

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra měření

Obor: Kybernetika a robotika



# Měření rychlosti vozidel pomocí magnetických senzorů

## Magnetic sensors based vehicle speed measurement

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Vojtěch Čechura

Vedoucí práce: Ing. David Novotný

Rok: 2022



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čechura** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **483487**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Měření rychlosti vozidel pomocí magnetických senzorů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Magnetic sensors based vehicle speed measurement**

Pokyny pro vypracování:

S využitím existujícího hardware ověřte možnosti měření rychlosti průjezdu vozidel s využitím vzájemné korelace magnetických měření. Následně navrhnete úpravu této stávající elektroniky, případně navrhnete zcela novou, tak aby nejlépe vyhovovala potřebám korelačního měření. Implementujte metodu vzájemné korelace do firmware řídicího procesoru STM32 tak, aby bylo možné v reálném čase určovat rychlost průjezdu. Experimentálně ověřte přesnost měření na několika vozidlech a porovnejte s existujícími metodami.

Seznam doporučené literatury:

- [1] RIPKA, P.: Magnetic sensors and magnetometers. Boston: Artech House, 2001. ISBN 15-805-3057-5.
- [2] Vít Záhlava: Návrh a konstrukce DPS, Ben 2010
- [3] VEDRAL, Josef a FISCHER Jan: Elektronické obvody pro měřicí techniku. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02966-2.
- [4] RIPKA, Pavel a JANOŠEK Michal: Advances in Magnetic Field Sensors. IEEE Sensors Journal [online]. 2010, 10(6), 1108-1116 [cit. 2021-01-22]. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2043429. ISSN 1530-437x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5443656>
- [5] J. Včelák, P. Ripka, A. Platil, J. Kubík, and P. Kašpar: "Errors of AMR compass and methods of their compensation". Sens. Actuators A, vol. 129, pp. 53–57, 2006.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. David Novotný, katedra měření FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **24.06.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2023**

Ing. David Novotný  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

Vojtěch Čechura



## **Poděkování**

Děkuji Ing. Davidu Novotnému za vedení, trpělivost a spoustu neocenitelných rad při tvorbě bakalářské práce.

Vojtěch Čechura

*Název práce:*

## **Měření rychlosti vozidel pomocí magnetických senzorů**

*Autor:* Vojtěch Čechura

*Studijní program:* Kybernetika a robotika

*Obor:* Kybernetika a robotika

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* Ing. David Novotný

Katedra měření

*Abstrakt:* V rámci této práce bylo navrženo zařízení pro měření rychlosti vozidel za pomoci magnetických senzorů a metody vzájemné korelace. Pro zařízení byla navržena a otestována deska plošných spojů s magnetickými senzory a další potřebnou elektronikou. Dále byl navržen firmware pro zvolený mikrokontroler, aby bylo možné se zařízením měřit v reálném čase. V rámci práce zároveň vzniklo přesné referenční měření, se kterým bylo možné porovnat data. Zařízení bylo otestováno a porovnáno s dalšími existujícími systémy pro měření rychlosti.

*Klíčová slova:* magnetické, senzory, rychlost, měření, vozidlo

*Title:*

## **Magnetic sensors based vehicle speed measurement**

*Author:* Vojtěch Čechura

*Abstract:* In this work, a device for measuring vehicle speed using magnetic sensors and the method of correlation was designed. A printed circuit board with magnetic sensors and other necessary electronics was designed and tested for the device. Furthermore, the firmware for the selected microcontroller was designed to enable real-time measurements with the device. The work also produced an accurate reference measurement against which the data could be compared. The device was tested and compared with other existing speed measurement systems.

*Key words:* magnetic, sensors, speed, measurement, vehicle

# Obsah

Seznam použitých zkratek	xi
Seznam obrázků	xii
Úvod	1
<b>1 Současné metody měření rychlosti vozidel</b>	<b>3</b>
1.1 Radary	3
1.2 Lidary	4
1.3 Úsekové měření	4
1.4 Další způsoby měření rychlosti	5
1.5 Výhody měření magnetickými senzory	5
<b>2 Teoretický rozbor</b>	<b>7</b>
2.1 Magnetická stopa vozidel	7
2.2 Vzájemná korelace a výpočet rychlosti	8
2.3 Magnetické senzory	9
2.3.1 AMR senzory	10
<b>3 Úvodní měření</b>	<b>13</b>
3.1 Senzory MMC5883MA	13
3.2 Senzory HMC1021z	14
3.3 Zpracování dat	16
3.4 Měření se senzory MMC5883MA	17
3.5 Měření se senzory HMC1021z	18
3.5.1 Průběh měření	18
3.6 Výsledky	19
<b>4 Návrh referenčního měření</b>	<b>21</b>
4.1 Hardware optických závor	21



---

4.2	Přesnost měření . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Finální hardware</b>	<b>25</b>
5.1	Napájení . . . . .	26
5.2	Magnetické senzory . . . . .	28
5.3	Zpracování signálu . . . . .	30
5.4	Komunikační rozhraní . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Výsledky měření s novým hardware</b>	<b>35</b>
6.1	Měření se Škodou Yeti a Citroenem C3 . . . . .	35
6.1.1	Průběh měření . . . . .	35
6.1.2	Zpracování dat . . . . .	36
6.1.3	Výsledky . . . . .	37
6.2	Měření v provozu . . . . .	40
6.2.1	Průběh měření . . . . .	40
6.2.2	Zpracování dat . . . . .	41
6.2.3	Výsledky . . . . .	42
6.3	Shrnutí výsledků . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Firmware pro real-time měření</b>	<b>47</b>
7.1	Požadavky . . . . .	47
7.2	Firmware . . . . .	48
	<b>Závěr</b>	<b>51</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>53</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>58</b>
A	Kompletní schéma navrženého PCB . . . . .	58



# Seznam použitých zkratek

<b>RF</b>	radio-frequency (module)
<b>DSP</b>	digital signal processing
<b>SPI</b>	serial peripheral interface
<b>PCB</b>	printed circuit board
<b>AD</b>	Analogově-digitální (převodník)
<b>AMR</b>	anizotropní magnetorezistor
<b>UART</b>	universal asynchronous receiver-transmitter
<b>NMOS</b>	N-type metal-oxide-semiconductor

# Seznam obrázků

2.1	Ukázka vlivu vozidla na magnetické pole země [8] . . . . .	7
2.2	Ukázka citlivosti jednotlivých magnetických senzorů [1] . . . . .	10
2.3	Princip AMR senzorů - Odpor se mění v závislosti na úhlu mezi směrem toku proudu a směrem magnetizace [13] . . . . .	11
2.4	Linearizace AMR senzorů . . . . .	11
2.5	Ukázka vlivu flipování AMR senzoru [14] . . . . .	12
3.1	Časový průběh dat ze senzorů MMC5883MA . . . . .	16
3.2	Ukázka šumu u senzoru HMC1021z . . . . .	18
3.3	Absolutní chyby měření rychlosti s Citroenem C3 . . . . .	19
3.4	Absolutní chyby měření rychlosti se Škodou Yeti . . . . .	20
4.1	Schéma napájení a modulace laserů . . . . .	22
4.2	Schéma zapojení přijímače optické závory . . . . .	23
5.1	Ukázka finální verze PCB zamontovaná ve vybraném průmyslovém boxu . . . . .	26
5.2	Schéma první části napájení s regulátorem TPS54060 . . . . .	27
5.3	Schéma napájení digitální a analogové části . . . . .	27
5.4	Schéma napájení zdrojů proudu a flipovací části obvodu . . . . .	28
5.5	Schéma zapojení senzorů HMC1021z . . . . .	29
5.6	Schéma zapojení obvodu pro flipování . . . . .	30
5.7	Schéma zapojení AD převodníku . . . . .	31
5.8	Schéma zapojení mikrokontroleru . . . . .	32
5.9	Schéma zapojení převodníku UART na RS485 . . . . .	33
5.10	Schéma zapojení RF modulu . . . . .	33
6.1	Časový průběh dat ze senzorů HMC1021z . . . . .	37

---

6.2	Výsledky měření pro jednotlivé signály s vozidlem Škoda Yeti . . . . .	38
6.3	Výsledky měření s vozidlem Škoda Yeti . . . . .	39
6.4	Výsledky měření v kladném směru s vozidlem Citroen C3 . . . . .	39
6.5	Výsledky měření v záporném s vozidlem Citroen C3 . . . . .	40
6.6	Foto z místa měření . . . . .	41
6.7	Kompletní data z měření na ose X . . . . .	42
6.8	Měření v bližším a vzdálenějším jízdním pruhu . . . . .	43
6.9	Absolutních odchylky z měření . . . . .	44
6.10	Histogram absolutních odchylek z měření . . . . .	45
7.1	Ukázka funkce navrženého filtru . . . . .	50
2	Schéma zapojení napájení a komunikačních periférií . . . . .	58
3	Schéma zapojení magnetických senzorů . . . . .	59



# Úvod

Většina současných způsobů měření rychlosti má společnou jednu věc, jejich přesnost je často negativně ovlivněna mnoha různými faktory. Obecně to mohou být například počasí, viditelnost, denní doba, provoz, stav vozovky, stav čoček kamery a mnoho dalších. Tato práce se tedy snaží o prozkoumání možností nového způsobu měření rychlosti, který by mohl některé z výše zmíněných problémů odstranit.

Již delší dobu se některé výzkumy pokoušejí využít magnetické senzory k detekci vozidel či k určení typu projíždějícího vozidla - například [1], [2] nebo [3]. Tato práce jde ještě o krok dále a chce magnetické senzory využít kromě detekce i k měření rychlosti. Tento přístup by mohl vést k vytvoření spolehlivého senzoru, který nebude ovlivněn počasím, viditelností a nebude tak náchylný k poškození.

Cílem je vytvořit hardware a software pro korelační měření rychlosti vozidel za pomoci magnetických sensorů. Další požadavky na zařízení jsou malá velikost a skladnost, nízká spotřeba a možnost bezdrátové komunikace. Díky těmto vlastnostem by mohl být vzniklý senzor umístěný přímo ve vozovce nebo ve skřínce blízko silnice. Celé zařízení by navíc mohlo být napájené například pomocí solárního panelu a bylo by tak naprosto soběstačné.

Zařízení pro korelační měření rychlosti nebude z principu metody vhodné pro policejní měření. Senzor by byl jen velmi těžko využitelný k měření za jízdy a navíc s rostoucí rychlostí výrazně klesá přesnost, byl by tedy vhodný pro měření rychlostí do cca 100 km/h. Jednalo by se spíše o senzor pro měření hustoty provozu ve městech. Taková data by pak mohla být využita například pro řízení provozu či pro dlouhodobý sběr dat, na základě kterého se budou plánovat budoucí komunikace.

V úvodu práce byly vyzkoušeny některé senzory využívané k detekci vozidel a nakonec byly pro měření rychlosti vybrané AMR<sup>1</sup> senzory. Byla tedy navržena

---

<sup>1</sup>anizotropní magnetorezistor

deska plošných spojů s vybranými senzory a další potřebnou elektronikou. Zároveň, aby bylo možné data s něčím porovnat, bylo navrženo referenční měření - dvojitá optická závora, vůči které byly porovnávány výsledky měření.

Pro vybraný mikrokontroler byl dále navržen firmware, který umožní vzorkovat data z magnetických senzorů a pomocí korelace počítat výslednou rychlost projíždějících vozidel v reálném čase. Vybraný kontroler se bohužel v závěru práce ukázal být nedostatečný kvůli malému výkonu a malé paměti, takže se firmware nepovedlo otestovat na reálných datech.



# Kapitola 1

## Současné metody měření rychlosti vozidel

V této kapitole budou zmíněné nejpoužívanější současné metody pro měření vozidel a jejich hlavní nevýhody. V poslední části jsou uvedené výhody, které by mohlo mít měření za pomoci magnetických senzorů.

Měření rychlosti se dá obecně rozdělit do 2 kategorií - měření okamžité rychlosti a měření průměrné rychlosti. V České republice se pro měření okamžité rychlosti využívá nejčastěji radarů či lidarů a pro měření průměrné rychlosti se využívá například úsekové měření za pomoci kamerového systému [4]. Povolená odchylka pro policejní přístroje měřící rychlost je u nás  $\pm 3$  km/h do rychlosti 100 km/h a  $\pm 3\%$  pro rychlosti nad 100 km/h [5].

### 1.1 Radary

Radary jsou v současné době asi nejpoužívanějším zařízením, které používá policie k měření rychlosti. Fungují na principu Dopplerova jevu. Zařízení vysílá směrem k vozidlu signál o určité frekvenci (obvykle v mikrovlnném pásmu), po odrazu od vozidla se tato frekvence změní v závislosti na rychlosti a směru jízdy vozidla. Podle změny frekvence je tedy zařízení schopné určit rychlost vozidla [6]. Kromě měření rychlosti se dají radary použít i k měření dopravního zatížení nebo k měření délky vozidel.

Radary mají ale i mnohé nevýhody, mezi ty největší patří převážně to, že vozidlo se musí pohybovat přímo proti či od radaru, jinak vzniká v měření chyba. Další

velkou nevýhodou je to, že jelikož má zařízení relativně velký zorný úhel, je náchylné k odrazům signálu od dalších předmětů. Proto jsou radary nevhodné pro měření na víceproudových silnicích či v tunelu [4].

## 1.2 Lidary

Dalším často používaným zařízením pro měření rychlosti jsou zařízení pracující na principu lidarů. Lidary vysílají laserový paprsek namířený na vozidlo, měří čas mezi vysláním a přijetím paprsku a na základě těchto dat určují vzdálenost vozidla. Vzdálenost vozidla měří v několika časových úsecích za sebou a ze změny vzdálenosti pak počítá rychlost vozidla [7]. Dále lze tyto měřiče použít pro měření dopravního zatížení či pro měření odstupů mezi vozidly.

Mezi nevýhody těchto měřičů patří převážně nutnost měření za dobrého počasí. Pokud například sněží nebo prší, může se světelný paprsek odrazet od kapek, a tím znehodnocovat výsledky měření. Stejně jako u radarů je nutné, aby byl úhel mezi lidarem a směrem pohybu vozidla co nejmenší. Další nevýhodou je potřeba mít po celou dobu měření volný výhled na vozidlo, u kterého měříme rychlost, proto jsou stejně jako radary nevhodné pro měření na víceproudových silnicích [4].

## 1.3 Úsekové měření

Úsekové měření neměří okamžitou ale průměrnou rychlost na předem daném úseku. K tomuto způsobu měření jsou třeba kamery, které zaznamenají vjezd a výjezd vozidla z měřeného úseku. Analyzující software pak z času potřebného k průjezdu úseku vypočítá hledanou rychlost [7]. Tento způsob měření může sloužit i například pro detekci vozidel či pro měření dopravního zatížení.

Úsekové měření odstraňuje některé nevýhody dříve zmíněných měřičů. Kamery pro zaznamenávání vjezdu například nemusí být přímo před vozidlem a metoda není tak závislá na počasí. Na druhou stranu je ale třeba celý systém pravidelně udržovat, jelikož je relativně náchylný na poškození [4].

## 1.4 Další způsoby měření rychlosti

Kromě způsobů uvedených v předchozích podkapitolách existuje mnoho dalších způsobů, jak měřit rychlost. Ty ale nejsou v praxi tak často používané. Patří mezi ně například měření pomocí optických závor, indukčních smyček nebo měření pomocí širokoúhlého infračerveného paprsku [4].

## 1.5 Výhody měření magnetickými senzory

Zařízení vyvíjené v této práci může odstranit mnoho z výše zmíněných nevýhod metod používaných v současnosti, proto by mohlo v některých situacích najít využití.

Měřidlo nepotřebuje přímý výhled na měřené vozidlo. Může tedy být umístěné v bytelném boxu vedle vozovky či přímo ve vozovce a bude tedy dobře chráněné před poškozením.

Měření s magnetickými senzory není ovlivněno počasím. Je tedy jedno, jestli prší, sněží nebo je například špatná viditelnost. Díky tomu může zařízení měřit snadno i v noci nebo při nepříznivém počasí.

Tento způsob měření není, na rozdíl od radarů a lidarů, závislý na přijímání odražených paprsků. Půjde ho tedy využít například i v tunelu, kde jsou klasické radary kvůli odrazům od stěn prakticky nevyužitelné.

