České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení modelu automobilu na autodráze

Praha, 2010 Autor: Ondřej Penc

Prohlášení

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

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb. , o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne _____ _____

podpis

Poděkování

Děkuji především vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Huškovi, Ph.D., za odborný dohled, Ing. Milanu Brejlovi, Ph.D. a společnosti Freescale Semiconductor, za poskytnutí základního software, hardware a ochotu pořádat soutěž Freescale Race Challenge 2010, dále Ing. Vítu Hlinovskému, CSc., za organizaci soutěže na ČVUT v Praze a konečně i své rodině a kamarádům za podporu a inspiraci.

Abstrakt

Tato práce popisuje postup vývoje samořídicího modelu automobilu jezdícího po neznámé dráze, od analýzy dílů autodráhy přes sestavení elektronické části až po její naprogramování a odzkoušení. Model automobilu demonstruje funkčnost použitých komponent, zejména senzorů, ovládacích prvků a funkčních modulů mikrokontroléru MCF51JM64. Analýza dráhy vedla k návrhu senzorů, napájení elektroniky vozidla a ke zjednodušení mapování autodráhy. Pro řízení motoru byl použit h-můstek MC33931, který pracuje ve čtyřkvadrantovém režimu. Signál senzoru zrychlení MMA7361L byl filtrován a museli být řešeny problémy způsobené zpožděním signálu. Akcelerometr se osvědčil při měření odstředivého zrychlení během mapování autodráhy, měřená data odpovídala skutečnosti. V aplikaci byla využita SD karta jako úložiště dat sbíraných během jízdy po autodráze a USB rozhraní sloužící ke spojení stolního počítače s mikrokontrolérem. USB rozhraní umožňuje naprogramování mikrokontroléru pomocí funkce zvané Bootloader místo standardně používaného rozhraní BDM.

Klíčová slova: model automobilu, mapování, akcelerometr, mikrokontrolér, programování

Abstract

This work describes the development of a selfdriven slotcar riding on a circuit, from analysis of track pannels, through assembling of an electronic part to programming and testing. The slotcar demonstrates function of used components especially sensors, driving elements and function modules of microcontroller MCF51JM64. The analysis of track pannels was used for a design of sensors, power supply and for simplification of mapping of the circuit. An h-bridge MC33931, which works in four-quadrant mode was chosen as a driving element to a motor. A signal of an accelerometer was filtered and problems with delaying had to be solved. The accelerometer was good for measuring centrifugal acceleration through mapping and measured data agreed with the premises. In this aplication an SD card was used as a storage device for collected data from race and also USB tranceiver which enabling connection of microcontroller and standard computer. USB interface is used for programming of the microcontroller by the function called Bootloader instead of standard BDM iterface.

Keywords: slotcar, mapping, accelerometer, microcontroller, programming

vložit originální zadáníííííííííííííííí !!!!!

Obsah

Seznam obrázků **viii**

Seznam tabulek **x**

Seznam zkratek **xi**

1 Úvod **1**

2 Teoretický rozbor **2**

2.1 Popis situace 2

2.1.1 Konstrukce modelu automobilu 2

2.1.2 Popis dráhy 3

2.1.3 Analýza dráhy 3

2.2 Způsoby řešení 4

2.2.1 Identifikace 4

2.2.2 Přímá regulace 6

2.2.3 Predikce tratě 8

3 Mapa a software **11**

3.1 Naměřené průběhy a hodnoty 11

3.1.1 Měření zatáček 11

3.1.2 Linearita motoru 14

3.1.3 Vnitřní a vnější zatáčka 15

3.1.4 Odstředivé zrychlení 15

3.2 Tvorba mapy a řízení vozidla 16

3.2.1 Zpracování mapy 16

3.2.2 Synchronizační body na dráze 21

3.2.3 Mapovací průjezd dráhou 21

3.2.4 Závod 24
3.3 Software 26
3.3.1 Program 26
3.3.2 SD karta 27

4 Elektronika **28**
4.1 Napájení a signalizace 28
4.1.1 Napájení z dráhy 28
4.1.2 Napájení motoru 29
4.1.3 Stabilizátor napětí na hodnotu 3,3 V 30
4.1.4 Záložní napájecí zdroj 31
4.1.5 Přední a zadní světla 32
4.2 Mikrokontrolér 32
4.2.1 Mikrokontrolér MCF51JM64 32
4.2.2 USB port 33
4.2.3 SD karta 34
4.3 Senzory 34
4.3.1 Senzor zrychlení MMA7361 35
4.3.2 Odometr a tachometr 36
4.3.3 Detektor startu 37
4.3.4 Snímač napětí na dráze 39

5 Závěr **40**

Literatura **43**

A Obrazová příloha **I**

B Obsah přiloženého CD **IV**

Seznam obrázků

1.1 Ukázka tvaru neznámé dráhy. 1

2.1 Konstrukce podvozku se zvýrazněným vodicím dílem. 2
2.2 Konstrukční prvky dráhy–Rovinky a Zatáčky. 3
2.3 Speciální konstrukční prvek Křížení. 4
2.4 Odezva systému na skok 1 V linearizovaného v pracovním bodě 6
2.5 Blokové schéma přímé regulace rychlosti systému. 7
2.6 Rozložení sil působících na pneumatiku modelu automobilu 8
2.7 Teoretický průběh rychlosti při průjezdu rovinkou 9

3.1 Ilustrace smyku ve vnitřní a vnější zatáčce 12
3.2 Grafická ukázka výpočtu poloměru zatáček 14
3.3 Statická převodní charakteristika modelu automobilu $u \rightarrow v$ 15
3.4 Signál z akcelerometru po průjezdu zatáčkami 17
3.5 Odezva rychlosti vozidla na velký skok napětí na motoru 18
3.6 Ukázka průjezdu modelu automobilu rovinkou 20
3.7 Blokové schéma regulátoru pro mapovací fázi 22
3.8 Průběh rychlosti při průjezdu zatáčkou s konstantním napětím na motoru 22
3.9 Průběh rychlosti při průjezdu zatáčkou s regulátorem 23
3.10 Ukázka identifikace zatáček při konstantní rychlosti během mapování . . 24
3.11 Ukázka identifikace zatáček a rychlosti během závodního kola 25
3.12 Vývojový diagram programu 26

4.1 Schéma zapojení napájení z dráhy. 29
4.2 Schéma zapojení h-můstku, který zajišťuje řízení motoru. 30
4.3 Schéma zapojení stabilizátoru napětí na 3,3 V. 31
4.4 Schéma zapojení záložní baterie. 31
4.5 Schéma zapojení svetel vozidla. 32

4.6 Schéma zapojení mikrokontroléru. 33
4.7 Schéma zapojení USB konektoru. 34
4.8 Schéma zapojení slotu pro SD kartu. 34
4.9 Schéma zapojení akcelerometru. 36
4.10 Rozeta odometru na předním kole 36
4.11 Schéma zapojení odometru a rychloměru. 37
4.12 Určení vzájemné polohy odrazových senzorů a jejich signál. 38
4.13 Schéma zapojení detektoru startu. 38
4.14 Schéma zapojení snímačů napětí na dráze. 39

A.1 Hlavní DPS zdola I
A.2 Hlavní DPS shora II
A.3 DPS odometru II
A.4 DPS detektoru startu II
A.5 DPS záložního zdroje napájení III

Seznam tabulek

3.1 Parametry panelů autodráhy tvořících zatáčky. 12
3.2 Porovnání skutečných parametrů zatáček se změřenými 13

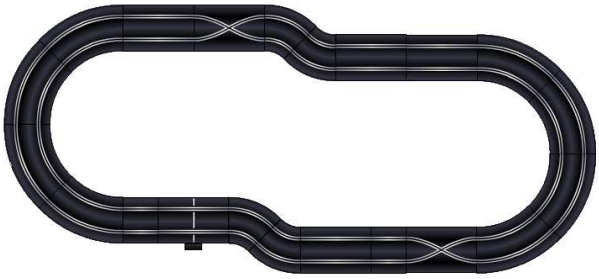
Seznam zkratek

LED	Light Emitting Diode
PWM	Pulse Width Modulation
SPI	Serial Peripheral Interface
IR	Infrared
BDM	Background Debug Mode
SD	Secure Digital
ANSI	American National Standards Institute
FAT	File Allocation Table
USB	Universal Serial Bus
A/D	Analog to Digital
DPS	Deska plošných spojů

Kapitola 1

Úvod

Úkolem této bakalářské práce bylo postavit a naprogramovat samořídicí model automobilu. Samořídicí znamená, že uživatel nezasahuje do činnosti vozidla během jízdy nebo závodu, jediné co může ovlivnit před závodem, je poloha jediného vypínače. Model automobilu se pohybuje po neznámé dráze, tím je myšleno, že nezná tvar dráhy, ale zná stavební prvky z nichž je dráha sestavena, především nejmenší možný poloměr zatáčky na dráze a přibližnou délku dráhy. Dráha je napájena stejnosměrným zdrojem o napětí 14.8 V a maximálním proudu 350 mA. Vozidlo je napájeno z kolejnic dráhy, z externího zdroje, podobně jako vlak nebo trolejbus. Jelikož se vodicí díl modelu automobilu pohybuje v drážce dráhy, jediná veličina, která může být regulována je rychlost, zde může být také viděna podobnost s vlakem.



Obrázek 1.1: Ukázka tvaru neznámé dráhy.

Model automobilu by měl být schopen projet deset kol neznámé dráhy za co nejkratší čas. Celkový čas se počítá jako součet časů projetí jednotlivých kol a začne se počítat po prvním průjezdu startem. Pokud model vypadne, je možné ho na dráhu opět nasadit a to před místo vypadnutí, čas v tomto případě běží.

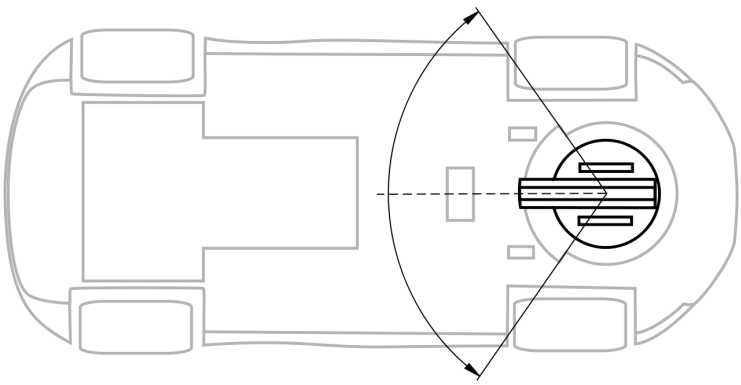
Kapitola 2

Teoretický rozbor

2.1 Popis situace

2.1.1 Konstrukce modelu automobilu

Na modelu automobilu je velmi důležitá konstrukce podvozku a vodicího dílu, tvořícího spojení s drahou. Tuto konstrukci nejlépe popisuje obrázek 2.1, na němž je znázorněno umístění vodicího dílu do přední části, mezi kola. Spojení tohoto dílu a podvozku představuje otočný kloub, umožňující pohyb dílu v rovině dráhy. Tímto kloubem podobnost s vlakem končí, jelikož vozidlo může, oproti vlaku, dostat smyk zadních kol. K možnému smyku zadních kol může přispět také skutečnost, že je na nich umístěn pohon, reprezentovaný stejnosměrným elektromotorem.



Obrázek 2.1: Konstrukce podvozku se zvýrazněným vodicím dílem.

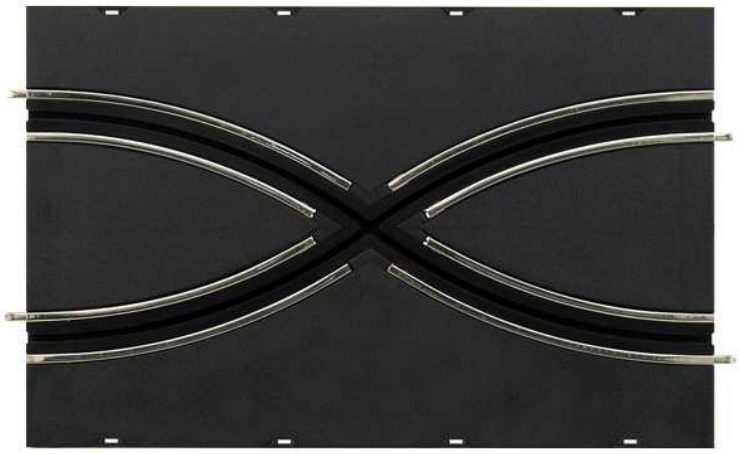
2.1.2 Popis dráhy

Dráha má vždy tvaru okruhu. Na okruhu jsou dvě drážky, levá a pravá, do kterých může být vozidlo vloženo. Dráha se skládá z rovinek, různé délky a ze zatáček dvou různých poloměrů. Ukázku použitých částí dráhy zobrazuje obrázek 2.2 (FARO, 2007), zejména jsou zde vidět čtyři poloměry, jejichž označení od nejmenšího 1 k největšímu 4 bude použito i dále. Tyto konstrukční prvky se dají kombinovat jakýmkoliv způsobem, tedy i tak, že zatáčka je nejdříve mírná, a posléze se utahuje. Dále existuje speciální stavební díl autodráhy, který se nazývá Křížení, na obrázku 2.3, jež umožňuje přejezd z levé drážky do pravé a naopak. Toto Křížení se na dráze objevuje vždy dvakrát, takže je zachována nezávislost dvou různých tratí na dráze.

Obrázek 2.2: Konstrukční prvky dráhy–Rovinky a Zatáčky.

2.1.3 Analýza dráhy

Dráha obsahuje několik význačných bodů. Start, a zároveň i cíl, označen bílou čarou kolmou na směr jízdy vozidla. S ohledem na skutečnost, že zbytek dráhy je černý, existuje možnost její detekce. Dále se na okruhu vyskytují Křížení obr. 2.3, která představují nepříjemnou změnu směru jízdy, zároveň však umožňují detekci pomocí poklesu napětí, který vyplývá z její konstrukce. Pro čtyři druhy rádiusů zatáček obr. 2.2 bude potřeba určit maximální průjezdové rychlosti a také maximální rychlost pro Křížení. Kolejnice vyrobeny z lesklého kovu dobře odráží světlo. Povrch dráhy je přilnavý.



