

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

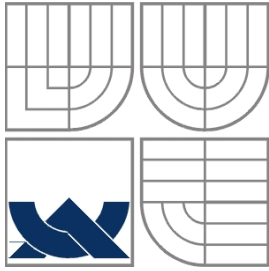
AUTONOMNÍ ŘÍDICÍ SYSTÉM MOBILNÍ PLATFORMY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

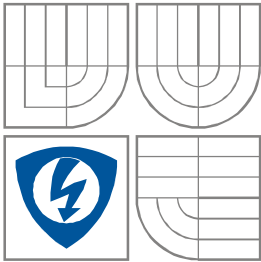
VLASTIMIL KŘÍŽ

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## AUTONOMNÍ ŘÍDICÍ SYSTÉM MOBILNÍ PLATFORMY

AUTONOMOUS CONTROL SYSTEM FOR MOBILE PLATFORM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

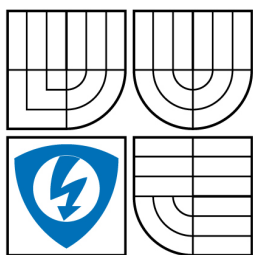
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Vlastimil Kříž

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Automatizační a měřicí technika

**Student:** Vlastimil Kříž

**ID:** 78250

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2008/2009

**NÁZEV TÉMATU:**

**Autonomní řídicí systém mobilní platformy**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Navrhněte mikroprocesorový řídicí systém pro mobilní platformu. Seznamte se s vhodnými mikrokontroléry firmy Freescale, navrhněte schéma systému, počítejte s možností rozšíření o snímače neelektrických veličin. Navržený systém prakticky realizujte a ověřte jeho funkci.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Dle vlastního literárního průzkumu a doporučení vedoucího práce.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 1.6.2009

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem a realizací autonomního řídicího systému pro mobilní platformu – autodráhové autíčko - pro soutěž Freescale Race Challenge 2009. Cílem je navrhnout a prakticky realizovat takový řídicí systém, který by umožnil autíčku samostatně zajet co nejrychleji neznámou soutěžní trasu. V práci jsou popsány faktory působící při jízdě na autíčko a podle nich je navrhnout optimální způsob jízdy. Jsou zvoleny senzory autíčka, způsob řízení motoru a řídicí jednotka. Je vytvořen algoritmus pro mapování profilu tratě a rozpoznávání kol. Dále je popsána praktická realizace systému.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** řídicí systém; autonomní řízení; senzory; řízení motoru; mikroprocesor; působení sil; korelace; Freescale Race Challenge 2009

## ABSTRACT

This work undertake the design of autonomous control system for mobile platform – slot car – for the Freescale Race Challenge 2009. The aim is to draw and implement control system, which will be able to drive the car trough the previously unknow path in the shortest time. In work is described factors that affect runing the car and draw optimal driving style. Then sensors for the car, type of motor control and control unit are chosen. The algorithms for maping the profile and for lap recognition are developed. Next the realization of the systém are descripted.

**KEYWORDS:** control system; self driving; sensors; motor control; microcontroller; action of the forces; correlation; Freescale Race Challenge 2009

## Bibliografická citace díla:

KŘÍŽ, V. *Autonomní řídicí systém mobilní platformy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla:

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma autonomní řídicí systém mobilní platformy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne 28. 5. 2009

.....

podpis autora

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Luděkovi Žaludovi, Ph.D. za účinné metodické a pedagogické vedení a technickou podporu související s realizací práce ohledně projektu. Dále děkuji panu Milanu Brejlovi, PhD. ze spolupracující firmy Freescale Semiconductor, Rožnov pod Radhoštěm za užitečné informace a materiální pomoc.

# OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>5</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>8</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1 CÍL PRÁCE</b> .....	<b>9</b>
<b>1.2 PRAVIDLA SOUTĚŽE FREESCALE RACE CHALLENGE 2009</b> .....	<b>9</b>
1.2.1 OBECNÁ PRAVIDLA:.....	9
1.2.2 DEFINICE TRATĚ: .....	9
1.2.3 POŽADAVKY NA AUTÍČKO: .....	10
<b>2 POŽADAVKY NA ŘÍZENÍ</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 PŮSOBÍCÍ SÍLY A MOMENTY</b> .....	<b>11</b>
2.1.1 SETRVAČNÁ SÍLA .....	11
2.1.2 ODSŤŘEDIVÁ SÍLA.....	12
2.1.3 SMYK .....	13
2.1.4 PŘEKLOPENÍ.....	15
<b>2.2 OPTIMÁLNÍ ZPŮSOB JÍZDY</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3 URČENÍ POLOHY NA DRÁZE</b> .....	<b>18</b>
<b>3 NÁVRH ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1 SENZOROVÝ SYSTÉM</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2 ŘÍZENÍ MOTORU</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA</b> .....	<b>23</b>
3.3.1 MIKROPROCESOR.....	23
3.3.2 AKCELEROMETR .....	27
3.3.3 H-MŮSTEK .....	28
<b>3.4 CELKOVÝ NÁVRHU SYSTÉMU</b> .....	<b>29</b>
<b>4 REALIZACE ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA</b> .....	<b>31</b>
<b>4.2 SNÍMAČ OTÁČEK</b> .....	<b>32</b>
<b>4.3 ROZHRANÍ AUTÍČKA</b> .....	<b>34</b>
<b>5 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ</b> .....	<b>36</b>
<b>5.1 STARTOVACÍ ČÁST</b> .....	<b>36</b>
<b>5.2 HLAVNÍ SMYČKA</b> .....	<b>37</b>
<b>5.3 OBSLUHY PŘERUŠENÍ</b> .....	<b>39</b>
5.3.1 OBSLUHA PŘERUŠENÍ OD BLOKU ADC.....	39

---

5.3.2 OBSLUHA PŘERUŠENÍ OD ČASOVAČE TPM1 .....	41
5.3.3 OBSLUHA PŘERUŠENÍ OD ČASOVAČE TPM2.....	42
<b>5.4 PODPROGRAMY A MAKRA .....</b>	<b>44</b>
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>46</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>47</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>48</b>
<b>PŘÍLOHA A SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY FREESCALE .....</b>	<b>49</b>
<b>PŘÍLOHA B PODKLADY K VÝROBĚ DESKY OD FIRMY FREESCALE .....</b>	<b>50</b>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 2.1 Odstředivá síla</i> .....	12
<i>Obr. 2.2 Třecí síla</i> .....	13
<i>Obr. 2.3 Síly působící v zatáčce</i> .....	14
<i>Obr. 2.4 Klopný moment</i> .....	15
<i>Obr. 2.5 Příklad dráhy</i> .....	17
<i>Obr. 2.6 Optimální průběh rychlosti a zrychlení na dráze z Obr. 2.5</i> .....	18
<i>Obr. 3.1 Princip činnosti optického otáčkoměru</i> .....	20
<i>Obr. 3.2 Princip činnosti PWM regulace</i> .....	22
<i>Obr. 3.3 Schéma H-můstku</i> .....	23
<i>Obr. 3.4 Blokové schéma procesorů rodiny MCF51JMI28</i> .....	25
<i>Obr. 3.5 Možné průběhy signálu PWM (střída 25%)</i> .....	27
<i>Obr. 3.6 Princip činnosti akcelerometru</i> .....	28
<i>Obr. 3.7 Blokové schéma navrženého řídicího systému</i> .....	30
<i>Obr. 4.1 Pohled dovnitř autíčka</i> .....	32
<i>Obr. 4.2 Schéma zapojení rozšiřující desky snímače otáček</i> .....	33
<i>Obr. 4.3 Provedení snímače otáček</i> .....	33
<i>Obr. 4.4 Spodní pohled na autíčko</i> .....	34
<i>Obr. 4.5 Číslování pinů konektoru autíčka</i> .....	35
<i>Obr. 5.1 Testovací dráha</i> .....	38
<i>Obr. 5.2 Korelační křivka</i> .....	38
<i>Obr. 5.3 Profil tratě před filtrací</i> .....	40
<i>Obr. 5.4 Profil tratě po filtraci</i> .....	40

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 3.1 Režimy činnosti H-můstku.....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 3.2 Stavý H-můstku .....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 4.1 Zapojení konektoru autíčka.....</i>	<i>35</i>

# 1 ÚVOD

## 1.1 Cíl práce

Cílem práce je vytvořit řídicí systém pro mobilní platformu - autíčko, pro soutěž Freescale Race Challenge 2009. V této soutěži musí autodráhové autíčko autonomně a co nejrychleji projet zadanou, předem neznámou, trasu.

Továrně vyráběné autíčko Faro Favorit je třeba vybavit řídicím systémem a vhodnými snímači. Řízení musí být zcela autonomní, tzn. autíčko nemůže být řízeno dálkově a nemůže ani z vnějšku dostávat synchronizační informace, když ujede jedno kolo.

## 1.2 Pravidla soutěže Freescale Race Challenge 2009

### 1.2.1 Obecná pravidla:

- Každé autíčko závodí samostatně.
- Čas se započítává od prvního projetí měřícím bodem po projetí tímto bodem v 10. kole
- Soutěž je dvoukolová, přičemž vítězí to autíčko, které má nejmenší součet časů z obou kol.
- V prvním kole jede autíčko v pravé dráze, v druhém kole v levé dráze
- Startovní pořadí v prvním kole je náhodné. V druhém kole je startuje jako první autíčko, jež bylo v prvním kole nejpomalejší a jako poslední startuje to, které bylo v prvním kole nejrychlejší.

### 1.2.2 Definice tratě:

- Trať je do začátku soutěže neznámá.
- Délka tratě je 10 – 16 m.
- Trať je napájena konstantním stejnosměrným napětím 12 V.
- Trať se skládá z těchto dílů:
  - Rovný díl dlouhý 60 mm
  - Rovný díl dlouhý 140 mm
  - Rovný díl dlouhý 280 mm

- Zatačka o poloměru 290 mm
- Zatačka o poloměru 470 mm
- Trať je bez křížení drah, nadjezdů a svodidel.

### **1.2.3 Požadavky na autíčko:**

- Musí být použita karosérie, podvozek, vodící člen a pneumatiky autodráhového autíčka Faro Favorit.
- Není povoleno používat přítlačný magnet k dráze.
- Před soutěží jsou vyměněny pneumatiky za nové.
- Autíčko nelze dálkově ovládat.
- Na autíčku může být umístěn jeden přepínač k výběru dvou módů.

Úplná pravidla soutěže (anglicky) jsou uvedeny v [7].

## 2 POŽADAVKY NA ŘÍZENÍ

### 2.1 Působící síly a momenty

Aby autíčko dokázalo zajet danou trať za co nejkratší čas, je třeba zvolit vhodný styl jízdy. A to takový, aby autíčko jelo co nejrychleji, avšak s ohledem na síly, které by mohly způsobit vyjetí autíčka z dráhy.

#### 2.1.1 Setrvačná síla

Setrvačná síla působí na autíčko, pokud má nějaké zrychlení. Na autíčko působí zejména tři druhy zrychlení: tíhové, dostředivé a tečné.

Tíhové zrychlení působí na autíčko všude na Zemi a způsobuje normálovou sílu, dostředivé zrychlení vzniká v zatáčke a způsobuje odstředivou sílu a tečné zrychlení vzniká pokud autíčko zrychluje nebo zpomaluje a způsobuje tečnou setrvačnou sílu.

Pod pojmem setrvačná síla bude dále rozuměna tečná setrvačná síla a pod pojmem zrychlení tečné zrychlení. Odstředivá síla je podrobněji rozebrána v kapitole 2.1.2

Velikost setrvačné síly je dána vztahem

$$F_s = m \cdot a \quad (2.1)$$

$F_s$  ... setrvačná síla

$m$  ... hmotnost autíčka

$a$  ... zrychlení autíčka způsobené zrychlováním / brzděním

Tíhovou sílu můžeme spočítat

$$F_G = m \cdot g \quad (2.2)$$

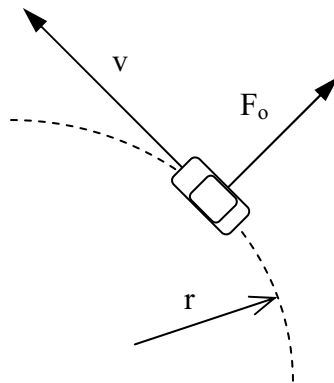
$F_G$  ... tíhová síla

$m$  ... hmotnost autíčka

$g$  ... tíhové zrychlení (  $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  )

### 2.1.2 Odstředivá síla

Odstředivá síla působí na autíčko při průjezdu zatáček a je způsobena dostředivým zrychlením, které působí do středu zátočiny. Odstředivá síla působí opačným směrem, tedy směrem ven ze zatáčky, viz. obr. 2.1



Obr. 2.1 Odstředivá síla

Její velikost můžeme určit ze vztahu

$$F_o = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (2.3)$$

$F_o$  ... odstředivá síla

$m$  ... hmotnost autíčka

$r$  ... poloměr zatáčky

$\omega$  ... úhlová rychlost

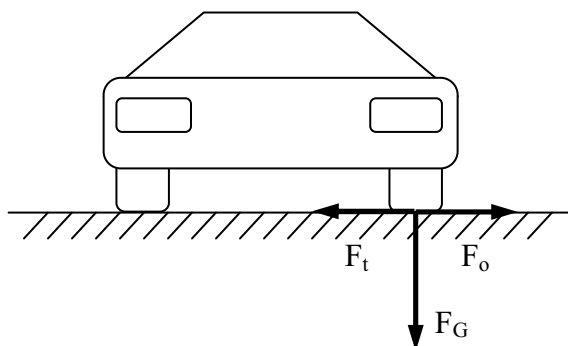
Úhlovou rychlost spočítáme podle vzorečku

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (2.4)$$

- $\omega$  ... úhlová rychlost
- $v$  ... rychlost autíčka
- $r$  ... poloměr zatáčky

### 2.1.3 Smyk

Smyk nastane tehdy, pokud síly působící na autíčko překročí třecí sílu. Třecí síla vzniká v místě styku kol s dráhou a působí proti směru působení síly.

