náklonu do odbočení ($t_{MAX_navrat} - t_{MAX_naklon}$). Pokud je tento čas menší nebo rovný meznímu (v kódu konstanta *MezniRychlostZmenyGyroX*), jedná se o rychlou změnu, kterou program ignoruje a hledá další maximum. Směrová světla se nevypnou. Mezní čas je v programu nastaven na 500 ms.

Tato detekce je stejná pro oba směry odbočení (vpravo/vlevo). Samozřejmě k této detekci dochází pouze tehdy, když došlo k nalezení maxim úhlových rychlostí náklonu do odbočení a narovnávání motocyklu.

Detekce návratu úhlu roll k okolí nuly

Pokud bylo nalezeno maximum úhlu roll do odbočení, provádí se hledání návratu úhlu roll do okolí nuly. Jinými slovy, se zjišťuje, jestli se motorka plně vyrovnala.

Hledání je prováděno tak, že se zjišťuje, jestli je aktuální hodnota úhlu roll v určitých mezích okolo nuly (v kódu konstanty *HorniMezOkoliNulyEulerZ* a *DolniMezOkoliNulyEulerZ*). Jelikož na hodnotu úhlu roll není příliš velký spoleh, je rozmezí okolí nuly široké. Toto rozmezí je stanoveno na interval $(-7 ; 7)^\circ$. Detekce je stejná pro oba dva směry odbočení.

Po detekování návratu k okolí nuly se zamezí tomu, aby se při dalších průchodech smyčkou vykonávalo hledání znovu, dokud není opět povoleno. Na to slouží proměnná (v kódu proměnná *NavratKnule_eulerZ*) nesoucí informaci o stavu návratu do okolí nuly (true = návrat detekován, false = návrat ještě nedetekován).

Detekce návratu úhlové rychlosti kolem osy X k okolí nuly

Pokud byla nalezena maxima úhlových rychlostí (náklonu do odbočení a narovnávání motocyklu) a byl rozpoznán návrat úhlu roll k okolí nuly, dojde k hledání návratu úhlové rychlosti do okolí nuly. Tento návrat reprezentuje vyrovnání motocyklu, stejně jako předešlý.

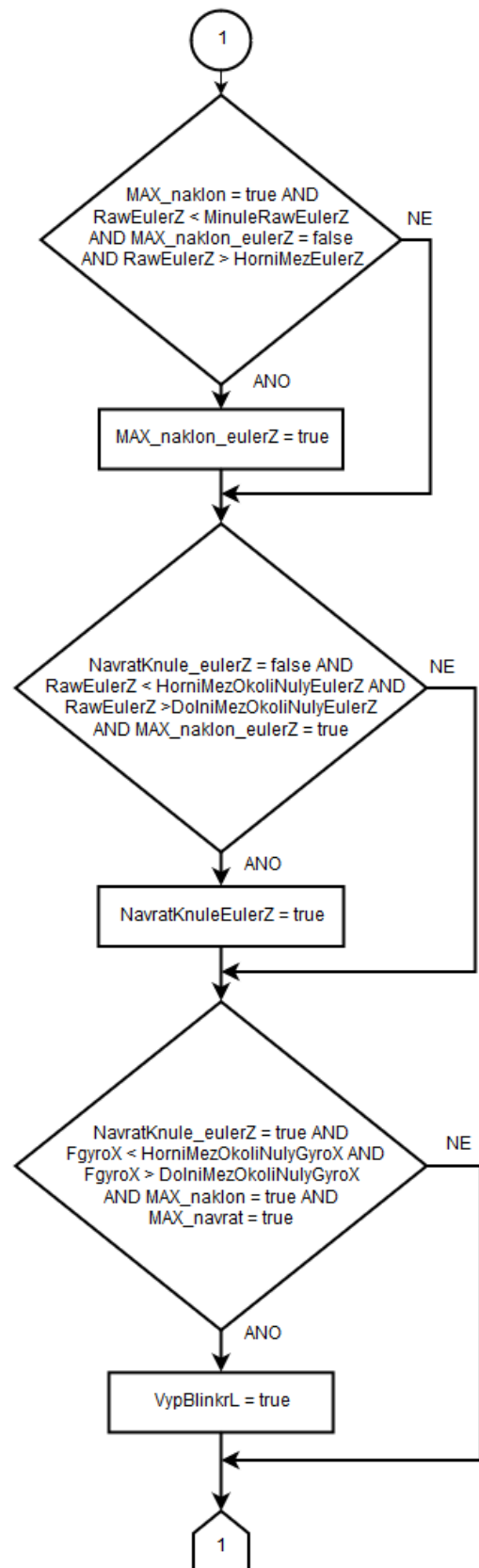
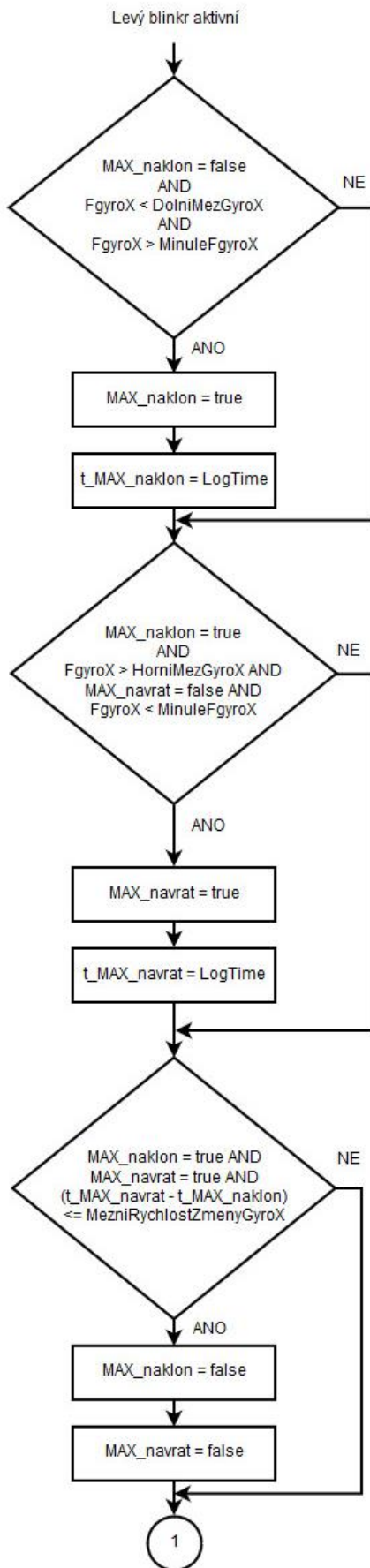
Návrat je rozpoznán tak, že se úhlová rychlost vrátí do okolí nuly, které je vymezeno určitými hranicemi (v kódu konstanty *HorniMezOkoliNulyGyroX* a *DolniMezOkoliNulyGyroX*). Rozmezí okolí nuly je stanoveno na interval $(-0,95;0,95)$ °/s. Detekce je stejná pro oba dva směry odbočení.