Obrázek 2.3: Speciální konstrukční prvek Křížení.

2.2 Způsoby řešení

Pro návrh účinného řešení problému je nutností identifikace systému. Touto identifikací získáme potřebné informace o jeho chování. Hlavně o jeho rychlosti a možnostech regulace.

2.2.1 Identifikace

Model automobilu pohání stejnosměrný motor s cizím buzením napájený napěťovým zdrojem. Tvar rovnic po odvození podle (Voženílek, P. a Janoušek, J., 2005) vychází ve tvaru

$$L\frac{di(t)}{dt} = -Ri(t) - k_e\omega(t) + u(t), \tag{2.1}$$

$$J\frac{d\omega(t)}{dt} = k_m i(t) - b\omega(t) - m_z(t), \tag{2.2}$$

kde u [V] je vstupní napětí, m_z [N m] je vnější zatěžovací moment, i [A] je proud motoru, ω [s^{-1}] je úhlová rychlost hřídele motoru, φ [rad] je úhel natočení hřídele, R [Ω] je odpor vinutí kotvy motoru, L [H] je indukčnost vinutí kotvy motoru, J [$\mathrm{kg\,m^2}$] je moment setrvačnosti kotvy, b [$\mathrm{kg\,m^2\,s^{-1}}$] je konstanta tření motoru, k_e [$\mathrm{s\,V^{-1}}$] je elektrická konstanta motoru a k_m [$\mathrm{kg\,m\,s^{-2}\,A^{-1}}$] je mechanická konstanta motoru. Dále v systému bude hrát

roli setrvačnost modelu automobilu. Setrvačná síla se uvažuje v podobě

$$F = \frac{dp(t)}{dt}\,, \tag{2.3}$$

přičemž p je hybnost ve tvaru

$$p(t) = mv(t), \tag{2.4}$$

kde m [kg] představuje hmotnost modelu automobilu a v [$\mathrm{m\,s^{-1}}$] rychlost modelu automobilu. Tyto rovnice dohromady dají vztah

$$F = m\frac{dv(t)}{dt}\,. \tag{2.5}$$

Síla bude vstupovat do soustavy v podobě zatěžovacího momentu m_z

$$m_z = mr\frac{dv(t)}{dt}\,, \tag{2.6}$$

takže rovnice pro výsledný systém se upraví, s pomocí vztahu mezi rychlostí v a úhlovou rychlostí ω

$$v(t) = r\omega(t), \tag{2.7}$$

kde r [m] je poloměr kola modelu automobilu, na konečný tvar

$$L\frac{di(t)}{dt} = -Ri(t) - \frac{k_e}{r}\,v(t) + u(t), \tag{2.8}$$

$$(J + mr^2)\frac{dv(t)}{dt} = rk_m i(t) - bv(t). \tag{2.9}$$

Přenos systému ze vstupu $u(t)$ na výstup $v(t)$ se vyjádří pomocí Laplaceovy transformace jako podíl Laplaceova obrazu pro výstup $Y(s)$ a Laplaceova obrazu pro vstup $U(s)$ jako

$$P(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k_m r}{L(J + mr^2)s^2 + (R(J + mr^2) + bL)s + bR + k_m k_e} \tag{2.10}$$

Z přenosu se nechají vyčíst následující informace:

- systém 2. řádu,
- póly systému budou od sebe vzdálené z důvodu menší mechanické konstanty,
- systém nemá nuly,
- je bez astatismu,
- bez dopravnního zpoždění.

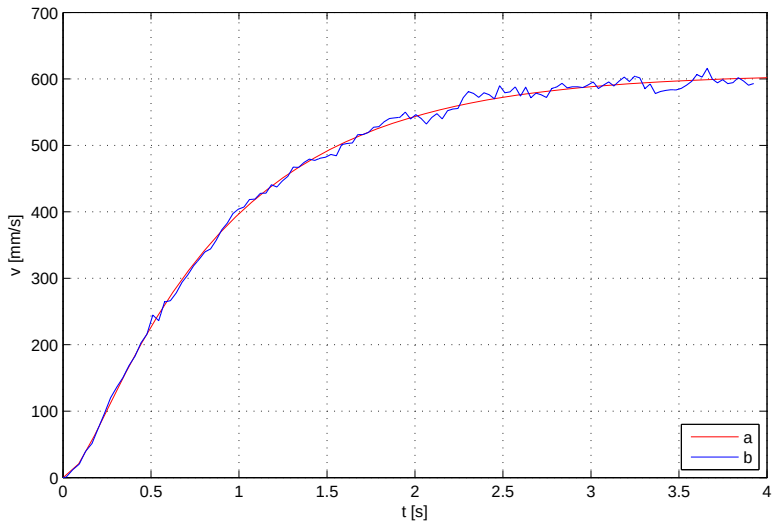
Experimentálně byla zjištěna bezpečná průjezdová rychlost drahou na 1000 $\mathrm{mm\,s^{-1}}$, která byla zvolena za pracovní bod pro identifikaci systému. Z pracovního bodu byla naměřena odezva na skok asi 25 %. Tato přechodová charakteristika byla nanormována na skok o velikosti 1 V a aproximována matematickým programem Matlab (The MathWorks, Inc., 2010) pomocí nástroje System Identification Tool, který využívá Gauss-Newtonovu metodu hledání extrémů více proměnných, podle předpokladu tvaru systému

$$P(s) = \frac{K}{(1 + T_{p1}s)(1 + T_{p2}s)}\,, \tag{2.11}$$

který vyplývá z rovnice (2.10). Výsledný systém po aproximaci má tvar

$$P(s) = \frac{607,8}{(1 + 0,101s)(1 + 0,842s)} = \frac{607,8}{0,085s^2 + 0,943s + 1}\,. \tag{2.12}$$

Grafický výsledek aproximace je na následujícím obrázku.

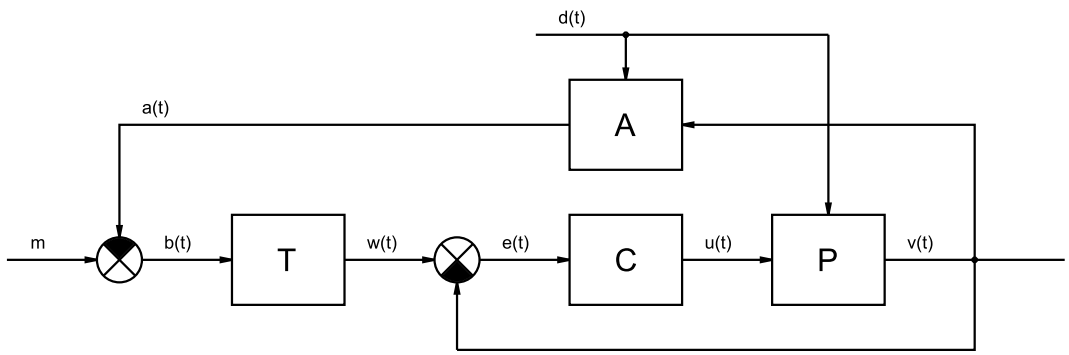


Obrázek 2.4: Odezva systému na skok 1 V linearizovaného v pracovním bodě(a), porovnaná s naměřenými daty(b).

2.2.2 Přímá regulace

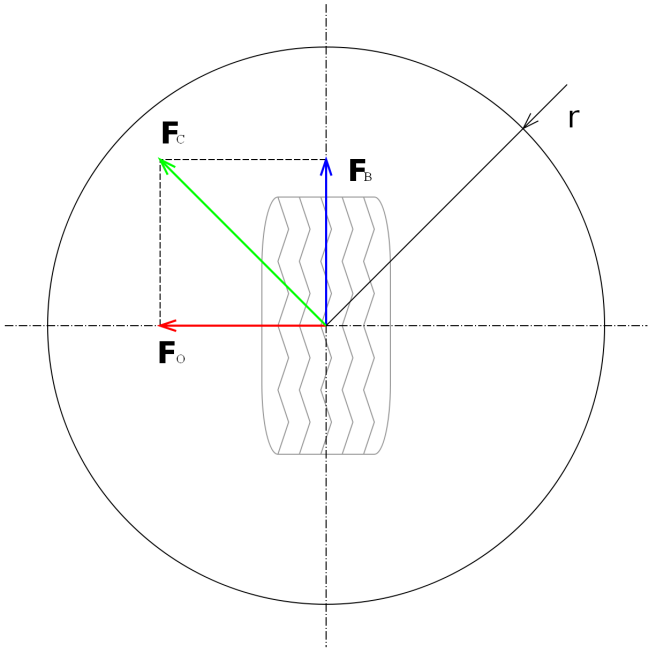
Přímou regulací je podle obrázku 2.5 myšlen regulovaný systém P, model automobilu do kterého vstupuje chyba v podobě poloměru zatáčky $d(t)$, a regulátor C s výstupem rychlosti $y(t)$ ve zpětné vazbě. Požadovaná veličina $w(t)$ je vypočítána podle funkce, nebo vybrána z tabulky T, jejíž vstup je rozdíl naměřené hodnoty odstředivého zrychlení

$a(t)$ a maximálního odstředivého zrychlení pro nejmenší rádius zatáčky m při nejvyšší bezpečné průjezdové rychlosti touto zatáčkou. Akcelerometr A, měří odstředivé zrychlení v závislosti na rychlosti $y(t)$ a poloměru zatáčky $d(t)$. Zde vyvstává úskalí tohoto způsobu regulace, jen velmi těžko jde správně zjistit převodní funkci v bloku T. Dále tento způsob regulace nemůže dostatečně splnit podmínku minimalizace závodního času z důvodu malé rychlosti odezvy systému na změnu požadované veličiny, blok T nesmí generovat příliš velké skoky požadované veličiny. Jinými slovy si model automobilu nemůže dovolit jet maximální rychlostí po rovince, protože nemá informaci o tom, kdy přijde další zatáčka a jaký bude mít poloměr. Pokud má model automobilu stihnout zpomalit až v zatáčce, kde se teprve projeví odstředivé zrychlení na které bude regulátor reagovat, musí se pohybovat rychlostí, ze které je možno zpomalit a nepřekročit síly působící na pneumatiku v horizontální rovině pro udržení přilnavosti.



Obrázek 2.5: Blokové schéma přímé regulace rychlosti systému.

Rozložení sil působících na pneumatiku je zjednodušeně zobrazeno na obrázku 2.6. Ve směru jízdy působí na pneumatiku hnací, nebo brzdná síla($\mathbf{F_B}$), zatímco v příčném směru působí odstředivá síla($\mathbf{F_O}$). Pro zachování přilnavosti nesmí velikost výslednice sil($\mathbf{F_C}$) překročit kružnici o poloměru r se středem ve styčném bodu pneumatiky s povrchem. Tato kružnice se nazývá Kammova kružnice přilnavosti, po automobilovém designéru a mechanikovi Wunibaldu Kammovi, a velikost jejího poloměru odpovídá přilnavosti povrchu.



Obrázek 2.6: Rozložení sil působících na pneumatiku modelu automobil s vyznačenou Kammovou kružnicí o poloměru r, pohled shora.

Jak vyplývá z obrázku 2.6 regulátor nebude moci uplatnit zásah v plném rozsahu, protože odstředivá síla v okamžiku zásahu už bude mít nenulovou velikost, což způsobí další přiblížení výslednice sil k hraniční Kammově kružci. Podle výše uvedených skutečností je přímá regulace bez znalosti budoucího průběhu dráhy neefektivní. Jiný způsob řízení modelu automobilu po dráze vychází z myšlenky prvotního zmapování tratě.

2.2.3 Predikce tratě

Predikce tratě v tomto případě, bez kamery, není možná jinak než podle mapy. Pokud bude obětováno první závodní kolo pro zmapování tratě, bude možno v dalších kolech jet efektivněji.

Ke správnému sestavení mapy bude potřeba získat informace o vývoji poloměrů zatáček tratě v závislosti na poloze $r(x)$, přičemž nulová poloha na trati odpovídá startovní čáře. S výhodou lze využít informace, že se na dráze objevuje pouze 5 různých poloměrů, 4 poloměry zatáček a jeden poloměr u Křížení, což si lze představit jako dis-

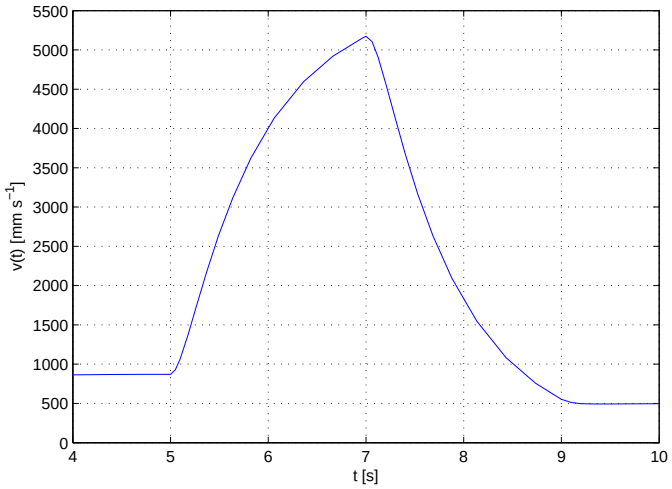
kretizaci funkce $r(x)$.

Další užitečná informace, kterou lze využít vychází z obr. 2.2, kde jsou poloměry zatáček označeny čísly od nejmenšího po největší a říká, že jednotlivé zatáčky, doleva nebo doprava, mohou obsahovat pouze dva různé druhy poloměrů, podle označení liché, nebo sudé. Jinými slovy nelze dráhu postavit tak, aby na ní byla funkční pouze jedna trať.

Průběh funkce $r(x)$ rozdělí trať na segmenty, na rovinky a levotočivé a pravotočivé zatáčky. Zdárné projetí rovinkou vyžaduje informace:

- o její délce,
- rychlosti na kterou musí na konci rovinky model automobilu zpomalit,
- funkci podle které vozidlo zrychluje nebo zpomaluje, přenos $u \to v$.