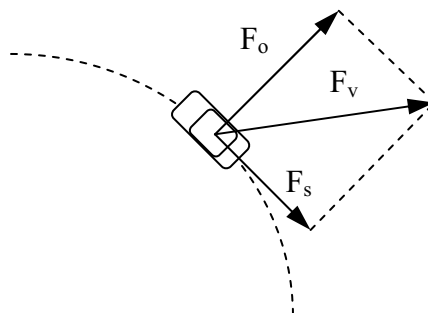


Obr. 2.2 Třecí síla

Jak bylo popsáno výše, na autíčko působí zejména odstředivá a setrvačná síla. Pokud na autíčko působí pouze setrvačná síla, tedy pokud autíčko brzdí nebo zrychluje, může dojít k prokluzu kol, ovšem nikoliv k vybočení z dráhy, neboť setrvačná – a tedy i opačně působící třecí síla – leží v ose dráhy.

Horší situace nastává, pokud autíčko projíždí zatáčkou. Zde musí třecí síla vyrovnávat odstředivou sílu. Viz. obr. 2.2. Pokud je odstředivá síla větší než třecí, autíčko dostane smyk, a protože odstředivá síla působí směrem ven ze zatáčky, autíčko z dráhy vyjede ven.

Nejhorší situace nastane, když autíčko projíždí zatáčkou a přitom brzdí nebo zrychluje, kdy na autíčko působí setrvačná i odstředivá síla. Výsledná síla pak vzniká složením setrvačné a odstředivá síly, viz. obr. 2.3.



Obr. 2.3 Síly působící v zatáčce

Přestože ven ze zatáčky působí pouze odstředivá síla, je třeba brát v potaz i setrvačnou sílu. Výsledná síla, vzniklá jejich složením, je vždy větší, než je samotná odstředivá síla. K prokluzu a následnému smyku tedy dojde i při menší rychlosti průjezdu zatáčkou.

Výsledná síla

$$F_v = \sqrt{F_o^2 + F_s^2} \quad (2.5)$$

$F_v$  ... výsledná síla

$F_o$  ... odstředivá síla

$F_s$  ... setrvačná síla

Velikost třecí síly můžeme určit ze vztahu

$$F_t = f \cdot F_G \quad (2.6)$$

$F_t$  ... třecí síla

$f$  ... součinitel smykového tření

$F_G$  ... tíhová síla

Složením rovnic 2.1 až 2.6 a podmínky, že odstředivá síla musí být menší než třecí, dojdeme k rovnici

$$f \cdot m \cdot g > \sqrt{\left(\frac{m \cdot v^2}{r}\right)^2 + (m \cdot a)^2} \quad (2.7)$$

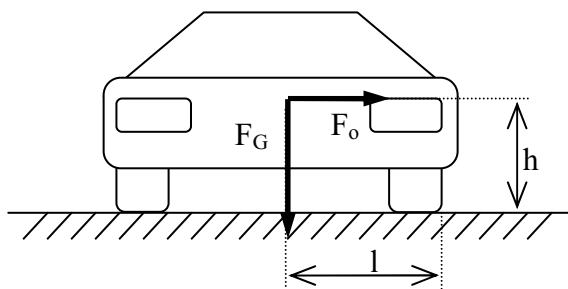
Její úpravou pak dostaneme maximální možnou rychlost autíčka v zatáčce, aby nedošlo ke smyku

$$v < r \cdot \sqrt{f^2 \cdot g^2 - a^2} \quad (2.8)$$

Maximální rychlost je tedy dána poloměrem zatáčky  $r$ , součinitelem smykového tření  $f$ , tíhovým zrychlením  $g$  a zrychlením autíčka v zatáčce  $a$ . Jelikož  $r$  je dán tratí,  $f$  je dán použitými (předepsanými) pneumatikami a  $g$  je konstanta, lze maximální rychlost průjezdu zatáčkou dosáhnout při nulovém zrychlení  $a$ , tj. při konstantní rychlosti průjezdu, jak již bylo poznamenáno výše.

#### 2.1.4 Překlopení

V zatáčce může také dojít k překlopení autíčka. A to tehdy, pokud klopný moment (daný odstředivou silou a výškou těžiště) překročí tíhový moment (daný tíhovou silou a vodorovnou vzdáleností mezi těžištěm a vnější hranou vnějšího kola v zatáčce), přitlačující autíčko k dráze. Viz obr. 2.4.



Obr. 2.4 Klopný moment

Matematicky vyjádřeno

$$F_o \cdot h < F_G \cdot l \quad (2.9)$$

$F_o$  ... odstředivá síla

$h$  ... výška těžiště autíčka od dráhy

$F_G$  ... tíhové zrychlení

$l$  ... vodorovná vzdálenost těžiště od vnější hrany vnějšího kola v zatáčce

Z rovnic 2.1, 2.2, 2.6 a 2.9 po úpravě dostaneme

$$v < \sqrt{\frac{g \cdot l \cdot r}{h}} \quad (2.10)$$

Maximální rychlost průjezdu zatáčkou, aby nedošlo k překlopení, je tedy dána tíhovým zrychlením  $g$ , výškou  $h$  a vzdáleností  $l$  těžiště od vnější hrany vnějšího kola a poloměrem zatáčky  $r$ . Jelikož  $r$  a  $g$  je dané, lze maximální rychlosti průjezdu dosáhnout snížením a posunem těžiště směrem do části autíčka, jež je blíže vnitřnímu okraji zatáčky. Jelikož ovšem není dopředu znám profil tratě a lze předpokládat, že trať bude obsahovat jak levotočivé, tak pravotočivé zatáčky, je nejvhodnější umístit těžiště v horizontálním směru do středu autíčka, kdy je vodorovná vzdálenost od obou kol největší, a co nejnižší.

## 2.2 Optimální způsob jízdy

Jak bylo v předchozí kapitole rozebráno, nejvíce limitující faktory působí na autíčko zejména při jízdě v zatáčkách. Byl navržen nejvhodnější způsob jejich průjezdu, a sice průjezd konstantní rychlostí a to maximální možnou. Jelikož většina parametrů není známa, není možné tuto rychlost jednoduše spočítat. Nejvhodnější řešení je tuto rychlost experimentálně určit na testovací dráze, jež bude sestavena z dílů dráhy určených pro stavbu zatáček.

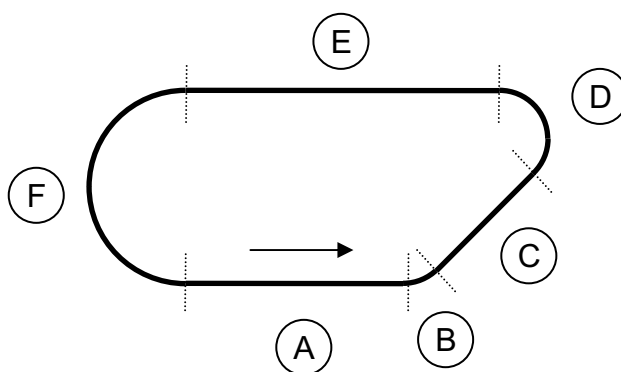
Podle zadání budou při soutěži použity dva druhy dílů zatáček, a to s poloměrem zatáčky 290 a 470 mm. Jelikož každý z těchto dílů obsahuje dvě dráhy pro autíčko (vnitřní a vnější) jsou zde celkem čtyři poloměry dráhy v zatáčkách. Je tedy možné určit čtyři maximální rychlosti, pro každý z poloměrů dráhy.

Jiným druhem jízdy je jízda v rovinkách. Zde nepůsobí žádné faktory, jež by způsobovaly vyjetí autíčka z dráhy, a tedy i rychlost je zde teoreticky neomezená. Nejvhodnější strategií pro jízdu v rovinkách je tedy maximální možné akcelerování. Limitujícími faktory jsou zde pouze výkon motoru a skluz (prokluz) pneumatik.

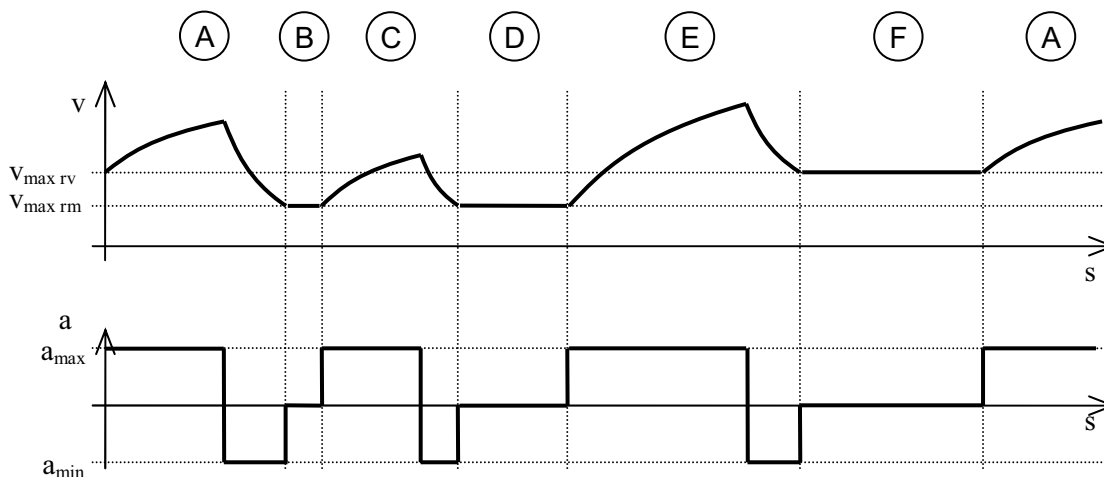
Prokluz pneumatik však zde na rozdíl od průjezdu zatáčkou nemůže způsobit vyjetí autíčka z dráhy. Průvodním jevem prokluzu je však chvění a protáčení kola, které se mohou nepříznivě projevit na senzorech autíčka. Chvění zejména pokud k měření profilu tratě bude použit akcelerometr, a prokluz kol tehdy, pokud by byl na této hnané nápravě umístěn snímač otáček. Pokud ovšem budeme prokluz akceptovat, je vhodné umístit otáčkoměr na nápravu, jež nebude hnaná a akcelerometr opatřit filtrem, jenž dokáže chvění potlačit.

Pokud bylo odvozeno, že nejvhodnější způsob průjezdu zatáčkami je jízda určitou maximální konstantní rychlostí, je třeba s touto skutečností počítat i co se jízdy v rovině týče, a na konci rovinky, před zatáčkou, začít v dostatečné vzdálenosti brzdit.

Příklad dráhy a optimální průběh rychlosti a zrychlení na této dráze je zobrazen na obr. 2.5 a obr. 2.6.



Obr. 2.5 Příklad dráhy



Obr. 2.6 Optimální průběh rychlosti a zrychlení na dráze z obr. 2.5

Z obrázku jsou vidět dvě úrovně maximální rychlosti pro dva různé poloměry (části dráhy  $B$ ,  $D$  – malý poloměr a  $F$  – velký poloměr) a akceleraci na rovinkách s brzděním před další rovinkou (části  $A$ ,  $C$  a  $E$ ).

## 2.3 Určení polohy na dráze

Abychom mohli navržený způsob jízdy autíčka použít, je třeba vědět, v jaké části tratě se autíčko v každé chvíli nachází. Jelikož je trasa dopředu neznámá, a autíčko musí být ve své jízdě zcela autonomní, je nutné, aby si dráhu nejprve zmapovalo. K tomu je třeba, aby si autíčko trasu nejméně jednou projelo.

Pro první kolo je vhodné zvolit konstantní rychlost, a to takovou, jako je maximální rychlost pro průjezd nejmenší možnou zatáčkou. Tím zaručíme, že autíčko nikde nevyjede z dráhy.

Zmapováním dráhy rozumíme přiřadit každému místu na dráze jeho profil, tedy jestli jde o rovinku nebo nějakou zatáčku, např. pomocí poloměru zatáčky daného místa (pro rovinku by byl nekonečný), nebo pomocí hodnoty odstředivé síly nebo zrychlení, jež v daném místě na autíčko působí (pro rovinku nulové).

Pokud si uvědomíme, že řízení autíčka musí být zcela autonomní, problém nastává v tom, jak určit, že autíčko již ujelo kolo a začíná další. Autíčko totiž nemůže zvenčí dostávat informaci, že právě projelo jedno kolo a dál už se bude profil dráhy opakovat. Je tedy třeba, aby dokázalo z naměřených hodnot určit, že jede další kolo.

Způsoby, jak toho dosáhnout, jsou v zásadě dva: zaznamenávání absolutní polohy autíčka v 2D prostoru, a pokud se objeví znovu na stejném místě, znamená to – za předpokladu, že na trati nejsou křížení nebo nadjezdy (což podle pravidel nejsou) – že

právě projelo kolo. Druhým způsobem je sledovat naměřený profil trati a zjišťovat, zda se již neopakuje.

Oba způsoby mají své výhody a nevýhody. Nevýhodou určování polohy autíčka v 2D prostoru je relativně malá přesnost, způsobená integrací chyby měření zatačení tratě. A pokud autíčko projíždí blízko místa, kde již jednou jelo – trať vede blízko sebe – může tento stav být vlivem této chyby v měření hodnot profilu tratě – zvláště pokud mezi tím ujelo větší vzdálenost – být vyhodnocen jako ujetí kola. Toto může být částečně kompenzováno přidáním hodnoty natočení autíčka k poloze v 2D, čímž lze eliminovat stav, kdy by autíčko projíždělo blízko již projeté tratě opačným směrem, ovšem zůstává problém, pokud autíčko projíždí poblíž již jednou jeté dráhy ve stejném směru.