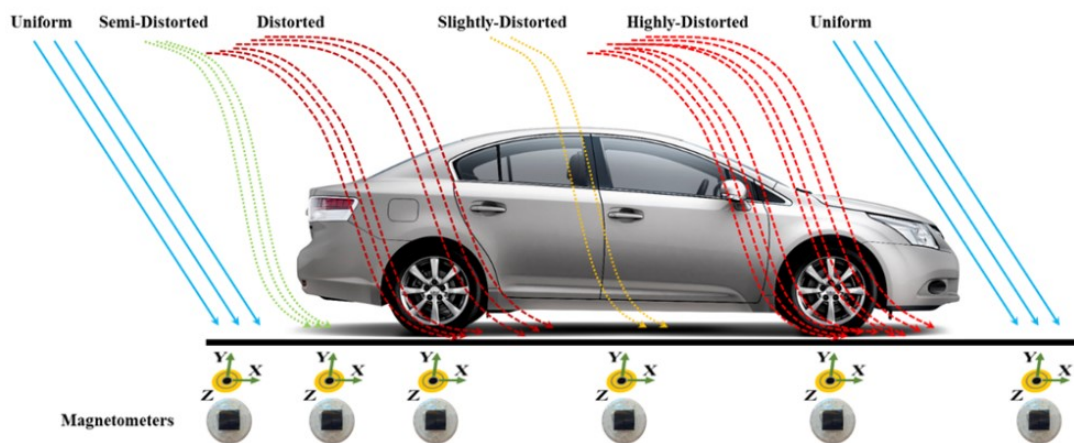


# Kapitola 2

## Teoretický rozbor

### 2.1 Magnetická stopa vozidel

Vozidla jsou z velké části tvořena z feromagnetických materiálů - například železo nebo ocel. Feromagnetické materiály způsobují při pohybu v zemském magnetickém poli změny, které jsme schopni měřit. Těmto změnám, způsobenými pohybem vozidla, se říká magnetická stopa vozidel [8]. Ukázkou vlivu průjezdu vozidla magnetickým polem země můžete vidět na obrázku 2.1. Jak je vidět z obrázku, největší změny jsou v oblasti kolem kol vozidla - tedy tam, kde je největší soustředění feromagnetických součástí.



Obrázek 2.1: Ukázkou vlivu vozidla na magnetické pole země [8]

Obvykle se magnetické pole automobilů modeluje jako jeden dipól, ačkoliv situace je složitější a model 1 dipólu situaci plně nepopisuje [9]. To musíme vzít v potaz, hlavně při návrhu vzdálenosti magnetických senzorů od sebe. Pokud budou senzory

moc daleko a vozidlo například neprojde kolem zařízení rovně, může být signál na obou senzorech natolik jiný, že nebude fungovat vzájemná korelace, pomocí které chceme data ze sensorů zpracovávat.

Vliv přítomnosti vozidla na změny v zemském magnetickém poli je těžké předpovídat. Různá vozidla jsou z různých materiálů, mají jiné součásti a i rozložení součástí se liší. Některé feromagnetické součásti jsou navíc pohyblivé a magnetické pole vozidla se tak může měnit. Všechny zmíněné vlastnosti mají vliv i na změny v zemském magnetickém poli, které potřebujeme měřit.

Velikost zemského pole v Čechách je přibližně  $B_x = 19 \mu\text{T}$  ve směru S-J,  $B_y = 4 \mu\text{T}$  ve směru V-Z a  $B_z = 46 \mu\text{T}$  ve svislém směru [10]. Změna magnetického pole způsobená průjezdem vozidla se snižuje se vzdáleností a ve vzdálenosti 3m od vozidla je tato změna asi  $1 \mu\text{T}$  [2]. Při výběru magnetických sensorů tedy musíme dát pozor, aby byly schopné tuto změnu měřit.

## 2.2 Vzájemná korelace a výpočet rychlosti

Při průjezdu vozidla kolem dvou magnetických sensorů, které jsou od sebe v nějaké definované vzdálenosti, bude signál z obou sensorů podobný, ale v čase posunutý. Abychom mohli určit rychlost vozidla, musíme najít časový posun mezi signály z těchto sensorů. K tomu byla vybrána metoda vzájemné korelace.

Vzájemná korelace je jedna z metod, které se používají k určení časového posunu mezi signály. Metoda je založená na korelaci signálů jako funkci vzájemného posunu mezi vstupními signály. Hledaný časový posun je pak argument maxima této funkce. Obecný vzorec pro vzájemnou korelaci vypadá následovně:

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t)f_2(t + \tau)dt, \quad (2.1)$$

kde  $R$  je korelační funkce,  $T$  je doba měření signálů,  $f_1$  a  $f_2$  jsou časové průběhy signálů a  $\tau$  je časový posun. Hledaný časový posun pak najdeme jako argument maxima  $R(\tau)$ .

Jelikož data z magnetických sensorů jsou diskrétní, uvedu ještě vzorec pro diskrétní vzájemnou korelaci signálů:

$$R[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_1[n]x_2[n + k], \quad (2.2)$$

kde  $R$  je diskrétní korelační funkce,  $N$  je počet vzorků,  $x_1$  a  $x_2$  jsou diskrétní data ze senzorů a  $k$  je hledaný posun, který opět nalezneme jako argument maxima  $R$ .

Vzájemnou korelaci jde také s výhodou vypočítat pomocí furierovy transformace. Výpočet vzájemné korelace z definice, pro signál o  $N$  vzorcích, má náročnost  $O(N^2)$ , kdežto výpočet korelace přes furierovu transformaci má náročnost  $O(N \cdot \log_2(N))$  [11]. Výsledkem výpočtu vzájemné korelace přes furierovu transformaci je ale kruhová korelace. Signál se tedy musí před výpočtem doplnit  $N$  nulami, což velmi zvyšuje paměťovou náročnost.

Při výpočtu rychlosti nás navíc zajímá jen relativně malý počet zpoždění (například  $\pm 100$  vzorků). To může velice urychlit výpočet vzájemné korelace z definice, jelikož nemusíme počítat výsledek pro všechna zpoždění. Toto zlehčení není při výpočtu za pomoci furierovy transformace možné. Která metoda bude ve výsledku lepší bude nejspíše třeba ověřit experimentálně. Vzorec pro výpočet korelace pomocí furierovy transformace vypadá následovně:

$$R = \mathcal{F}^{-1}(\text{conj}(\mathcal{F}(x_1[-k]) \cdot \mathcal{F}(x_2[k])), \quad (2.3)$$

kde  $R$  je diskrétní korelační funkce a  $x_1$ ,  $x_2$  jsou diskrétní data senzorů.

Výsledkem vzájemné korelace je posun udaný počtem vzorků. Ten tedy bude ještě třeba přepočítat na časový údaj. Což lze udělat jednoduše pomocí vzorce:

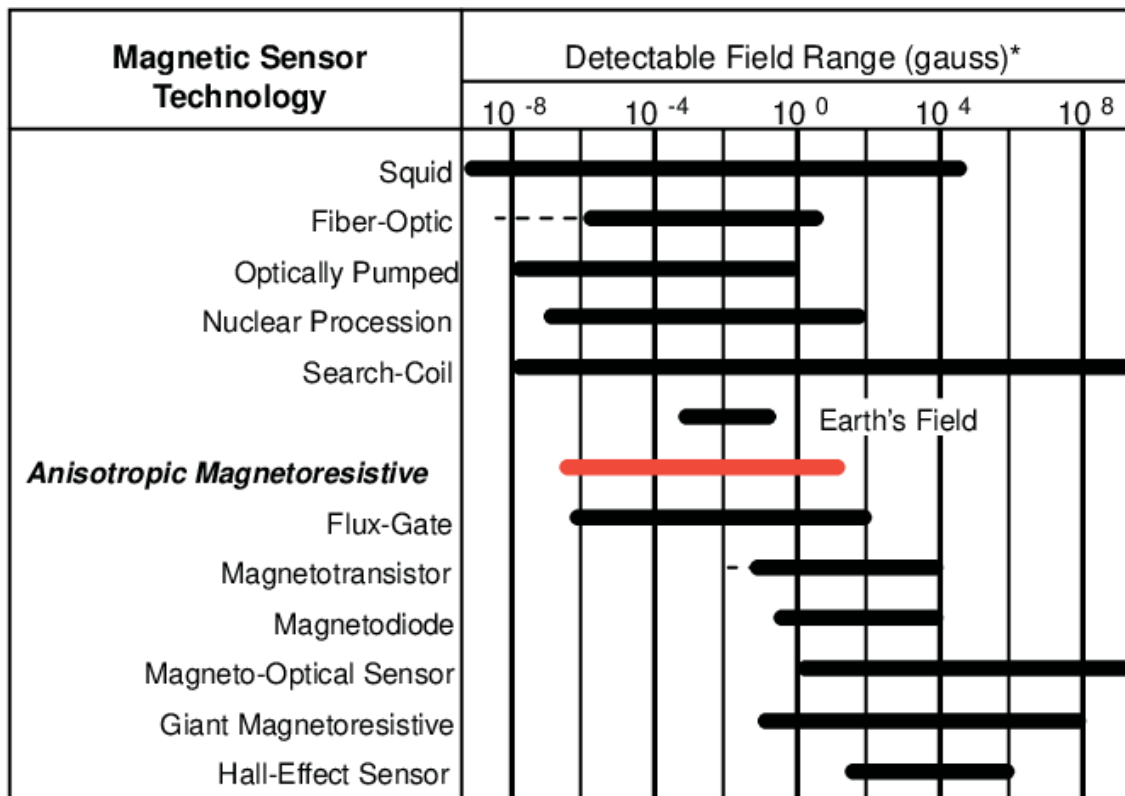
$$t = \frac{k}{f_s}, \quad (2.4)$$

kde  $t$  je hledaný časový posun,  $k$  je počet vzorků, o které jsou diskrétní signály posunuty a  $f_s$  je vzorkovací frekvence senzorů.

Z vzdálenosti senzorů a časového posunu signálů pak můžeme vypočítat rychlost vozidla, která je přímo úměrná vzdálenosti senzorů a nepřímo úměrná časovému posunu.

## 2.3 Magnetické senzory

Vzhledem k vlastnostem magnetické stopy vozidel popsané v minulé kapitole je třeba vybrat takové magnetické senzory, které budou schopné měřit změny v magnetickém poli země v řádech  $\mu\text{T}$ .



\* Note: 1gauss =  $10^{-4}$ Tesla =  $10^5$ gamma

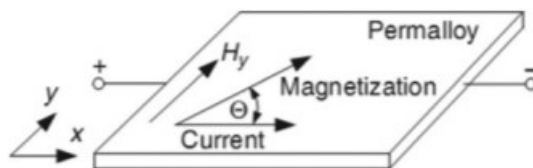
**Obrázek 2.2:** Ukázka citlivosti jednotlivých magnetických senzorů [1]

Z obrázku 2.2 vidíme, že toto kritérium splňuje více senzorů, například fluxgate či search-coil senzory. Zároveň potřebujeme, aby senzory byly schopné měřit na nízkých frekvencích, což nejlépe splňují fluxgate a AMR senzory. Pro vhodný poměr cena/šum a jednodušší elektroniku bylo zvoleno použití senzorů AMR. Tento druh senzorů je blíže popsán v další sekci.

### 2.3.1 AMR senzory

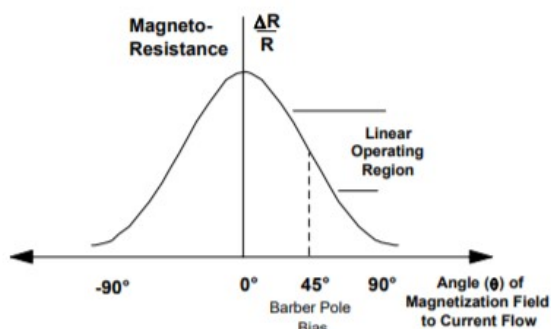
Anizotropní magnetorezistence je vlastnost, která se vykytuje u feromagnetických materiálů. Zjednodušeně - elektrický odpor těchto materiálů závisí na úhlu mezi směrem toku proudu a směrem magnetizace v materiálu [12]. Pro výrobu těchto senzorů se nejčastěji využívají magneticky měkké materiály jako např. permalloy (slitina železa a niklu).



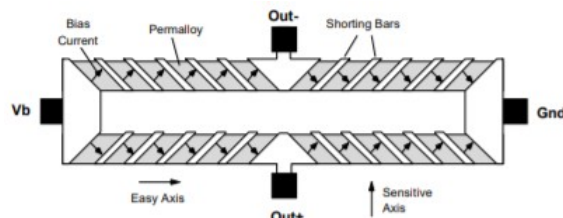


**Obrázek 2.3:** Princip AMR senzorů - Odpor se mění v závislosti na úhlu mezi směrem toku proudu a směrem magnetizace [13]

AMR senzory tedy využívají toho, že při působení externího magnetického pole se změní směr magnetizace a tím i elektrický odpor materiálu. Tato změna rezistence je asi 2% [13].



(a) Odezva AMR senzoru [14]



(b) Barber-pole [14]

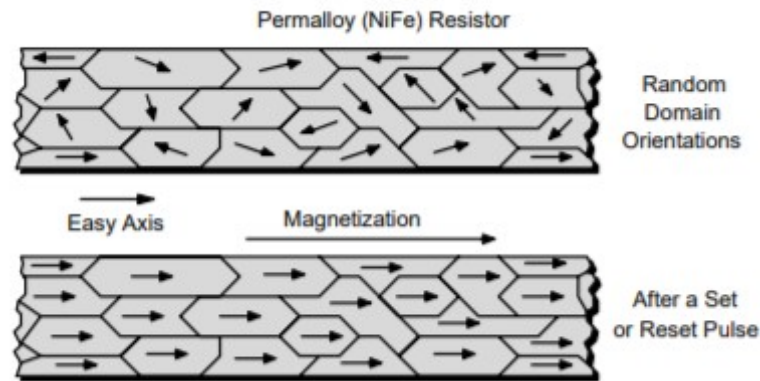
**Obrázek 2.4:** Linearizace AMR senzorů

Jak můžeme vidět na obrázku 2.4a, odezva AMR senzoru na vnější magnetické pole není lineární, a navíc podle ní nerozlišíme směr působícího magnetického pole. Obou těchto nevýhod se můžeme zbavit pomocí technologie barber-pole.

Technologii barber-pole můžeme vidět na obrázku 2.4b. Proud se za pomoci tenkých proužků hliníku nanesených na vrstvu permalloye odkloní o 45°. Tím dojde k posunutí pracovního bodu do lineární oblasti na boku charakteristiky. Navíc podle toho, zdali se odpor z pracovního bodu zvyšuje či snižuje, jsme pak schopni rozpoznat směr vnějšího magnetického pole. Abychom dále přesunuli pracovní bod do 0 a zlepšili stabilitu a linearitu senzoru, používá se většinou u AMR senzorů zapojení čtyř anizotropních magnetorezistorů do Wheatstoneova můstku.

Vystavení AMR senzorů silnému externímu poli porušuje magnetickou strukturu permalloye, která je kritická pro správnou funkci senzoru. Aby se struktura navrátila do původního tvaru, používá se cívka, pomocí které se generuje krátce

působící, silné magnetické pole tak, aby se magnetické domény permalloye opět srovnaly do původního směru. Těto technice se říká flipování. Vliv flipování můžeme vidět na obrázku 2.5. Na horním obrázku vidíme strukturu permalloye po vystavení vlivu externího magnetického pole a na spodním obrázku vidíme strukturu napravenou pomocí flipování.



**Obrázek 2.5:** Ukázka vlivu flipování AMR senzoru [14]

Flipování můžeme navíc využít k otočení magnetických domén permalloye o  $180^\circ$ , čímž vlastně obrátíme znaménko citlivosti. Touto metodou lze poté snadno potlačit vliv elektrických offsetů v obvodu. Provedeme jedno měření, poté obrátíme pomocí flipování citlivost a provedeme druhé měření. U obou vzorků je přičtený stejný elektrický offset, ale užitečná složka má obrácenou citlivost. Můžeme tedy obě měření odečíst, čímž dostaneme dvojnásobek hledané hodnoty, ale zbavíme se tím elektrických offsetů v obvodu.

# Kapitola 3

## Úvodní měření

Na začátku práce mi bylo dáno k dispozici zařízení, které vzniklo v rámci diplomové práce paní Michaely Brejchové [3] a dále zařízení, které vzniklo v rámci diplomové práce pana inženýra Davida Novotného [11]. Přístroje navržené v obou pracích sloužili primárně k detekci příjezdu a odjezdu vozidla z parkovacího místa. Takovýto hardware je ale principiálně velice podobný tomu, jaký je navrhován v této práci. Zařízení byla tedy využita k úvodním měřením, která měla stanovit, zdali půjdou použité magnetické senzory využít i pro měření rychlosti. V práci paní Brejchové jsou využité senzory MMC5883MA a v práci pana inženýra Novotného senzory HMC1021z.

### 3.1 Senzory MMC5883MA

Jedná se o plně digitální, tříosý senzor od firmy MEMSIC. V zařízení jsou 3 tyto senzory. Na desce jsou umístěné do tvaru písmene L, aby šlo měřit zpoždění ve 2 osách. Báze mezi senzory je 7 cm. Další vybrané specifikace senzorů můžete vidět v tabulce 3.1. Ačkoliv hladina šumu je

**Tabulka 3.1:** Vybrané specifikace senzoru MMC5883MA [15]

Vlastnost	Podmínka	Hodnota
Typ senzoru		AMR
Digitální rozlišení		až 16 bitů
Rozlišení	16 bitové rozlišení	0.025 uT
Rozsah		$\pm 800$ uT
$f_s$		100, 200, 400, 600 Hz
RMS šum	$f_s = 600$ Hz	0.12 uT
Teplotní drift	-40 až 80 °C	$\pm 5$ %

Data z magnetických senzorů jsou posílána po sběrnici I2C do mikrokontroleru. Z procesoru jsou dále posílána bez dalších úprav do počítače pomocí sériové linky. Kompletní zapojení zde nebude rozebíráno, jelikož není součástí této práce a lze ho najít v práci paní Brejchové [3].