Rovinku je požadováno projet co nejvyšší rychlostí, průběh rychlosti by měl v ideálním případě vypadat jako na obrázku 2.7, ve kterém vozidlo zrychluje asi do půlky rovinky a pak začne zpomalovat. Okamžik kdy začne vozidlo zpomalovat určuje délka rovinky a funkce podle níž bude vozidlo zpomalovat na požadovanou rychlost.



Obrázek 2.7: Teoretický průběh rychlosti při průjezdu rovinkou, v čase 5 s vozidlo vyjelo na rovinku a zrychluje, v čase 7 s začíná zpomalovat a v čase 9 s již vjíždí do zatáčky s jinou průjezdovou rychlostí.

Pro průjezd zatáčkou je nutné znát:

- její délku,
- poloměr.

Průjezdovou rychlost zatáčkou lze získat experimentálně, nebo z rovnice pro odstředivou sílu

$$F_{o,max} = \frac{mv^2}{r}\,, \tag{2.13}$$

kde r je poloměr zatáčky, v rychlost vozidla a m jeho hmotnost. Pro zjištění $F_{o,max}$ by bylo potřeba znát součinitel klidového tření f_0 mezi pneumatikou a plastovým povrchem dráhy a dosadit jej do vztahu

$$F_{o,max} = f_0 F_n, \tag{2.14}$$

kde F_n je svislá síla působící na vozidlo, gravitační síla. V této práci byla zvolena experimentální metoda zjištění průjezdových rychlostí zatáčkami.

Po průjezdu tratě a získání potřebných informací bude snadné sestavit mapu a vozidlo podle ní řídit. Tomuto úkolu je věnována kapitola 3.

Kapitola 3

Mapa a software

V této kapitole jsou popsány algoritmy pro mapování dráhy, řízení modelu automobilu, jejich softwarová realizace a naměřené průběhy a hodnoty, ze kterých se vycházelo.

3.1 Naměřené průběhy a hodnoty

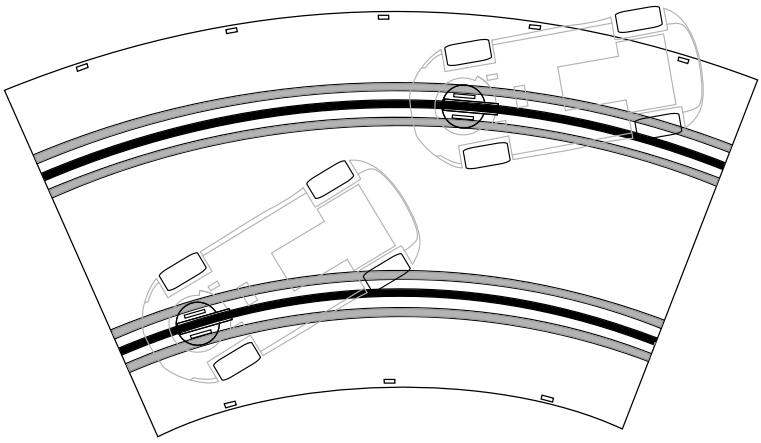
Naměřená data použitá v této práci byla zpracovávána pomocí již zmíněného programu Matlab. Byla vytvořena funkce pro vyčítání dat z SD karty a jejich zobrazení. Pomocí tohoto programu byla testována funkce některých algoritmů a zjištěn přenos modelu automobilu, který byl použit pro návrh regulátoru rychlosti pro mapovací fázi závodu.

3.1.1 Měření zatáček

Nejdříve bylo potřeba experimentálně zjistit maximální průjezdové rychlosti zatáček všech poloměrů. Byla sestavena dráha, na které se vyskytovaly pouze zatáčky zkoumaného poloměru a každým průjezdem startu byla zvyšována rychlost vozidla o $25\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$, až do jeho vypadnutí z dráhy. Takto byl získán sloupec „Rychlost“ v tabulce 3.1. Sloupec „Napětí“ byl získán stejným způsobem, pouze bylo při jízdě na dráze zvyšováno napětí na motoru místo rychlosti vozidla.

Ve vnitřních zatáčkách není smyk tak velkou hrozbou, vozidlu uklouzne zadní náprava do druhé tratě, zatímco ve vnějších zatáčkách zadní náprava uplně ztratí kontakt s plochou dráhy, obr. 3.1. Z tohoto důvodu byla u zatáčky 3 naměřena vyšší průjezdová rych-

lost než u zatáčky 4, přestože má menší poloměr.



Obrázek 3.1: Ilustrace smyku ve vnitřní a vnější zatáčce, vozidla mají natočený vodicí díl pod stejným úhlem.

Zatáčka	Poloměr cm	Délka cm	Úhel °	Rychlost $\mathrm{mm\,s^{-1}}$	Napětí V
1	15,5	12,1	45	1450	3.52
2	24,5	19,2	45	1500	3.63
3	33,5	26,3	45	1825	4.51
4	42,5	33,5	45	1750	4.29

Tabulka 3.1: Parametry panelů autodráhy tvořících zatáčky.

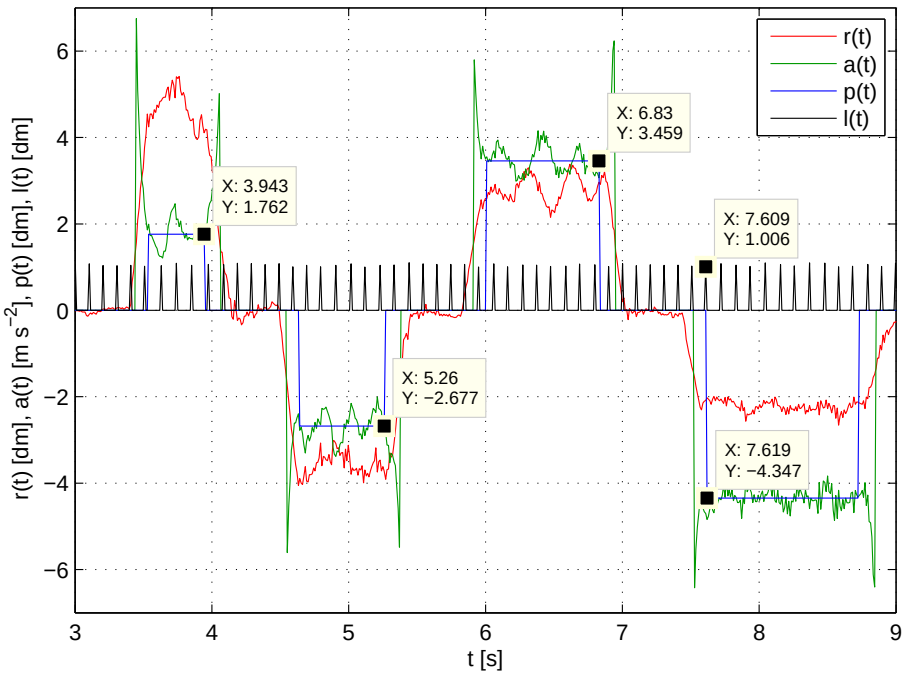
Druhý a třetí sloupec tabulky jsou naměřené parametry daných zatáček. Poloměr a délka byly měřeny klasickým způsobem. Hodnoty obou měření byly porovnány s teoretickým předpokladem na základě rovnice pro obvod a průměr kruhu a dobře odpovídají. Oba parametry zatáček lze porovnat s naměřenými hodnotami vozidlem na dráze. Na obrázku 3.2 je vidět průjezd vozidla postupně zatáčkami všech poloměrů, seřazenými od nejmenší po největší, tyto zatáčky jsou složeny ze 4 dílů, takže mění směr o 180 °. Z průběhu $a(t)$ získaného přenásobením dat z akcelerometru konstantou $\alpha = 0.01$ viz podkapitola 4.3.1, je s pomocí rychlosti $v(t)$ vypočten průběh $r(t)$ podle vzorce

$$r(t) = \frac{v(t)}{a(t)}\,, \tag{3.1}$$

pro který platí, že absolutní hodnota $a(t)$ musí být větší než $0{,}15\,\mathrm{m\,s^{-2}}$. Touto podmínkou je definována zatáčka a v softwarové realizaci se jí zamezí možnému dělení nulou. Na předělech mezi zatáčkou a rovinkou vznikají u průběhu $r(t)$ špičky v důsledku nízké hodnoty definující zatáčku. Vyřešení problému zvětšením této hodnoty není možné, hodnota musí splňovat účel pro všechny poloměry zatáček. Nechtěné špičky zkreslují výpočet poloměru zatáčky a byly odstraněny vynecháním prvních a posledních hodnot splňujících podmínku zatáčky. Použité oříznutí nemůže být nastaveno pevně, závisí na délce zatáčky a bylo experimentálně zjištěno vhodné oříznutí 10 % z každé strany. Výpočet průměrného poloměru zatáčky zobrazuje průběh $p(t)$. Ujetá vzdálenost je znázorněna černými čarami blízko osy x v grafu. Každá čára představuje ujetou vzdálenost v daném okamžiku od minulé čáry a může dosahovat hodnot 10–10,9 cm. Pro zjištění přibližné délky zatáček postačí představa tohoto průběhu jako měřítka s dílkováním, kde dílek představuje 10 cm. Porovnání změřených délek a poloměrů zatáček se skutečností ukazuje tabulka 3.2.

	Skutečné		Změřené	
Zatáčka	Poloměr cm	Délka dílu cm	Poloměr cm	Délka dílu cm
1	15,5	12,1	17,6	14
2	24,5	19,2	26,8	20
3	33,5	26,3	34,6	25
4	42,5	33,5	43,5	31

Tabulka 3.2: Porovnání skutečných parametrů zatáček s hodnotami změřenými modelem automobilu.

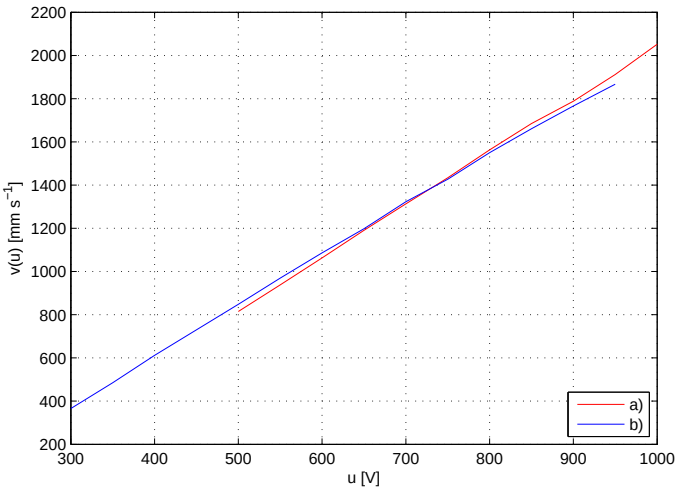


Obrázek 3.2: Grafická ukázka výpočtu poloměru zatáček.

Průjezdová rychlost Křížením byla změřena obdobným způsobem jako u zatáčky, vozidlo se dostalo do problémů po překročení rychlosti 1450 mm s^{-1}.

3.1.2 Linearita motoru

Pro zjištění jak se motor chová při různých napětích byla změřena statická převodní charakteristika motoru $u \rightarrow v$. Tato charakteristika byla měřena na okruhu, kde se každým projetím startu zvyšovala rychlost motoru vozidla, podobně jako při zjišťování průjezdových rychlostí zatáček. Zde však byla sledována rychlost vozidla na rovinkách při každém kole. Charakteristika zobrazena na obr. 3.3 ukazuje, že motor se v oblasti rychlostí, kterými se vozidlo v zatáčkách bude pohybovat chová lineárně. Okrajové hodnoty chrakteristiky nebylo možno tímto způsobem určit, ale linearita pro hodnoty které jsou zajímavé byla zjištěna.



Obrázek 3.3: Statická převodní charakteristika modelu automobilu $u \rightarrow v$ a) průběh při zvyšování napětí, b) průběh při snižování napětí.

3.1.3 Vnitřní a vnější zatáčka

Skutečnost zjištěná v podkapitole 2.2.3, že v levé trati budou všechny levotočivé zatáčky poloměrů 1, nebo 3 z tabulky 3.1 a pravotočivé zatáčky poloměrů 2, nebo 4, platící opačně pro pravou trať, vlastně znamená nutnost rozpoznávat zda se vozidlo nachází ve vnitřní či vnější zatáčce. Tuto informaci dostane vozidlo od uživatele prostřednictvím přepínače umístěného na podvozku modelu automobilu. Přejezd z jedné trati do druhé představuje stavební prvek dráhy s názvem Křížení.

Tímto mechanismem se velmi zjednoduší identifikace poloměru zatáčky. Zredukuje se počet potřebných prahových hodnot ze tří na dvě. Předchozí hledání čtyř různých poloměrů se změní na hledání dvou poloměrů a skutečnosti zda se vozidlo nachází ve vnitřní, nebo vnější zatáčce. Jedna prahová hodnota bude rozhodovat o poloměru vnitřních zatáček a druhá o poloměru vnějších zatáček.

3.1.4 Odstředivé zrychlení

Signál z akcelerometru bylo nutné fitrovat, byl zvolen filtr typu klouzavý průměr o délce $n = 128$. Řád tohoto filtru se nechá spočítat z jeho délky $M = n - 1$ a zpožďuje

signál o $M/2$ taktů podle (Hlaváč, V. a Sedláček, M., 2007). Toto zpoždění signálu způsobí posunutí vytvořené mapy.