Nevýhodou druhého způsobu je relativní náročnost na výpočetní výkon (výpočet autokorelace, ideálně v reálném čase) a možnost chybně vyhodnotit kolo za zaseté, pokud se v dráze vyskytnou opakující se úseky. Tento nedostatek lze ovšem částečně potlačit tím, že ze zadání soutěže známe rozsah délky tratě (10 – 16 m), a pokud by se profil tratě začal opakovat dříve, než po ujetí 10 m, nemůže tento stav být vyhodnocen jako ujetí kola a měření probíhá dál. Horší situace by nastala, pokud by se profil tratě nezačal opakovat ani po ujetí 16 m.

Pokud použijeme procesor, jenž bude schopen autokorelaci počítat, měl by být druhý způsob přesnější.

## 3 NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

### 3.1 Senzorový systém

Abychom mohli určit profil tratě, potřebného k sestavení optimálního jízdního plánu autíčka, jak bylo diskutováno v kapitole 2, musíme autíčko vybavit vhodnými snímači. K tomuto účelu je možné použít několik druhů snímačů. Je to zejména gyroskop, kompas, úhlový snímač polohy a akcelerometr.

Gyroskop by nám zajistil, že bychom v každém místě tratě znali její natočení vzhledem k počáteční poloze autíčka. Znali bychom tedy relativní tečný vektor směru tratě v každém jejím bodě. Pokud bychom chtěli vědět, zda je trať v daném místě rovná, nebo zatačí (znát poloměr zatačky), museli bychom spočítat z naměřených hodnot jejich diferenci podle polohy na trati.

Kompas by nám poskytl podobné hodnoty jako gyroskop, s tím rozdílem, že by hodnoty natočení nebyly vztaženy k počáteční poloze autíčka, ale k jeho absolutnímu natočení vzhledem k magnetickým pólům Země.

Úhlový snímač polohy - pokud bychom ho připojili tak, že by snímal úhel natočení vodícího členu autíčka vůči zbytku autíčka - by nám udával přímo profil tratě, tzn. změnu

natočení směrového vektoru tratě. Problémem zde ovšem je, že vodící člen autíčka má v drážce trati dosti velkou vůli, což by zatížilo naměřené hodnoty poměrně velkou chybou.

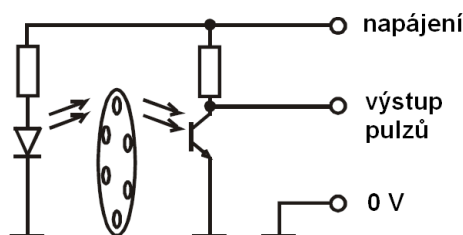
Výstupem akcelerometru by byly hodnoty zrychlení na trati. Z kapitoly 2.1.1 je zřejmé, že odstředivá síla (a tedy i odstředivé zrychlení) je funkcí mj. rychlosti a poloměru zatáčky. Pokud dáme dohromady rovnice 2.3, 2.4 a obecnou rovnici pro výpočet setrvačné síly (z rovnice 2.1), dostaneme

$$a_o = \frac{v^2}{r} \quad (3.1)$$

Z rovnice je patrné, že odstředivé zrychlení je závislé na rychlosti a poloměru zatáčky. Pokud tedy autíčko pojede první kolo konstantní rychlostí, je možné z naměřených hodnot zrychlení určit profil tratě.

Pokud bychom použili 2-osý (či 3-osý) akcelerometr, můžeme zjišťovat i hodnotu tečného zrychlení autíčka, což nám umožní pohlídat, aby vektorový součet zrychlení (po přepočtu součet sil) v rovině rovnoběžné s traťí – tedy odstředivého zrychlení (síly) a setrvačného zrychlení (síly) - byl menší než třecí síla. Použití akcelerometru se tedy jeví jako nevhodnější řešení.

Pokud chceme sestrojít profil tratě, musíme každou naměřenou hodnotu tečného vektoru směru tratě (nebo poloměru zatáčky) přiřadit určitému místu na trati. Polohu na trati můžeme určit několika způsoby. Nejjednodušší je využít otáčení kol a k nápravě připojit snímač. Pokud chceme poměrně přesně určit polohu na takovéto dráze, vzhledem např. k bodu, odkud autíčko odstartovalo, nabízí se jako řešení použít rotační optický inkrementální snímač polohy. Výstupem takového snímače je změna polohy oproti počátečnímu stavu. A to jak v kladném směru, tak v záporném. V našem případě však jízdu vzad nepředpokládáme. Díky tomu lze využít jednodušší způsob měření polohy, a to pomocí principu, jež se používá k měření rychlostí otáčení bez rozlišení směru. Ten spočívá v použití jednoduchého děrovaného kotouče, jež se otáčí mezi zdrojem světla a detektorem světla, viz obr. obr. 3.1.



Obr. 3.1 Princip činnosti optického otáčkoměru

K určení rychlosti otáčení se využívá měření času, jež proběhne mezi dvěma impulzy, případně měření počtu impulzů za určitý čas. Pokud známe počet impulzů na otáčku, můžeme spočítat rychlost otáčení. Pokud však známe i průměr kola, k jehož nápravě bude snímač připojen, můžeme lehce spočítat i ujetou dráhu. A sice tak, že obvod kola vydělíme počtem štěrbin v kotouči, a vynásobíme počtem pulzů. Mžeme tedy určit jak polohu na trati, tak i rychlost.

Jinými možnostmi zjištění polohy by byla dvojitá integrace výstupu akcelerometru měřící tečné zrychlení (neboť zrychlení je druhou derivací dráhy podle času), což však není příliš přesná metoda. Také by bylo možné využít snímačů pracujících na principu periodického snímání obrazu dráhy, a vyhodnocování jeho posunu mezi snímky (princip činnosti optické myši k PC). Zde by bylo možné využít již hotového snímače, např. právě z PC myši, ovšem bylo by třeba s ní komunikovat pomocí protokolu, nejjednodušeji PS/2. Princip komunikace je rozebrán v [11]. Nejelegantnějším se proto jeví způsob využít jednoduchý optický otáčkoměr, kdy stačí pomocí mikroprocesoru pouze čítat pulzy a časy mezi nimi.

### 3.2 Řízení motoru

K tomu, aby autíčko mohlo jet takovým způsobem, jak bylo navrženo, je nutné řídit moment motoru. V autíčku Faro Favorit je použitý stejnosměrný motor s konstantním buzením permanentními magnety. Jeho jmenovité napětí je 12 V a jmenovité otáčky 12 000 min<sup>-1</sup>.

Moment stejnosměrného motoru s konstantním buzením je přímo úměrný proudu, jenž jím protéká, a to podle rovnice

$$M(t) = c \cdot \Phi \cdot i(t) \quad (3.2)$$

$M(t)$  okamžitý moment motoru

$c$  ... konstanta stroje

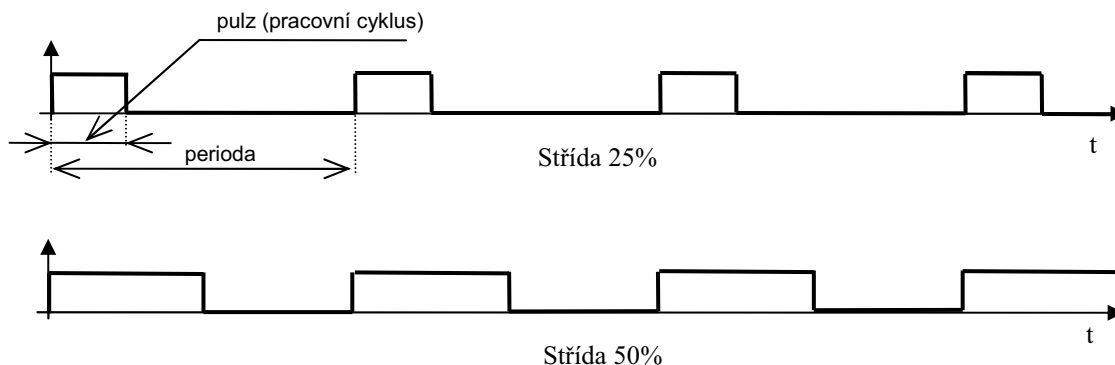
$\Phi$  ... budící tok stroje

$i(t)$  ... okamžitý proud motorem

Z toho plyne, že pokud chceme řídit moment motoru, potřebujeme řídit proud, jenž jím protéká. Řídit proud můžeme buďto plynule (např. pomocí tranzistoru), nebo lze s výhodou použít PWM regulaci. PWM regulace nabízí dvě výhody: Lze ji jednoduše

realizovat v mikroprocesoru bez použití D/A převodníků, a nedochází k výkonovým ztrátám na tranzistoru, jež vznikají, pokud tranzistor není plně otevřen nebo zavřen.

Princip PWM regulace (pulzně šířkové modulační) spočívá v generování periodických pulzů s volitelnou šířkou. Poměr šířky pulzu k délce periody udává tzv. střídu. Pokud je perioda dostatečně malá, pak změnou střídy lze regulovat relativně plynule chod motoru. Princip činnosti PWM regulace je na obr. 3.2.



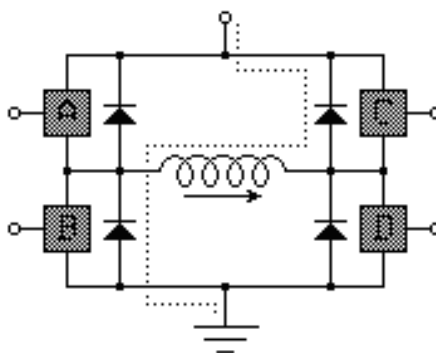
Obr. 3.2 Princip činnosti PWM regulace

Jelikož proud odebíraný motorem značně převyšuje to, kolik nám může poskytnout řídicí mikroprocesor, je potřeba použít výkonový prvek, jež bude proud do motoru v rytmu PWM spínat. Zde je možné použít buďto jednoduchého spínacího tranzistoru nebo H-můstku.

Při použití jednoho tranzistoru může být proud do motoru sepnut nebo rozepnut. To znamená, že buďto bude působit moment (a jemu úměrná síla) ve směru jízdy, nebo moment od motoru působit nebude, a autíčko bude brzdit vlivem různých odporů.

H-můstek umožňuje i určit, jakým směrem bude proud motorem protékat, a tedy i směr působení momentu. Můstek navíc dovoluje i zkratování vývodů motoru, což umožňuje brzdění motoru díky napětí, jež se v jeho kotvě indukuje vlivem otáčení. Lze tedy mnohem účinněji brzdit ve srovnání s jednoduchým spínacím tranzistorem. Navíc některé integrované H-můstky mají zabudována čidla proudu, jež nám umožňují jednoduše měřit proud motorem.

Schéma zapojení H-můstku je na obr. 3.3, režimy jeho činnosti pak v tab. 3.1.



Obr. 3.3 Schéma H-můstku

Horní levý spínač A	Spodní levý spínač B	Horní pravý spínač C	Spodní pravý spínač D	Motor
0	0	0	0	volně se otáčí
1	0	0	1	vpřed
0	1	1	0	vzad
0	1	0	1	brzda
1	0	1	0	brzda
<i>Vsvětlivka: 0 – spínač rozepnut, 1 – spínač sepnut</i>				

Tab. 3.1 Režimy činnosti H-můstku

### 3.3 Řídicí jednotka

Jako základ pro řídicí jednotku lze s výhodou použít desku od firmy Freescale. Její schéma zapojení je v příloze A. Deska je navržena pro mikroprocesor MC9S08JM32CLH, akcelerometr MMA7361L, můstek pro řízení motorů MCZ33887EK/R2, paměť EEPROM 24AA512, Schmidtův klopný obvod 74HC14DR2G, signalizační LED diody a další podpůrné obvody, potřebné pro správnou činnost těchto obvodů. Obsahuje také rozšiřující konektor pro připojení dalších zařízení.

#### 3.3.1 Mikroprocesor

Mikroprocesor MC9S08JM32CLH je 8-bitový mikroprocesor založený na jádru HCS08 s 32 kB paměti flash a 2 kB paměti RAM. Je vyroben v 64-pinovém pouzdře LQFP. Jádro je schopno pracovat na maximální frekvenci 48 MHz, přičemž periferie pracují na frekvenci poloviční.

Velikost paměti RAM a osmibitové jádro je ovšem pro aplikaci řízení autíčka, kde je třeba si pamatovat hodnoty profilu dráhy a počítat autokorelaci těchto hodnot, pro zjištění, zda autíčko jede další kolo (jak bylo naznačeno v kapitole 3.1), velmi limitující.

Jako výhodnější se jeví mikroprocesor MCF51JM128VLH, jež je pinově zcela kompatibilní, a obsahuje i stejné periferie. Jeho jádro ColdFire V1 je však 32-bitové a mikroprocesor obsahuje 128 kB paměti flash a 16 kB paměti RAM. Díky tomu, že jsou mikroprocesory pinově kompatibilní a mají i stejné periferie, je možné je zaměnit.

