

UNIVERZITA PARDUBICE  
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Bc. Tomáš Lelek

Univerzita Pardubice

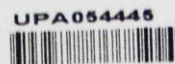
Dopravní fakulta Jana Pernera

Elektrický pohon bateriového studentského experimentálního elektromobilu

Bc. Tomáš Lelek

Diplomová práce

2013



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Lelek**  
Osobní číslo: **D11765**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura: Elektrotechnická zařízení**  
Název tématu: **Elektrický pohon bateriového studentského experimentálního elektromobilu**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Analýza současného stavu
2. Návrh algoritmu řízení trakčního pohonu
3. Návrh algoritmu řízení nadřazeného regulátoru trakčních pohonů
4. Implementace navržených struktur do zvoleného regulátoru
5. Ověření vlastností realizované struktury řízení vozidlových pohonů

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

1. LARMINIE, James a John LOWRY. Electric Vehicle Technology Explained. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2003. ISBN 0-470-85163-5
2. MOHAN, Ned. First course on power electronics and drives. Minneapolis: MNPERE, 2003. ISBN 0-9715292-2-1
3. BURKHARD, M. C pro mikrokontroléry. BEN Praha, Technická literatura, 2003
4. Balátě, Jaroslav. Automatické řízení. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004.
5. Firemní literatura a www stránky výrobců integrovaných obvodů, snímačů apod.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Ondřej Černý, Ph.D.**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce:

**3. ledna 2013**

Termín odevzdání diplomové práce:

**23. května 2013**

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.

doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2013

## **PROHLÁŠENÍ:**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 23. 5. 2013

Tomáš Lelek

## **PODĚKOVÁNÍ:**

Na tomto místě bych chtěl hlavně poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Ondřeji Černému, Ph.D. za jeho cenné připomínky a podněty k dané problematice. V neposlední řadě také patří velký dík mé rodině, jež mě během studia podporovala jak materiálně, tak i duševně.

*Tato diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu „IVINTEP - Inženýrské vzdělávání jako interakce teorie a praxe“, reg. č. CZ.1.07/2.2.00/15.0352*

## **ANOTACE**

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací elektrického pohonu pro trojkolový experimentální elektromobil. V první části práce je popsána trakční mechanika experimentálního elektromobilu, na základě které je sestavena trakční charakteristika vozidla. Dále je v práci prezentována elektrická výzbroj vozidla, tu lze rozdělit na část výkonovou a řídicí. Práce se dále věnuje návrhu regulačních struktur pro řízení pohonu. Regulace je navržena tak, aby byl při jízdě vozidla elektronicky realizován diferenciál jeho zadních kol. Ve svém závěru se práce zbývá implementací a ověřením regulačních struktur.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Elektrický pohon, PS regulátor, diferenciál, mikrokontrolér, trakční charakteristika

## **TITLE**

Electric drive for battery student experimental electric vehicle

## **ANNOTATION**

This thesis is focused on design and realization an electric drive for the experimental electric vehicle. The traction mechanics is described in first chapter. In the next paragraph is calculated speed-tractive-effort curve. In the thesis also is presented electric equipment that consists of power unit and control units. In further paragraphs are designed regulative structures for controlling drive. The regulation design is founded on electronic differential of rear wheels. The vehicle testing and verification is described in the end of the thesis.

## **KEYWORDS**

Electric drive, PS controller, differential, microcontroller, speed-tractive-effort curve

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Základní specifika experimentálního elektromobilu.....</b>	<b>11</b>
1.1 Výchozí stav pro řešení ročníkových projektů a diplomových prací.....	11
1.2 Požadavky na nadstavbové funkcionality souhrnně .....	12
1.3 Popis současného mechanického uspořádání vozidla .....	13
<b>2 Trakční výpočty .....</b>	<b>15</b>
2.1 Stanovení jízdních odporů vozidla.....	15
2.1.1 Výpočet valivého odporu.....	15
2.1.2 Výpočet třecího odporu v ložiskách kol .....	16
2.1.3 Výpočet aerodynamického odporu .....	17
2.1.4 Výpočet odporu ze sklonu tratě .....	18
2.1.5 Dynamický odpor vozidla.....	18
2.1.6 Celkový jízdní odpor vozidla.....	19
2.2 Moment síly potřebný pro rozjezd vozidla .....	20
2.3 Výpočet potřebného výkonu motoru pro rozjezd vozidla.....	22
2.4 Ověření správného vytížení baterií .....	23
2.5 Trakční charakteristika vozidla.....	24
<b>3 Elektrická výzbroj experimentálního elektromobilu – trakční část.....</b>	<b>26</b>
3.1 Blokové schéma elektrické výzbroje vozidla.....	26
3.2 Výkonový stupeň trakčního pohonu .....	28
3.3 Řídicí jednotka trakčního pohonu .....	31
3.4 Pomocná mikrokontrolérová jednotka .....	32
3.5 Soubor ochran .....	33
3.6 Použité snímače.....	35
3.6.1 Snímač natočení řídítek .....	35
3.6.2 Snímání otáček motorů .....	37
3.6.3 Snímače proudu .....	38
<b>4 Rozbor možností pro řešení elektronického diferenciálu .....</b>	<b>40</b>
4.1 Princip diferenciálu obecně.....	40
4.2 Mechanická analýza jízdy experimentálního elektromobilu.....	42
4.3 Navržená řešení elektronického diferenciálu zadních kol vozidla.....	45



<b>5</b>	<b>Regulace pohonu .....</b>	<b>47</b>
5.1	Princip regulace obecně .....	47
5.1.1	Ovládání v otevřené smyčce .....	47
5.1.2	Řízení v uzavřené smyčce.....	48
5.2	Popis regulované soustavy – stejnosměrného motoru s permanentními magnety .....	49
5.3	Regulace momentového diferenciálu .....	51
5.3.1	Popis navržené momentové zpětnovazební regulace.....	51
5.3.2	PS regulátor proudu .....	52
5.4	Regulace otáčkového deterministického diferenciálu.....	53
5.4.1	Popis navržené otáčkové zpětnovazební regulace .....	54
5.4.2	Otáčkový PSD regulátor .....	56
<b>6</b>	<b>Algoritmizace regulace pohonu a ovládání vozidla .....</b>	<b>57</b>
6.1	Algoritmy pro pomocnou mikrokontrolérovou jednotku.....	57
6.1.1	Způsob implementace softwaru pro pomocnou mikrokontrolérovou jednotku.....	58
6.1.2	Přerušení od sériové linky.....	63
6.2	Algoritmy pro řídicí mikrokontrolérovou jednotku .....	63
6.2.1	Způsob implementace softwaru pro řídicí jednotku pohonu .....	64
6.2.2	Přerušení od časovače T0 .....	69
6.2.3	Přerušení od sériových linek.....	70
6.3	Specifika komunikačního protokolu zavedeného mezi MCU jednotkami pohonu ...	70
<b>7</b>	<b>Popis implementace softwaru .....</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>Ověření funkčnosti algoritmů a technologie jako celku.....</b>	<b>75</b>
<b>9</b>	<b>Náměty pro pokračování v ožiování vozidla .....</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>78</b>
<b>11</b>	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>80</b>
<b>12</b>	<b>Seznam obrázků a tabulek.....</b>	<b>82</b>
<b>13</b>	<b>Přílohy.....</b>	<b>83</b>

## ÚVOD

V dnešní době se otázka elektromobility dere čím dál více na povrch, což přímo vybízí k rozjímání nad touto problematikou nejen techniky, ale i společnost jako celek. Zatím však mezi lidmi panuje všeobecný konsenzus, který upřednostňuje provozování konvenčních automobilů. Z vědeckých zjištění však vyplývá, že dříve nebo později budou muset lidé tento postoj přehodnotit, neboť se zásoby ropy stále ztenčují. Také si je nutno uvědomit, že s rostoucím počtem automobilů do atmosféry uniká stále více zplodin z nedokonalé spáleného paliva. Z tohoto důvodu je nutno začít přecházet na „čistou energii“ již dnes. Někdo by možná namítl, že se elektrická energie získává rovněž z nerostných surovin jako palivo, což je z větší části pravda. Ovšem pro ovzduší jsou bezprostředně škodlivé pouze tepelné elektrárny, které elektrickou energii získávají z energie uložené ve fosilních palivech. Tento segment energetického průmyslu je nutno do budoucna odstranit a nahradit jej šetrnějšími způsoby získávání energie, jako jsou například jaderné elektrárny nebo elektrárny pracující na principech obnovitelných zdrojů.

Výše uvedená úvaha není jistě lichá, neboť se během pár posledních let objevila spousta technologií, které s elektromobilitou úzce souvisejí. Mezi nejvýznamnější z nich patří bezesporu systém Smart Grids, česky řečeno systém chytrých sítí, který byl vytvořen mj. pro podporu elektromobilů. Systém je založen na myšlence neustálého přelévání elektrické energie mezi sítí a akumulátory elektromobilů, potažmo i mezi jinými zařízeními, což by mělo výrazně přispět k symetričtějšímu vyřízení distribuční soustavy po masivním příchodu elektrických vozidel. Mezi dalšími pokroky na poli elektromobility jsou elektromobily samotné. Spousta univerzit a firem po celém světě se jejich vývojem zabývá, což je zřejmé ze zveřejněných vědeckých prací i z nabídek prodejců. Jelikož není řada otázek z oblasti trakční mechaniky, dynamiky, energetiky a řídicích systémů uspokojivě zodpovězena, tak se i Dopravní fakulta Jana Pernera zabývá tvorbou elektromobilu. Vozidlo je budováno prostřednictvím ročníkových projektů a diplomových prací studentů Katedry elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě.

Hlavním cílem této práce je provést kompletní návrh řídicích algoritmů, potažmo elektronického diferenciálu pro pohon vozidla, a ověřit správnou funkčnost navržených algoritmů přímo na vozidle.

Konkrétněji řečeno se první část práce věnuje základnímu uspořádání vozidla, což znamená, že popisuje mechanickou základnu, na které byly vystavěny další podpůrné celky. V navazujících kapitolách bude čtenář seznámen s trakční mechanikou a dynamikou vozidla. Dále práce obsahuje statě pojednávající o návrhu a realizaci elektroniky pohonu, pomocných elektronických celků a řídicí elektroniky. Nejvýznamnější část práce se zabývá vývojem a implementací již zmíněných řídicích algoritmů pro pohon vozidla. V závěru práce jsou prezentovány výsledky, jichž se během vývoje experimentálního elektromobilu dosáhlo.

Paralelně s touto prací běží diplomová práce, která se zabývá vývojem nabíječe trakčních baterií a bateriového managementu pro experimentální elektromobil. U obou prací je definováno bezpečnostně relevantní rozhraní, pomocí něhož budou práce dohromady spolupůsobit na vybavování ochrany trakčních baterií. Dále je vyznačeno komunikační rozhraní, nad kterým bude prováděna výměna informací mezi jednotlivými systémy. Rozhraní bude později využito pro zobrazování charakteristických veličin na ovládacím pultu vozidla a pro logování veličin na paměťové médium. Díky těmto nadstandardním funkcím se vozidlo může stát i pomůckou ve výuce předmětů, jež se tematicky věnují pohonům.

# 1 ZÁKLADNÍ SPECIFIKA EXPERIMENTÁLNÍHO ELEKTROMOBILU

## 1.1 Výchozí stav pro řešení ročníkových projektů a diplomových prací

Prvotní myšlenkou bylo vytvořit lehké městské vozidlo na baterie, určené především pro lehce invalidní lidi. Z tohoto důvodu Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky zakoupila trojkolové vozidlo od firmy LOPED v. o. s., které bylo osazeno dvojicí trakčních stejnosměrných motorů s permanentními magnety firmy ATAS Náchod a. s. Již v té době bylo rozhodnuto, že motory budou pohánět zadní kola, protože byla vždy mezi motor a kolo vřazena planetová převodovka, která zajišťuje dodávku trakčního výkonu na kolo pomocí řetězu. Dále byly zakoupeny trakční sekundární články typu Li-Pol. Parametry zmíněných komponent jsou uvedeny v tabulce 1.1.

Tabulka 1.1 - Základní parametry vozidla, motoru a trakčních baterií

	Parametr	Hodnota
Vozidlo	Rozvor	1,01 m
	Rozchod	0,51m
	Celkový převod hřídel motoru – kolo	1 : 22,7
	Maximální rychlost	18 km/h
	Celková hmotnost (užitná a vozidlová)	180 kg
	Poloměr kola	0,3 m
	Účinnost převodovky (odhadem)	0,93
Trakční motor typ: P2XR492	Výkon	600 W
	Jmenovité napětí	24 V
	Jmenovitý proud	33 A
	Jmenovité otáčky	3 600 min <sup>-1</sup>
	Jmenovitý moment na hřídeli	1,6 Nm
	Moment setrvačnosti	8,67 kg.cm <sup>2</sup>
	Indukčnost kotvy	150 μH
	Odpor kotvy	45 mΩ
	Účinnost při maximální zátěži	0,76
Trakční baterie typ článku: LFP040AHA	Počet článků	8
	Jmenovité napětí článku	3,2 V
	Jmenovité napětí baterie	25,6 V
	Maximální napětí článku při nabíjení	4,2 V
	Maximální napětí baterie při nabíjení	33,6 V
	Optimální vybíjecí proud	20 A
	Hmotnost článku	1,6 kg
	Vybíjecí proud po dobu 15 minut	120 A
	Použitý nabíjecí proud	20 A
Kapacita baterie	40 Ah	

Původní podobu vozidla dokumentuje následující obrázek. Na vozidle však ještě nejsou zavěšeny trakční motory a není instalováno převodové ústrojí, neboť se jedná o fotografii pořízenou v průběhu mechanické proměny vozidla v dílnách DFJP.



*Obr.1.1- Původní podoba vozidla*

## **1.2 Požadavky na nadstavbové funkcionality souhrnně**

Prvotní požadavek na lehké městské vozidlo zůstal zachován, jelikož se dále mechanický základ nijak neměnil. Došlo však k upřesnění požadavků na vozidlo, které musí vykazovat následující jízdní vlastnosti:

- Jednoduchá ovladatelnost,
- Jízda vpřed i vzad,
- Elektrodynamická brzda (není předmětem stávajících diplomových prací):
  - a) Rekuperativní,
  - b) Odporová,
- Plně obsazené vozidlo se musí rozjet:
  - a) ve sklonu 10% na rychlost 10km/h s konečným zrychlením  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,
  - b) ve sklonu 0% na rychlost 18 km/h s konečným zrychlením  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,
- Průměrný dojezd 20 km.

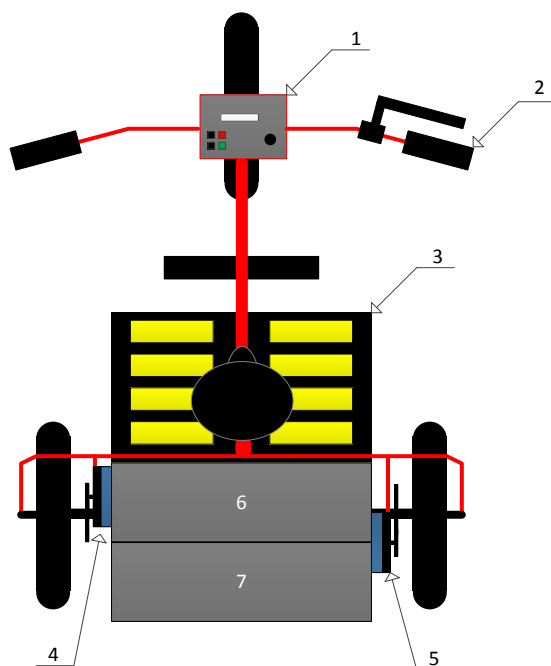
Dále bylo stanoveno, aby vozidlo obsahovalo následující elektronické systémy:

- Pohon umožňující rekuperaci elektrické energie,
- Elektronický diferenciál,
- Zobrazovací jednotku pro informování řidiče o stavech a význačných veličinách,
- Zařízení pro logování naměřených dat na SD paměťovou kartu,
- Palubní zdroj s nabíječem baterií Li-Pol,
- Systém bateriového managementu.

Výše je uvedena dílčí část zadání pro řešení ročníkových projektů a diplomových prací zainteresovaných studentů, a proto je dále popsána celá hierarchie řešení podrobněji. V prvním ročníkovém projektu [1] jsem řešil trakční výpočty vozidla. Paralelně se mnou prováděl kolega Sadílek energetické výpočty, respektive výpočty baterií, které prezentoval ve svém prvním ročníkovém projektu [2]. Ve druhém ročníkovém projektu [3] jsem se věnoval tvorbě podpůrné elektroniky pro pohon a celkové ovládání vozidla. Kolega Sadílek se ve druhém ročníkovém projektu [4] zabýval elektronickým diferenciálem a koncepčním návrhem nabíječe. Má diplomová práce svým obsahem navazuje na problematiku řešenou v ročníkových projektech. To znamená, že je nejdříve rekapituluje, a dále se zabývá aplikací elektronického diferenciálu do technologie experimentálního vozidla. Diplomová práce kolegy Sadílka rovněž v sobě sdružuje předchozí výsledky a dále se věnuje tvorbě bateriového managementu. Některé výše uvedené body nejsou v současné době řešeny, protože budou předmětem navazujících ročníkových či diplomových prací.

### **1.3 Popis současného mechanického uspořádání vozidla**

Zadní kola trojkolového vozidla jsou samostatně poháněna stejnosměrnými motory s permanentními magnety, kde každý motor disponuje výkonem 600 W a jmenovitým napětím 24 V. Snížení otáček motoru zajišťuje planetová převodovka a řetězový převod s celkovým převodem 1:22,7. Přenos krouticího momentu mezi převodovkou a kolem zajišťuje řetěz. Rozmístění hlavních prvků elektrické výzbroje na vozidle je schematicky znázorněno na obrázku č. 1.2.



