

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra měření



BAKALÁRSKA PRÁCA

Nepriame meranie rýchlosti závodných vozidiel
s pohonom všetkých kolies

Praha

jún 2016

autor: **Lukáš Hostačný**

vedúci práce: **Ing. Ján Tomlain**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Lukáš Hostačný**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Nepriame meranie rýchlosti závodných vozidiel s pohonom všetkých kolies**

Název tématu anglicky: **Indirect Speed Measurement for All-wheel-drive Racing Vehicles**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte systém pro nepřímé měření rychlosti závodného elektromobilu s pohonem všech kolies. Systém by měl poskytovat referenční údaje pro systémy trakční kontroly (protipreklzovací systém atd.). V rámci teoretické přípravy zanalyzujte požadavky na HW jednotku a vyhodnocovací FW. HW jednotka by měla implementovat MEMS akcelerometer s dostatečnou vzorkovací rychlostí. Zvažte výhodu měření úhlového zrychlení. Do zařízení implementujte aj referenční zdroj měření rychlosti v podobě min. 10 Hz GPS modulu. Měřené údaje by měly být k dispozici pomocí rozhraní CAN 2.0 a USB. Navržený algoritmus testujte a porovnejte s referenčními snímači. Vykonajte porovnanie s priamym meraním v prípade pohonu jednej nápravy. Vyhodnoťte limity a určite možnosti/podmienky využitia, príp. navrhnete ďalšie vylepšenie systému. K systému vytvorte jednoduchú PC aplikáciu pre zber údajov a nastavenie zariadenia.

Seznam odborné literatury:

- [1] Datasheet k procesorové rodině STM32F4 (dostupné on-line)
- [2] Návrh a konstrukce desek plošných spojů, Principy a pravidla praktického návrhu Záhlava Vít
- [3] High-Precision Calibration of a Three-Axis Accelerometer AN4399, Freescale Semiconductor (dostupné online)

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ján Tomlain

Datum zadání bakalářské práce: 8. prosince 2015

Platnost zadání do¹: 30. září 2017



Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 8. 12. 2015

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Pod'akovanie

Týmto sa chcem pod'akovať svojmu školiteľovi Ing. Jánovi Tomlainovi za cenné rady a usmernenie pri tvorbe tejto práce a v neposlednom rade za jeho ochotu.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s *Metodickým pokynom o dodržovaní etických princípů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.*

V Prahe dňa

.....
Lukáš Hostačný

Anotácia

Bakalárska práca sa zaoberá teoretickou analýzou požiadaviek vyhodnocovacieho zariadenia pre bezkontaktné meranie rýchlosti závodných vozidiel s pohonom všetkých kolies. Konkrétne závodného vozidla Formula Student FEE Prague eForce - FSE.05x, s ohľadom na jeho požiadavky. Ďalej sa venuje návrhu plošného spoja zariadenia, ako aj návrhu programovej časti zariadenia, výpočtu rýchlosti vozidla, korekcie gravitačného pôsobenia, zberu dát prostredníctvom grafickej aplikácie. Práca sa venuje aj porovnaniu výsledkov rôznych typov merania rýchlosti (GPS, resolvér, IMU) pre túto aplikáciu.

Annotation

The Bachelor Thesis focuses on theoretical analysis of the requirements present in designing and building a device used for contactless measurements of velocity in all-wheel-drive racing vehicles. The particular subject of this study is the racing vehicle "Formula Student FEE Prague eForce - FSE.05x". Further focus is the design of the Printed Circuit Board used in the measurement device as well as the design and implementation of the software, the calculation of vehicle's velocity, correction of the gravitational force and the graphical representation of the collected data. The thesis also compares the results of different types of measurements used in the application such as GPS, resolver and IMU.

Obsah

1	Úvod	10
1.1	Cieľ práce	10
2	Analýza požiadaviek pre zariadenie	11
2.1	Závodné vozidlo FSE.05x	11
2.1.1	Disciplíny	12
2.2	Trakčná kontrola FSE.05x	14
2.3	Hardvérové požiadavky	16
2.3.1	Akcelerometer	16
2.3.2	GPS	19
2.4	Softvérové požiadavky	21
2.4.1	Zber a prenos dát	21
2.4.2	Výpočtová jednotka	22
3	Návrh meracej sústavy	23
3.1	Koncept	23
3.1.1	Koncept SW	23
3.2	Hardvérový návrh	25
3.2.1	Napájanie	25
3.2.2	Akcelerometer	26
3.2.3	GPS	27
3.2.4	Zber dát a komunikácia	28
3.2.5	Plošný spoj	29
3.3	Softvérový návrh	31
3.3.1	Meranie z GPS	32
3.3.2	Meranie rýchlosti kolies	32
3.3.3	Vyčítanie dát z akcelerometra	33
3.3.4	Korekcia offsetu	33
3.3.5	Výpočet uhla natočenia a rýchlosti	34
3.3.6	Korekcia gravitačného pôsobenia	36
3.3.7	Fúzovanie dát senzorov	39
3.4	Grafická aplikácia pre prácu a zber dát	41
3.4.1	Real-time vyobrazovanie dát	42
4	Zhodnotenie výsledkov	43
5	Záver	44
A	Prílohy	48
A.1	CD obsah	48

1 Úvod

Bezkontaktné meranie rýchlosti sa stáva čoraz viac atraktívnejšie pre závodné vozidlá s pohonom všetkých náprav. Snahou konštruktérov závodných vozidiel bolo vždy navrhovať rýchlejšie a lepšie vozidlá. K tomu v poslednej dobe značne prispieva aj kontrola trakcie. Kontrola trakcie pre svoje správne fungovanie potrebuje, okrem iného, aj presný údaj o rýchlosti vozidla. Potreba bezkontaktného merania rýchlosti vzniká pri prudkej akcelerácii vozidla, kedy prešmykujú všetky kolesá a tým vozidlo stratí možnosť vypočítať svoju rýchlosť z klasického merania otáčok kolies a času.

Táto potreba vznikla aj v tíme eForce, ktorý navrhuje a konštruuje elektrické závodné formule. Tím eForce je dobrovoľný tím študentov pod záštitou elektrotechnickej fakulty ČVUT. Ja som jeho členom a touto bakalárskou prácou sa chcem podieľať na vývoji elektrickej formule.

1.1 Cieľ práce

Hlavným cieľom práce je navrhnuť a vytvoriť zariadenie, ktoré bude poskytovať monopostu FSE.05x referenčný údaj rýchlosti vozidla pre účely trakčnej kontroly. Zariadenie bude obsahovať IMU (Inertial Measurement Unit) jednotku ako vzťažný senzor pre meranie rýchlosti. IMU jednotka v sebe obsahuje akcelerometer a gyroskop. Pre dlhodobú korekciu chyby merania IMU, bude zariadenie mať k dispozícii GPS prijímač. Komunikáciu s monopostom FSE.05x a jednotkami v ňom, bude zaručovať CAN 2.0 rozhranie. Komunikáciu s užívateľom sa prevedie cez USB rozhranie. Pre obsluhu bude vytvorená aj grafická aplikácia pre zber, spracovanie dát a nastavenie zariadenia. Zariadením porovnáme rýchlosti, získané zo snímača kolies staršieho modelu formule z dielne eForce, GPS prijímača a navrhnutým programom, ktorý počíta rýchlosť z IMU senzoru. V prvom rade, je potrebné zanalyzovať požiadavky na hardvérové a firmvérové vybavenie zariadenia.

V neposlednej rade je zároveň cieľom sa na tejto práci naučiť novým poznatkom, pracovať s mikrokontrolérom a užívateľským prostredím CoCoX. Navrhnuť plošný spoj a hardvérovú časť zariadenia v programe Altium a grafickú aplikáciu napísať v programe Matlab. Osvojiť si správne návyky technického návrhu a práce v tíme.

2 Analýza požiadaviek na zariadenie

V tejto práci, meraciu jednotku o ktorej táto bakalárska práca je, budem nazývať ECUG. V prvom rade je potrebné zistiť aké hardvérové a firmvérové požiadavky si bude ECUG vyžadovať pre svoju aplikáciu. Pri tejto analýze sú do úvahy brané nasledovné faktory:

- **Disciplíny v ktorých vozidlo súťaží**
- **Požiadavky kontroly trakcie vozidla**
- **Dostupnosť potrebných súčiastok**

ECUG má obsahovať akcelerometer, ako hlavnú jednotku pre určovanie rýchlosti vozidla. K akcelerometru budeme potrebovať referenčný snímač rýchlosti a to GPS alebo v určitom prípade aj údaj o rýchlosti kolies, ktorý poskytuje monopost FSE.05x na svojej zbernici CAN. Pre prenos a ukladanie nameraných dát použijeme USB rozhranie na vyobrazenie a prenos dát na osobný počítač. V nasledujúcich podkapitolách opisujem podrobnejšie činitele, ktoré som pri analýze požiadaviek, bral do úvahy.

2.1 Závodné vozidlo FSE.05x

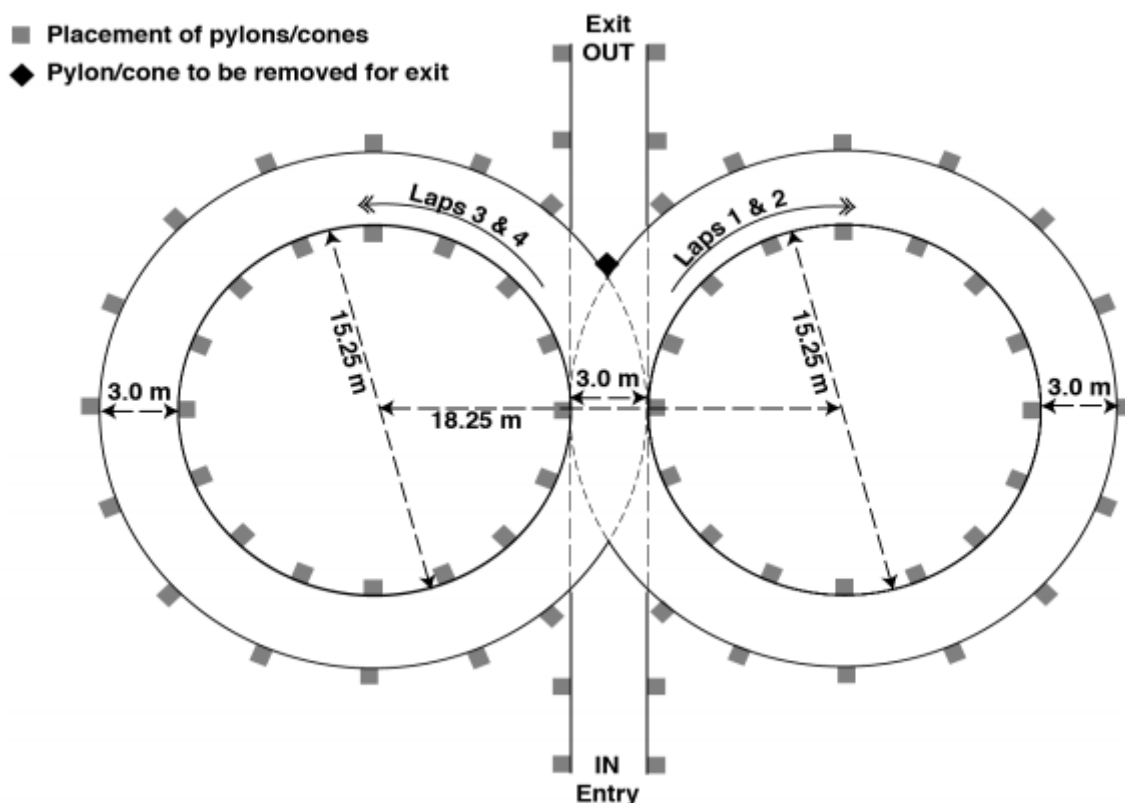
Ako cieľovú aplikáciu použitia ECUG som si vybral závodný špeciál tímu eForce FSE.05x. Toto vozidlo sa navrhuje a konštruje študentami ČVUT, podľa pravidiel súťaže Formula Student [15], na sezónu 2017. Z dôvodu, že tento model sa ešte len vyrába, tak pre výpočty som používal dáta namerané zo staršieho modelu FSE.04x, výsledkov iných tímov súťaže Formula Student a simulácií vytvorených pri návrhu vozidla FSE.05x. Predpokladané parametre, ktoré vznikli pri návrhu FSE.05x [4]:

- **Hmotnosť** - 200 kg
- **Motor** - $2 \times 8 \text{ kW}$ a $2 \times 30 \text{ kW}$
- **Max. rýchlosť** - $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
- **Max. akcelerácia** - 1.2 g až 1.3 g
- **Max. spomaľovanie** - 1.6 g
- **Max. bočné pret'aženia** - 1.8 g

2.1.1 Disciplíny

Celá súťaž Formula Student je rozdelená do 2 hlavných disciplín a to statické a dynamické. V statických disciplínach sa prezentuje technické prevedenie vozidla (Engineering Design), kde tím prezentuje a obhajuje svoje inovácie a technické riešenia. V statických disciplínach (Business Plan, Cost) sa prezentuje ekonomická stránka vozidla. Pre analýzu nášho problému sú podstatné dynamické disciplíny. Sú to tieto štyri:

- **Acceleration** - V tejto disciplíne sa merá čas od štartu formule až kým nedôjde do cieľa. Vzďialenosť štart-cieľ je 75 m. V tejto disciplíne sa prejavuje hlavne voľba prevodového pomeru hnaných náprav, hmotnosť formule, a trakčnej sile prenášanej z kolies na vozovku a dosahovaný výkon motorov. Ten je obmedzený pravidlami na 80 kW v súčte. Pri zrýchľovaní sa v značnej miere prejavuje kontrola trakcie, najmä pri zhoršených poveternostných podmienkach. Najlepšie tímy dosahujú čas približne pod 4 sekundy. Práve v tejto disciplíne by ECUG spolu s kontrolou trakcie malo prispieť k zlepšeniu výsledkov vozidla.
- **Skipad** - Táto disciplína ma za účel otestovať bočné zrýchlenie formule. Pozostáva z trate v tvare čísla 8. V tejto disciplíne sa jazdia 2 kolá do jednej strany a potom 2 kolá do druhej strany. Meria sa čas druhého kola, aby sa eliminovali vplyvy nájazdu na trať. Najlepšie časy, po prepočte, môžu dosahovať viac ako 1.4 g bočného zrýchlenia.



Obr. 2.1: Ukážka trate Skid-Pad. Prevzaté z [15]

- **Auto-Cross** - Formula jazdí približne 1 km danej trate. Trať je väčšinou plná zákrut bez akýchkoľvek tiahlych roviniek. Táto disciplína ma za účel otestovať jazdné vlastnosti formule.

V tejto disciplíne sa zvyčajne na efektívnosť nepozera a jazdí sa naplno. Pri rozjazde zo zákrut je dôležité mať pohotovú údaj o rýchlosti vozidla, ktorý je dôležitý pre udržanie primeranej trakcie kolies.

- **Endurance** - Z veľkej časti sa jazdí na tej istej trati ako sa jazdí Auto-Cross. S rozdielom, že sa jazdí 22 *km*. Pri tejto disciplíne sa jazdci musia striedať po 11 *km*. Čas, ktorý ubehne pri striedaní jazdcov, sa nepočíta do času meraného. Jazdci majú vyhradený čas na striedanie. V tejto disciplíne sa primárne ukazuje zručnosť vodičov, efektívnosť vozu a jazdného štýlu a technické riešenie.

Pre ukážku na obrázku 2.2 je vyobrazená trajektória formule na okruhu v Moste.



Obr. 2.2: Trajektória formule na okruhu v Moste. Údaje z GPS poskytnuté z [4].

Je vidno že dráha je skôr technickejšieho charakteru a nevyskytujú sa v nej roviny dlhšie ako 56 *m*. Stavba závodnej dráhy spadá pod pravidlá SAE. Jedno z nich je pravidlo D8.6.2 [15].