Při korekci posunutí mapy bylo využito znalosti, že vozidlo projíždí mapovacím kolem rychlostí $v = 1000\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$, jeden takt filtrace trvá $t = 0,5\,\mathrm{ms}$ a vzdálenost mezi jednotlivými body mapy jsou $d = 16,3\,\mathrm{mm}$. S pomocí rovnice

$$\Delta l = \frac{vt(n-1)}{2d}\,, \tag{3.2}$$

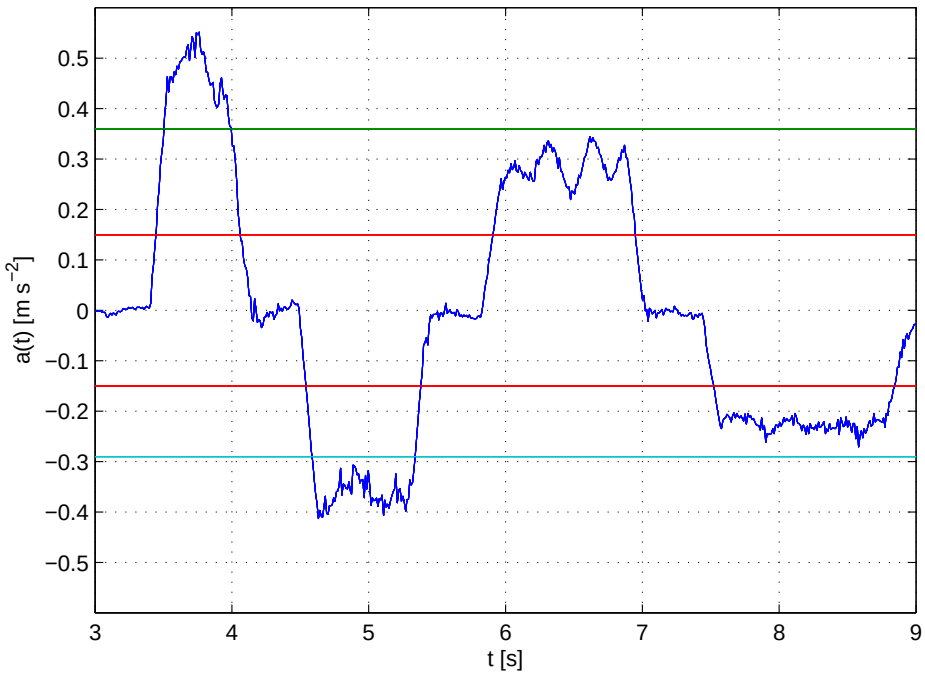
bylo spočítáno, že mapa bude posunuta přibližně o 2 dílky. Posunutí mapy je eliminováno vynecháním dvou hodnot po vjezdu do mapovacího kola a zpracováním prvních dvou hodnot z následujícího kola.

3.2 Tvorba mapy a řízení vozidla

Tato kapitola popisuje způsob jakým byla získána mapa závodní dráhy a jak je podle ní řízen model automobilu.

3.2.1 Zpracování mapy

Předzpracovaný signál z akcelerometru rozdělí v místech překročení prahových hodnot $\pm 0{,}15\,\mathrm{mm\,s^{-1}}$ dráhu na segmenty, levotočivé a pravotočivé zatáčky a rovinky. Rovinku definuje signál v oblasti kolem nuly, příslušnou zatáčku pak překročení kladné, nebo záporné prahové hodnoty. Obrázek 3.4 ilustruje zmíněné zjednodušení identifikace poloměru zatáčky na dvě prahové hodnotu z podkapitoly 3.1.3, prahová hodnota $0{,}36\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ znázorněná zelenou barvou pro vnitřní zatáčky 1, 3 a hodnota $0{,}29\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ znázorněná tyrkysovou barvou pro vnější zatáčky 2, 4 viz tabulka 3.1.



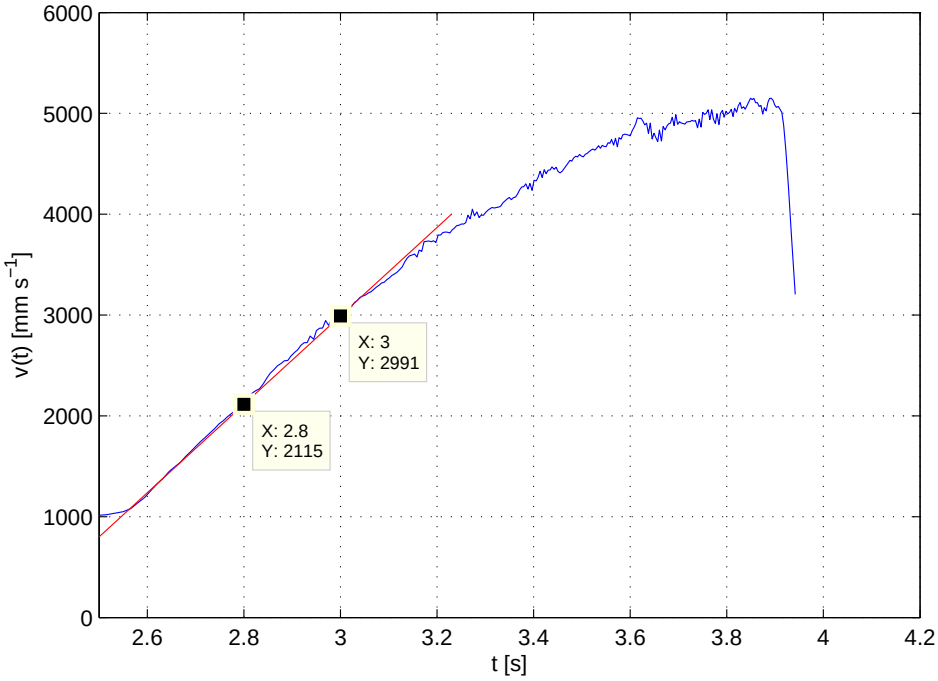
Obrázek 3.4: Signál z akcelerometru po průjezdu zatáčkami postupně od nejmenšího poloměru k největšímu.

Po změření a identifikaci zatáček je známo jakou rychlostí se jimi bude projíždět nebo jaké napětí bude na motoru při jejich průjezdu viz tabulka 3.2.

U rovinek musí být vypočteno jak bude vozidlo zrychlovat a zpomalovat, aby nevjelo do další zatáčky nebezpečnou rychlostí. Proto bylo nutné zjistit, jak se bude vozidlo chovat při zrychlování. Byla změřena přechodová charakteristika pro skok z nízké hodnoty napětí odpovídající asi 1000 mm s^{-1} na téměř maximální hodnotu. Pro toto měření byla sestavena speciální dráha dlouhého tvaru, nikoliv tvaru okruhu, zakončená měkkým polštářem pro bezpečné zbrždění vozidla. Změřená přechodová charakteristika obr. 3.5 je asi do hodnoty 4000 mm s^{-1} lineární a lze jí snadno aproximovat. Autodráha na které probíhala soutěž neobsahovala tak dlouhé rovinky, aby bylo nutné uvažovat vyšší rychlosti. Aproximace přechodové charakteristiky byla provedena přímkou, šlo použít i identifikovaného přenosu 2.12, ale výpočty by byly složitější. Aproximační přímka neprochází počátkem, protože motor je soustavou druhého řádu a přechodová charakteristika má

nenulovou dobu průtahu. Přímka bude mít tvar podle rovnice

$$\begin{aligned} v &= kt + q, \\ v &= 4380t - 211. \end{aligned} \tag{3.3}$$



Obrázek 3.5: Odezva rychlosti vozidla na skok napětí na motoru o velikosti 10 V z hodnoty 2 V, s vyznačenou přímkou pro aproximaci.

Obecný přímočarý pohyb vozidla po dráze se aproximací přímkou zjednoduší na pohyb rovnoměrně zrychlený, který podléhá rovnicím podle (Halliday, D. et al., 2000)

$$x_t - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2, \tag{3.4}$$

$$v_t = v_0 + at, \tag{3.5}$$

kde x_t a x_0 jsou polohy vozidla v čase t a $t = 0$, rychlosti v_t a v_0 jsou rychlost v čase t a $t = 0$ a a je zrychlení. Rovnice se nechají upravit na tvar vhodný pro výpočet rychlosti v závislosti na poloze dosazením t z druhé rovnice do první

$$v_t = \sqrt{2a\left(x_t - x_0\right) + v_0^2}. \tag{3.6}$$

Postup nalezení polohy na rovince, ve které začne vozidlo zpomalovat je založen na sestrojení dvou křivek a hledání jejich průsečíku. První křivka prochází bodem na začátku

rovinky $[x_1, v_1]$ a znamená zrychlování vozidla $a > 0$, druhá křivka prochází bodem na konci rovinky $[x_2, v_2]$ a představuje zpomalování vozidla $a < 0$. Hodnota průsečíku obou křivek na vodorovné ose je zlomový bod pro zpomalení. Porovnáním obou křivek vznikne rovnice určující polohu průsečíku

$$p = \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{4a} + \frac{l}{2}, \tag{3.7}$$

vstupní parametry rovnice jsou:

- v_1 vstupní rychlost do rovinky,
- v_2 výstupní rychlost z rovinky,
- l délka rovinky,
- a zrychlení vozidla.

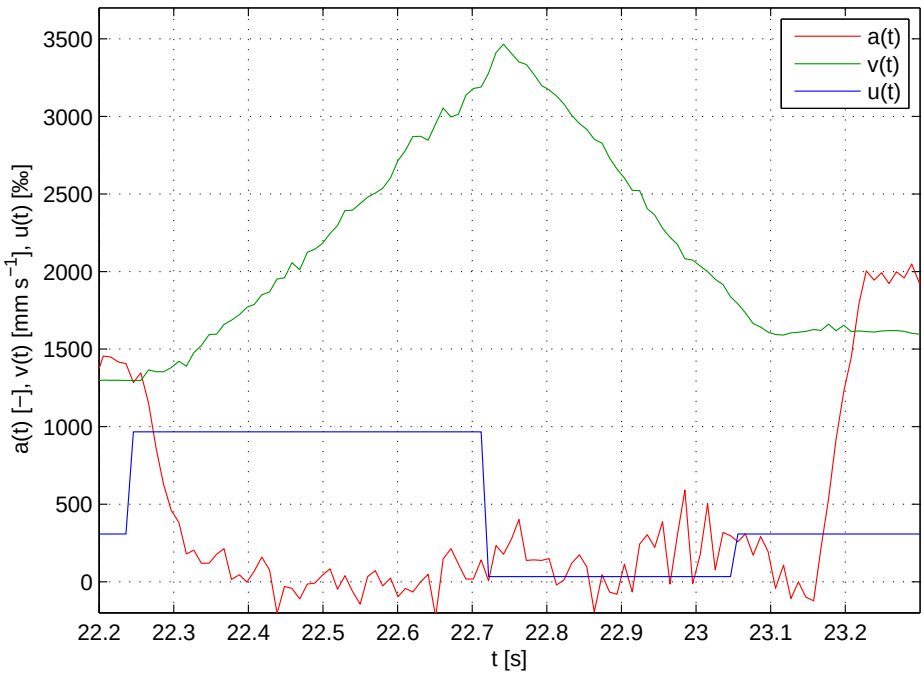
Délka rovinky musí být redukována o vzdálenost

$$l_r = \frac{q}{k} v_1, \tag{3.8}$$

která vyplývá z toho, že přímka podle níž aproximujeme neprochází nulou nebo-li motoru chvíli trvá než zareaguje. Toto zpoždění reakce také znamená, že vypočtený průsečík musíme posunout. Pro tento posun musíme znát maximální dosaženou rychlost v_{max}, kterou získáme z rovnice 3.6 dosazením průsečíku p. Posun vypočteného průsečíku pak vyplyne z rovnice 3.4, do které je dosazena rychlost v_{max} a záporný čas zpoždění určený rovnicí 3.3

$$x = -v_{max}\frac{q}{k} + \frac{1}{2}\, a\frac{q^2}{k^2}\,. \tag{3.9}$$

Tento způsob výpočtu je vhodný, pouze pokud se vozidlo při zrychlování a zpomalování chová stejně, experimentálně bylo zjištěno, že tomu tak přibližně je. Na obrázku 3.6 je vidět příklad průběhu rychlosti na rovince, kterou ohraničuje ilustrativní průběh $a(t)$. U průběhu rychlosti $v(t)$ je dobře vidět zpoždění oproti řídicímu napětí $u(t)$.



Obrázek 3.6: Ukázka průjezdu modelu automobilu rovinkou.

Okamžik zpomalování mezi bezprostředně navazujícími zatáčkami 3 a 1, nebo 4 a 2, byl zjištěn experimentálně. V zatáčce není možné brzdit smykem zadních kol, proto výpočet zpomalování na rovince u zatáčky neplatí. Zpomalení vozidla v zatáčce musí být plynulé.

Identifikace Křížení je provedena na základě poklesu napětí na stíracích kartáčcích modelu automobilu, ke kterému dojde uprostřed tohoto panelu autodráhy. Průjezdová délka tohoto dílu je 30 cm, takže oblast v níž se Křížení nachází je ±15 cm, přibližně ±9 dílků mapy od polohy detekce poklesu napětí. Tato skutečnost se na konci mapovacího kola zpětně zapíše do mapy dráhy.

Mapa se skládá ze segmentů, které mají následující atributy:

- rovinka:
  - délka,
  - vstupní rychlost,
  - výstupní rychlost,
  - zlomový bod pro zpomalení,
- zatáčka:

  - délka,
  - průjezdová rychlost,
  - průjezdové napětí,

- Křížení:
  - průjezdová rychlost,
  - průjezdové napětí.

3.2.2 Synchronizační body na dráze

Start je velmi důležitým bodem na dráze, od něho se odvíjí začátek mapy a orientace v ní. Pokud dojde během závodu ke ztrátě polohy vozidla v mapě, je vozidlo nastaveno do režimu bezpečné rychlosti, do doby kdy detekuje průjezd nějakým významným bodem na dráze, startem, nebo Křížením. Start jednoznačně nastaví polohu vozidla v mapě na začátek, v případě Křížení je to složitější, jelikož ty se objevují na dráze dvakrát. Dráha je těmito body rozdělena na 3 oblasti:

- mezi startem a první Křížením,
- mezi překříženími,
- mezi druhým Křížením a startem.

