

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

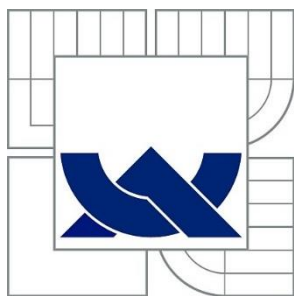
MODEL PÁSOVÉHO VOZIDLA S DÁLKOVÝM RÁDIOVÝM OVLÁDÁNÍM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

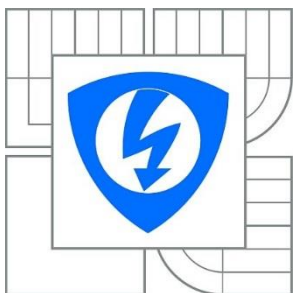
JIŘÍ CTIBOR

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MODEL PÁSOVÉHO VOZIDLA S DÁLKOVÝM RÁDIOVÝM OVLÁDÁNÍM

RADIO CONTROLLED TRACKED VEHICLE MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

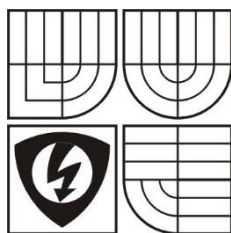
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ CTIBOR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. BOHUMIL KLÍMA, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Jiří Ctibor

Ročník: 3

ID: 146799

Akademický rok: 2013/14

NÁZEV TÉMATU:

Model pásového vozidla s dálkovým rádiovým ovládáním

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vyroberte desky plošných spojů pro model pásového vozidla s rádiovým dálkovým ovládáním
2. Navrhněte a popište strategii řízení pohybu vozidla
3. Oživte a naprogramujte zařízení
4. Vozidlo otestujte a vyhodnoťte výsledky

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Programování v jazyku C/C++. Sallyx [online]. [cit. 2013-11-06]. Dostupné z: <http://www.sallyx.org/sally/c/>

[2] SKALICKÝ, J. Teorie řízení 1. Teorie řízení 1. Brno: VUT FEKT ÚVEE Brno, 2002. ISBN: 80-214-2112- 6.

Termín zadání: 27. 9. 2013

Termín odevzdání: 2. 6. 2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Bohumil Klíma, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je návrh a vytvoření výrobní dokumentace stejnosměrného pohonu modelu pásového vozidla na dálkové ovládání, jeho konstrukce, naprogramování a oživení. Pro vytvoření výrobní dokumentace bylo třeba seznámit s návrhovým programem pro desky plošných spojů Altium Designer. Program mikroprocesoru bude vytvořen ve vývojovém prostředí CodeWarrior a to v jazyce C.

K navrhování obvodů byli využity zpravidla katalogové listy jednotlivých komponent. Návrh se skládá z několika funkčních obvodových celků, které zajišťují jednotlivé potřebné funkce. Řídicím prvkem celého zařízení je digitální signálový procesor zaměřený na aplikace v pohonech.

Abstract

The aim of the bachelor thesis is the design and creation of manufacturing documentation DC drive for the tracked vehicle model with remote control, its design, programming and inspirit. To create a manufacturing documentation it's needed to be familiar with the design program for printed circuit boards Altium Designer. Program of the microprocessor will be created in CodeWarrior development environment in the C language.

To design circuits were used generally datasheets of components. The proposal consists of several functional peripheral units that provide various functions needed. For control the circuit is used a digital signal processor aimed at applications in the motor drives.

Klíčová slova

Stejnoseměrný pohon, pasové vozidlo, stavebnice merkur, mikroprocesorové řízení, dálkové ovládání, bateriový trakční pohon, PWM řízení, regulace otáček

Key words

DC drive, tracked vehicle, merkur toys, microprocessor control, remote control, PWM modulation control, speed regulation

Bibliografická citace

CTIBOR, J. *Model pásového vozidla s dálkovým rádiovým ovládáním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 74 s.
Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohumil Klíma, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Model pásového vozidla s dálkovým rádiovým ovládáním 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

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, kterým je doc. Ing. Bohumil Klíma, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

Obsah

1 ÚVOD	13
2 HARDWARE	14
2.1 VÝKONOVÝ PRVEK OBVODU	14
2.2 VOLBA MOTORŮ PRO POHON VOZIDLA	15
2.3 RÁDIOVÉ OVLÁDÁNÍ	16
2.3.1 POPIS ZAŘÍZENÍ	16
2.4 SNÍMÁNÍ OTÁČEK	17
2.5 SNÍMÁNÍ PROUDU	18
2.5.1 VÝBĚR BOČNÍKU	19
2.6 MĚŘENÍ NAPĚTÍ BATERIE	20
2.6.1 NÁVRH OBVODU	21
2.7 POMOCNÉ NAPÁJENÍ	23
2.8 ZPRACOVÁNÍ ANALOGOVÝCH SIGNÁLŮ	24
2.8.1 ZESÍLENÍ A FILTRACE	24
2.8.2 ZESLABENÍ / ZESÍLENÍ	25
2.8.3 VOLBA OPERAČNÍHO ZESILOVAČE.....	26
2.9 PROPOJENÍ NAPĚŤOVÝCH HLADIN MIKROKONTROLÉRU A MŮSTKU	27
3 POUŽITÍ MIKROKONTROLÉRU	28
3.1 VÝBĚR TYPU PROCESORU	28
3.1.1 ZLOMKOVÁ ARITMETIKA	29
3.2 PULZNĚ ŠÍŘKOVÝ MODULÁTOR eFLEXPWM	29
3.2.1 VLASTNOSTI MODULU	30
3.2.2 BLOKOVÉ SCHÉMA JEDNOHO SUBMODULU	31
3.2.3 KONKRÉTNÍ NASTAVENÍ PWM SUBMODULŮ:	32
3.3 A/D PŘEVODNÍK	32
3.3.1 VLASTNOSTI PŘEVODNÍKU.....	32
3.3.2 KONKRÉTNÍ NASTAVENÍ A/D PŘEVODNÍKŮ	33
3.4 QUAD TIMER	35
3.4.1 VLASTNOSTI MODULU ČÍTAČE.....	36
3.4.2 REŽIMY ČÍTAČE/ČASOVAČE	36
3.4.3 FUNKČNÍ MÓDY.....	37
3.4.4 POUŽITÍ ČÍTAČŮ	39
4 REGULACE	41
4.1 URČENÍ PARAMETRŮ REGULOVANÉ SOUSTAVY	41
4.1.1 VÝPOČET KONSTANTY BUZENÍ $C\Phi$	41
4.1.2 VÝPOČET PŘENOSŮ JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ	42
4.2 NÁVRH REGULÁTORU METODOU TYPICKÝCH PŘENOSŮ OTEVŘENÉ SMYČKY	43
5 SOFTWARE	45

5.1 PŘEDSTAVENÍ ŘÍDÍCÍHO ALGORITMU	45
5.1.1 POPIS JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ	46
5.2 ALGORITMUS URČENÍ ŽÁDANÝCH OTÁČEK MOTORŮ	47
6 ZÁVĚR	48
7 POUŽITÁ LITERATURA	50
8 PŘÍLOHY	51
8.1 PŘIDĚLENÍ FUNKCÍ PINŮ PROCESORU (PIN ASSIGNMENT)	51
8.2 REGULAČNÍ SCHÉMA	52
8.3 MATLAB SKRIPT NA VÝPOČET PROUDOVÉHO REGULÁTORU	53
8.4 PROGRAM PROCESORU	55
8.5 PŘECHODOVÉ CHARAKTERISTIKY REGULÁTORŮ	61
8.6 GERBER SOUBORY DPS A SCHÉMATA ZAPOJENÍ	63

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 – Schéma H-můstku – výkonové části IO.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2 – Vzhled a umístění pinů na přijímači [7]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3 – Kvadraturní výstup čidla otáček.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4 - Typické zapojení TL431 [6].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 5 – Konečné zapojení obvodu pro měření napětí baterie</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 6 – Doporučené zapojení stabilizátoru napětí LD1117xx [3]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 7 – Odrušovací filtr pro analogovou napájecí sběrnici.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 8 - Obvod pro zesílení a filtraci analogového signálu.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 9 – Obvod pro zesílení/zeslabení analogového signálu.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 10 – Zapojení budiče pro řídicí signály PWM.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 11 – Center align PWM pulse.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 12 – Edge align PWM pulse (na hranu reloadu).....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 13 – Blokové schéma jednoho PWM submodulu [9].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 14 – Sekvenční mód zpracování vzorků A/D.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 15 – Paralelní mód zpracování vzorků A/D.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 16 – Synchronizace A/D převodníku s PWM.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 17 – Blokové schéma modulu čítače/časovače [9]</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 18 – Měření délky pulzu pomocí gated count mode.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 19 – Zpracování kvadraturního signálu čítačem.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 20 – AM přijímač výstup.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 21 – Popis algoritmu vývojovým diagramem</i>	<i>45</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 - Tabulka popisující způsob řízení H-můstku.....</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 2 – Významy výstupních signálů z přijímače</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 3 – Parametry motorků</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4 – Pohyby vozidla</i>	<i>47</i>

Seznam zkratek

A/D	Analogově digitální převodník
AM	Amplitudová modulace (<i>Amplitude Modulation</i>)
BAT	Baterie
CAN	Sériová datová sběrnice (<i>Controller Area Network</i>)
Clk	Taktovací frekvence jádra (<i>Clock</i>)
cmd	Povel z vysílačky (<i>Command</i>)
CTRL	Registr (<i>Control</i>)
cΦ	Konstanta buzení stejnosměrného stroje
DC	Stejnoseměrný proud (<i>Direct Current</i>)
DPS	Deska plošných spojů
DSC	Digitální signálový kontrolér (<i>Digital Signal Controler</i>)
eFlexPWM	PWM periferie kontroléru (<i>Enhanced Flex PWM</i>)
FS	Chybový status (<i>Fault Status</i>)
GPIO	Vstupně výstupní piny (<i>General purpose input output</i>)
I2C	Multi-masterová sériová sběrnice (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)
INT	Přerušeni (<i>Interrupt</i>)
IO	Integrovaný Obvod
LED	Světlo vyzařující dioda (<i>Light Emitting Diode</i>)
MOS-FET	Polem řízený tranzistor se strukturou z oxidu kovů (<i>Metal Oxid Structure - Field Effect Transistor</i>)
NC	Nepřipojeno (<i>Not Connect</i>)
OFLAG	Příznak přetečení (<i>Over Flow Flag</i>)
OZ	Operační zesilovač
PC	Osobní počítač (<i>Personal computer</i>)
PWM	Pulsně šířková modulace (<i>Pulse Wide Modulation</i>)
SCI	Sériový komunikační inteface (<i>Serial comunication interface</i>)
SIGN	Znaménko (<i>Signum</i>)
SMD	Zařízení pro povrchovou montáž (<i>Surface mount device</i>)
SMT	Technologie povrchové montáže (<i>Surface mount technology</i>)
SMPS	Spínaný zdroj (<i>Switch Mode Power Supply</i>)
SPI	Sériový interface pro periferie (<i>Serial pheriperial interface</i>)
TMR	Čítač (<i>Timer</i>)
VAL	Registr hodnoty (<i>Value registr</i>)
XBAR	Periferie kontroléru (<i>Cross bar</i>)

Seznam symbolů

F_a	Přenos obvodu kotvy
F_i	Přenos čidla proudu
F_{me}	Přenos měniče
f_{mez}	Mezní kmitočet
f_{NOS}	Nosná frekvence (modulační)
f_{PWM}	Frekvence PWM
F_R	Přenos regulátoru
F_{OS}	Přenos otevřené smyčky regulované soustavy
$I_{0,min}$	Minimální hodnota proudu děličem pro nastavení pracovního bodu
I_{ak}	Proud kotvou nakrátko
$I_{K,min}$	Minimální proud anoda - katoda
$I_{m,m}$	Maximální povolený proud
$I_{n,m}$	Maximální jmenovitý proud
K_i	Zesílení čidla proudu
K_{Pfrac}	Proporcionální zesílení ve zlomkovém formátu
K_{Ri}	Integrační zesílení regulátoru
K_{Rp}	Proporcionální zesílení regulátoru
K_u	Napěťový přenos
L_a	Indukčnost kotvy motoru
M_k	Záběrný moment
M_n	Jmenovitý moment
P_{ZTR}	Ztrátový výkon
R_a	Odpor kotvy motoru
R_B	Odpor bočnicku
$R_{DS,ON}$	Odpor na dráze drain - source v sepnutém stavu
R_S	Stabilizační odpor
s	Střída
T_{PWM}	Modulační perioda PWM
U_{AD}	Napětí na vstupu A/D převodníku
U_{ADm}	Maximální napětí na A/D převodníku
$U_{B,max}$	Maximální úbytek napětí na bočnicku
$U_{B,min}$	Minimální uvažované napětí baterie
U_d	Úbytek napětí na řízené diodě
U_{RS}	Úbytek napětí na stabilizačním odporu
V_{DD}	Kladné napětí napájecí sběrnice

V_{DDA}	Kladné napětí analogové napájecí sběrnice
V_{SS}	Záporné napětí napájecí sběrnice
V_{SSA}	Záporné napětí analogové napájecí sběrnice
$\Delta P_{ZTR,m}$	Maximální výkonové ztráty
τ_a	Elektromagnetická časová konstanta kotvy
τ_{me}	Časová konstanta měniče
τ_σ	Malá časová konstanta pro návrh reg. metodou standartních přenosů
ω_0	Úhlové otáčky naprázdno

1 ÚVOD

Předmětem této bakalářské práce je kompletní návrh a vytvoření výrobní dokumentace desky plošných spojů DC/DC měniče pro pohon modelu pásového vozidla na dálkové ovládání a jeho následná realizace, oživení a otestování. Model vozidla bude obsahovat dva stejnosměrné motory s permanentními magnety a bude sestaven ze stavebnice Merkur. Základním výkonovým prvkem měniče je integrovaný obvod MC33886 od firmy Freescale představující H-můstek, který umožňuje čtyř kvadrantové řízení stejnosměrného motoru. Pro regulaci pohonu bude použit 16 bitový digitální signálový procesor taktéž od firmy Freescale - MC56F8256.