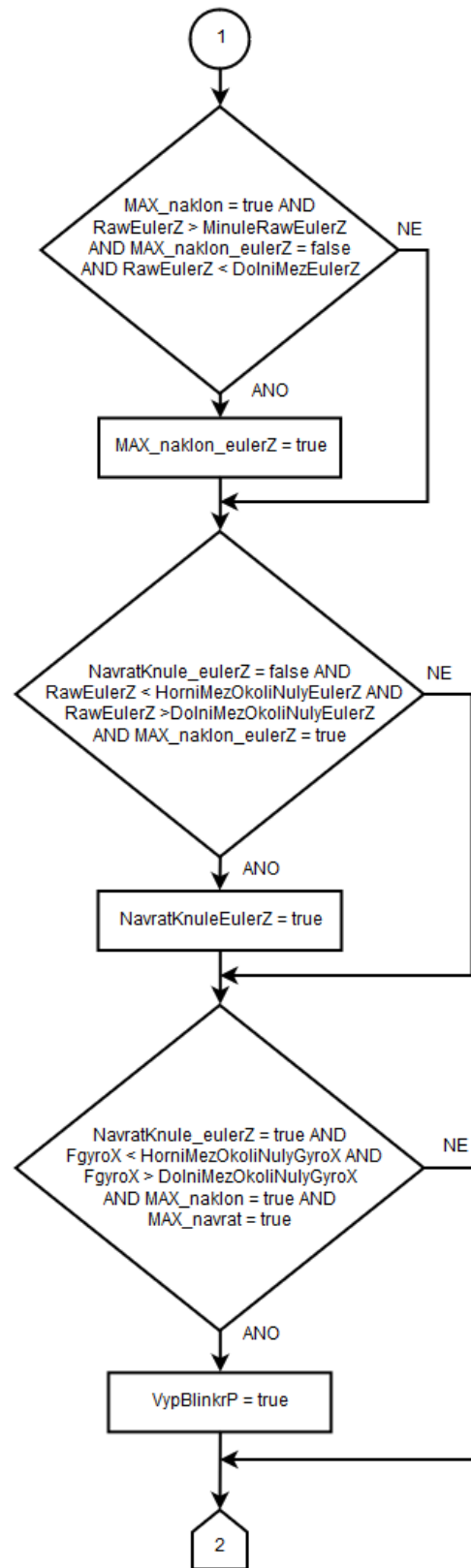
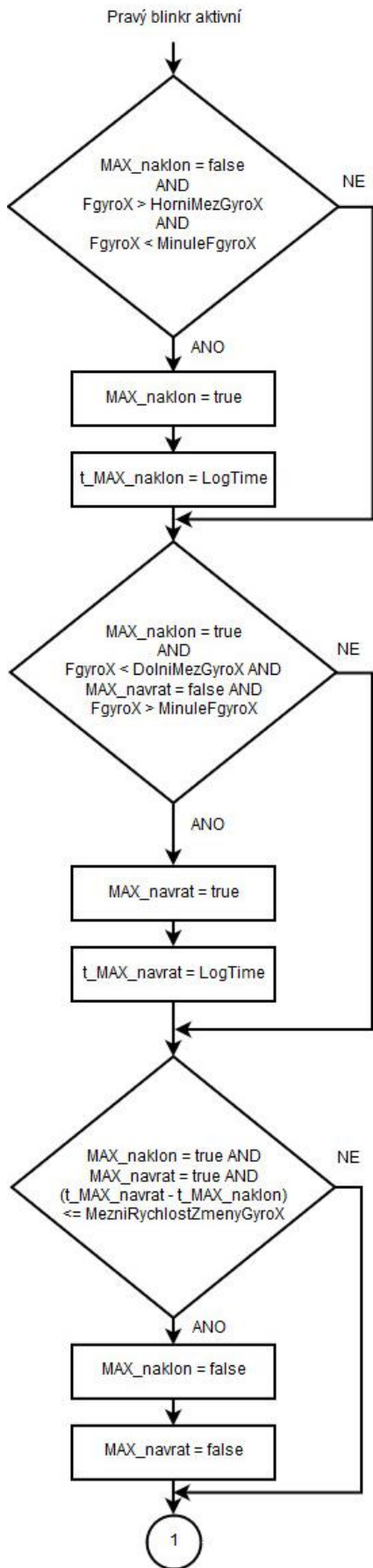
Rozpoznání tohoto návratu značí ukončení odbočovacího manévru, a proto dojde k vypnutí směrových světel. Vypnutí směrových světel i detekce návratu k nule je vidět na uvedených grafech.

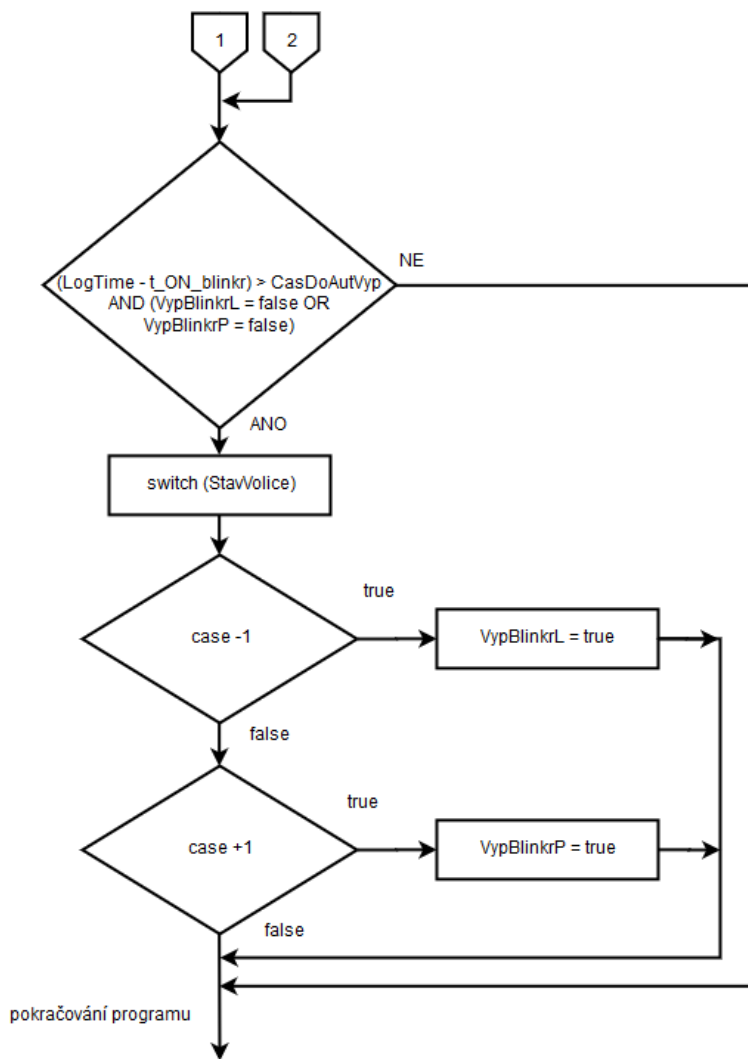
Vypnutí směrových světel při nedetekování odbočení do určité doby

Slouží pro vypnutí směrových světel při situaci, kdy nedojde k identifikování ukončení odbočení, a to díky jakémukoliv vlivu. Princip funkce je jednoduchý. Vypočítává se rozdíl mezi aktuálním časem a časem, kdy došlo k zapnutí blinkru. Pokud je tento rozdíl větší nebo rovný meznímu (v kódu konstanta *CasDoAutVyp*), dojde k vypnutí směrových světel. Mez je v programu nastavena na 30 s. Tato funkce je společná pro oba směry.

7.1.3 Vývojový diagram







Legenda k vývojovému diagramu:

- Celý algoritmus běží s pevně danou 30 ms periodou.
- Při zapnutí směrového světla jezdce se uloží čas sepnutí do proměnné *t_ON_blinkr*.
- Nastavení proměnných při zapnutí zařízení:
 - *MAX_naklon* = false
 - *MAX_navrat* = false
 - *MAX_naklon_eulerZ* = false
 - *NavratKnule_eulerZ* = false
 - *VypBlinkrL* = false
 - *VypBlinkrP* = false
- Když proměnná *VypBlinkrL* nebo *VypBlinkrP* je true (požadavek na vypnutí směrových světel) tak v následující části programu dojde k vypnutí příslušných směrových světel a k resetování všech výše zmíněných proměnných na výchozí hodnoty (hodnoty po zapnutí).