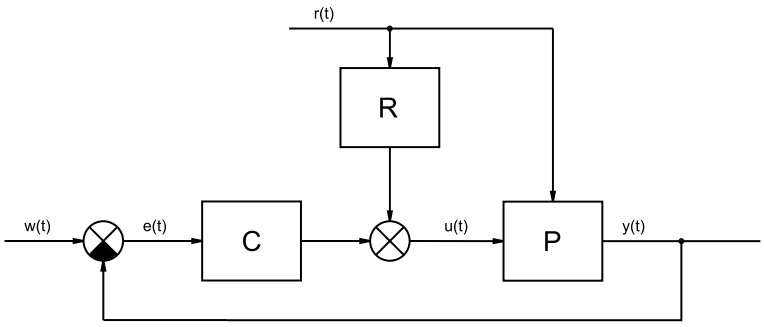
Během jízdy vozidla se neustále eviduje jeho poloha v těchto oblastech a pokud došlo k vypadnutí vyvolá se informace o poslední známé pozici vozidla, takže je známo na který předělový bod se bude čekat. Musí být splněno, že vozidlo bude nasazeno na dráhu před místo vypadnutí, ale ve stejné oblasti.

3.2.3 Mapovací průjezd dráhou

Na vozidlo projíždějící zatáčkami dráhy působí tření, to způsobuje zpomalení a zmenšuje ostrost signálu vycházejícího z akcelerometru. Proto je vhodné, aby se vozidlo v mapovacím kole pohybovalo konstantní rychlostí.

Byl navržen PI regulátor s korekčním členem zatáček podle obr. 3.7. Akční zásah do regulovaného systému určuje rovnice

$$u(s) = C(s)e(s) + Ra(s) = k_p e(s) + \frac{k_i}{s} e(s) + Ra(s). \tag{3.10}$$



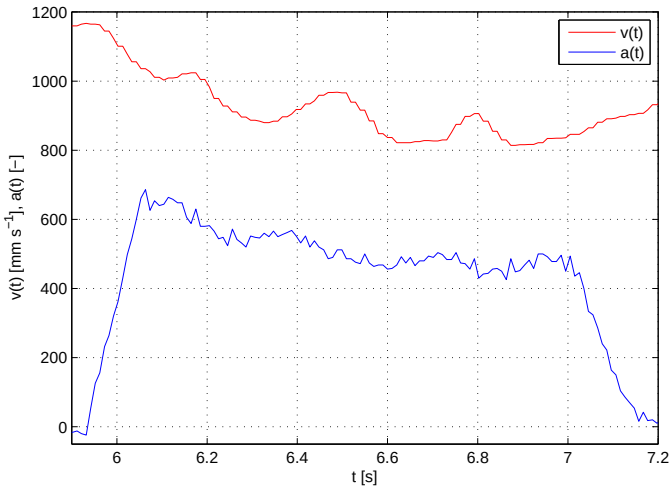
Obrázek 3.7: Blokové schéma regulátoru pro mapovací fázi.

Zatáčky vstupují do regulačního obvodu jako chyba, kterou lze měřit akcelerometrem a její dopady zmírnit. Konstanty PI regulátoru byly navrženy frekvenční metodou z přenosu (2.12) a dále doladěny metodou pokusů a omylů. Korekční člen zatáčky byl nastaven pouze experimentální cestou.

Konstanty regulátoru rychlosti pro mapovací kolo vyšly:

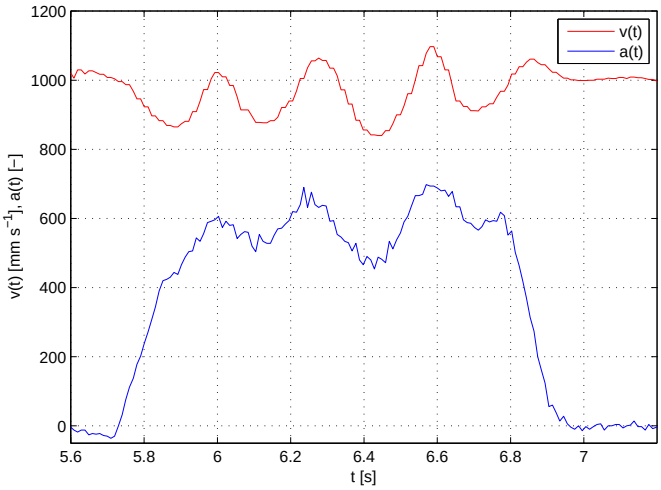
- $P = 0.1$,
- $I = 1.8$,
- $R = 0.6$.

Bylo zjištěno, že měřená rychlosti v zatáčkách kolísá obr. 3.8.



Obrázek 3.8: Průběh rychlosti při průjezdu zatáčkou s konstantním napětím na motoru a naměřeným odstředivým zrychlením, které vymezuje zatáčku.

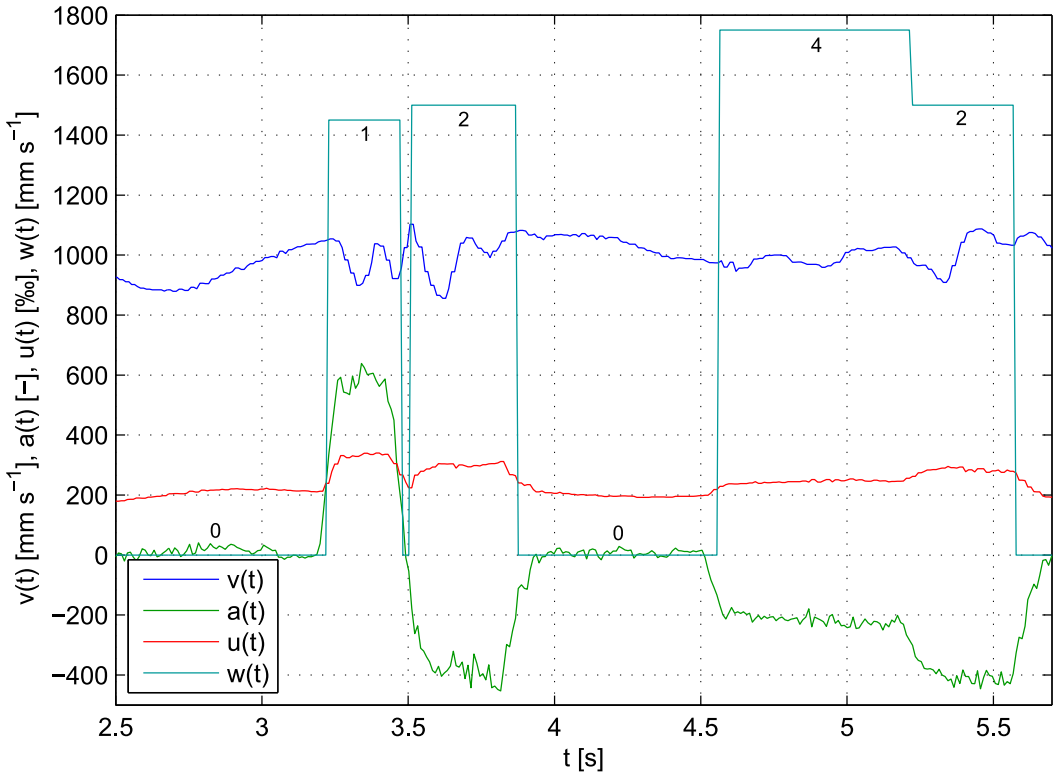
Rychloměr, umístěný na přední nápravě vozidla, ovlivňují obě kola, jelikož jsou spojena hřídelí. Každé kolo v zatáčce ujede jinou dráhu a tento rozdíl způsobí kolísání měřené rychlosti. Chybné měření rychlost se projeví i při regulaci rychlosti v zatáčkách. Opticky však žádné kolísání vidět není.



Obrázek 3.9: Průběh rychlosti při průjezdu zatáčkou s konstantním napětím na motoru a naměřeným odstředivým zrychlením, které vymezuje zatáčku.

Chyba měření rychlosti v zatáčkách byla důvodem, proč není vozidlo řízeno při závodu regulátorem, ale pouze nastavovaným napětím, tedy bez zpětné vazby.

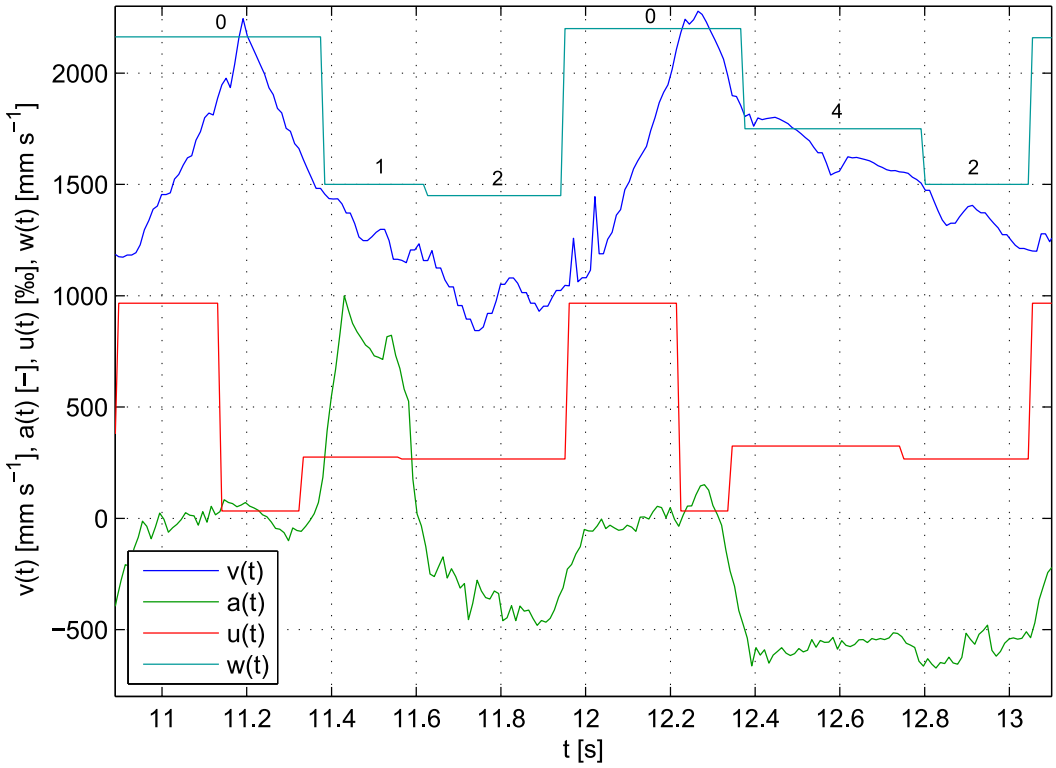
Příklad identifikace dráhy v mapovacím kole ukazuje obrázek 3.10. Při konstantní rychlosti $v(t)$, která je nastavována regulátorem pomocí napětí $u(t)$, byl změřen průběh odstředivého zrychlení $a(t)$. Z průběhu $a(t)$ se podařilo identifikovat zatáčky 1–4 podle tabulka 3.1 pomocí prahových hodnot z obrázku 3.4. Identifikované rovinky a zatáčky ilustruje průběh $w(t)$, rovinky jsou označeny nulami.



Obrázek 3.10: Ukázka identifikace zatáček při konstantní rychlosti během mapovacího kola.

3.2.4 Závod

Rychlost modelu automobilu během závodu již neřídí regulátor, ale hodnoty napětí pro jednotlivé segmenty zapsané v mapě. Průběhy naměřené během závodu na dráze jsou vidět v grafu na obr. 3.11.



Obrázek 3.11: Ukázka identifikace zatáček a rychlosti během závodního kola.

Průběh $w(t)$ ukazuje rychlost, jakou by se vozidlo v dané zatáčce mělo pohybovat a maximální předpokládanou rychlost na rovinkách. Čísla u průběhu představují jednotlivé identifikované rovinky – 0 a zatáčky – 1–4 jako v obr. 3.10. S tímto průběhem souhlasí odstředivé zrychlení $a(t)$, ukazující jak zatáčky vypadají ve skutečnosti. Skutečné rychlosti vozidla odpovídá průběh $v(t)$ a napětí na motoru $u(t)$.

Rychlost na rovince je správná, autíčko nejdříve zrychluje a do další zatáčky začne zpomalovat. Rychlost v zatáčkách při konstantním napětí klesá rychleji, než byl předpoklad, to je vidět například u zatáček 1 a 2. Mezi těmito dvěma zatáčkami, které na sebe bezprostředně navazují, byla identifikována rovinka. Tu však algoritmus ignoroval z důvodu její malé délky a bylo zde nastaveno napětí následujícího segmentu, tedy zatáčky 2. Jedna zatáčka, která mění v čase svůj poloměr, byla identifikována jako dvě zatáčky 4 a 2, jdoucí hned po sobě. Do prudší části zatáčky vozidlo zpomalí.

Z průběhu veličin na obr. 3.11 vyplývá, že chování vozidla v zatáčkách, následujících po sobě ve stejném směru, se podobá předpokladu. U zatáček jdoucích po sobě v různých

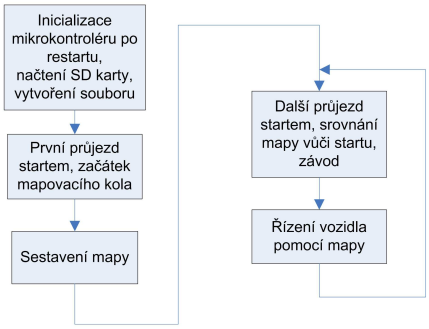
směrech je shoda s předpokladem menší. To je zřejmě způsobeno problémem kolísání měřené rychlosti, ukázaném na obr. 3.8.

3.3 Software

Tato kapitola se věnuje struktuře programu ovládajícího model automobilu a knihovně, která zprostředkovává komunikaci mikrokontroléru s SD kartou. Program byl psán ve vývojovém prostředí Codewarrior (Freescale Semiconductor, 2010) v programovacím jazyce ANSI C (Huss, E., 1997).