## 3.2 Senzory HMC1021z

HMC1021z je analogový magnetický senzor od společnosti Honeywell. Jedná se pouze o jednoosý senzor a na desce je pouze jeden pár. Magnetické pole tedy nebudeme schopni měřit ve všech osách, jako tomu je u senzoru MMC5883MA. Báze mezi senzory je na desce opět 7 cm. Kvůli snaze při měření jednoho průjezdu nasbírat více dat byly k zařízení namontovány 2 trubky o délce 20 cm, do kterých byly senzory umístěny. Tím došlo k prodloužení báze z původních 7 cm na 42 cm. Senzory byly do trubek umístěny tak, aby měřily magnetické pole v ose z, tudíž v ose kolmé k rovině silnice. Další vybrané vlastnosti senzoru můžete vidět v tabulce 3.2.

**Tabulka 3.2:** Specifikace senzoru HMC1021z [16]

Vlastnost	Podmínka	Hodnota
Typ senzoru		analogový AMR senzor
Rozlišení	10 Hz bandwidth	cca 10 nT
Rozsah		$\pm 600$ uT
Citlivost	flipovací proud 0.5 A	100 V/T při 10 V napájení
Offset můstku	po flipu	$\pm 2.5$ mV
Šumové vlastnosti	napájení 5 V	cca 480 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Jelikož se jedná o analogový senzor, data je třeba nejdřív digitalizovat pomocí AD<sup>1</sup> převodníku. K tomuto účelu je v zařízení AD převodník MCP3912, který má čtyři simultánně vzorkované kanály. Jedná se o delta-sigma převodník od společnosti Microchip. Vybrané charakteristiky můžete opět vidět v tabulce 3.3.

**Tabulka 3.3:** Specifikace AD převodníku MCP3912 [17]

Vlastnost	Podmínka	Hodnota
Typ AD převodníku		4-kanálový delta sigma převodník
Rozlišení		24 bitů
Rozsah		$\pm 1$ V
Frekvence vzorkování		až 4 MHz
Výstupní frekvence		až 125 ksps
Offset	typicky	0.2 mV
Teplotní drift offsetu		$0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
SNR	typicky	93.5 dB

Stejně jako v případě prvního zařízení jsou data z AD převodníku přeposílána do procesoru STM32 pomocí sběrnice I2C a z procesoru dále do počítače pomocí sériové linky. Kompletní zapojení zde opět není rozebíráno a lze ho najít v práci pana inženýra Novotného [11].

---

<sup>1</sup>Analogově-digitální (převodník)

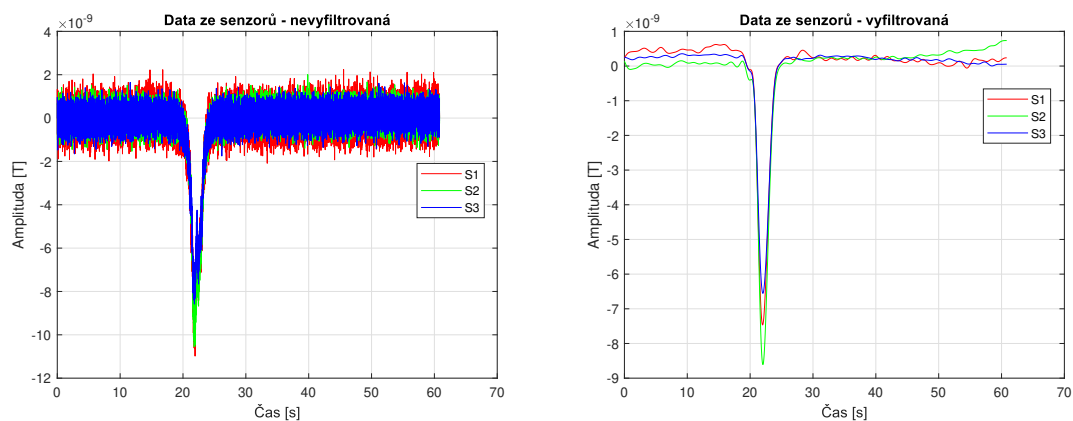
### 3.3 Zpracování dat

Data z magnetických senzorů byla bez úprav odesílána do počítače. V počítači byla pak data ukládána do textového souboru a následně zpracována v programu Matlab.

Při analyzování výsledků vyšlo najevo, že nastavení parametrů při výpočtu má na výsledné rychlosti zásadní vliv. Největší vliv mělo nastavení filtrů, délka časového úseku, ze kterého se počítala korelace. Z testů vyšla asi nejlépe kombinace parametrů popsaná níže a ta byla tedy využita u dále prezentovaných výsledků v této kapitole. Délka časového úseku zůstala prozatím nespecifikovaná a k výpočtu bylo vždy využito celé naměřené okno.

U takto získaných dat byl odečten průměr prvních 100 vzorků, pro vyrušení offsetů. Dále byla data vyfiltrována dolní propustí s mezní frekvencí 0.5 Hz a horní propustí s mezní frekvencí 0.01 Hz. Filtry byly vytvořeny pomocí funkce `designfilt()` a data poté vyfiltrovány pomocí funkce `filtfilt()`.

Nastavení filtrů vychází z požadavku na zachování tvaru signálu a odfiltrování zbytečného šumu, převážně šumu na frekvenci 50 Hz. Mohlo by se zdát zbytečné vzorkovat s frekvencí například 2 kHz, když je pak signál stejně filtrován. Vysoká vzorkovací frekvence je ale třeba převážně proto, aby bylo možné při následném výpočtu rychlosti dosáhnout dostatečného rozlišení, jelikož je zapotřebí najít relativně malé zpoždění mezi signály. Samotný signál na vyšších frekvencích ale příliš potřebný není. Časový průběh nevyfiltrovaných a vyfiltrovaných dat lze vidět na obrázcích 3.1.



(a) Nevyfiltrovaná data ze senzorů

(b) Vyfiltrovaná data ze senzorů

**Obrázek 3.1:** Časový průběh dat ze senzorů MMC5883MA

Na takto připravená data byla použita funkce `xcorr()` a podle ní bylo nalezeno zpoždění, které je využité k vypočtu rychlosti.

### 3.4 Měření se senzory MMC5883MA

Již u prvních pokusů s těmito senzory bylo jasné, že ačkoliv udává výrobce nejvyšší rychlost vzorkování 600 Hz, reálná nejvyšší dosažená rychlost vzorkování je menší. Naměřená rychlost vzorkování se rovnala kolem 427 Hz. V tabulce 3.4 můžete vidět vypočítané rychlosti pro vybraná zpoždění.

**Tabulka 3.4:** Výsledky měření pro vybraná zpoždění, bázi senzorů 7 cm a rychlost vzorkování 427.5 Hz

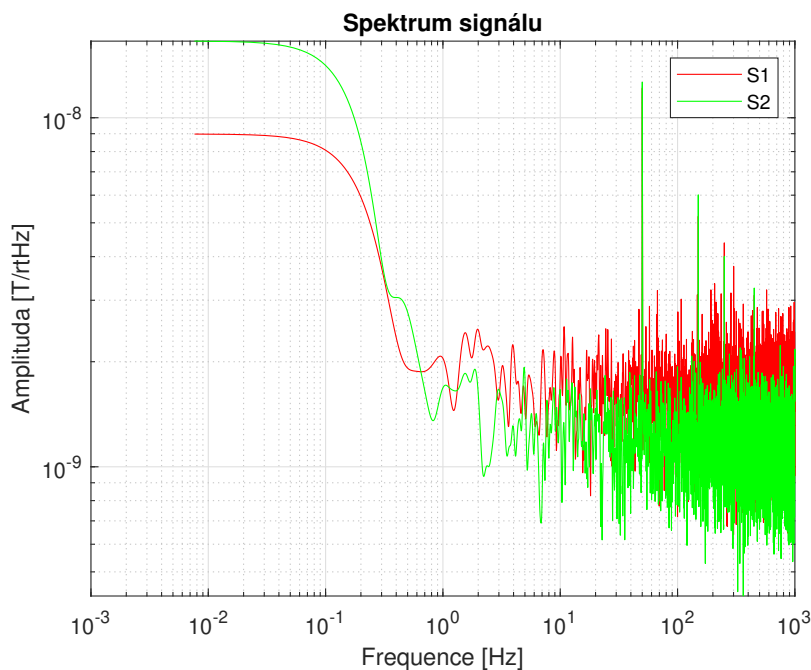
Zpoždění [vzorků]	Rychlost [km/h]
1	107.7
2	53.9
3	35.9
4	26.9
5	21.5

Jak je vidět z tabulky 3.4, při maximální rychlosti vzorkování 427 Hz a bázi senzorů 7 cm, není už z podstaty metody možné dosáhnout velké přesnosti. Signál je samozřejmě možné zkoušet převzorkovat, a tím dosáhnout mnohem lepšího rozlišení. Jelikož je ale cílem vytvořit hardware a software, který bude data zpracovávat reálném čase, bude lepší zvolit senzory, u kterých půjde vzorkovací rychlost zvětšit, jelikož převzorkování by bylo výpočetně i paměťově náročné.

Větší přesnosti by šlo dosáhnout také zvětšením báze mezi senzory. Zařízení by mělo ale zůstat kompaktní, a tak nelze tuto vzdálenost zvětšovat o mnoho. U finálního zařízení je tedy třeba najít kompromis ve vzdálenosti senzorů a vzorkovací rychlosti tak, abychom dosáhli dostatečné přesnosti, zařízení zůstalo kompaktní a procesor stíhal přijímat i vyhodnocovat data.

## 3.5 Měření se senzory HMC1021z

Měření se senzory HMC1021z přineslo již mnohem lepší výsledky. Zvýšená báze mezi senzory a zvýšení vzorkovací rychlosti umožnilo měřit s mnohem menšími chybami. Konkrétně bylo měřeno se vzorkovací rychlostí 2000 Hz. Zároveň senzory HMC1021z mají relativně malou hladinu šumu, jak můžeme vidět na obrázku 3.2. Bohužel je také vidět silné rušení na frekvenci 50 Hz a násobcích této frekvence, kvůli čemuž je nutné signál filtrovat. Rušení bylo částečně odstraněno tím, že jsme v dalších měřeních zařízení napájeli z 12 V baterie. Bohužel i přes to bylo převážně ve městě rušení na 50 Hz stále silně přítomné.



Obrázek 3.2: Ukázka šumu u senzoru HMC1021z

### 3.5.1 Průběh měření

Zařízení na měření rychlosti bylo umístěné 0.5 m nad vozovkou a auta projížděla ve vzdálenosti cca 1.5 m. Měření bylo provedeno se dvěma vozidly, konkrétně se Škodou Yeti a Citroenem C3 Picasso. Auta projížděla kolem zařízení rovně, souběžně se směrem osy  $y$  magnetických senzorů. Při průjezdu byla držena konstantní rychlost pomocí tempomatu. Kolem senzoru vždy projíždělo pouze jedno vozidlo najednou.

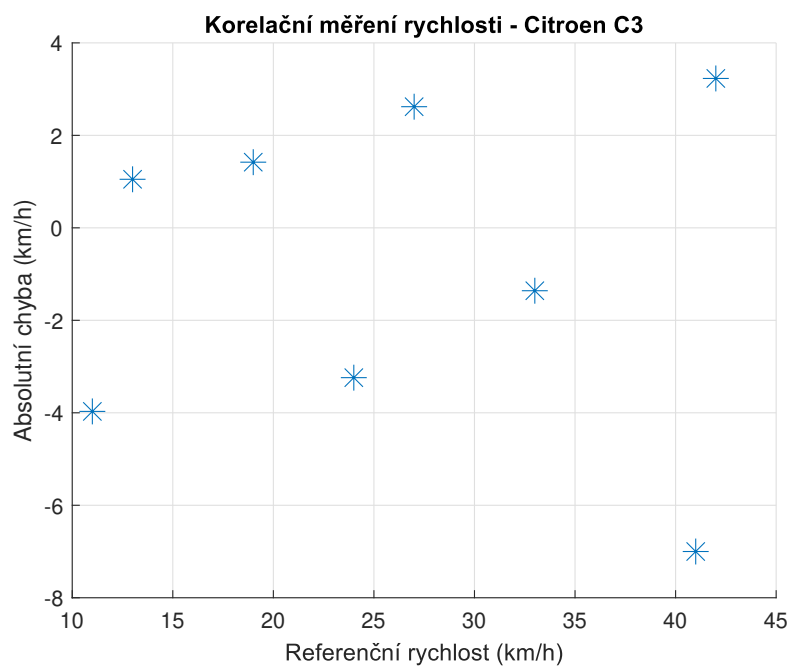
Jelikož referenční zařízení rychlosti nebylo v této části projektu zatím hotové, rychlosti byly porovnány pouze nahrubo s rychlostí odečtenou z tempomatu, od



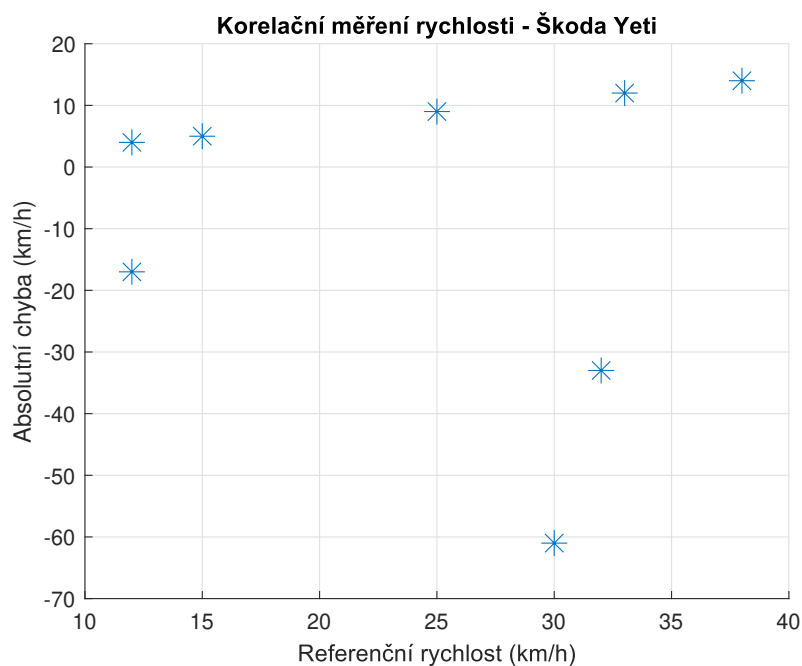
kteřé byly odečteny 3 km/h, o které tachometry v autech běžně přeměřují. Ve finální části práce jsou pak data porovnávána s referenční optickou závorou, která byla k tomuto účelu navržena.

## 3.6 Výsledky

S oběma vozidly bylo provedeno přibližně 10 měření. Bohužel kvůli chybám v přenosu dat do počítače byla část dat ztracena. V grafech 3.3 a 3.4 můžete vidět absolutní chyby měření.



**Obrázek 3.3:** Absolutní chyby měření rychlosti s Citroenem C3



**Obrázek 3.4:** Absolutní chyby měření rychlosti se Škodou Yeti

Výsledky měření s Citroenem C3 vychází velmi příznivě. Průměrná absolutní chyba nepřesahuje 4 km/h. Výsledky měření se Škodou Yeti nejsou ale zdaleka tak příznivé. Průměrná chyba u měření se Škodou Yeti je téměř 20 km/h. Jelikož podmínky pokusu byly u měření s oběma vozidly stejné a měření proběhla hned po sobě, lze asi vyloučit vliv nějakého vnějšího rušení. Nejspíše se kvůli prodloužení báze mezi senzory pouze více projevil fakt, že se vozidla reálně chovají jako více dipólů.

Pro ověření, že se nejedná o chybu korelace způsobenou například šumem, zpoždění mezi daty bylo určeno přibližně i manuálně, a to nalezením zpoždění mezi maximem dat z obou senzorů. Takto nalezené zpoždění opravdu neodpovídalo zpoždění, které by bylo očekávané pro dané rychlosti vozidel a odpovídalo spíše výsledkům nalezeným korelací.

I přesto se zdá, že senzory HMC1021z jsou pro potřeby měření rychlosti dostatečné. U finálního zařízení bude ale třeba najít správný kompromis vzdálenosti mezi senzory a rychlostí vzorkování. Příliš velká báze znamená, že se projeví více-dipólové chování vozidel, díky čemuž nemusí zpoždění nalezené korelací odpovídat. Příliš velká rychlost vzorkování zase značně zvyšuje nároky na rychlost procesoru a paměť.

# Kapitola 4

## Návrh referenčního měření

Jelikož rychlosti naměřené zařízením s magnetickými senzory bylo třeba s něčím porovnat, bylo navrženo za tímto účelem i referenční měření. Jedná se o dvojitou laserovou optickou závoru. Pro odstranění vlivu slunečního záření a vlivů dalších rušivých zdrojů světla je laser modulován. Měření časového úseku a výpočet rychlosti se provádí na desce Nucleo F446RE, ze které jsou výsledné rychlosti dále odesílané do počítače pomocí UART<sup>1</sup>. Závoru jsou umístěné 1 metr od sebe a k měření času je použit 32 bitový timer s frekvencí 80 MHz, rozlišení je tedy 12,5 ns.