Pravidlo D8.6.2 Straights:

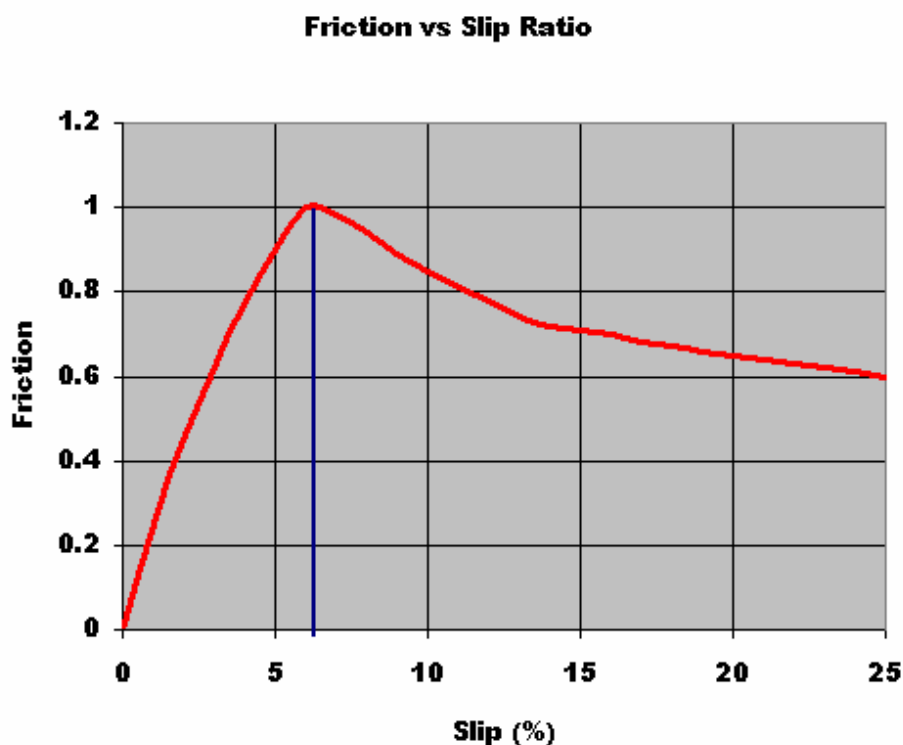
Rovinná časť trate nesmie byť dlhšia ako 77.0 *m* ak má na oboch koncoch sponové zákruty alebo rovinná časť nesmie byť dlhšia ako 61.0 *m* ak na koncoch trate je široká zákruta. Na rovinných častiach sa umiestňujú predbiehacie oblasti a to na viacero miest.

Z toho vyplýva, že slabšie monoposty túto oblasť, kedy je plyn neustále zošliapnutý, zvládnu približne za 4 až 5 sekúnd.

2.2 Trakčná kontrola FSE.05x

Trakčná kontrola v monoposte FSE.05x je výpočtové zariadenie umiestnené vo formule, ktoré prepočítava údaje obsiahnuté zo senzorov formule v reálnom čase, za účelom dosiahnutia čo najlepšej trakčnej sily prenášanej z kolies na vozovku a to za každých poveternostných podmienok. Trakčná kontrola ako výsledok posielajú požiadavku na krútiaci moment kolesa. Túto správu zachytáva frekvenčný menič, ktorý sa postará o to, aby sa na kolese vytvoril požadovaný moment v čo najkratšom čase. Monopost FSE.05x bude mať takto ovládaný krútiaci moment, na každé koleso zvlášť. S takouto možnosťou, ktoré poskytujú elektrické formule s náhonom všetkých kolies, je možné značne prispieť k zvýšeniu ovládateľnosti vozidla a trakcií pneumatík.

Trakčná kontrola sa snaží udržiavať obvodovú rýchlosť kolesa o niečo vyššiu ako je reálna rýchlosť vozidla. Zavisí to od trakčnej charakteristiky povrchu a pneumatiky. Na obrázku 2.3 je znázornený graf závislosti trecieho koeficientu priemernej pneumatiky od preklzu na suchom povrchu.



Obr. 2.3: Graf trakčnej charakteristiky pneumatiky na suchom povrchu. Prevzaté z [8]

Parameter Slip znamená preklz v %, podľa vzorca 2.1 [10]

$$Slip = \frac{\omega \cdot r - v}{\omega \cdot r} \cdot 100 \quad (2.1)$$

kde ω je uhlová rýchlosť, r je polomer kolesa, v je rýchlosť vozidla. Parameter Friction je trecí koeficient pneumatiky

Z grafu 2.3 je vidieť, že ak chceme dosiahnuť čo najlepšiu trakciu, musíme sa pohybovať v čo najmenšom rozmedzí v okolí maxima krivky grafu. Práve tu je kladený veľký dôraz na presnosť merania rýchlosti vozidla. Stanovme si rozsah 10 % preklzu, kde podľa obrázku 2.3, je koeficient trenia ešte približne 0.7. Pri rýchlosti $18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, čo je $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ s odchýlkou slip 10 %, predstavuje maximálnu chybu rýchlosti $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Vychádza sa z toho, že pri stanovenej hranici koeficienta 0.7 a rýchlosti $18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, môže celý systém trakčnej kontroly mať nepresnosť iba $\pm 0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Požiadavky od návrhára trakčnej kontroly:

- **Rýchlosť** - Údaj s presnosťou $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a obnovovacou rýchlosťou 100 Hz
- **Gyroskop** - Vzorkovaciu rýchlosť Yaw (obr. 3.10) osi gyroskopu 25 Hz

Tieto požiadavky na trhu spĺňa výrobok VBOX RLVBSS100 s parametrami:

- Accuracy: 0.1 Km/h
(averaged over 4 samples)
- Units: Km/h or Mph
- Update rate: 5 | 10 | 20 | 100Hz
- Maximum velocity: 1000 Mph
- Minimum velocity: 0.1 Km/h
- Resolution: 0.01 Km/h
- Latency: >160 | 41.5 | 41.5 | $8.5 \pm 1.5 \text{ mS}$

Obr. 2.4: Špecifikácie senzoru VBOX RLVBSS100. Prevzaté z [19]

ktorý funguje na báze vysoko presnej GPS vo fúzií s IMU senzorom. Takisto kladené požiadavky trakčnej kontroly spĺňa aj optický senzor Correvit ® L-350 Aqua:

Performance Specifications		
Speed range ¹⁾	km/h	0,3 ... 250
Distance resolution	mm	1,5
Measurement accuracy ²⁾	%FSO	< $\pm 0,2$
Measurement frequency	Hz	250
Working distance and range	mm	350 ± 130

Obr. 2.5: Špecifikácie senzoru Correvit L-350. Prevzaté z [9]

ktorého vzť ačný princíp, okrem iného, funguje na báze fotenia povrchu vozovky a z toho rozpoznáva rýchlosť vozidla. Dosiahnuť takéto výsledky je veľmi ťažké. Preto je cena senzoru Correvit L-350 je približne 400 000 Kč a cena VBOX RLVBSS100 je zhruba 200 000 Kč. Takto drahé senzory si tím eForce nemôže dovoliť a preto svojou prácou sa budem snažiť priblížiť k čo najlepšiemu výsledku.

2.3 Hardvérové požiadavky

2.3.1 Akcelerometer

Akcelerometer je senzor, ktorý meria vlastné zrýchlenie. Danú hodnotu prevádza na analógovú alebo digitálnu hodnotu, zaleží podľa spôsobu prevedenia.

Rozsah akcelerometra

V prvom rade som sa zamerlal na výber rozsahu. Pre správne určenie rozsahu pre aplikáciu Formula Student som vychádzal z dát najlepších tímov, ktoré dosahovali v jednotlivých disciplínach najlepšie výsledky. Predpokladám, že monopost FSE.05x sa môže k týmto výsledkom priblížiť, no výrazne neprekročiť. Výsledky som prevzal z [5]. Jeden z najlepších časov v disciplíne Acceleration dosahoval 3.3 s.

Pre výpočet zrýchlenia som vychádzal z nasledujúceho vzorca

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \quad (2.2)$$

pri vedomosti času za ktorý formula prekonala dráhu 75 m, môžeme úlohu zjednodušiť. Predpokladajme, že formula zrýchľovala rovnomerne priamočiara. Potom sa nám rovnica upraví na

$$a = \frac{2s}{t^2} \quad (2.3)$$

kde s je prejdená dráha, t je čas za ktorý vozidlo prešlo danú vzdialenosť. Pre detailnejšie odvodenie viz. [2]. Po dosadení do vzorca 2.3 vyšlo zrýchlenie $13,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, čo po prepočte konštantou gravitačného zrýchlenia ($9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) je približne 1.4 g . S touto konštantou budem pracovať pri výpočtoch. Naše predpoklady zo simulácií pre monopost FSE.05x sú 1.2 g až 1.3 g . Tento výpočet som použil ako približný odhad zrýchlení, ktoré môžu pôsobiť na formulu pri akcelerácií a zároveň skontrolovať simulácie FSE.05x.

Na súťazi Formula Student sa brzdná dráha nepočíta a preto som nasimulované dáta nemohol overiť. Neoficiálne výsledky zverejnené na fórach FSAE [6] hovoria o 1.1 g až 1.8 g . Naše simulácie odhadujú, že FSE.05x by mal spomalovať 1.6 g .

Pri výpočtoch bočného zrýchlenia som použil najlepší nameraný čas z disciplíny Skid-Pad. Tento čas je $t = 4.55 \text{ s}$. Predpokladajme že vozidlo sa pohybovalo konštantnou rýchlosťou po kružnici. Podľa vzorca 2.4 sme vypočítali odstredivé zrýchlenie.

$$a_o = \frac{v^2}{r} \quad (2.4)$$

kde a_o je odstredivé zrýchlenie, v je obvodová rýchlosť vozidla vypočítaná podľa vzorca 2.5 a r je polomer dráhy po ktorej vozidlo ide. Rýchlosť vypočítame ako

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2\pi r}{t} \quad (2.5)$$

kde $r = 8.5 \text{ m}$, ktorý je známy, podľa pravidiel [15]. Výsledné odstredivé zrýchlenie je $16.27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,

po prepočte 1.66 g. Simulácie FSE.05x predikujú 1.8 g.

Postačujúci rozsah akcelerometra odhadujem na $\pm 2 g$ až $\pm 2.5 g$. V ponuke sú akcelerometre s rozsahom $\pm 2 g$, $\pm 4 g$, $\pm 8 g$, $\pm 16 g$. Dokonca sú tieto rozsahy dostupné v jednom zariadení. Zvolil som si rozsah $\pm 2 g$, a $\pm 4 g$ nastavovateľný. Pre naše účely je vhodný kapacitný akcelerometer. Kapacitné akcelerometre poskytujú rozsahy približne od $\pm 2 g$ až $\pm 300 g$.

Výstupná forma dát

Bežne dostupné akcelerometre poskytujú dva druhy výstupných dát a to analógovú formu alebo digitálnu formu. Akcelerometre s analógovým výstupom dosahujú citlivosti od $150 mV \cdot g^{-1}$ až $660 mV \cdot g^{-1}$ v dostupnej cenovej kategórii pri celkovom rozsahu akcelerometra $2 g$. Čím vyšší je tento parameter, tým sa menej prejaví okolité rušenie na chybe merania. Predpokladajme, že akcelerometer s analógovým výstupom máme osadený na plošnom spoji, po ktorom vedenie z akcelerometra smeruje do výpočtového zariadenia. Na tejto ceste sa do vedenia indukuje rušenie z okolia v určitej hodnote. Pre príklad počítajme s hodnotou rušenia $20 mV$. Pri citlivosti akcelerometra $150 mV \cdot g^{-1}$, sa na vstupe výpočtovej jednotky naindukované rušenie prejaví ako signál, ktorý výpočtová jednotka spracuje ako plnohodnotný údaj merania. V tomto prípade je to $0.13 mg$. Pri citlivosti $660 mV$ by hodnota rušenia predstavovala $0.03 mg$.

Následne analógový signál z akcelerometra musíme previesť do digitálneho signálu pre výpočtovú jednotku. V tomto prípade na rozlíšenie merania, citlivosť akcelerometra nemá žiaden vplyv. Pri zvyšovaní citlivosti akcelerometra sa zvyšuje výstupný napät'ový rozsah a to bez zmeny rozsahu akcelerometra. V tomto prípade akcelerometer bude citlivejší, ale ADC prevodník bude musieť zvýšiť svoju rozlíšiteľnosť, ak chceme merať v plnom rozsahu akcelerometra a to je $\pm 2 g$. Rozlíšiteľnosť ADC prevodníka [11]

$$r_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^n - 1} \cdot u_{max} \quad (2.6)$$

kde n znamená rozlíšenie ADC prevodníka v bitoch a u_{max} maximálne merané napätie. r_n vyjadruje polovicu dielika LSB v jednotkách *Volt*. To je rozlíšiteľnosť ADC prevodníka.

Ak chceme dostať rozlíšiteľnosť sústavy ADC a akcelerometra z pohľadu meranej veličiny (tým je zrýchlenie), potrebujeme dosadiť za u_{max} rozsah akcelerometra R_{xl} .

$$r_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^n - 1} \cdot R_{xl} \quad (2.7)$$

kde r_s vyjadruje rozlíšiteľnosť sústavy v jednotkách g a R_{xl} je rozsah akcelerometra v jednotkách g .

Digitálny prenos dát je odolnejší voči rušeniu. Pri prenose plošným spojom, sa do určitej miery môžu indukovať rôzne rušenia, ale nemusia mať žiaden vplyv na prenesené dáta. Preto som sa rozhodol pre digitálny formát dát, ako výstup z akcelerometra.

Výber rozlíšenia prevodníka

Pri analýze postačujúcej rozlíšiteľnosti prevodníka som vychádzal z požiadaviek pre trakčnú kontrolu. Chyba rýchlosti maximálne $0.1 m \cdot s^{-1}$. A zároveň som vychádzal z predpokladu, že doba integrácie nebude dlhšia ako $4 s$. Ako v sekcií **Disciplíny** bolo spomenuté, vychádzajme z toho, že

najdlhšia rovinná pasáž je 75 m, ktorú starší monopost FSE.04x zvláda pod 4 sekundy. Potom monopost zaručene musí pustiť plynový pedál. V tej chvíli kolesá neprešmykujú a zároveň, ak nieje stlačená brzda, tak môžu vypovedať o veľmi presnej aktuálnej rýchlosti. To je podrobnejšie rozobrané v sekcii **Fúzovanie dát senzorov**.

Pri výbere rozlíšenia prevodníka berme v úvahu len chybu kvantovania prevodníka. Vzorec pre výpočet rýchlosti zo zrýchlenia a času je

$$v = \int a \cdot dt + v_0 \quad (2.8)$$

pri predpoklade priamočiareho rovnomerného zrýchlenia je výpočet aktuálnej rýchlosti

$$v = a \cdot t + v_0 \quad (2.9)$$

Ak budeme zrýchľovať po dobu 4 sekúnd, rozlíšiteľnosť by nemala prekročiť požadovanú najväčšiu chybu $\Delta v = 0.1 \text{ m/s}$. Za a dosadíme rozlíšiteľnosť sústavy r_s zo vzorca 2.7 a $v_0 = 0$.

$$\Delta v \geq t \cdot r_s \quad (2.10)$$

po dosadení

$$\Delta v \geq t \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^n - 1} \cdot R_{xl} \quad (2.11)$$

po úprave

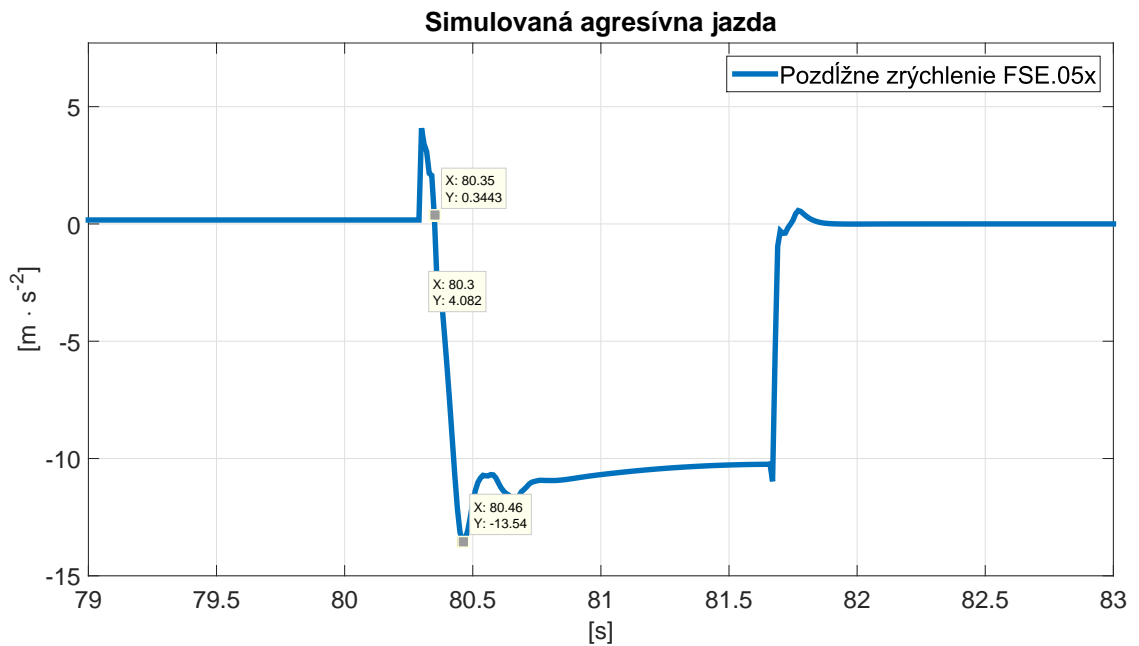
$$n = \log_2\left(\frac{t \cdot R_{xl}}{2 \cdot \Delta v} + 1\right) \quad (2.12)$$

kde n je rozlíšenie ADC prevodníka sústavy. Hodnota výrazu je 9.65. Nakoľko sa bity nemôžu deliť, hodnotu n zaokrúhlime na 10. To znamená, že pre našu aplikáciu postačí 10 bit akcelerometer.