3.3.1 Program

Program řídící model automobilu pracuje podle vývojového diagramu na obr. 3.12. Nejdříve inicializuje periferie mikrokontroleru a připraví komunikaci s SD kartou. Po rozjetí vozidla se čeká na první průjezd startem, který započne mapování dráhy. Během mapování dráhy se vozidlo pohybuje konstantní rychlostí a jsou vypočítávány atributy jednotivých segmentů dráhy viz 3.2.1, podle kterých je následně sestavena mapa. Druhý průjezd startem znamená impulz pro dokončení mapovaní, zakončení mapy a spojení odpovídajících segmentů z konce a začátku mapování. Po dokončení mapy vozidlo vstupuje do fáze závodu, ve které je řízeno podle instrukcí z mapy. V případě, že vozidlo vypadne z tratě, musí najít začátek mapy, nebo jiný významný bod na mapě viz 3.2.2, podle kterého se zorientuje a závod dokončí.



Obrázek 3.12: Vývojový diagram programu.

3.3.2 SD karta

Pro komunikaci mikrokontroléru s SD kartou byla použita volně dostupná knihovna generického FAT souborového systému, se jménem FatFs ve verzi R0.07e. Tato knihovna, dostupná na internetových stránkách (ChaN, 2009), je napsána v jazyce ANSI C, je platformě nezávislá, podporuje soubory do velikosti 4 GB a velikosti datových sektorů do 4 kB. V této práci byly použity pouze její základní funkce:

- *f_mount* pro registraci diskového prostoru s nímž se má pracovat,
- *f_open* a *f_close* určené k otevírání a zavírání souborů,
- *f_printf* zapisující formátovaný string do souboru,
- *f_sync* obstarávající fyzický zápis dat na kartu, určen pro případy déle otevřených souborů v zapisovacím módu.

Zápis dat na kartu při řízení vozidla probíhá po dávkách v okamžicích, kdy nejsou procesorem obsluhovány důležitější podprogramy a přerušení. Jednotlivá data jsou postupně shromažďována v datovém poli, které představuje vyrovnávací paměť pro fyzický zápis větších bloků dat.

Kapitola 4

Elektronika

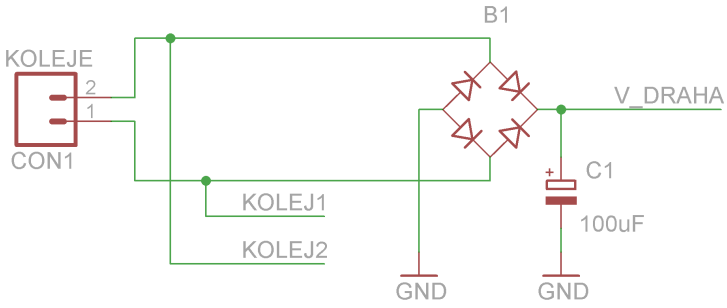
Tato kapitola se zabývá realizací hardwarové části bakalářské práce a problémy s ní spojenými.

4.1 Napájení a signalizace

Model automobilu může být napájen ze dvou druhů externího zdroje, z kolejnic na dráze, nebo z USB konektoru po připojení k počítači. Zdroj připojený k dráze dodává stejnosměrné napětí o velikosti 14,8 V. Napětí na USB konektoru je standardně stejnosměrných 5 V. Propojení modelu automobilu s počítačem je určeno pro naprogramování mikrokontroléru, a proto v tomto režimu USB konektor napájí pouze výpočetní elektroniku. Silové části, jako například H-můstek, jsou napájeny pouze z dráhy.

4.1.1 Napájení z dráhy

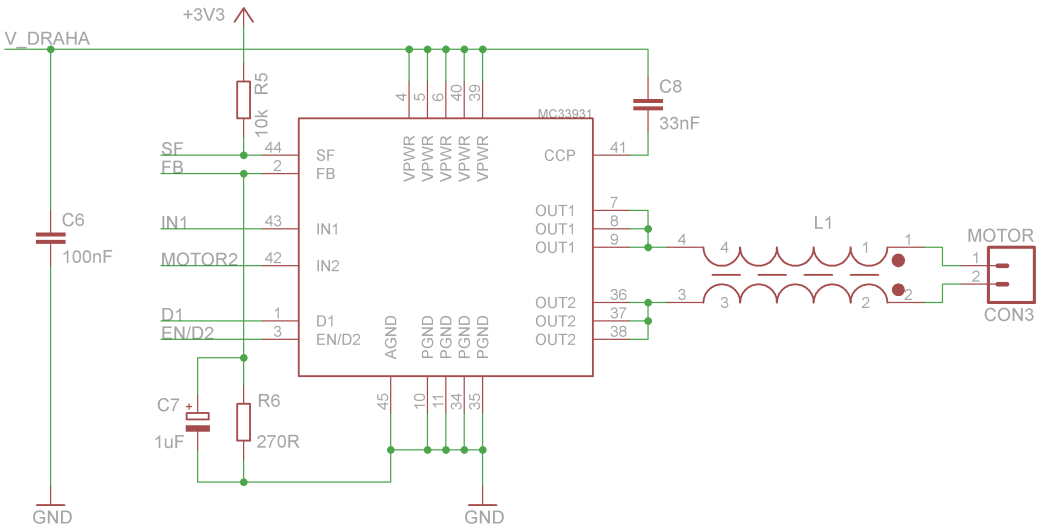
Energie z napájecího zdroje je přenášena z kolejnic na dráze do vozidla přes stírací kartáčky. Každé kolejnici náleží dva kartáčky. Aby nedošlo k přepólování elektroniky vozidla a zároveň nezáleželo na tom jakým směrem se bude model automobilu na dráze pohybovat, je za stírací kartáčky umístěn Graetzův můstek obr. 4.1. Můstek usměrní napětí na dráze na správnou polaritu, ale zároveň sníží napětí, které do vozidla vstupuje o úbytek napětí na dvou diodách, tedy asi o $2 \times 0,7\,V$. Výstup můstku filtrovaný kondenzátorem C1 o velikosti 100 μF, představuje bezpečný zdroj energie pro napájení dalších částí vozidla, nezávislý na směru jízdy vozidla.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení napájení z dráhy.

4.1.2 Napájení motoru

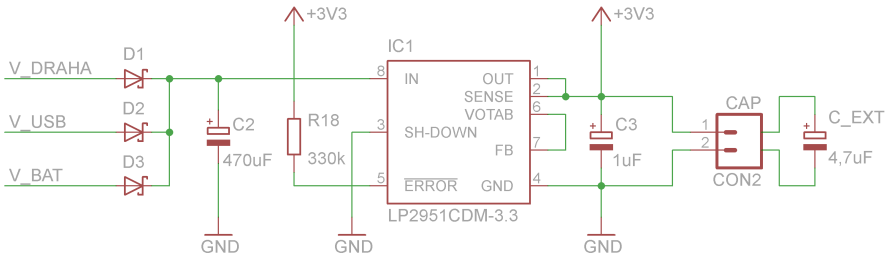
Napájení motoru zprostředkovává h-můstek od firmy Freescale s označením MC33931 (Freescale Semiconductor, 2008*a*). Maximální hodnoty napětí a proudu se kterými může h-můstek operovat jsou 28 V a 5 A. Stejnosměrný motor je řízen čtyřkvadrantově pomocí dvou PWM signálů, přivedených na piny IN1 a IN2, každý pro jednu stranu h-můstku. Uvnitř jeho pouzdra existuje ochrana proti jednorázovému sepnutí tranzistorů na jedné straně, která eliminuje možnost zkratu a zničení součástky. Mimo dva uvedené vstupy PWM byly použity ještě další vstupní piny EN/D1 uvádějící součástku do režimu spánku, D1 nastavující na výstupu h-můstku stav vysoké impedance a výstupní piny SF indikující stav motoru a FB poskytující informaci o protékajícím proudu h-můstkem. Všechny tyto piny jsou zapojeny podle schematu na obr. 4.2, které se řídí doporučeními z uvedeného katalogového listu.



Obrázek 4.2: Schéma zapojení h-můstku, který zajišťuje řízení motoru.

4.1.3 Stabilizátor napětí na hodnotu 3,3 V

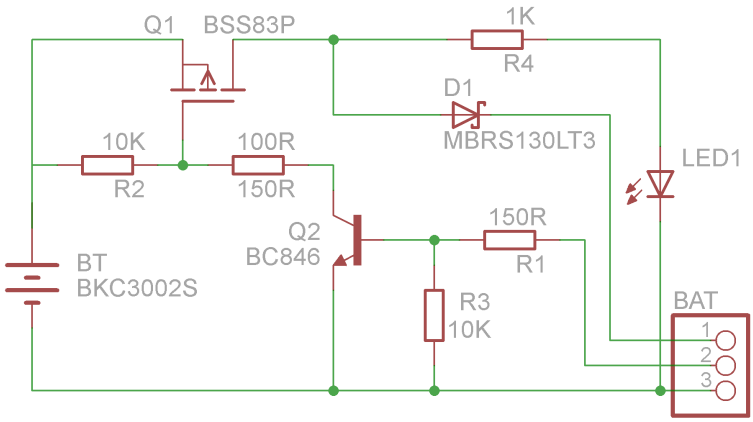
Napětí z Graetzova můstku, příliš vysoké pro napájení senzorů a jemnější elektroniky, bylo sníženo pomocí stabilizátoru napětí na 3,3 V při maximálním proudu 0,1 A. Použitý stabilizátor napětí, od firmy ON Semiconductor s označením LP2950-D (ON Semiconductor, 2010), je v programovacím režimu napájen z USB konektoru a v nouzovém režimu ze záložního napájecího zdroje. Tyto zdroje musí být odděleny diodami D1, D2 a D3 obr. 4.3, Schottkyho diody byly vybrány pro nízký úbytek napětí. Během průjezdu dráhou dochází ke krátkym ztrátám kontaktu stíracích kartáčků s kolejnicemi, čímž vznikají výpadky napětí, proto byly před a za stabilizátor umístěny kondenzátory s větší kapacitou o velikosti 470 μF a 4,7 mF. Při zapojení stabilizátoru nebylo využito přidaných funkcí, možnosti vypnutí stabilizátoru a kontroly jeho funkce, příslušné piny jsou uzeměny, nebo zapojeny podle doporučení v katalogovém listu tak, aby nezpůsobovali komplikace.



Obrázek 4.3: Schéma zapojení stabilizátoru napětí na 3,3 V.

4.1.4 Záložní napájecí zdroj

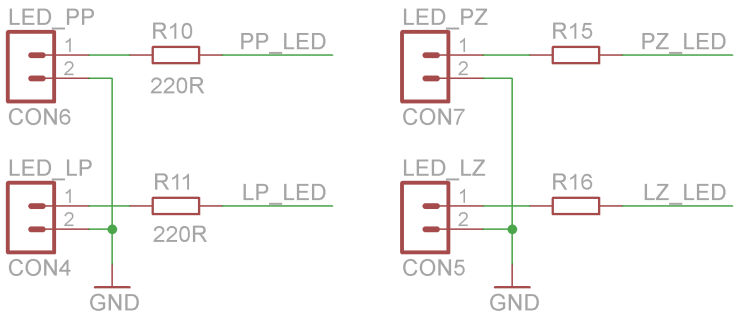
Záložní napájecí zdroj slouží v případě vypadnutí vozidla z dráhy, jako zdroj napětí pro mikrokontrolér. Ten se nevypne a mapa kterou vytvořil tak není ztracena. Jako záloha dat mapy se jistě dala použít SD karta, ale v tomto případě trvá delší dobu, než se SD karta po restartu mikrokontroléru načte a rychlost s jakou se vozidlo po vypadnutí vrátí do závodu je rozhodující. Záložní zdroj představují dva do série zapojené knoflíkové primární galvanické články na bázi lithia každý o napětí 3 V a kapacitě 160 mAh. Za hlavní spínač této elektrické baterie, byl zvolen unipolární tranzistor kvůli jeho malému odporu v otevřeném stavu méně než 2 Ω podle (Infineon Technologies, 1999). Zdroj bude spínán log. 1 na pinu 2 konektoru BAT, a proto je unipolární tranzistor typu p-kanál spínaný bipolárním tranzistorem NPN. Celá komponenta, na závěr doplněná signalizací funkce pomocí LED je zapojená podle schématu na obr. 4.4 a představuje poslední záchranu po vypadnutí vozidla z dráhy, ke kterému by však nemělo dojít.



Obrázek 4.4: Schéma zapojení záložní baterie.

4.1.5 Přední a zadní světla

Přední a zadní světla byla s výhodou využita při ladění programu jako signalizace stavu některých proměnných. Ve finální verzi jsou využita jen na efekt, přední světla svítí ve směru zatáčení a zadní signalizují brždění vozidla. Bliknutí všech světel naráz představuje přejezd významného bodu na trati, jako je start a překřížení.



Obrázek 4.5: Schéma zapojení svetel vozidla.