Mikroprocesor bude zajišťovat regulaci proudu a otáček a další podpůrné algoritmy, jako například vyhodnocování signálů z AM přijímače a na základě toho rozhodovat o hodnotě žádaných otáček obou motorů. Pro dálkové ovládání bude použita komerční modelářská dvoukanálová souprava od firmy Hitec. Jeden kanál přenáší informaci o rychlosti pohybu a druhý kanál přenáší informaci o směru pohybu (zatačení). Výstupní signál z přijímače je třeba vhodně upravit následně a zpracovat v mikroprocesoru. Snímání proudu bude provedeno nejjednodušeji pomocí bočníku a integrovaného obvodu MAX9929, který galvanicky odděluje měřené místo od řídicích obvodů a patřičně zesiluje úbytek napětí na bočníku pro další zpracování. Otáčky budou snímány optickým inkrementálním kodérem od firmy Avago technologies, který bude snímat otáčky pásů, nikoli přímo motorů, čímž bude zaručena jejich shodná rychlost při požadavku jízdy rovně. Celý systém bude napájen z olověného 12V gelového akumulátoru. Pro šetrnost k baterii bude její napětí měřeno a při poklesu napětí pak může být například omezen regulátor proudu a podobně.

2 HARDWARE

2.1 Výkonový prvek obvodu

Protože ze zadání nevyplývají nějaké zvláštní nároky na konstrukci výkonového měniče z vybraných diskretních součástek, bude pro realizaci použit integrovaný obvod obsahující čtyřkvadrantový měnič pro řízení stejnosměrných motorů včetně driveru. Použité stejnosměrné motorky jsou na 12V s jmenovitým proudem 350 mA. Na základě doporučení byl pro tuto aplikaci vybrán čtyřkvadrantový výkonový můstek pro pohon stejnosměrného motoru tzv. „H-bridge“ od firmy Freescale Semiconductor – MC33886.

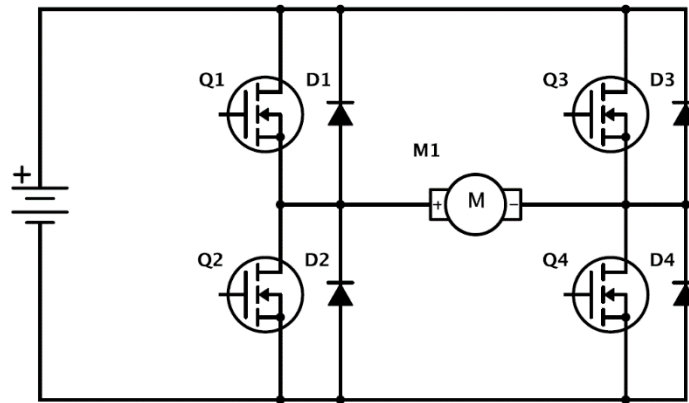
Je vhodný právě pro řízení DC motorů a solenoidů. Obsahuje řídicí logiku, nábojovou pumpu, budič a výkonové MOS-FET tranzistory s nízkým úbytkem napětí v sepnutém stavu $R_{DS,ON}$. Je schopen řídit indukivní zátěž odebírající stejnosměrný proud do velikosti nejvýše 5A. Výstup může být pulzně šířkově modulován (PWM) o nosné frekvenci až 10 kHz. Jeden digitální výstup s otevřeným kolektorem chybový status (*Fault Status*) slouží k informaci řídicímu systému o poruše. Můstek je vybaven aktivním omezováním proudu, vypnutí při poklesu napájecího napětí s automatickým obnovením, ochranu výstupů proti zkratu a ochranu proti přehřátí. Pokud nastane jakákoliv porucha, přejde výstup *Fault Status* do logické nuly. V normálním bezporuchovém stavu je tedy v log. 1. Pro obnovení činnosti po odeznění poruchy je třeba jeden z blokujících vstupů resetovat, nebo resetovat napájecí napětí. Pro povolení činnosti můstku jsou zde dva blokovací vstupy D1 a $\overline{D2}$. D1 musí být v log. 0 a D2 v log. 1 a FS nesmí hlásit chybu, musí tedy být v log. 1. IO dále obsahuje dva nezávislé vstupy IN1 a IN2 pomocí kterých se dají nezávisle řídit dva vyčkonové výstupy OUT1 a OUT2. Logika řízení je vysvětlena v následující pravdivostní tabulce [4]. Zjednodušeně, při log. 1 na vstupu je sepnut horní tranzistor patřičné větve a na výstupním pinu je tedy potenciál kladné napájecí sběrnice, při log. 0 je sepnut tranzistor dolní a na výstupu je napětí záporné napájecí sběrnice.

Tab. 1 - Tabulka popisující způsob řízení H-můstku

Pin	Vpřed	Vzad	Dynamické brždění 1	Dynamické brždění 2	Porucha	Blokování 1	Blokování 2
IN1	H	L	L	H	X	X	X
IN2	L	H	L	H	X	X	X
D1	L	L	L	L	X	H	X
D2	H	H	H	H	X	X	L
FS	H	H	H	H	L	X	X
OUT1	+BAT	-BAT	-BAT	+BAT	Z	Z	Z
OUT2	-BAT	+BAT	-BAT	+BAT	Z	Z	Z

Legenda: H – log. 1 (*high*); L – log. 0 (*low*); X – log. 0 nebo log. 1; Z – vysoká impedance

Obr. 1 – Schéma H-můstku – výkonové části IO



Základní technické parametry

- Maximální napájecí napětí – 40V DC
- Jmenovitý proud 5A
- Vnitřní proudové omezení 6,5A
- Maximální nosná frekvence $f_{PWM} = 20$ kHz
- Dopravní spoždění při zapnutí a vypnutí 18 us
- Náběžná/sestupná hrana 5 us
- $R_{DS,ON} = 120$ m Ω
- Klidový proud 20 mA

2.2 Volba motorů pro pohon vozidla

Pro vlastní pohon vozidla byly vybrány elektromotory s peramannými magnety a integrovanou převodovkou nabízené firmou Merkur Toys pro aplikaci v jejich stavebnicích. Výrobce je TT Motor a jsou nabízeny v široké škále jmenovitých otáček a momentů. Pro takovýto model bude optimální zvolit jeho rychlost pohybu okolo 1 m/s.

Určení otáček motoru pro optimální rychlost jízdy

Průměr poháněcího kola je 65 mm a tudíž potřebné jmenovité otáčky pro dosažení rychlosti jízdy 1 m/s jsou následující:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{v \cdot 2}{d} = \frac{1 \cdot 2}{0,065} = 30,77 \text{ rad/s} \quad (2.1)$$

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \cdot 60 = \frac{30,77}{2\pi} \cdot 60 = 293,82 \text{ min}^{-1} \quad (2.2)$$

Vybraný elektromotor:

TT MOTOR (HK) INDUSTRIAL CO., LTD

Typ: *GM37-3527-1256-10*

- Otáčky naprázdno 540 ot/min, jmenovité otáčky 410 ot/min
- Jmenovitý proud 350 mA, proud nakrátko 1,2A
- Jmenovité napájecí napětí 12V
- Výkon 2,1W
- Jmenovitý moment 4,9 mNm, maximální záběrný moment 18,3 mNm [12]

Výsledná rychlost pohybu vozidla s vybranými motory:

$$v = \omega \cdot r = \frac{410}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{0,065}{2} = 1,395 \text{ m/s} \quad (2.3)$$

Zvolený pohon s jmenovitými otáčkami 410 ot/min tedy je schopen dosáhnout rychlosti okolo 1 m/s.

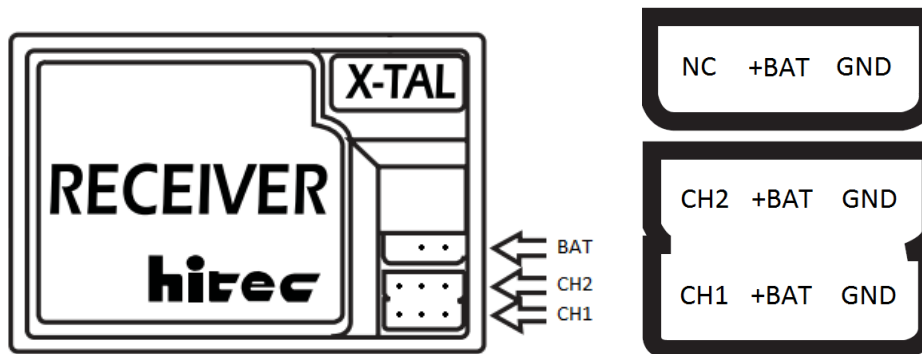
2.3 Rádiové ovládání

Pro dálkové ovládání vozidla bude použito komerční RC modelářské soupravy a v tomto projektu bude úkolem vhodně zpracovat výstupní signály z přijímače a pomocí algoritmu navrženého programu vykonat požadavek na pohyb vozidla.

2.3.1 Popis zařízení

Model: Hitec – Ranger 2N. Skládá se z vysílače (vysílačky) a z přijímače. Vysílač je digitální proporcionální superheterodynový s velkým dosahem. Jedná se o dvoukanalový systém, je tedy možno pomocí tohoto zařízení přenášet dvě různé informace o pohybu. Kanál CH1 bude využit pro přenos žádaného směru jízdy a kanál CH2 pro přenos žádané rychlosti pohybu. Přijímač bude napájen ze stabilizovaného napětí 5V [7].

Obr. 2 – Vzhled a umístění pinů na přijímači [7]



Technické parametry a informace:

- Napájecí napětí 5V DC
- Binární výstup s proměnnou střídou, $f_{nos} = 50$ Hz
- Rozměry $53 \times 35 \times 19$ mm, váha 28g

Tab. 2 – Významy výstupních signálů z přijímače

CH1		CH2	
Poloha	Střída	Poloha	Střída
Levá	0,05	Vpřed	0,05
0	0,075	0	0,075
Pravá	0,1	Vzad	0,1

2.4 Snímání otáček

K snímání otáček je použit inkrementální optický kodér (*incremental optical encoder*) od firmy Avago Technologies. Je to výkonný, nízkonákladový dvoukanálový kodér s vysokým rozlišením, který lze snadno umístit na snímáný objekt. K nejčastějším aplikacím patří prodejní automaty a řízení motorů v průmyslu. Jelikož je nízkonákladový není doporučeno ho aplikovat na zařízení chránící lidské životy, medicíně apod [1].

Princip činnosti:

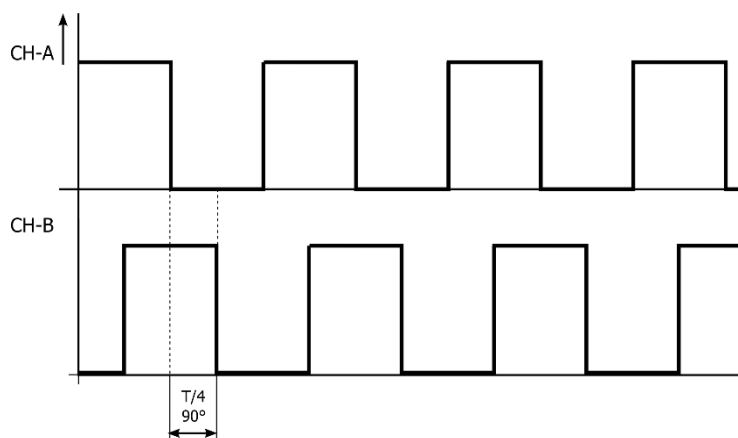
Snímač transformuje údaje o pohybu hřídele do dvoukanalového digitálního výstupu. Obsahuje 4 základní části: LED diodu vysílající optický signál, čtyři fotodiody přijímající optický signál modulovaný třetí částí, kterou je clonící kotouček (*codewheel*). Čtvrtou částí jsou pak čočky, upravující tvar vysílaného a přijímaného signálu. Díky dvoukanalovému výstupu je možno snadno identifikovat směr otáčení hřídele. Pokud kanál A přebíhá o 90° kanál B, je směr otáčení ve směru

hodinových ručiček (z pohledu kodéru na zadní straně motoru). V opačném případě, když kanál B předbíhá kanál A, je směr otáčení proti směru hodinových ručiček [1].

Technické parametry snímače AVAGO HEDR-54xx:

- 2 kanálový obdélníkový výstup s fázovým rozdílem 90°
- Napájecí napětí $-0,5V$ až $7V$
- Max. výstupní proud/kanál 12 mA
- Rozlišení – 200 pulzů/otáčku
- Výstupní signál $0 \div V_{DD}$

Obr. 3 – Kvadrurní výstup čidla otáček



2.5 Snímání proudu

MAX9929 je nízkonákladový jedno či dvousměrný proudový snímač pracující na principu snímání úbytku napětí na odporovém bočníku. Informaci o velikosti proudu tento integrovaný obvod udává v analogové formě se zesílením $50V/1V$. Digitální výstup SIGN udává informaci o směru proudu. Pro aplikace na malém napětí do $30V$ také zajišťuje galvanické oddělení.

Princip činnosti:

Proud protékající bočníkem na něm vytváří úbytek napětí U_{SENSE} . V závislosti na směru proudu může být tento úbytek kladný nebo záporný, to vyhodnocuje vnitřní komparátor. Informaci o směru proudu pak udává digitální výstup SIGN. Komparátor porovnává napětí $RS+$ a $RS-$. Jeli $RS+ > RS-$ výstup sign je v log. 1 a bočníkem protéká kladný proud. Je-li tomu naopak a $RS+ < RS-$, je výstup sign v log. 0 a bočníkem protéká proud záporný [2].

Výstupní napětí je dáno následujícím vztahem:

$$U_{out} = U_{SENSE} \cdot K_{AV} = (R_{SENSE} \cdot I_{SENSE}) \cdot K_{AV} \quad [2] \quad (2.4)$$

U_{out} – výstupní napětí; R_{SENSE} – odpor bočnicku; I_{SENSE} – aktuální proud bočnickem; K_{AV} – zesílení čidla (50V/1V)

2.5.1 Výběr bočnicku

MAX9929F je schopen pracovat se širokou škálou proudových rozsahů s odlišnými velikostmi bočníků. Při volbě bočnicku je třeba respektovat následující fakta:

- *Úbytek napětí* - Velká hodnota bočnicku způsobí velký úbytek napětí a při velkém proudu taky velké výkonové ztráty
- *Přesnost* - Velká hodnota bočnicku umožňuje, aby byly malé proudy měřeny s větší přesností
- *Efektivita a ztrátový výkon* - $P_{ztr} = RI^2$
- *Indukčnost* - Při měření vysokofrekvenčního proudu je třeba dbát a vliv parazitní indukčnosti bočnicku [2]

Návrh konkrétní hodnoty bočnicku:

- Napěťové zesílení proudového senzoru – $K_i = 50$
- Rozsah analogového vstupu mikroprocesoru – $U_{AD} = 0 \div 3,3V$
- Jmenovitý proud výkonového h-můstku – $I_{n,m} = 5A$
- Maximální proud výkonového h-můstku – $I_{m,m} = 6,5A$

Z těchto hodnot vyplývá, že při maximálním možném proudu 6,5A je potřeba na vstupu A/D převodníku napětí 3,3V. Při zesílení obvodu pro snímání $K_i = 50$ to odpovídá úbytku napětí na bočnicku:

$$u_{B,max} = \frac{U_{AD,m}}{K_i} = \frac{3,3}{50} = 68 \text{ mV} \quad (2.5)$$

Maximální možný úbytek napětí na bočnicku je tedy 68 mV, při maximálním proudu můstku. Z těchto hodnot je možno vyjádřit požadovaný odpor bočnicku.

$$R_B = \frac{u_{B,max}}{I_{m,m}} = \frac{0,068}{6,5} = 10,46 \text{ m}\Omega \quad (2.6)$$

V normalizované řadě hodnot nabízených bočníků je nejbližší hodnota 10 mΩ.