Procesor MCF51JM128VLH se skládá z těchto částí:

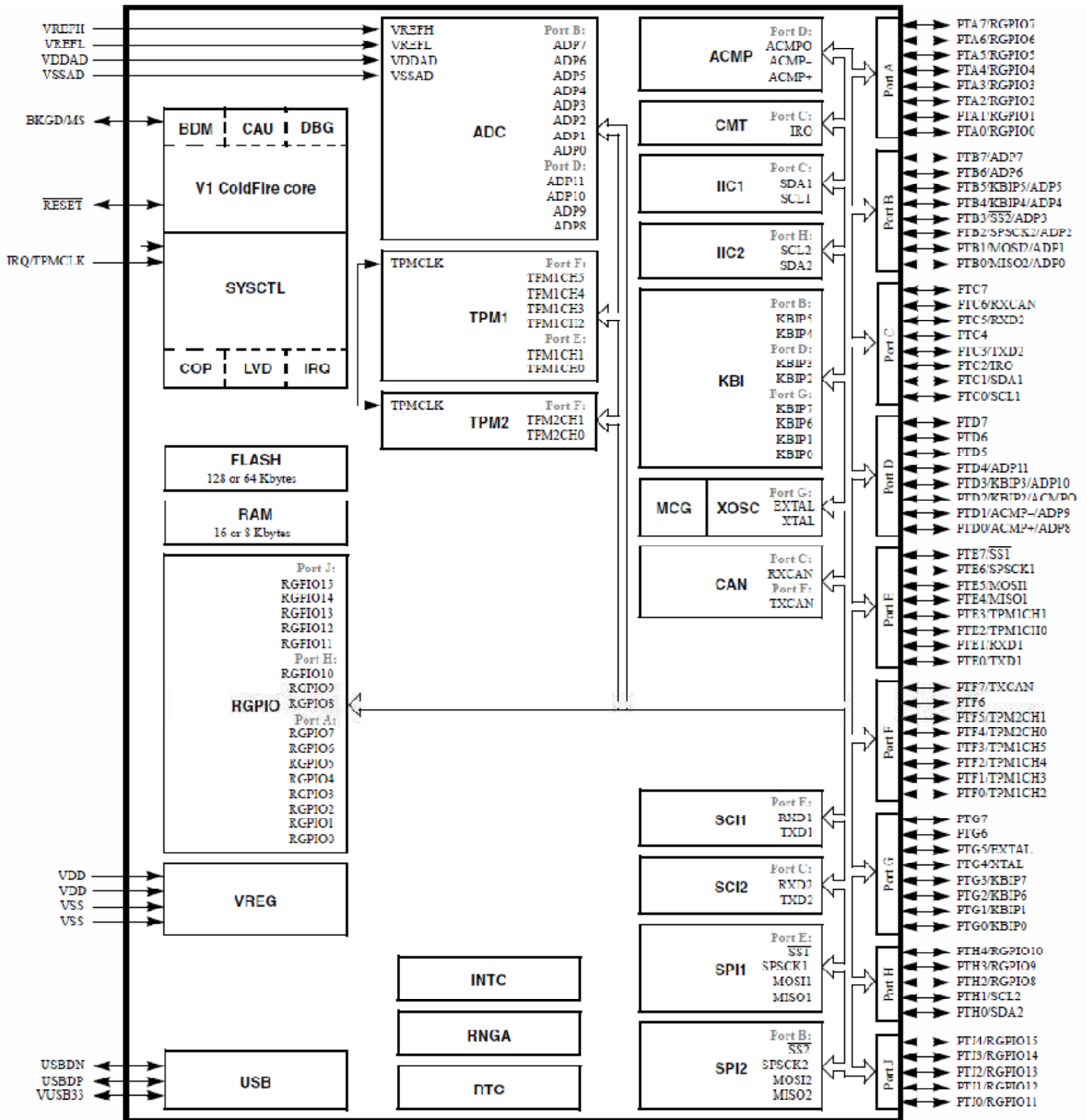
- CF1CORE (V1 ColdFire core) – jádro ColdFire V1
- BDM (background debug module) – 1-pinové rozhraní pro ladění
- DBG (debug) - rozhraní pro ladění a emulaci
- SYSCTL (system control) – jednotka řízení systému
- FLASH (flash memory) – flash paměť
- RAM (random-access memory) – paměť RAM
- RGPIO (rapid general-purpose input/output) - rychlý vstupně/výstupní port
- VREG (voltage regulator) – regulátor napětí pro mikroprocesor
- USB (USB On-The-Go) – USB port
- ADC (analog-to-digital converter) – A/D převodník
- TPM (timer/pulse-width modulators) – časovač/PWM modulátor
- CF1\_INTC (interrupt controller) – řadič přerušení
- CAU (cryptographic acceleration unit) – HW šifrovací jednotka
- RNGA (random number generator accelerator) – generátor náhodných čísel
- RTC (real-time counter) – hodiny/časovač reálného času
- ACMP (analog comparator) – komparátor
- CMT (carrier modulator timer) – modulátor signálu pro IR přenos
- IIC (inter-integrated circuits) – řadič I<sup>2</sup>C sběrnice
- KBI (keyboard interrupt) – řadič přerušení pro klávesnici
- MCG (multipurpose clock generator) – generátor hodin pro mikroprocesor
- Port I/O – univerzální vstupně/výstupní port
- XOSC (crystal oscillator) – krystalový oscilátor
- CAN (controller area network) – řadič sběrnice CAN
- SCI (serial communications interfaces) – řadič UART
- SPI (serial peripheral interfaces) – řadič sběrnice SPI

Blokové schéma procesorů rodiny MCF51JM128 je na Obr. 3.4

Z hlediska použití v řídicím systému autíčka jsou důležité zejména periferie Port I/O (univerzálně použitelné logické vstupy a výstupy), ADC (pro zpracování signálů ze senzorů) a TPM (pro řízení motoru a pro časování).

**Port I/O**

Procesor MCF51JM128VLH je vybaven 7 vstupně/výstupními porty (*Port A – Port G*), z nichž většina je 8-bitová. Celkem je k dispozici 51 V/V pinů. Většina z těchto pinů je sdílena s ostatními periferiemi. Piny mohou být nastaveny jako vstupní nebo výstupní. Některé z pinů portu B, D a G mohou generovat přerušení při změně logické úrovně nebo při přítomnosti nastavené logické úrovně na pinu.



Obr. 3.4 Blokové schéma procesorů rodiny MCF51JM128

## TPM

Procesor obsahuje dva bloky TPM: TPM1 a TPM2. Blok TPM1 obsahuje 6 kanálů a TPM2 obsahuje 2 kanály 16-bitových čítačů. Vstupním signálem pro čítače může být frekvence periferní sběrnice nebo externí signál synchronizovaný s frekvencí sběrnice. Frekvence vstupního signálu může být snížena vydělením  $2^n$ , kde  $n = 0 \div 7$ .

Každý z kanálů může pracovat v následujícím módu:

- **Input capture**

V tomto módu, pokud se na vybraném pinu objeví určitá událost, se aktuální hodnota čítače kanálu překopíruje do registru periferie, a nastane přerušení (pokud je povoleno).

Zvolená událost může být:

- náběžná hrana signálu
- sestupná hrana signálu
- libovolná hrana signálu

- **Output compare**

Pokud je zvolen output compare mód, pak, pokud hodnota v čítači kanálu dosáhne hodnoty uložené v registru, se na vybraném pinu objeví určitá událost a objeví se přerušení (je-li povoleno).

Událostí může být:

- nastavení logické úrovně na 0
- nastavení logické úrovně na 1
- změna logické úrovně
- ponechání výstupu beze změny (při použití jako SW časovač)

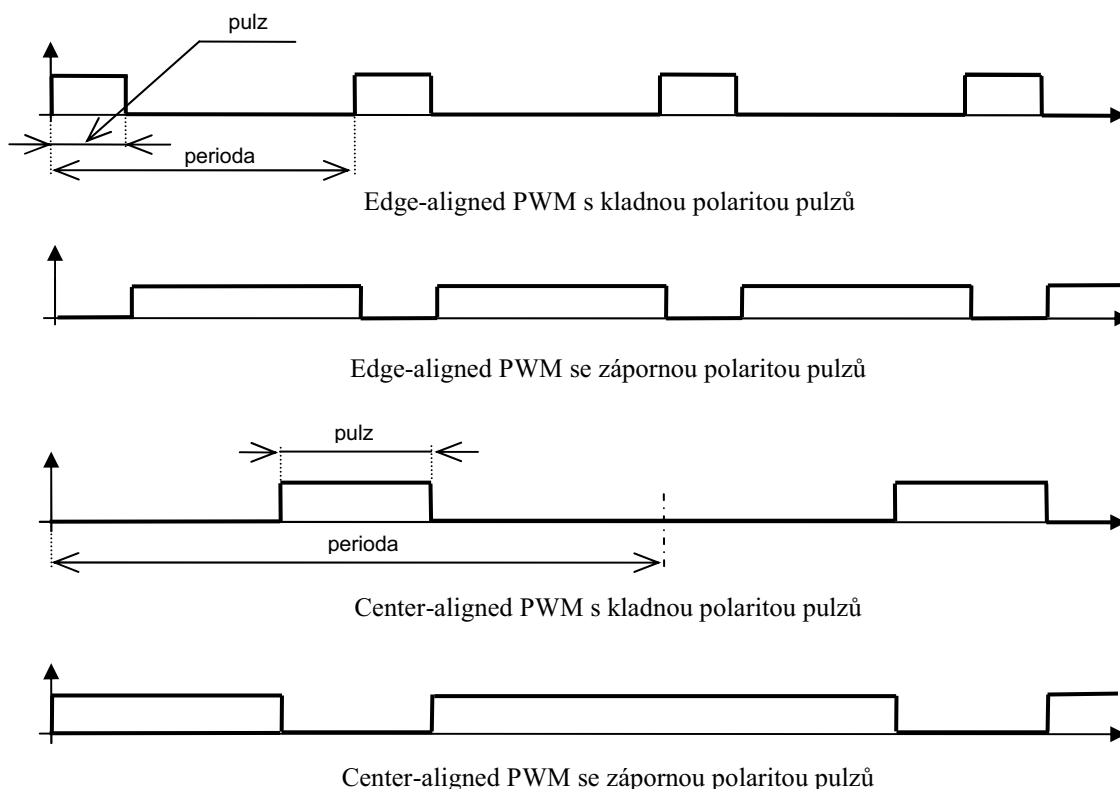
- **Edge-aligned PWM**

Mód *edge-aligned PWM* generuje signál pulzně šířkové modulace se zarovnáním pulzů na začátek periody. Délku pulzu určuje hodnota uložená v registru. Pulzy mohou být libovolné polarity.

- **Center-aligned PWM**

V módu *center-aligned PWM* probíhá generování signálu pulzně šířkové modulace se zarovnáním pulzů na střed periody. Délku pulzu určuje dvojnásobek hodnoty uložené v registru a perioda je také dvojnásobná. Pulzy mohou být libovolné polarity.

Možné průběhy PWM signálu jsou zobrazeny na obr. 3.5.



Obr. 3.5 Možné průběhy signálu PWM (střída 25%)

## ADC

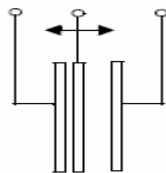
A/D převodník je 12-bitový a obsahuje 28 přepínatelných vstupů a z pouzdra vyvedené piny pro nastavení referenčních napětí. Může pracovat v kontinuálním nebo jednorázovém měření, a převod může být spuštěn softwarově nebo pomocí spouštěcího pinu. Přesnost převodu lze nastavit na 8, 10 nebo 12 bitů. Po převodu může převodník generovat přerušení. Přesnost převodníku je  $\pm 1/2$  lsb v 8 a 10-bitovém módu, a 2 lsb v 12-bitovém módu. Převodní funkce je monotónní a neobsahuje chybějící kódy.

### 3.3.2 Akcelerometr

Akcelerometr MMA7361L je 3-osý akcelerometr s vysokou citlivostí a přepínatelnými rozsahy  $\pm 1,5$  g a  $\pm 6$  g.

Pracuje na principu seizmické hmotnosti, umístěné na pohyblivé elektrodě, jež spolu s dalšími dvěma pevnými elektrodami umístěnými z obou stran kolem něj (pro každou osu) tvoří dva navzájem svázané kondenzátory. Při působení zrychlení se seizmická hmotnost působením setrvačné síly posune směrem působení síly, čímž se vzdálenost pohyblivé elektrody k jedné pevné elektrodě zmenší a k druhé pevné elektrodě zvětší.

Jelikož kapacita kondenzátorů je závislá na vzdálenosti elektrod, rozdíl kapacit kondenzátorů udává velikost a směr působící síly, a tedy i zrychlení. Princip činnosti je zobrazen na obr. 3.6.



Obr. 3.6 Princip činnosti akcelerometru

Rozsahy akcelerometru je možné přepínat pomocí logické úrovně na jeho vstupu g-select. Výstupní napětí, úměrné působícímu zrychlení, je pro jednotlivé osy vyvedeno na výstupy  $X_{out}$ ,  $Y_{out}$  a  $Z_{out}$ . Při nulovém působícím zrychlení je na těchto výstupech 1,65 V při napájecím napětí 3,3 V. Napájecí napětí lze použít v rozsahu 2,2 – 3,6 V. Se zvyšujícím se napájecím napětím se výstupní napětí odpovídající 0 g úměrně zvyšuje a naopak. Citlivost akcelerometru je 800 mV/g při rozsahu  $\pm 1,5$  g a 206 mV/g při rozsahu  $\pm 6$  g. Citlivost se také úměrně zvyšuje a snižuje se změnou napájecího napětí. Frekvenční rozsah akcelerometru je 400 Hz pro osy X a Y a 300 Hz pro osu Z (vertikální osa).

### 3.3.3 H-můstek

H-můstek MCZ33887EK/R2 lze použít pro řízení indukčních zátěží, jako jsou stejnosměrné motory, s trvalou zatížitelností až 5 A. K řízení lze použít PWM modulaci s frekvencí až 10 kHz. Můstek poskytuje informaci o proudu odebíraném zátěží a také informaci o chybovém stavu, jakým může být přetížení, přehřátí nebo nízké napájecí napětí můstku.