Obr. 1.2 - Mechanické uspořádání elektrické výzbroje na experimentálním elektromobilu; Legenda: 1 – Ovládací panel, 2 - Elektronická rukojeť plynu, 3 – Trakční baterie, 4 – Trakční motor M1, 5 – Trakční motor M2, 6 – Skříň s měničem, ochranami a řídicí elektronikou, 7 – Skříň zdroje a nabíječe. [3]

Brzdění vozidla realizuje třecí brzda umístěná na předním kole. Tato brzda však mechanicky nedokáže zabrzdit vozidlo při jízdě z kopce, neboť se počítá s maximálním přípustným zatížením 180 kg. Proto se již teď předpokládá, že bude trojkolka do budoucna dovybavena elektrodynamickou brzdou, která jednak zefektivní brzdový proces a pak také zvýší hospodárnost provozu pomocí rekuperace.

Elektronika pohonu vozidla bude podrobněji probrána v následujících kapitolách, neboť s ní souvisí strategie řízení pohonu, kterou se tato práce zabývá majoritně.

## 2 TRAKČNÍ VÝPOČTY

Tato kapitola je nesmírně důležitá z hlediska dimenzování pohonu vozidla. Cílem je zjistit potřebný výkon na hřídeli motoru pro předem stanovenou zátěž. Dále je nutno ověřit, zda motor dodá potřebný záběrný moment pro rozjezd vozidla. Komplexním výsledkem výpočtu je trakční charakteristika experimentálního elektromobilu, tj. závislost tažné síly na rychlosti vozidla. Při dílčích výpočtech se využívá parametrů z tabulky 1.1, tam však nejsou uvedeny zdaleka všechny veličiny, které ve výpočtech vystupují. Proto je nový parametr zaveden vždy během dílčího výpočtu.

### 2.1 Stanovení jízdních odporů vozidla

Proti jízdě vozidla působí soubor sil označovaných jako jízdní odpory. Každá z těchto sil je zapříčiněna jiným fyzikálním jevem. Navíc se odporové síly rozdělují na vozidlové a traťové. Původcem vozidlových odporů je, jak už název napovídá, samotné vozidlo. Do této skupiny lze zařadit odpor vznikající třením v ložiskách kol, odpor vznikající při valení kola po vozovce a odpor aerodynamický. Naopak traťové odpory jsou dány charakterem trati. Nejvýznamnějším z této skupiny je odpor ze sklonu trati. Níže je uvedena rovnice, jež poukazuje na důležitý poznatek, tedy, že tažná síla vozidla je rovna součtu všech sil odporových.

$$F_h = F_v + F_t + F_{ae} + F_s + F_d \quad (1)$$

Kde je:

$F_h$  [N] – tažná síla,

$F_v$  [N] – valivý odpor,

$F_t$  [N] – odpor z tření v ložiskách,

$F_{ae}$  [N] – aerodynamický odpor,

$F_s$  [N] – odpor ze sklonu,

$F_d$  [N] – dynamický odpor.

#### 2.1.1 Výpočet valivého odporu

Valivý odpor vzniká v místě styku kola s pojížděnou plochou, kterou nejčastěji představuje asfalt či beton. Primárně záleží na hmotnosti vozidla a rozměrech styčné plošky. Výpočet je dále proveden dle vztahu č. (2).



$$F_v = G \cdot f = m \cdot g \cdot \frac{e}{R} \quad (2)$$

Kde je:

$G$  [N] – tíhová síla,

$f$  [-] – součinitel smykového tření,

$m$  [kg] – hmotnost vozidla,

$g$  [ $\text{ms}^{-2}$ ] – tíhové zrychlení,

$e$  [m] – součinitel příčného posunutí,

$R$  [m] – poloměr kola.

Do výše uvedeného je nutno dosadit za hmotnost vozidla hodnotu 180 kg, neboť je takto stanovena tabulkou 1.1. Tíhové zrychlení je rovno známé konstantě, tedy  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ . Za součinitel příčného posunutí dosadím dle literatury [5], kde se uvádí, že je pro styk pryž asphalt  $e = 0,0016$  m. Poloměr kola trojkolky je rovněž uveden v tabulce 1.1, čili  $R = 0,3$  m.

$$F_v = m \cdot g \cdot \frac{e}{R} = 180 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,0016}{0,3} = 9,42 \text{ N} \quad (3)$$

### 2.1.2 Výpočet třecího odporu v ložiskách kol

Pokud bychom chtěli stanovit přesný výpočet tohoto odporu, tak bychom museli znát velké množství vlastností ložisek. Proto se do výpočtu dosazuje součinitel tření v čepu  $f_l$  [-], který v sobě zahrnuje například druh ložisek a použité mazivo. Tento koeficient standardně uvádí výrobce ložisek. Jelikož součinitel není znám, tak uvažuji hodnotu 0,0015, což je běžná hodnota součinitele tření pro kuličkové ložisko. Přesný vztah, pomocí něhož je možno třecí odpor vypočítat, je uveden dále.

$$F_t = m \cdot g \cdot f_l \cdot \frac{r}{R} \quad (4)$$

Kde je:

$r$  [m] – střední poloměr ložiska

Střední poloměr ložiska lze stanovit z rozměrů běžně užívaných ložisek na bicyklech. Budeme-li uvažovat vnitřní průměr ložiska 25 mm a vnější průměr 35 mm, tak vychází, že je střední průměr roven hodnotě 30 mm. Střední poloměr  $r$  je pak roven 0,15 m. Dosadíme-li známé hodnoty do vztahu číslo (4), tak dostaneme:

$$F_t = m \cdot g \cdot f_l \cdot \frac{r}{R} = 180 \cdot 9,81 \cdot 0,0015 \cdot \frac{0,015}{0,3} = 0,13 \text{ N} \quad (5)$$

### 2.1.3 Výpočet aerodynamického odporu

Aerodynamický odpor tvoří velice významnou součást celkového jízdního odporu, hlavně při vyšších rychlostech, což je způsobeno přítomností vzduchu na povrchu zemském. Aerodynamický odpor závisí na rychlosti dokonce kvadraticky, takže při vysokých rychlostech je výkon pohonu z větší části použit na krytí tohoto odporu. Aerodynamický odpor závisí i na dalších veličinách, pročež pro jeho stanovení platí následující vztah:

$$F_{ae} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot c_x \cdot v^2 \quad (6)$$

Kde je:

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – měrná hmotnost vzduchu (pro  $t_0 = 15 \text{ °C}$  a  $p_0 = 1,013 \text{ bar}$  je  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ),

$S$  [m<sup>2</sup>] – čelní plocha vozidla,

$c_x$  [-] – součinitel tvaru čela,

$v$  [km/h] – rychlost vozidla.

Stanovením čelní plochy vozidla i určením součinitele tvaru čela se podrobně zabýval ročníkový projekt [1]. Ve zmíněném ročníkovém projektu se čelní plocha vozidla určuje pouze z parametrů vozidla, přesněji řečeno z rozvoru a výšky vozidla. V případě elektromobilu nabývá čelní plocha vozidla hodnoty 1 m<sup>2</sup>. Poněkud složitější úlohou je stanovení součinitele tvaru čela. V případě trojkolového vozidla lze vzít za správnou takovou hodnotu, která platí pro svislou plochu, neboť řidič, největší útvar na vozidle, s určitou mírou abstrakce takovou plochu představuje. Běžně se uvažuje, že součinitel tvaru  $c_x$  rovinné plochy nabývá hodnoty 1,2, proto bude tato hodnota uvažována i ve výpočtu. Jelikož kapitola 1.2 stanovuje dvě rychlosti pro pohyb vozidla, tak je na následující straně aerodynamický odpor vypočítán pro rychlost 10km/h a 18km/h.

**a) Výpočet aerodynamického odporu pro rychlost 10 km/h:**

$$F_{ae_{10}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot c_x \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot \left(\frac{10}{3,6}\right)^2 = 5,8 \text{ N} \quad (7)$$

**b) Výpočet aerodynamického odporu pro rychlost 18 km/h:**

$$F_{ae_{18}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot c_x \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot \left(\frac{17,93}{3,6}\right)^2 = 18,6 \text{ N} \quad (8)$$

### 2.1.4 Výpočet odporu ze sklonu tratě

Odpor ze sklonu tratě je jednoduše dán následujícím výrazem:

$$F_s = G \cdot s \quad (9)$$

Kde je :

S [-] – sklon.

Hodnota sklonu byla v kapitole 1.1 stanovena na 10 %, takže by stačilo provést výpočet jen pro tento sklon. Jelikož máme dva významné pracovní režimy vozidla, tak je pro úplnost níže uveden i výpočet pro sklon nulový.

**a) Výpočet odporu ze sklonu pro sklon 10 %**

$$F_{s_{10}} = G \cdot s = 180 \cdot 9,81 \cdot 0,1 = 176,58 \text{ N} \quad (10)$$

**b) Výpočet odporu ze sklonu pro sklon 0 %**

$$F_{s_{0}} = G \cdot s = 180 \cdot 9,81 \cdot 0 = 0 \text{ N} \quad (11)$$

### 2.1.5 Dynamický odpor vozidla

Jedná se o odpor vozidla, který se uplatní vždy při rozjíždění se vozidla. Skládá se ze členu respektujícího urychlení posuvných hmot a ze členu pro urychlení rotujících hmot. Nevětší měrou závisí na hmotnosti vozidla, urychlování rotujících hmot je zanedbatelné, ale přesto se s ním dále počítá. Z tohoto důvodu je nutno před samotným výpočtem určit velikost rotujících hmot, která je popsána momentem setrvačnosti  $J$ . Pro zjednodušení nebude do výpočtu zahrnut moment setrvačnosti převodovky, jejíž hmoty jsou zanedbatelné.

Moment setrvačnosti motoru  $J_{mot}$  známe od výrobce, ten uvádí, že dosahuje hodnoty  $8,67e-4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Moment setrvačnosti kola  $J_{kolo}$  lze určit pomocí metody kyvů, nebo metodou otáčení. Výsledky z měření setrvačnosti kola jsou však dostupné v literatuře [6], kde pro moment setrvačnosti udávají hodnotu  $4,2e-2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Abychom mohli momenty sečíst, tak potřebujeme moment motoru převést na hřídel kola, což je patrné z následujícího vztahu.

$$J_{mot\_kolo} = \frac{J_{mot} \cdot i_p^2}{\eta_{prevod}} = \frac{8,67e^{-4} \cdot 22,7^2}{0,93} = 0,48 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (12)$$

Potom je celkový moment setrvačnosti na hřídeli kola  $J_{celk\_hr\_kolo} [\text{kg}\cdot\text{m}^2]$  vypočten takto:

$$J_{celk\_hr\_kolo} = 3 \cdot J_{kolo} + 2 \cdot J_{mot\_hr\_kolo} = 2 \cdot 0,48 + 3 \cdot 4,2e^{-2} = 1,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (13)$$

Nyní, když jsou všechny konstanty známe, je možno přistoupit k výpočtu dynamického odporu vozidla, který je popsán následujícím vzorcem:

$$F_d = F_{pos} + F_{rot} = m \cdot a + J_{celk\_hr\_kolo} \left( \frac{2}{D_k} \right)^2 a = \left( m + J_{celk\_hr\_kolo} \left( \frac{2}{D_k} \right)^2 \right) a \quad (14)$$

Kde je:

$F_{pos}$  [N] – síla potřebná pro urychlení posuvných hmot,

$F_{rot}$  [N] – síla potřebná pro urychlení rotujících hmot,

$a$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ] – zrychlení vozidla,

$D_k$  [m] – průměr kola.

Do rovnice (14) je za zrychlení dosazena hodnota  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , jež vychází z kapitoly 1.2.

Hmotnost je určena tabulkou č. 1.1 a celkový moment setrvačnosti vychází z rovnice (13).

$$F_d = m \cdot a + J_{celk\_hr\_kolo} \left( \frac{2}{D_k} \right)^2 a = \left( 180 + 1,1 \cdot \left( \frac{2}{0,6} \right)^2 \right) \cdot 0,3 = 53,4 \text{ N} \quad (15)$$

### 2.1.6 Celkový jízdní odpor vozidla

Celkový odpor působící proti jízdě vozidla získáme dosazením do rovnice (1). Celkový jízdní odpor, respektive tažnou sílu, je nutno stanovit pro oba jízdní režimy, tedy jízdu do stoupání a po rovině.

**a) Jízda do sklonu ( $v = 10 \text{ km/h}$ )**

$$F_{h\_sklon} = F_v + F_t + F_{ae} + F_s + F_d = 9,42 + 0,13 + 5,79 + 176,58 + 53,4 = 245 \text{ N} \quad (16)$$

**b) Jízda po rovině ( $v = 17,93 \text{ km/h}$ )**

$$F_{h\_rovina} = F_v + F_t + F_{ae} + F_s + F_d = 9,42 + 0,13 + 18,6 + 53,4 = 81,5 \text{ N} \quad (17)$$

## 2.2 Moment síly potřebný pro rozjezd vozidla

Moment síly  $M$  [ $n.m$ ] na kolech vozidla lze vypočítat dle následujícího obecně platného vztahu.

$$M = F \cdot r \quad (18)$$

Kde je:

$F$  [N] – síla působící kolmo na rameno síly,

$r$  [m] – délka ramena síly.

V tuto chvíli by teoreticky stačilo provést výpočet pro největší odporovou sílu, která vyšla v kapitole 2.1.6, to znamená pro případ jízdy do sklonu. Pro úplnost jsou však níže vypočteny potřebné soudobé momenty pro oba režimy jízdy.

**a) Potřebný soudobý moment pro rozjetí vozidla do sklonu ( $v = 10 \text{ km/h}$ )**

$$M_{10} = F_{h\_sklon} \cdot \frac{D_k}{2} = 245 \cdot \frac{0,6}{2} = 73,5 \text{ Nm} \quad (19)$$

**b) Potřebný soudobý moment pro rozjetí vozidla po rovině ( $v = 18 \text{ km/h}$ )**

$$M_{18} = F_{h\_rovina} \cdot \frac{D_k}{2} = 81,5 \cdot \frac{0,6}{2} = 24,5 \text{ Nm} \quad (20)$$

Pro ověření, zda motor vyhovuje zadání, však musí být moment působící v ose kol přepočten na hřídel motoru pomocí následujícího vzorce:

- a) **Potřebný součtový moment na hřídelích motorů pro rozjetí vozidla do sklonu ( $v = 10 \text{ km/h}$ )**

$$M_{10\_mot} = \frac{M_{10}}{\eta_{prevod} \cdot i_p} = \frac{73,5}{0,93 \cdot 22,7} = 3,5 \text{ Nm} \quad (21)$$

- b) **Potřebný součtový moment na hřídelích motorů pro rozjetí vozidla po rovině ( $v = 18 \text{ km/h}$ )**

$$M_{18\_mot} = \frac{M_{18}}{\eta_{prevod} \cdot i_p} = \frac{24,5}{0,93 \cdot 22,7} = 1,16 \text{ Nm} \quad (22)$$

Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že největší moment na hřídelích motorů bude při rozjezdu na rychlost 10 km/h do sklonu 10 %. Pokud tento moment vydělíme dvěma, tak vyjde následující hodnota momentu na hřídeli jednoho motoru.

$$M_{10\_1mot} = \frac{M_{10\_mot}}{2} = \frac{3,5}{2} = 1,75 \text{ Nm} \quad (23)$$

Jelikož je maximální moment jednoho motoru dle tabulky 1.1 roven hodnotě 1,6 N.m, tak je jasné, že bude daný motor při rozjezdu do stoupání 10 % přetížen. Motor lze krátkodobě přetížít, proto s touto hodnotou může být počítáno dále. Ze vztahu (14) však vyplývá, že na hodnotu výsledné odporové síly, potažmo momentu, má nemalý vliv zrychlení  $a$  vozidla, které bylo zvoleno  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Pokud bychom uvažovali se zrychlením menším, například by se uvažovalo, že vozidlo zrychlí z 0 km/h na 10 km/h za 15 s, tak zrychlení vyjde  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Pokud bychom provedli znovu výše uvedené výpočty, tak požadovaný moment motoru vyjde roven hodnotě 1,6 N.m, což je jmenovitý moment motoru. Pro potřeby pozdějšího naddimenzování výkonového měniče však lze počítat s vypočtenou hodnotou ve vztahu (23).

### 2.3 Výpočet potřebného výkonu motoru pro rozjezd vozidla

Při výpočtu se využije níže uvedeného obecně platného vztahu pro výpočet výkonu  $P [W]$  na základě znalosti rychlosti  $v [km/h]$  vozidla a odporové síly  $F [N]$  proti němu působící.

$$P = F \cdot v \quad (24)$$

Pro ověření, zda jsou motory správně zvoleny po výkonové stránce, je opět nutno počítat s oběma režimy jízdy tak, jak je uvedeno dále.

- a) **Potřebný součtový výkon na obvodu kol pro rozjetí vozidla do sklonu ( $v = 10 \text{ km/h}$ )**

$$P_{10\_mot} = F_{h\_sklon} \cdot v_{10} = 245 \cdot \frac{10}{3,6} = 681 \text{ W} \quad (25)$$

- b) **Potřebný součtový výkon na obvodu kol pro rozjetí vozidla po rovině ( $v = 18 \text{ km/h}$ )**

$$P_{18\_mot} = F_{h\_rovina} \cdot v_{18} = 81,5 \cdot \frac{18}{3,6} = 408 \text{ W} \quad (26)$$

Pokud dojde k povýšení výkonu o účinnost převodovky, tak vyjde požadovaný výkon motorů. Výpočet potřebného výkonu dvou motorů je uveden dále.

- a) **Potřebný součtový výkon dvou motorů pro rozjetí vozidla do sklonu ( $v = 10 \text{ km/h}$ )**

$$P_{10\_mot} = \frac{P_{10\_kola}}{\eta_{převod}} = \frac{681}{0,93} = 732 \text{ W} \quad (27)$$

- b) **Potřebný součtový výkon dvou motorů pro rozjetí vozidla po rovině ( $v = 18 \text{ km/h}$ )**

$$P_{18\_mot} = \frac{P_{18\_kola}}{\eta_{převod}} = \frac{408}{0,93} = 439 \text{ W} \quad (28)$$

Z výše uvedených výpočtů je jistě zřejmé, že je motory nutno dimenzovat na výkon vyšší, potřebný při jízdě do desetiprocentního stoupání rychlostí  $10 \text{ km/h}$ . Pokud celkový výkon motorů vydělíme dvěma, tak dostáváme výkon jednoho motoru, který je pak roven hodnotě  $366 \text{ W}$ . Z výsledku jistě vidíte, že na vozidlo instalovaný motor je dostatečně dimenzovaný z hlediska výkonového.