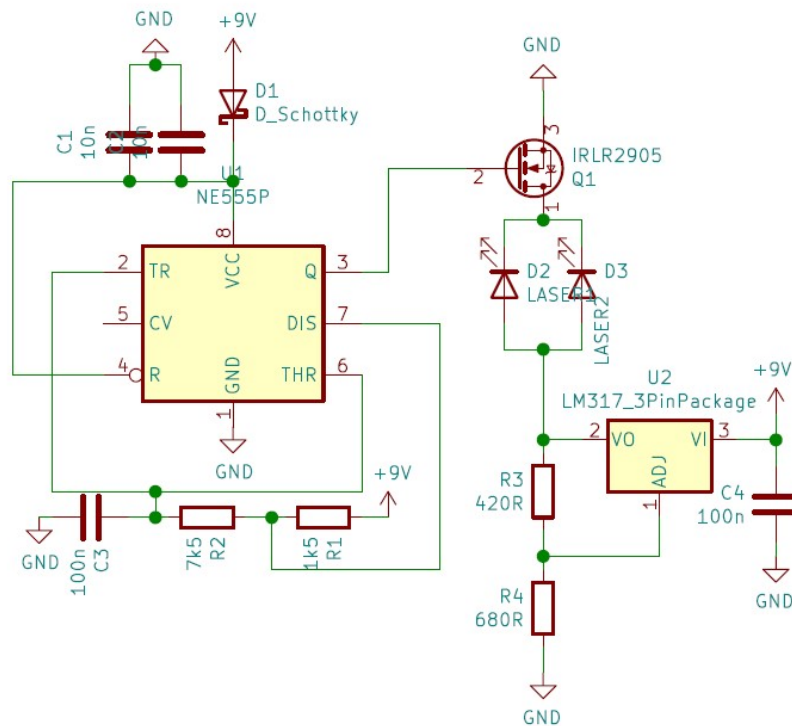
### 4.1 Hardware optických závor

Schéma modulace a napájení laserů můžete vidět na obrázku 4.1. Lasery jsou modulovány pomocí obvodu NE555, který je zapojený jako astabilní klopný obvod. Frekvence se kterou jsou lasery modulovány je přibližně 9 kHz. Obvod je napájený z 9 V baterie. Jelikož lasery mají být napájené z 3,3 V, je do obvodu ještě přidán regulátor LM317, který mění vstupních 9 V na výstupních 3,3 V.

Na straně přijímače je jako optický senzor využita fotodiody BPW34. Zpracování modulovaného signálu probíhá následovně. Proudový výstup fotodiody je převeden na napětí pomocí převodníku proudu na napětí. Signál je pak vyfiltrován pásmovou propustí, která propouští signál přibližně mezi 300 Hz až 30 kHz. Po pásmové propusti následuje aktivní špičkový detektor a komparátor s nastavitelnou úrovní citlivosti. Jelikož výstupem komparátoru jsou přímo logické úrovně, jeho výstup je napojený na piny procesoru, který může rovnou zpracovávat data. Strana

---

<sup>1</sup>universal asynchronous receiver-transmitter



Obrázek 4.1: Schéma napájení a modulace laserů

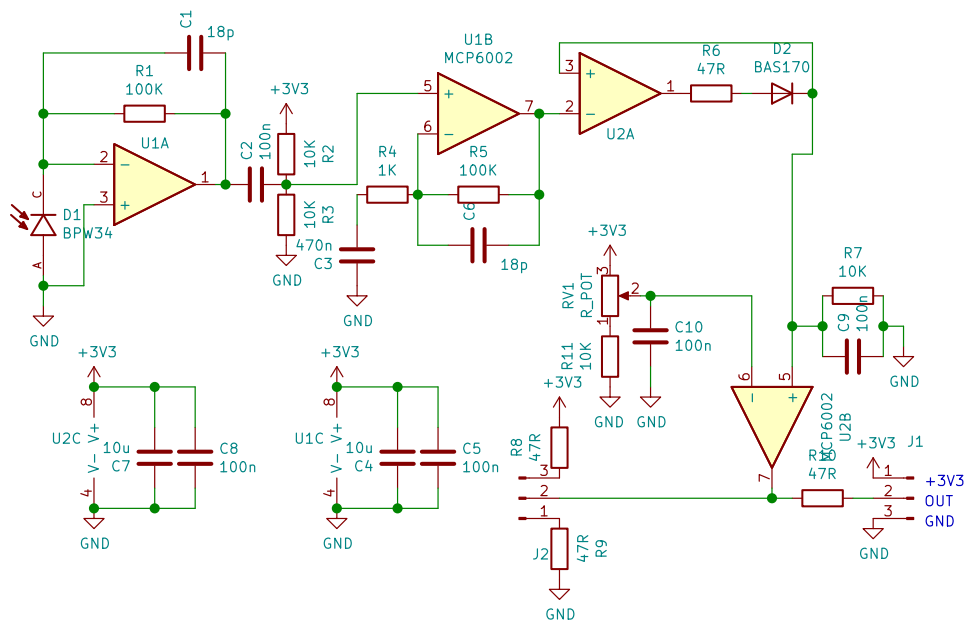
přijímače je napájena pomocí 3,3 V z desky Nucleo. Celé schéma můžete vidět na obrázku 4.2.

## 4.2 Přesnost měření

V laboratoři byla ověřena přesnost měření času na desce Nucleo a jaký vliv má na výsledné rychlosti. Na piny procesoru byly posílány pulsy s různým zpožděním pomocí dvoukanalového generátoru funkcí, čímž byl simulován průjezd vozidla a zakrytí přijímače. Zjištěná chyba je minimální, například pro auto jedoucí rychlostí 100 km/h je tato chyba 0.003 km/h a relativní chyba je tedy 0,003 %.

Dalším zdrojem chyb může být různá reakční doba přijímačů, způsobená například různými odchylkami součástek. Tato chyba jde do určité míry ovlivnit pomocí nastavení citlivosti komparátoru, ale nejmenší odchylka, kterou se takto podařilo dosáhnout, je 10  $\mu$ s. Při jízdě 100 km/h je chyba cca 0.04 km/h a relativní chyba je tedy 0,04%.

Metoda měření s optickými branami předpokládá, že auto projede bránou rovně,



**Obrázek 4.2:** Schéma zapojení přijímače optické závory

respektive kolmo na paprsky laserů. To není v realitě nikdy možné úplně zaručit. Chyba, která vznikne, když auto bude od rovného průjezdu odkloněno o  $10^\circ$ , je při rychlosti 100 km/h cca 1,5 km/h a relativní chyba je tak 1,5 %. Toto bude tedy pravděpodobně největší zdroj chyb, na který bude třeba dát při měření pozor.

Další chyby, jako například zakmitání na výstupu komparátoru při změně stavu, jsou potlačeny softwarově. Celkově se tedy jedná o velmi přesný způsob měření. Například policejní radary mají do 100 km/h jednotnou povolenou odchylku  $\pm 3$  km/h [5], kterou by mělo splňovat i výše popsané referenční měření.



# Kapitola 5

## Finální hardware

Při testování hardware pro detekci vozidel, byly desky uloženy v průmyslovém boxu o velikosti 11x11 cm. Jelikož taková velikost se zdá ideální, i nový hardware byl navržen tak, aby šel do boxu namontovat. To tedy znamená uzpůsobit tvar a velikost navrhovaného PCB<sup>1</sup>. Uložení do boxu zaručí ochranu před poškozením, ale velikost zůstaneme relativně malá, a zařízení tak bude snadno přenosné.

Po testech uvedených v kapitole 3 byly zvoleny senzory HMC1021z, které se zdají být pro měření rychlosti dostatečné. Na desku byly umístěny 2 tripletty těchto senzorů tak, aby bylo možné měřit magnetické pole ve 3 osách. Magnetické senzory byly na desce umísťovány co nejdále od dalších součástek, které by mohly způsobovat magnetické rušení.

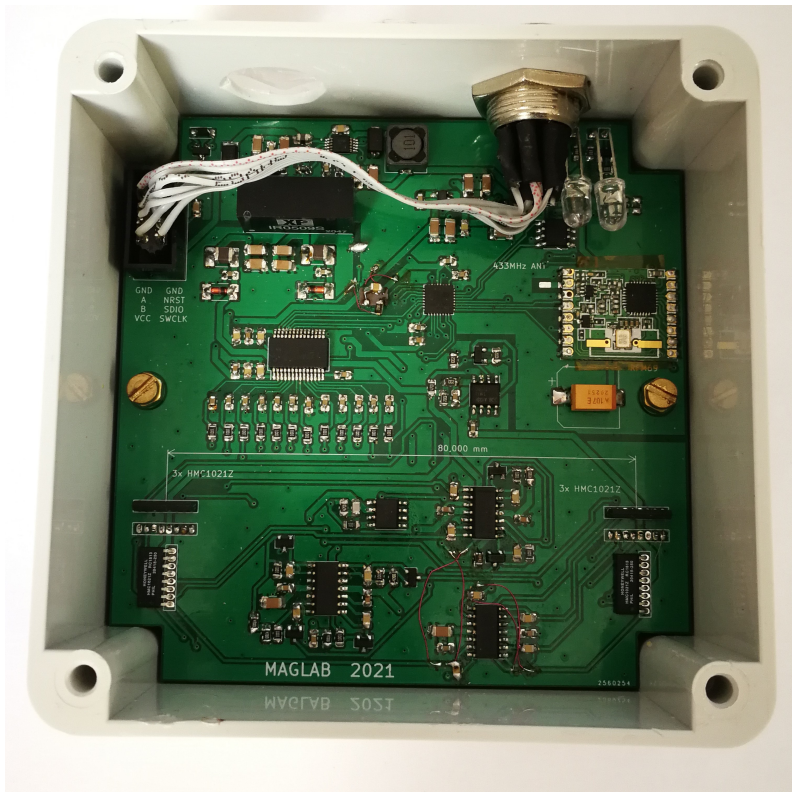
Báze mezi senzory byla zvolena 8 cm. Velikost báze byla omezena velikostí desky, navíc po prvních pokusech v kapitole 3 se zdálo, že větší báze by mohla způsobovat nepřesnosti ve výpočtu rychlosti, jelikož se vozidla nechovají jako jeden dipól. Se vzorkovací rychlostí 16 kHz a touto bází bude rozlišení senzoru cca 1.5 km/h, což by pro informativní měření mělo být dostatečné. Teoreticky bychom ale se zvoleným senzorem a AD převodníkem měli být schopni dosáhnout i větších vzorkovacích rychlostí a rozlišení tak ještě zlepšit.

Schéma i návrh samotného PCB byl proveden v programu KiCad. Jedná se o 2 vrstvou desku s tloušťkou 1.6 mm. Navržená deska vychází ze zařízení pro detekci vozidel vzniklého na fakultě v rámci diplomové práce pana inženýra Novotného [11]. Finální verzi desky již zamontovanou ve vybraném boxu můžete vidět na obrázku

---

<sup>1</sup>printed circuit board

5.1. Kompletní schéma desky můžete najít v přílohách na konci práce.

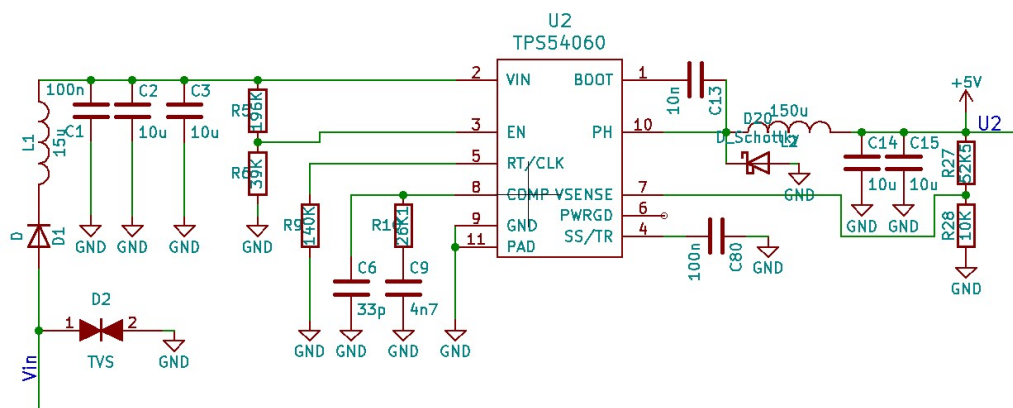


**Obrázek 5.1:** Ukázka finální verze PCB zamontovaná ve vybraném průmyslovém boxu

## 5.1 Napájení

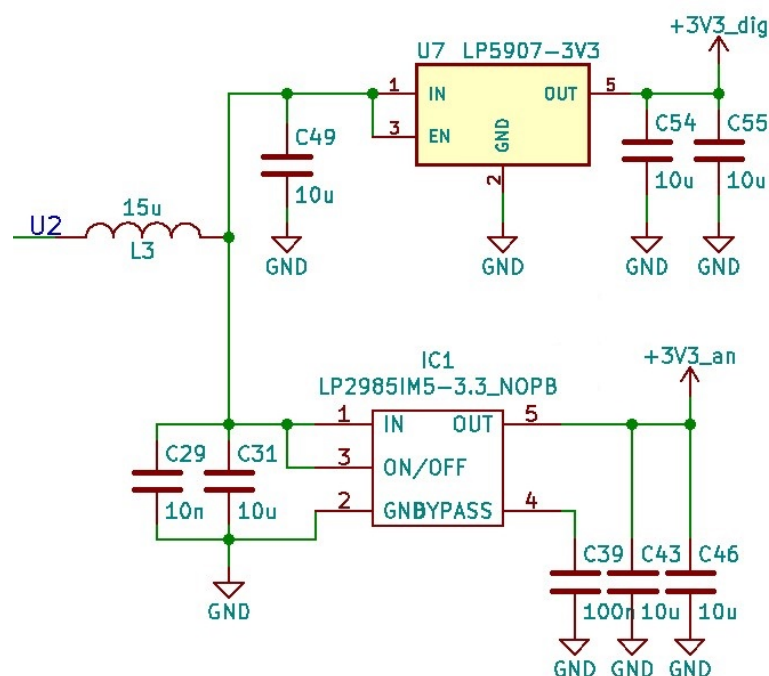
Jelikož zařízení mělo být možné napájet jak ze sítě přes adaptér, tak například z 12 V baterie, aby bylo přenosné, bylo nutné do obvodu zařadit regulátor, který bude mít relativně velký rozsah vstupních hodnot. Byl vybrán spínaný zdroj TPS54060 od společnosti Texas Instruments, jehož rozsah je 3.5 - 60 V. Maximální možný proud regulátorem je 0.5 A, což je pro naši aplikaci dostatečné. Výstupní napětí je možné nastavit děličem mezi piny VSENSE a PH a je nastavený na výstup 5 V. Zapojení můžete vidět na obrázku 5.2.





Obrázek 5.2: Schéma první části napájení s regulátorem TPS54060

Pro napájení a oddělení digitální od analogové části jsou využity regulátory LP5907 a LP2985IM5, opět od společnosti Texas Instruments. Tyto regulátory mají menší rozsah než výše zmíněný TPS54060, zato je jejich výstup přesnější a méně šumivý. V kombinaci s regulátorem TPS54060 znamenají stabilní napětí pro napájení digitální i analogové části obvodu. Výstup pro napájení digitální i analogové části je nastaven na 3.3 V. V tomto případě je výstupní napětí součástek fixní a nastavené výrobcem. Zapojení těchto regulátorů můžete vidět na obrázku 5.3.

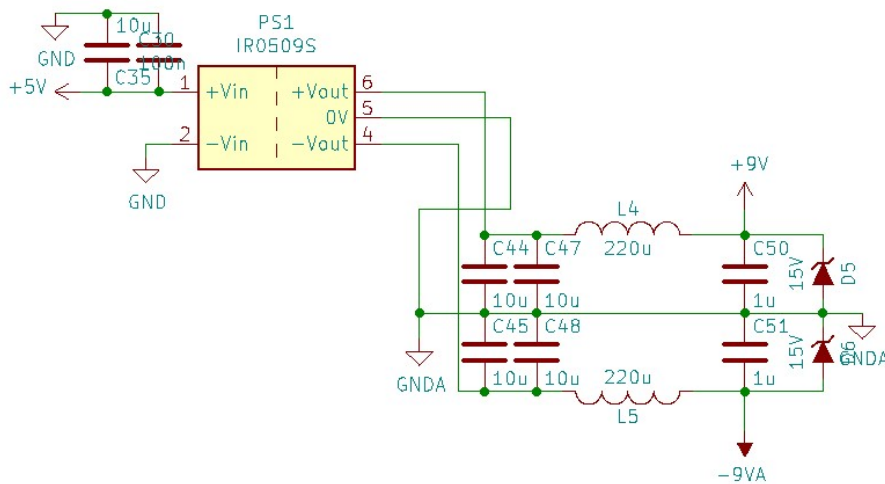


Obrázek 5.3: Schéma napájení digitální a analogové části

Senzory HMC1021z potřebují jako napájení zdroj proudu. Tento zdroj vytvořen pomocí operačních zesilovačů TL074. Tyto zesilovače mají symetrické napájení  $\pm 9V$ .