K řízení můstku je použito 5 vstupů: EN, IN1, IN2, D1 a D2 a můstek je vybaven 4 výstupy: OUT1, OUT2, FB a FS. Vstup EN slouží k přepnutí zařízení do provozního režimu nebo do režimu „spánku“ (nízkého odběru). Vstupy IN1 a IN2 slouží k ovládní výstupů OUT1 a OUT2. Logické úrovně přivedené na vstupy se objeví na výstupech. Vstupy D1 a D2 slouží k přepnutí výstupů do stavu vysoké impedance (stav „odpojeno“). Jejich funkce je totožná: Aktivováním libovolného z nich dojde k odpojení obou výstupů. Liší se pouze logickou úrovní ovládacího signálu. Zatímco vstup D1 odpojí výstupy tehdy, pokud je na něm log. 1, vstup D2 odpojuje výstupy při log. 0. Výstup FS, pokud se na něm objeví log. 0, signalizuje chybový stav můstku, a výstup FB poskytuje proudovou zpětnou vazbu zátěže. Teče z něj proud odpovídající 1/375 proudu odebíraného zátěží.

Možné stavy můstku jsou uvedeny v tab. 3.2.

Stav	Vstupy					Stavový výstup	Pracovní výstupy	
	EN	D1	D2	IN1	IN2	FS	OUT1	OUT2
Polarita výstupu A	H	L	H	H	L	H	H	L
Polarita výstupu B	H	L	H	L	H	H	L	H
Oba prac. výstupy na log. 0	H	L	H	L	L	H	L	L
Oba prac. výstupy na log. 1	H	L	H	H	H	H	H	H
Aktivace D1	H	H	X	X	X	L	Z	Z
Aktivace D2	H	X	L	X	X	L	Z	Z
Odpojení IN1	H	L	H	Z	X	H	H	X
Odpojení IN2	H	L	H	X	Z	H	X	H
Odpojení D1	H	Z	X	X	X	L	Z	Z
Odpojení D2	H	X	Z	X	X	L	Z	Z
Nízké nap. napětí	H	X	X	X	X	L	Z	Z
Přehřátí	H	X	X	X	X	L	Z	Z
Zkrat	H	X	X	X	X	L	Z	Z
Deaktivace EN („spánek“)	L	X	X	X	X	H	Z	Z
Odpojení EN	Z	X	X	X	X	H	Z	Z

Vysvětlivky: H – log. 1, L – log. 0, X – libovolný stav, Z – vysoká impedance, Polarita výstupu A – na výstupu OUT1 je kladné napětí, na výstupu OUT2 nulové, Polarita výstupu B – na výstupu OUT2 je kladné napětí, na výstupu OUT1 nulové

Tab. 3.2 Stavby H-můstku

### 3.4 Celkový návrh systému

Celkové blokové schéma navrženého řídicího systému je zobrazeno na obr. 3.7. Jádrem řídicího systému je mikroprocesor, k němuž jsou připojeny potřebné obvody.

Otáčkoměr sloužící ke snímání rychlosti otáčení kol a počítání ujeté vzdálenosti je připojen přes rozšiřující konektor desky k V/V portu procesoru.

Akcelerometr je použit k měření sil působících na autíčko. Výstupy akcelerometru pro každou osu jsou připojeny k A/D převodníku mikroprocesoru, a z V/V portu procesoru je přiveden signál k nastavení měřícího rozsahu akcelerometru.

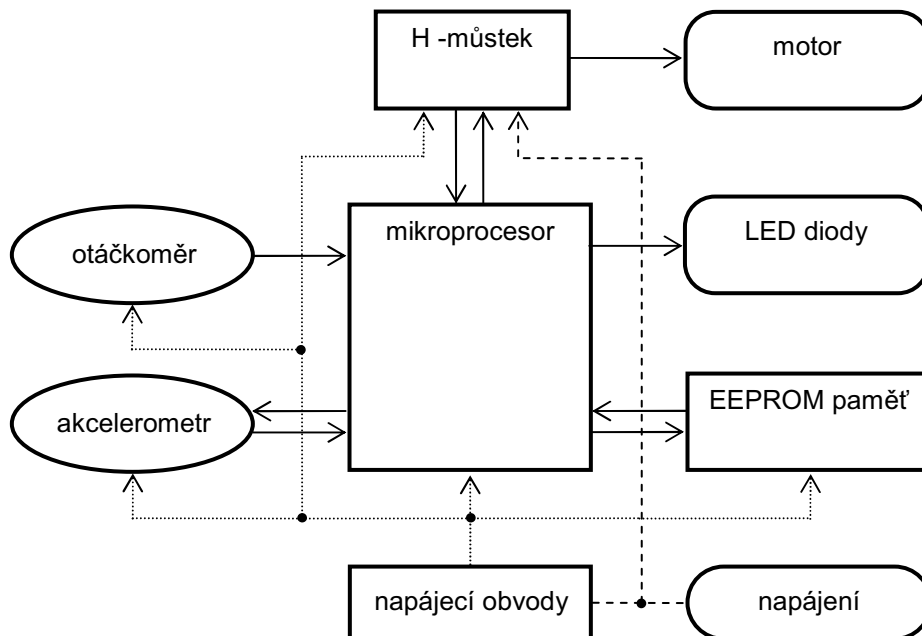
H-můstek tvoří „most“ mezi mikroprocesorem a motorem. K motoru je připojen jeho dvěma výstupy OUT1 a OUT2. Vstupní signály pro jeho ovládání (IN1, IN2, D1, D2 a EN) jsou připojeny na V/V port mikroprocesoru, kam je také přiveden signál informující o stavu můstku. Proudový výstup můstku, sloužící k měření proudu odebíraného motorem, je

pomocí rezistoru převeden na napěťový signál, a ten je zpracován A/D převodníkem mikroprocesoru.

Paměť EEPROM slouží k uchování rozsáhlejších struktur naměřených dat po odpojení napájení, jež mohou být použity zejména při ladění optimální jízdy autíčka.

LED diody, jež mohou být použity k signalizaci stavu autíčka, jsou připojeny k V/V portu procesoru.

Napájení celého systému je z dráhy autíčka. Pro veškeré obvody je napájení usměrněno a stabilizováno. K napájení motoru je použito napětí z dráhy, jež je pouze usměrněno a filtrováno.



Obr. 3.7 Blokové schéma navrženého řídicího systému

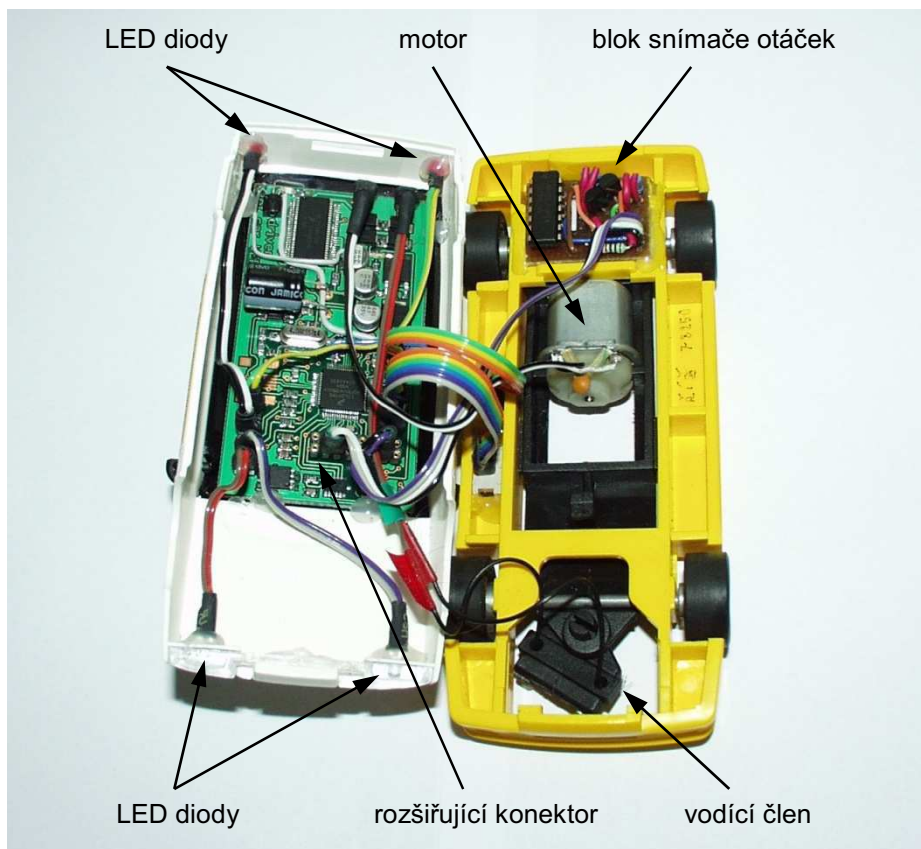
## 4 REALIZACE ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU

### 4.1 Řídící jednotka

Řídící jednotka je dle návrhu založena na desce fy. Freescale, avšak s malými úpravami. Jde zejména o vyvedení sériové linky na BDM konektor a výměnu procesoru.

V první verzi autíčka byl použit mikroprocesor HCS08JM60 - neboť navržený výhodnější MCF51JM128 nebyl zpočátku k dispozici. Ukázalo se však, že obava, že nebude výpočetně stačit k počítání korelace – metody, která byla vybrána k rozpoznávání kola – byla oprávněná. Procesor nebyl schopen ani po několika minutách korelaci spočítat. Simulace v programu Freescale Code Warrior ukázala, že MCF51JM128 by měl být schopen korelaci spočítat během přibližně 4 sekund. Po výměně procesoru a následujících praktických testech byla doba počítání korelace o něco delší. To bylo způsobeno přerušeními, jež slouží k obsluze snímače rychlosti a k vykonávání jiných obslužných činností, jež nebyly v simulaci zahrnuty. Doba výpočtu však byla stále v řádu jednotek sekund, což je dostačující.

Co se mechanického provedení týče, deska s řídicí jednotkou je připevněna z vnitřní části karoserie autíčka, jak je patrné z obr. 4.1. K desce jsou pomocí kabelů připojeny přepínač, snímač otáček a motor, jež se nacházejí na podvozku, a LED diody, které jsou vlepny do vyvrtaných děr v karoserii v místě světel. K desce je také přivedeno napájení z vodícího členu. Veškeré kabely jsou připojeny přes konektory, což umožňuje v případě potřeby jednoduché vyjmutí desky nebo jednotlivých komponent.

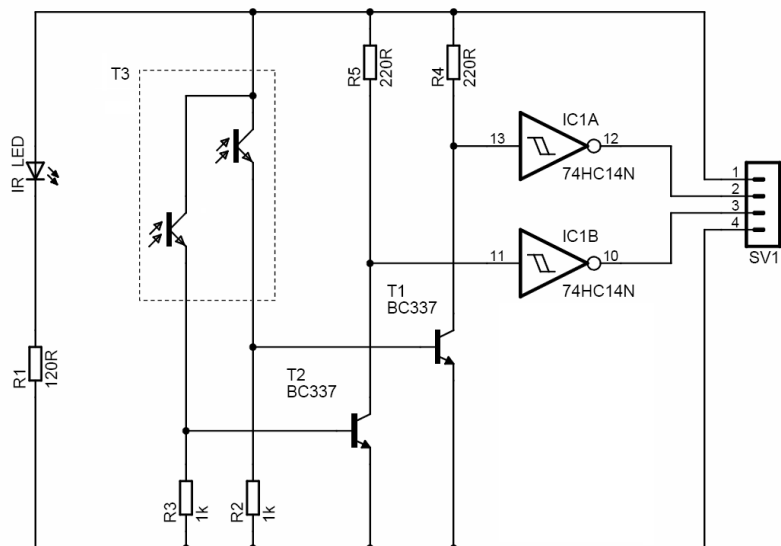


Obr. 4.1 Pohled dovnitř autíčka

## 4.2 Snímač otáček

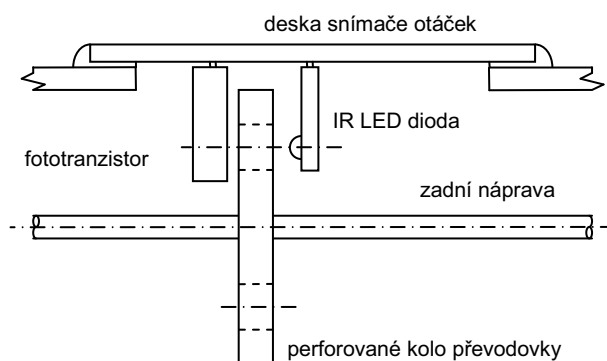
Ke snímání otáček byl použit navržený princip s relativním optickým enkodérem. Za tímto účelem byla navržena rozšiřující deska. Její schéma je na obr. 4.2. Je zde použita IR fotodioda a dvojitý fototranzistor z kuličkové PC myši. Tranzistory T1 a T2 slouží k zesílení signálu z fototranzistoru a IO 74HC14, což je Schmidtův klopný obvod, slouží k zavedení hystereze, aby docházelo k spolehlivé detekci pulzů bez zákmitů.

Deska snímače otáček je připojena pomocí plochého čtyřžilového kabelu k rozšiřujícímu konektoru řídicí jednotky. Napájení rozšiřující desky (pin 1 konektoru rozšiřující desky) je přivedeno na pin 3 konektoru řídicí jednotky, který poskytuje napájecí napětí +5V a zem je přivedena na zemnicí pin (označeny číslem 4 na obou deskách). Signálové vodiče (piny č. 2 a 3 na rozšiřující desce), jejichž logická úroveň odpovídá sepnutí nebo rozepnutí příslušného fototranzistoru, jsou připojeny na piny 12 a 14 na desce řídicí jednotky, na nichž jsou vyvedeny vstupy/výstupy bloku TPM mikroprocesoru.