Parametry vybraného bočnicku:

Výrobce:	Ohmite
Typ:	LVK12R010DER
Odpor:	10 mΩ
Jmenovitý ztrátový výkon:	500mW

Pro vybraný bočník bude situace vypadat následovně.

$$u_{B,max} = R_B \cdot I_{m,m} = 0,01 \cdot 6,5 = 65 \text{ mV} \quad (2.7)$$

$$U_{ADm} = K_i \cdot u_{B,max} = 50 \cdot 0,065 = 3,25 \text{ V} \quad (2.8)$$

Kontrola maximálního ztrátového výkonu bočnicku při I_{mm} .

$$\Delta P_{ZTR,m} = R_B \cdot I_{m,m}^2 = 0,01 \cdot 6,5^2 = 0,4225 \text{ W} \quad (2.9)$$

Ztrátový výkon ani při maximálním proudu můstku nepřesáhne jmenovitý ztrátový výkon, vybraný bočník je tedy dostačující.

2.6 Měření napětí baterie

Pro lepší využití, větší šetrnost a prodloužení životnosti akumulátoru bude kontinuálně měřena hodnota napájecího napětí. Při poklesu napětí pod určitou mez pak bude možné omezit maximální žádaný proud pro proudový regulátor a tím šetřit životnost baterie. Problém spočívá v převodu napětí $9 \div 15\text{V}$ na hodnotu $0 \div 3,3\text{V}$ zpracovatelnou v A/D převodníku mikroprocesorem.

Řešení:

Od napětí baterie odečíst úbytek napětí, který bude v rozsahu možných napětí baterie $U_{B,min} = 9\text{V}$ až $U_{B,max} = 15\text{V}$ mít konstantní hodnotu a v A/D převodníku zpracovávat již napětí snížené. Napěťovou referenci je možno vytvořit pomocí zenerovy diody, ta by však nebyla v relativně velkém rozsahu napětí příliš konstantní. Přesnější referenci získáme použitím říditelné elektronické zenerovy diody, například **TL431**, která má úbytek napětí nastavitelný v rozsahu $1,24 \div 18\text{V}$.

Vybraná napěťová reference:

TL431 – ST Microelectronics

- $U_d = 1,24 \div 18\text{V}$
- $I_{k,min} = 100 \mu\text{A}$
- Přesnost $0,25 - 0,5 \%$

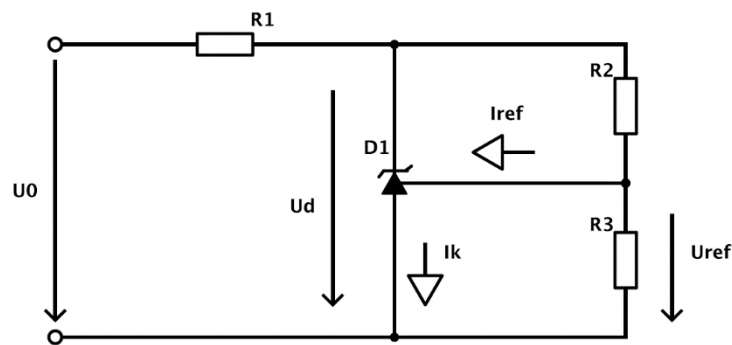
Vztah pro určení napětí U_d :

$$U_d = U_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + R_1 \cdot I_{ref} \quad [6] \quad (2.10)$$

U_d – úbytek napětí anoda-katoda; I_{ref} – referenční proud pro nastavení pracovního bodu; U_{ref} – napětí na referenčním rezistoru

Podmínkou pro kvalitní stabilizaci napětí je zajištění vhodného a stabilního pracovního bodu obvodu TL431. Minimální proud $I_K = 60 \div 200 \mu A$ [6] závisí na požadované velikosti U_d . Hodnota proudu I_{ref} se pohybuje v řádu jednotek mikroampér, tudíž při návrhu je možné přírůstek napětí U_d způsobený referenčním proudem zanedbat.

Obr. 4 - Typické zapojení TL431 [6]



Aby bylo možné zpracovat napětí baterie v A/D převodníku, je třeba zvolit vhodný úbytek napětí U_d , aby při nejmenším možném uvažovaném napětí 9V byl zajištěn minimální proud $I_{K,min}$ pro stabilizaci U_d a zároveň, aby při provozu zařízení proud I_k nebyl při napětí 12V příliš velký a nevybíjel zbytečně akumulátor.

2.6.1 Návrh obvodu

Přepokládané minimální napětí baterie je rovno 9V, tudíž zvolený úbytek s ohledem na zmíněné podmínky U_d je 8V. V takovém případě bude napětí na stabilizačním odporu 1V. Při tomto napětí je třeba tímto odporem do diody „vnutit“ minimální proud $I_{K,min}$. V katalogu výrobce je udána minimální hodnota $100 \mu A$ [6]. Pro jistotu je zvolen proud 1 mA, při odlaďování může být případně tento proud zmenšen výměnou stabilizačního odporu:

$$R_S = \frac{U_{B,min} - U_d}{I_{K,min}} = \frac{9 - 8}{0,001} = 1 \text{ k}\Omega \quad (2.11)$$

$$U_d = U_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + R_1 \cdot I_{ref} \approx U_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.12)$$

$$U_d = 8 \text{ V}; U_{ref} = 1 \text{ V};$$

$$\frac{U_d}{U_{ref}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 8 \quad (2.13)$$

Abychom mohli považovat odporový dělič tvořený R_1 , R_2 za nezatížený, musí jím téct takový klidový proud, aby byl I_{ref} oproti tomuto proudu zanedbatelný, tedy aby byl zdroj napětí tvořený děličem pro nastavení pracovního bodu dostatečně tvrdý. Jedině tak lze považovat referenční napětí U_{ref} za konstatní.

$$I_{0,min} \sim 100 \cdot I_{ref} = 100 \cdot 10 = 1 \text{ mA} \quad (2.14)$$

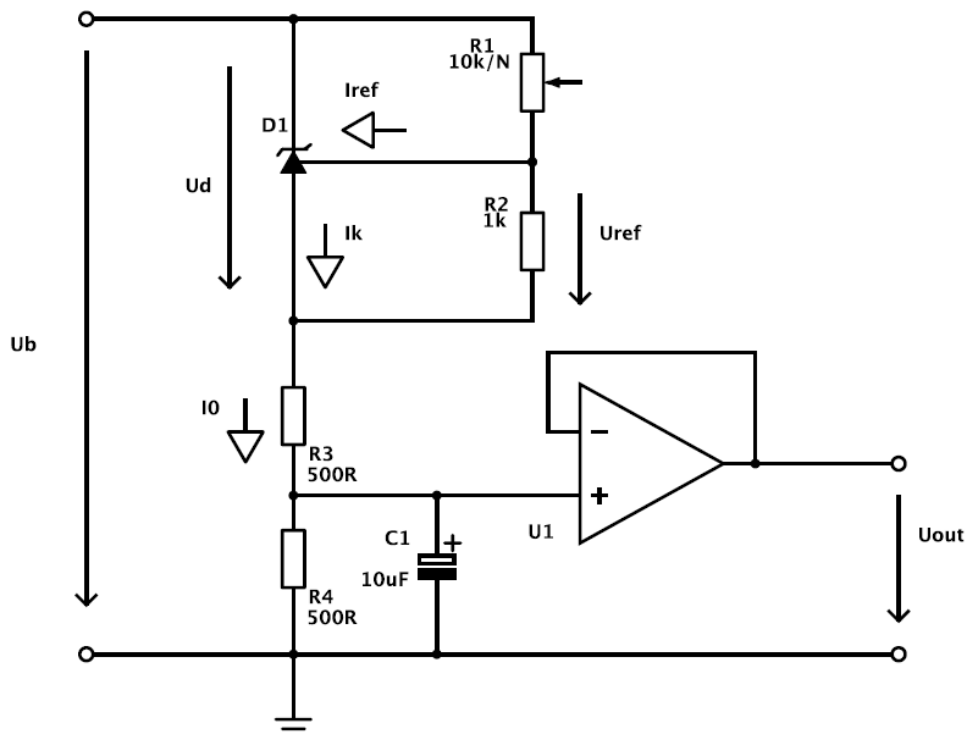
$$R_1 + R_2 = \frac{U_d}{I_{0,min}} = \frac{8}{0,001} = 8 \text{ k}\Omega \quad (2.15)$$

Z rovnic 2.13 a 2.15 je pak možno určit jednotlivé hodnoty odporů: $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 7 \text{ k}\Omega$.

Takto navržený obvod však ještě není kompletní. Předpokládaná změna napětí na baterii je $12 \pm 3\text{V}$, čemuž odpovídá rozkmit napětí $0 \div 6\text{V}$. Je však třeba myslet také na minimální úbytek na stabilizačním odporu, který je $U_{Rs} = 1\text{V}$. Proto rozkmit „sraženého“ výstupního napětí bude $1 \div 7\text{V}$. Pro zpracování v A/D převodníku je tedy nutné toto napětí dále přizpůsobit. Stabilizační odpor tedy bude rozdělen na dva stejné odpory. Teoreticky maximální výstupní napětí pak bude dělené na polovinu - 3,5V. V praxi bude maximální napětí vyskytující se na baterii při nabíjení 14,4V. V tomto stavu bude výstupní napětí na převodníku 3,2V.

Díky vysokofrekvenčnímu pulznímu proudu odebíraného měničem se dá předpokládat drobné zvlnění napětí, proto je vhodné výstup vyfiltrovat kapacitorem. Aby převodník byl co nejméně ovlivňován vnějším obvodem, je výstup ještě doplněn napěťovým sledovačem z operačního zesilovače.

Obr. 5 – Konečné zapojení obvodu pro měření napětí baterie



2.7 Pomocné napájení

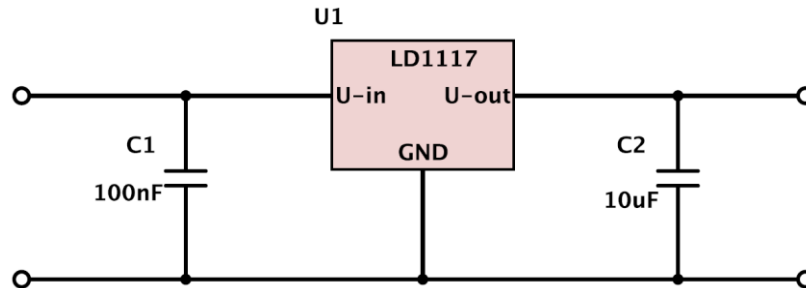
Především pro napájení mikroprocesoru je potřeba relativně přesné napětí 3,3V a to zejména pro napájení vnitřních napěťových referencí pro A/D převodníky. Z důvodů ochrany analogových vstupů procesoru budou také ostatní aktivní součásti zpracovávající analogový signál napájeny z napětí 3,3V. Potom nebude možné, aby na jejich výstupu bylo napětí větší než napájecí a následně došlo ke zničení A/D převodníku. Zvláštní napájení 5 V je také potřeba pro napájení AM přijímače. Pro napájení analogových obvodů bude vhodné vytvořit zvláštní napájecí sběrnici, která bude od hlavní výkonové sběrnice oddělena pomocí odrušovacího LC filtru. Konkrétní hodnoty byli zvoleny na základě doporučení z datasheetu. Obecně platí čím větší indukčnost tím lepší odrušení od šumu, větší indukčnost ale znamená větší impedanci a tedy větší úbytek napětí. Maximální rozdíl mezi hlavním napájecím napětím mikroprocesoru a analogovým má maximální výrobcem definovanou hodnotu.

	Min	Max
Rozdíl napětí V_{DD} a V_{DDA}	-0,3V	+0,3V
Rozdíl napětí S_{DD} a S_{DDA}	-0,3V	+0,3V

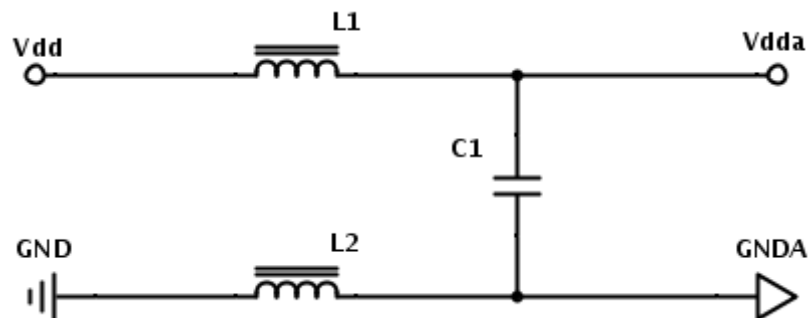
Při výběru tlumivek byl taky brán zřetel na jejich fyzickou velikost, vybrány byly tlumivky s následujícími parametry:

$$L = 47 \mu\text{H} \quad R = 670 \text{ m}\Omega \quad \text{Velikost pouzdra } 3,2 \times 2,5 \text{ mm}$$

Obr. 6 – Doporučené zapojení stabilizátoru napětí LD1117xx [3]



Obr. 7 – Odrušovací filtr pro analogovou napájecí sběrnici



2.8 Zpracování analogových signálů

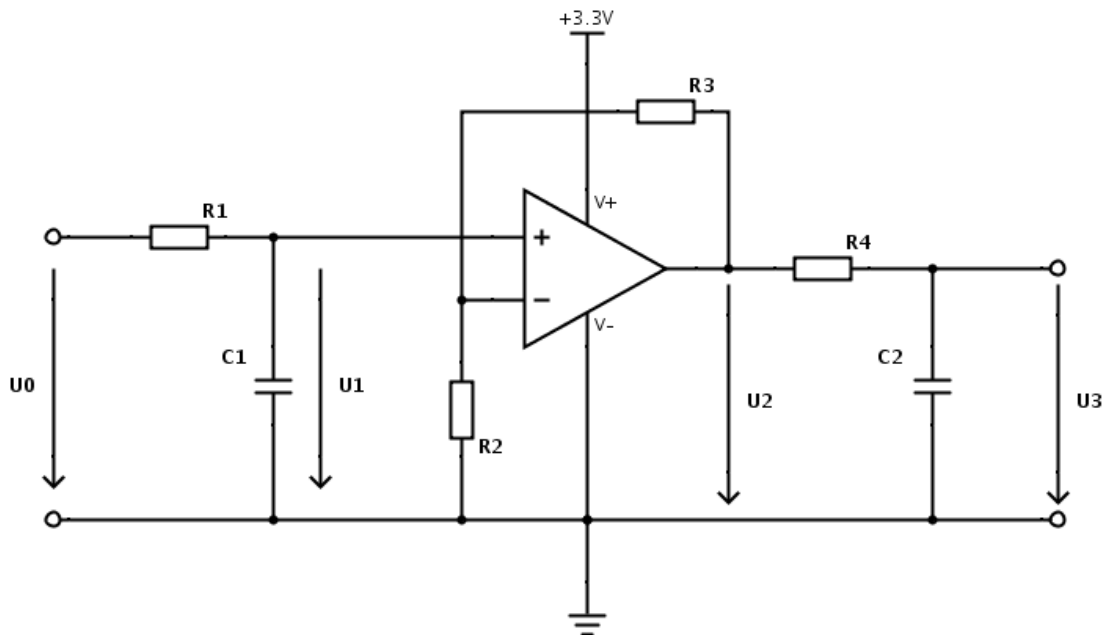
Při návrhu obvodu byla snaha vytvořit co nejvíce univerzální zařízení. Častou úlohou v praxi je zpracovávání různých analogových signálů. Z tohoto důvodu byly navrženy obvody pro analogové zpracování, konkrétně zesílení/ zeslabení a filtraci. Protože ještě v současné chvíli není požadavek, jaké externí analogové signály budou zpracovávány, bude tento obvod navržen univerzálně.