7.1.4 Seznam konstant pro nastavení algoritmů detekce ukončení odbočení

Název konstanty	Hodnota konstanty	Jednotka
<i>HorniMezEulerZ</i>	0,1	°
<i>DolniMezEulerZ</i>	-0,1	
<i>HorniMezOkoliNulyEulerZ</i>	7	
<i>DolniMezOkoliNulyEulerZ</i>	-7	
<i>HorniMezGyroX</i>	2,5	°/s
<i>DolniMezGyroX</i>	-2,5	
<i>HorniMezOkoliNulyGyroX</i>	0,95	
<i>DolniMezOkoliNulyGyroX</i>	-0,95	
<i>MezniRychlostZmenyGyroX</i>	500	ms
<i>CasDoAutVyp</i>	30 000	

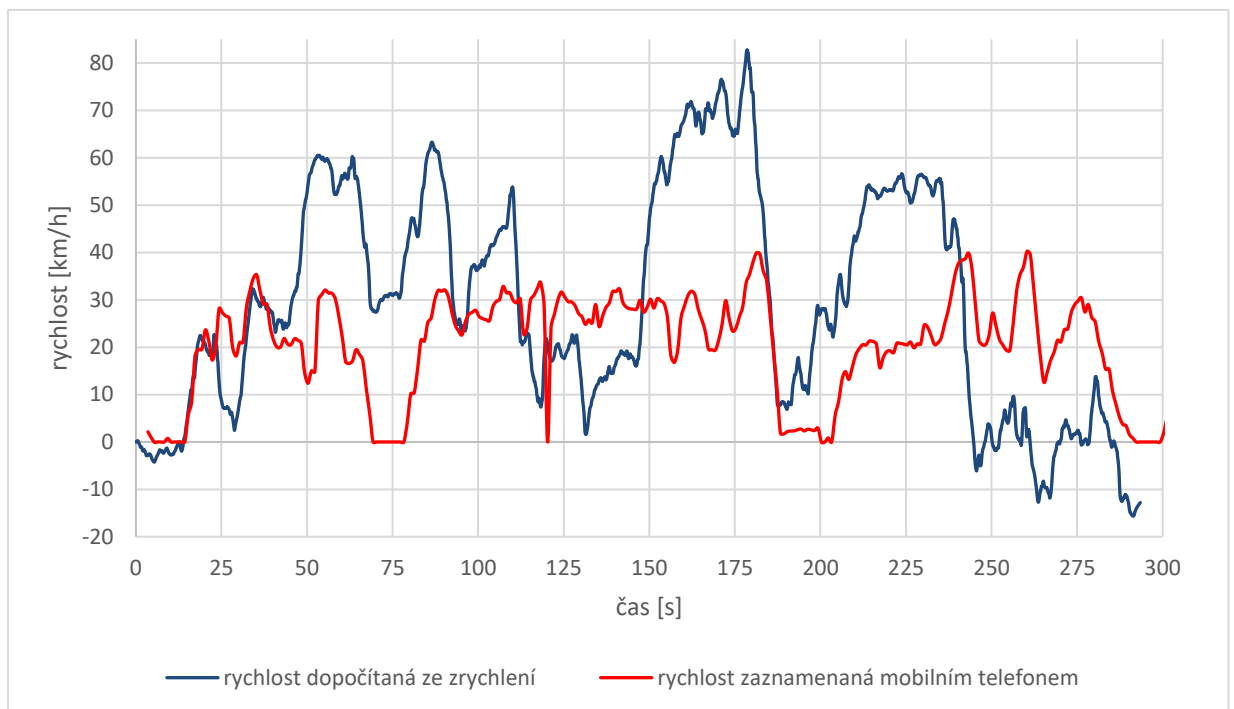
Tabulka 3 Seznam konstant pro nastavení algoritmu vyhodnocení ukončení odbočení

Význam konstant je zmíněn v podkapitole 7.1.2 Popis algoritmu pro rozpoznání ukončení odbočovacího manévru.

7.2 Rozpoznání stání motocyklu pomocí dopočítané rychlosti

Získání rychlosti ze zrychlení v ose X je popsáno v podkapitole 3.3.1 Výpočet rychlosti ze zrychlení. Vyčítané hodnoty zrychlení značně oscilují, proto je i zde použita filtrace. Filtrace je stejná jako u gyroskopu (viz 7.1.1 Filtrace dat), filtr má i stejnou váhu (9).

Pojďme se podívat na to, jak vypadá průběh rychlosti dopočítaný z dat zaznamenaných při jízdě motocyklu. V následujícím grafu je zobrazena rychlost dopočítaná ze zaznamenaného zrychlení v ose X a rychlost zaznamenaná pomocí GPS v mobilním telefonu. Dopočet rychlosti je proveden z vyfiltrovaného zrychlení v ose X.



Graf 5 Porovnání vypočtené a zaznamenané rychlosti

Z tohoto grafu je patrné, že vypočítaná rychlost pomocí numerické integrace akcelerace v ose X vůbec nekoresponduje se skutečnou rychlostí (zaznamenaná mobilním telefonem), a ani z ní není možné s jistotou určit, v jakém okamžiku došlo k zastavení motocyklu.

Nepřesnost výpočtu je způsobena tím, že akcelerometr není při jízdě umístěn přesně ve směru pohybu, a jeho úhel náklonu vůči směru pohybu se během jízdy mění v důsledku pro pružení tlumičů motocyklu. Důsledkem je, že data z akcelerometru nejsou čisté zrychlení ve směru pohybu. Abychom dostali hodnotu zrychlení pouze ve směru pohybu motocyklu, je nutné kompenzovat náklon akcelerometru a další vlivy (např. nestabilita nuly akcelerometru,

vibrace atd.). Kompenzace je složitá, a proto byl tento způsob rozpoznání stání pomocí rychlosti zavrhnut.

7.3 Rozpoznání stání motocyklu pomocí měření vibrací

Tento způsob rozpoznání stání umožňuje detekovat stání vozidla bez informace o jeho rychlosti. Princip spočívá v měření vibrací v ose Z pomocí akcelerometru. Při jízdě vozidla jsou vibrace větší než při jeho stání. Díky tomuto poznatku lze určit, kdy je vozidlo v pohybu a kdy stojí. Vyhodnocení se provádí pomocí směrodatné odchylky, která je při jízdě znatelně větší než při stání, kdy se pohybuje v okolí nuly. Bližší informace byly již uvedeny v kapitole 3.3.2 Rozpoznání stání pomocí vibrací.

Vyčítané hodnoty zrychlení značně oscilují, proto je i zde použita filtrace. Filtrace je stejná jako u gyroskopu (viz 7.1.1 Filtrace dat), filtr má i stejnou váhu (9).

Směrodatná odchylka je počítána pomocí knihovny *Statistics.h*, nejedná se o mou knihovnu. Při inicializování knihovny je potřeba zadat počet odebíraných vzorků. Počet vzorků, ze kterých se počítá směrodatná odchylka je potřeba naladit podle měřených dat, v mém případě byl zvolen na 20. Výpočet směrodatné odchylky knihovnou je proveden tak, že se nejdříve vypočítá rozptyl, a následným odmocněním rozptylu se získá směrodatná odchylka.

Výpočet směrodatné odchylky v knihovně Statistics:

```
if (mCurrNumSamples >= mNumSamples)
{
    mTotal = mTotal * (mNumSamples - 1) / mNumSamples;
    mRefVariance = mRefVariance * (mNumSamples - 1) / mNumSamples;
}
else
    mCurrNumSamples++;
mTotal += val;
mRefVariance += val*val;

mean = mTotal / mCurrNumSamples;
variance = (mRefVariance - (mCurrNumSamples * sqr(mean))) / mCurrNumSamples;
stdDeviation = sqrt(variance);
```

[32]

Kde:

mCurrNumSamples je číslo aktuálního vzorku

mNumSamples je počet odebíraných vzorků (v mém případě 20)