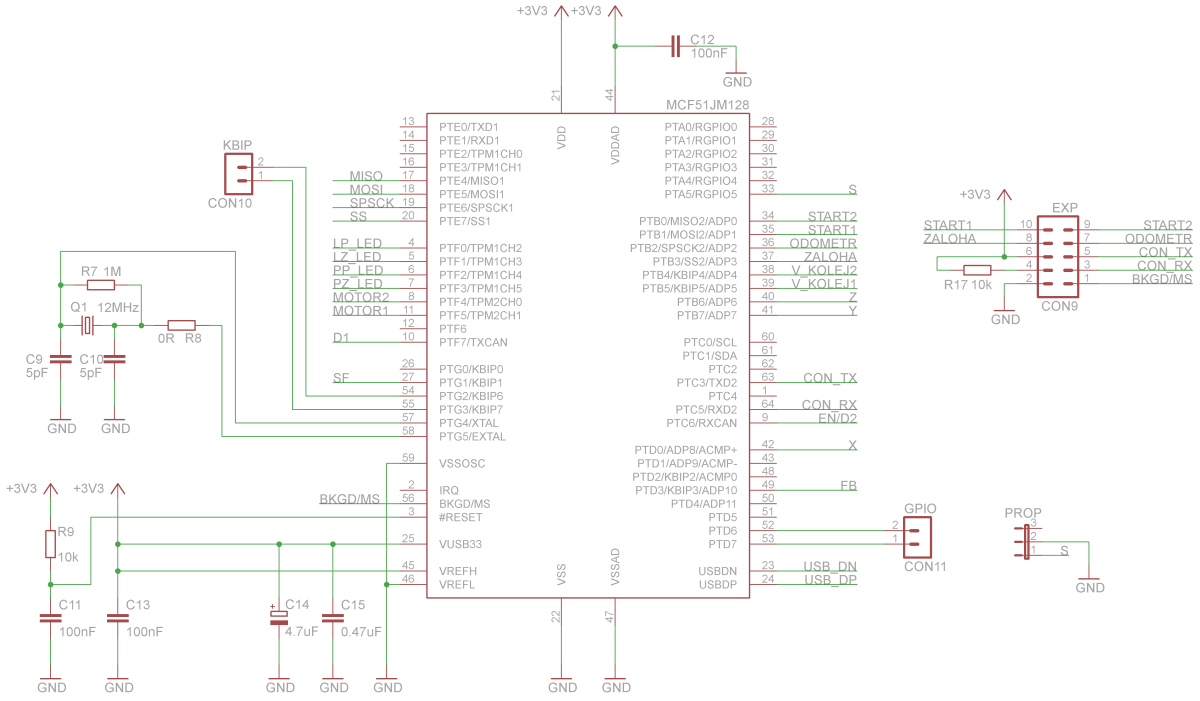
4.2 Mikrokontrolér

Za řídicí člen modelu automobilu byl vybrán mikrokontroler firmy Freescale s označením MCF51JM64 (Freescale Semiconductor, 2009). Tento mikrokontrolér založen na 32-bitovém RISC jádře V1 ColdFire, pracující na frekvenci do 50,33 MHz opatřen flash pamětí pro program o velikosti 64 kB a operační pamětí 16 kB je navržen na napájecí napětí v rozsahu 2,7 V - 5.5 V. Jeho konstrukce má vlastnosti "systems-on-chip"(SoC), představující integraci více funkčních bloků na jeden čip.

4.2.1 Mikrokontrolér MCF51JM64

Mikrokontrolér v této aplikaci pracuje na frekvenci 48 MHz na napětí 3,3 V. Za frekvenční referenci byl zvolen piezoelektrický krystalový rezonátor o frekvenci 8 MHz. Použité 64pinové pouzdro vlastní více periferií a funkcí, v této aplikaci byly použity zejména dva 16bit časovače ke generování PWM a měření rychlosti, multiplexovaný 12bit A/D převodník s postupnou aproximací na vyčítání senzorů, modul zajišťující komunikaci po SPI sběrnici pro komunikaci s SD kartou, USB rozhraní zprostředkující nahrání programu

do mikrokontroléru a digitální vstupy a výstupy na řízení ostatních komponent. Vstupy A/D převodníku jsou vyvedeny na konektor CON9 obr. 4.6 spolu s napájením 3,3 V, log. 1 a log. 0. Zapojení piezoelektrického rezonátoru k mikrokontroléru bylo provedeno podle doporučení v katalogovém listu (Freescale Semiconductor, 2009), resetovací pin $\overline{\text{RESET}}$ byl nastaven pull-up rezistorem na log. 1, piny VREFH a VREFL byly nastaveny na log. 1 a log. 0 pro inicializaci A/D převodníku. Jediný uživatelský vstup mikrokontroleru představuje propojkový přepínač PROP. Zapojení USB a slotu SD karty jsou uvedeny dále.

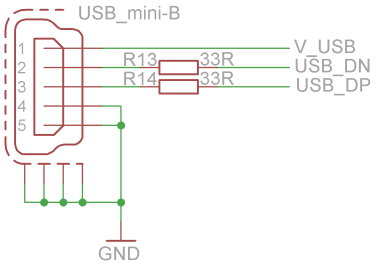


Obrázek 4.6: Schéma zapojení mikrokontroléru.

4.2.2 USB port

USB řadič mikrokontroléru byl použit jako prostředník k naprogramování mikrokontroleru pomocí počítače, tato funkce se nazývá Bootloader. Po restartu mikrokontrolér vykoná část programu určeného pro inicializaci, zde se vyhodnotí podmínky ke vstupu do aktivního režimu, nebo do Bootloaderu, v tomto případě je to přítomnost napětí na stíracích kartáčcích modelu automobilu. Napájení aplikace přes USB port, bez napětí na kartáčcích, inicializuje Bootloader a mikrokontrolér se v počítači přihlásí jako hro-

madné úložiště. Po nahrání nového zkompilovaného zdrojového kódu se mikrokontrolér sám přeprogramuje. Příští vložení vozidla na dráhu již spustí nový program.

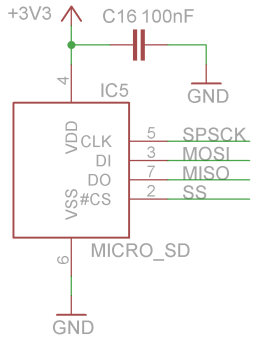


Obrázek 4.7: Schéma zapojení USB konektoru.

Zapojení USB modulu mikrokontroléru, který je napájen menším napětím než 3,9 V, vyžaduje přídavné napájení na pinu VUSB33, které je vidět na obr. 4.6 a zapojení kondenzátorů C14 a C15 pro potlačení rušení. Datovou část zapojení USB rozhraní ilustruje schéma na obr. 4.7.

4.2.3 SD karta

SD karta, moderní datové médium, byla použita jako úložiště dat sbíraných během jízdy vozidla na trati pro svou velkou kapacitu a protože se dá velmi snadno připojit k jakémukoliv dnešnímu počítači a data z ní vyčíst. Toto datové uložiště je vhodné i pro své velmi malé rozměry a možnost komunikace po SPI sběrnici (SD Group, 2006). SPI sběrnice, která umožňuje synchronní sériovou komunikaci mezi mikrokontrolerem (master) a SD kartou (slave) byla zapojena podle schématu na obr. 4.8. V komunikaci figuruje pouze jedno zařízení slave, takže adresovací pin SS(Slave Select) byl zapojen přímo ke slotu karty. Datové vodiče MISO a MOSI a hodinový signál SCLK, byly zapojeny standartním způsobem.



Obrázek 4.8: Schéma zapojení slotu pro SD kartu.

4.3 Senzory

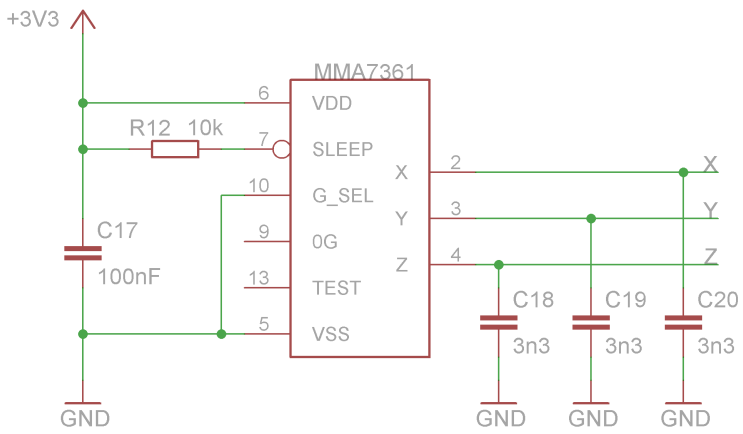
Senzory, zařízení převádějící fyzikální veličiny na elektrický signál, představují nezbytnou součást pro řízení a jsou uvedeny v této podkapitole.

4.3.1 Senzor zrychlení MMA7361

Nejdůležitější senzor aplikace, senzor zrychlení nebo-li akcelerometr, slouží k měření odstředivého zrychlení působícího na model automobilu v zatáčkách. Použitá součástka vyrobená technologií MEMS od firmy Freescale s označením MMA7361, funguje na principu změny kapacity v závislosti na působícím zrychlení (Ripka, P. et al., 2005). Zjednodušeně si lze představit jednu elektrodu kondenzátoru spojenou s hmotností na pružině, která se pohybuje v ose měření vůči druhé elektrodě pevně spojené s pouzdrem součástky a mění tak vzduchovou mezeru kondenzátoru a jeho kapacitu. Ze známé hmotnosti, tuhosti pružiny a parametrů kondenzátoru se nechá vypočítat působící zrychlení. Senzor umožňuje nastavení rozsahu na ±1,5 g a ±6 g, pro účely této práce byla zvolena vyšší citlivost ±1,5 g uzeměním pinu g-Select. Jednotka g představuje gravitační zrychlení a jeho působení změní výstup akcelerometru o 800 mV.

Senzor je zapojen podle doporučení v katalogovém listu (Freescale Semiconductor, 2008*b*), viz 4.9. Pouzdro senzoru bylo vybaveno vstupy řídícími režim spánku, autotest, pro zjištění závad a detekci volného pádu, tyto funkce však z důvodu velikosti DPS, nebyly inicializovány. Signál na výstupu akcelerometru je vzorkován 12bit A/D převodníkem s frekvencí 2 kHz a bylo zjištěno, že velmi šumí. Filtrace eliminující tento šum, byla provedena softwarově filtrem typu klouzavý průměr o délce 128. Pro získání odstředivého zrychlení z dat akcelerometru musíme tato data přenásobit konstantou vyplývající z napětí A/D převodníku $U_{\mathrm{A/D}}$, z jeho bitového rozsahu bit, z citlivosti samotného akcelerometru c a samozřejmě z velikosti gravitačního zrychlení g. Konstanta se nechá vypočíst podle vzorce

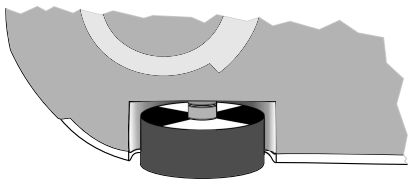
$$\alpha = \frac{U_{\mathrm{A/D}} \times g}{2^{bit} \times c} = \frac{3,3 \times 9,81}{2^{12} \times 0,8} = 0,0099\,\mathrm{m\,s^{-2}}. \tag{4.1}$$



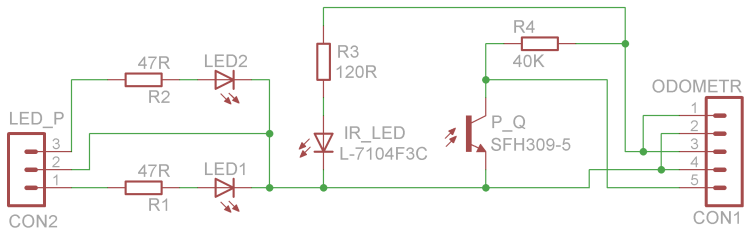
Obrázek 4.9: Schéma zapojení akcelerometru.

4.3.2 Odometr a tachometr

Zařízení pracuje na principu odrazivosti infračervené části spektra světla od bílé (velká odrazivost) a černé (malá odrazivost) barvy. Na vnitřní straně předního kola viz obr. 4.10, je umístěna černobílá rozeta. Kolo vpředu bylo vybráno záměrně, nemělo by zde dojít ke smyku jako na zadní hnané nápravě. Na rozetu, rozdělenou na čtyři segmenty míří zevnitř karoserie infračervený odrazový senzor, na jehož výstupu jsou generovány dvě náběžné a dvě spádové hrany během jednoho otočení kola. Infračervený odrazový senzor se skládá z vysílací části, kterou zastupuje infračervená svítivá dioda IR_LED a z přijímací části, reprezentované fototranzistorem P_Q. Odpory R3 a R4, které nastavují jas diody a úroveň napětí na výstupu senzoru jsou na schématu na obr. 4.11. V levé části schématu je zobrazeno zapojení předních světel, jelikož jsou umístěna na jedné desce plošných spojů.



Obrázek 4.10: Rozeta odometru na předním kole



Obrázek 4.11: Schéma zapojení odometru a rychloměru.

Chyba se kterou měřič vzdálenosti pracuje, vyplývá z neznámé velikosti offsetu měřítka, z nepřesnosti potisku rozety, excentricity kola a samozřejmě ze samotné jemnosti měřítka. Offset měřítka se jednoduše určí z aktuální rychlosti vozidla a doby mezi detekcí startovní čáry a první hranou sinálu z odometru. Nepřesnost potisku představuje periodickou chybu o frekvenci 0,25 Hz která je filtrována filtrem typu klouzavý průměr o délce 4, jehož zpoždění signálu je zanedbatelně malé. Odometr tedy pracuje s chybou generovanou pouze jemností měřítka

$$\Delta s = \pm\frac{o}{n} = \pm\frac{65,2}{4} = \pm 16,3\,\mathrm{mm}, \tag{4.2}$$

kde o je obvod kola v mm a n je počet segmentů.

Signál ze senzoru vstupuje do časovače a A/D převodníku. A/D převodník vzorkuje signál s frekvencí 2 kHz a jeho přerušení obsahuje kód starající se o odometrii, o mapu dráhy. Časovač pracuje v záchytném režimu náběžných a spádových hran na frekvenci 1,5 MHz, počítá čas mezi změnami segmentu na rozetě a jeho přerušení obsahuje kód regulátoru rychlosti. Chyba měření při předpokládané maximální měřené rychlosti 5000 mm s^{-1} se nechá vypočítat podle vztahu

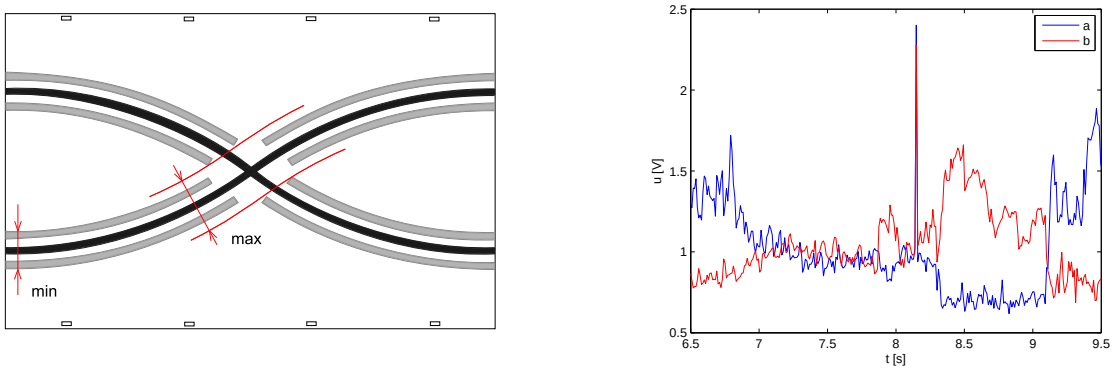
$$\Delta v = \frac{1}{t^2}\sqrt{t^2\Delta t + l^2\Delta r} = 0,26\,\mathrm{mm\,s^{-1}}, \tag{4.3}$$

kde Δt je chyba měření času v [s], Δr je chyba velikosti segmentů rozety, po filtraci rovna nule, t čas v [s] a l uražená vzdálenost v [mm] představující jeden segment rozety.