2.8.1 Zesílení a filtrace

Protože A/D převodník pracuje pouze s kladným napětím, nemá velký význam používat invertující zapojení OZ, přestože by bylo lepší ho použít. Neinvertující zesilovač totiž neumí zesílení menší než jedna, jinými slovy, neumí signál řízeně zeslabovat. Na vstupu a na výstupu je zařazena RC dolní propust prvního řádu. Napěťový přenos takového obvodu pak je roven:

$$K_{uc} = \frac{U_3}{U_0} = \frac{U_3}{U_0} * \frac{U_1}{U_1} * \frac{U_2}{U_2} = \frac{U_3}{U_2} * \frac{U_2}{U_1} * \frac{U_1}{U_0} = \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_2} * \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) * \frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1}$$

Obr. 8 - Obvod pro zesílení a filtraci analogového signálu



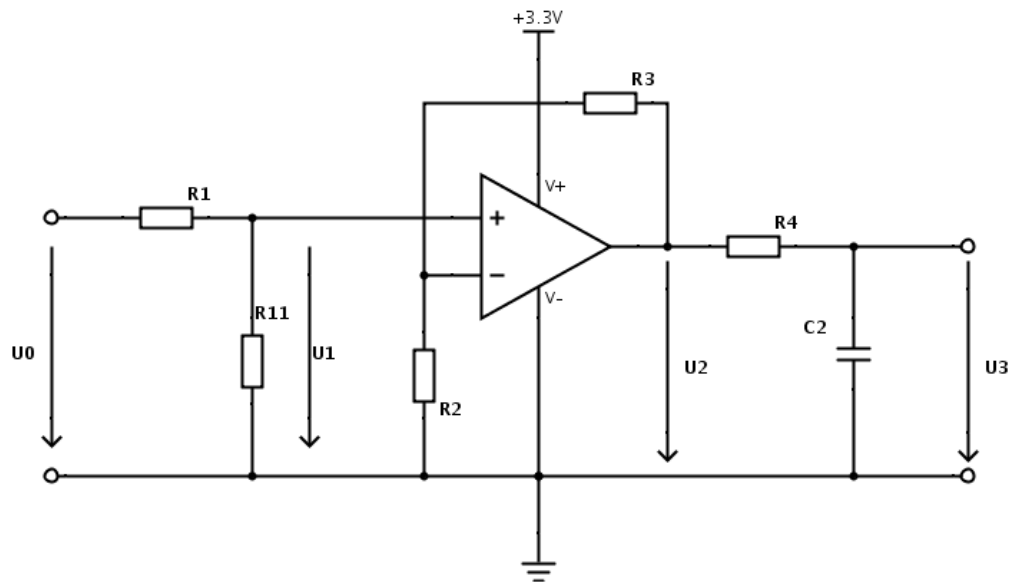
2.8.2 Zeslabení / zesílení

Pro případné zeslabení signálu je místo vstupního RC filtru použit odporový nezatížený napěťový dělič. Nezatížený je z toho důvodu, jelikož vstupní impedance OZ v neinvertujícím zapojení se blíží nekonečnu. Topologie napěťového odporového děliče je stejná jako topologie RC filtru a proto je možné použít tentýž obvod pro rozdílné účely (předpoklad stejných SMD pouzder je ve většině případů také splněn). Filtrování zde bude provádět pouze filtr výstupní. Napěťový přenos celého obvodu s napěťovým děličem na vstupu, kdy kondenzátor C_1 je nahrazen rezistorem R_{11} , má následující tvar:

$$K_{u1} = \frac{U_3}{U_0} = \frac{U_3}{U_0} * \frac{U_1}{U_1} * \frac{U_2}{U_2} = \frac{U_3}{U_2} * \frac{U_2}{U_1} * \frac{U_1}{U_0} = \frac{1}{1 + j\omega R_2 C_2} * \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) * \frac{R_{11}}{R_1 + R_{11}}$$

Úbytek napětí na rezistoru R_4 může považován za nulový, jelikož vstupní proud do A/D převodníku je taktéž blízký nule.

Obr. 9 – Obvod pro zesílení/zeslabení analogového signálu



2.8.3 Volba operačního zesilovače

Požadavky:

- Jednostranné napájecí napětí 3,3V
- Minimální napěťový úbytek od napájecího napětí
- Požadovaný počet OZ: 3 (dva kanály a jeden pro měření napětí baterie)
- Malá spotřeba energie
- Odolnost proti rušení

Vybraný operační zesilovač:

Texas Instruments

Typ: *OPA 4313*

- Napájecí proud 60 μA / kanál
- Napájecí napětí 1,8 V – 5,5 V
- Nízký šum
- Vhodný pro baterií napájené zařízení
- 4 OZ v pouzdře [11]

2.9 Propojení napěťových hladin mikrokontroléru a můstku

Protože zvolený mikroprocesor pracuje s binárními signály s 3,3V logikou a výkonový můstek pracuje s 5V logikou, je třeba napěťové hladiny řídicích signálů IN1, IN2 a D1, D2 oddělit. Výstupní signál z můstku FS (*Fault Status*) není třeba oddělovat, neboť procesor má toleranční pásmo vstupních digitálních signálů v rozmezí $-0,3 \div 6V$ [9]. K oddělení byl navrhnut dvoukanálový budič (*buffer*) s otevřeným kolektorem na výstupu.

Vybraný IO:

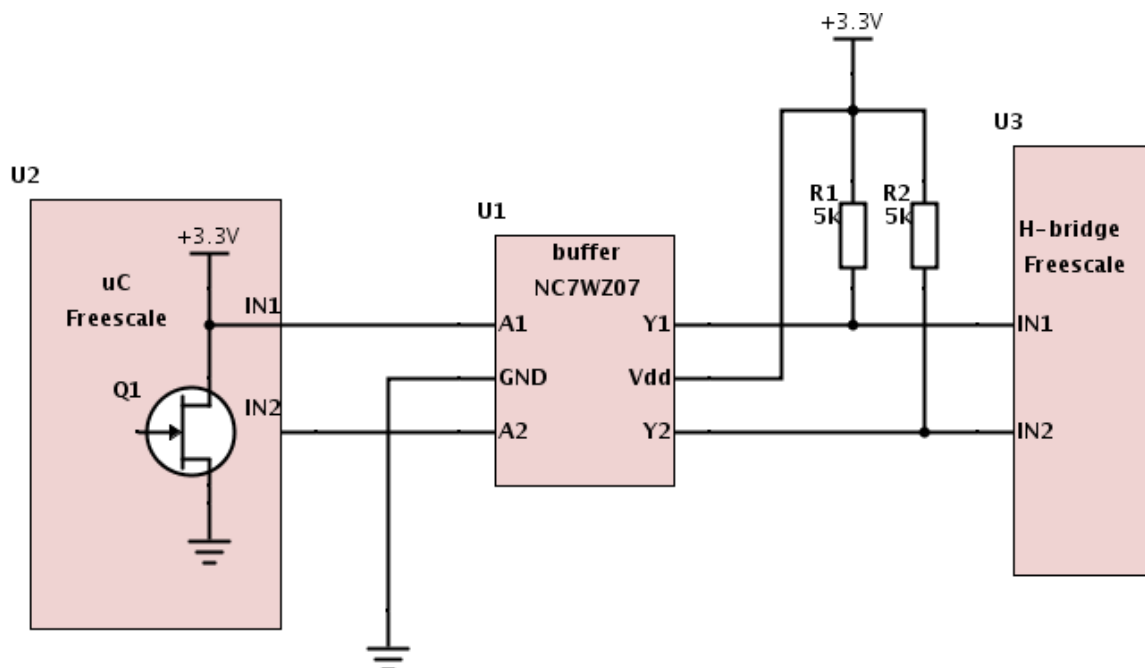
Fairchild Semiconductor

Typ: *NC7WZ07 TinyLogic UHS Dual Buffer (Open Drain Outputs)*

Vlastnosti:

- Malé pouzdro ($1,2 \times 2$ mm) SC70 6 – pin
- Velmi vysoká rychlost náběžné hrany, typicky 2,3 ns do 50 pF na 5V
- Napájení $1,65 \div 3$ V [13]

Obr. 10 – Zapojení budiče pro řídicí signály PWM



3 POUŽITÍ MIKROKONTROLÉRU

3.1 Výběr typu procesoru

Pro realizaci řídicích obvodů elektrických pohonů se osvědčilo použití digitálních signálových procesorů a to hned z několika důvodů. Pro řízení a regulaci je důležité v reálném čase zpracovávat signály z čidel proudu, otáček, poloh a dalších, provádět výpočty nejlépe v pohyblivé řadové čárce (*floating point processor*) a následně reagovat na výsledek například nastavením střídny na PWM výstupu. Procesory s pohyblivou řadovou čárkou v dnešní době zatím nejsou levnou záležitostí, proto se využívá častou vlastností DSC, kterou je podpora zlomkové aritmetiky. Další výhodnou vlastností pro realizaci pohonů je instrukce MAC (*multiple and accumulate*), instrukce, která konkrétně ve vybraném jádře procesoru dokáže v jednom strojovém cyklu vynásobit dvě čísla, výsledek přičíst do jednoho z násobitelů a ještě načíst další hodnoty pro násobení v příštím cyklu. Taková to instrukce se hodí pro realizaci rychlých číslicových filtrů. [10]

Na základě uvedených předností signálových kontrolérů byl vybrán digitální signálový kontrolér od firmy Freescale, protože se hodí pro řízení elektrických pohonů a v programovacím prostředí je možno s výhodou využít knihoven od výrobce, které mohou usnadnit programování. Zvolený procesor MC56F8256 je 16 bitový a má kromě dalších periférií *Enhanced Flex PWM* umožňující snadné řízení motorů pomocí PWM. Pro zpracování analogových signálů obsahuje dva pěti kanálové 12 bitové A/D převodníky. Pro zpracování signálu ze snímače otáček je zapotřebí čtyř čítačů, procesor obsahuje dva čtyřkanálové 16 bitové čítače/časovače. Tento výčet periférií je klíčový pro realizaci pohonu elektromotru s regulací otáček. Procesor obsahuje také periferie pro sériovou komunikaci, jako je například I2C/SPI/SCI/CAN. Vzhledem k dostatečnému množství volných IO pinů budou tyto komunikační vývody vyvedeny pro univerzálnost měniče na zvláštní konektor a měnič bude například schopen eventuálně pracovat pro nadřazené řídicí obvody.

Základní parametry procesoru:

- 16 bitový digitální signálový procesor
- 2 × 5 kanálů 12 bitového A/D převodníku
- 2 × 4 kanály 16 bitového čítače/časovače
- Sériová komunikační rozhraní: I2C/SPI/SCPI/CAN
- Paměť:
 - 64 kB flash
 - 8 kB data/program RAM
- 6 × Enhanced Flex PWM periferie s vysokým rozlišením
- Jádro DSC 56800E s modifikovanou Harvardskou strukturou
- 60 milionů instrukcí za sekundu při hodinách 60 MHz
- Napájecí napětí 3,3 V DC [5]

3.1.1 Zlomková aritmetika

Ve zlomkové aritmetice se pohybujeme v rozsahu hodnot $x \in (-1;1)$. Předpokladem tedy je, že vyjadřované konstanty větší než jedna budou mít patřičné měřítko. Důležitou výhodou této aritmetiky je, že po vynásobení dvou čísel výsledná hodnota zůstává opět v rozsahu $-1;1$, pouze má výsledek dvojnásobnou bitovou šířku. Existují instrukce pro násobení, které 32 bitový výsledek zaokrouhlí tak, že spodních 16 bitů zahodí. Tím se nezmění výsledná hodnota, klesne pouze přesnost výsledku [10].

Číslo ve zlomkové aritmetice má následující formát:

$$x = (-1)b_{n-1}2^0 + b_{n-2}2^{-1} + \dots + b_02^{-(n-1)} \quad ; x = \langle -1; 1 - 2^{-(n-1)} \rangle \quad [10]$$

Příklad vyjádření konstanty větší než jedna pomocí zlomkové aritmetiky:

Proporcionální zesílení regulátoru - $K_p = 12,86$

$$K_{p_{frac}} = \frac{12,86}{2^n} < 1$$

$$12,86 < 2^n$$

$$12,86 < 2^4$$

$$K_{p_{frac}} = \frac{12,86}{2^4} = \frac{12,83}{16} = 0,80375$$

Hodnota zesílení tedy lze vyjádřit hodnotou $K_{p_{frac}} = 0,80375$ a následným čtyřnásobným bitovým posunem tedy vynásobením šestnácti.