Pri rozsahu 4 g digitálne akcelerometre poskytujú rozlíšenie od 8 bit do 16 bit. Ja som sa rozhodol pre 16 bit akcelerometer, ktorý ma vyššiu rozlíšiteľnosť.

Výber vzorkovacej frekvencie

Pre určenie minimálnej vzorkovacej frekvencie IMU, pre našu aplikáciu, potrebujeme vedieť maximálnu zmenu zrýchlenia, ktoré sa v aute bude prejavovať v smere jazdy tj. v našom prípade osi X. Pre absenciu reálnych dát som použil dáta zo simulačného programu IPCarMaker z tímu eForce [4]. Na obrázku 2.6 je znázornená zložka zrýchlenia v osi X vozidla. Simulácia bola nastavená tak, že vodič agresívnym štýlom stúpil na brzdú, chvíľu podržal a pustil ju.



Obr. 2.6: Simulované dáta pozdĺžneho zrýchlenia FSE.05x pri prudkom impulze brzdenia.

Z obrázku sú odčítané dve hodnoty o ktorých je predpoklad, že zodpovedajú maximálnej zmene zrýchlenia v aute v osi X. Predpokladajme, že krivka na meranom úseku je lineárna, potom z prvého bodu s hodnotami $X_1:80.35$, $Y_1:0.35$ a druhého bodu s hodnotami $X_2:80.46$, $Y_2:-13.54$, vypočítame rozdiel $X_2 - X_1 = 0.11$ a $Y_2 - Y_1 = -13.89$, kde body X značia čas t a body Y značia zrýchlenie a . Vzorec 2.13 vyjadruje aká môže byť maximálna perióda vzorkovania, aby chyba vzorkovaním nebola väčšia ako polovica LSB. [11]

$$T \leq \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^n - 1} \cdot a_{\text{rozsah}}}{\left(\frac{da}{dt}\right)_{\text{max}}} \quad (2.13)$$

Po dosadení do vzorca 2.13, $a_{\text{rozsah}} = 39.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ a minimálnemu rozlíšeniu prevodníka stanoveného v podsekcii **Výber rozlíšenia prevodníka** $n = 9.65 \text{ bit}$, je maximálna perióda vzorku $T = 0.1936 \cdot 10^{-3} \text{ s}$, čo predstavuje minimálnu vzorkovaciu frekvenciu akcelerometra $f_{\text{vz}} = 5164 \text{ Hz}$. Predpokladáme, že až takto agresívne vodič na trati jazdiť nebude.

Z analýzy požiadaviek na akcelerometer som vybral akcelerometer od spoločnosti ST electronics LSM6DS3, ktorý disponuje nasledujúcimi parametrami:

- **Rozsah** - $\pm 2 \text{ g}$, $\pm 4 \text{ g}$, $\pm 8 \text{ g}$, $\pm 16 \text{ g}$
- **Výstupná forma dát** - digitálna
- **Rozlíšenie** - 16 bit dáta
- **Obnovovacia frekvencia** - akcelerometer: 6.66 kHz, gyroskop: 1.66 kHz

2.3.2 GPS

Pri výbere požiadavok GPS som bol ohraničený ponukou dostupných GPS modulov. Modul s najlepšimi parametrami bol Quectel L26 a Quectel L76.

Horizontal Position Accuracy	Autonomous	<2.5 m CEP
Velocity Accuracy	Without Aid	<0.1m/s
Acceleration Accuracy	Without Aid	0.1m/s ²
Timing Accuracy	1PPS Out	10ns
Reacquisition Time		<1s
TTFF@-130dBm with EASY™	Cold Start	<15s
	Warm Start	<5s
	Hot Start	<1s
TTFF@-130dBm without EASY™	Cold Start	<35s
	Warm Start	<30s
	Hot Start	<1s
Sensitivity	Acquisition	-148dBm
	Tracking	-165dBm
	Reacquisition	-160dBm
Environmental	Operating Temperature	-40°C to 85°C
	Storage Temperature	-45°C to 125°C
Dynamic Performance	Maximum Altitude	Max.18000m
	Maximum Velocity	Max.515m/s
	Maximum Acceleration	4G

Tabuľka 2.1: Parametre GPS modulu Quectel L76. Prevzaté z [14]

Serial Interfaces

Serial Interfaces	UART: Adjustable 4800~115200 bps Default: 9600bps
Update rate	1Hz (default), up to10Hz
I/O Voltage	2.7V ~ 2.9V
Protocols	NMEA 0183 PMTK

Tabuľka 2.2: Parametre GPS modulu Quectel L76. Prevzaté z [14]

Power Management

Power Supply	2.8V ~ 4.3V
Power Acquisition	25mA(GPS+GLONASS) 21mA(GPS)
Power Tracking	18mA(GPS+GLONASS) 15mA(GPS)
Power Saving	Typ.2.6mA @AlwaysLocate™(Note1) 7uA@Backup Mode 500uA@Standby Mode Periodic Mode
Antenna Type	Active or Passive
Antenna Power	External or Internal VCC_RF

Tabuľka 2.3: Parametre GPS modulu Quectel L76. Prevzaté z [14]

Špecifikácie ktoré potrebujeme brať na zreteľ, sú:

- **Presnosť rýchlosti** - $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- **Obnovovacia frekvencia** - 10 Hz
- **Max. zrýchlenie** - 4 g
- **Max. UART baud rate** - 115200 bps

Najlepšia dostupná GPS, ktorá bola nájdená pre túto aplikáciu na českom trhu bola Quectel L76. Jej parametre presnosti rýchlosti sa blížia hranici požiadavky trakčnej kontroly. GPS s takouto presnosťou môžeme využiť na korigovanie dlhodobých údajov.

Maximálne zrýchlenie, ktoré GPS L76 dokáže zachytiť je dostatočné pre naše účely, kde predpokladané maximálne zrýchlenie je do 2 až 2.5 *g*.

Maximálna rýchlosť komunikácie UART je dostačujúco rýchla. Pri predpoklade odoslania 10 znakov po zbernici, Start bit, 8 dátových bitov a Stop bit pri maximálnej podporovanej rýchlosti 115200 *bps*, je čas odoslania plnej NMEA správy, ktorá môže mať maximálne 80 znakov, približne 7ms. Viac o NMEA protokole je napísane v sekcii **Meranie z GPS**.

2.4 Softvérové požiadavky

2.4.1 Zber a prenos dát

Pre správny vývoj softvéru a algoritmov ECUG je potrebné mať možnosť vyobrazit' namerané dáta, najlepšie v reálnom čase a možnosť ich úpravy bez pripojenej jednotky. Pre tieto účely je potrebné implementovať rozhranie, ktoré by s vyhodnocovacím softvérom dokázalo komunikovať. V našom prípade je to USB rozhranie. Toto rozhranie sa konfiguruje oveľa obtiažnejšie ako iné rozhrania, napríklad UART. Preto pri návrhu počítam s USB-UART prevodníkom FT230XS-R od firmy FTDI [7]. Údaje, ktoré chceme poslať, pošleme cez UART rozhranie do FTDI prevodníka a bez dodatočnej konfigurácie to automaticky prevedie na USB protokol. Rovnako to funguje aj zo strany vyhodnocovacieho softvéru. Cez USB vyšleme správu, ktorú prijme FTDI čip a automaticky prevedie na UART.

Predpokladajme, že pre dobrú analýzu budeme posilať 12, 32 bitových čísel. Počítajme s parametrami UART. To predstavuje 384 dátových bitov na poslanie. K tomu ešte Stop a Start bit. Dokopy je to 408 bitov. Ak si zvolíme baudrate 115200, tak celkový predpokladaný čas posielania by mal byť 3.5 *ms*, čo je menej ako pri prijímaní plnej NMEA správy z GPS modulu Quectel L76. [14]

Hlavný účel ECUG je poskytovať aktuálnu rýchlosť formuly trakčnej kontrole. Formula FSE.05x komunikuje medzi všetkými jednotkami cez CAN rozhranie 2.0. Tento rok vo formule používame jednotné CAN budiče a to od firmy NXP TJA1049/3. Tieto zvládnu prenosovú rýchlosť až $1 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$. Zvyčajne pre stabilitu komunikácie sa medzi jednotkami komunikuje na prenosovej rýchlosti $250 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$ až $500 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$. Vplyvy rôznych rušení sa nám v predošlom modeli FSE.04x nepodarilo odstrániť.

2.4.2 Výpočtová jednotka

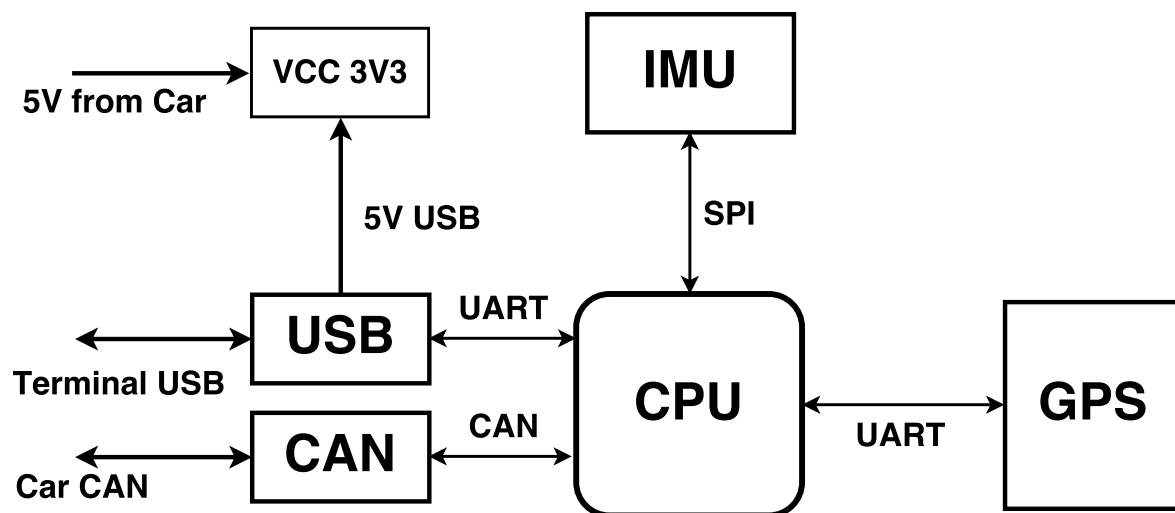
Požiadavky na ECUG sú: zber a následný výpočet rýchlosti z akcelerometra, prijímanie a odosielanie správ z a na CAN zbernicu FSE.05x, komunikácia s riadiacim softvérom pre zber a vyhodnocovanie dát, použitie GPS.

Výber vhodnej výpočtovej jednotky ovplyvnil aj faktor, že v tíme eForce sme prešli celoplošne na ARM procesory od firmy ST Microelectronics. Svoj výber som nasmeroval práve na tieto procesory. Ako centrálna výpočtová jednotka by mala poskytovať 2x UART rozhranie pre komunikáciu s GPS a vyhodnocovacím programom, SPI pre komunikáciu s IMU jednotkou a rozhranie CAN 2.0B pre dobrú komunikáciu s ostatnými jednotkami vo formule. Takisto by mal spĺňať požiadavok na výpočtovú rýchlosť. Vzhľadom na to, že nebolo jasné o aký obsiahly a výpočtovo náročný program si aplikácia vyžaduje, bol zvolený procesor STM32F407VG [17] o ktorom je predpoklad, že má dostatočnú výpočtovú kapacitu pre tieto účely a spĺňa aj požiadavky periférií.

3 Návrh meracej sústavy

3.1 Koncept

Návrh dosky je rozdelený do 6 celkov: napájanie VCC 3V3, komunikáciu s výpočtovou jednotkou a terminálom USB, akcelerometrická jednotka IMU, GPS jednotka a centrálna výpočtová jednotka CPU. Na obrázku 3.1 je znázornená bloková schéma týchto celkov.

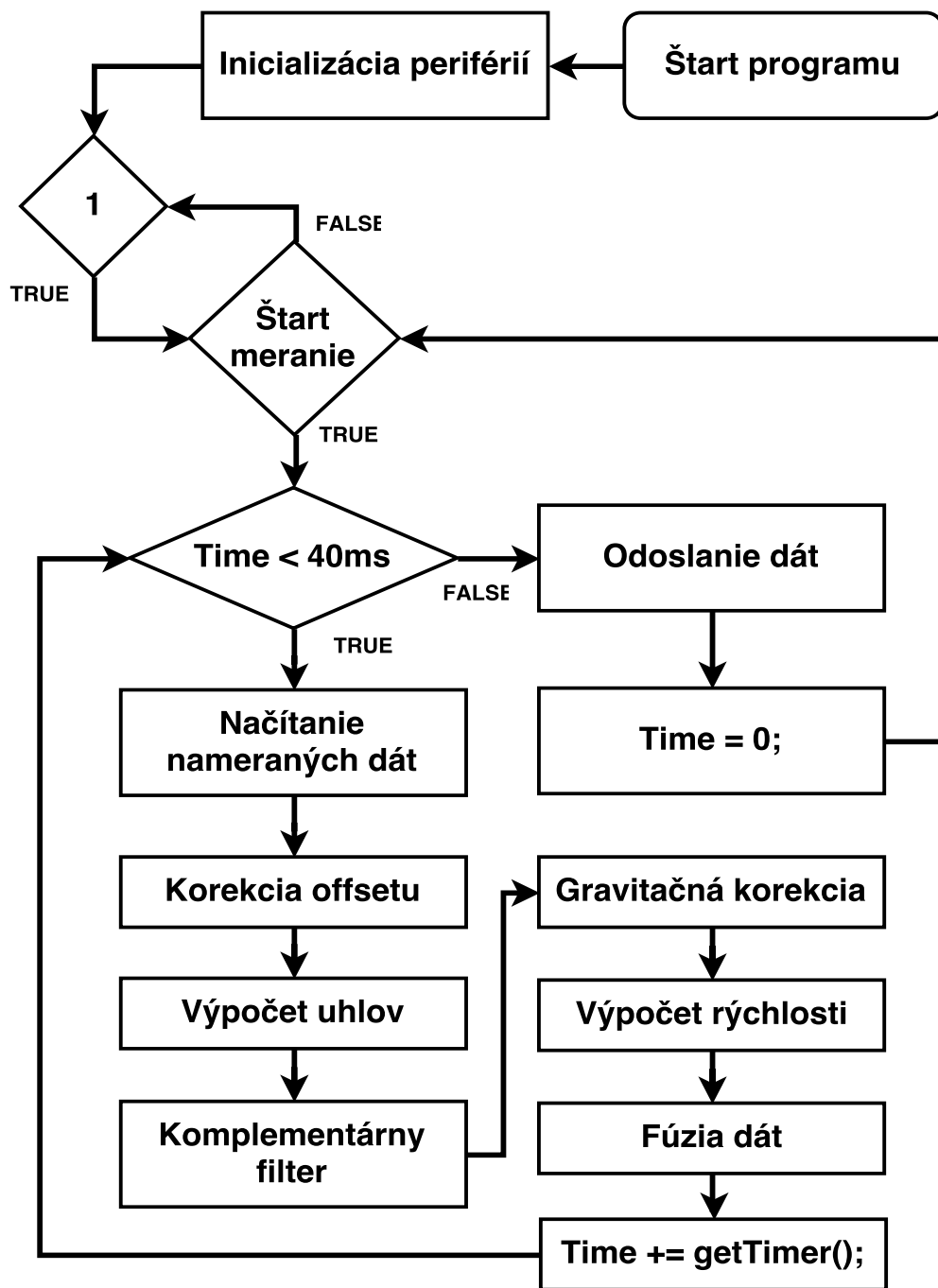


Obr. 3.1: Bloková schéma hardvérového zapojenia ECUG

Ďalej v texte budem používať skratky použité v obrázku 3.1, kde IMU je akcelerometer LSM6DS3, GPS je GPS modul Quectel L76, CPU je procesor STM32F407VG. Príslušné schémy a návrhové súbory plošného spoja, sú vložené v prílohe.

3.1.1 Koncept SW

Programová časť ECUG je písaná v jazyku C. Ako vývojové prostredie som použil program CoCoX. Grafická užívateľská aplikácia je napísaná v MatLab-e. Program sa delí na meraciu časť a kalibračnú časť. Tieto dve časti sa spúšťajú stlačením tlačítka v grafickej aplikácii vytvorenej pre ECUG. Na obrázku 3.2 je bloková schéma meracieho programu, ktorá je rozpísaná v nasledujúcich sekciách.