Pro vytvoření tohoto napětí byl do obvodu přidán regulátor IR0509SA od výrobce XP Power. Zapojení můžete vidět na obrázku 5.4.

Pro funkčnost AMR senzorů je důležité flipování, jak je vysvětleno v kapitole 2.3.1. Flipovací část obvodu je také napájena pomocí 9 V. Regulátor byl tedy vybírán tak, aby snesl relativně vysoké proudy, které je při flipování třeba chvilkově generovat.

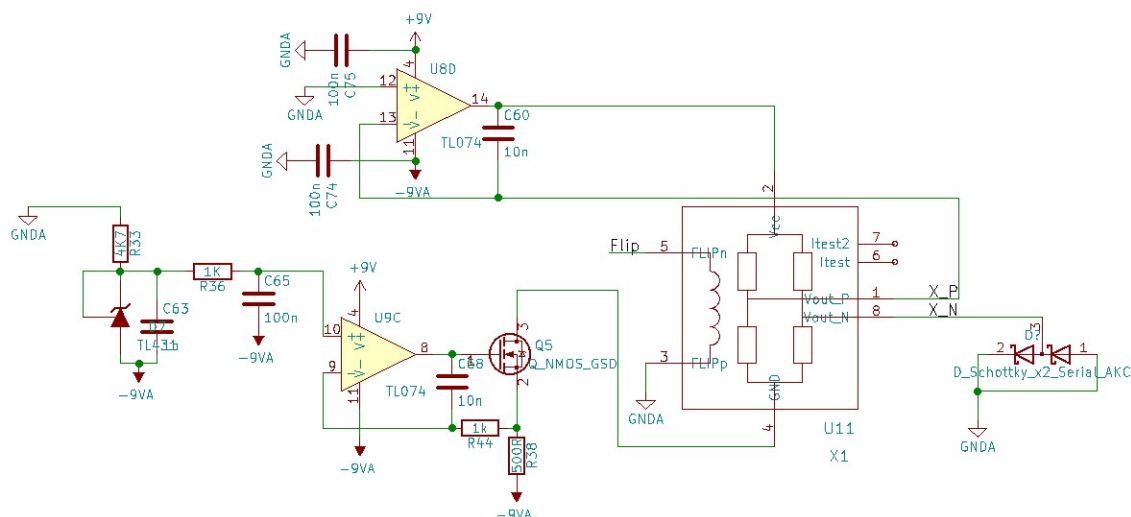


**Obrázek 5.4:** Schéma napájení zdrojů proudu a flipovací části obvodu

## 5.2 Magnetické senzory

Jak bylo řečeno v kapitole 2.3.1, AMR senzory jsou často tvořené více prvky, které jsou zapojeny do Wheatstoneova můstku. To je i případ senzoru HMC1021z. Senzor má tedy 2 výstupy, které jsou výstupem zmíněného můstku. Můstek je napájen ze zdroje proudu. Jelikož maximální rozsah napětí, které zvládne vybraný AD převodník je  $\pm 1$  V, bylo třeba vytvořit takové zapojení, aby výstup můstku toto splňoval. Toho je dosaženo pomocí zpětnovazebního zapojení s operačním zesilovačem, které je popsáno dále v kapitole.

Zapojení senzoru můžete vidět na obrázku 5.5. Kvůli přehlednosti je v této kapitole ukázáno pouze zapojení jednoho ze senzorů. Všech šest senzorů je ale zapojeno totožně.



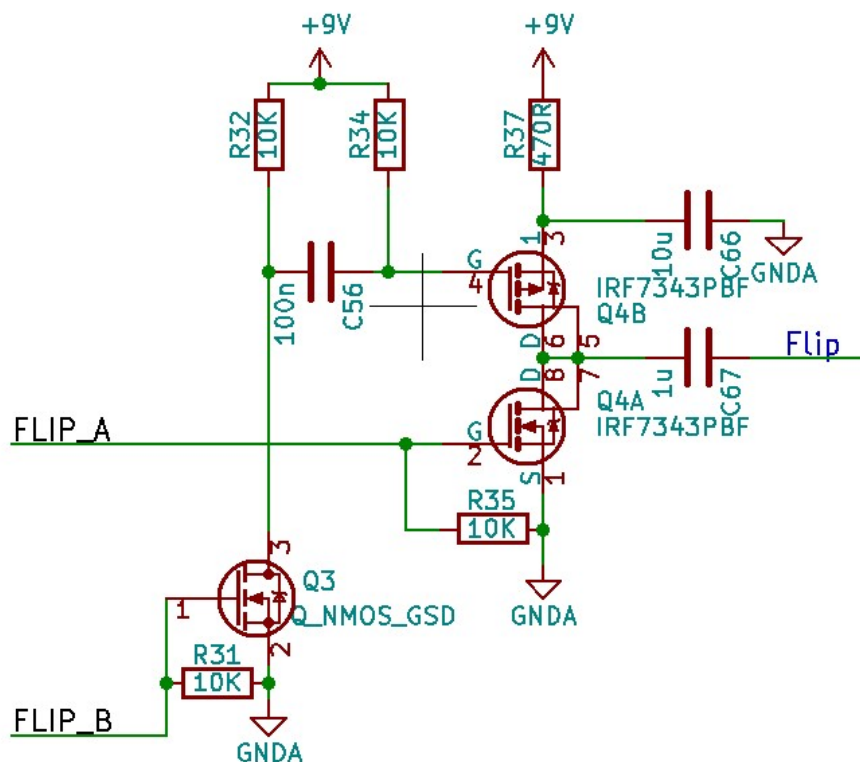
**Obrázek 5.5:** Schéma zapojení senzorů HMC1021z

Bylo zapotřebí vytvořit stabilní zdroj proudu. Zdroj proudu je vytvořen pomocí operačního zesilovače TL074, NMOS<sup>2</sup> tranzistoru a napěťové reference vytvořené pomocí stabilizátoru TL431. Na vstup zesilovače je přivedeno napětí ze stabilizátoru TL431, ten díky tomu drží na výstupu konstantní napětí, které je připojeno na snímací rezistor.

Jedna z výstupních svorek je díky zpětné vazbě připojena na nulový potenciál. Na druhé výstupní svorce je tedy napětí výstupu můstku, které je řádově menší než  $\pm 1$  V (výstup senzorů je řádově v mV), a je tedy splněna podmínka stanovená AD převodníkem. Výstup senzoru je navíc chráněn dvojicí schottkyho diod proti přepětí, v případě že by došlo například k poškození senzoru. Diody zabrání, aby na výstupu bylo větší napětí než  $\pm 1$  V, které by poškodilo AD převodník.

Pro správné fungování AMR senzorů je potřeba jednou za čas obnovit jejich přesnost pomocí flipování, jak bylo popsáno v kapitole 2.3.1. Flipovací cívka se nachází přímo v senzoru. Je ale třeba zařídit zdroj proudu takový, aby při průchodu cívkou generoval dostatečně silné magnetické pole. Obvod ke generování proudu pro flipování můžete vidět na obrázku 5.6. Flipování je řízené dle potřeby pomocí mikrokontroleru.

<sup>2</sup>N-type metal-oxide-semiconductor



Obrázek 5.6: Schéma zapojení obvodu pro flipování

### 5.3 Zpracování signálu

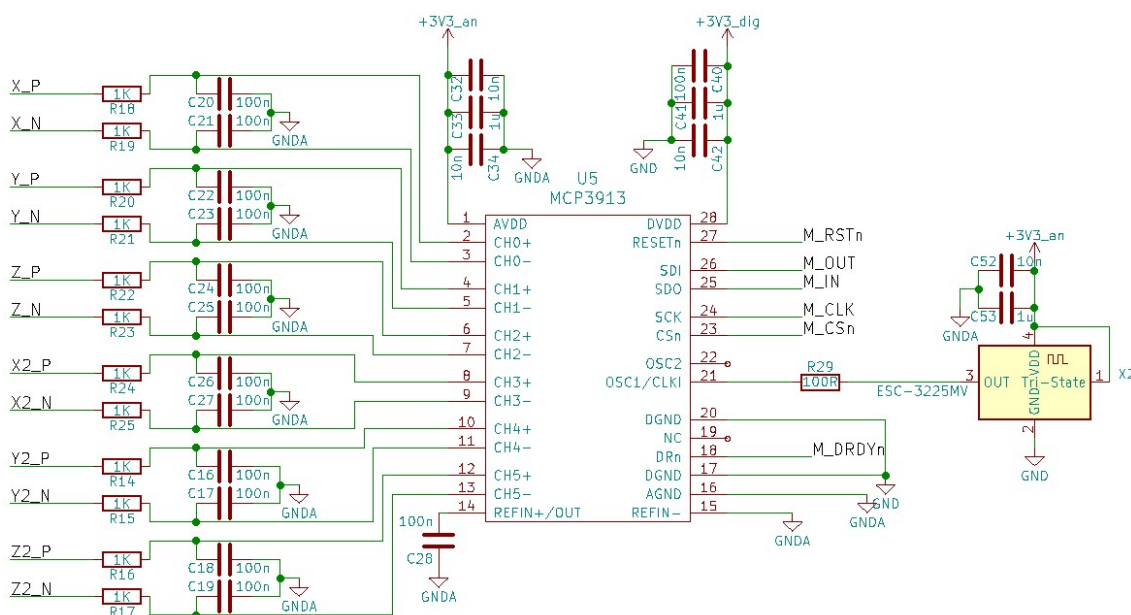
Pro digitalizaci bylo třeba najít převodník, který je šestikanálový a je schopný vzorkovat diferenciální vstup, jelikož výstup AMR senzorů je výstup Wheatstoneova můstku. Byl zvolen AD převodník MCP3913. Jedná se o šestikanálový delta-sigma převodník od firmy Microchip. Kanály je možné vzorkovat simultánně, což je pro potřeby měření rychlosti kritické - časový posun mezi vzorky by způsoboval chyby při výpočtu rychlosti. Další vlastnosti převodníku můžete vidět v tabulce 5.1

**Tabulka 5.1:** Specifikace AD převodníku MCP3913 [18]

Vlastnost	Podmínka	Hodnota
Typ AD převodníku		6-kanálový delta sigma převodník
Rozlišení		24 bitů
Rozsah		$\pm 1$ V
Frekvence vzorkování		až 4 MHz
Výstupní frekvence		až 125 ksp/s
Offset	typicky	0.2 mV
Teplotní drift offsetu		$0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
SNR	typicky	93.5 dB
Komunikační rozhraní		SPI

Jelikož je třeba zajistit, aby co nejlépe odpovídala převodní frekvence, kterou přímo využíváme k výpočtu rychlosti, je k převodníku navíc externě připojený kryštalový oscilátor. Jedná se o oscilátor ECS-2520MV, který osciluje na frekvenci 16 MHz.

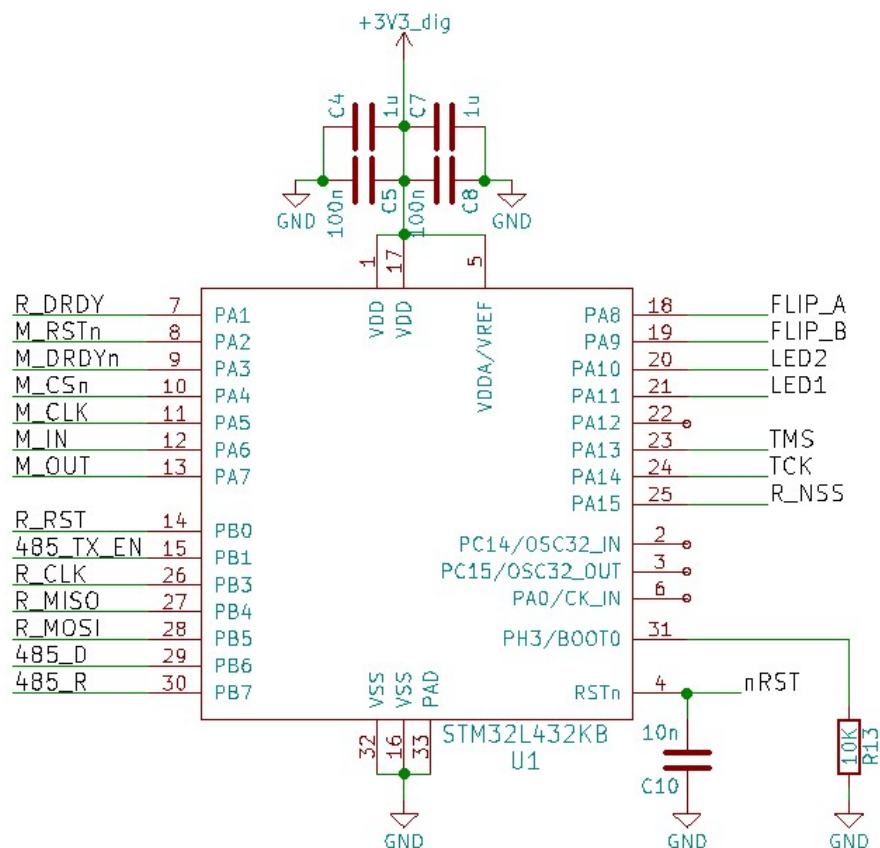
Komunikaci s procesorem je zajištěna pomocí SPI<sup>3</sup>. Celkové zapojení převodníku můžete vidět na obrázku 5.7.

**Obrázek 5.7:** Schéma zapojení AD převodníku

<sup>3</sup>serial peripheral interface

Jelikož výpočet korelace je paměťově a výkonově náročná operace, bylo nutné zvolit dostatečně rychlý mikrokontroler, který bude mít dostatek paměti RAM pro udržování dat z magnetických senzorů. Navíc je nutné, aby měl mikrokontroler minimálně 2 rozhraní SPI pro připojení AD převodníku a RF<sup>4</sup> modulu a dále rozhraní UART, aby mohlo zařízení komunikovat například s počítačem či jiným nadřazeným zařízením.

Zvolen byl procesor STM32L432KB. Má 64 KB RAM a maximální rychlost je 80 MHz. Tento procesor má 2 SPI rozhraní, 3 UART rozhraní a další rozhraní jako I2C, která by se mohla hodit, pokud se bude návrh v budoucnu měnit [19]. Procesory STM navíc mají možnost využívat DSP<sup>5</sup> instrukce, které velice usnadní psaní programu pro výpočet korelace a samotný program navíc zrychlí. Zapojení můžete vidět na obrázku 5.8.



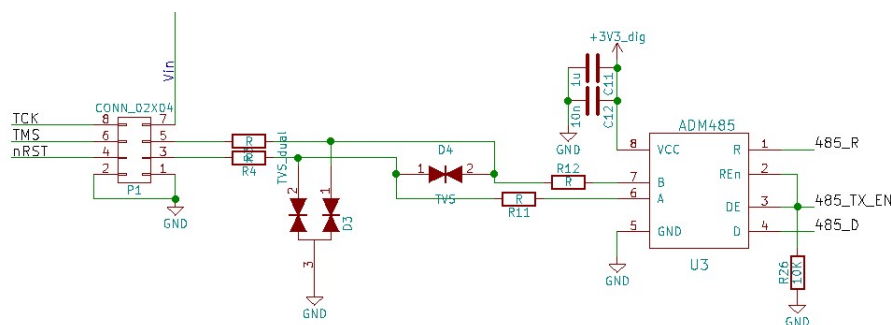
Obrázek 5.8: Schéma zapojení mikrokontroleru

<sup>4</sup>radio-frequency (module)

<sup>5</sup>digital signal processing

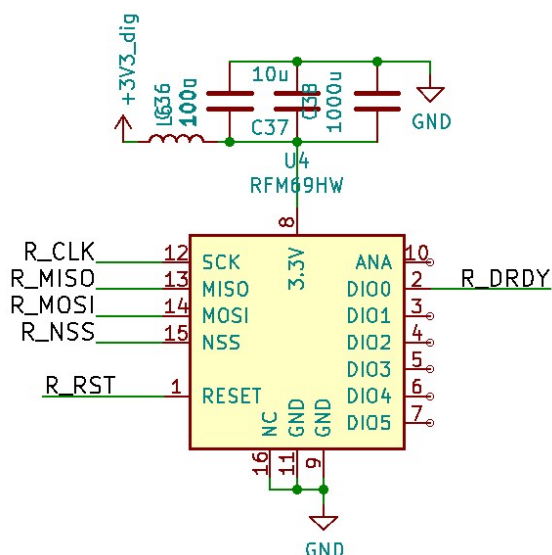
## 5.4 Komunikační rozhraní

Aby mohlo zařízení komunikovat s počítačem či jinou nadřazenou jednotkou, obsahuje převodník UART na sběrnici RS485. Zapojení převodníku můžete vidět na obrázku 5.9.