3.2 Pulzně šířkový modulátor eFlexPWM

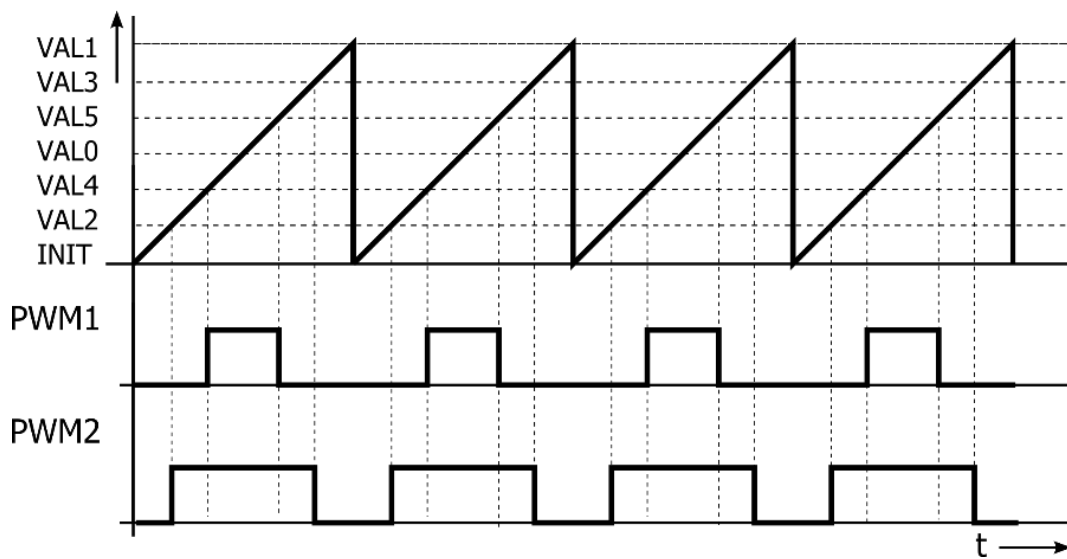
Jednou z nejdůležitějších periférií použitou v tomto projektu, je periferie pulzně šířkového modulátoru, výstup je přiveden přes budič (*buffer*) na vstupy výkonového můstku.

Periferie se skládá z několika submodulů, z nichž každý je schopen řídit jednu větev výkonového měniče. Může být použita, jak pro řízení všech známých typů motorů, tak pro spínané zdroje *SMPS*. Ve spolupráci s periferií *XBAR* je možné hlášení o chybě z můstků, čtených na i/o pinech, hardwarově propojit s PWM a docílit tak v případě poruchy okamžitému zastavení činnosti a to nezávisle na chodu nebo na probíhající fázi programu.

3.2.1 Vlastnosti modulu

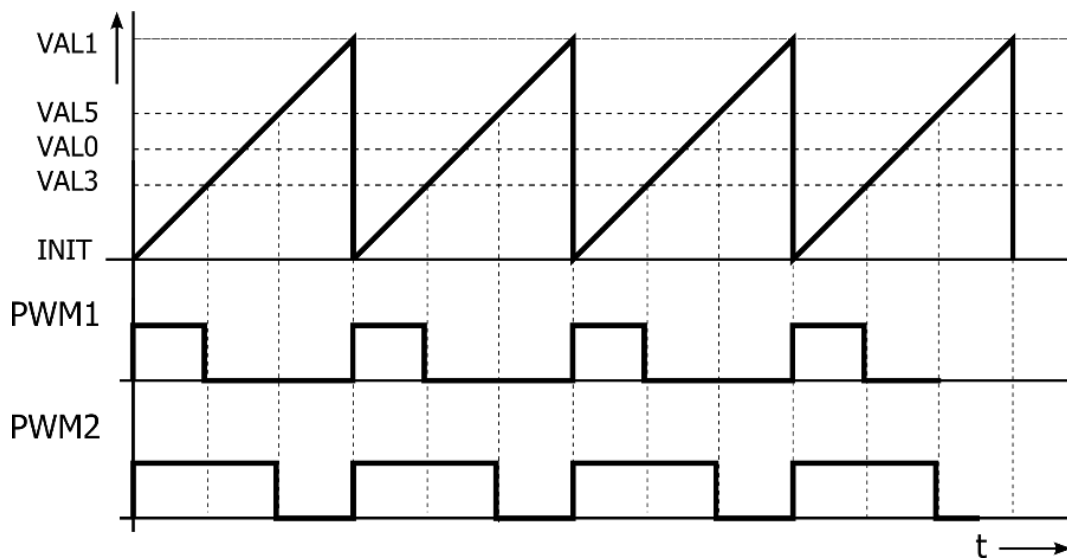
- Maximálně 16 bitové rozlišení PWM
- Vybraný model procesoru obsahuje 4 submoduly
- Možnost zarovnání na hranu *reloadu*, na střed (symetricky) – viz Obr. 11 a 12
- Nezávislé řízení obou hran každého PWM výstupu
- Jednotlivé PWM výstupy mohou pracovat nezávisle (jeden výstupní pin řídí jednu větev) nebo v komplementární dvojici (jeden výstupní pin řídí jeden tranzistor větve)
- Nezávislé vložení ochranné doby (*deadtime*) pro horní a dolní tranzistor
- Podpora pro synchronizaci s ostatními perifériemi procesoru (přes XBAR)
- Možnost tvorby filtrů pro chybové vstupy

Obr. 11 – Center align PWM pulse



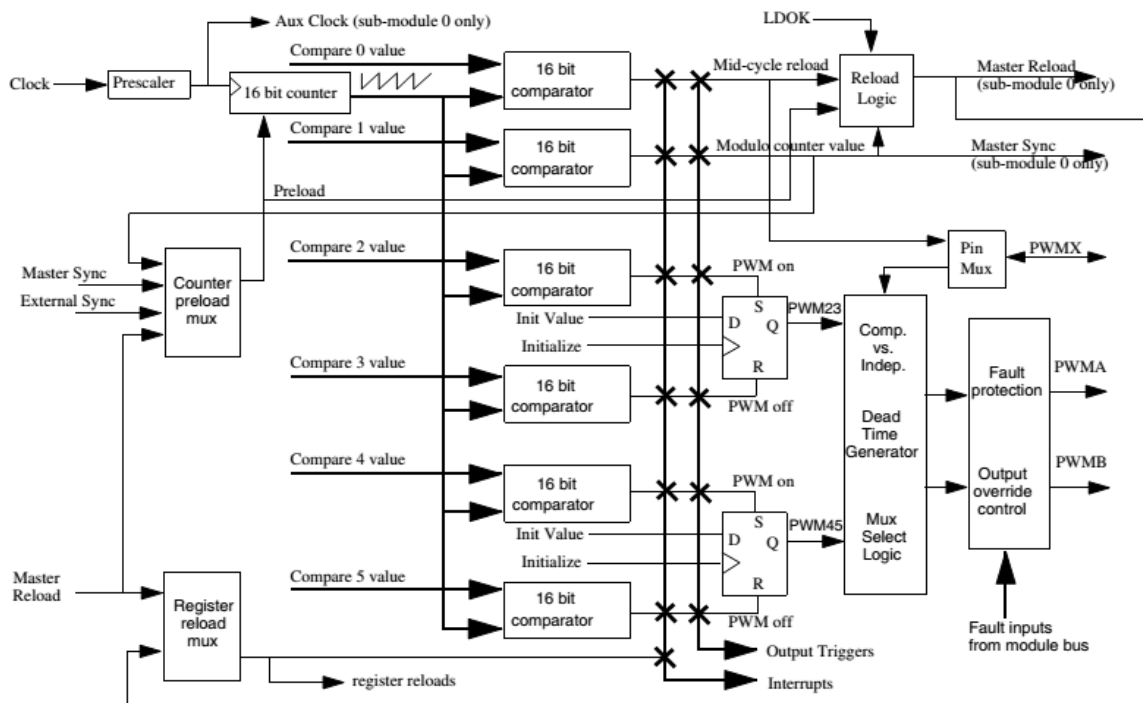
$$\text{VAL5} = -\text{VAL4}, \text{VAL3} = -\text{VAL2}$$

Obr. 12 – Edge align PWM pulse (na hranu reloadu)



3.2.2 Blokové schéma jednoho submodulu

Obr. 13 – Blokové schéma jednoho PWM submodulu [9]



Popis:

Generátorem nosného modulačného pilového signálu je 16 bitový čítač, čítajúci hodinové pulzy přes nastaviteľnú predďeličku, sloužící k hrubému nastavení spínací frekvence. Nosný signál je porovnávan v šesti 16 bitových digitálných komparátorech, z nichž každý může být použit pro generování jakékoliv hrany jakéhokoliv PWM výstupu. Obvykle bývá použit komparátor 2 a 3 pro PWM-A, 4 a 5 pro PWM-B, komparátor 1 pro nastavení okamžiku *reloadu* (okamžik resetu pily, kdy se zároveň aktualizují hodnoty v číslicových komparátorech), tedy pro přesné nastavení spínací frekvence a komparátor 0 například pro synchronizaci činnosti jiné periferie v průběhu každé PWM periody. Vlastní generování hran PWM je realizováno RS klopným obvodem, jehož set a reset vstupy mohou být přiřazeny libovolnému komparátoru. Výstup na pin je ještě doplněn o blok pro implementaci ochranné doby (*deadtime*) a blok hardwarové ochrany chyb (*fault protection*). Každý submodul navíc poskytuje volitelný pomocný třetí PWM výstup PWMX. Periferie je vybavena čtyřmi chybovými (*fault*) vstupy, které slouží pro hardwarové blokování činnosti submodulů. K zablokování tedy dojde okamžitě, není třeba vyvolávat například přerušení a blokování provádět softwarově. Samozřejmě taková možnost vyvolat následně přerušení, ve kterém se řeší způsobená chyba, je možná.

3.2.3 Konkrétní nastavení PWM submodulů:

Spínací frekvence je nastavená na hodnotu přibližně jeden a půl krát větší, než je jmenovitá frekvence můstku. Je to z důvodů blíže nespecifikovaných nastavení PWM periferie. Je možné si to dovolit, protože můstek nebude ani z daleka plně výkonově zatížen, a tak nevadí díky vyšší frekvenci větší přepínací ztráty.

PWM výstupy jsou v režimu nezávislém (*independent*). Každý PWM výstup řídí jednu větev můstku. (viz. Tab. 5 - *Tabulka popisující způsob řízení H-můstku*). Odpadají tedy záležitosti související s nastavení ochranné doby (*deadtime*), ta je řešena již od výrobce ve vlastním budiči můstku. V projektu bude použito zarovnání pulsů PWM na střed modulační periody (*center align*). V tomto režimu hodnoty komparátorů nabývají opačných hodnot $VAL5 = -VAL4$, $VAL3 = -VAL2$, přičemž ve středu modulační periody má vždy čítač nosné pily hodnotu nula, čili pulzy jsou pak symetrické okolo středu modulační periody. Výstupní napětí na motor má díky tomuto způsobu dvojnásobnou frekvenci než je spínací frekvence tranzistorů a tím bude dosaženo menšího zvlnění proudu motorem. Registr VAL0 je použit pro synchronizaci činnosti A/D převodníku, z důvodů nutnosti snímání proudu v konkrétních okamžicích. O této problematice bude pojednáno v kapitole o A/D převodníku číslo 3.3.2.1.

3.2.3.1 Chybové vstupy periferie

Chybové výstupy (*fault outputs*) z obou můstků jsou přivedeny na piny procesoru (viz příloha přidělení pinů 8.2). Při oživování projektu modelu pásového vozidla zatím nevznikl požadavek nějakým způsobem poruchy můstků řešit. Tato funkce je tedy pro jiné aplikace připravená, avšak zatím nevyužita.

3.3 A/D převodník

Periferie analogově digitálního převodníku je složena ze dvou A/D převodníků s 12 bitovým rozlišením a každý má svůj řídicí blok a oddělené napěťové reference. Každý z převodníků obsahuje 8 multiplexních vstupů. Je tedy možné zpracovávat celkem 16 analogových signálů.

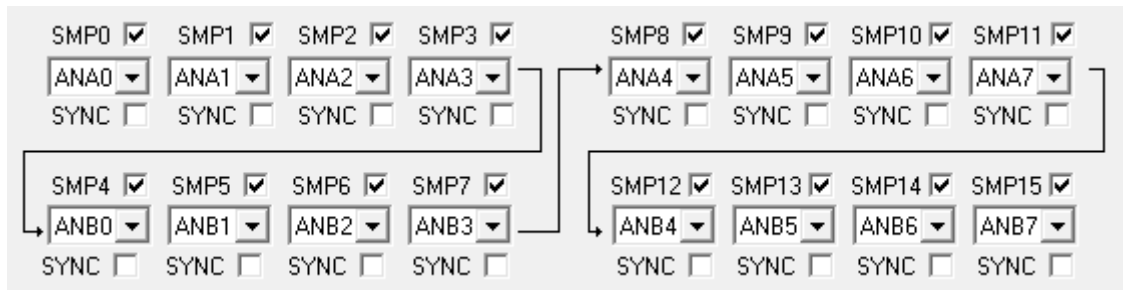
3.3.1 Vlastnosti převodníku

- 12 bitové rozlišení
- Maximální frekvence hodin 15 MHz
- Rychlost samplování až 3,33 MS/s
- Možnost synchronizace s PWM (přes XBAR)
- Volitelné zesílení 1x, 2x, 4x pro každý vstup
- Znaménkový/neznaménkový výsledek

Základní režimy:

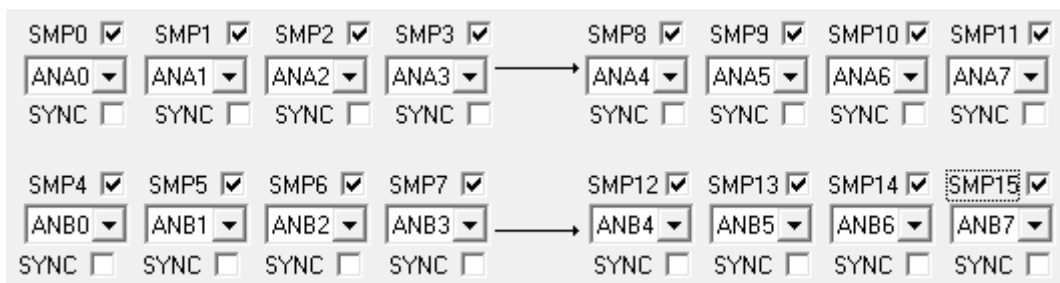
Sekvenční (*sequential*) – vzorky jsou zpracovávány postupně jeden po druhém

Obr. 14 – Sekvenční mód zpracování vzorků A/D



Paralelní (*parallel*) – vzorky z převodníku A a B jsou zpracovávány současně

Obr. 15 – Paralelní mód zpracování vzorků A/D



Skenovací mód:

- Jednou (*once*) – převod je spouštěn softwarově, provede se jednou, hodnoty se uloží do sample registrů a převodník se vypne a čeká na další spuštění převodu
- Smyčka (*loop*) – převod probíhá neustále pořád dokola, hodnoty sample registrů jsou neustále aktualizovány
- Spoušť (*trigger*) – spuštění převodů je odvozeno od vnějšího spouštěcího signálu, například z periferie PWM