## 2.4 Ověření správného vytížení baterií

Na základě potřebného výkonu motorů pro rozjetí se do sklonu je dále třeba ověřit, zda jsou baterie zatěžovány maximálně proudem číselně shodným s kapacitou baterií ( $I_{bat\_max} = C_{bat}$ ). Proto je třeba zjistit příkon měniče, u kterého zatím uvažujeme účinnost 90 %. Účinnost motoru vychází z tabulky č. 1.1. Výkon odebíraný z baterie se tedy vypočte dle vztahu (29).

$$P_{bat} = \frac{P_{10\_mot}}{\eta_{mot} \cdot \eta_{men}} = \frac{732}{0,76 \cdot 0,9} = 1070 \text{ W} \quad (29)$$

Dále je třeba stanovit maximální proud  $I_{bat\_max}$  [A] odebíraný z baterie při jízdě do stoupání 10% na základě středního napětí na baterii  $U_{bat\_střed}$  [V], což je 25,6 V. Výpočet proudu popisuje vztah (30).

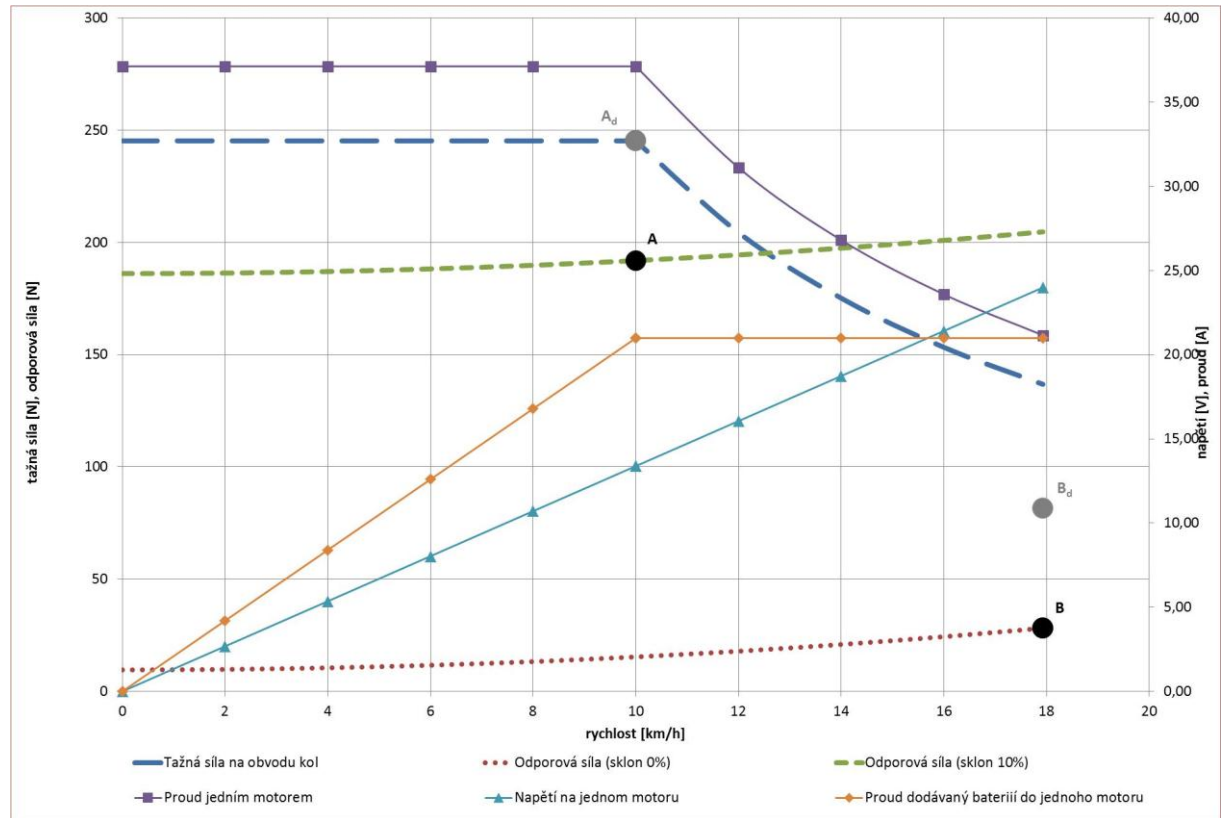
$$I_{bat\_max} = \frac{P_{bat}}{U_{bat\_střed}} = \frac{1070}{25,6} = 42 \text{ A} \quad (30)$$

Z výše uvedeného vztahu je zřejmé, že baterie musí dodat proud až 42 A, což je proud, který baterie dodá bez sebemenších problémů. Výrobce článků totiž ve svém datasheetu [7] udává, že lze odebírat proud až 120 A po dobu patnácti minut. Proud 42 A, který byl stanoven rovnicí (30), právě odpovídá přechodnému odběru, protože proud po odeznění přechodného stavu, rozjezdu vozidla, klesne pod hranici 40 A. Z tohoto důvodu bude provoz optimální i z hlediska delší životnosti baterií.



## 2.5 Trakční charakteristika vozidla

Z výše uvedených výpočtů jsem dále sestavil trakční charakteristiku vozidla vyhovující jednak pro režim jízdy do stoupání 10 % rychlostí 10 km/h, potom také pro režim jízdy po rovině rychlostí 18 km/h. Trakční charakteristika je uvedena na obrázku č. 2.1.



Obr. 2.1- Trakční charakteristika vozidla při jízdě do stoupání

Na obrázku č. 2.1 představuje trakční charakteristiku křivka vykreslená pomocí hrubé přerušované čáry procházející pracovním bodem  $A_d$ . V tomto bodě se vozidlo nachází při rozjezdu do stoupání 10% procent, těsně před atakováním rychlosti  $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , tedy ve fázi konečného zrychlení  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Ve chvíli, kdy vozidlo dosáhne rychlosti  $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , se pracovní bod přesune do pozice bodu A, což je bod, kde se již neuplatňuje dynamický odpor vozidla. Pokles trakční charakteristiky za bodem  $A_d$  je dán chtěným omezením odebíraného proudu z baterie s cílem prodloužit životnost baterie. Odebíraný proud pro jeden motor je znázorněn křivkou, která je v bodech výpočtu opatřena kosočtverečky. Z obrázku je vidět, že daný proud odebíraný měničem z baterie pro jeden motor nepřesáhne hranici 21A, což je podloženo výpočtem v kapitole 2.4. Křivka s trojúhelníčky představuje rostoucí napětí na jednom z motorů vozidla, které by při rychlosti 18 km/h dosáhne hodnoty 24 V. Křivka označená čtverečky znázorňuje proud tekoucí jedním motorem vozidla. Na tečkované čáře,

respektive křivce představující odpory vozidla při jízdě do nulového sklonu, se nachází pracovní bod  $B$  vozidla. V tomto bodě vozidlo dosahuje rychlosti 18 km/h, motory jsou napájeny napětím 24 V a dosahují tak svých jmenovitých otáček. V případě, že se vozidlo rozjíždí se zrychlením  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  na rychlost 18 km/h, tak před posledním infinitezimálním přírůstkem rychlosti, který předchází konečné rychlosti 18 km/h, se vozidlo nachází v bodě  $B_d$ . Níže najdete tabulku shrnující důležité parametry vozidla v souvislosti s jeho pracovními body. Výpočty potřebné pro vykreslení trakční charakteristiky jsou zahrnuty do přílohy v podobě excelovského sešitu.

Tabulka 2.1 - Pracovní body vozidla

<b>Pracovní bod</b>	<b>A<sub>d</sub></b>	<b>B<sub>d</sub></b>
<b>Sklon</b>	10 %	0 %
<b>Rychlost vozidla</b>	10 km/h	18 km/h
<b>Zrychlení vozidla</b>	$0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	$0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
<b>Otáčky trakčního motoru</b>	2008 ot/min	3600 ot/min
<b>Tažná síla</b>	245 N	81,5 N
<b>Potřebný trakční výkon</b>	681 W	408 W
<b>Potřebný moment každého motoru</b>	1,75 Nm	1,1 Nm

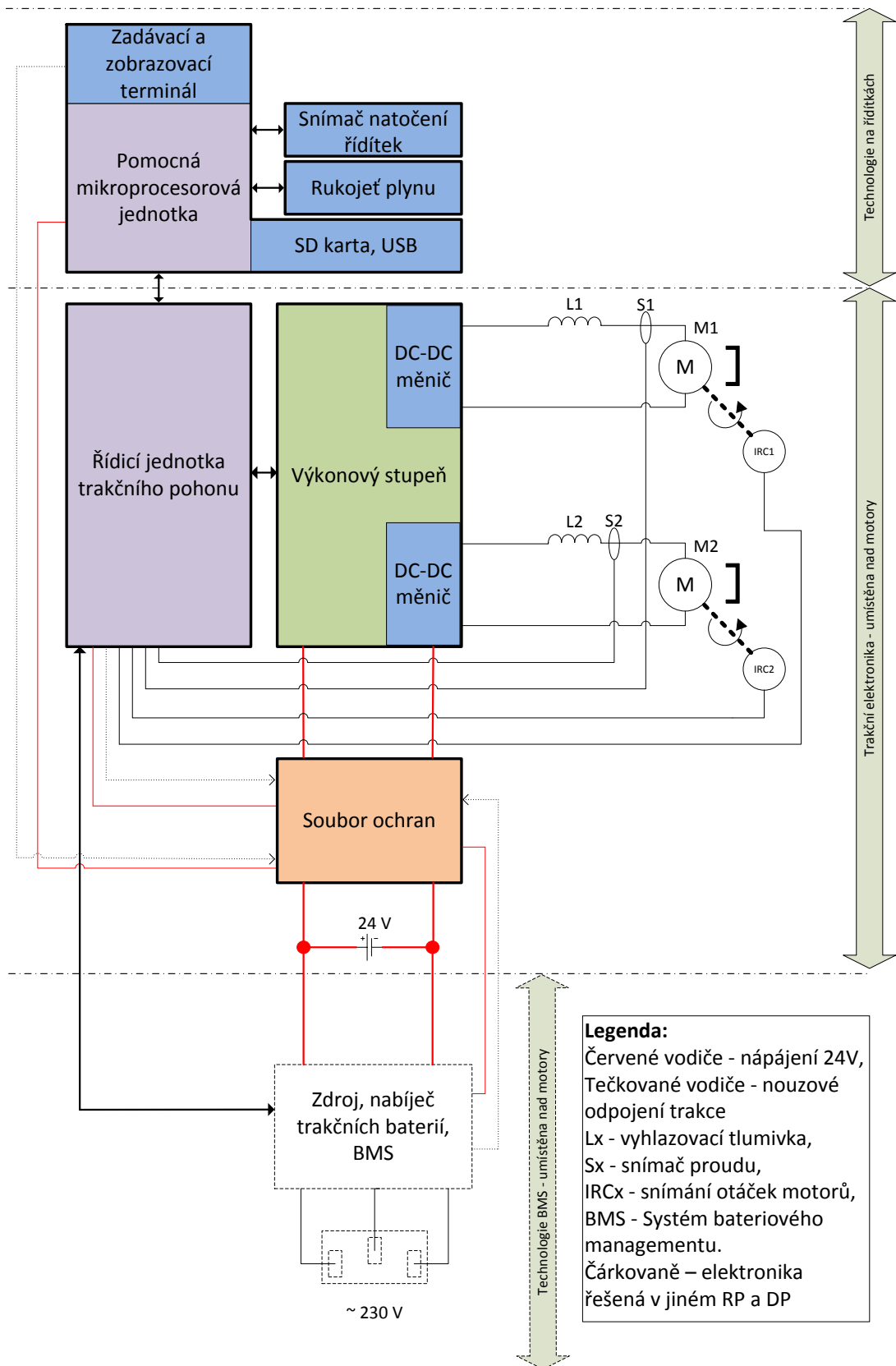
### **3 ELEKTRICKÁ VÝZBROJ EXPERIMENTÁLNÍHO ELEKTROMOBILU – TRAKČNÍ ČÁST**

Vozidlo sestává ze dvou na sobě nezávislých, avšak vzájemně se doplňujících částí elektrické výzbroje. Jedna z těchto částí zajišťuje trakci vozidla, druhá potom podporu trakční části ve formě nabíjení trakční baterie a provádění kontrol jejích parametrů. Mezi kontrolované parametry patří podbití článků, přebití článků, hodnota odebíraného proudu a teplota. Jednotlivé části mezi sebou komunikují prostřednictvím sériového protokolu. Obě části také spolupůsobí při mimořádných stavech, tj. vybavují společné ochranné prvky s cílem ochránit elektrickou výzbroj vozidla před účinky zkratových proudů a s cílem napomoci tak k bezpečnému zastavení vozidla po vzniku poruchy.

Návrhu a realizaci trakční výzbroje jsem se věnoval v ročníkovém projektu [3]. Z tohoto důvodu jsou zde dále uvedeny jen základní rysy a výpočty týkající se úzce problematiky řešené v dalších kapitolách.

#### **3.1 Blokové schéma elektrické výzbroje vozidla**

V ročníkovém projektu [1] je jedna kapitola věnována obšírné problematice týkající se celkové hardwarové koncepce vozidla z hlediska regulace dvojice trakčních motorů. Jelikož jedním z požadavků na vozidlo je aplikace elektronického diferenciálu, tak musela být i elektrická výbava koncipována v souladu s tímto požadavkem. Přístup k řešení problematiky elektronického diferenciálu existuje několik, detailněji o nich hovoří ročníkový projekt [4]. Zjednodušeně řečeno jsou dvě varianty, které připadají v úvahu. Buď můžeme každý motor regulovat pomocí samostatného zpětnovazebního momentového regulátoru, což povede při průjezdu zatáčkou k automatickému vyrovnávání otáček jednotlivých kol. Druhou možností je snímat natočení řídicíků. Ze zjištěného úhlu natočení lze vypočítat poměr mezi otáčkami jednotlivých kol, který je následně vložen do nadřazené otáčkové regulace každého z motorů. Z výše uvedených možností regulace tedy vyplývá celková koncepce elektrické výzbroje, tu můžete vidět na obrázku 3.1. Návrhem a realizací jednotlivých bloků jsem se zabýval v ročníkovém projektu [3]; bloky jsou dále velmi stručně popsány po jejich funkční stránce.



Obr. 3.1- Blokové schéma experimentálního elektromobilu [3]

### 3.2 Výkonový stupeň trakčního pohonu

Ročníkový projekt [1] se věnoval výběru vhodné topologie měniče pro pohon experimentálního elektromobilu. Po řadě úvah byl vybrán klasický snižovací měnič v h-můstkovém provedení. Tato topologie totiž umožňuje reverzaci motorů. Pokud do série s motorem vložíme vhodnou indukčnost, tak můžeme využívat i rekuperace. Jelikož jsou na vozidle motory dva, tak by bylo třeba dvou h-můstků. Z důvodu úspory místa však došlo ke sloučení těchto dvou měničů v jeden. Měnič pak lze postavit na třífázovém polovodičovém modulu, což fakticky ušetří místo ve skříni pohonu. Topologie je však nevýhodná z hlediska dimenzování polovodičového modulu, protože jsou společně tranzistory protékány dvojnásobným proudem.

Z hlediska dimenzování nám musí součástka vyhovovat jak napěťově, tak i proudově. To znamená, že napětí na drainu tranzistoru, pokud se jedná o MOSFET, nesmí překročit maximální možnou hodnotu napětí vyskytujícího se ve stejnosměrném meziobvodu. V případě trojkolového vozidla je baterie složena z osmice článků, kde má každý z nich maximální nabíjecí napětí  $U_{clanek\_max}$  rovno hodnotě 4,2 V. Celkové napětí baterie je tedy dáno následujícím výrazem:

$$U_{bat} = 8 \cdot U_{clanek\_max} = 8 \cdot 4,2 = 33,6 \text{ V} \quad (31).$$

Jestliže chceme určit pracovní závěrné napětí součástky s jistou rezervou, tak je dobré nejvyšší napětí ve stejnosměrném meziobvodu vynásobit součinitelem komutačního přepětí, který se běžně uvažuje 1,3. Pokud tento výpočet provedeme pro zde řešený případ, tak nám vyjde:

$$U_{RWM} = 1,3 \cdot U_{bat} = 1,3 \cdot 33,6 = 43,68 \text{ V} \quad (32)$$

Teď, když je stanoveno napětí polovodičového prvku, tak je třeba polovodič proudově dimenzovat. V tomto výpočtu vyjdeme z požadovaného momentu  $M_{10\_1mot} [W]$  připadajícího na hřídel jednoho stejnosměrného motoru. Požadovaný moment vychází ze vztahu (22). Maximální proud *drainem* tranzistoru  $I_{d\_max} [A]$ , kterým budeme zatěžovat jak samotný výkonový polovodič, tak i přidruženou nulovou diodu, vypočteme dle následujícího vzorce:

$$I_{d\_max} = \frac{M_{10\_1mot}}{M_{n\_mot}} \cdot I_{n\_mot} = \frac{1,75}{1,6} \cdot 33 = 36 \text{ A} \quad (33)$$

Kde je:

$I_{n\_mot}$  – jmenovitý proud motorem (stanoveno tabulkou 1.1),

$M_{n\_mot}$  – jmenovitý moment motoru (stanovenou tabulkou 1.1).

Výsledek rovnice (32) je však nutno vynásobit dvěma, neboť musíme celý modul dimenzovat na dvojnásobný proud  $I_{2d\_max} [A]$  tranzistorem. Po vynásobení je  $I_{2d\_max} = 72 \text{ A}$ . Na základě výše uvedených výpočtů byl zvolen modul GWM 120-0075X1 od firmy IXYS, jenž svými parametry plně vyhovuje požadavkům. V modulu jsou použity tranzistory typu MOSFET s vodivostním kanálem typu N, které je možno sepnout přivedením kladného napětí na elektrodu *gate*.