Obr. 3.2: Bloková schéma hardvérového zapojenia ECUG

Merací program sa hneď po štarte inicializuje a čaká na príkaz z užívateľského rozhrania grafickej aplikácie. Viac o grafickej aplikácii v sekcii **Grafická aplikácia pre prácu a zber dát**. Ak sa stlačí tlačítko Štart/Clear, merací program sa spustí. Program sa môže zastaviť tlačítkom Stop a vráti sa do nekonečnej slučky, kde sa kontroluje, či je nastavená hodnota Štart tlačítka na hodnotu 1. V tomto stave sa môže prijať správa o kalibrácii modulu. Vtedy sa vykoná kód, ktorý zodpovedá za správnu kalibráciu dosky. Stav kalibrácie je bližšie popísaný v sekcii **Korekcia offsetu**. Príslušné zdrojové kódy grafickej aplikácie a vyhodnocovacieho softvéru, sú vložené v prílohe.

3.2 Hardvérový návrh

3.2.1 Napájanie

Doska ECUG je napájaná napätím 5 V zo zdroja formule. Pre testovacie účely je napájaná aj z USB portu pripojeného zberného zariadenia. ECUG môže byť napájaná zároveň z oboch vstupov. Aby nenastalo nežiadúce spätné pretekание prúdov medzi zdrojmi, na doske sú dve Schottky diody PMEG3010EJ D22 a D23 viz. obrázok 3.3. Takisto plnia ochrannú funkciu, v prípade, že by sa vstupné napätie nedopatrením prepólovalo. Schottky diódy som zvolil preto, lebo ich úbytok napätia v priepustnom smere je približne o 0.4 V menší ako u bežnejšie používaných usmerňovacích diódach s PN priechodom. Z toho vyplýva, že pri rovnakom odoberanom prúde, budeme na diódach mať menšiu výkonovú stratu.

Navrhovaný napájací obvod musí napájať tieto zariadenia s nasledujúcimi parametrami. Prúd označuje maximálny možný odoberaný prúd, ktorý zariadenie potrebuje pre svoju maximálnu funkciu.

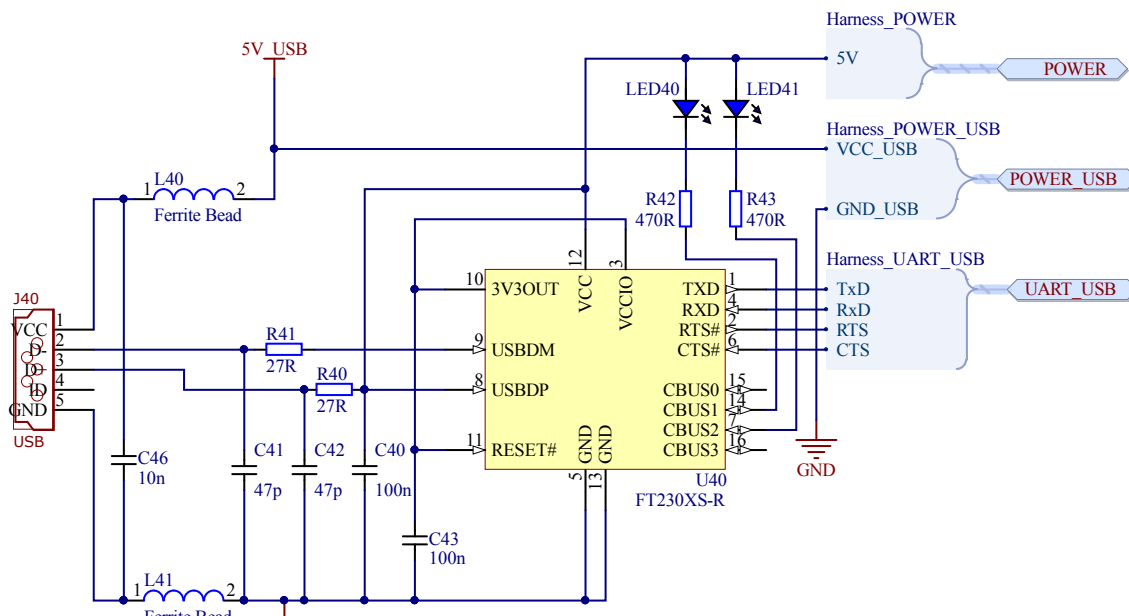
- **CPU STM32F407xx** - 3.3 V , 102 mA
- **USB FTDI230X** - 5 V , 22 mA
- **CAN TJA1049** - 5 V , 65 mA
- **GPS L76** - 3.3 V , 150 mA
- **Indikačné LED** - $5 \times 20\text{ mA}$
- **IMU LSM6DS3** - 1.25 mA

Pre správne napájanie obvodov potrebujeme zaistiť 5 V a 3.3 V výstup. Pre 3.3 V výstup je použitý napäťový regulátor LD1117S33TR s označením U20. Dokáže poskytnúť výstupný prúd 800 mA . Pri súčte maximálnych možných odoberaných prúdov zariadení, ktoré pracujú na 3.3 V , je odoberaný prúd 352 mA .

Podľa výrobcu odporúčaného zapojenia LD1117S33TR, by na vstupe mal byť kondenzátor o hodnote 100 nF a na výstupe s hodnotou $10\text{ }\mu\text{F}$. To spĺňajú kondenzátory C28 a C25. Naša jednotka ECUG je umiestnená ako zásuvný modul v jednotke ECUB spojená konektorom J_IN, cez ktorý poskytuje napájanie 5 V a spojenie cez CAN rozhranie so zvyškom vozidla. ECUB sa okrem iného stará, aj o napájanie ostatných jednotiek. Napájanie z tejto jednotky je pomerne dostatočne odfiltrované. Na vstupe sú ako filtračné kondenzátory keramické kondenzátory C23 a C24, s puzdrom 0805, namiesto elektrolytických filtračných kondenzátorov s omnoho väčšou kapacitou. Na výstup je pridaný 100 nF keramický kondenzátor.

Pre vizuálnu detekciu prítomnosti napätia na výstupe regulátora som použil zelenú LED diódu s predradeným odporom s hodnotou $62\text{ }\Omega$.

Na schéme 3.3 je vypočítaná hodnota odporu, pri ktorej LED dosahuje nominálneho prúdu. Na plošnom spoji som osadil odpor s vyššou hodnotou, aby odoberaný prúd a svietivosť bola menšia.

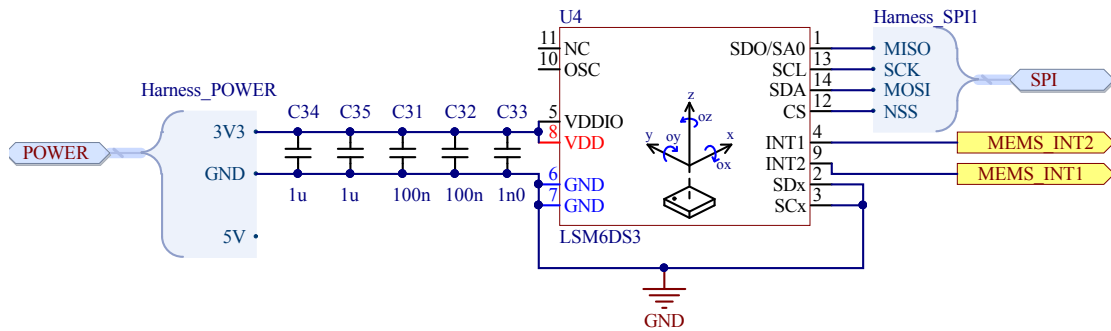


Obr. 3.3: Schéma napájania ECUG

3.2.2 Akcelerometer

Akcelerometer je základné zariadenie, od ktorého sú závislé výsledky merania. Preto pri návrhu zapojenia akcelerometra som kládol dôraz na blokovacie kondenzátory zariadenia.

Náš akcelerometer LSM6DS3 má pracovný rozsah napájania 1.71 V až 3.6 V. Pracovný rozsah je pomerne široký. Napätie, ktorým je akcelerometer napájaný, je 3.3 V. Podľa datasheetu akcelerometra LSM6DS3 je potrebné blokovať piny VDDIO a VDD keramickými kondenzátormi o hodnote 100 nF. Na kondenzátoroch C34 a C35 som použil typ puzdra 0805, pre prípadné možnosti výmeny kondenzátorov za väčšie hodnoty. Tieto kondenzátory na doske primárne neosadzujem, sú tam pre prípadné testovacie účely a ochranu pri nečakaných problémoch s celkovým napájaním formule. LSM6DS3 pracuje s vysokými frekvenciami. SPI komunikácie môže fungovať na frekvenciách 10 MHz. Pre tento prípad rýchlych odberov, viz. [20], je pre kondenzátor C33 navrhnuté miesto na plošnom spoji. Pre prípadné použitie takto vysokých frekvencií si môžeme overiť teóriu blokovania. Pre správnu funkciu zariadenia sú postačujúce kondenzátory C31 a C32, ktoré doporučuje výrobca. Použitý akcelerometer má funkciu oznámiť, keď merané dáta sú dostupné a pripravené. Tieto oznamy sa môžu previesť dvoma spôsobmi. Prvým z nich je hodnota status registra, v ktorom sa bity zodpovedajúce tejto funkcii zmenia na vysokú úroveň pri správnom naplnení registra. Akcelerometer poskytuje aj iný spôsob a to taký, že na výstup MEMS_INT1 a MEMS_INT2, ktoré vidno na schéme 3.4, zmení stav z nízkeho na vysoký. Tieto signálové cesty vedú do CPU. Na základe toho, CPU dokáže detekovať, že merané dáta su pripravené na vyčítanie z dátového registra alebo fronty. Tieto signály slúžia na hardvérové prerušenie hlavného programu a vykonanie podprogramu, ktorý následne obsluží indikujúci stav.



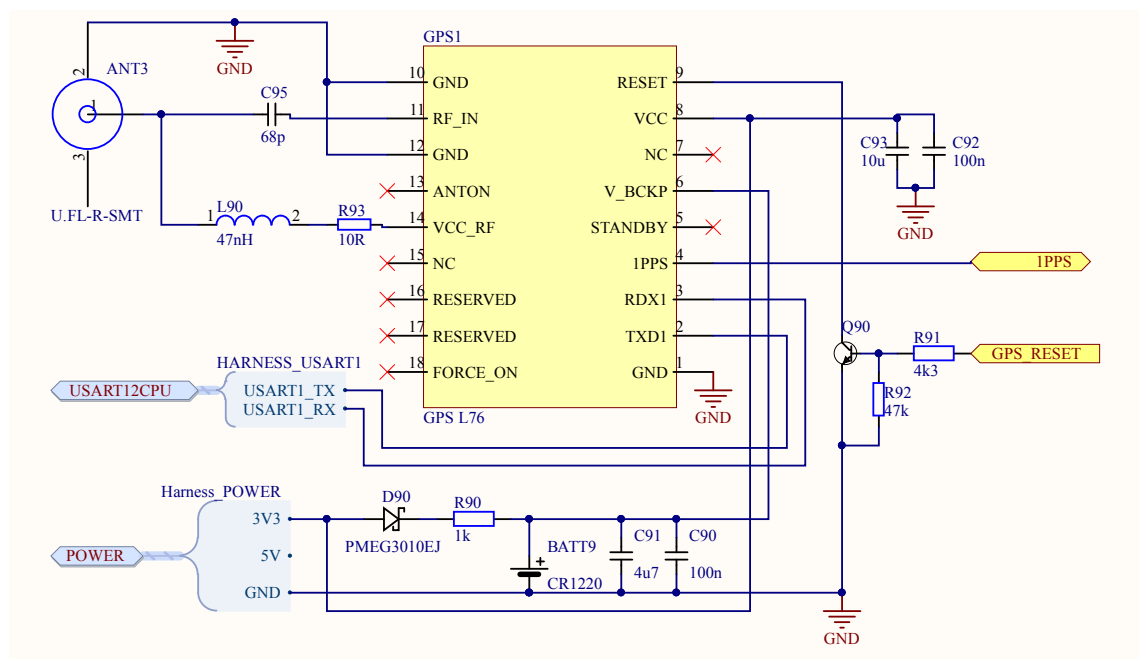
Obr. 3.4: Schéma zapojenia IMU

3.2.3 GPS

Ako GPS prijímač som si zvolil Quectel L76, ktorý podporuje pripojenie pasívnej ale aj aktívnej antény. Na obrázku 3.5 je vidieť schému zapojenia GPS prijímača. Odporúčané zapojenie výrobcom pre aktívnu anténu je zapojenie bez kondenzátora C95. Ten je nahradený spojom. Aktívna anténa funguje aj s týmto kondenzátorom. Pre prípad použitia pasívnej antény, sa signál VCC_RF, nezapája. V našom prípade sa cesta vedúca z tohto pinu preruší neosadením odporu R93 alebo cievky L90. My používame aktívnu anténu so zapojením aké je vidno na obrázku 3.5.

Signál GPS_RESET slúži na resetovanie GPS prijímača. Je zapojený cez NPN tranzistor na zem podľa doporučenej schémy.

Prijímač L76 podporuje zapojenie so záložnou batériou. Pri tomto zapojení je dostupná funkcia EASY. Tá zabezpečuje rýchlejší štart prijímača viz. 2.1. Na schéme v obrázku 3.5 je aj odporúčané zapojenie pre dobíjateľnú batériu.

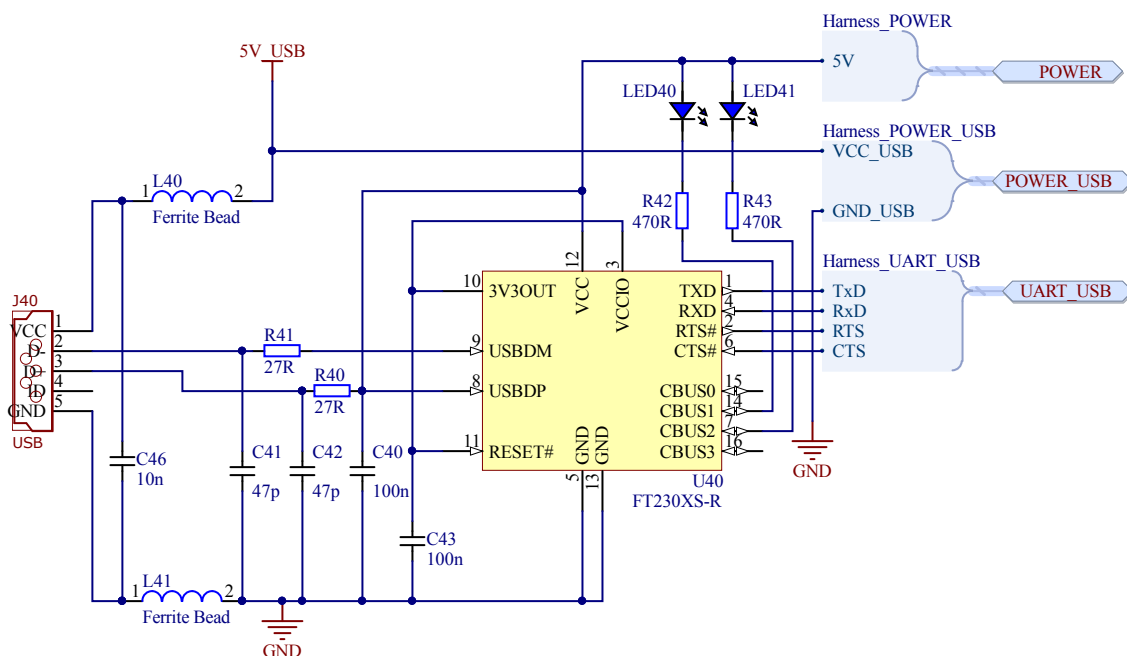


Obr. 3.5: Schéma zapojenia GPS prijímača

3.2.4 Zber dát a komunikácia

Pre zber dát ECUG používa dva spôsoby. Jeden je pomocou datalogeru, ktorý je nainštalovaný vo FSE.05x a skonštruovaný aby prijímal a ukladal všetky správy, ktoré sa vysielajú na CAN zbernicu formule. Druhý spôsob bol navrhnutý predovšetkým pre zber dát počas testovania. To sa realizuje pomocou USB komunikácie. Na obrázku 3.6 vidíme prevodník FTDI FT230XS-R. Schéma zapojenia napájania prevodníka je až na súčiastku L41, zapojená podľa odporúčania výrobcu. Ferrite bead L41 je tam pre lepšie odfiltrovanie naindukovaných šumov.

LED diódy LED40 a LED41 indikujú činnosť zbernice. LED40 indikuje prichádzajúce rámce a LED41 odchádzajúce. Použil som modré LED diódy a navrhoval som ich na prúd 5 mA . Diódy sú napájané 5 V . Úbytok napätia na LED pri 5 mA je 2.9 V . Vypočítaný odpor nám vyšiel $420\ \Omega$. Pre absenciu tejto hodnoty rezistoru v internom sklade, bol použitý $470\ \Omega$ rezistor.