mean je aktuální průměr

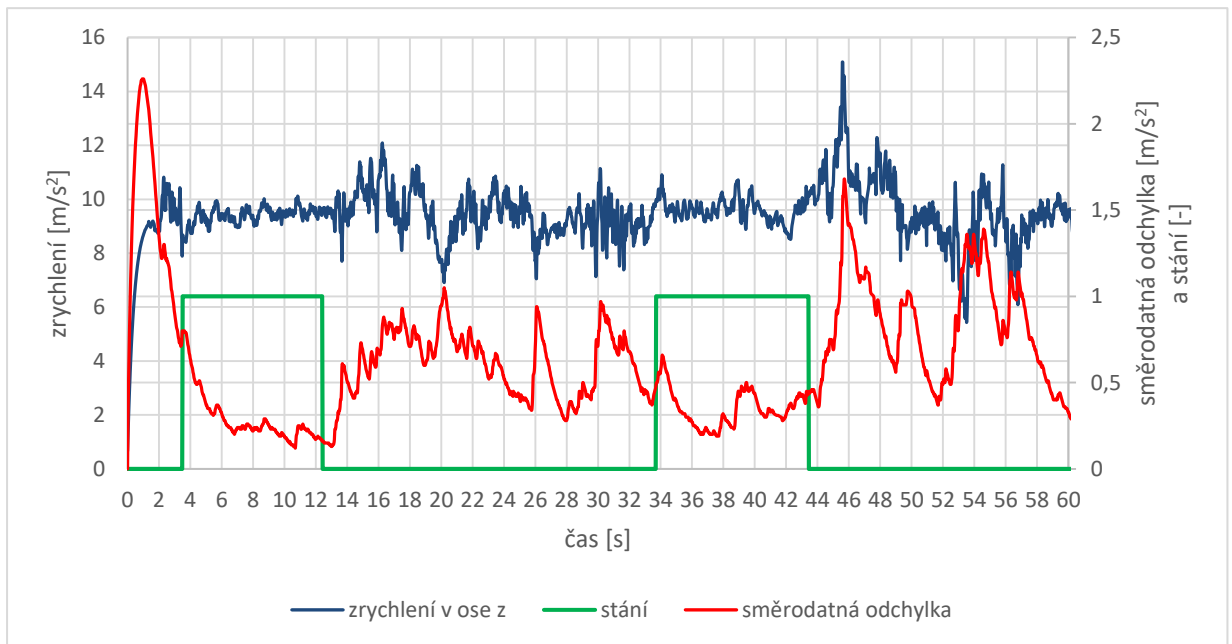
variance je aktuální odchylka

stdDeviation je aktuální směrodatná odchylka

sqr znamená druhou mocninu

sqrt znamená druhou odmocninu

V následujícím grafu je zobrazen průběh zaznamenaných dat při jízdě motocyklu. V grafu jsou vyznačena místa, ve kterých došlo k zastavení. Okamžiky zastavení jsou označeny jezdcem pomocí stisku tlačítka.



Graf 6 Vyhodnocení zastavení motocyklu z vibrací v ose Z

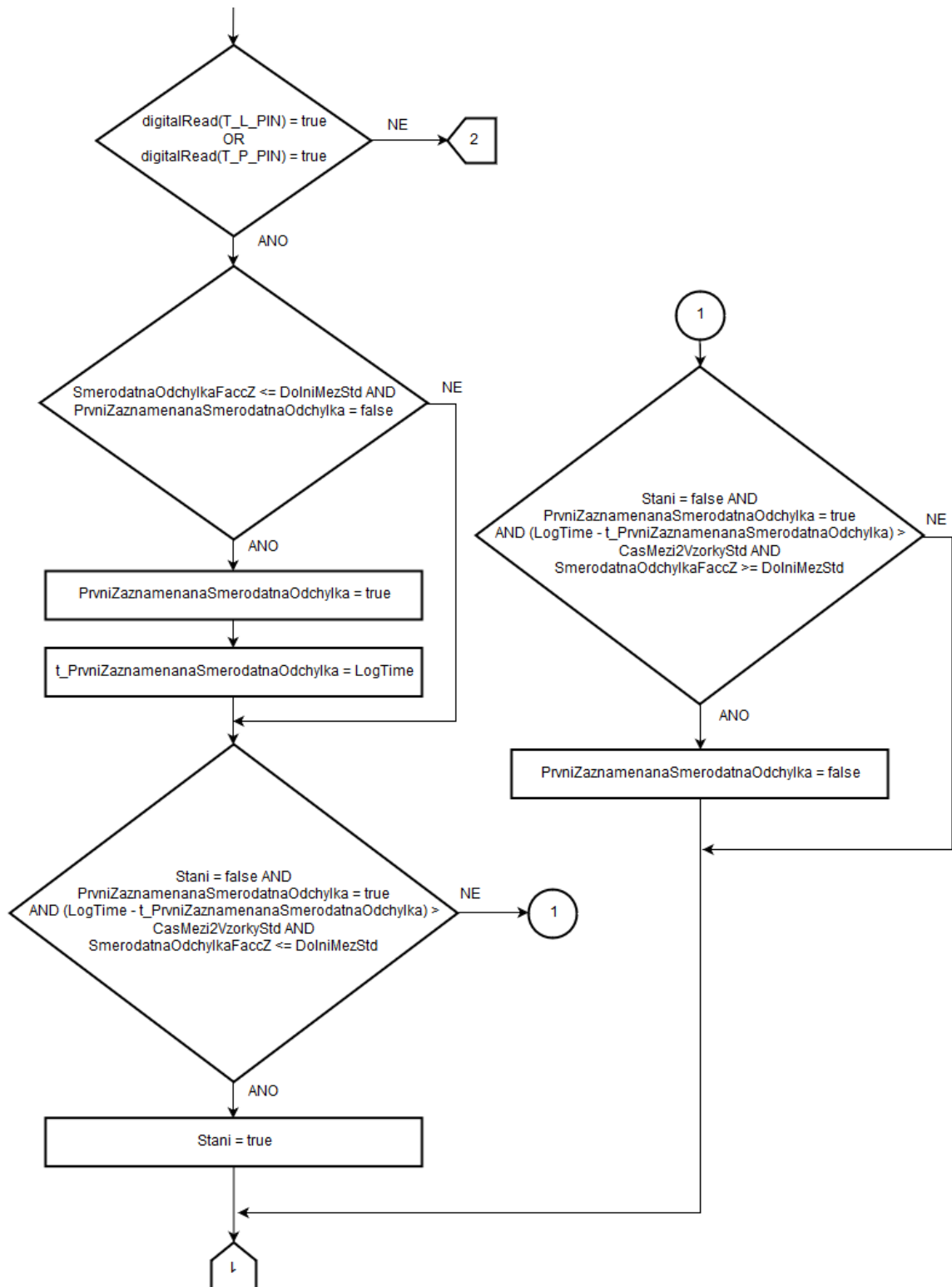
Legenda grafu:

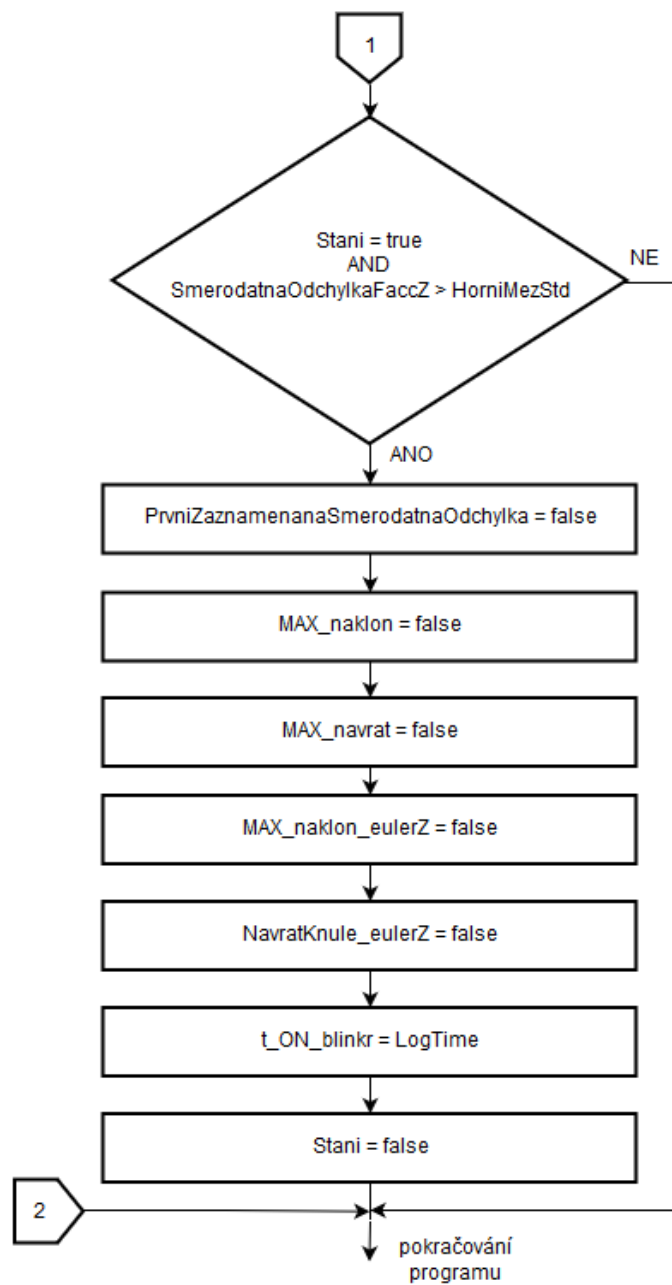
- Průběh stání vyjadřuje okamžiky, kdy motocykl stojí. Kde „1“ motocykl stojí a „0“ motocykl je v pohybu.
- Zrychlení je filtrováno.