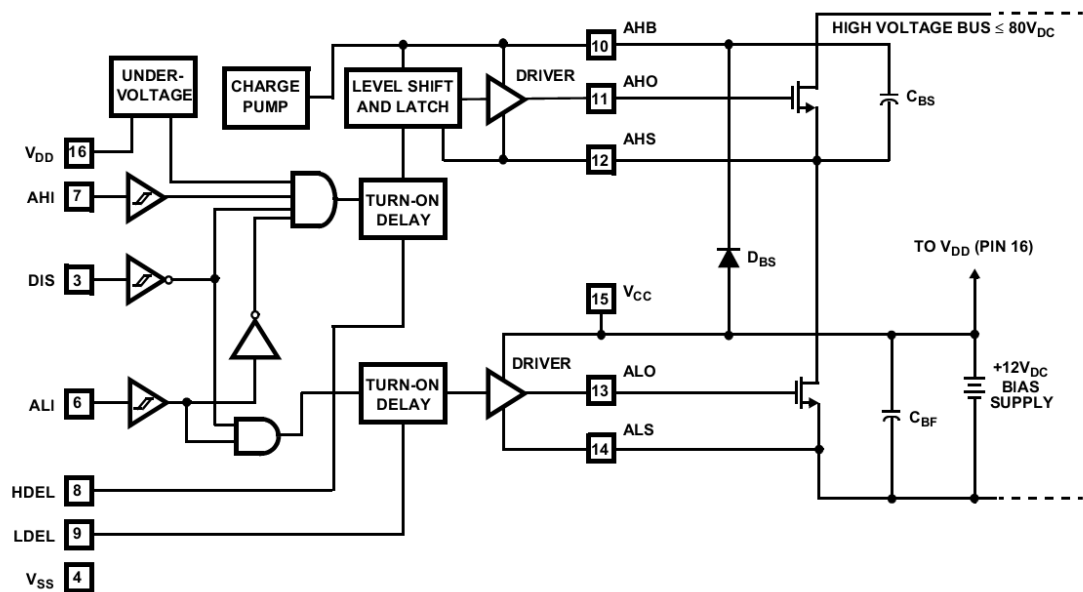
Pro správnou funkci napěťového měniče je nezbytné před napájecí svorky polovodičového modulu umístit filtrační kondenzátor. Ročníkový projekt [3] se výpočtem kondenzátoru zabýval a stanovil jeho kapacitu na hodnotu 5,1 mF. Aby se potlačilo zvlnění proudu procházejícího motorem, tak byla do série s motorem vřazena indukčnost o hodnotě 5 mH. Při spínací frekvenci 10 kHz vyšlo zvlnění 120 mA při maximálním proudu motorem.

V ročníkovém projektu [3] byla vypočtena účinnost měniče, ta respektuje ztráty na polovodičových součástkách a indukčnostech. Celková účinnost měniče vyšla 91 %, což je o jedno procento lepší účinnost než ta, se kterou se počítá při výpočtu potřebných momentů a výkonů motorů.

Při konstruování měniče bylo nutno vyřešit problematické spínání horních unipolárních tranzistorů. Běžně se používají dva způsoby, jedním z nich je do obvodu *gatu* vložit galvanicky oddělený zdroj od potenciálu společné země. Při sepnutí zdroje by se na *gate* dostalo potřebné napětí, neboť se předpokládá propojení zemní svorky galvanicky odděleného zdroje s elektrodou source unipolárního tranzistoru. Druhou možností je použití nábojové pumpy, která sice nemá galvanické oddělení, ale dokáže dané napětí vytvořit vhodným spínáním polovodičových prvků v kombinaci s nabíjením kapacit. Galvanicky

odděleným zdrojům se blíže věnovat nebudu, neboť se přeci jen jedná o drahou variantu budiče. Dále bude výklad věnován nábojovým pumpám.

Budič tranzistorů pro měnič pohonu experimentálního vozidla je založen na integrovaném obvodu HIP4081, jehož funkční schéma si můžete prohlédnout na obrázku 3.2.



Obr. 3.2- Funkční schéma obvodu HIP4081 [8]

Tento obvod je určen pro buzení všech čtyř tranzistorů klasického h-můstkového provedení měniče, proto jsou pro buzení šestice tranzistorů třífázového modulu GWM 120-075XI použity dva obvody typu HIP4081. Část druhého obvodu není sice použita pro buzení trakčního měniče, ale využívá se ke spínání ventilátoru chlazení měničové skříně.

Nyní již pár slov k zapojení na obrázku 3.2. Na levé straně jistě vidíte vstupní svorky obvodu HIP4081. Svorka  $V_{DD}$  je určena pro připojení napájecího napětí. Pokud napájecí napětí poklesne pod stanovenou mez, tak dojde k vypnutí zátěže. Chceme-li spínat horní tranzistor, tak přivedeme signál na vstup AHI. Pokud potřebujeme spínat dolní tranzistor, tak musíme přiložit TTL signál na vstup ALI. Vstup DIS vyloučí daný integrovaný obvod z provozu, tj. vypne zátěž, v případě nastavení tohoto pinu do úrovně logické jedničky. Piny HDEL a LDEL slouží pro nastavení zpoždění sepnutí opačného tranzistoru, zajišťují tedy tzv. dead time – mrtvou dobu mezi vypnutím jednoho a sepnutím druhého tranzistoru. Pokud má obvod fungovat, tak je nutno na pin VSS připojit zemní polaritu. Zaměříte-li se na střed funkčního diagramu, tak první výstupní pin je označen písmeny AHB. Tento pin slouží k nabíjení tzv. bootstrap kondenzátoru, který v obrázku nese označení  $C_{BS}$ . Pomocí pinu AHO

se provádí samotné spínání horního výkonového tranzistoru. Na pin AHS je přiváděn potenciál z drainu spodního tranzistoru. Pin  $V_{CC}$  slouží pro připojení napájecího napětí, které může být odlišné od napětí na pinu  $V_{DD}$  v případě, kdy potřebujeme napěťově oddělit logickou část obvodu od silové. Pomocí ALO lze spínat dolní tranzistor. Pin ALS je připojen ke společné zemi.

Obvod jako takový je založen na již zmíněném principu nábojové pumpy. Konkrétně tento integrovaný obvod má dvě možnosti, jak správné funkčnosti nábojové pumpy dostat. První z nich je založena na přepínání horního a spodního tranzistoru. Zapojení pak funguje tak, že když je dolní tranzistor sepnut, dochází k nabíjení kondenzátoru  $C_{BS}$  přes diodu  $D_{BS}$ . Po vypnutí tranzistoru se na kondenzátoru vyskytuje dostatečné napětí, které může sepnout horní tranzistor. Tento princip lze uplatnit jen v aplikacích, kde dochází ke střídavému spínání horního a spodního tranzistoru, například ve střídači. Pokud však vyvstane potřeba mít sepnutý jen horní tranzistor, tak by tento princip nefungoval. Proto je obvod HIP4081 vybaven interní nábojovou pumpou, která se stará o nabíjení kondenzátoru  $C_{BS}$ . Funkce nábojové pumpy se právě využívá při spínání diagonálních tranzistorů v h-můstku měniče instalovaného na trojkolové vozidlo.

Detailní obvodové schéma celého pulzního měniče včetně budičů najdete v příloze tohoto dokumentu nebo v ročníkovém projektu [3], kde je proveden jeho detailní popis.

### 3.3 Řídicí jednotka trakčního pohonu

Základním posláním řídicí jednotky, kterou jsem navrhl, je regulovat činnost motorů na základě požadavků obsluhy. K tomu je však zapotřebí, aby byla jednotka vybavena výpočetním systémem. Ten je v tomto případě tvořen mikrokontrolérem (dále označovaného zkratkou MCU) AtMega128A. Jedná se o 8-bitový mikropočítač harwardské architektury pracující na platformě AVR firmy Atmel corp. Výhodou platformy AVR je jednotnost periférií na všech typech MCU. Další plus spočívá v systému zřetězení instrukcí, což znamená, že počet provedených instrukcí za vteřinu je shodný s počtem tiků taktovacího kmitočtu. V této aplikaci byl zvolen kmitočet 12 MHz, takže počet instrukcí za vteřinu je roven dvanácti milionům.

Jádro řídicí jednotky ovládá jednotlivé tranzistory umístěné ve výkonovém stupni trakčního pohonu prostřednictvím komparační periférie MCU, která vytváří PWM signál na základě příkazů obdržených ze softwarového regulátoru. Pod pojmem softwarový regulátor si



lze představit otáčkový regulátor s podřazenou proudovou regulační smyčkou. Z důvodu takové regulace zpracovává řídicí jednotka signály ze senzorů proudů a otáček. Každý motor je vybaven jak senzorem proudu, tak senzorem otáček. Senzorem proudu se rozumí Hallův článek v podobě čidla LA55-P, které má proudový výstup. Tento proudový výstup je veden do řídicí jednotky, kde se pomocí snímacího rezistoru převádí na napětí, které je zpracováno interním AD převodníkem MCU. Čidlo otáček je založeno na principu IRC snímače. Signál z tohoto snímače je rovněž zpracováván pomocí MCU. Žádanou hodnotu pro regulátor a úhel natočení řídítek získává řídicí jednotka z pomocné mikrokontrolérové jednotky umístěné na řídítkách vozidla pomocí sériového datového přenosu.

Řídicí jednotka komunikuje s okolními pomocnými jednotkami právě prostřednictvím výše zmíněného sériového kanálu UART. Hardwarově je vedení založeno na standardní sběrnici RS232, jejíž výhoda spočívá ve větší odolnosti proti rušení, neboť je úroveň TTL napětíově pozvednuta z 5 na  $\pm 12$  V. O pozvednutí logické hladiny se stará integrovaný obvod MAX232ECW, který je implementován, coby budič sběrnice, do všech jednotek na trojkolovém vozidle přítomných. Uvedená sběrnice je určena pro přenos veličin potřebných pro chod pohonu a pro přenos bezpečnostních zpráv.

Jednotka dále obsahuje port USB pro ladění firmwaru. K tomu musí být jednotka vybavena obvodem FT232BL, který se stará o překlad informace z klasické sériové linky na informaci posílanou po USB. Data, která dojdou do počítače, jsou vyobrazena v terminálovém programu. Vyobrazené informace pak vypovídají o správné funkci či disfunkci zařízení.

### **3.4 Pomocná mikrokontrolérová jednotka**

Pomocnou mikrokontrolérovou jednotku jsem rovněž osadil mikrokontrolérem ATMEGA128, proto ho není třeba dále popisovat. MCU je opět taktován krystalem 12 MHz. Zapojení periférií se však trochu změnilo. Jeden z analogových vstupů mikrokontroléru se využívá k měření velikosti napětí generovaného plynovou rukojetí. Toto napětí se pohybuje v intervalu od jednoho do čtyř voltů a má lineární závislost na natočení plynové rukojeti. Na porty MCU je dále připojen zadávací a zobrazovací terminál, jenž je tvořen dvouřádkovým šestnáctiznakovým displejem a klávesnicí ve formě čtyř tlačítek. Dvojice černých tlačítek slouží pro pohyb v menu zadávacího terminálu. Po stisknutí červeného tlačítka dojde ke zrušení volby, respektive k přesunu ze sub-menu. Zelené tlačítko slouží například k potvrzení zadávaného parametru, dále pak k přesunu do sub-menu. Krom zadávacího terminálu dokáže

pomocná jednotka zjišťovat velikost natočení řídítek, a to z integrovaného obvodu AS5045, který dokáže absolutně měřit úhel pootočení nad ním umístěného magnetu.

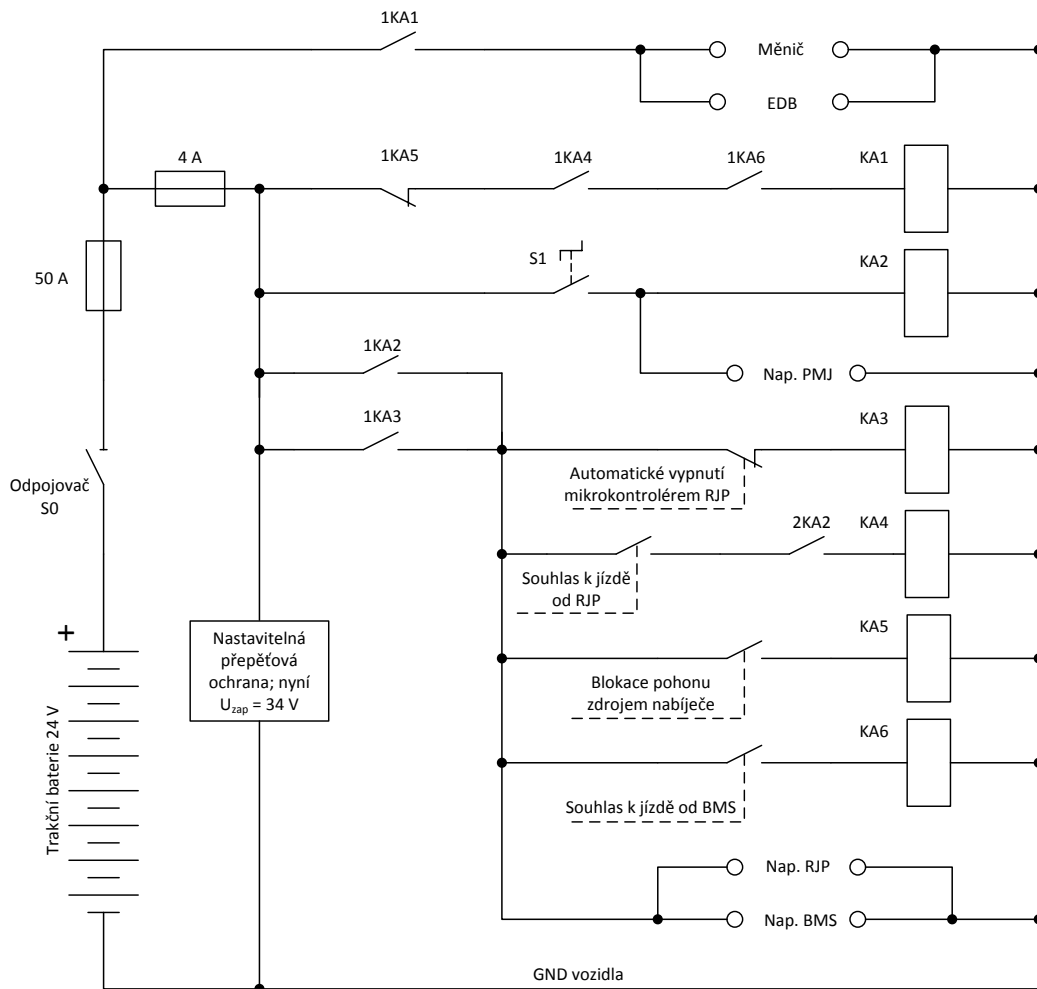
Komunikace s řídicí jednotkou probíhá opět přes sériový kanál, prostřednictvím něhož pomocná jednotka odesílá data obsahující hodnotu vypovídající o natočení plynové rukojeti a velikost úhlu reprezentujícího natočení řídítek. Jednotka rovněž obsahuje port USB pro ladění firmwaru. Přes sériový kanál naopak mohou k jednotce proudit data s hodnotami nejrůznějších veličin pojednávajících o stavu celé technologie. Pomocná jednotka pak tyto veličiny může zobrazit na displeji anebo je může logovat na SD paměťovou kartu, jejímž slotem je pomocná jednotka také vybavena.

Pro ladění je z pomocné jednotky opět vyveden port USB. Na rozdíl od řídicí jednotky však port USB prostupuje skrz skříň ovládacího pultu, tudíž do něj může být připojen počítač i za provozu, což poslouží při parametrizaci a diagnostice celého zařízení za provozu, bez nutnosti měnit firmware. Zprovoznění této funkcionality se předpokládá až po plném otestování prvotní verze firmware; zmíněná funkcionality tedy není součástí této práce.

### **3.5 Soubor ochran**

Obvod jsem navrhl zejména na principu reléových vazeb, které svou funkcí podpoří bezpečnostní koncepci vozidla. Hlavní funkce obvodu spočívá v možnosti nouzově odpojit výkonovou elektroniku vozidla v případě poruchy na motoru, výkonovém měniči nebo při poruše softwaru. Nouzové odpojení je možno provést buď automaticky, nebo manuálně pomocí vypínače. Dále obvod zajišťuje jistění trakčního obvodu pomocí rychlé tavné pojistky se jmenovitým proudem 50 A. Soubor ochran chrání také řídicí systémy, a to jak proti přepětí, tak i proti ničujícím účinkům zkratového proudu. Přepětí může vzniknout například při náhlém rozpojení trakčního proudu, jehož zánik vyvolá nebezpečný nárůst napětí na indukčnosti motoru dle Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Prahové napětí přepětí ochrany je nastaveno na hladinu 34 V jednak z důvodu nepřekročení maximálního napájecího napětí na lineárních stabilizátorech, které jsou použity pro napájení veškeré elektroniky vozidla, a zadruhé potom na základě maximálního napětí na bateriích, které dosahuje hodnoty až 33,6 V při plném nabití. Z hlediska zkratu zajišťuje ochranu elektroniky rychlá tavná pojistka se jmenovitým proudem 4 A. Funkční schéma korespondující s dále uvedeným stručným popisem funkce zapojení najdete na obr. č. 3.3; podrobné schéma zapojení je uvedeno

v příloze pod názvem Soubor ochran. Podrobný popis zapojení pak najdete v ročníkovém projektu [3].



Obr. 3.3 – Funkční schéma souboru ochran; kde je: EDB – elektrodynamická odporová brzda, PMJ – Pomocná mikrokontrolérová jednotka, RJP – Řídicí jednotka pohonu, BMS – Bateriový management.