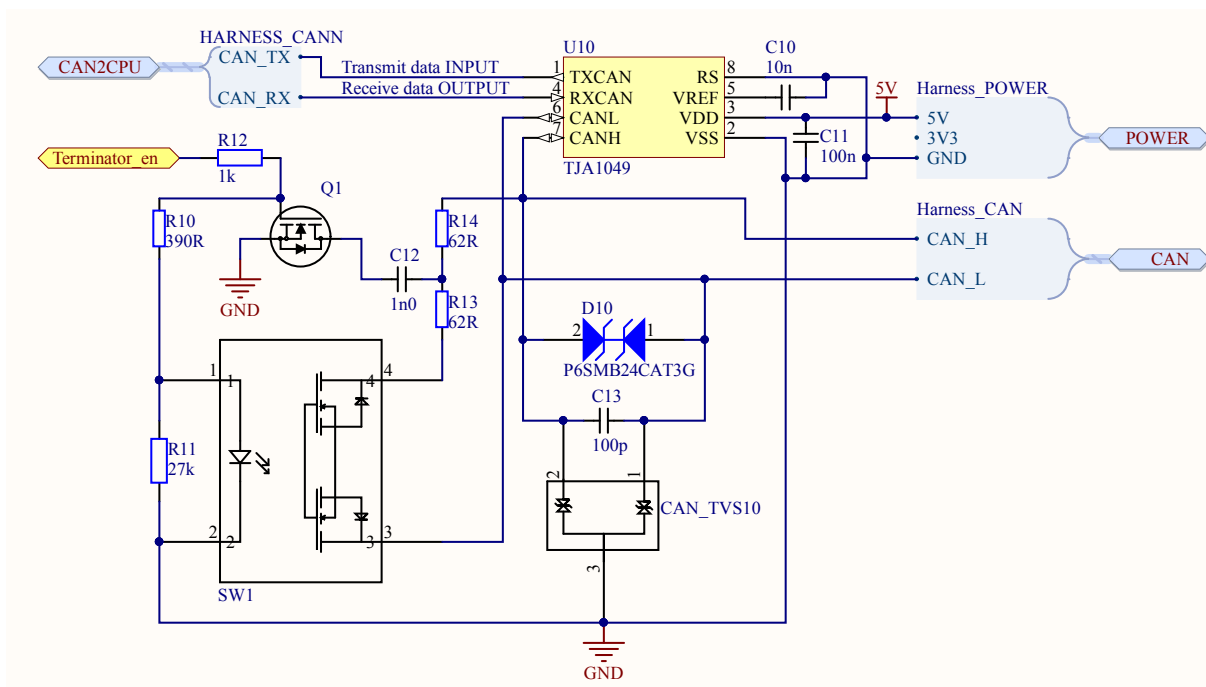


Obr. 3.6: Schéma zapojenia USB prevodníku

Schematické zapojenie CAN zbernice je prevzaté z tímu eForce[4]. Je to z dôvodu kompatibility a jednotnosti schém CAN-u. V predošlom roku, kedy sa navrhoval monopost FSE.04x, sa CAN budiče menili veľmi často z dôsledku poškodenia. S CAN komunikáciou bol problém. Bola nespoľahlivá, niektoré správy nedochádzali a nevedeli sme prečo. Navyše sa časom poškodzovali CAN budiče. Bola potreba ich meniť, niekedy aj v priebehu pretekov.

Pri návrhu formuly FSE.05x sa uvažoval galvanický oddelený CAN, ale to nebolo možné realizovať kvôli obmedzeniu káblových zväzkov. Preto sa zaviedla jednotná schéma zodpovedná pre komunikáciu cez CAN zbernicu pre všetky zapojené dosky. Doplnili sa ochranné prvky Zener TVS diódy D10 a CAN_TVSI10. Pre lepšie testovanie zbernice a komunikácie medzi doskami sa pridala možnosť softvérovo terminovať zbernicu na každej doske osobitne. Terminuje sa pomocou signálu Terminator_en, ktorý vedie z CPU. Cez MOSFET relé G3VM-61G1 SW1 sa pripoja rezistory R14 a R13 a slúžia na

terminovanie zbernice.



Obr. 3.7: Schéma zapojenia CAN zbernice

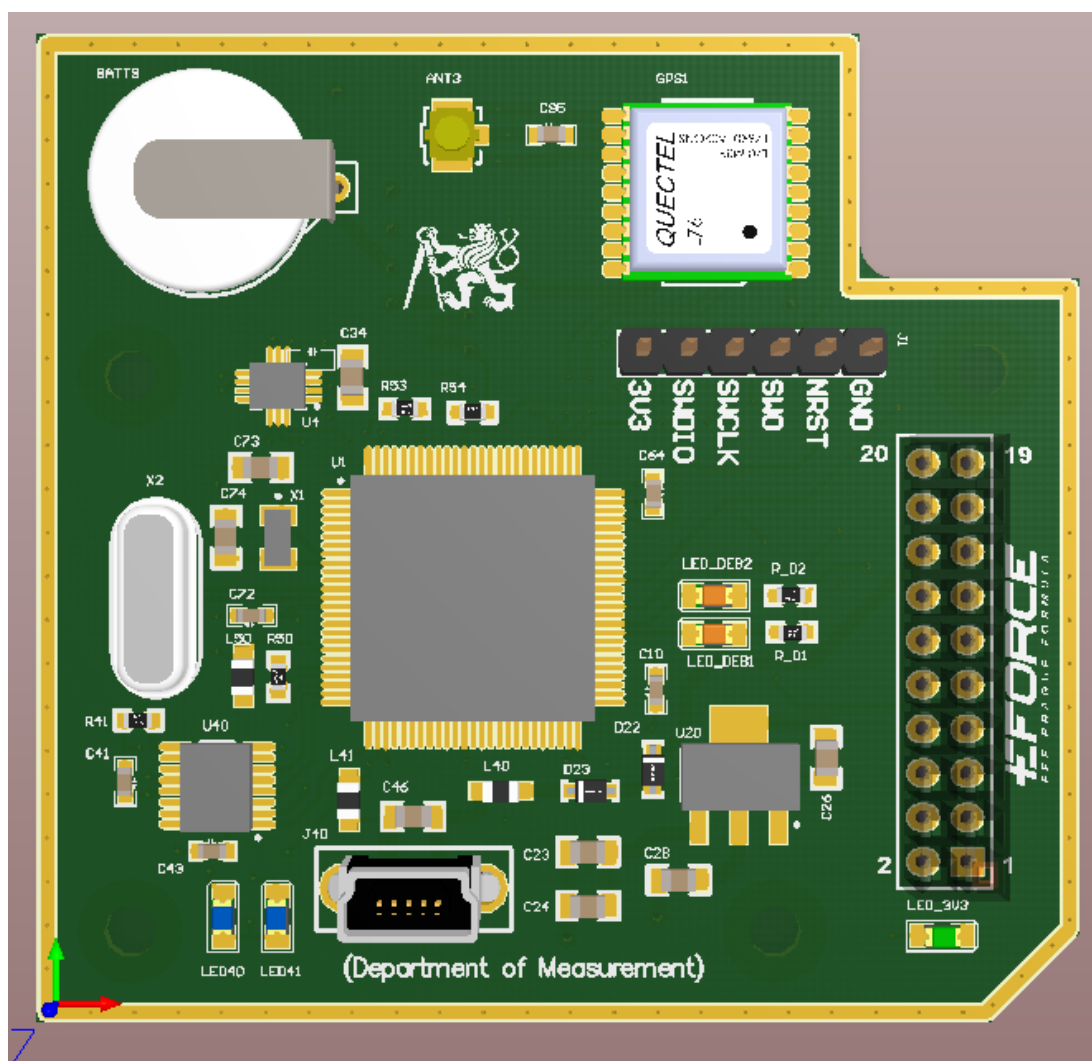
3.2.5 Plošný spoj

Plošný spoj jednotky ECUG je navrhnutý v programe Altium. Tento program sa špecializuje na návrh schém a plošných spojov. Obrázky 3.9 a 3.8 sú 3D modely exportované z tohto programu.

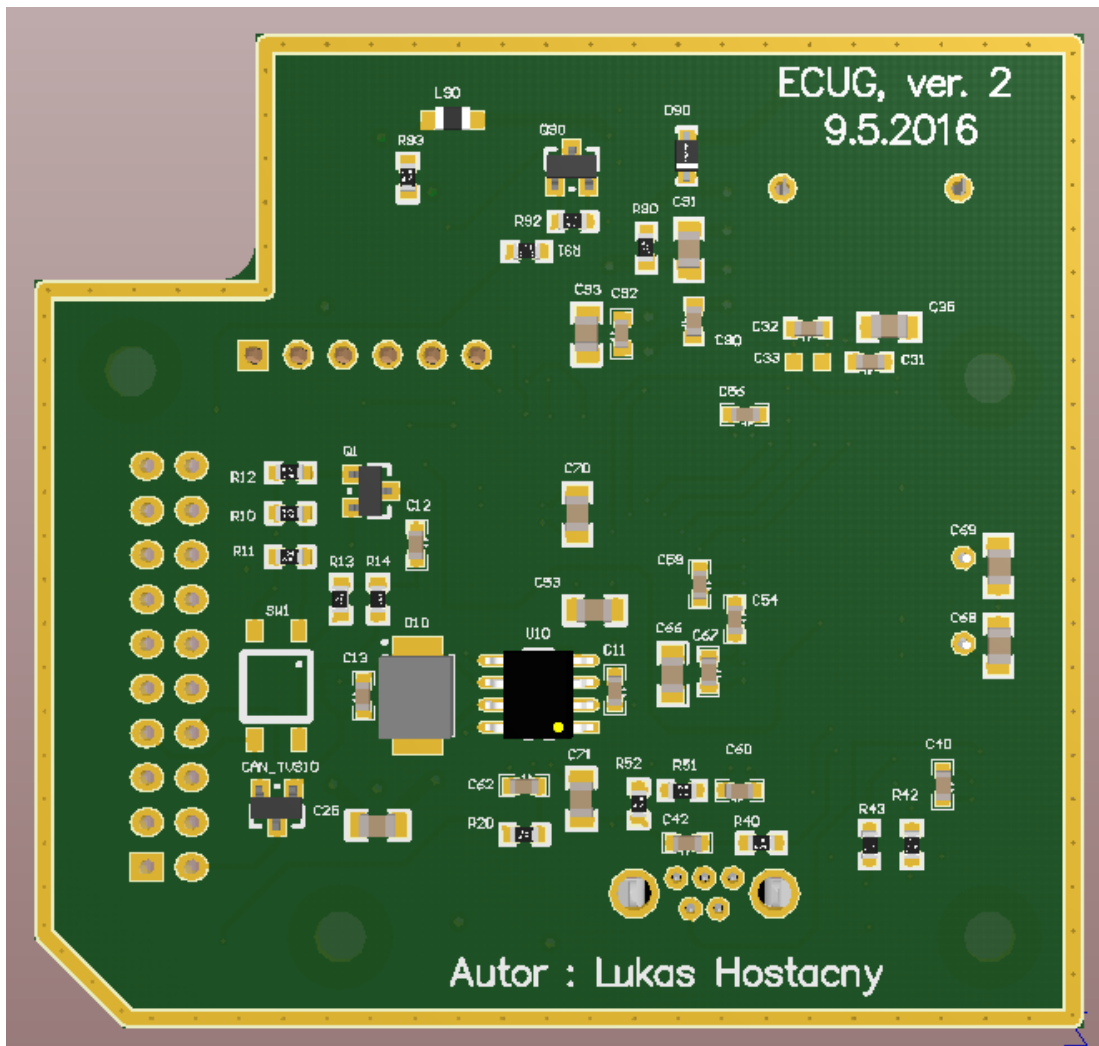
Naša meracia sústava ECUG je umiestnená v jednotke ECUB. Zdieľajú rovnaký úložný priestor. Úložný priestor je spravidla vodotesná krabica aby odolala skúške, v ktorej sa na formulu strieka voda. Viac o tejto skúške viz. [15]. Dizajn dosky ECUB oproti modelu, ktorý bol nainštalovaný v monoposte FSE.04x, ostal nezmenený. Preto sa naša meracia doska ECUG musela podrobiť rozmerovým obmedzeniam. ECUB má na každý prídavný modul pripravené štyri úchyty. Dvomi ľavými a pravým dolným úchytom viz. 3.8, sa doska pripevní k ECUB a 20 pinovým konektorom pripojí ku napájaniu a CAN zbernici monopostu. Diera na pravo hore slúži pre stabilizáciu ak sa doska testuje na stole. Je položená na dištančných podložkách. Doska podopretá v týchto štyroch miestach drží stabilnú polohu.

Navrhnutý plošný spoj je zložený zo 4-och vrstiev. Doska bola navrhnutá tak, aby vyžarovala menej EMC rušenia do okolia viz. [20]. Prvá vrchná a štvrtá spodná vrstva je signálová. Druhá je rozliata zem a tretia vrstva je napájanie. Na vrchnej vrstve sú rozmiestnené obvody GPS, CPU, USB, Napájanie, IMU. Na spodnej vrstve je rozmiestnený prevažne CAN a väčšina blokových kondenzátorov.

Na plošnom spoji sú prevažne súčiastky typu SMD. Niektoré súčiastky sú typu THT. Sú to po väčšine súčiastky mechanicky viac namáhané. Konštrukcia SMD súčiastok, ktoré sú uchytené na medenej plôške niektorej zo signálových vrstiev, je náchylnejšia na poškodenie plošného spoja. Pri vyššej mechanickej námahe môže z plošného spoja vytrhnúť spájkovaciu plôšku. THT súčiastky majú svoje vývody cez plošný spoj a tým sú odolnejšie voči poškodeniu plošného spoja pri zvýšenej mechanickej námahe. Najviac namáhané súčiastky sú konektory. USB konektor spolu s programovacím konektorom sú najviac mechanicke namáhané súčiastky na doske ECUG. THT súčiastky okrem iného sú: USB a programovací konektor, 8 MHz kryštál, batéria pre GPS a konektor, ktorým sa ECUG pripája k monopostu.



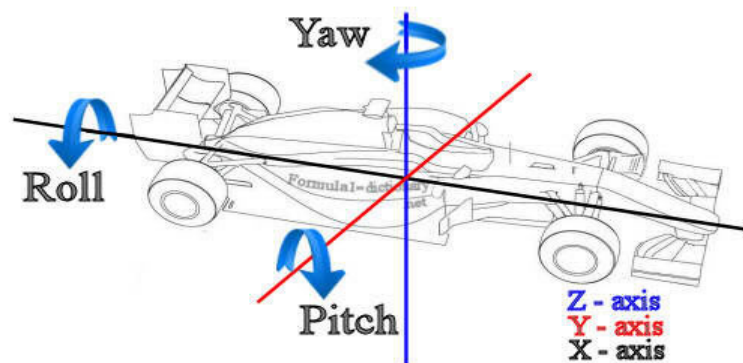
Obr. 3.8: 3D model navrhutej dosky, vrchná strana



Obr. 3.9: 3D model navrhnutej dosky, spodná strana

3.3 Softvérový návrh

V nasledujúcom texte sú použité pojmy pitch, roll, yaw - čo znamenajú osi rotácie viz. 3.10



Obr. 3.10: Ilustrácia osí rotácií. Prevzaté z [18]

3.3.1 Meranie z GPS

Použitá GPS Quectel L76 podporuje prácu v NMEA formáte. Tento formát poskytuje údaje v podobe znakov. Viac informácií o NMEA protokole v datasheete od výrobcu [13]. Dáta vysielané z GPS do CPU sú následne preposlané na USB port. Správa z GPS je tak zachytená cez zberné zariadenie v tzv. surovom stave. Dáta sú zachytené pomocou terminálu RealTerm. Nás bude zaujímať správa RMC (Recommended Minimum Position data), ktorá v sebe obsahuje hodnotu pozície, rýchlosti a času. Na obrázku 3.11 sú zachytené správy RMC, ktoré posielala GPS.

```
$GPRMC,090212.400,U,5006.2138,N,01423.6343,E,8.49,332.31,110516,0.0,E*7BCRLF
$GPRMC,090212.600,U,5006.2142,N,01423.6339,E,8.49,331.76,110516,0.0,E*79CRLF
$GPRMC,090212.800,U,5006.2146,N,01423.6335,E,8.49,331.32,110516,0.0,E*7FCRLF
$GPRMC,090213.000,U,5006.2150,N,01423.6331,E,8.49,330.95,110516,0.0,E*79CRLF
$GPRMC,090213.200,U,5006.2154,N,01423.6327,E,8.49,330.64,110516,0.0,E*76CRLF
```

Obr. 3.11: Príklad NMEA správy

Pre naše účely potrebujeme získať údaj o rýchlosti. Údaj o rýchlosti sa nachádza za 7 čiarkou zľava. Získavame ho v podobe znakov, ktoré pomocou funkcie atof() v jazyku C prevedieme do dátového typu float.