Z grafu je vidět, že rozptyl hodnot zrychlení při stání je menší, a tedy i směrodatná odchylka je nízká. Naopak při pohybu je rozptyl hodnot zrychlení větší, a směrodatná odchylka je logicky větší. Je vidět, že pro identifikaci stání je opravdu možné využít směrodatnou odchylku, touto cestou jsem se vydal.

Při stání je směrodatná odchyl v rozmezí přibližně 0 až 0,6 m/s². Tohoto poznatku jsem využil při návrhu algoritmu. Výsledný algoritmus funguje tak, že pokud jsou dvě hodnoty směrodatné odchylky, které jsou od sebe vzdáleny daný čas (v kódu konstanta *CasMezi2VzorkyStd*), menší než stanovená mez (v kódu konstanta *DolniMezStd*), tak motocykl stojí. Při stání je zamezeno vyhodnocování ukončení odbočovacího manévru, tzn. že směrová světla blikají dál. a algoritmus čeká na průjezd zatáčkou, aby až poté vypnul směrová světla. Čas mezi jednotlivými hodnotami směrodatné odchylky jsem stanovil na 2 s. Mez směrodatné odchylky, která je považována za stání, byla testováním stanovena na hodnotu 0,3 m/s². Opětovný rozjezd je rozpoznán nárůstem směrodatné odchylky nad danou hodnotu (v kódu konstanta *HorniMezStd*). Tuto hodnotu jsem testováním zvolil na 0,6 m/s². Po zaregistrování rozjezdu se spustí algoritmus vyhodnocení ukončení odbočovacího manévru, který po projetí zatáčkou vypne směrová světla. Celý algoritmus vyhodnocení stání běží pouze, když je zapnuto pravé nebo levé směrové světlo.

7.3.1 Vývojový diagram





7.3.2 Seznam konstant pro nastavení algoritmu detekce stání

Název konstanty	Hodnota konstanty	Jednotka
<i>HorniMezStd</i>	0,6	m/s ²
<i>DolniMezStd</i>	0,3	
<i>CasMezi2VzorkyStd</i>	2 000	ms

Tabulka 4 Seznam konstant pro nastavení algoritmu stání

Význam konstant je zmíněn v podkapitole 7.3 Rozpoznání stání motocyklu pomocí měření vibrací.

7.4 Struktura Arduino projektu

Projekt se skládá z vlastního programu (Arduino file) a knihoven. Veškeré knihovny jsou třetích stran.

Seznam knihoven:

- Adafruit_BNO055 – knihovna pro obsluhu BNO055
- Adafruit_Sensor – knihovna pro sjednocení různých senzorů (BNO055,...)
- imumaths – knihovna pro potřeby Adafruit_BNO055
- matrix - knihovna pro potřeby Adafruit_BNO055
- quaternion - knihovna pro potřeby Adafruit_BNO055
- vector - knihovna pro potřeby Adafruit_BNO055
- Bounce2 – knihovna pro ošetření zákmitů tlačítek
- SD – knihovna pro obsluhu SD shieldu
- Statistics – knihovna pro výpočet směrodatné odchylky
- Filter – knihovna pro filtrování (klouzavý průměr s exponenciálním zapomináním)

8 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ FUNKCE

Veškeré testování bylo provedeno s motocyklem Jawa 125 Dandy. Testovací jízdy byly uskutečněny pouze v areálu pracoviště v Doubravicích (viz. obrázek níže), kde je omezený prostor pohybu a omezená rychlost (30 km/h), nikoliv v reálném provozu.

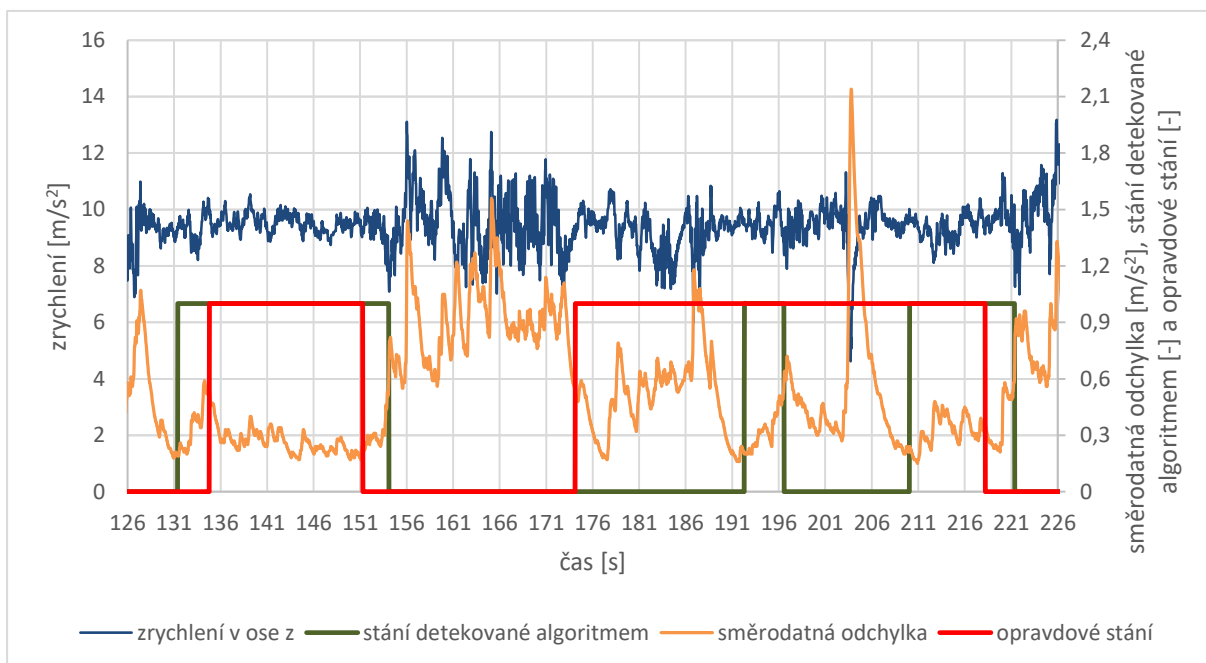


Obrázek 38 Mapa areálu pracoviště v Doubravicích [33]

8.1 Ověření funkce algoritmu vyhodnocení stání motocyklu

Algoritmus vyhodnocení stání se při jízdách projevil jako spolehlivý. Pouze při značném „propérování“ motocyklu při stání (např. při vysednutí ze sedla a následném zasednutí do sedla) došlo v některých případech k mylnému vyhodnocení jízdy motocyklu, a to vedlo k nesprávnému vypnutí směrových světel. Občas také došlo k vypnutí směrových světel těsně před zastavením.

Ukázka naměřených dat



Graf 7 Vyhodnocení stání a jízdy motocyklu

Popis grafu:

- Stání detekované algoritmem vyjadřuje okamžiky, kdy algoritmus vyhodnotil stání motocyklu. Kde „1“ – motocykl stojí, „0“ motocykl je v pohybu.
- Opravdové stání – jedná se o jezdcem označené stání motocyklu. Jezdec při zastavení zmáčkne tlačítko napojené na zařízení a tím signalizoval stání motocyklu. Kde „1“ – motocykl stojí, „0“ motocykl je v pohybu.

Na grafu vidíme průběhy z dat zaznamenaných při jízdě motocyklu po areálu v Doubravících. U prvního zastavení motocyklu je vidět, že je zde určitá časová prodleva mezi algoritmem detekovaným zastavením a označeným zastavením jezdcem. Tato prodleva je zde kvůli tomu, že jezdec není schopný stisknout tlačítko přesně v okamžiku zastavení. Podobná situace je i při rozjezdu, kdy jezdec pustí tlačítko a až za nějakou dobu (pár sekund) se rozjede. Nejedná se tedy o chybu algoritmu. Z prvního zastavení je patrné, že algoritmus správně vyhodnotil okamžik stání motocyklu.