Před přiložením napětí na měnič, potažmo před započítím jízdy, soubor ochran zajistí následující bezpečnostně relevantní sekvence:

- Start řídicích systémů vozidla na základě přepnutí tlačítka START (ve schématu S1) umístěného na řídkách vozidla do polohy zapnuto, potažmo vybavením pomocného relé KA2,
- Aby za provozu nedošlo k předčasnému vypnutí celé technologie po ztrátě signálu od tlačítka START, nebo po přestavení tlačítka do polohy vypnuto, tak je napájení řídicí elektroniky drženo v zapnutém stavu pomocí přídržného relé KA3.

- Řídicí elektronika měniče dá souhlas pro sepnutí hlavního trakčního relé po inicializaci měniče; potvrzující signál od řídicí elektroniky sepne relé KA4.
- Nabíječ provede kontrolu všech článků a zjistí nulovost proudu tekoucího z baterie, následně vydá povolení pro připojení trakčního měniče sepnutím relé KA6.
- Jestliže je napájecí zdroj nabíječe připojen k síťovému napětí 230 V, tak je spuštění trakčního měniče blokováno přímo zdrojem; blokaci zajišťuje relé KA5.

Pokud jsou výše uvedené podmínky splněny, tak se měniči zpřístupní napájení pomocí zapínacího kontaktu relé KA1.

K vypnutí celé technologie dojde po proběhnutí následujících kroků:

- Přestavením přepínače STRAT do polohy vypnuto dojde k prvotní iniciaci vypnutí celé technologie, zároveň dojde k okamžitému přerušení dodávky energie do měniče (k přerušení napájení měniče dojde též v případě výpadku souhlasu ke spuštění technologie od měniče či nabíječe); odpadne KA1,
- Řídicí jednotka měniče zjistí, že spadla komunikace po sériové lince,
- Jestliže jsou otáčky motorů nulové, tak řídicí jednotka spustí časovač vypnutí, jinak čeká až do zastavení vozidla<sup>1</sup>,
- Po uplynutí přednastavené doby dojde k automatickému vypnutí vozidla rozpojením přídržného relé KA3 ovládacím signálem z řídicí jednotky.

## 3.6 Použité snímače

### 3.6.1 Snímač natočení řídítek

V kapitole 3.1 se hovořilo o celkové koncepci vozidla, vyplynul zde požadavek na snímání natočení řídítek. Ovšem už zde nebyl proveden podrobnější rozbor problému, protože se jím zabývejme dále.

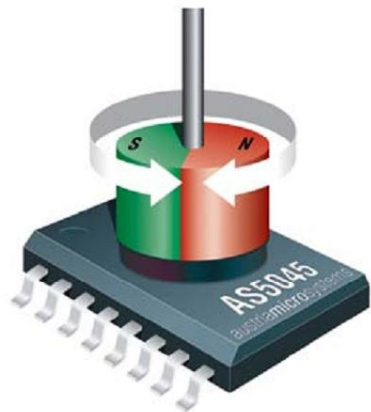
Celé zařízení musí být velice robustní, neboť se vozidlo může pohybovat přes různorodé nerovnosti vyskytující se na jízdni dráze. Proto první variantou, nad kterou jsem se zamýšlel, byl potenciometrický snímač polohy. Sestával by z otočné části na řídítkách a potenciometrické fixní části umístěné ve vhodné vzdálenosti od středu otáčení řídítek. Tyto dvě části by vzájemně spojoval gumový řemínek, který by sloužil zároveň jako pružná spojka,

---

<sup>1</sup> Do budoucna je počítáno s přidáním elektrické brzdy, která by v tomto případě byla automaticky aktivována.

jež by se uplatňovala při rozkmitání sestavy. První variantu zatěžovaly i další problémy, například by se musel stanovit poměrně precizně převodový poměr pro maximální vytočení řídicích, protože by mohlo nastat přetočení potenciometru, nebo naopak jeho nedotočení, což by způsobilo snížení přesnosti měření. Na základě výše uvedených problémů jsem začal vymýšlet elegantnější konstrukci. Prohledal jsem portfolio výrobců a narazil jsem na obvod AS5045.

Jedná se o integrovaný obvod vyráběný pouze v SMD pouzdře typu SOIC. Funguje na principu vyhodnocování přítomnosti specificky uspořádaného magnetického pole nad jeho pouzdrům. Proto je zdrojem magnetického pole permanentní neodimový magnet typu NdFeB (magnetizace: N42) válečkovitého tvaru, který nemá póly v podstavách, nýbrž je polarizován podélně. Umístění magnetu nad obvodem demonstruje obrázek č. 3.3.



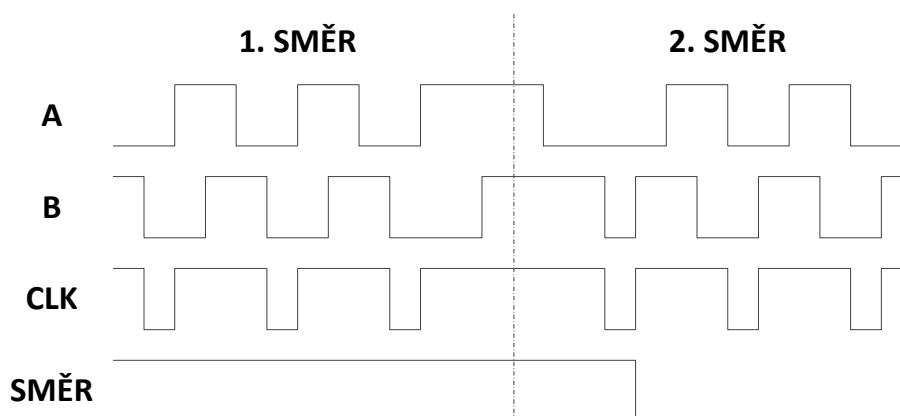
Obr. 3.4- Umístění magnetu nad obvodem AS5045 [9]

Obvod funguje na bázi v kruhu rozmístěných Hallových sond, které snímají úroveň magnetického pole v daném místě. Pro měření úrovní magnetických polí a pro následný výpočet úhlu natočení je uvnitř obvodu umístěn DSP procesor. Výstupem z tohoto procesoru je 12-bitové číslo odpovídající míře natočení magnetu, v tomto případě míře natočení řídicích. Číselnou hodnotu procesor předá do jednotky obstarávající SPI komunikaci. Z této jednotky si pak číslo vyzvedne řídicí systém, pro nějž se hodnota natočení měří. Jednotka se dá také programovat vstupem nazvaným *Prog*. Uživatel si tak může provést kalibraci dle natočení magnetu nebo třeba zablokovat PWM výstup, kterým je rovněž obvod vybaven. Vzorkovací frekvence obvodu dosahuje až 10,42 kHz, to je naprosto dostačující pro regulovaný pohon.

### 3.6.2 Snímání otáček motorů

Existuje mnoho způsobů, jak snímat otáčky. Nejpoužívanějším způsobem je pravděpodobně snímání na bázi optických bran, kde snímání zajišťují IRC<sup>2</sup> snímače. Průmyslově vyráběné snímače jsou zbytečně složité a tím pádem i drahé, proto si bylo třeba vyrobit snímač vlastní. Na experimentálním elektromobilu se snímají otáčky motorů jednak kvůli regulaci pohonu, dále pak pro omezení otáček motorů, které by mohly vzrůst nad jmenovitou hodnotu, neboť napětí z baterií je při jejich plném nabití vyšší než jmenovité napětí motorů.

Základem vyrobeného snímače je dvojice optických bran, které vytvářejí vzájemně posunuté signálové kanály A a B. Použité optické brány jsou stejné konstrukce, obě jsou zabudovány do plastového výlisku tvaru U. V jedné stěně výlisku se nachází dioda, jejíž paprsek je natočen na protilehlou stěnu, ve které je umístěn snímací tranzistor. Na plošném spoji jsou optočleny umístěny za sebou tak, aby skrze ně mohl procházet otáčející se kotouč s pravidelně umístěnými otvory, jež jsou určeny pro přerušování světelného toku diody. To znamená, že pokud pronikne světelný tok skrz otvor k tranzistoru, tak se tranzistor sepne. Naopak, pokud je tranzistor zastíněn kotoučkem, tak se rozepne. Na základě tohoto principu jsou generovány náběžné a sestupné hrany, respektive pulzy. Protože jsou instalovány dvě optické brány, tak vznikají dva vzájemně posunuté signály A a B, jejich průběhy jsou ostatně vidět na obrázku č. 3.5.



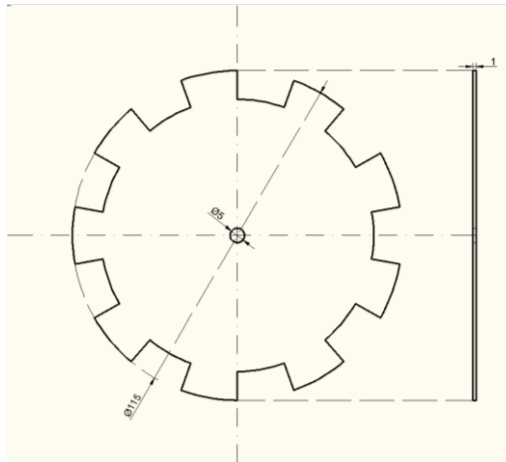
Obr. 3.5 - Signály z IRC snímače

Signály A a B jsou prostřednictvím pomocné logiky převedeny na signál CLK, respektive na signál SMĚR. Signál CLK je zaveden do mikrokontroléru, který načítá periodicky přicházející pulzy. Signál SMĚR pouze informuje mikrokontrolér o směru jízdy vozidla, který

<sup>2</sup> IRC – inkrementální rotační snímač

je výhodné znát pro pozdější detekci ujetí vozidla ze svahu, respektive pro správné nastavení brzdného měniče při jízdě vozidla z kopce.

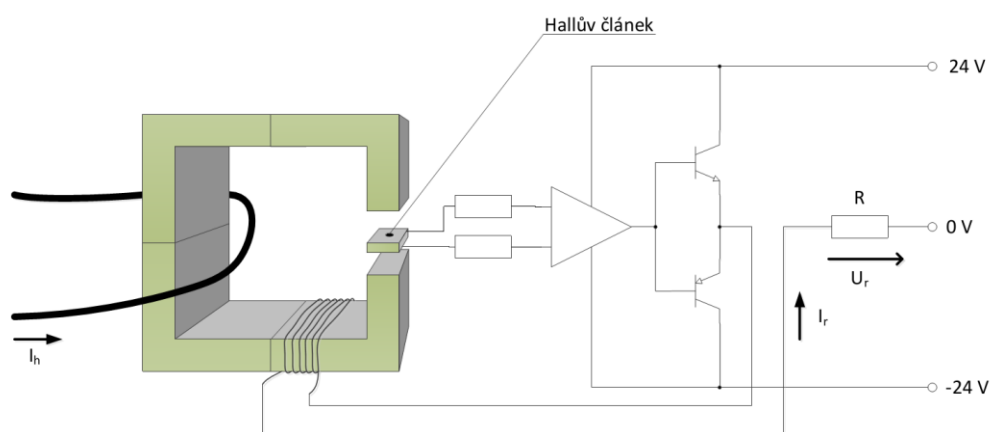
Pokud mikrokontrolér určitý počet pulzů vztáhne k době, za kterou je naměřil, tak snadno vypočte otáčky kola, neboť počet otvorů v kotoučku je známý a neměnný. V případě snímače umístěného na každý z motorů experimentálního elektromobilu je použit kotouček s devíti otvory, to je ostatně dokumentováno obrázkem č. 3.6.



Obr. 3.6 – Kotouč IRC snímače

### 3.6.3 Snímače proudu

Na tříkolovém vozidle se snímání elektrických proudů provádí pomocí senzoru LA55-P firmy LEM za účelem regulace pohonu. Vnitřní uspořádání senzoru je vyneseno na obrázku č. 3.7.



Obr. 3.7 - Funkční schéma senzoru LA55-P

Jádrem senzoru je provléknut vodič protékající primárním proudem  $I_h$ . V magneticky vodivém jádru vzniká magnetický tok, který samozřejmě prochází i přes Hallův článek, na němž tak

vzniká napětí. Toto napětí vstupuje do zesilovače, jenž ho převádí na proud  $I_r$ , který je dále veden do kompenzačního vinutí, kde se tak vytváří magnetický tok opačného smyslu oproti magnetickému toku vytvořenému průchodem primárního proudu. Po vykompenzování dojde k vyrušení magnetického toku v magnetickém jádru a na Hallově článku je nulové napětí. Z tohoto vyplývá, že je primární proud převeden v určitém poměru na kompenzační proud. Ten prochází přes rezistor  $R$  k zemi, což znamená, že právě na tomto rezistoru se získává napětí pro AD převodník mikrokontroléru.



## 4 ROZBOR MOŽNOSTÍ PRO ŘEŠENÍ ELEKTRONICKÉHO DIFERENCIÁLU

### 4.1 Princip diferenciálu obecně

V silniční technice se diferenciálem rozumí mechanický nápravový diferenciál, jímž jsou vybavena téměř všechna silniční vozidla. Diferenciál zajišťuje přidělování výkonu  $P$  [W] na jednotlivá kola přímo úměrně k jejich otáčkám  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ], přičemž se na všech kolech vyskytuje konstantní záběrný moment  $M$  [Nm]. Výkon, který se dostává na každé z kol, je popsán níže uvedenou rovnicí (34).

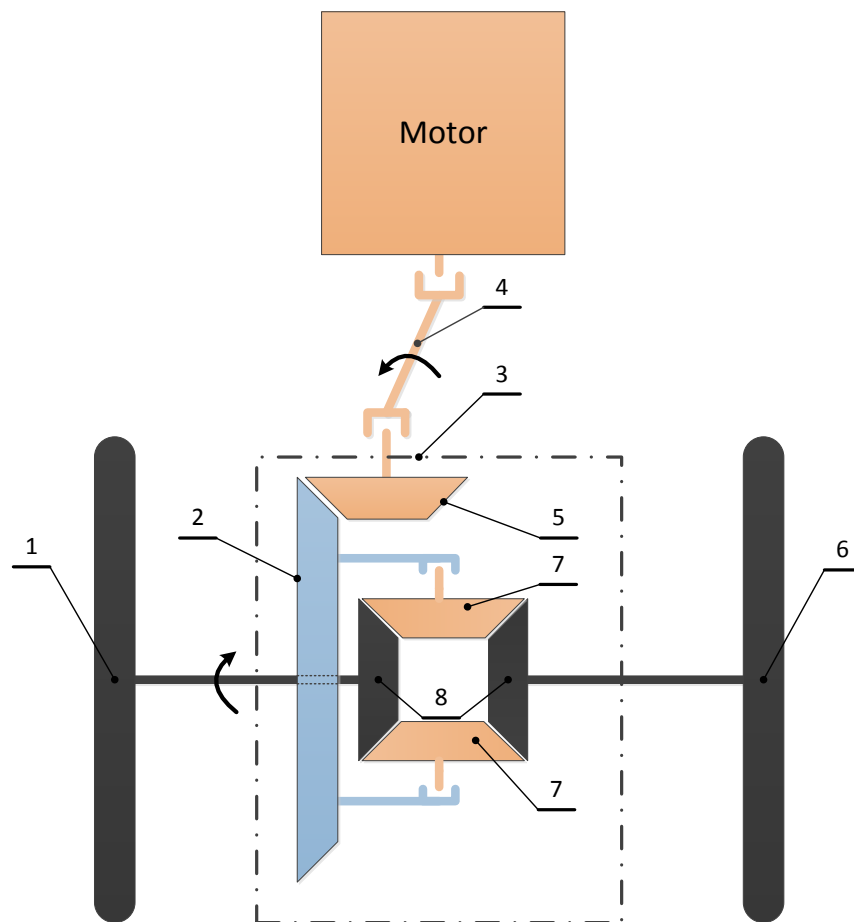
$$P = M \cdot \frac{\pi}{30} \cdot n \quad (34)$$

Příkladem může být vozidlo jedoucí do zatáčky, jehož vnější kola se točí rychleji nežli kola vnitřní, což je způsobeno tím, že vnější kolo urazí delší trajektorii oproti kolu vnitřnímu. Pokud by vozidlo výše definovaný diferenciál neobsahovalo, tak by motor nutil dvojici kol na hnané nápravě stejné otáčky, docházelo by tak k většímu opotřebení pneumatik, ztrátě výkonu vozidla a větší spotřebě paliva. Standardní diferenciál má však i své stinné stránky, které se projeví například v zimě, když vozidlo s diferenciálem zapadne do sněhové závěje. Pokud se jedno kolo dostane na led a druhé uvízne ve sněhu, tak se veškerý výkon přelege na kolo, které se otáčí snadno a vozidlo tím pádem nevyjede. Pokud by však bylo možné mechanický diferenciál uzamknout tak, aby byla potlačena jeho funkce, tak by kola dostala stejné otáčky, ale rozdílné tažné síly a vozidlo by vyjelo. Principu uzamčení diferenciálu se hojně využívá u offroadů, zde se jím v případě mechanického diferenciálu dále zabývat nebudu.

V dnešní době se používají nejrůznější typy diferenciálů, například se jedná o čelní diferenciál, jednoduchý otevřený diferenciál nebo třeba samosvorný diferenciál, který vyniká svými vlastnostmi při akceleraci a má vyšší účinnost oproti jednoduchým diferenciálům. Ovšem pro celkové objasnění problematiky dále uvádím pouze popis nejběžnějšího kuželového diferenciálu, jehož nákres můžete vidět na obrázku č. 4.1.

Hnací moment na kola je přiváděn z motoru prostřednictvím kardanu (4), na nějž ve skříní diferenciálu (3) navazuje pastorek (5), který s určitým převodem točí s talířovým kolem (2). Pokud vozidlo jede po rovině, tak jsou otáčky kol shodné, satelity (7) unášené talířovým kolem se neotáčejí. Jestliže vozidlo najede například do pravotočivé zatáčky, tak dojde

k přibrzdění pravého kola, levé kolo se točí naopak rychleji. V tuto chvíli musí dojít k vyrovnání diference otáček mezi koly, což je možné díky spolupráci planetových kol a satelitů. Zmíněná diference otáček kol automobilu se totiž přenáší na planetová kola v diferenciálu, takže pravé planetové kolo se točí pomaleji a levé rychleji. Diferenci otáček pak vyrovnávají satelity (7) tak, že se začnou otáčet kolem své osy. Satelity jsou v případě jízdy vozidla zatáčkou unášeny jednak taliřovým kolem, čímž dochází k přenosu krouticího momentu na kola, dále pak se satelity otáčejí kolem své osy, vyrovnávají tak rozdílné otáčky planetových, respektive vozidlových kol.