Obr. 4.2 Schéma zapojení rozšiřující desky snímače otáček

Rozšiřující deska snímače otáček je provedena na univerzální desce plošných spojů. Je připevněna pomocí tavného lepidla k podvozku autíčka nad zadní nápravou. Osazení desky je oboustranné, a to tak, že většina součástek mimo IR LED a fototranzistor jsou osazeny z horní strany. IR LED dioda a fototranzistor jsou umístěny na spodní části desky, a sice tak, aby se nacházely z obou stran talířového kola převodovky, v místě, kde do něj byly vyvrtány otvory, jak ukazuje obr. 4.3. Kolo převodovky je provrtané na osmi místech po obvodě - celý snímač tedy poskytuje 8 pulzů na otáčku.



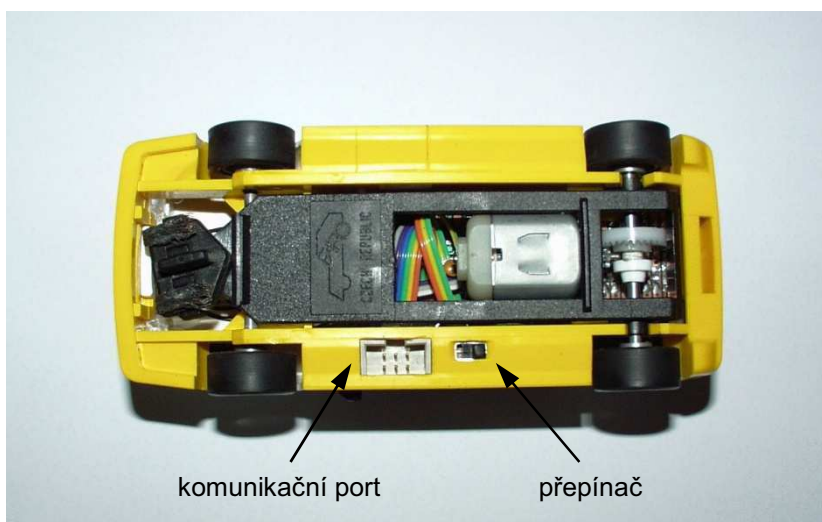
Obr. 4.3 Provedení snímače otáček

### 4.3 Rozhraní autíčka

Ke komunikaci autíčka s okolím slouží přepínač, komunikační port a LED diody.

Přepínač je umístěn zespodu autíčka a slouží k výběru rychlostního módu. Při přepnutí do přední polohy jsou zvoleny vyšší rychlosti, v zadní poloze nižší. Použití přepínače je podrobněji popsáno v kapitole 5.

Komunikační port je vyveden na šesti pinový konektor na spodní část autíčka vedle přepínače, viz. obr. 4.4.



Obr. 4.4 Spodní pohled na autíčko

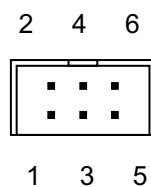
V původní verzi autíčka, kde byl použit procesor MCS08JM60, byl tento konektor využit jako programovací a ladící (BDM) rozhraní procesoru. Jeho provedení bylo takové, aby odpovídalo konektoru modulu OSBDM. Ten je šesti pinový, z čehož pouze čtyři piny jsou využity. OSBDM modul umožňoval jak programování a ladění programu, tak i vyčítání hodnot z EEPROM paměti.

Po přechodu na procesor MCF51JM128 však bylo zjištěno, že OSBDM modul neumožňuje při použití tohoto procesoru vyčítat data z EEPROM paměti. Bylo tedy vymyšleno takové řešení, že data budou včítána přes asynchronní sériovou linku, jíž je tento procesor vybaven, a tato sériová linka byla vyvedena na nevyužité piny konektoru. Toto řešení umožňuje využívat nadále jeden konektor jak k programování, tak k vyčítání hodnot.

Zapojení konektoru je uvedeno na obr. 4.5 a v tabulce tab. 4.1. Pin č. 3 konektoru (výstup sériové linky) byl na desce propojen na pin č. 13 procesoru (TXD) a pin č. 5 konektoru (vstup sériové linky) byl propojen na pin č. 14 procesoru (RXD). Oba náleží bloku SCI.

Číslo pinu	Signál	Použito při připojení OSBDM modulu	Použito při vyčítání dat z autíčka
1	Jedno-pinové ladící rozhraní	X	
2	Zem	X	X
3	Výstup sériové linky		X
4	Reset	X	
5	Vstup sériové linky		X
6	Napájení +5 V	X	X

Tab. 4.1 Zapojení konektoru autíčka



Obr. 4.5 Číslování pinů konektoru autíčka

## 5 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

Řídící program v mikroprocesoru má na starosti tyto úkoly:

- Inicializace procesoru
- Zpracování hodnot z akcelerometru
- Nalezení počátku kola
- Synchronizace mezi koly
- Volba rychlosti
- Řízení motoru
- Obsluha externí paměti EEPROM
- Komunikace s PC

Z hlediska logického uspořádání lze program rozdělit na:

- Startovací část
- Hlavní smyčka
- Obsluhy přerušení
- Podprogramy

### 5.1 Startovací část

Startovací část programu se začne vykonávat ihned po startu procesoru – tedy po přivedení napájecího napětí k autíčku.

První na řadě je inicializace procesoru. Jádro procesoru je zde nastaveno na pracovní frekvenci 48 MHz a sběrnice na 24 MHz.

Další částí je definování vstupních a výstupních pinů procesoru.

Následuje konfigurace periférií. Blok TPM1 je nastaven na generování PWM signálu typu „Center-aligned“ (viz. kapitola 3.3.1, popis módů TPM) s frekvencí 2 kHz, jež je použit k řízení motoru. Po proběhnutí jedné periody je také generováno přerušení, čehož je využito k periodickému spouštění některých částí programu. Blok TPM2 je nastaven jako čítač typu „Input capture“. Vstupem jsou mu pulzy z otáčkoměru a perioda čítání je 5,3  $\mu$ s. Slouží k měření rychlosti a ujeté vzdálenosti.

Další v pořadí je nastavení bloku ADC, který umožňuje převádět na digitální signál výstupy akcelerometru ve všech třech osách. ADC je konfigurován na 8 bitové rozlišení a kontinuální vzorkování. První vzorek je k dispozici za 26,9  $\mu$ s a každý další pak za 24,7  $\mu$ s. Převedení vzorku také vyvolá žádost o přerušení.

Poslední částí inicializace periférií je nastavení sérové linky - bloku SCI. Ta je nastavena na rychlost 115,2 kpbs, délku znaků 8 bitů, bez parity a s jedním stop bitem.

Po inicializaci procesoru a jeho periférií následuje volba citlivosti akcelerometru na hodnotu 1,5 g, nastavení střídavy PWM na nulu (nulové napětí na motoru) a zapnutí H-můstku. Poté jsou na základě polohy přepínače nastaveny rychlostní proměnné. Ty jsou, jak je popsáno dále, dvě: Pro rovinku a zatačku. Je-li přepínač v přední poloze, jsou do těchto proměnných přiřazeny větší hodnoty (vyšší rychlost), je-li v zadní poloze, je zvolen konzervativnější rychlostní mód v podobě přiřazení nižších rychlostí.

Dále se autíčko přepne do jednoho ze dvou provozních módů: jízda nebo vyčítání hodnot z paměti do PC. To se provede na základě polohy autíčka. Pokud je autíčko otočené na střechu, přepne se do vyčítacího módu a začne posílat do PC po sériové lince data z EEPROM paměti. Je-li v normální poloze (podvozkiem dolů), přepne se do módu jízdy a nastaví se příznak informující, že se jede první kolo.

Zjištění, na v jaké poloze se autíčko nachází, je určeno z hodnoty zrychlení v ose Z (osa kolmá na rovinu podvozku autíčka), která odpovídá tíhovému zrychlení. Po vykonání všech uvedených úkonů se program přesouvá do hlavní smyčky.

## 5.2 Hlavní smyčka

Hlavní smyčka je rozdělena do dvou částí, a to podle toho, v jakém provozním módu se autíčko nachází.

Je-li autíčko v jízdním módu, provádí se v této části programu výpočet korelace z naměřeného profilu tratě, která slouží k určení, zda autíčko jede další kolo. (Jak se sestavuje profil tratě je popsáno v kapitole 5.3.3.) Korelace se začíná počítat v okamžiku, kdy autíčko ujede určitou vzdálenost. Ta musí být taková, aby autíčko bylo schopné spolehlivě určit opakování se profilu tratě. Toho je možné dle pokusů na testovacích tratích spolehlivě dosáhnout po ujetí přibližně 1,4 násobku nejdelšího možného kola. To podle zadání může mít 16 m. Jak již bylo uvedeno, vzdálenost je určována na základě pulzů od snímače otáček. Jelikož na jednu otáčku připadá 8 pulzů a obvod kola je 6 cm, odpovídá jeden pulz od snímače v tomto případě ujeté vzdálenosti 0,75 cm. Pokud tedy maximální délka tratě činí 16 m, začíná se korelace počítat po 3 000 pulzech od snímače.

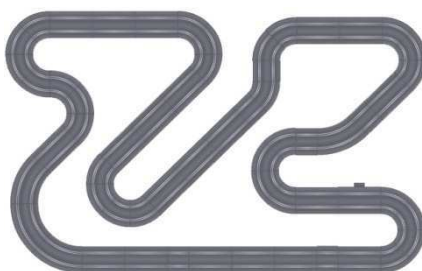
Vzorec, podle něžž program autokorelaci počítá, je

$$R_{xx}[k] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^N x[n] \cdot x[n+k] \quad (5.1)$$

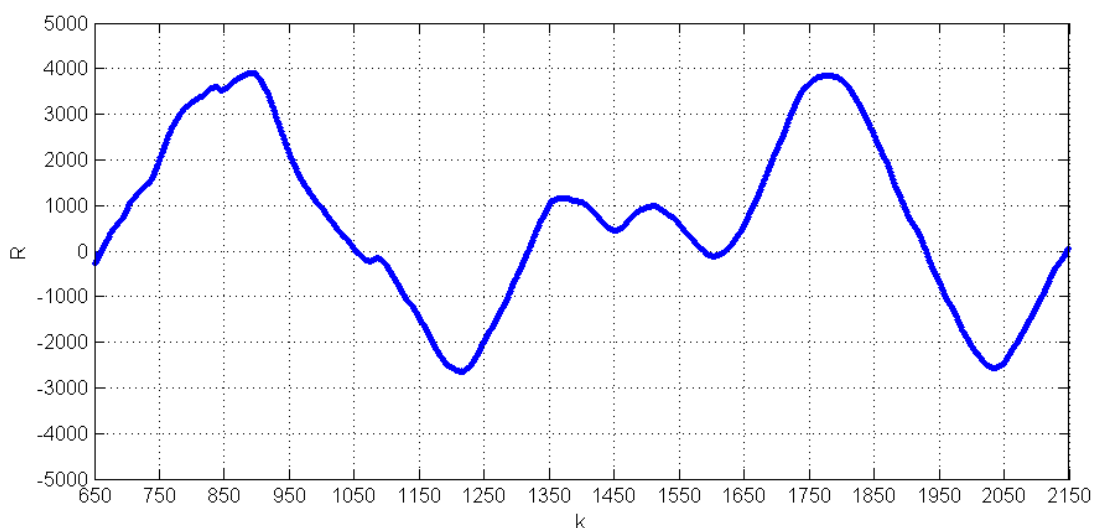
$R_{xx}[k]$  ... koeficient korelace pro posunutí signálu o  $k$

$x[n]$  ... vzorek na pozici  $n$

Korelace se počítá nad jedním průběhem – profilem tratě – jde tedy vlastně o autokorelaci. Protože podle pravidel známe nejmenší možnou délka kola (10 m) - tedy vzdálenost, do které se profil trati nemůže začít opakovat - nepočítá se korelace pro posunutí od nuly, ale od hodnoty  $k = 650$  (650 pulzů odpovídá přibližně 10 m). Tím je dosaženo snížení doby výpočtu korelace. Průběh korelační křivky pro dráhu z obr. 5.1 je vidět v grafu na obr. 5.2.



Obr. 5.1 Testovací dráha



Obr. 5.2 Korelační křivka

Po výpočtu korelace je nalezeno maximum korelační funkce, jehož poloha odpovídá délce kola. Z grafu je patrné, že v tomto případě maxima korelační křivka nabývá pro hodnotu posunutí o 891 pulzů. Délka kola je tedy 981 pulzů (14,715 m).

(V grafu je také vidět druhý vrchol pro posunutí o 1 778 pulzů, tedy odpovídající dvojnásobné délce kola. To je způsobeno tím, že profil tratě se neopakuje jen každé kolo, ale i taktéž i každé dvě kola atd. Jinými slovy, celou 10-ti kolovou trať můžeme vidět jako 10 x opakující se stejnou dráhu, ale stejně tak například jako 5x opakující se dráhu dvojnásobné délky.)

V tomto okamžiku je již tedy známa délka kola. Nyní je třeba určit, kde přesně se autíčko v tomto intervalu, odpovídajícímu délce kola, nachází. Tato poloha odpovídá zbytku po celočíselném vydělení celkové ujeté vzdálenosti délkou kola. Neboli po odečtení všech do té doby projetych kol. Po provedení těchto operací se vynuluje příznak prvního kola.

Ve smyčce probíhá také testování, zda jsou připraveny hodnoty pro zápis do EEPROM – zda je naplněn jeden ze zásobníků (ten, který je nyní aktuální pro zápis) určených pro uložení hodnot do EEPROM. Pokud ano, nastaví se druhý z nich jako aktuální pro zápis a původní zapíše do EEPROM. Funkce, jakými je možné připravit data k zápisu do EEPROM, jsou popsány v kapitole 5.4.