3.3.2 Meranie rýchlosti kolies

Formula FSE.05x disponuje senzorom uhlu natočenia hriadeľa a motoru. Tento údaj potrebuje frekvenčný menič pre riadenie motorov. Údaj o natočení hriadele prepočítava frekvenčný menič na rýchlosť otáčania sa hriadeľa za minútu. Na CAN zbernici formule je k dispozícii údaj, ktorým po úprave dostaneme otáčky motora za sekundu. Krútiaci moment motora je na koleso formule prevedený cez jednostupňovú prevodovku. Pri znalosti obvodu kolesa, ktorý je 1.215 m a prevodového pomeru prevodovky, ktorý je 5.3, je možné tento údaj prepočítať na rýchlosť, ktorým sa vozidlo za určitých podmienok pohybuje. Dáta na zbernici sú vo formáte Q15. Viac informácií o tomto formáte nájdete na [1]. Tento formát má rozsah od 1 do -1. Aby sme ho previedli na otáčky za minútu, musíme získanú hodnotu prenásobiť konštantou, ktorú udáva odosielateľ, čo je 20000, a predeliť hodnotou 32768, čo zodpovedá rozsahu signed integer. Pre výpočet rýchlosti potrebujeme ešte tento údaj prenásobiť prevodovým pomerom a obvodom kolesa. R je údaj získaný z CAN zbernice, ktorý posielala frekvenčný menič.

$$v = \frac{1.215 \text{ m} \cdot 20000 \cdot R}{5.3 \cdot 32768} \quad (3.1)$$

Získanú rýchlosť v určitých podmienkach považujeme ako presný údaj pre naše účely.

3.3.3 Vyčítanie dát z akcelerometra

Zariadenia IMU s CPU komunikuje cez rozhranie SPI. Dáta, ktoré sa posielajú, sú zrýchlenia v osiach X, Y, Z so vzorkovacou frekvenciou 1.66 kHz a dolno-priepustným filtrom 400 Hz ale aj uhlová rýchlosť roll, pitch, yaw so vzorkovacou frekvenciou 1.66 kHz bez filtra. IMU jednotke, určitý čas trvá, kým pripraví namerané dáta do registru. Aby nenastala situácia, kedy procesor chce vyčítať dáta z registra IMU, ktoré ešte nie sú korektne pripravené, tak sa vždy pred prístupom k registru kontroluje STATUS register, či sú dáta pripravené. Viac informácií o STATUS registri IMU, nájdete na [16]. CPU príma dáta ako dve 8-bitové hodnoty, ktoré sa následne programom skladajú na 16-bitové číslo. Aby sme dostali hodnotu v jednotkách $m \cdot s^{-2}$, musíme hodnotu prenásobiť konštantou $59.87 m \cdot s^{-2}$, ktorú sme vypočítali ako rovnicu 3.2

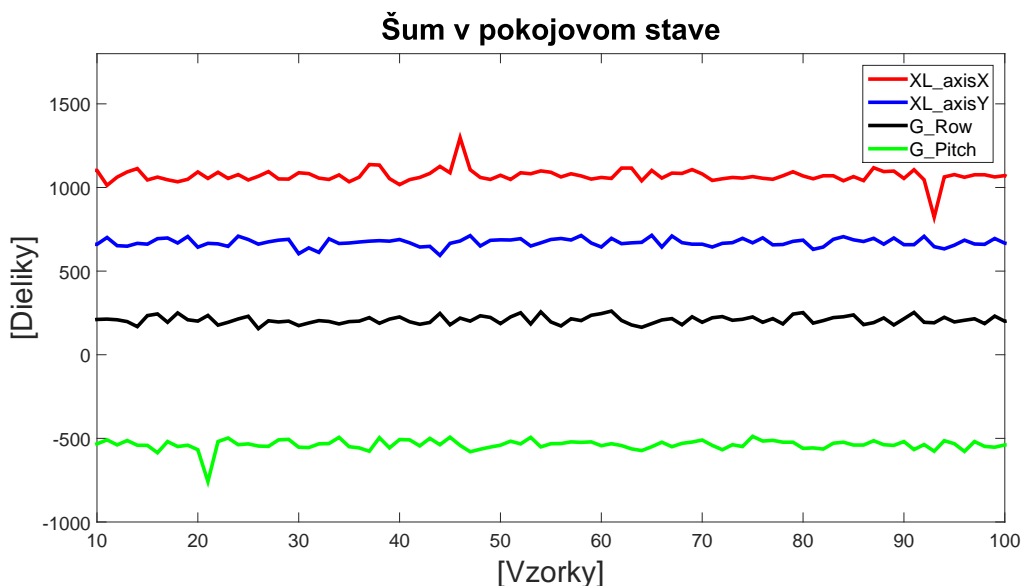
$$XL_{const.} = \frac{R_{XL} \cdot 9.81}{2^{16}} \quad (3.2)$$

kde $XL_{const.} = 4 g$ je požítý rozsah akcelerometra. Vypočítaná konštanta sa zhoduje s odporúčaním výrobcu.

3.3.4 Korekcia offsetu

V prvom rade, pre zachovanie správneho minimálneho offsetu garantovaného výrobcom, je dôležité pri spájkovaní postupovať správnym spôsobom a nepresiahnuť spájkovacia teplotu pri určitej vlhkosti v puzdre. Zariadenie IMU použité na doske ECUG, bolo zapájkované ručne. Usudzujem, že takýmto postupom sa posunuli offsety zariadenia [12]. IMU LSM6DS3 poskytuje hardvérovú kalibráciu offsetu, kde do registrov sa zapíše hodnota offsetu, s ktorou IMU následne počíta. Pre presnú kalibráciu sme nemali k dispozícii presne kalibračné prístroje.

Pre zistenie offsetu je zhotovený program pre kalibráciu. Pri predpoklade, že IMU jednotka je vo vodorovnej polohe alebo jej veľmi blízkej, odčítajú sa aktuálne hodnoty $\hat{\sigma}$. Aj keď doska je zdanlivo v pokoji, merané hodnoty sú zaťažené šumom viz. obrázok 3.12. Preto odčítanie aktuálnej hodnoty pre naše účely sa vykoná opakovanými meraniami 500 hodnôt s pauzou medzi meraniami 10 ms . Potom namerané hodnoty sa spriemerujú. Priemerovanie nám pomôže odstrániť šum a dopracovať sa tak k presnejšej hodnote offsetu. Vstupné hodnoty, ako počet opakovaní a prestávka medzi meraniami, sa môžu meniť podľa požiadavok a situácie. Výsledná hodnota merania sa uloží ako kalibračná konštanta a odpočítava sa od nameraných hodnôt, ktoré používame ďalej pri iných výpočtoch. Takýto druh kalibrácie je veľmi účinným pri kalibrácii offsetu gyroskopu. Gyroskop nám poskytuje údaj o uhlovej rýchlosti, nie uhlového zrýchlenia. Pri vyššie uvedenej kalibrácii, keď je doska položená napríklad na stole, je predpoklad, že rýchlosť otáčania sa dosky v ktorejkoľvek osi rotácie, je približne nulová. Merania ukázali, že offset v osi pitch je zhruba 500 dielikov, čo po prepočte je približne $4.4^\circ \cdot s^{-1}$. Na obrázku 3.12 je zobrazený ako G_Pitch.



Obr. 3.12: Šum osí akcelerometra(XL) a gyroskopu(G) v pokoji v jemnom náklone

Korekcia offsetu akcelerometra je omnoho zložitejšia. Akcelerometer merá absolútne zrýchlenie. V praxi to znamená, že zmerá aj gravitačné zrýchlenie. Ak položíme akcelerometer na rovnú plochu tak, že osi X, Y sú v horizontálnej polohe voči zemi a os Z je zvislo, tak na osi Z môžeme vidieť zrýchlenie približne $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Predpokladáme, že doska ECUG sa vo formule montuje vždy s osou Z zvisle k zemi so zastavenou formulou vo vodorovnej polohe. Korekciu offsetu osi X a Y prevádzame rovnako ako v prípade gyroskopu. S korekciou osi Z predpokladáme, že má ukazovať zrýchlenie $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Pri kalibrácii od nameranej hodnoty odčítame gravitačné zrýchlenia a výslednú hodnotu uložíme do kalibračnej konštanty. Vo všetkých prípadoch kalibračné konštanty používame ako vo vzorci 3.3.

$$dataNew = dataRaw - calibrationConst \quad (3.3)$$

kde *dataRaw* predstavujú nameranú hodnotu, a *dataNew* hodnotu po kalibrácii. Premenná *calibrationConst* je nameraná kalibračná konštantka.

Tato kalibrácia ma zmysel len vo veľmi úzkom rozsahu. Dosku ECUG sa snažíme mať v čo najvodorovnejšej polohe. Pre väčšie uhly sa táto kalibrácia offsetu nedá použiť.

3.3.5 Výpočet uhla natočenia a rýchlosti

Po korekcií nameraných dát kalibračnými konštantami, tieto dáta používame na výpočet uhla natočenia akcelerometru v osiach rotácií row a pitch. Gyroskop poskytuje uhlovú rýchlosť natočenia. Aby sme dostali uhol natočenia potrebujeme získané dáta integrovať v čase.

$$\beta(t) = \int dataG(t) \cdot dt \quad (3.4)$$

Pri digitálnom spracovaní sa integrál zmení na sumu 3.5

$$\beta = \sum_{i=1}^n dataG_i \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (3.5)$$

Samotný údaj o aktuálnom uhle natočenia dosky ECUG získavaný z gyroskopu je krátkodobo veľmi presný, ale na dlhodobé meranie uhlu natočenia môže byť veľmi nepresný. Na obrázku 3.13 je zachytený náhodný pohyb dosky v osi rotácie pitch. Potom je vrátený do východzej polohy.



Obr. 3.13: Chyba pri získavaní uhla z gyroskopu pohybom v jednej osi rotácie

Je vidieť, že po úkone vo východzej polohe meria približne 3° . Oveľ a viac náchylnejší je gyroskop na pohyb vo všetkých osiach. Na obrázku 3.14 je náhodný pohyb vykonávaný rukou po kruhovej trajektórii vo všetkých smeroch. Pri opätovnom vrátení do východzej polohy ukazuje údaj o uhle dosky skoro -15° , čo je veľká chyba.



Obr. 3.14: Chyba pri získavaní uhla z gyroskopu pohybom vo viacerých osiach rotácie

Určovanie uhlu akcelerometrom je krátkodobo nepresné ale dlhodobu môže poskytovať presnejší

údaj ako gyroskop. Akcelerometer meria aj gravitačné zrýchlenie a na základe tejto znalosti, môžeme použiť nasledujúci vzorec pre výpočet uhla.

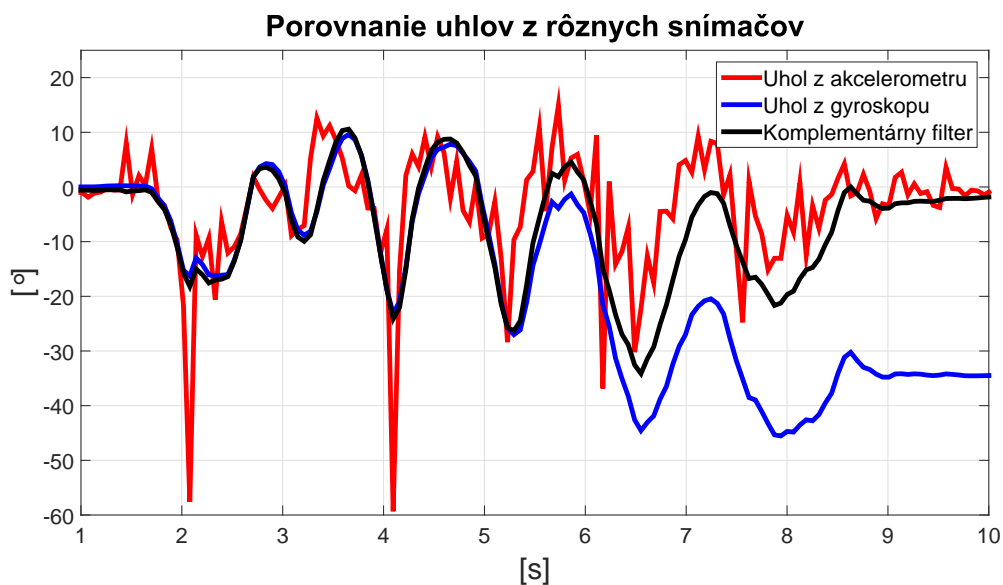
$$pitchXL = \tan^{-1} \left(\frac{dataX}{dataZ} \right) \quad (3.6)$$

kde $dataX$ predstavujú dáta akcelerometra merané na osi X, $dataZ$ predstavujú dáta akcelerometra merané na osi Z a $pitchXL$ je uhol v osi rotácie pitch.

Pre filtrovanie týchto dvoch údajov o uhle, je použitý komplementárny filter [3].

$$angle = pitchGyro \cdot k_1 + pitchXL \cdot k_2 \quad (3.7)$$

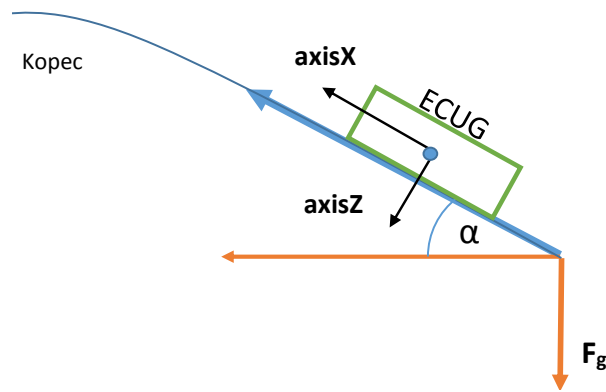
kde $pitchGyro$ predstavuje uhol vypočítaný z dát gyroskopu, vzorec 3.5, $pitchXL$ predstavuje uhol vypočítaný z dát akcelerometra, vzorec 3.6. Koeficient k_1 predstavuje váhu hodnoty $pitchGyro$ a k_2 predstavuje váhu hodnoty $pitchXL$. Hodnoty koeficientov su zistené empiricky $k_1 = 0.99$ a $k_2 = 0.01$. Na obrázku 3.15 je znázornený výsledok komplementárneho filtra. Na rýchle zmeny má vplyv vypočítaný uhol z gyroskopu a na dlhodobé pomalé zmeny majú vplyv uhly vypočítané z akcelerometra.



Obr. 3.15: Výsledok po filtrácii komplementárnym filtrom

3.3.6 Korekcia gravitačného pôsobenia

Ako je už vyššie spomenuté, akcelerometer sníma aj gravitačné zrýchlenie. Pre nás je dôležité zrýchlenie v osi X, ktoré je nastavené pozdĺžne v smere vozidla. Z tohto údajja môžeme počítať rýchlosť, ktorá je dôležitá pre kontrolu trakcie. Ak chceme merať zrýchlenie vozidla akcelerometrom, ktorý je pevne pripevnený k vozidlu, musíme uvažovať, že vozidlo sa nepohybuje len po rovinatej dráhe. Prekonáva rôzne vyvýšeniny a kopce. Pri stúpaní na vyvýšeninu je auto spolu s doskou ECUG naklonené v uhle stúpania viz. obrázok 3.16. Pri tomto uhle naklonenia α sa začína na osi X, prejavovať gravitačné zrýchlenie.



Obr. 3.16: ECUG pod náklonom v osi pitch

Pri získavaní rýchlosti sumáciou viz. 3.5, sa nám pri náklone ECUG, začne prejavovať gravitačná zložka na osi X. To sa prejaví na výslednej rýchlosti neustálym zrýchľovaním. V konečnom dôsledku, aj keď sa auto po kopci pohybuje konštantnou rýchlosťou, výsledok ukazuje že vozidlo zrýchľuje.