3.3.2 Konkrétní nastavení A/D převodníků

V projektu jsou použity A/D převodníky pro následující účely:

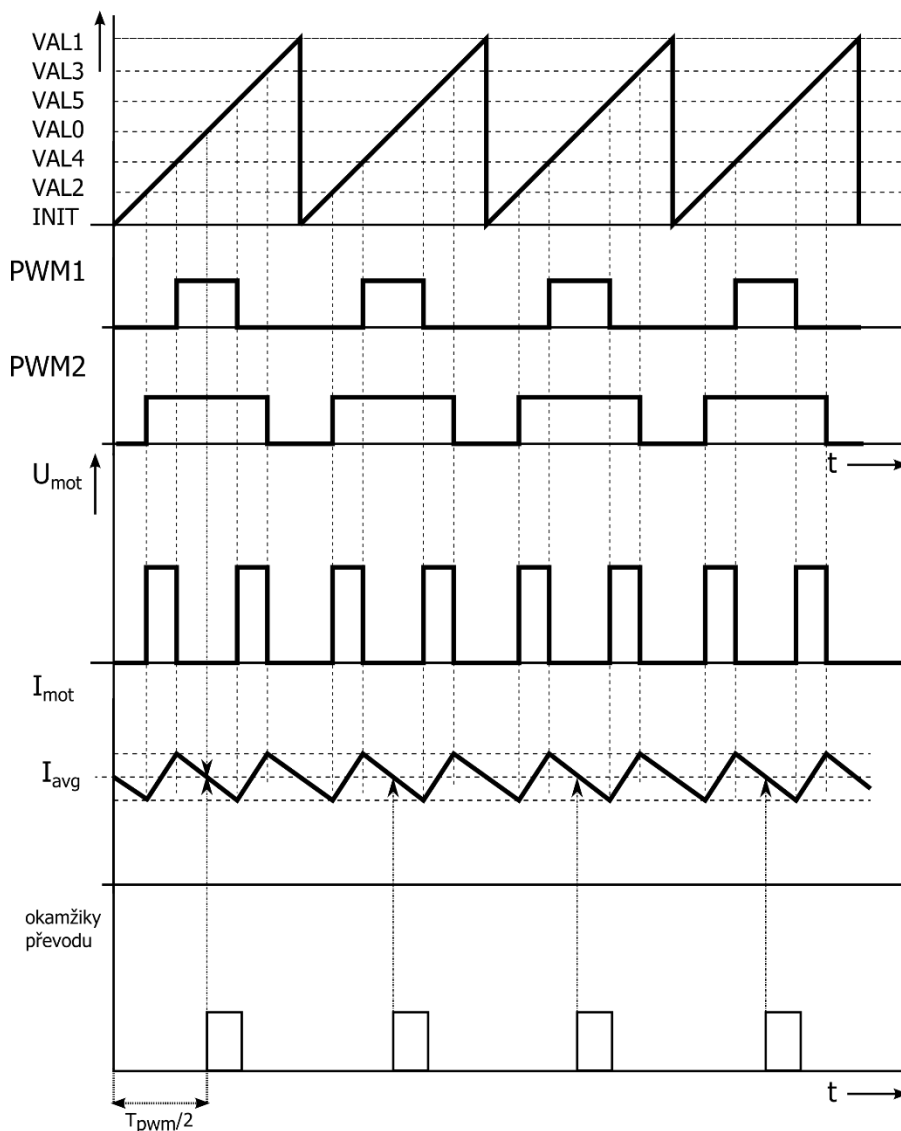
- Snímání proudů obou motorů
- Měření napětí baterie
- Dva analogové univerzální vstupy s obvodem pro úpravu vstupního signálu

3.3.2.1 Snímání proudů motorů

Pro měření proudu motorů za účelem regulace bylo navrženo nejjednodušší řešení a to měření úbytku napětí na bočniku. Jako obvod pro zpracování a zesílení signálu je použit integrovaný obvod MAX9929 o kterém již bylo pojednáno v kapitole 2.6. Velikost bočniku je navržena tak, aby při maximálním proudu výkonového můstku bylo na jeho výstupu 3,25 V, bude tak dosaženo téměř maximálního rozlišení převodníku.

Protože jsou motory napájené z pulzního napětí, bude proud tekoucí motorem v důsledku indukčnosti kotvy motoru zvlněný. Není tedy možné snímat proud v libovolných okamžicích, nebo ho snímat stále dokola, ale je nutné provádět převod synchronizovaně s nosnou frekvencí PWM. Na následujícím obrázku je celá situace naznačena.

Obr. 16 – Synchronizace A/D převodníku s PWM



Z obrázku je patrné, že skutečnou střední hodnotu proudu je možné snímat velmi jednoduše přesně uprostřed modulační periody. S výhodou je využito zarovnání PWM pulsů na střed periody, a tak tento okamžik bude nastávat u obou motorků současně. Je tedy možné snímat oba proudy v jednom přerušení synchronizovaného na střed modulační periody od libovolného submodulu.

Vybraný mikroprocesor disponuje periférií XBAR, díky které je možné některé výstupy periférií propojit hardwarově s vstupy jiných periférií. Protože se jedná o procesor určený k aplikacím v elektrických pohonech, výrobce s tímto problémem počítá. Každý submodul PWM je vybaven více komparátory, než je potřebné pro generování výstupního signálu a kterýkoliv z nich je možné použít pro spouštění událostí synchronizovaně během PWM periody, tzv. „triggerování“. Pro tento účel bude použit komparátor 0. Změnou porovnávané hodnoty se pak bude okamžik převodu časově posouvat v rámci modulační periody. Převodník je možné spouštět buď softwarově příkazem „ADC_start“, nebo vnějším signálem přivedeným přes XBAR. Spouštěcí výstup z PWM submodulu bude propojen přes XBAR na spouštěcí vstup A/D převodníku.

3.3.2.2 Měření napětí baterie

Bateriím neprospívá jejich hluboké vybíjení. Vybraná olověná baterie s gelovým elektrolytem je vůči sulfaci mnohem odolnější než olověné baterie a klasickým elektrolytem. Udává se, že odolnost je asi 4 týdny při hlubokém vybití. To však není důvod, proč se hlubokému vybíjení nevyvarovat. Za tímto účelem je snímáno napětí baterie a při poklesu napětí pod 9V je činnost výkonových můstků zablokována.

3.4 Quad timer

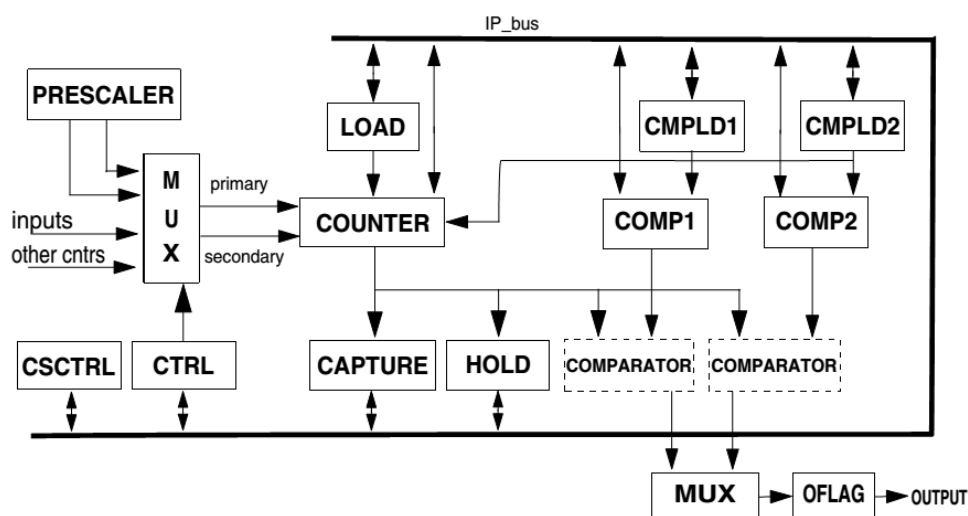
Periferie se skládá ze dvou modulů, TMR-A a TMR-B. Každý modul obsahuje čtyři identické skupiny 16 bitových čítačů/časovačů. Každý z nich pak obsahuje nezávislou předděličku, registr čítání, *load* registr, *hold* registr, *capture* registr, dva *comapre* registry a status a *control* registry, viz obr. 17.

Load registr – poskytuje inicializační hodnotu čítači, když je dosaženo mezní hodnoty. Jinými slovy, od této hodnoty se začíná čítat.

Hold registr – zachytí hodnotu čítače, když je čteno z ostatních čítačů. Tato schopnost je vhodná pro čtení kaskádních čítačů.

Capture registr – umožňuje pomocí externího signálu vytvořit „snímek“ současné hodnoty čítače
COMP 1 a 2 registr – jsou v nich uloženy hodnoty, s kterými je hodnota čítače porovnávána. Shoda může způsobit setování, vymazání nebo negaci bitu OFLAG. Může také vyvolat přerušení nebo nahrání nové hodnoty pro porovnání.

Obr. 17 – Blokové schéma modulu čítače/časovače [9]



3.4.1 Vlastnosti modulu čítače

- Čtyři 16 bitové čítače/časovače
- Čítání nahoru/dolu
- Čítače je možné kaskádně řadit
- Programovatelné čítací modulo
- Maximální externí čítací frekvence je $\text{clk}/2$, interní je clk
- Čítat lze jednou, nebo stále dokola
- Čítače mohou sdílet svoje vstupy v rámci jednoho modulu
- Programovatelný vstupní filtr

3.4.2 Režimy čítače/časovače

Základní dva režimy jsou:

1. čítání vnitřních hodinových pulzů, v takovém případě se hovoří o časovači, nebo čítání vnějších impulzů, kdy se hovoří o čítači.
2. čítání vnitřních hodinových pulzů tehdy, je-li aktivní externí sekundární signál, což umožňuje měřit šířku externích impulzů.

Čítač je schopen počítat nástupné, sestupné nebo oboje hrany vybraného vstupního pinu. Je schopen jednoduše dekodovat kvadrurní výstup např. z inkrementálního čidla. Externí vstupy mohou být využity jako:

- Čítací/časovací událost
- Mohou být využity jako spouštěcí vstup vybraného čítače a vykonat *capture* událost
- Mohou být využity pro spouštění přerušení [9]

3.4.3 Funkční módy

3.4.3.1 Stop mode

Čítač je nečinný. Žádné čítání nenastává, taktéž tento mód zakazuje veškeré přerušení od daného čítače.

3.4.3.2 Mód čítání (*Count mode*)

V tomto režimu čítač čítá nástupné hrany vybraného vstupu. Tento mód je užitečný pro generování periodických přerušení pro časovací účely, nebo pro čítání externích událostí. Při opačné polaritě, jež je nastavitelná v CTRL registru, dochází k čítání sestupných hran.

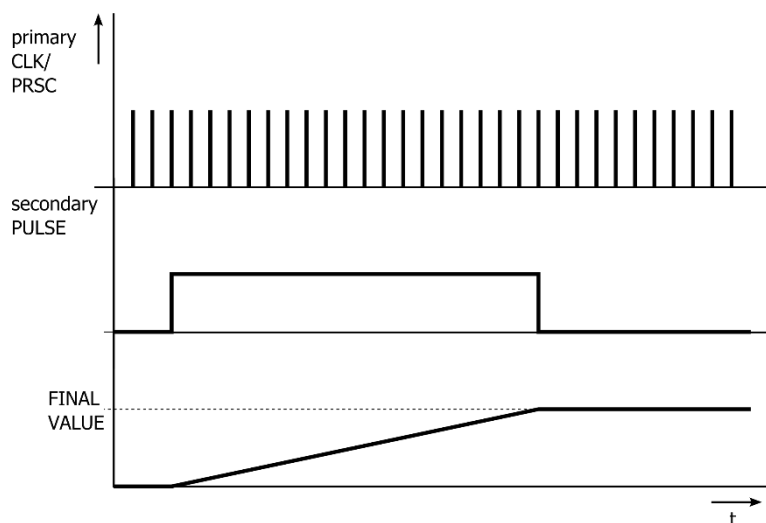
3.4.3.3 Mód čítání hran (*Edge count mode*)

Čítač čítá jak nástupné tak sestupné hrany vybraného vstupního signálu. Tento mód je vhodný pro počítání změn externího signálu. Například pro jednoduchý enkodér, kdy oproti čítání pouze jedné hran takto dosáhneme dvojnásobného rozlišení.

3.4.3.4 Synchronizovaný mód čítání (*Gated count mode*)

V tomto módu bude čítán primární vstup pouze za současné aktivní úrovně sekundárního vstupu. Tohoto módu je vhodné využít pro měření šířky externích impulzů. Je zde možná i inverze sekundárního vstupu.

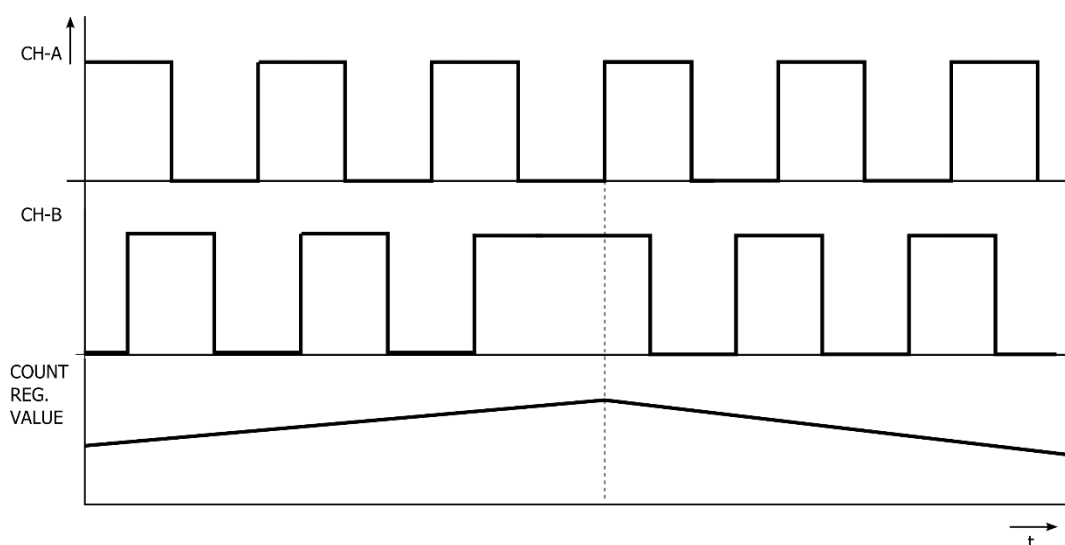
Obr. 18 – Měření délky pulzu pomocí *gated count mode*



3.4.3.5 Kvadrurní mód (*Quadrature mode*)

Kvadrurní mód slouží k jednoduchému zpracování dvouvstupového kvadrurního signálu, jenž bývá obvykle výstupem rotačního nebo lineárního kvadrurního enkodéru.