**Obrázek 5.9:** Schéma zapojení převodníku UART na RS485

Jelikož má být zařízení přenosné, zdálo se vhodné přidat i možnost bezdrátové komunikace. To bylo vyřešené přidáním modulu RFM69HW. Modul umí komunikovat v širokém pásmu frekvencí a má možnost nastavení několika metod modulace. Modul má relativně malou spotřebu, kterou můžeme ještě upravit nastavením vysílacího výkonu. Pro modul navíc existují open-source knihovny, například [20], které nám mohou usnadnit práci. Zapojení modulu můžete vidět na obrázku 5.10.



**Obrázek 5.10:** Schéma zapojení RF modulu





# Kapitola 6

## Výsledky měření s novým hardware

S novým hardware byly provedeny 2 typy měření. Jedno měření bylo provedeno podobně jako v kapitole 3 - s vozy Škoda Yeti a Citroen C3 v "ideálních" podmínkách. Druhé měření proběhlo u silnice, kde byla měřena náhodně projíždějící vozidla. toto měření se tedy více přibližovalo podmínkám, v jakých by bylo zařízení reálně využité. V této části projektu byla již vyvinuta optická závora, která je popsána v kapitole 4 a která byla využita jako referenční měření.

Data ze zařízení byla opět bez zpracování posílána do PC, kde byla ukládána do textového souboru pro pozdější zpracování. Využitý AD převodník má rozlišení 24 bitů, ale efektivní počet bitů převodníku je 16. Z převodníku se tedy četlo a ukládalo pouze horních 16 bitů. Díky tomu bylo možné zvýšit vzorkovací rychlost ze 2 kHz na 7812 Hz. Vyšší vzorkovací rychlost, kterou AD převodník umí - 15625, už bohužel nebylo možné přenášet přes UART, jelikož bylo třeba nastavit tak vysoký baudrate, že signál byl už příliš zdeformovaný.

### 6.1 Měření se Škodou Yeti a Citroenem C3

#### 6.1.1 Průběh měření

Měření proběhlo se dvěma vozidly - Škodou Yeti a Citroenem C3. S každým vozidlem bylo naměřeno přibližně 15 průjezdů s rychlostmi mezi 10-50 km/h. Jako referenční měření byla využita optická závora, která je popsána v kapitole 4.

Zařízení s magnetickými senzory bylo umístěné na zemi asi 0.5 m od vozovky. Vozidla projížděla cca metr od zařízení. Kolem senzoru projíždělo vždy pouze jedno vozidlo najednou a to konstantní rychlostí. Při průjezdech byl dáván zřetel na průjezd kolmý k paprskům světelné závor, aby nevznikaly odchylky v důsledku šikmého průjezdu závorou.

### 6.1.2 Zpracování dat

Zpracování dat proběhlo v programu Matlab. Korelace byla počítána pro všechny osy. Zároveň se zdálo vhodné zkusit korelaci počítat například i z celého magnetického vektoru či vyzkoušet korelaci počítat z analytického signálu. Proto jsme kromě jednotlivých os počítali korelaci i pro následující signály.

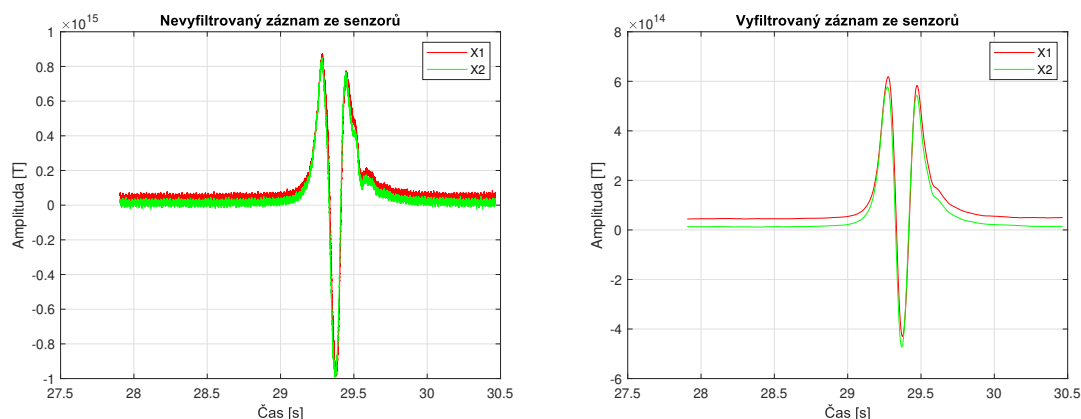
$$B_{abs} = |B_x| + |B_y| + |B_z| \quad (6.1)$$

$$B_{sqrt} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (6.2)$$

kde  $B_x$ ,  $B_y$  a  $B_z$  jsou data z jednotlivých os. U takto připravených dat byl poté odečten průměr prvních 100 vzorků pro vyrušení offsetů.

Navzdory snaze co nejvíce odstranit rušení na frekvenci 50 Hz - například napájením zařízení z baterie místo přes adaptér ze sítě, bylo rušení stále silně přítomné. Šum byl bohužel tak silný, že se korelace často chytala právě na posun způsobený signálem o této frekvenci místo na posun signálů způsobený průjezdem vozidla. Signál bylo tedy třeba vyfiltrovat. Oproti původnímu měření bylo zvoleno filtrování odečtem klouzavého průměru. To umožňuje ztlumit právě frekvenci 50 Hz a její násobky a naopak zanechat užitečný signál. Pro vyfiltrování pak byla využita funkce `movmean()`.

Z pokusů také vyšlo najevo, že korelace funguje jednoznačně nejlépe, když je počítána ze signálu, kde je vidět celý průjezd vozidla. Pro menší rychlosti je průjezd v signálu vidět okolo 2 vteřin. Při vzorkovací rychlosti 7812 byla tedy využita velikost okna 20000 vzorků. Ukázkou dat ze sensorů můžete vidět na obrázku 6.1.



(a) Nevyfiltrovaná data ze senzorů

(b) Vyfiltrovaná data ze senzorů

**Obrázek 6.1:** Časový průběh dat ze senzorů HMC1021z

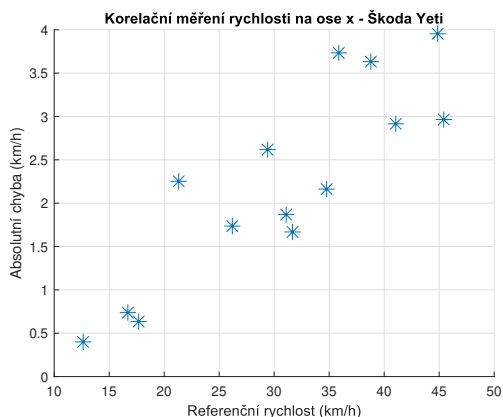
Na takto připravená data byla použita funkce `xcorr()` a podle ní bylo nalezeno zpoždění, které je poté využito k výpočtu rychlosti.

### 6.1.3 Výsledky

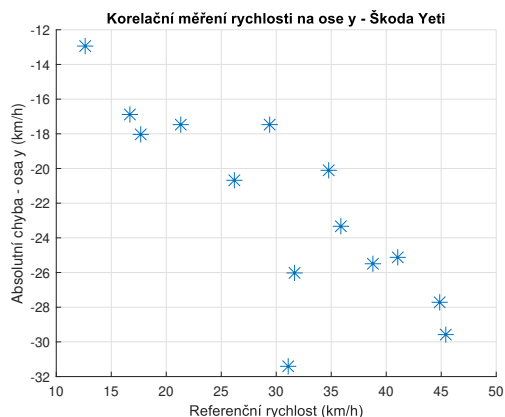
Nejprve byly analyzovány výsledky korelací na jednotlivých osách a analytických signálech. Nejlépe funguje metoda korelace na ose kolmé k jízdě vozidla a rovnoběžné s rovinnou vozovky - ose x. Naopak na ose y, která je souběžná s jízdou vozidla jsou výsledky nehorší. Relativní chyby některých výpočtů dosahují u osy y téměř 100%.

U analytických signálů se předpokládalo, že by díky nim mohla být metoda výpočtu robustnější. Předpoklad byl, že pokud budou data na jedné ose zašumělá, bude výsledný výpočet rychlosti stále přesný díky datům ze zbylých 2 os. Bohužel se ukázalo, že pokud metoda vrátí špatný výsledek na ose x, vrátí u většiny případů špatný výsledek i na zbylých osách. Zároveň se na ose x nejméně často stává, že by korelace mezi signály nenašla žádný posun.

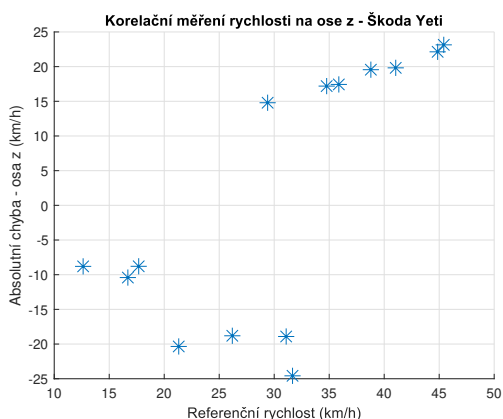
Díky tomu funguje metoda výpočtu z analytického signálu jen v případě, že funguje pro samostatnou osu x a vytvářet analytické signály se tedy zdá zbytečné. Jelikož jsou výsledky na ose x nejlepší, budu v dalším textu udávat právě tyto výsledky. Ukázkou výsledků měření rychlosti můžete vidět na obrázcích 6.2.



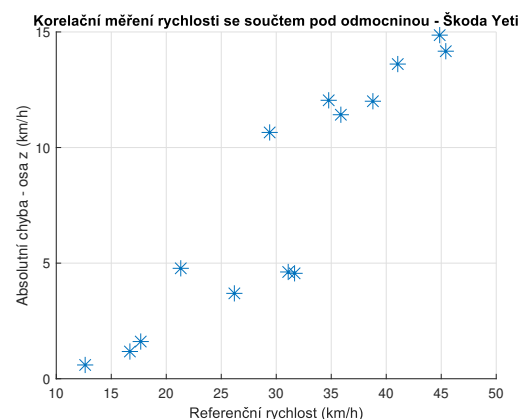
(a) Výsledky měření na ose x



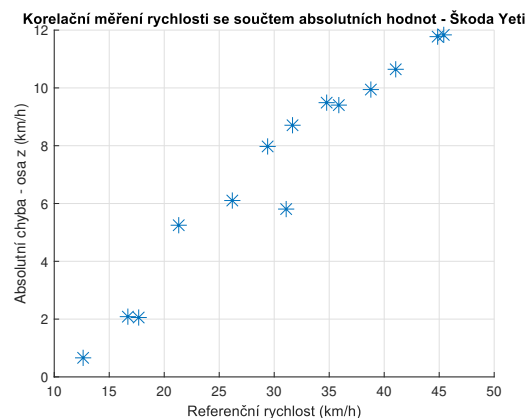
(b) Výsledky měření na ose y



(c) Výsledky měření na ose z



(d) Výsledky měření z celého mag. vektoru

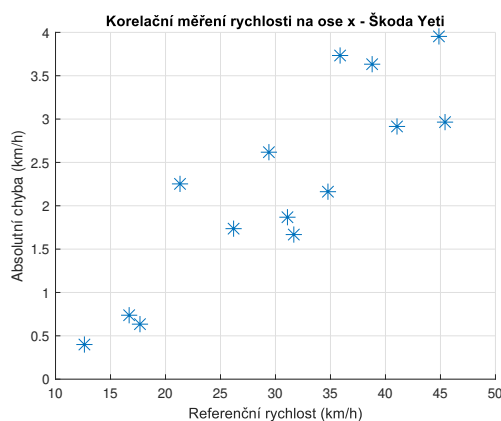


(e) Výsledky měření z analytického signálu

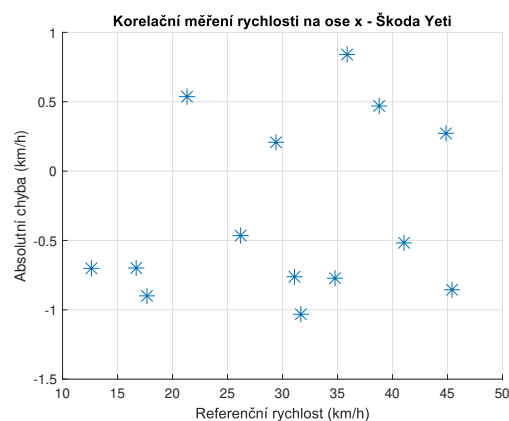
**Obrázek 6.2:** Výsledky měření pro jednotlivé signály s vozidlem Škoda Yeti

Z výsledků měření se Škodou Yeti je vidět, že jednoznačně nejlépe vycházejí rychlosti na ose x, kde maximální absolutní chyba nepřesahuje 4.5 km/h. Z grafu se navíc zdá, že dochází při měření k multiplikativní chybě. Ta může být způsobená například špatným zarovnáním referenčního měření a zařízení s magnetickými senzory, případně nepřesným určením vzorkovací frekvence AD převodníku. Experimentálně

byla tedy určena konstanta 1.09. Pokud jí vynásobíme výsledné rychlosti, dostaneme se na maximální absolutní chybu  $\pm 1$  km/h, jak můžeme vidět na obrázku 6.3.



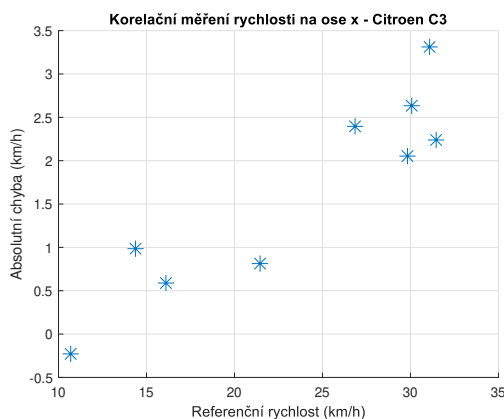
(a) Výsledky měření na ose x



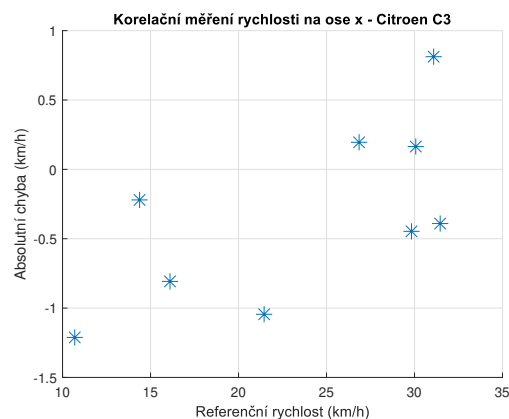
(b) Výsledky měření na ose x s korigovanou multiplikativní chybou

**Obrázek 6.3:** Výsledky měření s vozidlem Škoda Yeti

Na výsledcích měření s Citroenem C3 je vidět, že při průjezdu vozidla kolem senzoru jednou stranou - v kladném směru, jsou výsledky srovnatelné s těmi z měření se Škodou Yeti. Opět je na výsledcích vidět multiplikativní chyba, které se lze zbavit vynásobením konstantou 1.09. Absolutní chyba pak nepřesahuje  $\pm 1.5$  km/h. Tyto výsledky můžete vidět v grafu 6.5.



(a) Výsledky měření na ose x

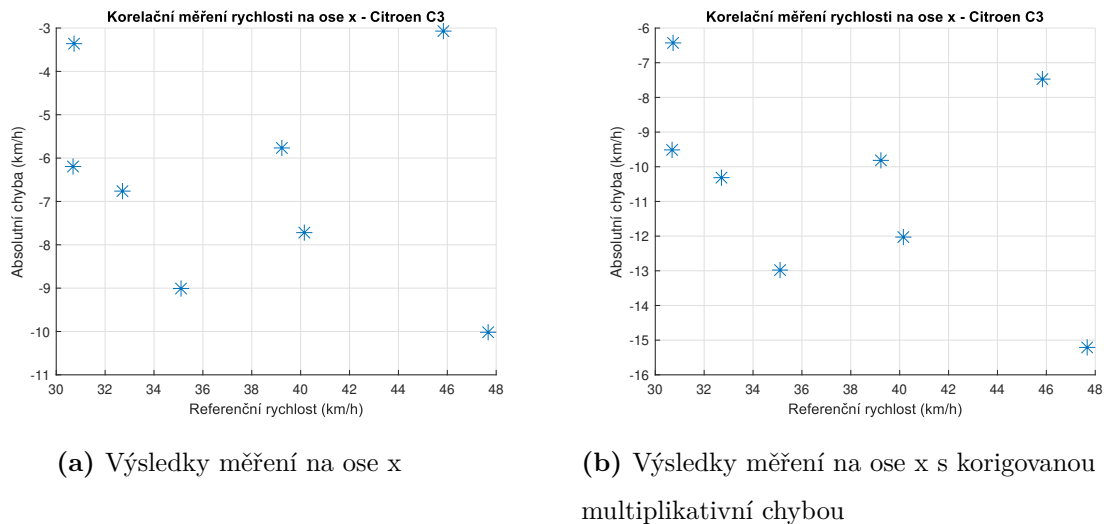


(b) Výsledky měření na ose x s korigovanou multiplikativní chybou

**Obrázek 6.4:** Výsledky měření v kladném směru s vozidlem Citroen C3

Při průjezdu druhou stranou - v záporném směru, dochází ale v metodě k relativně velkým chybám, jak můžete vidět v grafu ???. Chyby zde dosahují absolutní

odchylky 10 km/h. Navíc korekce pomocí konstanty 1.09 výsledky dále zhoršuje. Bohužel zdroj chyby se nám nepodařilo odhalit, pravděpodobně se jedná o nějaký z pohybujících se prvků, například motoru a jeho umístění ve vozidle. Díky tomu není magnetická stopa vozidla za jízdy souměrná a výsledný posun na tripletech senzorů není jednoznačný.