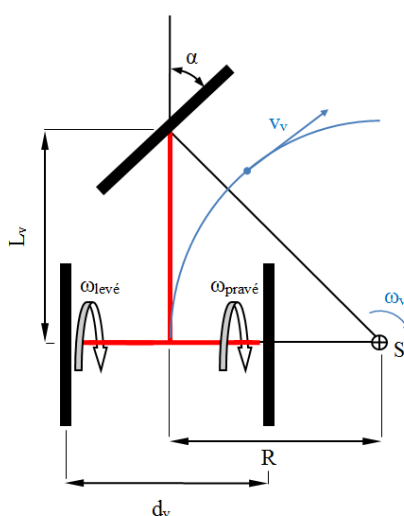
Obr. 4.1- Kuželový diferenciál, kde je: 1 – Hřídel k levému kolu; 2 – Taliřové kolo; 3 - Skříň diferenciálu; 4 - Kardan přivádějící hnací moment z motoru vozidla; 5 – Pastorek; 6 – Hřídel k pravému kolu; 7 – Satelit; 8 - Planetové kolo.

V případě našeho trojkolového vozidla je situace z hlediska pohonu kol poněkud rozdílná oproti výše uvedenému mechanickému diferenciálu. Každé z kol zadní nápravy pohání totiž individuální motor. Z hlediska mechaniky se však jedná o rovnocenný problém, neboť při ručním ovládní vozidla by byl oběma motorům přidělen stejný napěťový, respektive jízdní, stupeň. Při průjezdu zatáčkou by pak u jednoho z kol došlo k poklesu otáček, což by vedlo k následnému navýšení momentu na tomto kole dle vztahu (34), výkon motoru by ale zůstal

konstantní. Z tohoto důvodu musí být motory regulovány individuálně, dle aktuální trakční situace a také na základě požadavků na plynulé zatáčení vozidla. Automatická regulace tak plně nahradí diferenciál zadních kol vozidla. Před uvedením samotných regulačních struktur a algoritmů je nutné provést mechanickou analýzu vozidla při jízdě v přímém směru a průjezdu zatáčkou.

## 4.2 Mechanická analýza jízdy experimentálního elektromobilu

Před samotným rozbořením jízdy vozidla z hlediska diferenciálu zadní nápravy je nutno definovat parametry vozidla, které se budou v dalších úvahách vyskytovat. Níže uvedený obrázek jistě poslouží pro lepší zorientování se v dané problematice.



Obr. 4.2 – Schématické znázornění experimentálního elektromobilu, kde je:  $\alpha$  [°] – úhel natočení řídicího,  $L_v$  [m] – rozvor vozidla,  $d_v$  [m] – rozchod vozidla,  $R$  [m] – poloměr zatáčky,  $S$  – střed zatáčky,  $\omega_{levé}$  [rad.s<sup>-1</sup>] – úhlová rychlost levého kola,  $\omega_{pravé}$  [rad.s<sup>-1</sup>] – úhlová rychlost pravého kola,  $\omega_v$  [rad.s<sup>-1</sup>] – úhlová rychlost zatáčení vozidla,  $v_v$  [km/h] – rychlost vozidla.

Konstantními parametry pro další výpočty jsou rozchod a rozvor vozidla. Poloměr zatáčky je při jízdě vozidla proměnnou a mění se v závislosti na úhlu natočení řídicího vztahu:

$$R = \frac{L_v}{\tan \alpha} \quad (35)$$

Dále je třeba obecně stanovit rychlost vozidla, která závisí na otáčkách jednotlivých kol následovně:

$$v_v = \omega_v \cdot R = \omega_{střední} \cdot r = \frac{\omega_{levé} + \omega_{pravé}}{2} \cdot r \quad (36)$$

Kde je:

$r$  [m] – poloměr kola

$\omega_{středni}$  – úhlová rychlost imaginárního kola umístěného do středu nápravy.

Nezatačí-li vozidlo, tak se jedná o velice jednoduchý případ pohybu, neboť jsou shodné otáčky kol i krouticí momenty na kolech, což také znamená, že je výkon obou motorů shodný. Z toho je zřejmé, že v tomto případě není třeba nikterak diferencíál realizovat.

Při jízdě vozidla do zatáčky však dojde k rozvážení otáček kol a tím pádem i k rozvážení výkonů na kolech. Z hlediska pozdější regulace je nutno odvodit vztahy pro výpočet úhlových rychlostí jednotlivých kol na základě úhlu natočení řídk. Jelikož se při výpočtu vychází z úhlové rychlosti vozidla při průjezdu zatáčkou, tak je ji nutno stanovit následovným způsobem:

$$\omega_v = \omega_{středni} \cdot \frac{r}{R} \quad (37)$$

Dále pak musí být stanoveny rychlosti vozidla vždy ve vzdálenosti  $d_v/2$  od středu nápravy vozidla, což je jistě patrné ze vzorce (38) a (39).

$$v_{levé} = \omega_v \cdot \left( R + \frac{d_v}{2} \right) \quad (38)$$

$$v_{pravé} = \omega_v \cdot \left( R - \frac{d_v}{2} \right) \quad (39)$$

Na základě výše uvedených vztahů lze vypočítat úhlové rychlosti kol při průjezdu zatáčkou pomocí níže uvedených vzorců.

$$\omega_{levé} = \omega_{středni} \cdot \left( \frac{R + \frac{d_v}{2}}{R} \right) = \omega_{středni} \cdot \left( 1 + \frac{\frac{d_v}{2}}{2 \cdot \frac{L_v}{\operatorname{tg} \alpha}} \right) = \omega_{středni} \cdot \left( 1 + \frac{d_v \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2 \cdot L_v} \right) \quad (40)$$

$$\omega_{pravé} = \omega_{středni} \cdot \left( \frac{R - \frac{d_v}{2}}{R} \right) = \omega_{středni} \cdot \left( 1 - \frac{\frac{d_v}{2}}{2 \cdot \frac{L_v}{\operatorname{tg} \alpha}} \right) = \omega_{středni} \cdot \left( 1 - \frac{d_v \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2 \cdot L_v} \right) \quad (41)$$

Ze vztahů (40) a (41) vyplývá, že poměrné úhlové rychlosti kol při určité rychlosti vozidla závisí pouze na jedné proměnné, a to na natočení řídicích. V předpisu obou vzorců se však vyskytuje goniometrická funkce tangens, ta však není definována pro úhel  $90^\circ$ . Jelikož by teoreticky bylo možno řídicí do této polohy vytočit, tak je dále ukázáno řešení zmíněného problému pomocí limity funkce, kde uvažují, že se blíží k úhlu  $90^\circ$  zleva.

$$\frac{\omega_{\text{levé}}}{\omega_{\text{střední}}} = \lim_{\alpha \rightarrow 90^\circ} \left( 1 + \frac{d_v \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2 \cdot L_v} \right) = \infty \quad (42)$$

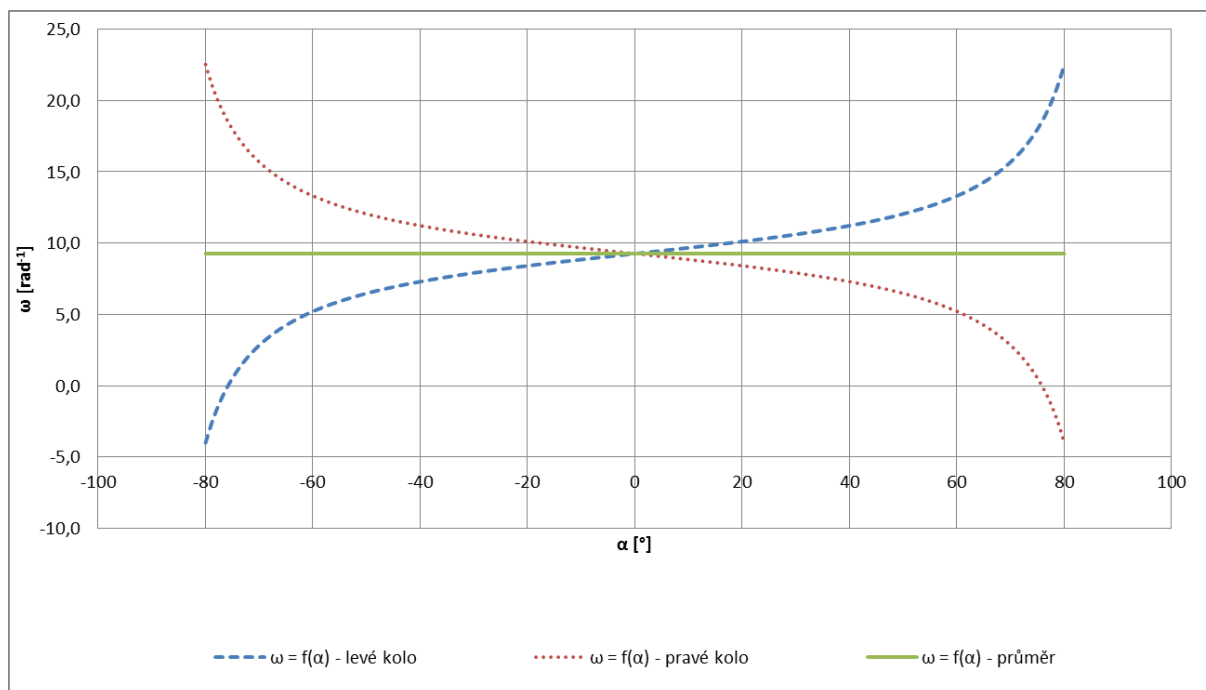
$$\frac{\omega_{\text{pravé}}}{\omega_{\text{střední}}} = \lim_{\alpha \rightarrow 90^\circ} \left( 1 - \frac{d_v \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2 \cdot L_v} \right) = -\infty \quad (43)$$

Z výše uvedených limitních výpočtů je jisté zřejmé, že pokud by došlo k vytočení řídicích tak, aby přední kolo svíralo s podélnou osou vozidla úhel  $90^\circ$ , tak potom poměrné otáčky kol vzrostou nad všechny meze. Ve skutečnosti je rychlost vždy konečná, neboť vztahy pouze vyjadřují, že v limitě obě kola získají stejnou úhlovou rychlost, neboť i střední rychlost s rostoucím úhlem klesá. Trojkolové vozidlo by v tom případě konalo otáčivý pohyb kolem středu osy zadních kol, což by byl pohyb žádaný jen za podmínky, že by vozidlo před uvedením do tohoto pohybu stálo. Jelikož experimentální vozidlo není vybaveno typem měniče, který by umožňoval otočit se s vozidlem na místě tím způsobem, že se začnou kola otáčet proti sobě, tak je nutno omezit vytočení řídicích. Maximální možný úhel vytočení lze vypočítat například ze vztahu (40) tak, že se ze vztahu vyjádří úhel natočení a za otáčky levého kola se dosadí nula. Po úpravě a dosazení vznikne níže uvedený vztah.

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \pm \frac{2 \cdot L_v}{d_v} \right) = \operatorname{arctg} \left( \pm \frac{2 \cdot 1,01}{0,51} \right) = \pm 75,8^\circ \quad (44)$$

Výsledný úhel je však nutno zaokrouhlit dolů z důvodu vůlí v mechanismu zatáčení. Proto je úhel mechanicky zablokovaný na hodnotě  $\pm 75^\circ$ .

Na obrázku č. 4.3 jsou pro ilustraci uvedeny průběhy úhlových rychlostí jednotlivých kol v závislosti na rostoucím úhlu natočení řídicích. Jedná se o případ, kdy vozidlo jede rychlostí 10 km/h. Maximální úhel natočení řídicích byl v tomto obrázku zvolen záměrně  $80^\circ$ , aby byly vidět záporné hodnoty úhlových rychlostí jednotlivých kol.



Obr. 4.3- Závislost úhlové rychlosti kol na úhlu natočení řídicíků při rychlosti vozidla 10 km/h

Z obrázku 4.3 je dále zřejmé, že se zhruba od 60 stupňů zvětšuje diference úhlových rychlostí mezi koly daleko významněji. V grafu uvedená rychlost vozidla reprezentovaná středními otáčkami je teoreticky konstantní, ale ve skutečnosti se zvětšujícím se úhlem zatočení rychlost vozidla klesá, neboť jednak roste odstředivá síla, jež na vozidlo i řidiče působí, a potom také vozidlo již není schopno při určité rychlosti požadované otáčky dodat, jelikož se motory dostanou na svá otáčková maxima.

### 4.3 Navržená řešení elektronického diferenciálu zadních kol vozidla

Na základě výše uvedeného rozboru mechanického diferenciálu a rozboru jízdy trojkolového vozidla vychází, že lze postavit regulaci pohonu trojkolového vozidla, respektive vytvořit elektronicky ovládaný diferenciál, na dvou odlišných principech, které jsou dále rozebrány.

#### a) Elektronický momentový diferenciál

Regulace vychází z rovnice (34) uvedené v kapitole 4.1. Výkon motoru přímo úměrně závisí na točivém momentu a jeho otáčkách. Pokud tedy bude moment na obou motorech udržován na žádané hodnotě, tak se budou moci napětí a otáčky sami přizpůsobovat danému směrovému profilu trati. Výkon bude na motory rozdělen v poměru otáček kol nezávisle na točivém momentu.

### **b) Deterministický otáčkový diferenciál**

Druhý způsob regulace pohonu vozidla lze spatřovat v regulaci otáček motorů na základě znalosti úhlu reprezentujícího natočení řídítek. Dle natočení řídítek a žádané hodnoty rychlosti se tedy provede výpočet otáček jednotlivých kol. Vypočtené otáčky pak regulátor vnutí jednotlivým kolům, čímž se naplní regulace pohonu vozidla v duchu deterministicky řízeného diferenciálu. Tento typ diferenciálu bude použitelný například v případě, kdy vozidlo zapadne a jedno kolo přijde o adhezi. Obě kola budou mít totiž deterministicky určené otáčky, a tak se vozidlo snáze dostane z nevhodného terénu. Jedná se vlastně o analogii k závěrce mechanického diferenciálu.

## 5 REGULACE POHONU

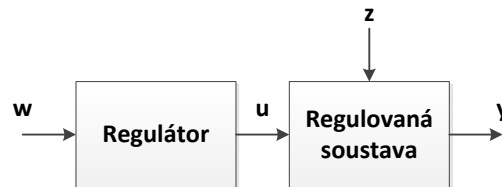
### 5.1 Princip regulace obecně

Objekt, jehož parametry je třeba nějakým způsobem regulovat, se nazývá regulovaná soustava. Při regulaci dochází k ovlivňování regulované soustavy regulátorem za účelem změny chování regulované soustavy jako takové. Regulátor a regulovaná soustava tvoří regulační obvod.

V reálném životě samozřejmě nejsou řízeny jen pochody v rámci elektrických pohonů, ale obecně lze řídit jakýkoliv proces záměrně navozený lidskou činností za účelem zkvalitnění jeho průběhu, nebo dokonce umožnění existence tohoto procesu. Příkladem může být regulace pokojové teploty, regulace hladiny nádrží pro uchování dostatečného množství dané kapaliny či řízení robotického ramena.

#### 5.1.1 Ovládání v otevřené smyčce

Nejjednodušší možností regulace je tzv. ovládání v otevřené smyčce, kde regulátor spolu s regulovanou soustavou utváří otevřený regulační obvod, který je prezentován prostřednictvím obrázku č. 5.1.



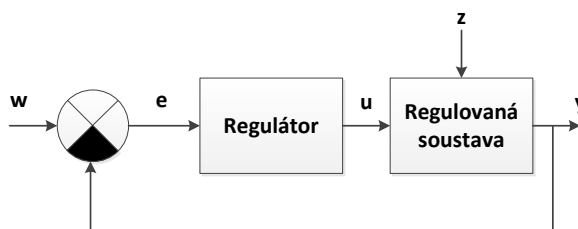
Obr. 5.1 - Řízení v otevřené regulační smyčce, kde je:  $w$  – žádaná hodnota regulované veličiny,  $u$  – akční veličina,  $z$  – porucha,  $y$  – skutečná hodnota regulované veličiny

Princip ovládání v otevřené smyčce spočívá v tom, že regulátor ovládá regulovanou soustavu na základě žádané veličiny. Příkladem takové regulace může být řízení asynchronního motoru frekvenčním měničem, který nastaví požadované otáčky motoru pomocí frekvence. Pokud dojde k pozdějšímu zatížení motoru, což je na obrázku č. 5.1 charakterizováno poruchou  $z$ , tak jeho otáčky s rostoucím zatížením začnou klesat dle mechanické charakteristiky daného motoru. V případě asynchronního motoru může dokonce dojít až k zastavení motoru, pokud se moment vlivem zátěže dostane za všeobecně známý moment zvratu. Z výše uvedeného příkladu a provedeného rozboru vyplývá, že tato regulace nebude vhodná v případě experimentálního elektromobilu, kde chceme automaticky držet buď požadovaný moment, nebo otáčky motoru.



### 5.1.2 Řízení v uzavřené smyčce

V případě řízení v uzavřené smyčce regulátor spolu s regulovanou soustavou utváří uzavřený regulační obvod. Protože je skutečná hodnota regulované veličiny porovnávána s žádanou hodnotou regulované veličiny, tak se této formě regulace říká též zpětnovazební regulace. Principiální schéma této regulační struktury je uvedeno na obrázku č. 5.2.