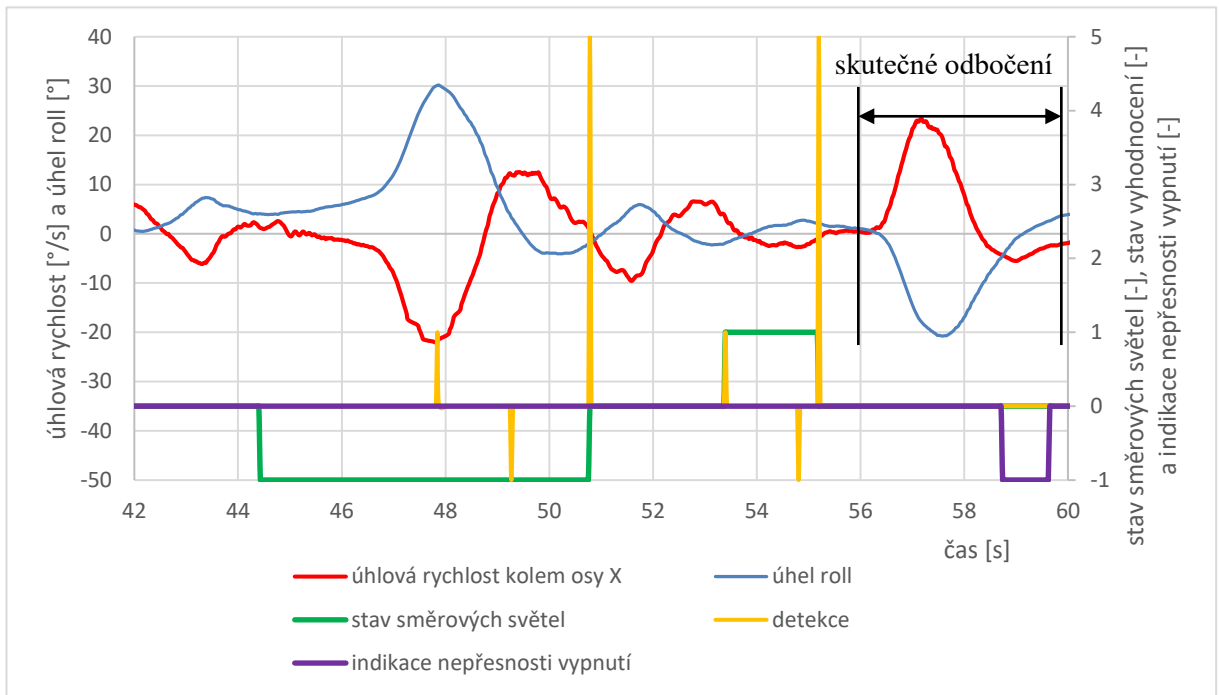
U druhého zastavení je situace krapet komplikovanější. Jezdec se záměrně na motocyklu více „vrtěl“ a razantněji vysedal ze sedla a nasedal na sedlo, aby došlo k otestování limitů algoritmu. Je vidět, že algoritmus nebyl schopný správně určit stání. Skoro celou dobu stání (skutečného) algoritmus vyhodnotil jako jízdu, protože díky velkým vibracím byla směrodatná odchylka mnohem větší než hodnota směrodatné odchylky definující zastavení ($0,3 \text{ m/s}^2$). Dvakrát během tohoto skutečného stání algoritmus rozeznal zastavení.

Z výše uvedeného plyne, že při rázném vysedání jezdce ze sedla a nasedání jezdce na sedlo, popřípadě při větším vrtěním se jezdce není schopný algoritmus úspěšně vyhodnotit stání, a následkem toho by mohlo dojít k nesprávnému vyhodnocení ukončení odbočení. Avšak tato situace byla poměrně krajní, ve většině případů se jezdec při stání nebude takto na motocyklu chovat, a tedy dojde ke správnému určení stání. Z tohoto plyne i nevýhoda tohoto systému vyhodnocení, kdy nevyhodnocujeme stání/jízdu motocyklu z rychlosti, ale jen z projevu spojeného s jízdou a stáním motocyklu. Při použití vyhodnocení na základě rychlosti by k této situaci nedošlo. Ale získat skutečnou rychlost ze zrychlení měřeného akcelerometrem je složité, jako bylo uvedeno v kapitole 7.2 Rozpoznání stání motocyklu pomocí dopočítané rychlosti, proto nebyl zvolen tento přístup.

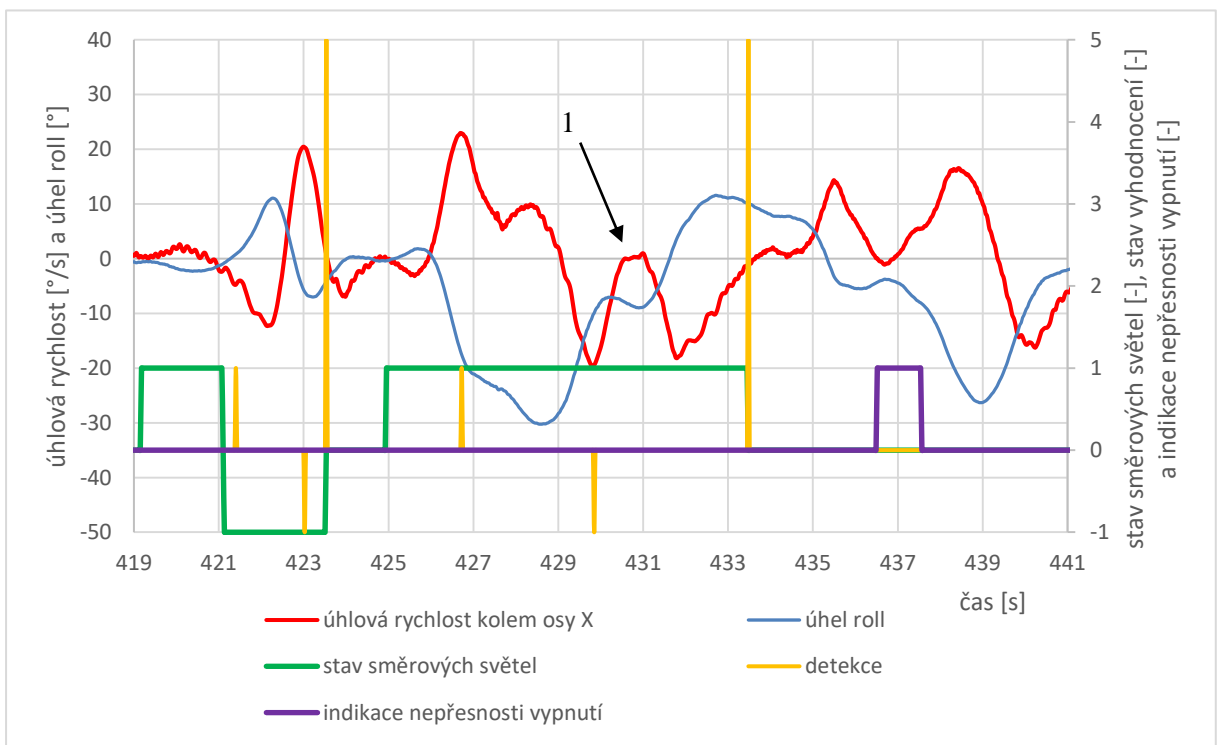
8.2 Ověření funkce algoritmu rozpoznání ukončení odbočovacího manévru

Algoritmus rozpoznání ukončení odbočovacího manévru správně vyhodnotil situaci v přibližně 85 % případů. Ve zbylých 15 % došlo ke špatnému určení ukončení odbočovacího manévru, avšak ve většině z těchto případů nevedlo nesprávné vypnutí směrového světla k nebezpečné situaci. Směrové světlo bylo například vypnuto v průběhu odbočování, a ne až po jeho ukončení. K této situaci docházelo většinou v případech, kdy se jezdec v odbočení vyhýbal nějaké překážce, například kamenu, a díky tomuto pohybu došlo k mylnému vyhodnocení. Změnu pruhu (předjíždění) zvládal systém velice dobře.