(a) Výsledky měření na ose x

(b) Výsledky měření na ose x s korigovanou multiplikativní chybou

**Obrázek 6.5:** Výsledky měření v záporném s vozidlem Citroen C3

K nalezení chyby, která způsobuje tyto odchylky, by pravděpodobně bylo třeba udělat podrobnější výzkum s více vozidly. K většímu počtu vozidel ale není snadné získat přístup, a navíc by takový výzkum byl nad rámec této práce. V další části měření byla snaha nasbírat větší dataset s různými projíždějícími vozidly, abych bylo možné alespoň určit, jak často bude k takovýmto odchylkám docházet.

Průměrná absolutní chyba měření se Škodou Yeti je 0.64 km/h. Průměrná absolutní chyba měření s Citroenem C3 je i přes výše zmíněné odchylky 5.23 km/h. Celková průměrná chyba měření je tedy přibližně 3 km/h. Taková chyba je pro účel informativního měření, k jakému je zařízení zamýšleno naprosto dostatečná.

## 6.2 Měření v provozu

### 6.2.1 Průběh měření

Měření bylo na rozdíl od předchozího prováděno na dvou lokacích. Jednou těsně za městem a jednou mimo město, a tak byl nasbírán dataset s širším rozsahem

naměřených rychlostí. Měření bylo provedené na náhodně projíždějících vozidlech, aby bylo možné vyloučit, že metoda funguje jen s vozidly, na kterých byly provedeny první testy. Podmínky tohoto měření se více přibližují reálným podmínkám, v jakých bude zařízení případně využito.

Zařízení s magnetickými senzory bylo opět umístěné na zemi asi 0.5 m od vozovky. Vozidla projížděla tedy cca metr od zařízení. Jako referenční měření byla využita optická závora, která je popsána v kapitole 4. Foto z místa měření můžete vidět na obrázcích 6.6



(a) Pohled na celou vozovku s optickou závorou

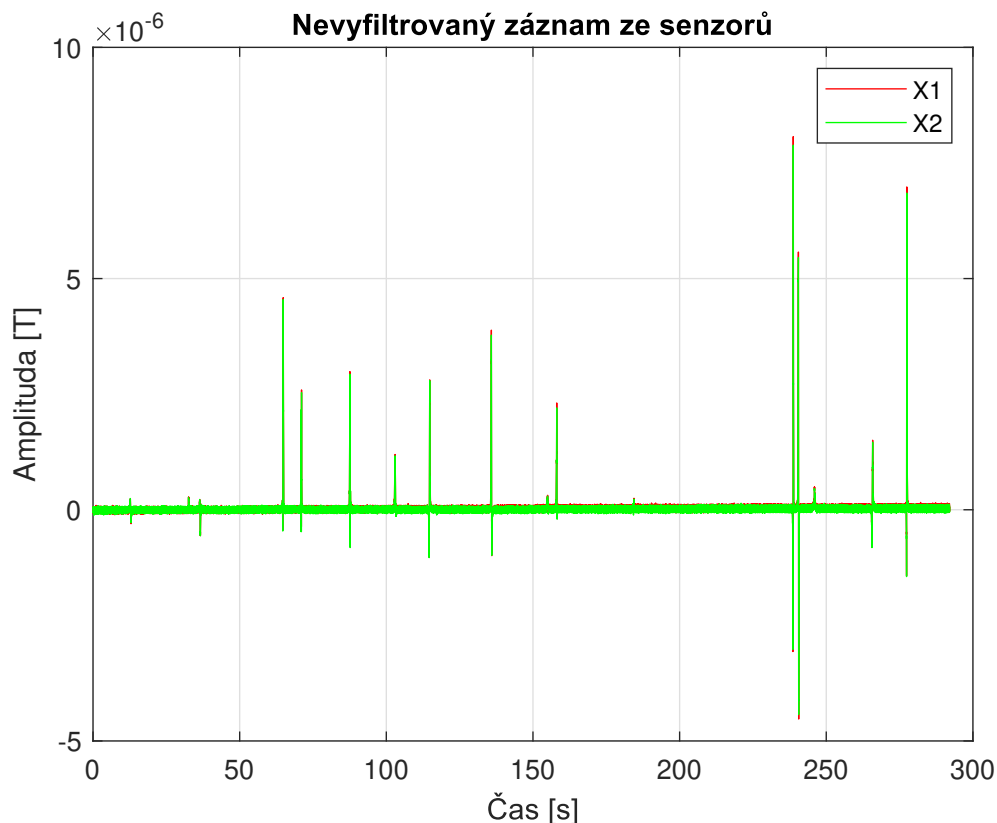
(b) Pohled na stranu přijímače optické závory

(c) Pohled na stranu optické závory s lasery

**Obrázek 6.6:** Foto z místa měření

### 6.2.2 Zpracování dat

Data byla zpracována stejně jako v předchozí kapitole. Z nasbíraných dat byly pouze odstraněny průjezdy, kdy například docházelo při průjezdu závorou k předjíždění. V těchto případech nelze zaručit, že data z referenčního měření budou odpovídat. Ukázkou dat z tohoto měření, u kterých je pouze odečtený offset, můžete vidět na obrázku 6.7.



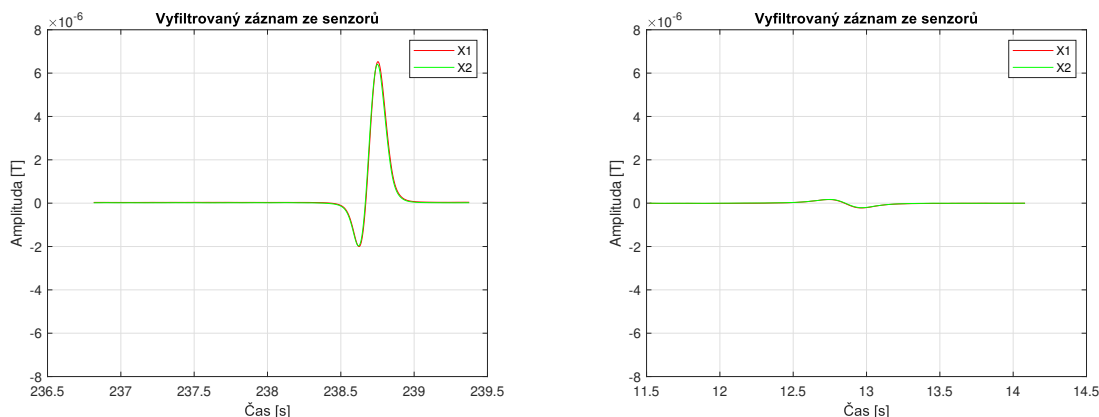
Obrázek 6.7: Kompletní data z měření na ose X

### 6.2.3 Výsledky

Jedna z předpokládaných nevýhod měření s magnetickými senzory byla, že vozidla ve vzdálenějším pruhu by mohla s měřením interferovat. V nasbíraných datech jsou vidět průjezdy vozidel v bližším i vzdálenějším pruhu a situaci lze tedy analyzovat. Amplituda, která je na senzorech vidět při průjezdu vozidla v bližším pruhu, je přibližně o řád vyšší.

Při měření byla vzdálenost zařízení od vozovky přibližně 0.5 m. Pokud tedy zařízení umístíme ještě dále od vozovky, vozidla projíždějící ve vzdálenějším pruhu způsobí v signálu pouze zanedbatelnou výchylku. Rozdíl amplitud průjezdů v jízdnicích pruzích můžete vidět na obrázcích 6.8.

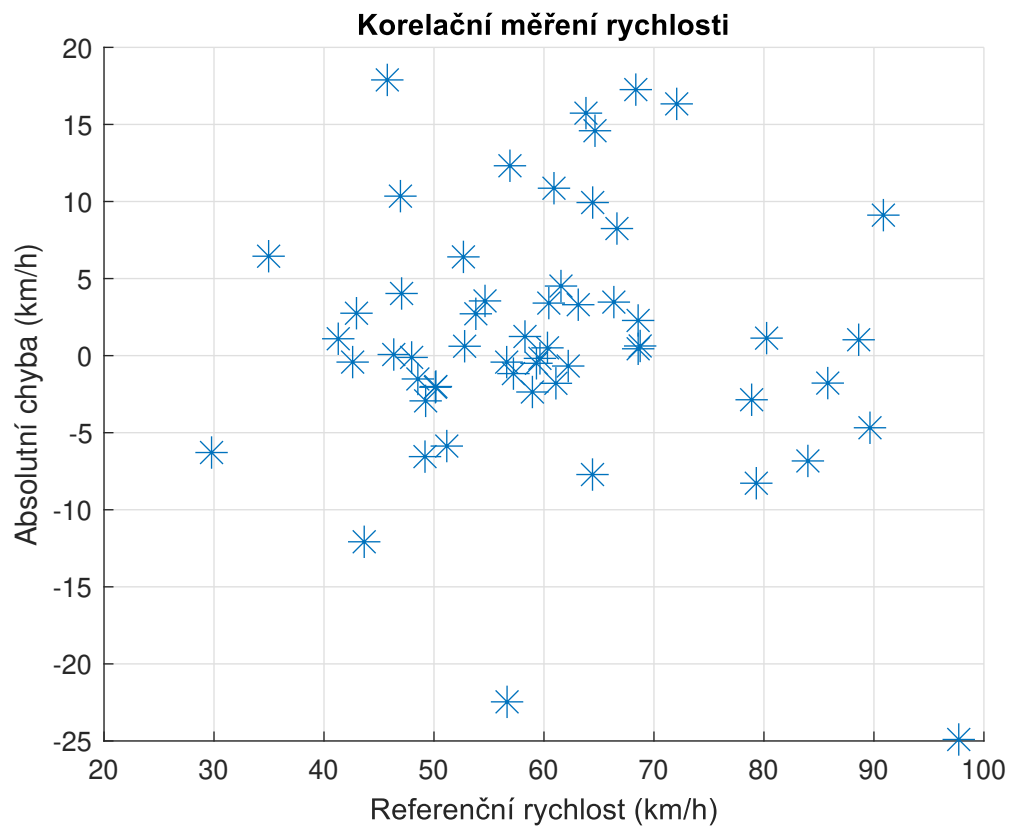




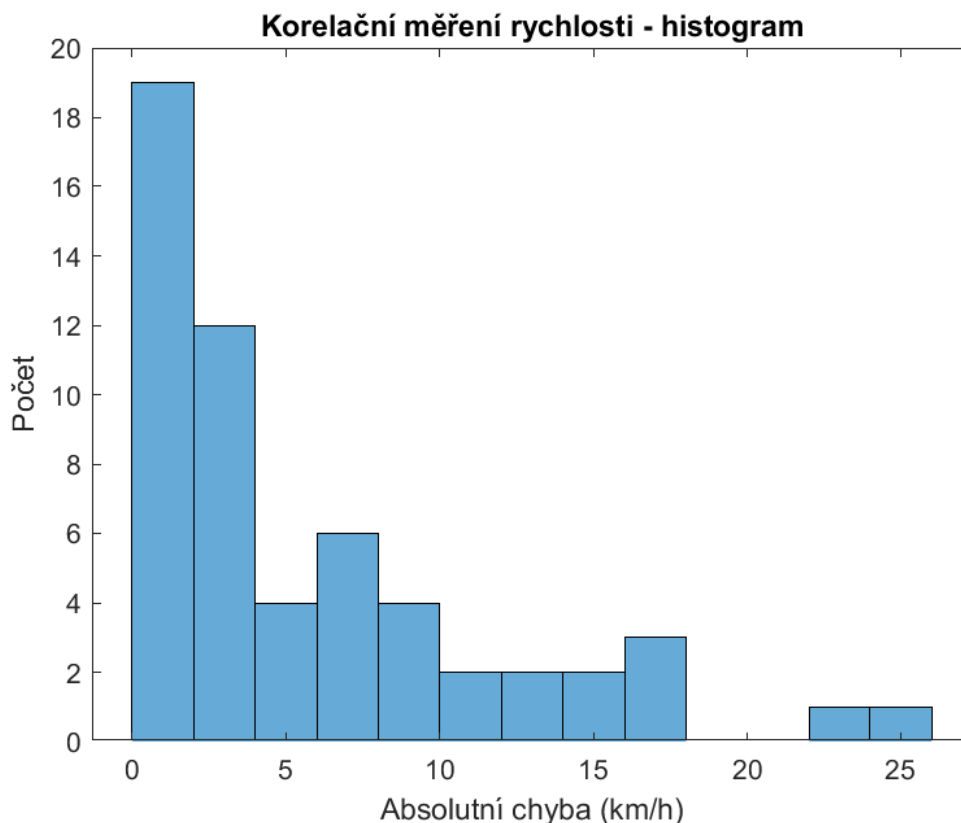
(a) Amplituda dat při průjezdu vozidla v bližším pruhu      (b) Amplituda dat při průjezdu vozidla ve vzdálenějším pruhu

**Obrázek 6.8:** Měření v bližším a vzdálenějším jízdním pruhu

Celkové výsledky jsou o něco horší, než u předchozího měření s vlastními vozidly. To se ale dalo předpokládat, jelikož podmínky pro měření již nebyly ideální. Auta často projížděla blízko u sebe, projížděla v obou pruzích najednou, nedržela na měřeném úseku konstantní rychlost a navíc neprojížděla vždy kolem senzorů rovně. To vše má vliv na výsledek korelace a tedy i výslednou rychlost. Dalším faktorem je, že měření proběhlo mimo město a měřené rychlosti byly tedy vyšší. Jelikož je rychlost nepřímo úměrná zpoždění, s rostoucí rychlostí klesá přesnost metody. S rychlostí vzorkování 7812, která byla při měření využita je při rychlosti 100 km/h chyba zpoždění o jeden vzorek ekvivalentní chybě rychlosti už o cca 2km/h. Graf absolutních odchylek můžete vidět na obrázku 6.9.



**Obrázek 6.9:** Absolutních odchylky z měření



**Obrázek 6.10:** Histogram absolutních odchylek z měření

Průměrná absolutní chyba je přibližně 5.5 km/h. Bohužel se zdá, že výsledek, který byl zjištěný při měření s Citroenem C3 se potvrdil u více vozidel. Magnetická stopa některých vozidel se i na krátké vzdálenosti báze (8 cm) změnil natolik, že metoda není schopná přesně určit rychlost, a při měření tak vznikají chyby. Tyto větší chyby jsou ale spíše ojedinělé, jak můžete vidět na histogramu na obrázku 6.10.

### 6.3 Shrnutí výsledků

Při měření s vozidly Škoda Yeti a Citroen C3 v "ideálních" podmínkách je průměrná absolutní chyba 3 km/h. Při měření s Citroenem C3 se zároveň zjistilo, že některá vozidla mají magnetickou stopu natolik proměnlivou, že i při velmi malé bázi (8 cm) mezi triplety senzorů, je signál na tripletech natolik jiný, že metoda není schopná vrátit přesný výsledek. Čím je tato změna magnetické stopy způsobena se zjistit nepodařilo, pravděpodobně za tím stojí některá z pohyblivých částí vozidla - jako například motor. Pro zjištění přesné příčiny by bylo třeba udělat rozsáhlejší výzkum s více vozidly, který přesahuje rámec této práce.

Další měření již probíhalo na silnici mimo město s běžným provozem, tudíž měřené rychlosti byly větší. Jelikož podmínky pro měření již nebyly ideální, průměrná absolutní chyba se zhoršila na 5.5 km/h. Jelikož má zařízení sloužit pouze pro informativní měření, je taková přesnost pravděpodobně dostatečná.

Vlastnost zjištěná u Citroenu C3, kdy je magnetická stopa vozidla proměnná i na malé bázi se potvrdila i u druhého měření, ale zdá se že k ní nedochází příliš často. Z celkového počtu 56 naměřených průjezdů je 63% absolutních odchylek menších než 5 km/h, 80% odchylek menších než 10 km/h a pouze 1% odchylek je větší než 15 km/h.

# Kapitola 7

## Firmware pro real-time měření

### 7.1 Požadavky

Při tvorbě firmware pro real-time měření za pomoci korelace jsme vázáni výkonem procesoru a velikostí RAM. Procesor STM32L432KB má 64 kB RAM a nejvyšší možný takt 80 MHz, což se podle původních odhadů zdálo dostatečné. Jelikož bylo ale třeba neustále zvyšovat vzorkovací rychlost, aby bylo dosaženo větší přesnosti měření, rostly zároveň i požadavky na paměť a výpočetní výkon.