Obr. 5.2- Řízení v uzavřené regulační smyčce, kde je:  $w$  – žádaná hodnota regulované veličiny,  $u$  – akční veličina,  $z$  – porucha,  $y$  – skutečná hodnota regulované veličiny,  $e$  – regulační odchylka

V případě zpětnovazebního řízení regulátor opět svými akčními zásahy reguluje činnost regulované soustavy, ovšem s tím rozdílem, že je informován o případném vzniku poruchové veličiny  $z$ . Pokud poruchová veličina sníží úroveň regulované veličiny, tak se tato informace přenáší zpět do regulátoru, respektive dojde k vypočtení regulační odchylky  $e$  takto:

$$e = w - y \quad (45)$$

Pokud k poruše nedojde, tak je regulační odchylka rovna nule, regulátor potom nikterak nezasahuje do průběhu regulované veličiny. Pokud regulační odchylka nulová není, tak regulátor provádí regulační zásah tak dlouho, dokud není regulační odchylka nulová.

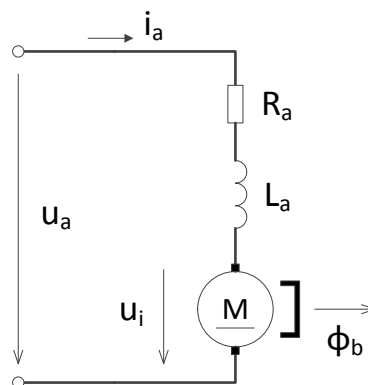
V minulé kapitole pojednávající o regulaci v otevřené smyčce byl uveden příklad s asynchronním motorem, který byl řízen frekvenčním měničem. V kapitole proběhla jistá úvaha, která vedla k závěru, že při určitém zatížení motoru by došlo k jeho zastavení. Nyní vyvstává otázka, co se stane s motorem, pokud bude řízen zpětnovazebně? Dobře naladěný regulátor na základě signálu ze zpětné vazby vyrovná regulační odchylku a otáčky udrží na žádané hodnotě. Naopak špatně naladěný regulátor způsobí rozkmitání regulované veličiny, regulace se tak stane nestabilní. Ovšem i dobře naladěný regulátor nedokáže zabránit zastavení pohonu z hlediska překročení maximální zátěže, jelikož se dostane do fyzikální limitace.

Další podkapitola se tedy věnuje popisu regulované soustavy, tak jak je chápána na experimentálním vozidle. Následně se práce zabývá volbou vhodných regulátorů a tvorbou

potřebných regulačních smyček pro bezproblémový chod experimentálního vozidla. Poslední subkapitoly se pak zabývají tvorbou algoritmů pro řídicí jednotku a pomocnou jednotku pohonu experimentálního elektromobilu.

## 5.2 Popis regulované soustavy – stejnosměrného motoru s permanentními magnety

Jak již bylo řečeno v úvodní kapitole, tak je experimentální elektromobil vybaven dvojicí stejnosměrných motorů s permanentními magnety. Tento točivý elektrický stroj, ostatně jako každý jiný, přeměňuje elektrickou energii na energii mechanickou, samozřejmě s jistou mírou účinnosti, neboť při zmíněné přeměně se část elektrické energie ztratí ve formě tepla. Přeměnu elektrické energie na mechanickou lze u každého točivého stroje charakterizovat rovnicemi popisujícími daný stroj z hlediska elektrického, mechanického i elektromechanického. Rovnice vycházejí z uspořádání náhradního schématu motoru, pročež je toto schéma níže uvedeno prostřednictvím obrázku č. 5.3.



Obr. 5.3- Náhradní schéma stejnosměrného motoru s permanentními magnety

Z náhradního schématu na obrázku č. 5.3 je dozajista patrné, že se jedná pouze o náhradní schéma kotevní části stejnosměrného motoru, neboť buzení je tvořeno též zakresleným permanentním magnetem produkujícím konstantní budící magnetický tok  $\phi_b$  [Wb]. Po přiložení napětí  $u_a$  [V] na kotvu motoru začne obvodem procházet proud  $i_a$  [A]. Tento proud vyvolá úbytek napětí na odporu  $r_a$  [ $\Omega$ ] kotevního vinutí. Na kotevní indukčnosti  $L_a$  [H] vznikne napětí vlivem Lenzova zákona, tedy změnou proudu  $\Delta i_a$  za dobu  $\Delta t$  [s]. V obrázku je také zakresleno indukované napětí  $u_i$  [V], které vzniká při otáčení se rotoru vlivem magnetického pole buzení. Napětíovou rovnicí pro rotor stejnosměrného stroje lze pak zapsat následovně:

$$u_a = u_i + r_a \cdot i_a + L_a \cdot \frac{\Delta i_a}{\Delta t} \quad (46)$$

Dále lze motor popsat z hlediska momentového. Proud  $I_a$  procházející kotvou totiž vyvolá ve spolupráci s konstantním budícím magnetickým tokem  $\Phi_b$  silové působení na vodiče umístěné v rotoru stroje. Silové působení je úměrné elektromagnetickému momentu  $M_{em} [Nm]$ , který lze stanovit přes konstrukční konstantu stroje  $c [-]$  pomocí níže uvedeného vztahu (47).

$$M_{em} = c \cdot \phi_b \cdot I_a \quad (47)$$

V technické praxi se uvažuje, že je elektromagnetický moment produkovaný strojem v podstatě totožný s mechanickým momentem, neboť mechanické ztráty vznikající hlavně v ložiskách motoru jsou zanedbatelné. Z tohoto důvodu je i v této práci krouticí moment motoru uvažován takto:

$$M = M_{em} \quad (48)$$

Otáčky motoru  $n [min^{-1}]$  jsou přímo úměrné indukovanému napětí  $U_i$  přiloženému na kotvu motoru a nepřímo úměrné budícímu magnetickému toku  $\Phi_b$ , což dokumentuje i následující vztah:

$$n \approx \frac{U_i}{\phi_b} \quad (49)$$

Z hlediska řízení pohonu je jasné, že otáčky motoru lze řídit dle vztahu (49) pomocí napětí  $U_a$  přiloženého na kotvu stroje. Při momentové regulaci pohonu se může vyjít ze vztahu (47), kde je vidět, že moment motoru závisí přímo úměrně na kotevním proudu  $I_a$ . Jak je však známo, tak je elektrický proud vybuzen napětím, tudíž i moment motoru bude řízen napětím. Totiž pokud dojde k vyrovnání napájecího napětí motoru  $U_a$  a indukovaného napětí  $U_i$ , tak v konečném důsledku zanikne proud  $I_a$ , který je dle vztahu (47), respektive vztahu (48), úměrný záběrnému momentu. Situaci vzniku proudu, potažmo vzniku momentu, dokumentuje níže uvedený vztah, který je odvozený z rovnice (46), samozřejmě v ustáleném stavu, kdy odpadá napětí indukované na vinutí.

$$M \approx I_a = \frac{U_a - U_i}{R_a} \quad (50)$$

### 5.3 Regulace momentového diferenciálu

Jak již z názvu vyplývá, tak je tato regulace založena na regulaci točivého momentu motoru. Samotná regulace vychází z myšlenky nezávisle momentově řídit dva motory pohánějící kola umístěné v zadní ose experimentálního elektromobilu. Realizovatelností momentového elektronického diferenciálu se důkladně zabývala kapitola č. 4, kde se došlo k závěru, že nezávislou regulací točivých momentu motorů se skutečně dosáhne elektronicky ovládaného diferenciálu.

#### 5.3.1 Popis navržené momentové zpětnovazební regulace

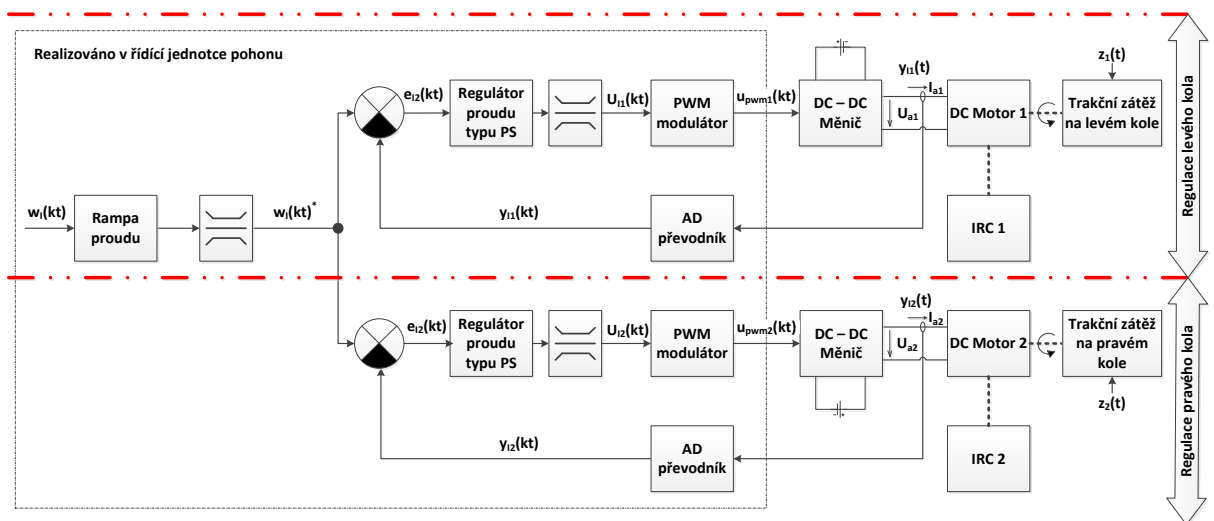
Pro momentovou regulaci pohonu jsem vymyslel digitálně analogový zpětnovazební regulační obvod, jehož schématickou podobu zachycuje obrázek č. 5.4. Prvním stimulem pro uzavřený regulační obvod na obrázku je diskrétní žádaná hodnota momentu  $w_i(kt)$ , která odpovídá jistému záběrnému proudu. Požadavek na proud dále přechází do bloku nazvaného rampa proudu. Tento blok je nesmírně důležitý z hlediska navození plynulého náběhu záběrného momentu. Náhlý velký záběrný moment by způsobil růst zrychlení vozidla (tzv. ryv), což v první řadě nekoresponduje s uvažovaným konstantním zrychlením  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Druhým, avšak neméně významným efektem růstu zrychlení, je snížení pohodlí obsluhy při jízdě vozidla.

Dále se žádost předává limitačnímu bloku, který řeší jednak limitaci žádaného proudu z hlediska nepřekročení maximálního proudu odebíraného měničem z baterie, a pak také tento blok limituje žádaný proud dle maximálního proudu měniče. Po průchodu žádosti limitačním blokem se žádost  $w_i(kt)^*$  rozdělí do dvou regulačních větví. Každá z uvedených větví tvoří samostatný uzavřený regulační obvod regulující záběrný moment daného kola. Zmíněná dvojice regulačních větví je funkčně stejná, proto dále popíšu jen jednu z nich.

Upravený žádaný proud  $w_i(kt)^*$  je zaveden do rozdílového členu, kde se od něj odečte AD převodníkem diskretizovaná hodnota žádané veličiny  $y_{ix}(kt)$ , tedy záběrného proudu. Vznikne tak regulační odchylka  $e_{ix}(kt)$ , jež je vedena do diskrétní formy PI regulátoru, tzv. PS regulátoru, kde dojde k výpočtu akční veličiny  $u_{ix}(kt)$ . Tato veličina je ovšem limitována následujícím blokem, neboť regulátor může vypočítat regulační zásah, který bude ležet nad možnostmi akčního členu. Zároveň v tomto bloku dochází k potlačení tzv. Wind-up efektu, při kterém integrační složka regulátoru roste dál, i když je akční veličina limitována. Pokud by nedošlo k limitaci integrační složky, tak může docházet k překmitům regulované veličiny, což není žádané. Limitací upravená akční veličina dále vstupuje do bloku PWM modulátoru.

Zde je klasický diskretní signál zakódován do PWM signálu  $u_{pwm}(kt)$ , tedy do pulzního signálu, kde určité hodnotě diskretního signálu odpovídá délka pulzu. Perioda tohoto signálu je však neměnná. PWM signálem se zajišťuje poměrné otevření měniče, čili dochází ke změně napětí, potažmo proudu, na výstupu měniče v závislosti na délce aktivního pulzu PWM modulovaného signálu. Pulzní napětí je potom přivedeno na svorky stejnosměrného motoru, čili regulované soustavy. Jelikož se nachází v regulované soustavě indukčnost, tak je hypoteticky vzniklý pulzní proud touto indukčností vyhlazen a vzniká tak proud v čase i amplitudě spojitý, který je ve schématu označován regulovanou veličinou  $y_{ix}(t)$ . Z motoru je moment přenášen do zátěže, kde dochází ke vzniku tažné síly. Na zátěž působí porucha  $z(t)$ , kterou se snaží regulátor vyrovnat změnou regulované veličiny  $y_{ix}(t)$ . Do obrázku je též zakresleno čidlo otáček, z jehož pulzů mikrokontrolér otáčky vyhodnocuje, i když se nejedná o otáčkovou regulaci. Naměřené otáčky slouží pouze pro rychlostní omezení při dosažení maximální rychlosti a pro možnost zobrazovat aktuální rychlost vozidla.

V regulačním schématu na obrázku č. 5.4 je čerchovanou čarou znázorněna ta část, která je hardwarově i softwarově realizována řídicí jednotkou pohonu, jež byla popsána z konstrukčního hlediska v kapitole č. 3.3. Podrobnému popisu algoritmů zprostředkovávajících regulaci pohonu se pak věnuje kapitola č. 6.



Obr. 5.4- Schéma regulace momentového diferenciálu

### 5.3.2 PS regulátor proudu

Regulátor tvoří jednu z nejpodstatnějších částí regulační struktury, proto budou dále popsány jeho vlastnosti podrobněji.

PS regulátor byl vybrán z toho důvodu, že plně umožňuje řízení astatické soustavy prvního řádu, kterou právě stejnosměrný motor představuje. P regulátor by řízení obstaral rovněž, ale nebyl by schopen eliminovat trvalou regulační odchylku. PS regulátor vypočítává akční veličinu na základě regulační odchylky dle následující rovnice:

$$u(k) = K \left[ e(k) + \frac{T}{T_i} \cdot \sum_{j=1}^{k-1} e(j) \right] \quad (51)$$

kde je:

$u(k)$  – hodnota akční veličiny v  $k$ -té regulační smyčce,

$e(k)$  – regulační odchylka v  $k$ -té regulační smyčce,

$K$  – proporcionální zesílení regulátoru,

$T$  – perioda regulace,

$T_i$  – integrační časová konstanta.

Regulátor jako celek funguje tak, že nejdříve reguluje proporcionální část regulátoru, která utváří jeho dobrou dynamiku, to znamená, zrychluje regulaci. Po uplynutí integrační časové konstanty se začne při regulaci uplatňovat i integrační část regulátoru. Integrační časová konstanta, proporcionální zesílení i perioda regulace se volí s cílem zvýšit kvalitu regulace. Pokud se zvolí příliš velké proporcionální zesílení, tak dojde k rozkmitání regulované veličiny. Naopak menší proporcionální zesílení vede k prodloužení doby regulace. Nabývá-li integrační časová konstanta malé hodnoty, tak může dojít opět k rozkmitání regulované veličiny. Samotné nastavování parametrů regulátoru je experimentálně řešeno v kapitole zabývající se implementací regulačních a řídicích algoritmů.

#### 5.4 Regulace otáčkového deterministického diferenciálu

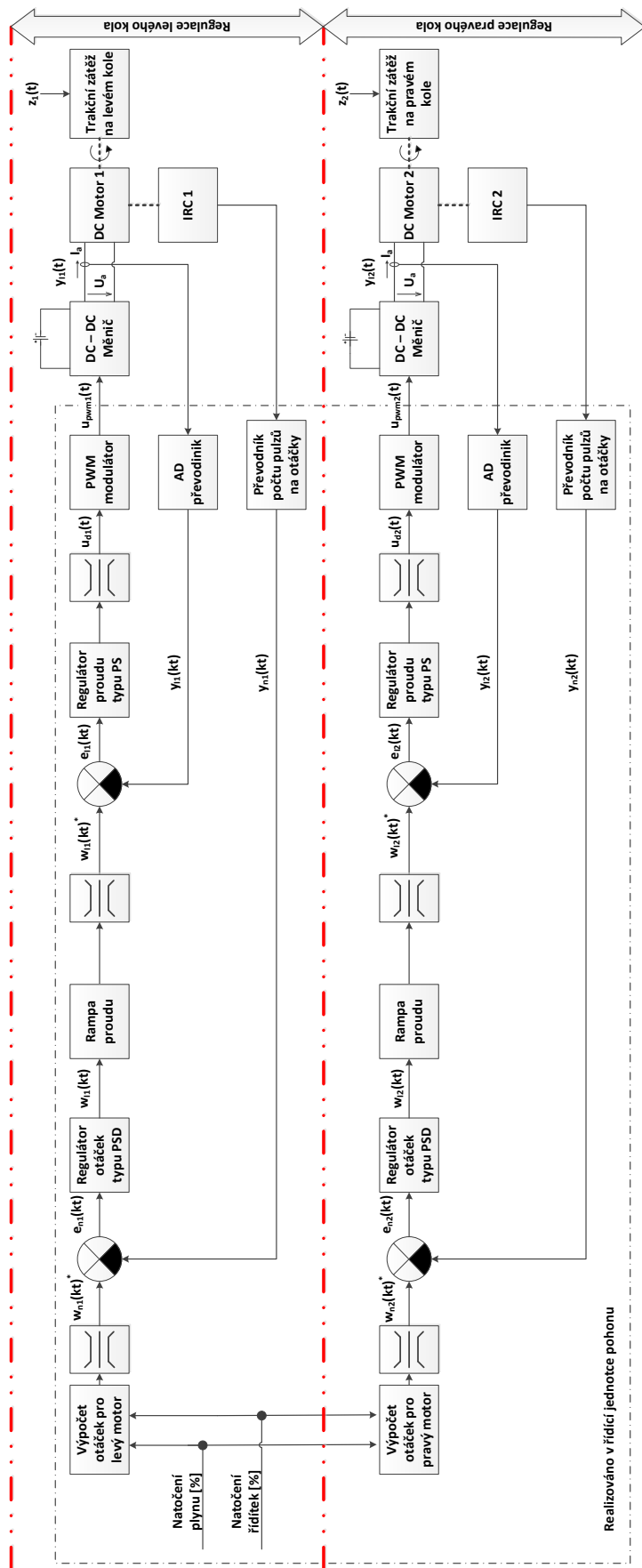
Jedná se o další možnost, jak zvládnout řízení pohonu vozidla z hlediska elektronického diferenciálu. Tentokrát však není primární regulovanou veličinou proud, nýbrž otáčky motorů. Pro nezávislou otáčkovou regulaci motorů musí být vozidlo vybaveno snímačem natočení řídítek, jinak by nemohla být stanovena difference otáček mezi koly. Zadáním při takové regulaci nebude požadavek na moment, ale na rychlost vozidla. Pro řidiče vozidla bude zřejmě ovládání netypické, neboť bude plynovou rukojetí zadávat požadavek na rychlost, nikoliv na moment. Zároveň však řidič nebude muset tolik pracovat s plynovou rukojetí, což může být přidanou hodnotou.