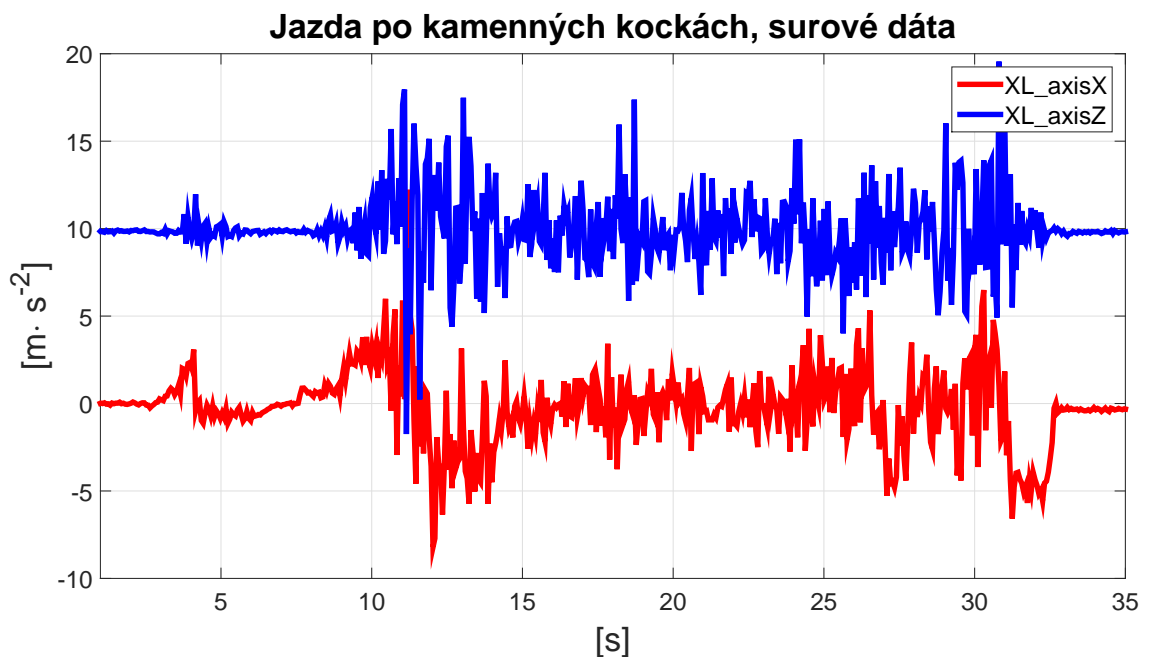
Pre korekciu tohto javu, je potrebné vedieť pomerne presný a rýchly údaj uhla natočenia ECUG. Pri znalosti uhla α natočenia ECUG, môžeme predpokladať veľkosť gravitačného zrýchlenia zaznamenanom na osi X, podľa vzorca 3.8.

$$Fx_g = 9.81 \cdot \arcsin(\alpha) \quad (3.8)$$

pre korekciu, túto zložku odčítame od nameranej hodnoty v ose X.

$$axisX_{new} = axisX - Fx_g \quad (3.9)$$

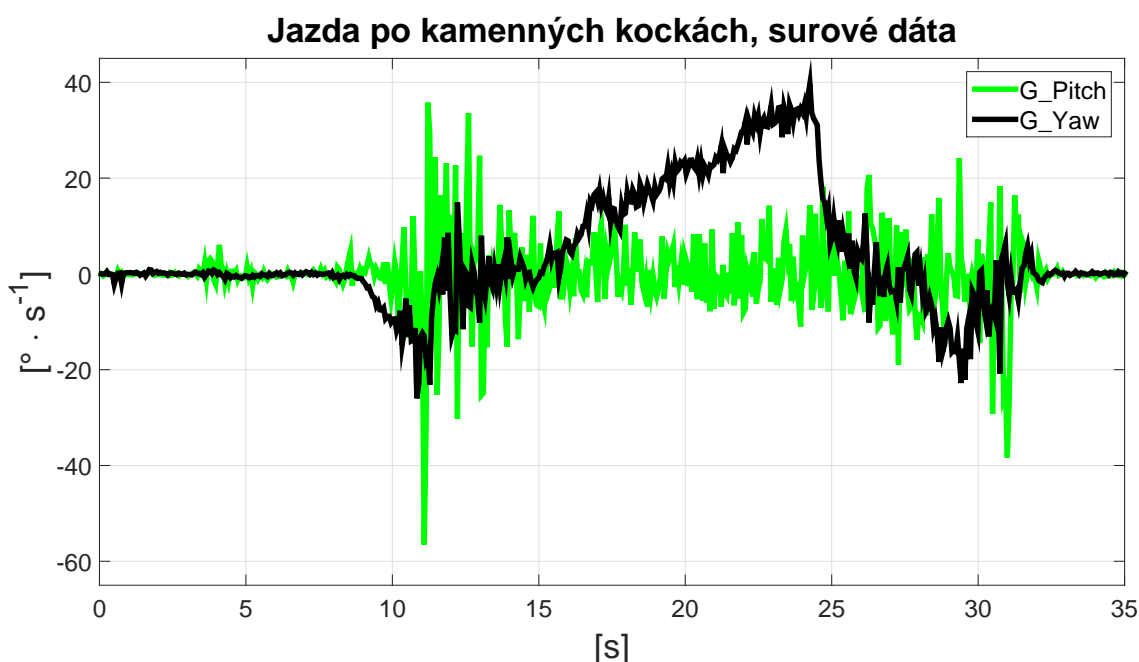
Formula pri jazde vibruje a trasie sa. To všetko zaznamenáva akcelerometer a gyroskop ako plnohodnotné dáta. Ukážka jazdy po väčších nerovnostiach, obrázok 3.17.



Obr. 3.17: Surové dáta osi X a Z z akcelerometra pri jazde hrbol'atým terénom

Na grafe je vidieť, že akcelerometer je veľmi citlivý. Sumáciou sa rušenie z väčšej časti odstráni a v konečnom dôsledku z týchto dát je možné vypočítať rýchlosť. Problém môže nastať pri určovaní uhla. Vzhľadom na to, že uhol je počítaný z akcelerometra, má podľa vzorca 3.7, váhu $k_1 = 0.05$. S tak malým koeficientom sa na výslednom uhle šum veľmi neprejaví.

Na druhej strane chybu môžu zvýšiť práve dáta z gyroskopu, ktoré pri použití koeficientu $k_2 = 0.95$ zo vzorca 3.7, svoju chybu prejavia oveľa viac. Na obrázku 3.18 sú namerané dáta z gyroskopu na rovnakej trase ako dáta z 3.17 a 3.18. Otrasy sa taktiež prejavovali na osiach rotácií pitch a yaw, viz. 3.18.



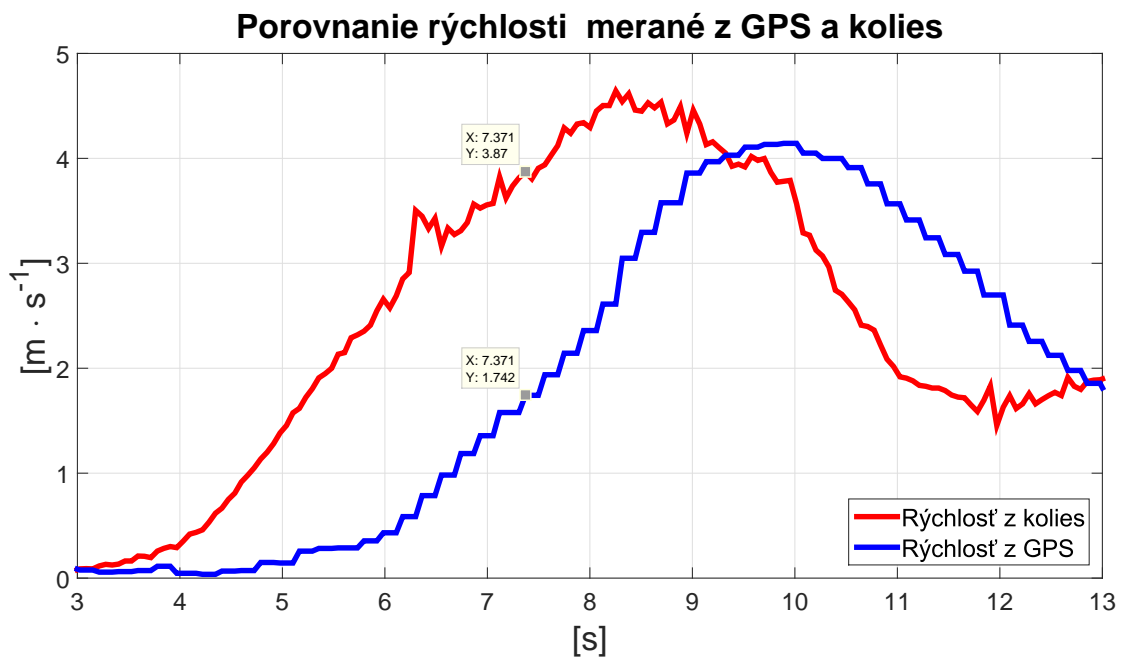
Obr. 3.18: Surové dáta osí rotácie pitch a yaw gyroskopu

Z obrázkov 3.17 a 3.18 je vidieť, že otrasy pôsobia vo viacerých osiach. Ako je popísané v podsekcii **Výpočet uhla natočenia a rýchlosti**, gyroskop je náchylný k väčšej chybe na konkrétnej osi, ak doska vykonáva viacsmerový pohyb.

Domnievam sa, že práve tento jav spôsobuje to, že po nájazde na nerovnosti, sa krátkodobo meraný uhol ECUG posunie a tým sa ovplyvní použitá gravitačná korekcia, ktorá je podľa vzorca 3.8 a 3.9, úplne závislá na hodnote uhlu α . Myslím si, že výsledok tohto narušenia sa v dlhodobom meraní môže prejavíť ako značná chyba. Do budúca to vidím ako predmet, ktorým sa treba ďalej intenzívne zaoberať.

3.3.7 Fúzovanie dát senzorov

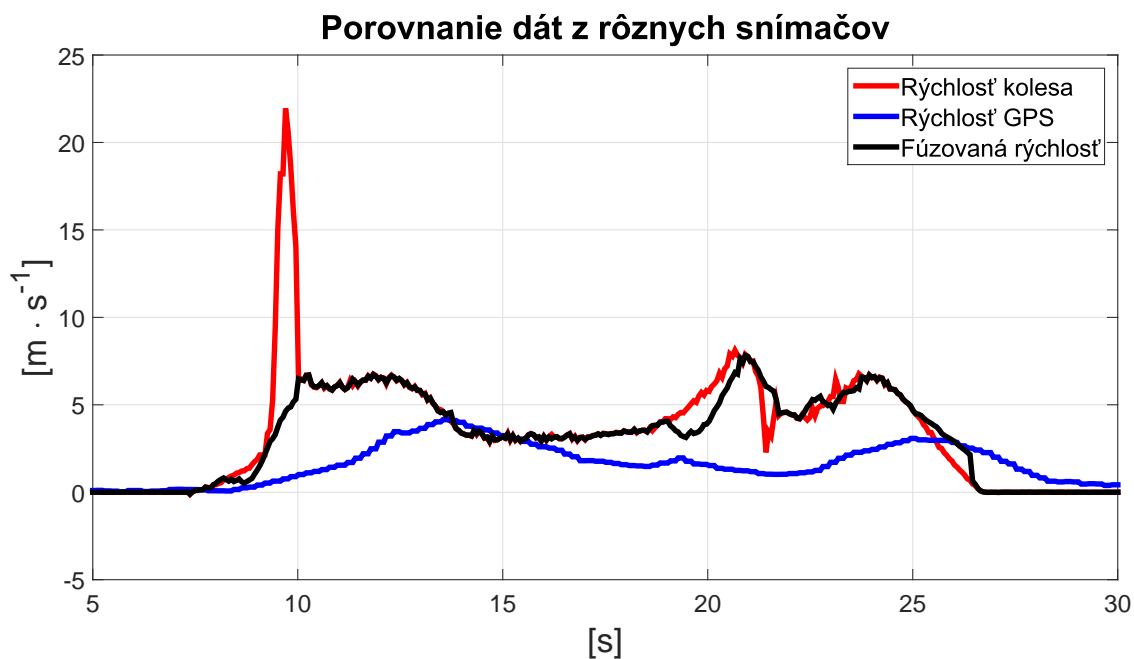
Kontrola trakcie po väčšinu času jazdy má presný reálny údaj o aktuálnej rýchlosti vozidla vďaka senzoru, ktorý je v motoroch pre určovanie polohy rotora. Tento údaj je veľmi presný do chvíle, kým nezačnú kolesá preklzovať alebo šmýkať. Práve v prípade preklzu pri zrýchľovaní, potrebuje kontrola trakcie presný údaj o aktuálnej rýchlosti auta. K dispozícii máme dve zariadenia, ktoré by mali v tomto prípade poskytnúť spoľahlivý údaj a to GPS a IMU. Na obrázku 3.19 je porovnanie rýchlosti obsiahnutej z GPS a rýchlosti z kolies, pri relatívne pokojnej akcelerácii a následnom spomalení.



Obr. 3.19: Porovnanie rýchlosti meranej z GPS a z kolies

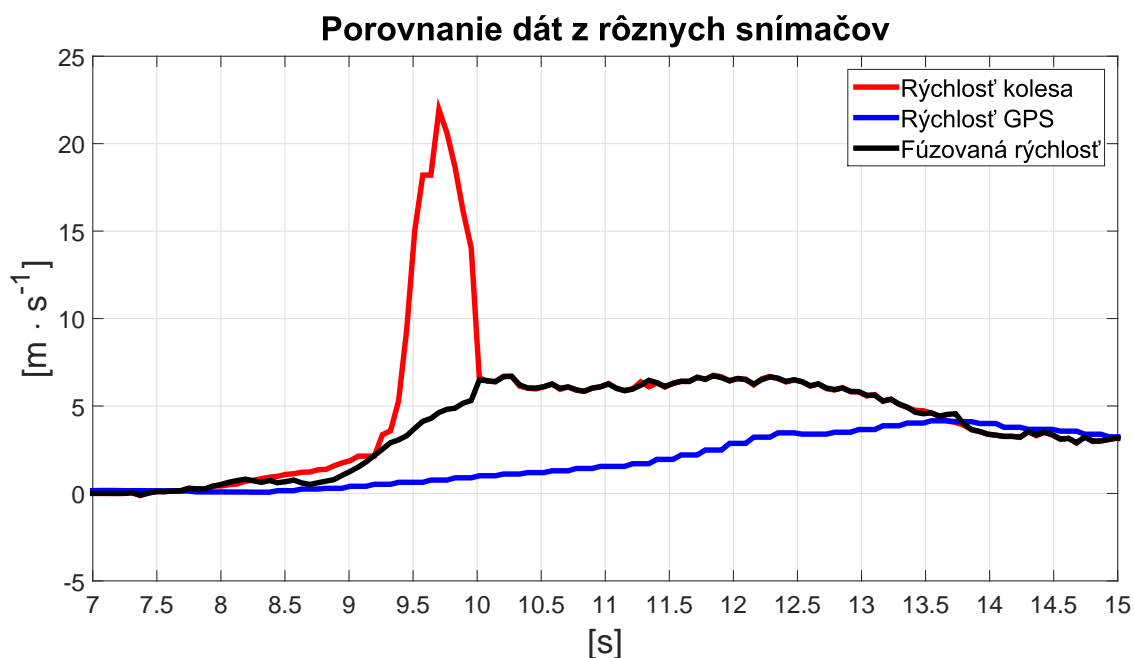
Je vidieť že GPS je, akoby spomalená, oproti meraniu z kolies, ktoré považujeme v našom prípade za presné. Vo vyznačených bodoch v grafe, ktoré sú v rovnakom čase $t = 7.371$ s, rozdielne hodnotou rýchlosti až $3.87 - 1.742 = 2.128$ m · s⁻¹. Z toho usudzujem, že GPS nemôže byť použitá ako presný údaj pre kontrolu trakcie o rýchlosti ale nemôže byť použitá ani pri krátkodobej korekcii chyby rýchlosti vypočítanej z IMU senzora. Týmto nevyklúčujem, že údaje z GPS, nebudú užitočné pri ďalšom vývoji algoritmov.

V doske ECUG je naprogramované fúzovanie dát nasledujúcim spôsobom. Na CAN zbernici sú dostupné dáta od rôznych senzorov, a to aj od pedálovej jednotky, ktorá posiela správy o požiadavkách na krútiaci moment, motorov a správy o tlaku v brzdovom okruhu. Tieto správy zachytáva jednotka ECUG a používa pri fúzovaní dát. Princíp spočíva v myšlienke, že pri nulovej požiadavke na moment tj. pri pustenom plyne a zároveň pri pustenej brzde sa ako presná hodnota berie údaj meraný z kolies. Pri určitej hranici plynu alebo brzdy sa ako správny údaj berie rýchlosť vypočítaná z IMU senzora. Na obrázku 3.20, je dlhodobější záznam z testovania.



Obr. 3.20: Meranie v teréne reálnych dát

Na obrázku 3.21 je priblížený prvý prešmyk kola z obrázku 3.20. Od 8. sekundy je zaznamenané prudké zrýchlenie kola až do prešmyku. Ten nastal približne v 9.25 sekunde. Tam je vidieť, že výsledná fúzovaná rýchlosť prestala brať v úvahu rýchlosť kola a ukazovala výsledok merania z IMU jednotky. Obrázok 3.21 na osi X zobrazuje čas od zapnutia merania.