Ukázka naměřených dat



Graf 8 Předčasné automatické vypnutí směrových světel



Graf 9 Zpožděné automatické vypnutí směrových světel

Popis grafů:

- Stav směrových světel reprezentuje vypnutá nebo zapnutá příslušná směrová světla. Kde „0“ - vypnutá směrová světla, „-1“ - zapnutá směrová světla doleva a „1“ - zapnutá směrová světla doprava.
- Detekce signalizuje, kdy zařízení rozpoznalo jednotlivé stavy probíhajícího vyhodnocení ukončení odbočovacího manévru. Kde „1“ - detekování maximální úhlové rychlosti náklonu do odbočení, „-1“ - detekování maximální úhlové rychlosti při narovnávání motocyklu, a „5“ - detekování návratu úhlové rychlosti do okolí nuly.
- Indikace nepřesnosti vypnutí reprezentuje nepřesnost vypnutí směrových světel. Tuto informaci zajišťuje jezdec stisknutím jednoho ze dvou tlačítek. Nabývá hodnoty „0“ – k žádné nepřesnosti vypnutí směrových světel nedošlo, „1“ – směrová světla vypnuta příliš pozdě, „-1“ – směrová světla vypnuta příliš brzo.

Z grafu č.8 je patrné, při prvním odbočení (doleva) došlo ke správné identifikaci ukončení odbočovacího manévru a následnému vypnutí směrových světel. Naopak druhé odbočení bylo algoritmem špatně vyhodnoceno. Algoritmus chybně vyhodnotil první zvlnění úhlové rychlosti a úhlu roll jako ukončení odbočení. Z průběhů jde vidět, že ke skutečnému odbočení došlo až následně.

Z grafu č. 9 je patrné, že u prvního odbočení jezdec nejdříve zapnul směrová světla doprava a následně je přepnul doleva. Algoritmus správně vyhodnotil ukončení odbočení doleva a vypnul směrová světla. Při druhém odbočovací manévru došlo ke zpožděnému vypnutí směrových světel. Bodem č. 2 je v grafu vyznačen předpokládaný okamžik dokončení odbočovacího manévru. S největší pravděpodobností algoritmus nevypnul směrová světla kvůli tomu, že nebyla splněna podmínka, že úhel roll dosáhl okolí nuly a úhlová rychlost se nalézá v okolí nuly. Respektive úhlová rychlost byla v okolí nuly, ale úhel roll nikoliv. Když se úhel roll dostal do okolí nuly, tak už nebyla úhlová rychlost v okolí nuly, a proto nedošlo k vypnutí směrových světel. Jakmile úhel roll dosáhl okolí nuly, tak už jen algoritmus čekal až bude úhlová rychlost v okolí nuly, a k tomu právě došlo v místě vypnutí směrových světel.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit fungující prototyp automatického vypínání směrových světel motocyklu po ukončení odbočovacího manévru. A to jak po hardwarové, tak i softwarové stránce. Tohoto cíle bylo dosaženo.

Výsledný prototyp zařízení dokáže poměrně spolehlivě určit okamžik ukončení odbočovacího manévru (cca na 85 %) a vypnout příslušnou sadu směrových světel. Samozřejmostí je zamezení vypnutí směrových světel při stání, například na světelné křižovatce. Po opětovném rozjetí dojde k obnově funkce algoritmu pro vyhodnocení ukončení odbočovacího manévru. Další klíčovou vlastností, kterou zařízení disponuje, je možnost samotným jezdce vypnout směrové světlo nezávisle na stavu vyhodnocení odbočovacího manévru jednoduchým opětovným sepnutím přepínače do aktuálně zvoleného směru. Jezdec také může během jízdy změnit signalizaci směru odbočení pouhým přepnutím přepínače do nového směru, tím se automaticky vypnou původní směrová světla a vyhodnocení a zapnou opačná směrová světla společně se spuštěním nového vyhodnocení. Pokud zařízení nedetekuje odbočení do určitého času, dojde k vypnutí směrových světel.

Výsledný prototyp zařízení se samozřejmě nedá srovnávat s komerčním produktem STS (Smart Turn System), který byl vyvíjen po dobu několika let a při jehož testování byly najety tisíce kilometrů.

Krokem k vylepšení zařízení by bylo doladění algoritmů tak, aby měly větší úspěšnost vyhodnocení než již zmíněných 85 %. Bylo by také užitečné provést testování v ostrém provozu, které by mohlo odhalit další nedostatky. A dále by bylo potřeba zařízení zmenšit a umístit více do středu motocyklu, kde nebudou takové vibrace jako při umístění prototypu na zadním nosiči zavazadel. Tyto vibrace stěžují vyhodnocení, protože do měřených dat zanášejí šum. Tyto zmíněné úpravy by jistě přinesly ke zvýšení úspěšnosti vyhodnocení ukončení odbočovacího manévru a tím k bezpečnější jízdě.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *SignalMinder SMI* [online]. [cit. 2019-05-5]. Dostupné z: <https://kisantech.com/sm-1.html>
- [2] *SignalMinder 5/6 Installation Guide* [online]. [cit. 2019-05-5]. Dostupné z: <https://kisantech.com/pub/media/brochures/sm56.pdf>
- [3] *ATS-03 - Instructions* [online]. [cit. 2019-05-6]. Dostupné z: <http://staging.namzcustomcycleproducts.com/wp-content/uploads/2016/04/ATS-03.pdf>
- [4] *Self Canceling Turn Signal Module* [online]. [cit. 2019-05-6]. Dostupné z: <http://www.signaldynamics.com/self-canceling-turn-signal-module/>
- [5] *Smart Turn System* [online]. [cit. 2019-05-6]. Dostupné z: <https://saferturn.com/product/smart-turn-system/>
- [6] *Smart Turn System - STS, automatic turn signal cancelling module, self cancelling system* [online]. [cit. 2019-05-6]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/dp/B06XD71KSW>
- [7] *STS Installation Manual* [online]. [cit. 2019-05-6]. Dostupné z: <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/B1PZ9bQDKrS.pdf>
- [8] *Honda VFR 800 (2015) manual.*
- [9] *Návod k obsluze R1200GS.*
- [10] VOJÁČEK, Antonín. *Integrované MEMS GYROSKOPY* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- [11] *MEMS Accelerometer Gyroscope Magnetometer & Arduino* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino/>
- [12] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů: 1. díl - Piezoelektrické* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [13] WOODFORD, Chris. *Accelerometers* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/accelerometers.html>
- [14] WOODFORD, Chris. *Specifying an Accelerometer: Function and Applications* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://insights.globalspec.com/article/1263/specifying-an-accelerometer-function-and-applications>

- [15] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů: 3. díl - Tepelné akcelerometry MEMSIC* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007040901>
- [16] SMETÁK, Jan. *Jízdní charakteristiky cyklisty* [online]. [cit. 2019-05-16]. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní. Vedoucí práce Doc. Ing. Drahomír Schmidt, Ph.D.
- [17] PREETI, Jain. *Accelerometers* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.engineersgarage.com/articles/accelerometer>
- [18] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů: 2. díl - Piezorezistivní* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>
- [19] ALBARBAR, Alhussein, Samir MEKID, Andrew STARR a Robert PIETRUSZKIEWICZ. *Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An experimental study* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/26547676_Suitability_of_MEMS_Accelerometers_for_Condition_Monitoring_An_experimental_study
- [20] *Magnetické otazníky 5: Co je magnetometr a jak zvířata využívají magnetické pole* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/blog/magneticke-otazniky-5-co-je-magnetometr-a-jak-zvirata-vyuzivaji-magneticke-pole-n106>
- [21] *Fyzikální princip měření magnetického pole - Univerzita Palackého v Olomouci* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://atmilab.upol.cz/texty/squid.pdf>
- [22] *Bmw HP2 Megamoto Top View* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.bikesyard.com/bmw-hp2-megamoto-top-view/>
- [23] *Akcelerometry* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://vyuka.pavelrozsival.cz/isame/Akcelerometry.pdf>
- [24] YU, Jiadi, Hongzi ZHU, Haofu HAN, et al. *SenSpeed: Sensing Driving Conditions to Estimate Vehicle Speed in Urban Environments* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/305527771_SenSpeed_Sensing_Driving_Conditions_to_Estimate_Vehicle_Speed_in_Urban_Environments
- [25] Směrodatná odchylka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sm%C4%9Brodavn%C3%A1_odchylka
- [26] *Data sheet BNO055*. Dostupné z: https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bno055
- [27] *Arduino 9osý pohybový Shield* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.hwkitchen.cz/arduino-9-osy-pohybovy-shield/>