Původní předpoklad byl, že korelaci bude dostatečně počítat z relativně malého okna (například 512 vzorků), ten se ale ukázal být chybný. Při zpracovávání dat z měření se ukázalo, že metoda funguje nejlépe, když se korelace počítá z dat, kde je vidět celý průjezd vozidla. Průjezd vozidel kolem senzoru rychlostí 50 km/h je v datech vidět přibližně 2 vteřiny. Při vzorkovací rychlosti 7812 je tedy třeba zvolit velikost okna větší než 15624, aby bylo možné vidět celý průjezd vozidla. Vzájemnou korelaci je navíc ideální počítat ve floating pointovém datovém typu a při této velikosti okna se už tedy dostáváme za možnosti zvoleného procesoru.

Druhý chybný předpoklad byl, že signál nebude třeba filtrovat, jelikož samotná korelace se často využívá k nalezení užitečného signálu v signálu zašuměném. Z výsledků měření se ale ukázalo, že ve městě, kde by se zařízení pravděpodobně nejčastěji využívalo, je silné rušení na frekvenci 50 Hz a jejích násobcích. Díky tomu je signál třeba filtrovat, což dále zvyšuje nároky na rychlost procesoru a paměť.

Z tohoto důvodu se nepodařilo vzniklý firmware vyzkoušet při reálném měření. Firmware je ale vytvořen a jeho funkčnost byla ověřena na datech, která jsem zároveň

zpracovával i v matlabu. Do budoucna bude tedy třeba vyměnit procesor za silnější, s dostatečnou RAM a výkonem. To možná povede například na výměnu současného procesoru STM32 za minipočítač jako například Raspberry Pi.

## 7.2 Firmware

Nejprve byla snaha napsat firmware za pomoci standardních knihoven jazyka C a výpočtu korelace z definice. Ukázalo se však, že takto vzniklý program je moc pomalý. Výpočet korelace a následně rychlosti trval řádově déle, než sběr dat pro výpočet. Bylo tedy jasné, že je třeba využít DSP instrukce, které by měly zpracování signálů značně usnadnit a zrychlit. K tvorbě finálního firmware byla využita open-source knihovna CMSIS-DSP [21].

Data z AD převodníku jsou zpracována v přerušeních a jsou pouze převedena do floating pointového datového typu a uložena do pole. Ve chvíli, kdy je nasbíráno celé okno pro výpočet korelace, začne výpočet v hlavní smyčce. Hlavní smyčku můžete vidět níže.

```
while (1)
{
    if(dataReady){
        dataReady = 0;

        /* Filter ADC data */
        arm_fir_f32(&S1, (float32_t *)adcDataS1,
            filteredS1, DATA_WINDOW_LEN);
        arm_fir_f32(&S2, (float32_t *)adcDataS2,
            filteredS2, DATA_WINDOW_LEN);

        /* Subtract mean */
        arm_mean_f32(filteredS1, DATA_WINDOW_LEN,
            &S1_mean);
        arm_mean_f32(filteredS2, DATA_WINDOW_LEN,
            &S2_mean);
        arm_offset_f32(filteredS1, -S1_mean,
```

```

    filteredS1 , DATA_WINDOW_LEN);
    arm_offset_f32 (filteredS2 , -S2_mean,
    filteredS2 , DATA_WINDOW_LEN);

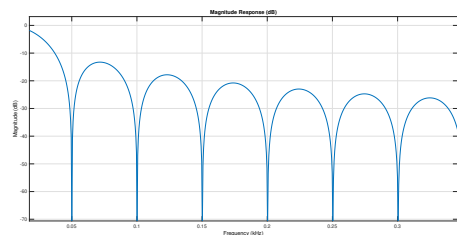
    /* Prepare output vector - fill with 0 */
    arm_fill_f32(0, output_data, 2*DATA_WINDOW_LEN-1);

    /* Cross-correlate and find max */
    arm_correlate_f32(filteredS1 , DATA_WINDOW_LEN,
    filteredS2 , DATA_WINDOW_LEN, output_data);
    arm_max_f32(output_data , 2*DATA_WINDOW_LEN-1,
    &corrResult , &corrResultIndex);

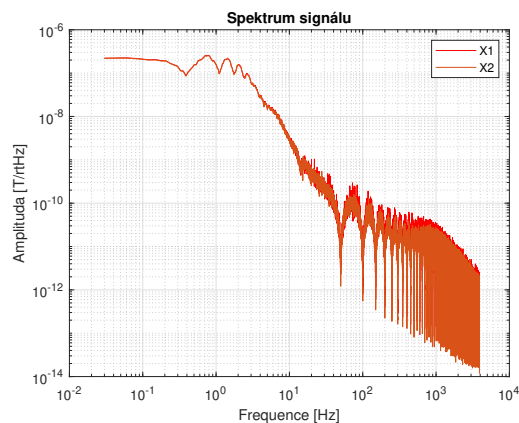
    /* Calculate speed */
    if(corrResult > 1600000){
        int divisor = corrResultIndex
        - DATA_WINDOW_LEN+1;
        if(divisor != 0){
            v = cons2 / (divisor * cons1);
            UartPrintNumDMA(v);
        }
    }
    calcDone = 1;
    HAL_NVIC_EnableIRQ(EXTI3_IRQn);
}
}

```

Data se nejprve vyfiltrují pomocí FIR filtru. Ten je upravený tak, aby fungoval jako moving average filtr, jelikož moving average je vlastně jen speciální tvar FIR filtru. Filtr byl navržen v programu matlab a jeho přenos a ukázkou spektra signálu vyfiltrovaného tímto filtrem můžete vidět na obrázku 7.1. Tento filtr zaručí, že se ze signálu vyfiltruje nežádoucí složka na 50 Hz a zbytek užitečného signálu zůstane zachovaný.



(a) Přenos filtru



(b) Spektrum vyfiltrovaného signálu

**Obrázek 7.1:** Ukázka funkce navrženého filtru

Z vyfiltrovaných dat je poté spočítána a odečtena jejich průměrná hodnota, aby byly vyrušeny nežádoucí offsety. Poté se již počítá samotná korelace. Dle výsledku korelace je pak hodnoceno, zdali došlo k průjezdu vozidla či nikoliv, a zdali má tedy smysl počítat výslednou rychlost. V kódu je zatím hodnota 1600000, která byla určena experimentálně. Ta bude ale třeba upravit podle testů na reálných datech, až dojde k výměně procesoru, protože závisí mimo jiné i na délce okna, které se bude pravděpodobně měnit. Všechny funkce využitě v hlavní smyčce patří do již zmíněné knihovny [21].



# Závěr

Práce potvrdila, že magnetické senzory je s výhodou možné využít k měření rychlosti vozidel a v rámci práce bylo vyvinuto zařízení k tomu určené. Zařízení je možné napájet z velkého rozsahu napětí 3.5 - 60 V. Spotřeba při napájení z 12 V je za běhu přibližně 1.68 W. Zařízení je navíc uloženo v průmyslovém boxu, díky čemuž je dobře chráněné před poškozením a na desce se nachází i bezdrátový modul, díky čemuž může být zařízení dále zabudované například i ve vozovce či v bytelném boxu vedle silnice, přitom má ale možnost komunikace s okolím.

Podařilo se vyvinout zařízení, které je schopné měřit s průměrnou absolutní chybou 5 km/h. Tato odchylka byla ověřena několika měřeními v reálném provozu. Ačkoliv bylo měření provedeno v běžném provozu, do budoucna by bylo potřeba provést další měření například s nákladními vozidly či vozidly s elektrickým pohonem, která se stávají v poslední době oblíbená.

Chyba 5 km/h je větší, než jakou mají současné měřicí systémy. Ty jsou ale využívány pro přesná měření například policií. Zařízení vyvinuté v této práci má ale sloužit spíše pro informativní měření, a proto je taková chyba přijatelná.

Při měření bylo zjištěno, že korelační měření rychlosti vychází nejlépe na ose, která je v rovině s vozovkou a kolmá na směr jízdy vozidla. Měření na zbylých osách je tedy víceméně zbytečné. Díky tomu půjde do budoucna přebytečné senzory odstranit. Půjde tedy použít AD převodník s méně vzorkovanými kanály a odstranit elektroniku pro napájení přebytečných senzorů. Navržený hardware tedy bude možné ještě více zjednodušit, zmenšit a snížit spotřebu.

Podařilo se vytvořit i firmware pro měření rychlosti vozidel v reálném čase. Bohužel kvůli volbě pomalého kontroleru s malou pamětí se nepodařilo firmware otestovat na reálných datech. Jeho funkčnost byla ověřena pouze porovnáním s daty v programu Matlab. Do budoucna bude tedy třeba vyměnit kontroler za výkonnější

a funkčnost firmware ověřit v reálném provozu. Výměna povede pravděpodobně na nahrazení mikrokontroleru za minipočítač jako například Raspberry Pi, které je mnohonásobně výkonnější, než zvolený mikrokontroler od firmy STM.

Kromě výše zmíněných úprav bude ještě třeba vytvořit přijímač pro zvolený bezdrátový modul, aby bylo možné ověřit jeho funkčnost. Další možnost je vyvinutí napájení pro zařízení s využitím solárních panelů a celková úprava zařízení, aby došlo ke snížení spotřeby. Tyto změny by mohly být implementovány například v rámci diplomové práce při dalším studiu.

# Bibliografie

1. CARUSO, Michael J.; WITHANAWASAM, L. Vehicle detection and compass applications using amr magnetic sensors. In: 1999.
2. KOSZTECZKY, Bence; SIMON, Gyula. Magnetic-based vehicle detection with sensor networks. In: *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE, 2013, s. 265–270. ISBN 978-1-4673-4623-8. Dostupné z DOI: 10.1109/I2MTC.2013.6555421.
3. BREJCHOVÁ, bc. Micheala. *Pokročilé metody detekce automobilů s využitím měření magnetického pole*. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické.
4. SILOVSKÁ, Jana. *Měření rychlosti vozidel*. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické.
5. *Měření rychlosti silničních vozidel*. Policie České republiky, 2013. Dostupné také z: [https://www.policie.cz/docDetail.aspx?docid=21932075%5C&doctype=ART%5C&%5C#\\_ftnref3](https://www.policie.cz/docDetail.aspx?docid=21932075%5C&doctype=ART%5C&%5C#_ftnref3).
6. ORAVEC, Matej. *Dopplerovské měření rychlosti pro systém určování polohy*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické.
7. *Silniční rychloměry*. Brno: Český meteorologický ústav, 2010. Dostupné také z: [https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/Uredni\\_deska/3405-ID-C\\_3405-ID-C.pdf](https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/Uredni_deska/3405-ID-C_3405-ID-C.pdf).
8. BALID, Walid; TAFISH, Hasan; REFAI, Hazem H. Intelligent Vehicle Counting and Classification Sensor for Real-Time Traffic Surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018, roč. 19, č. 6, s. 1784–1794. ISSN 1524-9050. Dostupné z DOI: 10.1109/TITS.2017.2741507.

9. ROUSSEL, Stephane; PORUMAMILLA, Hemanth; BIRDSONG, Charles; SCHUSTER, Peter. Modeling of Vehicle Magnetic Footprint in 3-D Space for Type Detection. In: 2012, s. 5. Dostupné z DOI: 10.1115/IMECE2012-85903.
10. *Geomagnetic observatory of Kelčany*. Maglab, [b.r.]. Dostupné také z: <https://maglab.fel.cvut.cz/geomagnetic/>.
11. NOVOTNÝ, ing. David. *Magnetický gradiometr pro detekci automobilů a měření rychlosti*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické.
12. MCGUIRE, T.; POTTER, R. Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1975, roč. 11, č. 4, s. 1018–1038. ISSN 0018-9464. Dostupné z DOI: 10.1109/TMAG.1975.1058782.
13. RIPKA, P.; ARAFAT, M.M. Magnetic Sensors: Principles and Applications. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier, 2019. ISBN 9780128035818. Dostupné z DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11680-7.
14. CARUSO, Michael; SMITH, Carl; BRATLAND, Tamara; SCHNEIDER, Robert. A New Perspective on Magnetic Field Sensing. *Sensors (Peterborough, NH)*. 1998, roč. 15, s. 5–6.
15. *MMC5883MA*. Memsic, 2019. Dostupné také z: <http://www.memsic.com/uploadfiles/2021/12/20211202135252941.pdf>.
16. *HMC1021z*. Honeywell International Inc, [b.r.]. Dostupné také z: [https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/sensors/datasheet/N61-2056-000-000\\_MagneticSensors\\_HMCds.pdf](https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/sensors/datasheet/N61-2056-000-000_MagneticSensors_HMCds.pdf).
17. *MCP3912*. Microchip Technology Inc., c2014-2020. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP3912-3V-Four-Channel-Analog-Front-End-DS20005348C.pdf>.
18. *MCP3913*. Microchip Technology Inc., c2013-2020. Dostupné také z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP3913-3V-Six-Channel-Analog-Front-End-DS20005227C.pdf>.
19. *STM32L432KB*. STMicroelectronics, 2018. Dostupné také z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l432kc.pdf>.

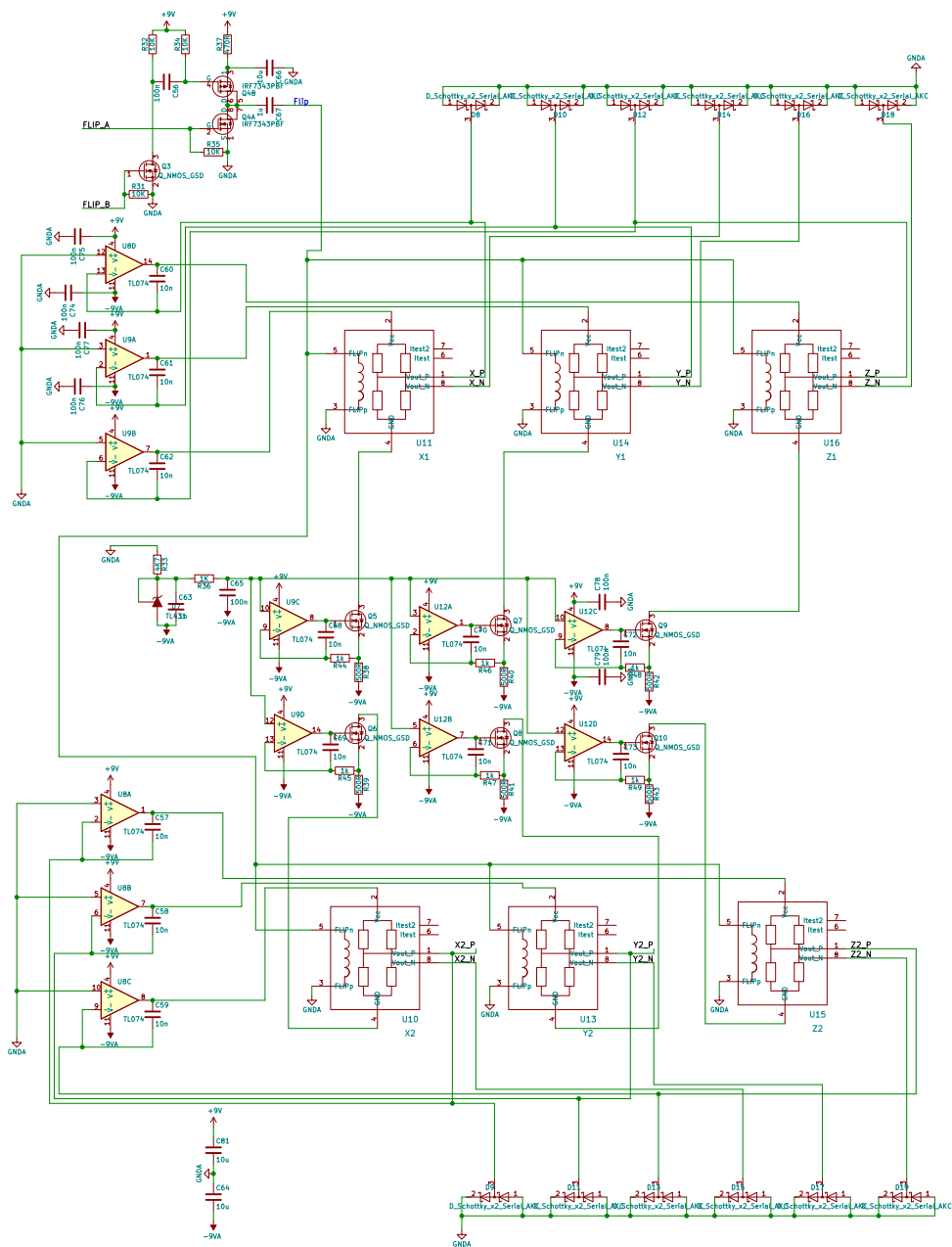
- 
20. *RFM69 library*. LowPowerLab, [b.r.]. Dostupné také z: <https://github.com/LowPowerLab/RFM69>.
  21. *CMSIS library*. ARM Inc, [b.r.]. Dostupné také z: [https://github.com/ARM-software/CMSIS\\_5](https://github.com/ARM-software/CMSIS_5).











Obrázek 3: Schéma zapojení magnetických senzorů