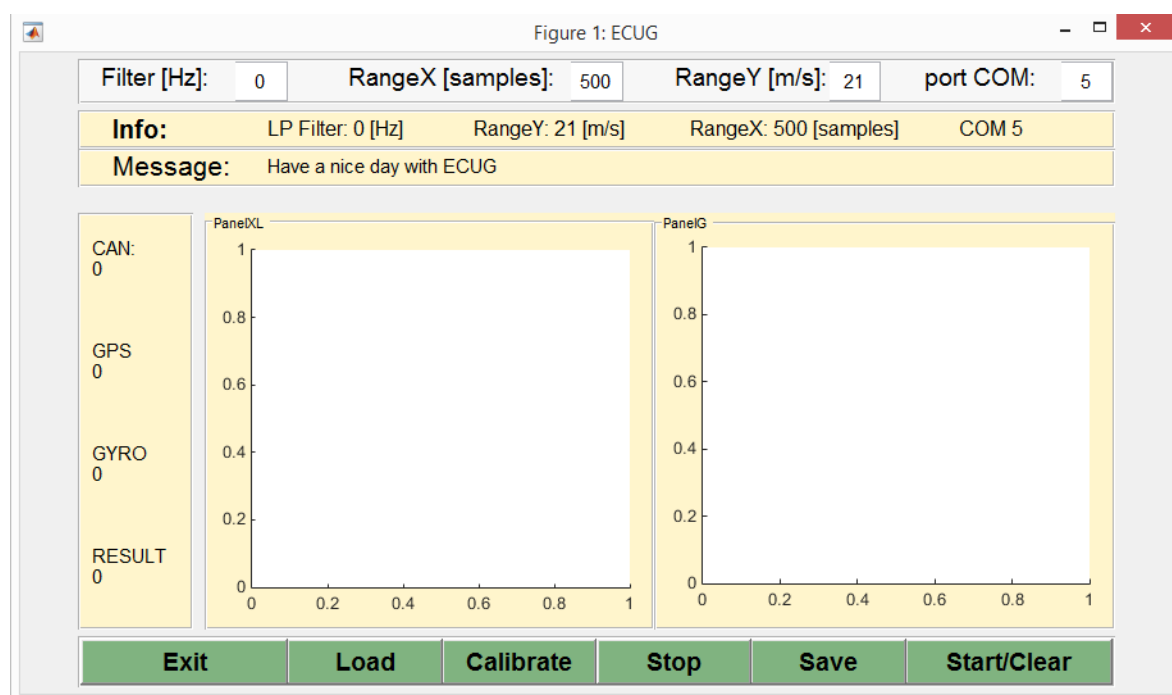
Obr. 3.21: Detailnejší pohľad na obrázok 3.20

IMU zariadenie dokáže krátkodobo poskytnúť pomerne presný údaj o aktuálnej rýchlosti vozidla. Pri dlhšom meraní na nepriaznivom povrchu, na ktorom formuľa jazdiť na závodoch nebude, sa chyba

merania časom zvýšila. Na obrázku 3.20 v čase 19 s je vidieť, že výsledná rýchlosť začala brať v úvahu IMU senzor a ten akoby začínal spomaľovať. Rovnako sa to prejavilo aj pri spomalení v 25 s, kde výsledná rýchlosť na základe IMU dát začala spomaľovať oveľa pomalšie ako bola skutočná rýchlosť. Kolesá v posledných dvoch spomínaných prípadoch neprešmykovali, takže ukazovali v našom prípade skutočnú rýchlosť pre naše účely.

3.4 Grafická aplikácia pre prácu a zber dát

K doske ECUG je vytvorená grafická aplikácia pre zber, nastavenie, ukladanie dát a vyobrazovanie dát v reálnom čase. Táto aplikácia je napísaná v jazyku Matlab. Tento jazyk som zvolil preto, lebo sa zdal ako najlepšia varianta pre neskoršie spracovávanie nameraných dát. Na obrázku 3.22 je ukážka užívateľského rozhrania.



Obr. 3.22: Užívateľské rozhranie programu k ECUG

V hornom panele zľava je možné nastaviť dolno-priepustný filter akcelerometra. Druhá kolónka zľava, nastavuje počet vyobrazených vzoriek v grafe. Tretia kolónka zľava je rozsah Y osi grafu, vyobrazovanej rýchlosti v $m \cdot s^{-1}$. Posledná kolónka nastavuje COM port, v ktorom je zapojená jednotka ECUG.

Druhý panel zhora je informačný panel. Vyobrazujú sa tam nastavené dáta, s ktorými sa aktuálne počíta.

Tretí panel zhora vyobrazuje správy pre užívateľa. Napríklad o zlom výbere portu, nenadviazanej komunikácii, zastavení programu a podobne.

Štvrtá úroveň panelov je rozdelená na pravý a ľavý panel. Ľavý panel ukazuje rýchlosti kolies, GPS, rýchlosť vypočítanú z IMU a výslednú fúzanú rýchlosť v číselnej forme. Pravý panel obsahuje dva grafy. V ľavom grafe sú vyobrazované jednotlivé osi akcelerometra a gyroskopu, takzvané surové dáta. Tieto dáta pri testovaní pomáhajú rýchlejšie odhaliť nedostatky programu alebo nečakané deje. V pravom

sú vyobrazené rýchlosti GPS, kolies, rýchlosť IMU a výsledná fúzovaná rýchlosť.

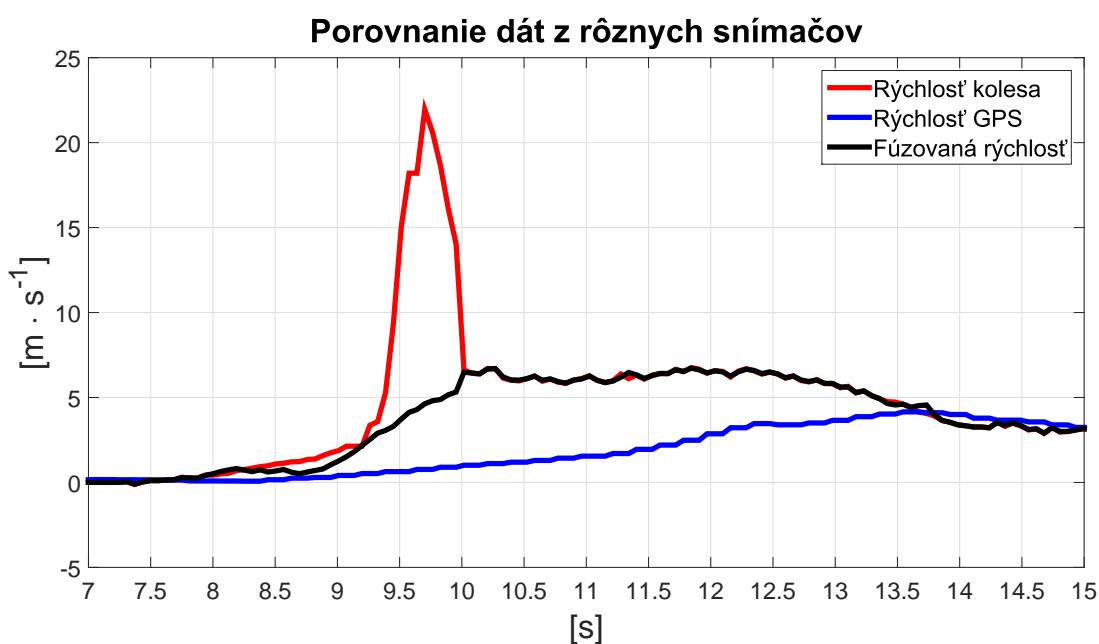
Na ploche panela, úplne na spodku okna, sú tlačítka pre ovládanie. Zľava je tlačítko na korektné vypnutie aplikácie. Ďalšie tlačítko je na pripojenie aplikácie k zvolenému COM portu. Nasleduje kalibrácia jednotky ECUG, zastavenie zasielania dát jednotkou ECUG, uloženie poslaných dát aplikáciou pre neskoršie spracovanie, spustenie posielania dát ECUG na zbernicu a zároveň vyčistenie grafov od predošlých vyobrazení.

3.4.1 Real-time vyobrazovanie dát

Veľmi dôležité, pre testovanie a návrh algoritmov zariadenia, je vyobrazovanie nameraných dát v reálnom čase. Ako fyzické zariadenie pre zber dát, bol použitý notebook ASUS X550VB. Nakoľko použitý notebook je pre naše účely veľmi výkonný, používaný non-realtime operačný systém mu nedovoľoval v reálnom čase spracovať také množstvo dát, ktoré dokáže poskytnúť ECUG. Sme obmedzený rýchlosťou zbernej aplikácie. Preto kód ECUG je navrhnutý tak, aby čo najrýchlejšie spracoval dáta a každých 40 *ms* odoslal balík správ, ktoré zberná aplikácia prijíma. Ak táto podmienka nieje dodržaná, aplikácia si zhromažďuje správy vo vstupnom buffery pre neskoršie spracovanie. Týmto stratíme schopnosť aplikácie vyobrazovať prijaté hodnoty v reálnom čase. Pre datalogging to vplyv nemá. Všetky nespracované dáta sa zachytia v buffery a po ukončení odosielania sa určitú dobu spracovávajú. Ak zberné zariadenie(notebook) sa vypojí z napájania, zníži sa mu výkon. Vtedy je potrebné, pre zachovanie realtime vyobrazovania grafov a dát, zvýšiť hodnotu periódy odosielania ECUG na 80 *ms* až 90 *ms*.

4 Zhodnotenie výsledkov

Bola zrealizovaná analýza hardvérových a firmvérových požiadavok ECUG. Vybrané komponenty, okrem GPS prijímača, splňali požadované minimálne parametre. GPS prijímač Quectel L76 disponuje parametrami, ktoré samotné nedostačujú pre požiadavky kontroly trakcie, ale spolu s fúziou s IMU jednotkou by mohol výrazne zlepšiť presnosť merania, ak by chyba rýchlosti, garantovaná výrobcom, bola aj v našom prípade dodržaná. V takom prípade by tento prijímač bol použiteľný pre naše účely. Výsledná rýchlosť GPS prijímača bola oneskorená a v dôsledku toho, sa v niektorých prípadoch líšila až o $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a viac. Takisto niekedy sme zaznamenávali aj hrubé chyby, kedy GPS prijímač meral rýchlosť $18000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V tomto prípade by stálo za zváženie skúsiť GPS od iného výrobcu a s lepšími parametrami.



Obr. 4.1: Priblíženie výsledkov merania pri prešmyku

Výsledné meranie rýchlosti, jednotkou ECUG, je krátkodobo postačujúce pre účely kontroly trakcie. Na obrázku 3.20 bolo meranie prevedené za zhoršených podmienkach, z dôvodu obmedzeného časového prístupu k monopolu FSE.04x. Je vidieť, že krátkodobo ECUG jednotka má potenciál poskytovať postačujúce dáta pre kontrolu trakcie viz. obr. 4.1. Nakoľko vibrácie dokážu dlhodobo razantne zhoršiť výsledky merania, tu vidím priestor pre zlepšenie nastavení konštánt komplementárneho filtra k_1 a k_2 viz. vzorec 3.7, prípadne návrhu iných riešení pri filtrácii nežiadúcich efektov jazdy po hrbolatej vozovke. ECUG je zrealizovaná a navrhnutá, aby poskytovala dostatočné množstvo dát pre rýchlejší vývoj.

5 Záver

Cieľom práce bolo vyvinúť meracie zariadenie rýchlosti, ktoré by bolo schopné poskytnúť referenčný údaj kontrole trakcie. Podľa zadania zariadenie obsahuje GPS prijímač, akcelerometer, CAN rozhranie 2.0, USB rozhranie. Ďalej je naprogramovaný softvér, pre vyhodnotenie rýchlosti a bola vytvorená užívateľská grafická aplikácia.

V úvode boli rozobrané požiadavky pre hardvérovú a firmvérovú výbavu meracieho zariadenia. Na základe ktorých sa vybrali komponenty pre fyzický návrh zariadenia. Zrealizovaný plošný spoj sa osadil vybranými súčiastkami, vyvíjal a testoval na vozidle tímu eForce FSE.04x. K zariadeniu bol navrhnutý softvér, v jazyku C, pre vyhodnotenie rýchlosti a posielanie nameraných dát do osobného počítača, pre ktorý bolo vytvorené užívateľské rozhranie pre prácu, nastavenie zariadenia a zber dát, v jazyku Matlab. Boli zrealizované merania a porovnanie dát z rôznych senzorov rýchlosti.

Výsledky ukázali, že takto meraná rýchlosť má v budúcnosti potenciál poskytnúť, postačujúci údaj o rýchlosti pre kontrolu trakcie. Pre dlhodobé použitie si táto aplikácia vyžaduje viac času stráveného nad testovaním, ladením konštánt a návrhu korekcie chyby spôsobenej vibráciami pri jazde na hrbol'atej vozovke.

Prácu na tomto zariadení nehodlám ukončiť odovzdaním bakalárskej práce, ale pokračovať vo vývoji meracieho zariadenia a v konečnom dôsledku poskytnúť dostatočne presné výstupy pre zlepšovanie trakcie monopostu.



Literatúra

- [1] ARM®. *Q-format* [online]. 2001. [cit. 21.3.2016]. Dostupné z: <http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.dui0066d/CHDFAAEI.html>.
- [2] BEDNAŘÍK, M. *Fyzika 1. Česká technika - nakladatelství ČVUT*, 2011. ISBN 978-80-01-04834-4.
- [3] MAELE, P.-J. V. *Reading a IMU Without Kalman: The Complementary Filter* [online]. 2014. [cit. 9.1.2016]. Dostupné z: http://www.academia.edu/6261055/Complementary_Filter_Design_for_Angle_Estimation_using_MEMS_Accelerometer_and_Gyroscope.
- [4] eForce FEE Prague Formula (CTU in Prague). *Simulácia a databáza FSE.05x 2016*. Ústným podaním, dáta, 2016.
- [5] Formula Student Germany. *FSE15 Overall Scoring Results*, 2015. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fse/2015/results/>.
- [6] FSAE.COM. *FSAE - Average 100-0 kph braking performance* [online]. 2009. [cit. 2.11.2015]. Dostupné z: <http://www.fsae.com/forums/showthread.php?894-Average-100-0-kph-braking-performance>.
- [7] FTDI Chip. *FT230X (USB to BASIC UART IC)*, 2011. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT230X.pdf.
- [8] HONDATA. *Traction Control* [online]. 2009. [cit. 16.11.2015]. Dostupné z: <https://www.hondadata.com/help/tractioncontrol/wheelslip.gif>.
- [9] Kistler Holding AG. *Correvit L-350 Aqua Non-Contact Optical Sensors*, 2010. Dostupné z: http://datrontechnology.co.uk/files/CL350A_000-808e.pdf.
- [10] LI, S. – KAWABE, T. Slip Suppression of Electric Vehicles Using Sliding Mode Control Method. 2013, 4, 3, s. 328–329. doi: 10.4236/ica.2013.43038. Dostupné z: http://file.scirp.org/pdf/ICA_2013080911130020.pdf.
- [11] LUFINKA, A. *VLASTNOSTI KOMPONENTŮ MĚŘICÍHO ŘETĚZCE - ČÍSLICOVÁ ČÁST* [online]. 2012. [cit. 19.10.2015]. Dostupné z: http://www.kst.tul.cz/podklady/experimentalnimetody/prednasky/p6_vlastnosti_komponentu_2.pdf.

- [12] NXP Freescale Semiconductor. *High-Precision Calibration of a Three-Axis Accelerometer*, 2015. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4399.pdf.
- [13] QUECTEL. *L76 Series, Protocol Specification GNSS module*, 2014. Dostupné z: http://quectel.com/UploadImage/Downlad/Quectel_L76_Series_Protocol_Specification_V2.0.pdf.
- [14] QUECTEL. *L76 Series, Hardware Design*, 2014. Dostupné z: http://quectel.com/UploadImage/Downlad/Quectel_L76_Series_Hardware_Design_V3.0.pdf.
- [15] SAE International. *2015 Formula SAE Rules*, 2015. Dostupné z: students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf.
- [16] ST Microelectronics. *LSM6DS3 iNemo inertial module*, 2015. Dostupné z: <http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/a3/f5/4f/ae/8e/44/41/d7/DM00133076.pdf/files/DM00133076.pdf/jcr:content/translations/en.DM00133076.pdf>.
- [17] ST Microelectronics. *STM32F407xx*, 2016. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/ef/92/76/6d/bb/c2/4f/f7/DM00037051.pdf/files/DM00037051.pdf/jcr:content/translations/en.DM00037051.pdf>.
- [18] Technica F1 directory. *Motions of an Formula 1 car* [online]. 2014. [cit. 12. 11. 2015]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/Images/motion_yaw_pitch_roll.jpg.
- [19] VBOX Automotive. *Speed Sensor Range RaceLogic*, 2015. Dostupné z: http://www.racelogic.co.uk/_downloads/vbox/Datasheets/Speed_Sensors/RLVBSS_DATA.pdf.
- [20] ZÁHLAVA, V. *Návrh a konstrukce DPS - Principy a pravidla praktického návrhu*. 1. 2011. ISBN 978-80-7300-2.

A Prílohy

A.1 CD obsah

```
./
├── Program
│   ├── C program
│   │   ├── cmsis
│   │   ├── cmsis_boot
│   │   ├── cmsis_lib
│   │   ├── ECUG_c
│   │   │   ├── ECUG_CAN.c
│   │   │   ├── ECUG_GPS.c
│   │   │   ├── ECUG_SPI.c
│   │   │   └── ECUG_USART.c
│   │   ├── ECUG_h
│   │   │   ├── ECUG_CAN.h
│   │   │   ├── ECUG_GPS.h
│   │   │   ├── ECUG_SPI.h
│   │   │   └── ECUG_USART.h
│   │   ├── ECUG_BlinkLED
│   │   ├── Sensor_Reader
│   │   ├── stdio
│   │   ├── syscalls
│   │   ├── main.c
│   │   └── ECUG_BlinkLED.coproj
│   ├── Matlab program
│   │   └── ECUG_GUI.m
│   └── BP_Hostačný.pdf
```