- [28] KUCHAR, Michal. *Návrh aplikace s implementací algoritmu kalibrace MEMS magnetometru* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/84834471.pdf>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Bušek.
- [29] *BNO055 Absolute Orientation Sensor with Raspberry Pi & BeagleBone Black* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/bno055-absolute-orientation-sensor-with-raspberry-pi-and-beaglebone-black/webgl-example>
- [30] *Arduino Data Logger Shield* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/arduino-data-logger-shield>
- [31] *Understanding Euler Angles* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.chrobotics.com/library/understanding-euler-angles>
- [32] *Statistics on the Arduino (also Pic or any microcontroller)* [online]. 14.11.2012 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://provideyourown.com/2012/statistics-on-the-arduino/>
- [33] *Mapy* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://mapy.cz>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Jednotky jednotlivých výstupních dat BNO055	29
Tabulka 2	Propojení SPI sběrnice Arduina se shieldy	33
Tabulka 3	Seznam konstant pro nastavení algoritmu vyhodnocení ukončení odbočení	66
Tabulka 4	Seznam konstant pro nastavení algoritmu stání	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Modul STS [6]	12
Obrázek 2	Napojení STS na motocykl [7].....	13
Obrázek 3	Osy gyroskopu [10].....	15
Obrázek 4	Příklad působení Coriolisovy síly (vektor ω směřuje do obrázku) [10]	16
Obrázek 5	Působení Coriolisovy síly na hmotný objekt mechanického gyroskopu (vyznačeno oranžovou šipkou) [10].....	16
Obrázek 6	Zjednodušený princip funkce MEMS gyroskopů [10]	17
Obrázek 7	Osy akcelerometru [14].....	18
Obrázek 8	Blokové schéma jednoduchého piezoelektrického akcelerometru [17].....	19
Obrázek 9	Blokové schéma jednoduchého piezorezistivního akcelerometru [19].....	20
Obrázek 10	Zjednodušený princip funkce kapacitního akcelerometru [11].....	20
Obrázek 11	Princip měření magnetického pole pomocí Hallova jevu [11]	21
Obrázek 12	Souřadný systém motocyklu (v mém případě) [22].....	24
Obrázek 13	Grafické zobrazení numerické integrace [23].....	26
Obrázek 14	Rozpoznání stání/pohybu pomocí vibrací [24]	27
Obrázek 15	9 axes motion shield [27]	28
Obrázek 16	Architektura BNO055 [26]	30
Obrázek 17	Data logger shield [30].....	32
Obrázek 18	Stohování jednotlivých komponentů	32
Obrázek 19	Výsledné rozhraní společně s ostatními komponenty.....	34
Obrázek 20	Schéma napájecího bloku.....	35
Obrázek 21	Zapojení směrových světel na motocyklu Jawa 125 Dandy	37
Obrázek 22	Základní schéma spínací části rozhraní	38
Obrázek 23	Finální zapojení spínací části rozhraní.....	39
Obrázek 24	Umístění kolébkového přepínače na řídítkách.....	40
Obrázek 25	Blok přepínače ukazatele směru	41
Obrázek 26	Výsledné rozhraní	41
Obrázek 27	Umístění zařízení na motocyklu	43
Obrázek 28	Schéma připojení rozhraní na kabeláž motocyklu	43
Obrázek 29	Osy motocyklu [22]	44

Obrázek 30 Osy gyroskop	44
Obrázek 31 Osy akcelerometr	45
Obrázek 32 Osy Euler.....	45
Obrázek 33 Inerciální souřadný systém [31].....	47
Obrázek 34 Yaw rotace [31].....	48
Obrázek 35 Aplikovaná rotace pitch a yaw [31]	49
Obrázek 36 Aplikovaná rotace Yaw, Pitch a Roll [31]	50
Obrázek 37 Funkce firmware – blokově	52
Obrázek 38 Mapa areálu pracoviště v Doubravicích [33].....	74

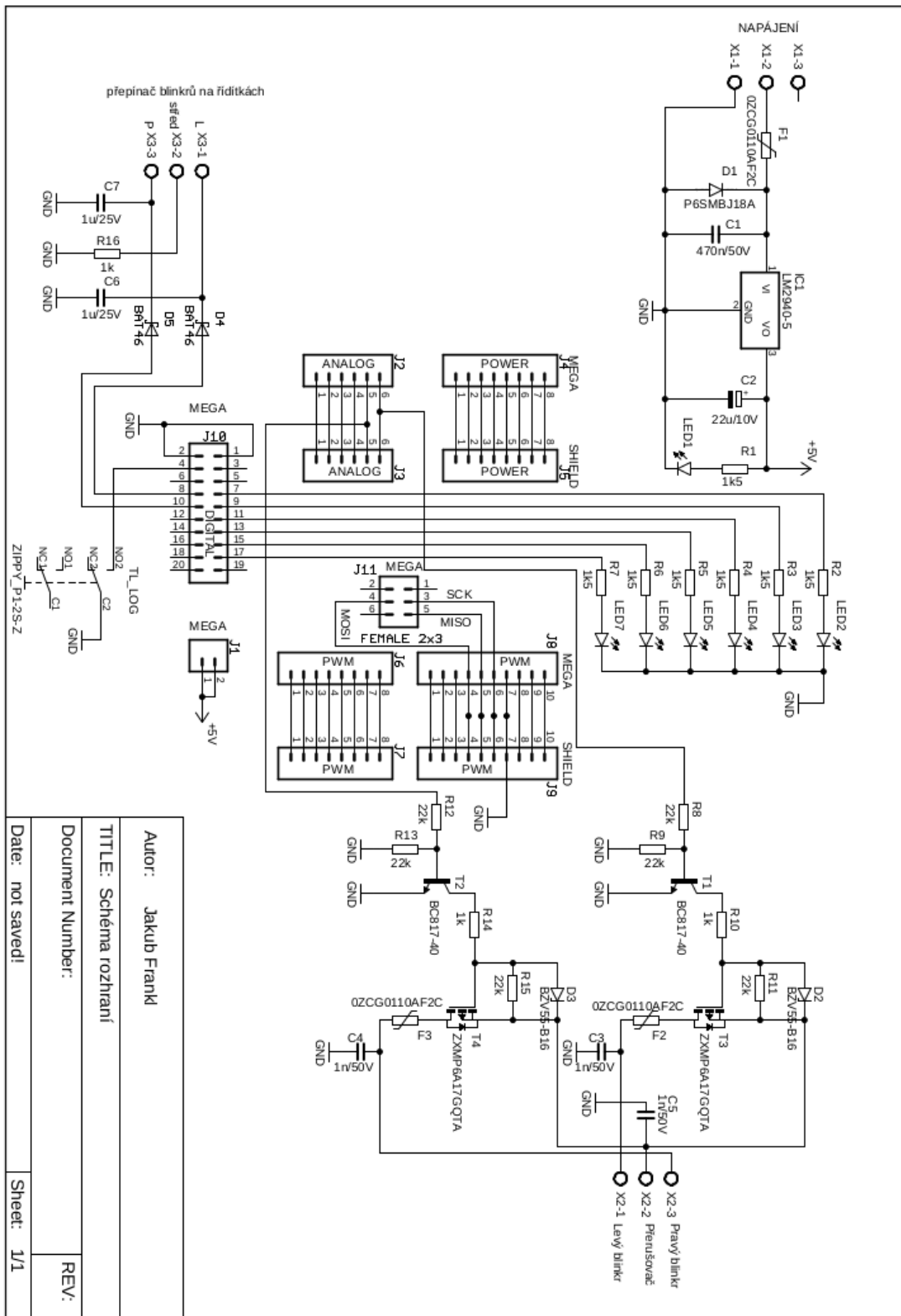
SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Průjezd motocyklu zatáčkou	54
Graf 2 Porovnání vyfiltrované a nevyfiltrované úhlové rychlosti	57
Graf 3 Automatické vypnutí směrových světel po odbočení vlevo	58
Graf 4 Automatické vypnutí směrových světel po odbočení vpravo.....	58
Graf 5 Porovnání vypočtené a zaznamenaná rychlosti	67
Graf 6 Vyhodnocení zastavení motocyklu z vibrací v ose Z.....	69
Graf 7 Vyhodnocení stání a jízdy motocyklu	75
Graf 8 Předčasné automatické vypnutí směrových světel	77
Graf 9 Zpožděné automatické vypnutí směrových světel.....	77

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Elektrické schéma rozhraní.....	88
Příloha B – Kresba DPS rozhraní.....	89

Příloha A Elektrické schéma rozhraní



Příloha B Kresba DPS rozhraní