Obr. 19 – Zpracování kvadrurního signálu čítačem



3.4.3.6 Znaménkový čítací mód (*Signed count mode*)

Čítač čítá pulzy primárního vstupu, přičemž sekundární vstup udává směr čítání (nahoru/dolu).

3.4.3.7 Spouštěný čítací mód (*Triggered count mode*)

Čítač začne čítat pulzy primárního vstupu, pokud se na sekundárním vstupu objeví náběžná hrana (možno též nastavit na sestupnou). Čítání pokračuje, dokud nenastane *compare* událost nebo nepřijde další náběžná hrana sekundárního vstupu. V případě druhé náběžné hrany je čítání ukončeno a *compare* flag je nastaven na log. 1. Je možné nastavit, že příchodem další náběžné hrany se čítač restartuje a pokračuje v čítání od *reload* hodnoty.

3.4.3.8 Kaskádní mód

V tomto módu je výstup jednoho čítače připojen na vstup čítače dalšího. Kaskádní řazení lze však provést pouze v rámci jednoho modulu. Tímto způsobem je tedy možné sestavit 64 bitový synchronní čítač. Pokud vybraný zdrojový čítač čítá nahoru a nastane *compare* událost nebo přetečení, nadřazený čítač se inkrementuje. Pokud čítá směrem dolů a dojde ke *compare* události nebo k „podtečení“, nadřazený čítač se dekrementuje. Vždy, je-li jeden z kaskádně řazených čítačů právě čtený, jsou hodnoty ostatních čítačů v rámci jednoho submodulu zachyceny v jejich vlastních hold registrech [9].

Kromě těchto základních módů čítače disponují ještě dalšími módy jako například generátor pulzů, PWM generátor apod.

3.4.4 Použití čítačů

3.4.4.1 Snímání otáček

V původní koncepci měli být čítače využity pouze pro zpracování kvadrurních výstupů z inkrementálních snímačů otáček za účelem regulace otáček. Při ožívování však bylo zjištěno, že použité snímače nemají dostatečně velké rozlišení při „rozumné“ vzorkovací frekvenci, která je 500 Hz. Při této frekvenci se rozlišení pohybuje okolo $0 \div 16$ dílků. Kvadrurní mód bude tedy použit jen pro určení směru otáčení a pro určení, zda k otáčení vůbec dochází. Přesná absolutní hodnota otáček bude získána z čítače v *gated* módu, který bude měřit periodu pulzů, nikoliv frekvenci. Měření periody probíhá tak, že na primární vstup je přiveden přes předděličku vnitřní hodinový signál a na sekundární výstup z inkrementálního čidla je přiveden výstup z čidla. Čítání probíhá jen tehdy, jeli sekundární vstup v log. 1. Vyskytne-li se na sekundárním vstupu sestupná hrana, dojde k vyvolání přerušení, přečtení hodnoty čítače úměrné otáčkám a k vynulování čítače. Čítač pak čeká na další nástupnou hranu a proces se opakuje. Výsledná hodnota čítače je následně vydělena 32bitovou konstantou *Frac32 k_speed* z důvodů škálování. Z kvadrurního módu se určí směr otáčení následujícím způsobem popsaným diferenční rovnicí:

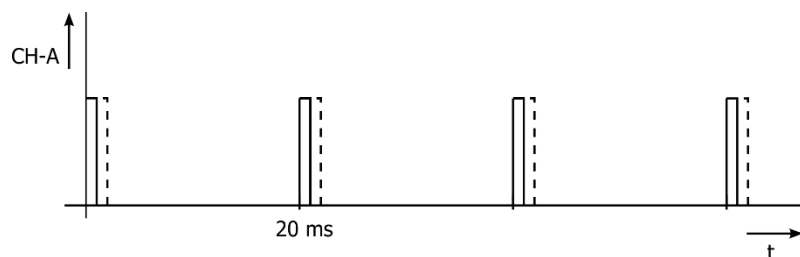
$$\begin{aligned} pulse_{diff} &= pulse(k) - pulse(k - 1) \\ pulse(k - 1) &= pulse(k) \end{aligned}$$

Bude-li vzorek v čase **k-1** menší než vzorek **k**, rozdíl pulzů je kladný a tedy také směr otáčení. V opačném případě je výsledek a otáčky záporné.

3.4.4.2 Zpracování signálů z AM přijímače

Výstupní signál z přijímače je binární s proměnnou periodou 1 – 2 ms, což při frekvenci 50 Hz odpovídá rozmezí střídy $s = 0,05 - 0,1$. Pro hrubou představu:

Obr. 20 – AM přijímač výstup



Zpracovávat takovýto signál analogově přes A/D převodník a filtrovat ho je sice možné, ale i po filtraci a bitovému posunu, tedy zesílení, bylo dosaženo jen žalostného rozlišení současně s velmi velkým šumem.

Díky však periférii XBAR je možné některé volné piny procesoru, které byli vyvedeny jako univerzální vstupy/výstupy (Universal IO. Headers – P1), přemostit na vstupy čítačového modulu B. Zpracování příkazů z přijímače tedy bude realizováno stejně jako snímání otáček a to tak, že bude měřena perioda pulzů. Pulzy přicházejí ze snímače těsně po sobě, a tak není třeba ošetřovat prioritu obou přerušení, protože se provádí v jiných po sobě jdoucích okamžicích.

4 REGULACE

Aby byl dodržen žádaný směr jízdy, je nutné zpětnovazební řízení otáček obou pásů. Za tímto účelem je každý pás vybaven snímačem otáček a otáčky motorů jsou regulovány. Mikroprocesor obsahuje algoritmus číslicových regulátorů. Vlastní algoritmy regulátorů jsou poskytovány přímo firmou Freescale ve formě volně stažitelných knihoven. Regulace bude probíhat podle regulačního schématu uvedeného v příloze 8.2.

Byl navrhnout kaskádní způsob regulace, který se tradičně používá pro řízení elektrických pohonů. Nadřazená primární otáčková regulační smyčka řídí podřazenou proudovou smyčku. Analytický návrh regulátoru je proveden pouze pro smyčku proudovou. Nastavení otáčkového regulátoru bude provedeno pokusně. Je to z toho důvodu, že i kdyby byl regulátor vypočten, tak při oživování by byly hodnoty zesílení stejně pozměněny, jelikož na stabilitu otáčkové smyčky bude mít vliv dynamika pásů, hmotnost a setrvačnost vozítka a další těžko popsatelné okolnosti.

Tab. 3 – Parametry motorků

$R_a = 9,64 \Omega$
$L_a = 12,66 \text{ mH}$
$\omega_0 = 5600/\text{min}$
$M_n = 50 \text{ g}\times\text{cm} = 4,9 \text{ mN}\times\text{m}$
$I_{an} = 350 \text{ mA}$
$M_k = 187 \text{ g}\times\text{cm} = 18,3 \text{ mN}\times\text{m}$
$I_{ak} = 1,2 \text{ A}$
$c\Phi = 0.0151 \text{ V/rad}$

4.1 Určení parametrů regulované soustavy

4.1.1 Výpočet konstanty buzení $c\Phi$

Pro přesnější určení konstanty $c\Phi$ bude její výpočet proveden několika způsoby a následně výsledné hodnoty zprůměrovány. Kompletní výpočet je v MATLAB skriptu, zde je uveden příklad jednoho výpočtu:

Určení $c\Phi$ ze stavu naprázdno:

$$c\Phi = \frac{U - R_a * I_{a0} - U_{kar}}{2\pi * \frac{n_0}{60}} = \frac{12 - 9,64 * 70 * 10^{-3} - 2}{2\pi * \frac{5600}{60}} = \quad (4.1)$$
$$= 0,0159 \text{ Vs}$$

4.1.2 Výpočet přenosů jednotlivých bloků

Přenos kotvy:

$$F_a = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + p\tau_a} = \frac{\frac{1}{9,64}}{1 + p \frac{12,66 * 10^{-3}}{9,64}} = \frac{0,103}{1 + p0,0013} \quad (4.2)$$

Přenos měniče:

Na výstupu je napětí $0 \div 12V$, na vstupu hodnota frakčního čísla $0 \div 0,5$. Z toho tedy plyne výstup k vstupu zesílení. Časová konstanta je dána polovinou modulační periody $T_{pwm}/2$.

$$F_{me} = \frac{K_{me}}{1 + p\tau_{me}} = \frac{\frac{12}{0,5}}{1 + p \frac{1}{2 * f_{pwm}}} = \frac{24}{1 + p34,153 * 10^{-6}} \quad (4.3)$$

Přenos čidla proudu:

Proudové čidlo bude uvažováno jako nekonečně rychlé a jeho přenos je dán pouze zesílením. Pro maximální hodnotu informace o proudu ve frakčním formátu čemuž odpovídá hodnota 1, je nutný takový proud, který vyvolá na vstupu A/D převodníku napětí 3,3V.

$$I = \frac{\frac{U_{AD}}{K_i}}{R_B} = \frac{\frac{3,3}{50}}{10 * 10^{-3}} = 6,6 A \quad (4.4)$$

Hodnota proudu je ještě navíc vynásobena bitovým posunem čtyřmi. Proto bude mít přenos čidla proudu následující tvar:

$$F_i = \frac{1}{6,66} * 4 = 0,6006 \quad (4.5)$$

Přenos otevřené smyčky regulované soustavy:

$$\begin{aligned}
 F_{os} &= F_a * F_{me} * F_i = \frac{1}{R_a} * \frac{K_{me}}{1 + p\tau_a} * K_i = \\
 &= \frac{0,103}{1 + p0,0013} * \frac{24}{1 + p34,153 * 10^{-6}} * 0,6006 = \quad (4.6) \\
 &= \frac{1,4846832}{(1 + p0,0013) * (1 + p34,153 * 10^{-6})}
 \end{aligned}$$

4.2 Návrh regulátoru metodou typických přenosů otevřené smyčky

Pro tuto regulovanou soustavu se hodí použít metodu optimálního modulu, jelikož soustava má charakter setrvačného članku druhého řádu s dvěma časovými konstantami. Větší časová konstanta 13 ms je elektromagnetická časová konstanta motoru a menší 34 us je časová konstanta měniče. Pro návrh regulátoru proudu bude menší konstanta měniče 34 us označena jako malá časová konstanta τ_σ .

Přenos otevřené smyčky podle optimální modulu:

$$F_o = \frac{1}{2\tau_\sigma p(\tau_\sigma p + 1)}$$

Vlastní výpočet regulátoru proudu:

$$\begin{aligned}
 F_R &= F_o * \frac{1}{F_{os}} = \frac{1}{2\tau_\sigma p(\tau_\sigma p + 1)} * \frac{(1 + p\tau_a) * (1 + p\tau_{me})}{K_S} = \quad (4.7) \\
 &= \left| \tau_\sigma = \tau_{me} = 34,153 * 10^{-6} s \right|_{\text{volba}} = \\
 &= \frac{1}{2 * 34,158 * 10^{-6} p(34,158 * 10^{-6} p + 1)} * \\
 & * \frac{(1 + p0,0013) * (1 + p34,153 * 10^{-6})}{1,4846832} = \\
 &= \frac{(1 + p0,0013)}{2 * 34,158 * 10^{-6} * 1,4846832 p} = \frac{(1 + p0,0013)}{1,014 * 10^{-6} p} = \\
 &= 12,86 + 9791 * \frac{1}{p}
 \end{aligned}$$

Výsledné hodnoty spojitého regulátoru:

$$K_{Rp} = 12,86$$

$$K_{Ri}' = 9791$$

Protože je v přípravku použit číslicový regulátor, je nutná diskretizace spojitého regulátoru. Integrovaní zesílení číslicového regulátoru je vynásobeno vzorkovací periodou regulátoru T_S , jenž odpovídá frekvenci, na které běží snímání proudu, výpočet regulační odchylky a regulačního zásahu regulátoru proudu.

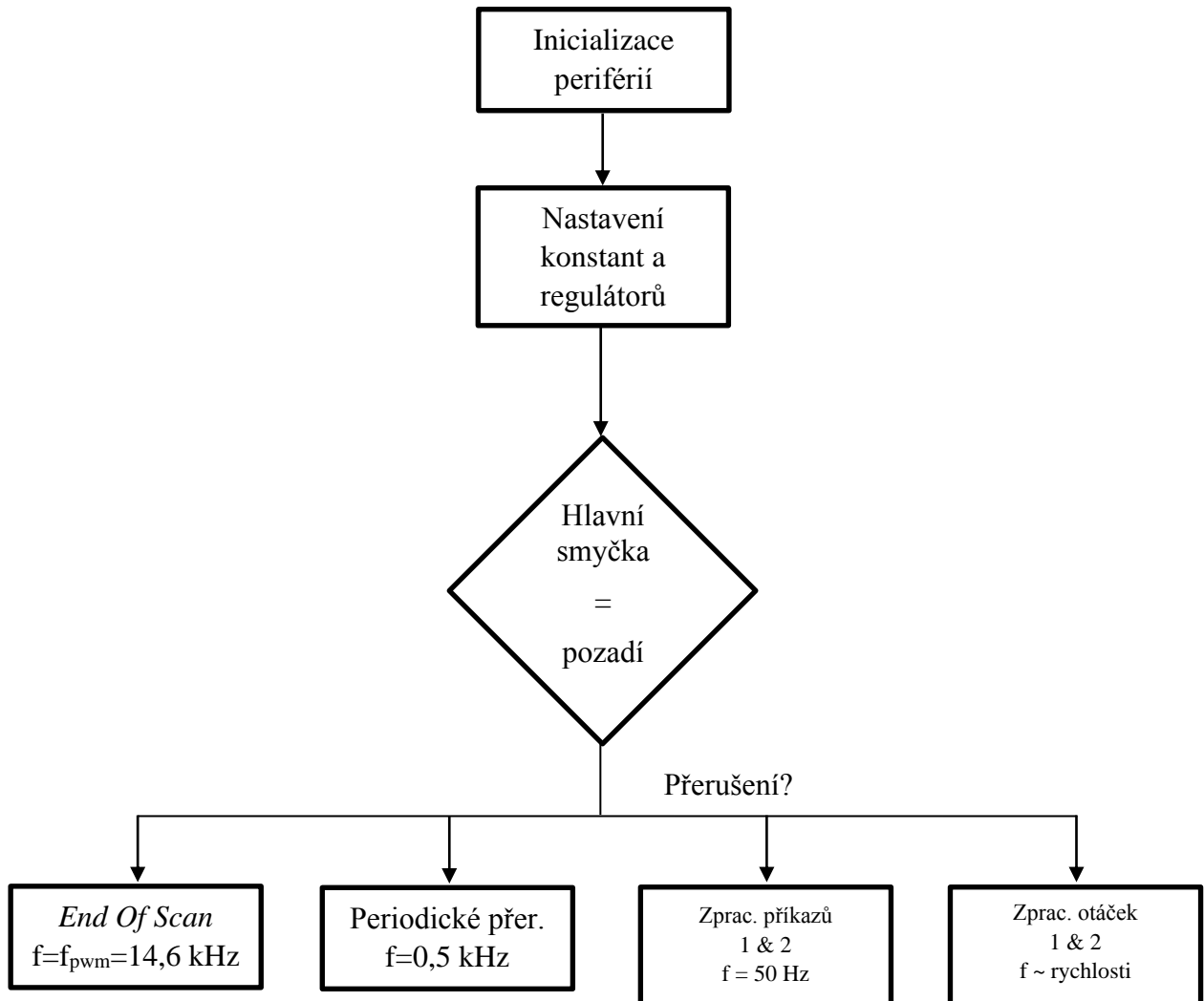
$$K_{Ri} = K_{Ri}' * T_S = 9791 * \frac{1}{14.64844 * 10^3} = 0,668 \quad (4.8)$$

Pro rychlý návrh regulátoru proudu při případné změně pohonných jednotek byl vytvořen skript v programu MATLAB, jež je přiložen v příloze 8.3.