Pokud se autíčko nachází ve vyčítacím módu, procesor začne po zhruba 3 sekundách od zapnutí po sériové lince posílat data, jež vyčítá z paměti EEPROM. Data jsou posílána po jednotlivých bajtech, kdy odeslaný bajt obsahuje přímo hodnotu uloženou v EEPROM. Tento přístup, kdy odeslané znaky mohou nabývat všech hodnot v rozmezí 0 - 255, znamená mírně složitější řešení na straně příjemce, tj. PC, kdy je třeba použít terminál, jež je schopen přijmout jakoukoliv hodnotu, nejen tisknutelných znaků. Avšak nabízí větší rychlost přenosu - a to až 4x - což je výhodné při odladování programu, kdy je třeba stahovat data poměrně často. Stahování obsahu celé EEPROM (tj. 512kb) tímto způsobem tak trvá 11 sekund. Pokud bychom použili posílání dat pouze pomocí tisknutelných znaků, trvalo by vyčítání téměř  $\frac{3}{4}$  minuty.

Jako vhodný terminál k příjmu dat se ukázal program Advanced Serial Port Monitor, který je schopen přijmout všechny znaky, zobrazit je v uživatelsky definované formátu a také zapsat do souboru. Program navíc může běžet na pozadí, což umožňuje dosáhnout stavu, kdy po připojení autíčka k PC se v počítači automaticky vytvoří nový soubor, a do něj se zapíše stahovaná data, např. ve formátu čísel oddělených čárkou. Ten je schopna přímo zpracovat většina programů, např. Matlab nebo Excel.

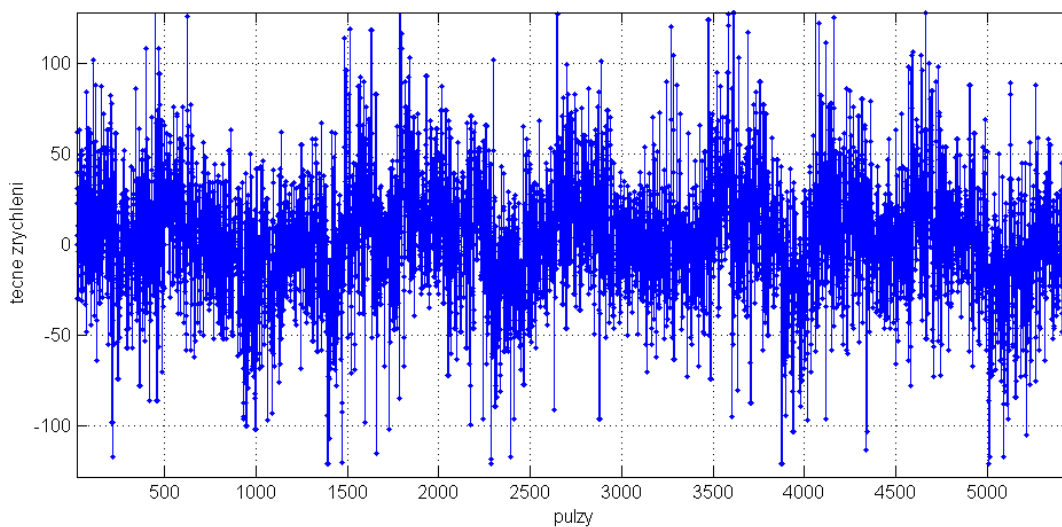
## 5.3 Obsluhy přerušení

### 5.3.1 Obsluha přerušení od bloku ADC

A/D převodník vyvolá přerušení vždy, jakmile je převedena nová hodnota napětí ze vstupu, z jakého je požadována. Při startu programu je to vstup připojený k výstupu akcelerometru v ose Z, kvůli zjištění otočení autíčka, jinak vstup připojený k výstupu ose X měřící příčné zrychlení, tedy určující profil tratě.

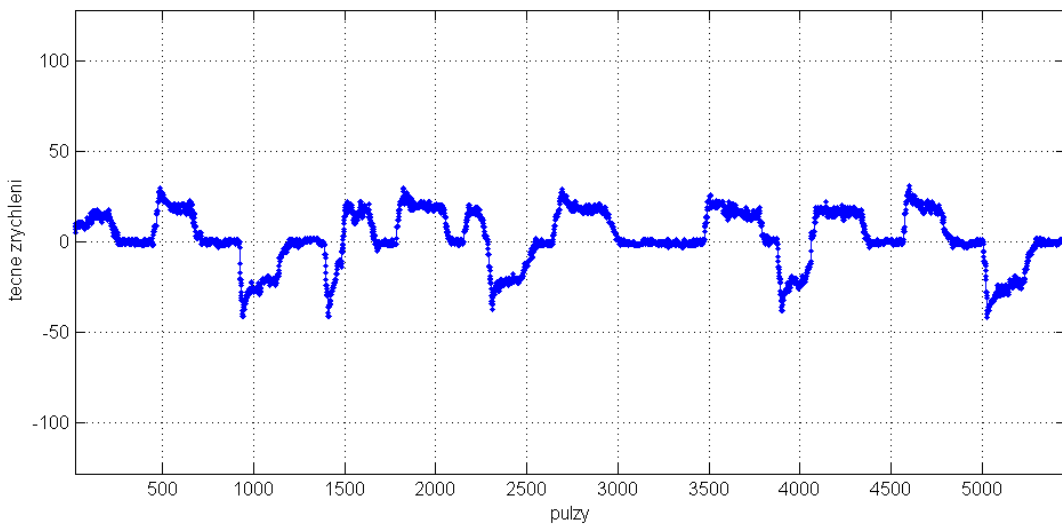
Obsluha má za úkol vyčtení hodnoty z ADC a část filtrace. Signál, jdoucí z přímo z akcelerometru, je totiž pro řízení, resp. určování profilu trati, nepoužitelný. Pokud je autíčko v pohybu, objevuje se v něm obrovské množství šumu, způsobeného převážně vibracemi od motoru, kol a převodovky. Amplituda tohoto šumu je několikanásobně větší

než amplituda užitečného signálu, jak je patrné z obr. 5.3. Je třeba ho tedy vhodným způsobem vyfiltrovat.



*Obr. 5.3 Profil tratě před filtrací*

Zpočátku byly k tomuto účelu testovány diskrétní filtry typu dolní propusti, ovšem jejich použití se ukázalo jako problematické. Uspokojivé výsledky dávaly totiž až filtry vysokých řádů, jejichž implementace v mikroprocesoru, vzhledem k jejich relativně nízkému výkonu, nebyla možná. Nakonec byla zvolena jiná metoda: načtení a uložení velkého množství vzorků (256) z akcelerometru a jejich zprůměrování na jeden vzorek, jež je dále zpracováván. Tímto způsobem vyfiltrovaný průběh je vidět na obr. 5.4.



*Obr. 5.4 Profil tratě po filtraci*

Jak bylo uvedeno, v obsluze přerušení je část této filtrace. A sice vyčtení hodnoty z bloku ADC a uložení do pole. Pole má 256 pozic a ukládání probíhá cyklicky. To znamená, že index, kam je hodnota uložena, se při každém přerušení zvýší, a jakmile je dosažen konec pole, začíná zápis znovu od začátku pole. Pole tedy tvoří jakýsi cyklický zásobník, který uchovává posledních 256 hodnot z převodníku. Další zpracování probíhá v obsluze přerušení od časovače TPM2.

### 5.3.2 Obsluha přerušení od časovače TPM1

Toto přerušení se vyvolá vždy po uběhnutí jedné periody PWM signálu pro řízení motoru, tedy každých 0,5 ms. Obsluha přerušení má za úkol nastavit střídu signálu v další periodě – určuje tedy napětí přiváděné na motor a tím pádem i rychlost. Způsob nastavení rychlosti je rozdílný podle toho, jestli je, nebo není nastaven příznak prvního kola.

Je-li příznak nastaven, znamená to, že autíčko ještě nerozpoznalo kolo a rychlost se volí podle aktuální hodnoty profilu tratě. Způsob zpracování profilu tratě je uveden v kapitole 5.3.3. Je-li aktuální hodnota profilu tratě rovinka, zvolí se rychlost pro rovinku, a to taková, jaká byla přiřazena pomocí přepínače. Je-li aktuální hodnota profilu zatáčka, zvolí se nastavená rychlost pro danou zatáčku. Při tom nezáleží, je-li zatáčka pravotočivá nebo levotočivá.

Přestože se původně počítalo s pěti různými rychlostmi pro čtyři možné poloměry zatáček a pro rovinku, bylo zjištěno, že spolehlivě je možné rozlišit jen tři úrovně: Rovinku a levou/pravou zatáčku, jak je patrné z obr. 5.4. Jsou tedy definovány celkem dva rychlostní profily: Pro rovinku a pro zatáčku.

Pokud příznak prvního kola není nastaven – byl smazán – znamená to, že autíčko již rozpoznalo kolo a má k dispozici informaci o tom, jak trať před ním vypadá. V tom případě vypadá algoritmus nastavení rychlosti následovně: Nejdříve je do proměnné pro aktuální rychlost nastavena rychlost pro rovinku (maximální rychlost). Následuje procházení pole, ve kterém je uložen profil tratě. (Pole je definováno v kapitole 5.3.3.)

Procházení pole obsahující profil probíhá v cyklu, a to od hodnoty s indexem aktuální polohy až po hodnotu s indexem aktuální poloha + vzdálenost, na kterou je autíčko schopno přibrzdit. Tato vzdálenost byla určena na 7,5 cm.

Je-li v této procházené části profilu trati nalezena zatáčka, jež by vyžadovala nižší rychlost, než je momentálně nastavena v proměnné pro aktuální rychlost, je tato snížena na požadovanou hodnotu. Tím je zajištěno, že autíčko před zatáčkou přibrzdí a naopak na rovině jede maximální možnou rychlostí.

### 5.3.3 Obsluha přerušení od časovače TPM2

Jak již bylo uvedeno, blok TPM2 slouží k měření rychlosti a ujeté vzdálenosti. Je to čítač, který počítá dobu mezi dvěma pulzy od otáčkoměru. A každý pulz vyvolává přerušení. V něm se z délky pulzu určí aktuální rychlost autíčka, a to jako převrácená hodnota délky pulzu.

Čítač je nastaven tak, aby vyvolával ještě jeden druh přerušení. A sice, když čítač přeteče. To znamená, když do doby, kdy dosáhne maximální hodnoty + 1, nepříjde impulz od snímače. (Čítač je 16 bitový, perioda čítání 5,3  $\mu$ s. Toto přerušení je tedy generováno tehdy, pokud během 1/3 sekundy nepříjde impulz od snímače.) Tento typ přerušení ošetřuje stav, kdyby se autíčko zastavilo nebo velmi zpomalilo. Pak by se první typ přerušení nevyvolával (nepřicházely by pulzy od snímače) a autíčko by si myslelo, že stále jede stejnou rychlostí, jaká byla vypočtena při posledním pulzu. Při přerušení vyvolaném přetečením čítače je oznámena délka pulzu jako maximální možná, čemuž odpovídá velmi malá rychlost, na což zareaguje regulátor rychlosti.

Regulátor rychlosti je funkce, která se volá z obou přerušení a stará se o řízení rychlosti. Vstupují do ní požadovaná a aktuální rychlost a výstupem je požadovaný akční zásah neboli žádané napětí motoru. Regulátor je typu PS s omezením integrační složky. Konstanty regulátory byly nastaveny experimentálně.

V obsluze přerušení však není z délky pulzu určena rychlost vždy přímo. Testováním bylo zjištěno, že hodnoty z čítače ne vždy odpovídaly tomu, jak rychle se náprava otáčela. Objevovaly se mezi nimi i krátké pulzy, které evidentně neodpovídaly skutečné rychlosti. Tyto byly nejspíše způsobeny zákmity z optické závory, a to přesto, že byl použit Schmidtův spólný obvod k jejich omezení - bez jeho použití by záchvěvů bylo jistě mnohem více. Tento nepříznivý jev byl minimalizován použitím filtrování hodnot z čítače.

Filtr se skládá ze dvou částí: První spočívá v tom, že se odstraní všechny pulzy kratší než 340  $\mu$ s. Druhá část dělá to, že pokud je délka nového pulzu menší než 2/3 předchozího pulzu, je hodnota nového pulzu přepsána hodnotou minulého pulzu. Bylo totiž zjištěno, že vzhledem k setrvačnosti autíčka se délka pulzů o více než 1/3 nemění a tyto pulzy jsou tedy opět falešné. Počet takovýchto přepsání délky pulzu je však sledován, a dojde-li k více než 5 přepsáním bezprostředně za sebou, další hodnota pulzu je již přímo použita a není přepsána starou hodnotou. To pro případ, že by k takovému skoku rychlosti přeci jenom došlo, např. vlivem prokluzu.

Další funkce obsluhy přerušení je ukládání profilu trati a měření ujeté vzdálenosti. Profil se ukládá do pole o 3 000 pozicích. Jednotlivé prvky v poli tvoří filtrované hodnoty odstředivého zrychlení, a jejich index pak říká, kde na trati se toto zrychlení nachází.