4.3.3 Detektor startu

Detekce startu pracuje na stejném principu jako předchozí senzor, jelikož start na dráze vyznačuje bílá čára, jak bylo popsáno v podkapitole 2.1.2. Dobrá odrazivost kolejnic na dráze vyžaduje konstruovat detektor ze dvou infračervených odrazových senzorů se správným umístěním na podvozku vozidla vzhledem ke kolejnicím. Poloha senzorů, dána

rozchodem kolejnic a konstrukcí křížení na dráze, musí respektovat také skutečnost, že oba senzory měří stejnou událost a musí být umístěny v jedné rovině kolmé na směr jízdy.



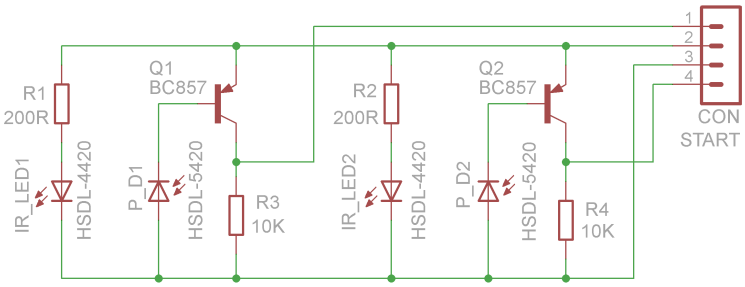
(a) Znázornění umístění odrazových senzorů.

(b) Signál z odrazových senzorů.

Obrázek 4.12: Určení vzájemné polohy odrazových senzorů a jejich signál.

Hodnoty min a max z obr. 4.12(a) odpovídají hodnotám 20 a 34 mm, byla zvolena hodnota 22 mm. Obrázek 4.12(b) ukazuje výstupní signál z takovéto konfigurace senzorů, v čase 8,15 s vozidlo projelo startem. Signál ze senzorů vzorkuje A/D převodník s frekvencí 2 kHz a úspěšné vyhodnocení detekce závisí na překonání prahových hodnot o velikosti 2 V u obou senzorů najednou. Prahové hodnoty odrazových senzorů nemusí být nutně stejně veliké, záleží na jejich konstrukci a chybách způsobených při výrobě.

Schéma na obr. 4.13 ukazuje oba infračervené odrazové senzory, lišící se od odrazového senzoru použitého u odometru změnou fototranzistoru na fotodiodu připojenou na bázi bipolárního tranzistoru, představující přijímač odraženého záření.



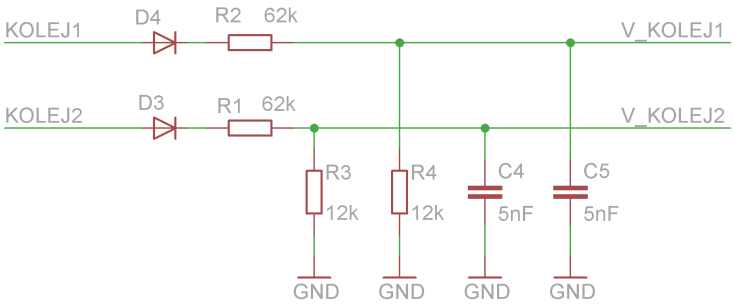
Obrázek 4.13: Schéma zapojení detektoru startu.

4.3.4 Snímač napětí na dráze

Snímač měří napětí na stíracích kartáčcích modelu automobilu, slouží jako rozhodovací element pro vstup mikrokontroléru do režimu Bootloaderu a také jako detektor průjezdu křížením. Napětí na kartáčcích 14,8 V se po průchodu diodou nechá zmenšit děličem napětí s dělicím poměrem 0,16 na hodnotu

$$U = (14,8 - 0,7) * 0,16 = 2,23\,\mathrm{V}, \tag{4.4}$$

která se již vejde do měřicího rozsahu A/D převodníku vzorkujícího signál s frekvencí 2 kHz. Zdánlivě zbytečná dioda před děličem napětí je velice důležitá, jelikož mikrokontrolér a napětí na dráze nemají společnou zem. Schéma zapojení snímače je vidět na obr. 4.14.



Obrázek 4.14: Schéma zapojení snímačů napětí na dráze.

Kapitola 5

Závěr

Testováním vozidla na různých neznámých drahách, byly ověřeny výhody a nevýhody zvolených metod a zkonstruovaných senzorů, jejichž využití je možné i v jiných praktických aplikacích.

Zjišťování poloměrů zatáček na dráze pomocí měření odstředivého zrychlení akcelerometrem se osvědčilo. Součástka s označním MMA7361 měla na výstupu výrazný šum, což se připisuje hlavně její nízké ceně, ale po jeho odfiltrování a správném nastavení ofsetu měřila velmi dobře.

Měření vzdálenosti a rychlosti pomocí amatersky sestrojeného enkodéru mělo na rovinkách dobré výsledky i přes malé množství segmentů na jeho rozetě. K přesnému počítání rychlosti výrazně přispěla i vysoká frekvence použitého mikrokontroléru, která umožnila přesné odečítání času. Měření těchto věličin v zatáčkách narazilo na problémy v důsledku spojení předních kol hřídelí napevno, absencí diferenciálu.

Mikrokontrolér samotný poskytoval obrovský výpočetní výkon, díky vysoké pracovní frekvenci a nepochybně by mohl být nasazen i do složitějších a časově náročnějších aplikací. Velmi užitečnou vlastností tohoto mikrokontroléru je konektivita s klasickým počítačem přes USB rozhraní.

Minimum falešných detekcí startu ukazuje na správně provedenou analýzu dráhy a návrh detektoru startu.

Výpočty pohybu vozidla na rovince jsou správné, vozidlo při testech na rovinkách zrychlovalo a do zatáček stíhalo zpomalovat.

Nejvíce však k vyladění celé aplikce přispěla SD karta. Toto miniaturní datové médium, ze kterého se dají vyčíst data téměř v jakémkoliv počítači bylo velmi příjemné. Obrovská datová kapacita tohoto média je vhodná pro aplikace ve kterých je potřeba uchovat větší množství informace, například datový záznamník.

Sestavený model automobilu byl nasazen do závodu Freescale Race Challenge 2010 a prošel třemi koly, až do finále. Ve finále se neumístil na příliš dobré místě, ale samotná účast v tomto kole je úspěch. V dalším ročníku soutěže Freescale Race Challenge 2011, ve kterém již byla potvrzena účast, budou použity poznatky z této práce a výsledek by měl být znát.

Literatura

ChaN (2009), *FatFs Generic FAT File System Module*, ChaN. [cit. 2010-12-27], ⟨http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html⟩.

FARO (2007), Česká autodráha faro. [cit. 2010-12-28], ⟨http://www.autodraha-faro.cz/⟩.

Freescale Semiconductor (2008*a*), *5.0 A Throttle Control H-bridge MC33931*, USA: Freescale Semiconductor, Inc. [cit. 2010-12-21], ⟨http://www.freescale.com/files/analog/doc/data_sheet/MC33931.pdf⟩.

Freescale Semiconductor (2008*b*), *±1.5g, ±6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer MMA7361L*, USA: Freescale Semiconductor, Inc. [cit. 2010-12-21], ⟨http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361L.pdf⟩.

Freescale Semiconductor (2009), *MCF51JM128 ColdFire® Integrated Microcontroller Reference Manual*, USA: Freescale Semiconductor, Inc. [cit. 2010-12-21], ⟨http://www.freescale.com/files/32bit/doc/ref_manual/MCF51JM128RM.pdf⟩.

Freescale Semiconductor (2010), 'Codewarrior'. [cit. 2010-12-29], ⟨http://www.freescale.com/codewarrior⟩.

Halliday, D., Resnick, R. a Walker, J. (2000), *Fyzika část 1. Mechanika*, Brno: Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIUM. ISBN 80-214-1868-0.

Hlaváč, V. a Sedláček, M. (2007), *Zpracování signálů a obrazů*, Praha: Nakladatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-03110-0.

Huss, E. (1997), 'The c library reference guide'. [cit. 2010-12-28], ⟨http://www.acm.uiuc.edu/webmonkeys/book/c_guide/⟩.

Infineon Technologies (1999), *SIPMOS® Small-Signal-Transistor BSS 83 P*, Mnichov: Infineon Technologies AG. [cit. 2010-12-21], ⟨http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/infineon/1-bss83p.pdf⟩.

ON Semiconductor (2010), *100 mA, Low Power Low Dropout Voltage Regulator LP2950-D*, USA: Semiconductor Components Industries. [cit. 2010-12-18], ⟨http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/LP2950-D.PDF⟩.

Ripka, P., Ďaďo, S., Kreidl, M. a Novák, J. (2005), *Senzory a převodníky*, Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-03123-3.

SD Group (2006), 'Sd specifications 1 physical layer'. [cit. 2010-12-28], ⟨http://www.sdcard.org/developers/tech/sdcard/pls/Simplified_Physical_Layer_Spec.pdf⟩.

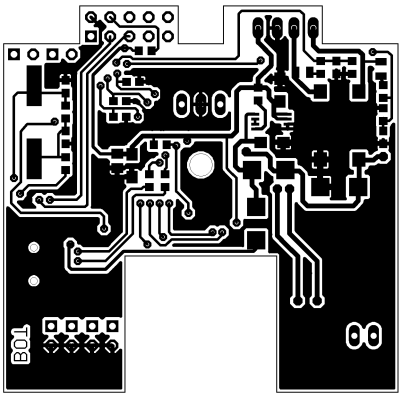
The MathWorks, Inc. (2010), 'Matlab'. [cit. 2010-12-28], ⟨http://www.mathworks.com/help/techdoc/⟩.

Voženílek, P. a Janoušek, J. (2005), *Základy silnoproudé elektrotechniky*, Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-03135-7.

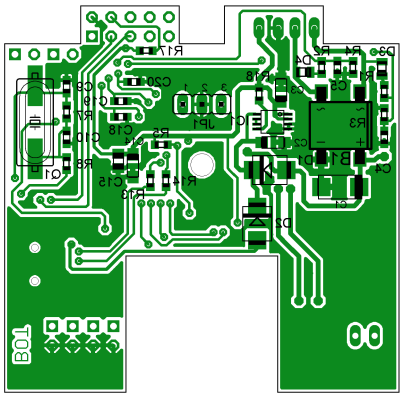
Příloha A

Obrazová příloha

Tato příloha obsahuje výkresy DPS.

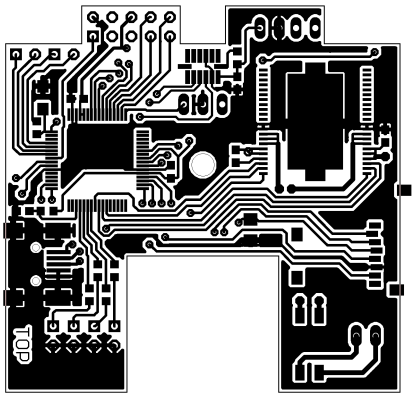


(a) DPS

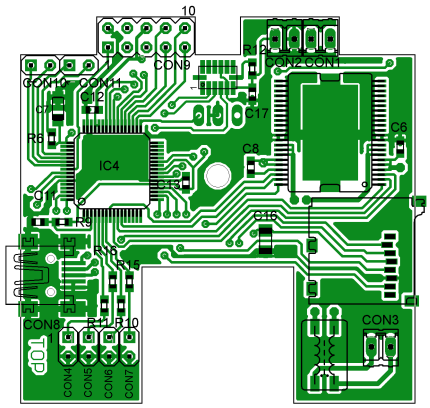


(b) Osazovací výkres

Obrázek A.1: Hlavní DPS zdola

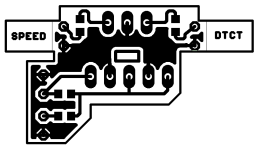


(a) DPS

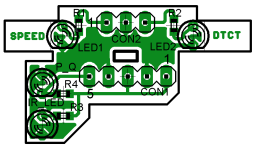


(b) Osazovací výkres

Obrázek A.2: Hlavní DPS shora

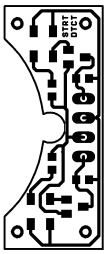


(a) DPS

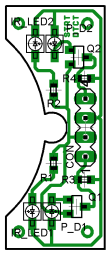


(b) Osazovací výkres

Obrázek A.3: DPS odometru

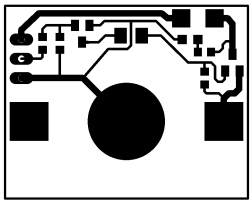


(a) DPS

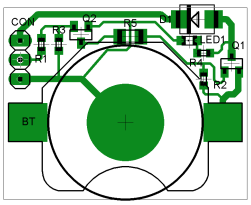


(b) Osazovací výkres

Obrázek A.4: DPS detektoru startu



(a) DPS



(b) Osazovací výkres

Obrázek A.5: DPS záložního zdroje napájení

Příloha B

Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uložena potřebná data.

- Adresář Bakalářskám_práce: Samotný text bakalářské práce ve formátu .pdf
- Adresář Model_automobilu: Projekt ve vývojovém prostředí Codewarrior
- Adresář Zdrojové kódy: Zdrojové kódy