5 SOFTWARE

5.1 Představení řídicího algoritmu

Obr. 21 – Popis algoritmu vývojovým diagramem



5.1.1 Popis jednotlivých bloků

- **Inicializace periférií** – provede se pouze jednou při startu programu. Tento blok obsahuje instrukce pro inicializaci používaných periférií.
- **Nastavení regulátorů a konstant** – deklarace parametrů regulátorů, zesílení, limity, shift a dalších konstant používaných v programu.
- **Hlavní smyčka** – v mnohých aplikacích obsahuje hlavní tělo programu. V tomto případě obsahuje pouze operace, které se provádějí „na pozadí“. Jsou to operace, u kterých nezáleží, v jakém okamžiku jsou vykonávány, není jich třeba na nic synchronizovat. Konkrétně se zde jedná o softwarové blokování výkonových můstků od hardwarového klíče, nebo od poklesu napětí po určitou mez. Dále se zde provádí signalizace vycentrování příkazů z vysílačky, aktualizace limitů pro proudový regulátor a výpočet filtračních konstant. A to je pro hlavní smyčku vše, zbytek se provádí v obsluhách přerušení.
- **End Of Scan přerušeni** – při dokončení převodu A/D převodníku. Potřeba využívat tento typ přerušeni souvisí s nutností snímat proud v konkrétních okamžicích, což bylo vysvětleno v kapitole 3.3.2.1. pojednávající o PWM periférii. Bylo by totiž zbytečné provádět operace, které souvisí s PWM a které nastavují PWM častěji, než je samotná modulační perioda. V tomto přerušeni se provádí prioritně čtení hodnot proudů z A/D převodníků, výpočet regulační odchylky, výpočet regulačního zásahu regulátoru proudu, a aktualizace VAL registrů PWM. Má nejvyšší prioritu, jelikož v něm probíhají činnosti citlivé na změnu okamžiku, kdy jsou prováděny.
- **Pravidelné přerušeni 500 Hz** – potřeba přerušeni na frekvenci 500 Hz vznikla z důvodů snímání otáček. Použité inkrementální čidlo nemá pro vyhodnocování otáček pásů pouze z kvadrurního módu dostatečné rozlišení. Proto se z kvadrurního módu určuje pouze směr otáček a zda jsou otáčky nulové nebo různé od nuly. I pro to je určité rozlišení potřeba. Čím menší rozlišení, tím obtížnější a méně stabilní bude regulace minimálních otáček. Z hlediska rozlišení by bylo vhodné provádět výpočet co nejpomaleji. Pro zachování jisté dynamiky regulace otáček nemůže regulátor běžet příliš pomalu. Je tedy nutné zvolit kompromis, který je v tomto případě 500 Hz.
- **Přerušeni pro zpracování příkazu 1 a 2** – jsou dvě odlišná přerušeni. Odlišná v tom smyslu, že jsou spouštěna od jiných čítačů, jinak jsou totožná. Tyto přerušeni zajišťují čtení hodnot přicházejících signálů z vysílačky. Spouštění je od vzestupné hrany přichozího signálu. Vhodným nastavením čítače ve spolupráci s přerušením od sestupné hrany snímaného signálu se vlastně provádí měření periody každého přichozího pulzu. V obsluze přerušeni se aktualizuje hodnota zpracovávaného signálu, upraví se její rozsah a vynuluje se *capture* registr.

- **Přerušeni pro zpracování otáček 1 a 2** – přerušeni velmi podobné jako pro zpracování příkazů, provádí se zde přesné určení absolutní hodnoty otáček. Měří se zde perioda pulzů z inkrementálního čidla.

5.2 Algoritmus určení žádaných otáček motorů

Hodnota žádaných otáček bude dána následující matematickou rovnicí:

$$\omega_{M1} = \omega_{CH2} + \omega_{CH1} \quad (5.1)$$

$$\omega_{M2} = \omega_{CH2} - \omega_{CH1} \quad (5.2)$$

$\omega_{M1} \in \langle -1,1 \rangle$ – žádané otáčky motoru 1

$\omega_{M2} \in \langle -1,1 \rangle$ – žádané otáčky motoru 2

$\omega_{CH1} \in \langle -1,1 \rangle$ – žádaný směr

$\omega_{CH2} \in \langle -1,1 \rangle$ – žádaná rychlost

Tab. 4 – Pohyby vozidla

Rovně vpřed	Rovně vzad	Otočka na místě vlevo	Otočka na místě vpravo
$\omega_{M1} = 1 + 0 = 1$ $\omega_{M2} = 1 - 0 = 1$	$\omega_{M1} = -1 + 0 = -1$ $\omega_{M2} = -1 - 0 = -1$	$\omega_{M1} = 0 + 1 = -1$ $\omega_{M2} = 0 - 1 = 1$	$\omega_{M1} = 0 + (-1) = 1$ $\omega_{M2} = 0 - (-1) = -1$

Zatáčení vlevo	Zatáčení vpravo
$\omega_{M1} = 1 + (-0,5) = 0,5$ $\omega_{M2} = 1 - (-0,5) \approx 1$	$\omega_{M1} = 1 + (0,5) \approx 1$ $\omega_{M2} = 1 - (0,5) = 0,5$

1 – maximální otáčky před

(-1) – maximální otáčky vzad

6 ZÁVĚR

V této bakalářské práci bylo podle prvního bodu zadání navrženo obvodové řešení stejnosměrného pohonu pro vlastní model pásového vozidla na dálkové ovládání. Návrh schémat a desek plošných spojů je proveden v profesionálním designérském programu *Altium Designer*, v kterém jsem se během semestrálního projektu a navazující bakalářské práci naučil s drobnou pomocí vedoucího práce pracovat.

Při návrhu byl kladen důraz na minimalizaci rozměrů výsledného produktu, na jistou systematickosti rozmístění komponent na desce a také na univerzálnost použití navrženého zařízení pro řízení dvou stejnosměrných motorů. Pro minimalizaci je většina použitých součástek v pouzdrech pro povrchovou montáž (SMD). Při osazování desky bylo nutné si osvojit pro mě doposud nepoznanou oblast pájení – techniku povrchové montáže (SMT), včetně pájení horkým vzduchem. Celá deska je z hlediska rozmístění komponent rozdělena na 3 části. Je oddělena analogová část od části digitální a výkonové. Spojovacím prvkem je část řídicí, tvořena převážně jen mikroprocesorem. Konektory, pro propojení řídicí desky s ostatními komponenty modelu, jsou rozmístěny po obvodu desky. Aby byl výrobek co nejuniverzálnější, zbylé nevyužité piny procesoru byly vyvedeny společně s oběma napájecími sběrnicemi na zvláštní konektor nazvaný *Universal IO*, na který je možné v budoucnu připojit libovolné rozšiřující moduly, nebo nadřazené řídicí systémy apod. Byli zde vyvedeny všechny typy sériových komunikací, kterými disponuje procesor, dále vstupně/výstupní piny (*GPIO*), které je možné periferií XBAR přemostit přímo na vybrané periferie, což umožňuje poměrně širokou škálu jejich uplatnění, vstupy A/D převodníků, komparátorů, a XBAR výstupy.

Navržená deska plošných spojů byla na zakázku vyrobena v Brně firmou *Apama Nikator s.r.o* zabývající se profesionální výrobou DPS. Osazení bylo provedeno moderními součástkami, jenž jsou většinou na českém trhu nedostupné. Součástky byly objednány z USA ve velkoobchodě *Mouser Electronics*. Při ožívování byla zjištěna jediná chyba v zapojení. Došlo k prepólování analogového napájení mikroprocesoru. Chyba spočívala už v chybně vytvořené schématické značce procesoru.

Programování procesoru od fy Freescale probíhalo v jazyce C ve vývojovém prostředí *Code Warrior IDE 5.9*, určené pro 16 bitové digitální signálové procesory. Konfiguraci periférií výrazně usnadnil grafický plug-in *Quick Start Guide 2.01*, který je vyvíjen na pobočce Freescale v Rožnově pod Radhoštěm. Pro osvojení znalostí o těchto procesorech a o programování v jazyce C jsem zároveň s prací absolvoval předmět Mikroprocesorová technika v pohonech.

Při ožívování byli postupně zjištěny následující nedostatky, kterým se budu snažit v budoucnu vyhnout.

Prvním nedostatkem se ukázalo nedostatečné rozlišení inkrementálního čidla otáček. Bylo zjištěno, že při vyhodnocení otáček z kvadrurního módu čítače je dosaženo nedostačujícího rozlišení ($0 \div 16$ pulzů pro $0 \div \omega_{\max}$). Tento problém byl vyřešen díky dostatečnému počtu čítačů. Z kvadrurního módu se určuje jen směr otáčení a zjišťují se nulové otáčky (tímto rozlišením jsou pak dány minimální otáčky, které jsme schopni účinně regulovat). Absolutní hodnota otáček již s velmi dobrým rozlišením je získávána z jiného čítače pracujícím v *gated* módu, který měří periodu pulzů. Otázkou je, za se dalo této chybě předejít, jelikož právě toto čidlo tvořilo

nejnákladnější položku celého projektu. A samozřejmě čidlo s větším rozlišením na jednu otáčku je dražší. Problém nejspíš spočívá v nevhodném umístění čidel. Jsou navržena pro montáž na zadní stranu motorů, a měří tedy podstatně větší otáčky hřídele rotoru, zatímco zde jsou použity pro měření otáček pásů, které jsou díky integrované převodovce menší. Tento problém byl bez větších problémů vyřešen softwarově a i regulace nízkých otáček je díky setrvačnosti vozidla plynulá.

Dalším nedostatkem hardwarové koncepce byl stabilizátor napětí 3,3V pro napájení především mikroprocesoru. Po zapnutí všech potřebných periférií se stabilizátor začínal přehřívat, působením tepelné ochrany docházelo ke kolísání a dokonce i k mžikovému výpadkům napětí. Podle datasheetu však nedošlo k překročení limitu u žádné veličiny. Situace by se zlepšila, kdyby byla vytvořena na DPS kovová plocha, do které by se stabilizátor mohl chladit. Je možné, že by i toto řešení nebylo dostatečné, protože i doplněný chladič nepřinesl výrazné zlepšení. Navrhovaný způsob příštího vylepšení je, použití spínaného stabilizátoru, které mívají větší účinnost, a tedy na nich nedochází k takovým výkonovým ztrátám. Zatím byla situace vyřešena použitím jiného lineárního regulátoru v pouzdře TO 220, který se chladí do kovové konstrukce vozítka.

Do budoucna bych chtěl vytvořit větší a kvalitnější model vozidla, při návrhu s tím bylo počítáno, je možnost použít vytvořený měnič pro motory o jmenovitém výkonu až 60W (při zvýšení napájecího napětí až na maximální napětí můstku - 200W). Další vylepšení by se mohlo týkat dálkového ovládání. Jednou možností je využití kvalitnější soupravy se šifrovaným přenosem. Mým cílem však je připojení *Bluetooth*, nebo *Wi-Fi* modulu a vozítko řídit z PC. Současně s řízením uskutečnit i například přenos obrazu, přičemž na vozítku by byla umístěna kamera.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] AVAGO TECHNOLOGIES. *HEDR-54xx datasheet*. 11.7.2011, 11 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/ghlojlx9ws91hky/1_HEDR-5420-ES214-Avago.pdf
- [2] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. *MAX9929 datasheet*. Rev 3. Sunnyvale USA, 4.2012, 14 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/m6f0fa7h5r1g2ue/2_MAX9928F-MAX9929F.pdf
- [3] ST MICROELECTRONICS. *LD1117xx datasheet*. Rev 32. 2012, 41 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/5muzkd9yf1a02vf/3_voltage_reference_STelectro.pdf
- [4] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MC33886 datasheet*. Rev 9.0. 4.2011, 27 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/3tm9dxuy4wltjwj/4_MC33886-mustek.pdf
- [5] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MC56F8255 datasheet*. Rev 3.0. 4.2011, 88 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/0ec2mqx8nl5ghal/5_MC56F825X.pdf
- [6] ST MICROELECTRONICS. *TL431 datasheet*. Rev 1. 2012, 14 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/gkxxviuk9g5hbzk/6_TLVH431.pdf
- [7] HITEC. *Ranger 2N user manual*. 4 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/6rt9amy63amo6dd/7_Hitec_Ranger_2N.pdf
- [8] HÄBERLE, Heinz. *Průmyslová elektronika a informační technologie*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2003, 719 s. ISBN 80-867-0604-4.
- [9] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MC56F825x/4x Reference Manual*. Rev 2.0. 10/2010. 629 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/z5ljdj7m02e250r/9_MC56F825XRM.pdf
- [10] KLÍMA, Bohumil. *Střídavé pohony: Pracovní verze* [online]. VUT Brno Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/dgs5oqxcb7d8et/10_MSPO-MMRP.pdf
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. *OPA4313 datasheet*. Rev 1. 3/2013, 38 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/uo12eagh8w5ic19/11_OPA4313.pdf
- [12] TT MOTORS. *GM37-3530-1256 datasheet*. Rev 1. 2011, 1 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/0c4oqrrzym1bxzs/12_a2013912135728_21_GM37.pdf
- [13] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *NC7WZ07P6X datasheet*. Rev 1.10.0. 3/2008, 10 s. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/g3pvvcpr141wga2/13_Fairchild_Semiconductor-NC7WZ07P6X.pdf