Ujetou vzdálenost obsahují dvě proměnné. Jedna obsahuje celkovou ujetou vzdálenost (ta určuje indexy hodnot zrychlení v profilu dráhy) a druhá ujetou vzdálenost v rámci jednoho kola. Obě se inkrementují každé dva pulzy od snímače. Ujetá vzdálenosti je tedy

hodnota dané proměnné  $x$  1,5 cm. Celková vzdálenost se začíná počítat, jakmile je dosaženo referenčního bodu, kterým je začátek první zatáčky. (Autíčko startuje z předem přesně nedefinovaného místa na startovní/cílové rovince.) Příznak dosažení referenčního bodu je nastaven tehdy, je-li aktivní příznak prvního kola, proměnná obsahující aktuální profil neodpovídá rovince a autíčko ujelo od zapnutí napájení alespoň 7,5 cm (počítáno v jiné proměnné, která se začíná inkrementovat pulzy od snímače ihned po startu). Principem této podmínky je zamezení toho, aby se jako začátek zatáčky identifikovala rovná část dráhy ihned po startu. K tomu může dojít, pokud autíčko na dráhu neumístíme zcela rovně, a na autíčko při rozjezdu po zapnutí napájení působí chvíli příčné zrychlení, což může být vyhodnoceno jako zatáčka.

Hodnota proměnné obsahující ujetou vzdálenost v rámci kola se začíná inkrementovat tehdy, pokud není nastaven příznak prvního kola. Tato hodnota je také vynulována vždy, jakmile dosáhne hodnoty proměnné obsahující délku kola, tedy jakmile autíčko ujede celé kolo.

Určení profilu trati probíhá na základě hodnot příčného zrychlení (v ose X), jejichž posledních 256 hodnot je připraveno od obsluhy přerušení ADC (viz. kapitola 5.3.1). Z hodnot je spočítán průměr a dále je kvantován do úrovní, odpovídajících jednotlivým zatáčkám nebo rovince. Pokud je nastaven příznak prvního kola, tato hodnota je uložena do pole, které, jak bylo uvedeno výše, čítá 3 000 pozic, a to na pozici, jejíž index odpovídá proměnné obsahující ujetou vzdálenost. Takto sestavený profil je poté v dalších kolech využíván k zjištění, jak vypadá trať před autíčkem, jak je popsáno v kapitole 5.3.2.

Po sestavení profilu ještě probíhá jeho úprava, která má za cíl odstranit chyby, jež by se v něm mohly objevit přesto, že je použita filtrace hodnot z akcelerometru. Chyba má buďto podobu osamocené hodnoty odpovídající zatáčce v délce jednoho pulzu, kdy ostatní hodnoty kolem odpovídají rovince, nebo v podobě jedné hodnoty odpovídající rovince, přestože hodnoty v nejbližším okolí odpovídají zatáčce. Úprava má za úkol tyto chyby najít a odstranit, neboť způsobují zpomalení autíčka. Jestliže totiž autíčko jede po rovince a z profilu zjistí, že se před ním má objevit zatáčka, byť jen v délce jednoho pulzu, musí před ní přibrzdit. Úprava profilu spočívá v tom, že pole je procházeno v cyklu, a najde-li se prvek, který svou hodnotou neodpovídá hodnotám dvou prvků před ním a dvou za ním, je tato hodnota přepsána na hodnotu sousedních prvků.

Poslední věcí, kterou tato obsluha přerušení řeší, je synchronizace mezi aktuální polohou v rámci kola, a proměnnou, která tuto polohu obsahuje. Snímač totiž vlivem různých prokluzů, nepřesně stejného vybočení autíčka v zatáčkách, filtrací pulzů apod. každé kolo nenapočítá přesně stejný počet pulzů. Tato chyba se každé kolo zvyšuje a může vést k tomu, že autíčko vyletí z dráhy - autíčko si myslí, že už je na rovince, proto začne zrychlovat, ale ve skutečnosti stále projíždí zatáčkou. Měřeními na testovací dráze bylo zjištěno, že na první kolo připadá vždy méně pulzů, než na kola následující. Toto je nejspíše způsobeno vlivem prokluzů. To proto, že autíčko první kolo, kdy ještě neví, jak bude dráha vypadat, jede pomaleji než v dalších kolech. Při vyšších rychlostech se pak

kola protácejí o něco více. Je tedy třeba vyřešit, aby proměnná, která ukazuje aktuální polohu na dráze v rámci kola, neobsahovala vyšší hodnotu, než odpovídá tomu, kde se aktuálně autíčko nachází. Jinak řečeno, aby se nepředbíhala.

Tento problém je řešen následujícím způsobem: Je uchováváno posledních 10 hodnot aktuálního profilu tratě. Dále je sledována proměnná, obsahující polohu v rámci kola. Jakmile začne tato ukazovat v uloženém profilu tratě na místo, kde má být zatáčka, a 20 hodnot před tímto místem v profilu odpovídá rovince (neboli „byla delší rovinka a právě by měla začínat zatáčka“) a aktuálně uchované hodnoty tratě (včetně té poslední naměřené) obsahují rovinku (neboli „je rovinka a zatáčka stále nepřichází“), není hodnota ukazující aktuální polohu v rámci kola v probíhající obsluze přerušena inkrementována. A to tak dlouho, dokud je tato podmínka splněna. Tímto je zajištěno, že proměnná bude ukazovat na místo v profilu, kde začíná zatáčka, a pokračovat v inkrementaci teprve tehdy, až daná zatáčka skutečně přijde.

## 5.4 Podprogramy a makra

Program obsahuje podprogramy (funkce) pro uložení hodnot do EEPROM. Zápis do EEPROM se provádí pomocí funkce *PutToBuffer8(char hodnota)* nebo *PutToBuffer16(int hodnota)*. První slouží k uložení proměnné velikosti 1 bajt, druhá k uložení proměnné dvojnásobné délky.

Zápis do EEPROM probíhá po 128 bajtových blocích (tzv. stránkách), což umožňuje rychlejší zápis díky menším nárokům na režii sběrnice. Zapisování využívá dvojitého vyrovnávání. To znamená, že jsou definovány dva zásobníky o velikosti jednoho bloku (stránky), přičemž do jednoho se zapisují hodnoty, zatímco druhý se zapisuje do EEPROM. Funkce je možné vepsat kamkoliv do programu, kde si potřebujeme zaznamenat do EEPROM nějakou proměnnou, abychom si později její hodnotu mohli stáhnout do PC a analyzovat.

Funkce a jimi využívané rutiny pro komunikaci mikroprocesorů HCS08 s pamětmi EEPROM pomocí I<sup>2</sup>C sběrnice vytvořil Jaroslav Nečesaný. S malými úpravami (viz. příložený program na CD) fungují i pro procesory ColdFire V1.

Pro zjednodušení signalizace stavu autíčka byla definována makra pro zapnutí a vypnutí jednotlivých LED diod. Pro jejich použití stačí do požadovaného místa v programu vepsat `LED_xx = 1` nebo `0`, kde `xx` odpovídá HL pro levé přední, HR pro pravé přední, BL pro levé zadní a BR pro pravé zadní LED. Přiřazení „1“ odpovídá rozsvícení a „0“ zhasnutí dané LED diody. Např. pro rozsvícení pravé přední LED tak bude použito `LED_HR = 1`. Při odladování programu bylo toto využíváno například k signalizaci rozpoznání kola, ověření dosažení referenčního bodu nebo signalizaci zatáčky/rovinky.

---

Program byl vytvořen v jazyce C pro mikroprocesory HCS08 a po výměně procesoru upraven pro procesor ColdFire V1. Programování a odladování programu probíhalo ve vývojovém prostředí Freescale CodeWarrior for Microcontrollers v 6.2.

Program se skládá ze tří souborů:

- main.c
- slotcarutils.c
- EEPROM.c

Soubor main.c obsahuje hlavní program včetně obsluh přerušení, slotcarutils.c podprogramy a EEPROM.c rutiny pro komunikaci s EEPROM.

## 6 ZÁVĚR

V první části práce jsou rozebrány faktory, jež působí na jízdu autíčka, a s nimiž je třeba počítat při návrhu systému řízení. Jako nejvíce limitující se zde jeví působení odstředivé síly v zatáčkách a setrvačné síly při akceleraci a brzdění.

Vzhledem k těmto skutečnostem je navrhnout optimální způsob řízení pro co nejrychlejší zjetí trasy. Navržený způsob je takový, kdy na rovinkách autíčko maximálně akceleruje a před zatáčkou brzdí. Zatáčku projíždí konstantní rychlostí.

Aby autíčko mohlo takto programově jezdit, je třeba nejdříve zmapovat profil tratě a rozpoznat kolo. Podle tohoto je také navržen řídicí systém pro autíčko. Je vybrán akcelerometr jako senzor pro měření profilu tratě a optický inkrementální enkodér k určení polohy a rychlosti autíčka. Kolo je rozpoznáno na základě opakování se profilu trati. Ke zjištění, zda se profil tratě opakuje, je využita korelace.

Řídicí systém je postaven na desce od firmy Freescale, obsahující řídicí mikroprocesor, 3-osý akcelerometr, H-můstek a další podpůrné obvody. Kvůli náročnosti výpočtu korelace však bylo třeba vyměnit původní 8-bitový mikroprocesor MC9S08JM32CLH s 2 kB paměti RAM za 32-bitový MCF51JM128VLH s 16 kB RAM. Dále byla také deska dovybavena sériovou linkou pro odesílání dat z autíčka do PC. Pro odladování optimální jízdy autíčka je totiž řídicí systém vybaven pamětí EEPROM, která umožňuje ukládání uživatelských dat v průběhu jízdy.

Autíčko vybavené realizovaným řídicím systémem bylo testováno na tratích sestavených dle požadavků na soutěžní trať. Na nich byla ověřena schopnost autíčka rozpoznat kolo a jezdit dle navrženého programu. Při testech se ukázala nutnost vytvoření synchronizace mezi polohou autíčka uchovávanou v systému a skutečnou polohou na dráze. Bez ní docházelo k vyjetí autíčka z dráhy. Bylo třeba také vyřešit způsob získání profilu tratě ze signálu z akcelerometru, neboť ten je velmi zašuměn. Použitý způsob využívající rychlého vzorkování a průměrování se ukázal jako dobře použitelný. Oproti návrhu však nebylo možné přesně rozeznat poloměry zatáček, neboť rozdíly v odstředivém zrychlení způsobené rozdílnými poloměry zatáček jsou poměrně malé.

Do budoucna by bylo možné uvažovat o rozšíření řídicího systému o rádiový modul, kterým by autíčko komunikovalo s PC. Ten by umožňoval bezdrátový přenos sledovaných hodnot, případně i v opačném směru vzdálené nastavování různých proměnných v řídicím systému autíčka, což by vedlo k větší produktivitě práce při vyhodnocování naměřených hodnot a změnách v programu autíčka.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. *MC9S08JM60, MC9S08JM32 Data Sheet*. [Online] Rev. 2, březen 2008.  
[http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data\\_sheet/MC9S08JM60.pdf](http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC9S08JM60.pdf).
- [2] FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. *MCF51JM128 ColdFire® Integrated Microcontroller Reference Manual*. [Online] Rev. 2, září 2008.  
[http://www.freescale.com/files/32bit/doc/data\\_sheet/MCF51JM128.pdf](http://www.freescale.com/files/32bit/doc/data_sheet/MCF51JM128.pdf).
- [3] FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. *Podklady pro elektronickou výbavu auta. HW.cz*. [Online] 5. listopad 2008. [http://hw.cz/files/slot\\_car equip.zip](http://hw.cz/files/slot_car equip.zip).
- [4] FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. *Technical Data ±1.5g, ±6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer*. [Online] Rev. 0, duben 2008.  
[http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7361L.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361L.pdf).
- [5] FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. *Technical data 5.0 A H-Bridge with Load Current Feedback*. [Online] Rev. 13.0, říjen 2008.  
[http://www.freescale.com/files/analog/doc/data\\_sheet/MC33887.pdf](http://www.freescale.com/files/analog/doc/data_sheet/MC33887.pdf).
- [6] BENEŠ, P., A DALŠÍ. *Měření fyzikálních veličin - návody do laboratorních cvičení*. Brno : VUT v Brně, FEKT, 2008.
- [7] BREJL, M. *Freescale Race Challenge 2009. HW.cz*. [Online] Freescale Semiconductor, Rožnov p.R., Czech Republic, 23. říjen 2008. <http://hw.cz/files/FRC2009.pdf>.
- [8] JAN, J., KOLÁŘ, R., KOZUMPLÍK, J. *Číslicové zpracování a analýza signálů - počítačová cvičení*. Brno : VUT v Brně, FEKT, 2003.
- [9] KERLIN, T., PATOČKA, M., VOREL, P. *Řídící elektronika - laboratorní cvičení*. Brno : VUT v Brně, FEKT, 2003.
- [10] LOCKER, M. *Řízení stejnosměrného motoru*. [Online] 9. prosinec 2002.  
[http://www.eurobot.cz/Workshop2006/Rizeni\\_stejnosmerneho\\_motoru.ppt](http://www.eurobot.cz/Workshop2006/Rizeni_stejnosmerneho_motoru.ppt).
- [11] MAŠLÁŇ, S. *Řízení PS/2 myši*. [Online] 8. září 2007.  
[http://www.elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/tutorial/PS2/PS2\\_mouse.html](http://www.elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/tutorial/PS2/PS2_mouse.html).

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

2D	dvojdímenzionální
A/D	analogově/digitální
ADC	analogově/digitální převodník
BDM	programovací a ladící rozhraní procesoru
D/A	digitálně/analogový
EEPROM	elektronicky programovatelná a mazatelná paměť
HW	hardware
I <sup>2</sup> C	druh sériové sběrnice
kbaud	kilobaudy za sekundu
LED	světlo vyzařující dioda
lsb	nejméně významný bit
msb	nejvýznamnější bit
OSBDM	typ programátoru a komunikačního modulu pro mikroprocesor
PC	osobní počítač
Port I/O	univerzální vstupně/výstupní port
PS	proporcionálně-sumační regulátor
PWM	pulzně šířková modulace
RAM	paměť s libovolným (náhodným) přístupem
SW	software
TPM	jednotka časovače/PWM modulátoru
UART	univerzální rozhraní pro asynchronní sériovou komunikaci
V/V	vstupně/výstupní