### 5.4.1 Popis navržené otáčkové zpětnovazební regulace

Pro otáčkovou regulaci byl vymyšlen uzavřený regulační obvod, jehož podobu si lze prohlédnout na obrázku č. 5.5. Celkové schéma regulace sestává ze dvou rovnocenných, avšak zároveň nezávislých, zpětnovazebních regulačních struktur, pomocí nichž se dosáhne nezávislého řízení zadních kol experimentálního elektromobilu. Pro uvedení vozidla do pohybu je nutno vyvinout předem určenou tažnou sílu, která vznikne jedině v případě, že má motor k dispozici dostatečný moment. Aby nedocházelo k momentovým rázům, tak je otáčkové smyčce podřazena proudová smyčka, která se stará o plynulý rozjezd vozidla. Proudovou smyčkou se zabývala předchozí kapitola, takže jí nebude dále věnována pozornost, pouze zde bude řešena interakce mezi oběma smyčkami.

První blok, který je naznačen na schématu otáčkové regulace, slouží pro výpočet žádaných otáček daného motoru. Do tohoto výpočtu jsou zahrnuty dva údaje. Prvním z nich jsou požadované otáčky, které jsou zjištěny na základě polohy plynové rukojeti. Druhý údaj tvoří hodnota, jež svou velikostí reprezentuje mocnost natočení řídítek. Samotný výpočet pak vychází z rovnice (40) a (41). Vzniklá žádaná veličina otáček  $w_{nx}(kt)$  dále postupuje do bloku limitace, který žádanou hodnotu limituje maximálními otáčkami motoru. Za limitačním blokem signál přechází do rozdílového bloku, kde je od žádané hodnoty otáček odečtena skutečná hodnota otáček  $y_{nx}(kt)$ . Produktem tohoto rozdílu je regulační odchylka  $e_{nx}(kt)$ , jež dále přechází do PSD regulátoru. V bloku regulátoru se na základě velikosti regulační odchylky vypočte akční veličina, která zároveň funguje jako žádaná hodnota proudu  $w_{ix}(kt)$  pro podřazenou proudovou regulační smyčku. Žádaná hodnota proudu dále prostupuje rampou proudu, kde dojde k plynulému nárůstu proudu. Bez tohoto bloku by došlo k prudkému nárůstu proudu při rozjezdu vozidla. Následuje limitační blok, který zajistí, aby požadavek na proud nevyvolal nadměrné výkonové zatížení baterie. Blok limitace zároveň slouží pro zastavení dalšího růstu integrační složky regulátoru tzv. Wind-up efektu, ke kterému dochází jen u číslicových regulátorů, spojitě regulátory jsou totiž automaticky limitovány saturací napájecího napětí.

Přímou regulaci rychlosti nelze použít, neboť by byl motor značně momentově přetěžován a navíc by nedošlo k bezpečnému rozjetí se vozidla vlivem značného záběrného momentu.



Obr. 5.5 – Schéma regulace otáčkového deterministického diferenciálu



### 5.4.2 Otáčkový PSD regulátor

Jelikož se jedná o regulátor, kterému je podřízena další regulační struktura, tak je třeba, aby tento regulátor pracoval efektivněji. Podřazená struktura regulace proudu totiž do regulace otáček zanáší jisté zpoždění, další časovou konstantu. Mechanickou časovou konstantu sice kompenzuje podřízená regulační struktura, ale i ta má určitou konečnou dynamiku, kterou celkový regulační pochod zpožďuje. Z důvodu eliminace přidaných časových konstant byl zvolen pro nadřazenou strukturu PSD regulátor, který svou derivační složkou regulaci urychluje. Ostatní složky regulátoru mají stejné vlastnosti, jako v případě PS regulátoru, jehož princip byl objasněn v předchozí kapitole. Rovnice PSD regulátoru, dle níž mikrokontrolér regulaci provádí, je vyobrazena níže:

$$u(k) = K \left[ e(k) + \frac{T}{T_i} \cdot \sum_{j=1}^{k-1} e(j) + \frac{T_d}{T} \cdot (e(k) - e(k-1)) \right] \quad (52)$$

kde je:

$u(k)$  – hodnota akční veličiny v  $k$ -té regulační smyčce,

$e(k)$  – regulační odchylka v  $k$ -té regulační smyčce,

$K$  – proporcionální zesílení regulátoru,

$T$  – perioda regulace,

$T_i$  – integrační časová konstanta,

$T_d$  – derivační časová konstanta.

## **6 ALGORITMIZACE REGULACE POHONU A OVLÁDÁNÍ VOZIDLA**

V této kapitole si kladu za cíl vytvořit komplexní algoritmus, na jehož základě bude pracovat trakční pohon experimentálního elektromobilu. To znamená, že zde budou řešeny jak algoritmy, které poslouží pro regulaci pohonu, tak algoritmy, jež zabezpečí bezproblémovou interakci obsluhy s hardwarovým vybavením experimentálního elektromobilu.

Aby výsledný software fungoval co nejrychleji, tak se při jeho návrhu využívá nejrůznějších programovacích technik. Již samotné algoritmy jsou proto navrženy například na bázi událostního programování, tedy opětovného dotazování se na stav nějakého procesu. Konkrétně zde se této techniky používá při dotazování se, zda nastal čas vykonat určitou část programu. Dále se pracuje s přerušovacím systémem mikrokontroléru, bez něhož by takřka nemohla probíhat výměna dat mezi MCU jednotkami.

Experimentální elektromobil je vybaven dvojicí mikrokontrolérových jednotek. Pomocná mikrokontrolérová jednotka slouží hlavně pro zjištění mocnosti natočení plynové rukojeti a ke komunikaci s obvodem zjišťujícím natočení řídítek. Naměřená data dále upraví a poskytne je řídicí jednotce pohonu, avšak jen v případě, že si o ně sama požádá. Řídicí jednotka data používá pro řízení pohonu vozidla. K zajištění správné regulace však řídicí jednotka potřebuje další podpurná data, jednak o proudech tekoucích do motorů, jednak o otáčkách motorů. Jelikož pomocná řídicí jednotka vytváří žádané veličiny pro regulační smyčky, tak dále bude nejdříve řešena její algoritmizace. Posléze se práce věnuje tvorbě algoritmů pro řídicí jednotku pohonu.

### **6.1 Algoritmy pro pomocnou mikrokontrolérovou jednotku**

V návaznosti na kapitolu řešící regulaci pohonu se od pomocné mikrokontrolérové jednotky očekává, že bude vypočítávat žádané hodnoty otáček pro regulaci deterministického diferenciálu, a že bude zpracovávat uživatelem učiněné volby. Do pomocné jednotky jsou totiž zavedeny signály z tlačítek umístěných na ovládacím panelu experimentálního vozidla a signál z plynové rukojeti tak, jak je podrobně vylíčeno v kapitole 3.4. Uživatel si může zatím navolit směr jízdy a princip regulace dle kapitoly 5.

Základní rysy algoritmu lze popsat dle zvolené regulace následovně:

- a) Je-li zvolena regulace pomocí momentového diferenciálu (dále zjednodušeně regulace momentu), tak pomocná jednotka:
- Zjišťuje jak moc je vytočena plynová rukojeť; změřenou informaci dále posílá skrze sériovou linku do řídicí jednotky ve formě žádosti na změnu momentu (interval žádosti je 0 až 100 %),
  - Zjišťuje, zda nedošlo ke stisknutí tlačítka pro změnu směru jízdy,
  - Zjišťuje, zda nedošlo ke stisknutí tlačítka určeného pro volbu typu regulace,
  - Zajišťuje sestavení datové zprávy na základě navolených parametrů.
- b) Je-li zvolena regulace deterministického otáčkového diferenciálu (dále zjednodušeně regulace otáček), tak pomocná jednotka:
- Zjišťuje jak moc je vytočena plynová rukojeť; změřenou informaci převádí na žádanou hodnotu rychlosti (interval žádosti je 0 až 100 %),
  - Měří úhel natočení řídítek,
  - Z žádané rychlosti a z natočení řídítek vypočítává žádané hodnoty otáček, které odesílá po sériové lince do řídicí jednotky,
  - Zjišťuje, zda nedošlo ke stisknutí tlačítka pro změnu směru jízdy,
  - Zjišťuje, zda nedošlo ke stisknutí tlačítka určeného pro volbu typu regulace,
  - Zajišťuje sestavení datové zprávy na základě navolených parametrů.

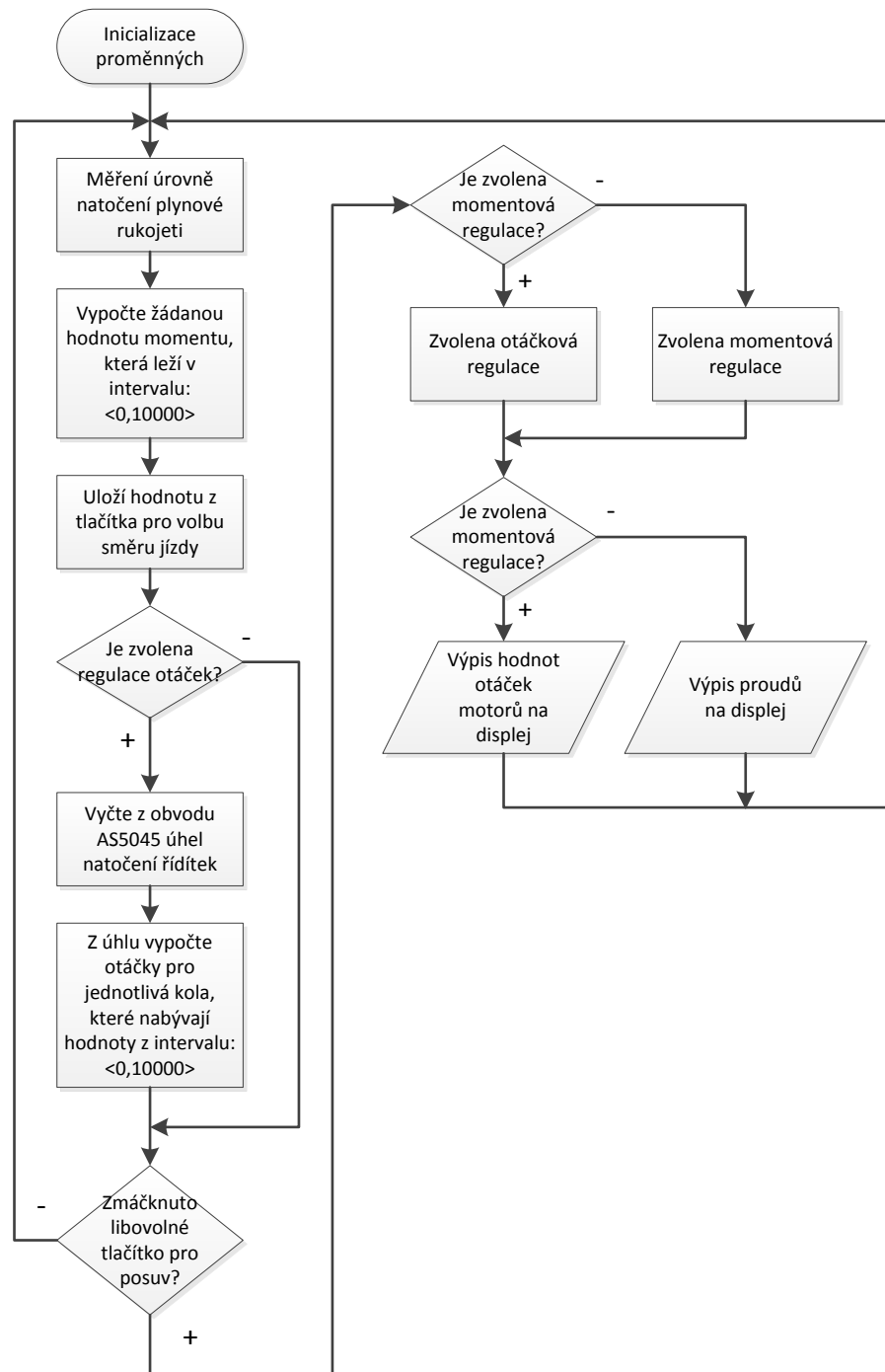
### **6.1.1 Způsob implementace softwaru pro pomocnou mikrokontrolérovou jednotku**

Činnost každého mikrořadiče je založena na vykonávání programu, který běží v nekonečné smyčce. Jinak tomu není ani u MCU jednotek experimentálního vozidla. Algoritmus softwarového jádra pomocné jednotky je zobrazen na obrázku č. 6.1.

Po startu mikrokontroléru probíhá inicializace, všechny I/O porty, registry, proměnné jsou nastaveny na své prvotní hodnoty. V tomto případě lze inicializaci shrnout pomocí následujících bodů:

- Nastavena frekvence časovače,
- Nastavena rychlost sériové komunikace,
- Inicializace displeje,
- Nastavena vzorkovací frekvence a režim interního 10bitového A/D převodníku,

- Nastavení portů pro připojení tlačítek; porty jsou nastaveny jako vstupní,



Obr. 6.1- Softwarové jádro pomocné mikrokontrolérové jednotky

Dále program pokračuje měřením úrovně natočení plynové rukojeti. To se provádí pomocí interního A/D převodníku. Signál z plynové rukojeti má lineární charakter a je přiveden na pin PF0 mikrokontroléru. Při nulovém natočení plynové rukojeti se na signálovém vodiči objeví napětí jeden volt. Naopak při plném vytočení plynové rukojeti se na vodiči objeví napětí rovné hodnotě 4 V. Napětí z plynové rukojeti je vedeno do A/D

převodníku, který zajistí jeho digitalizaci. Po získání desetibitové číselné hodnoty dojde k výpočtu, jehož výsledkem je procentuální hodnota natočení rukojeti. Jedná se vlastně o procentuální hodnotu žádané veličiny, tedy momentu, nebo otáček. Jelikož procesor neumí počítat s desetinnými čísly, tak je procentuální hodnota vynásobena 100, čímž se stanoví přesnost čísla na setiny. Ostatně tímto způsobem jsou převáděna všechna čísla potřebná pro regulační výpočty. Mohlo by se totiž stát, že například při dělení se přesnost výsledného čísla zmenší, což by bylo problematické pro další výpočty.

Hodnotu z tlačítka pro volbu směru jízdy snímá pomocná jednotka na pinu PE3. Směr jízdy, reprezentovaný logickou jedničkou v případě jízdy vpřed a logickou nulovou při jízdě vzad, se následně uloží do příslušné proměnné v operační paměti RAM mikrokontroléru.

Nyní se běh programu zakresleného pomocí vývojového diagramu na obrázku č. 6.1 dostává do úseku, kde je třeba rozhodnout o tom, zda bude dále pohon řízen otáčkovým, nebo momentovým regulátorem. Pokud je tlačítkem pro posuv v menu pomocné jednotky navoleno, že bude řízení probíhat momentovou regulací, tak program přeskočí úsek vyčítání úhlu natočení řídítek z obvodu AS5045. Po zapnutí celé technologie je v programu implicitně nastavena taková hodnota, že program začne vykonávat momentovou regulaci.

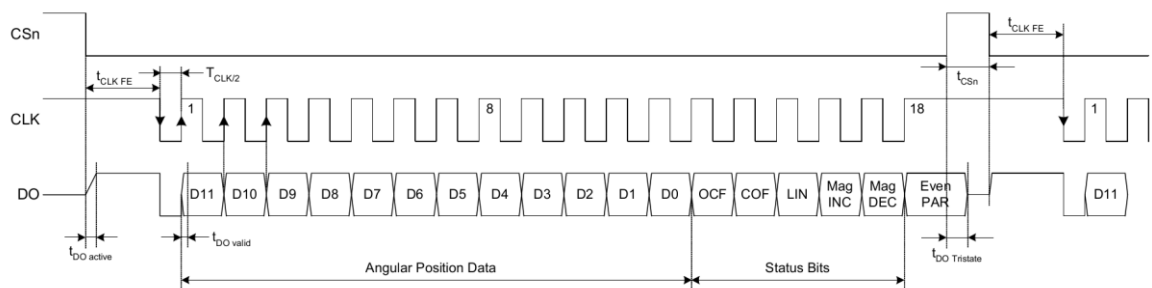
Při požadavku na regulaci otáček program postupuje do bloku, kde se provádí měření natočení řídítek. Princip samotného snímání byl nastíněn v kapitole č. 3.6.2. Co se týče komunikace s obvodem AS5045, tak ta probíhá pomocí linky SSI. Přesně tímto typem sběrnice není mikrokontrolér ATMEGA128 vybaven, proto byly možnosti komunikace s obvodem vyzkoušeny na přípravku k tomu účelu zkonstruovanému. Z testů vyplynulo, že lze s přípravkem komunikovat prostřednictvím metody „Bit banging“. Jedná se o metodu, pomocí níž lze na výstupech mikrokontroléru napodobit hardwarově akcelerovaný přenos dat. Nevýhodou této metody je, že nelze uplatnit priorit přerušování z důvodu absence již zmiňované hardwarové podpory. Jelikož MCU pomocné jednotky není tolik vytížen, tak je nakonec možno této metody využít. Integrovaný obvod komunikuje s mikrokontrolérem ATMEGA128 prostřednictvím portu B. Pro komunikaci potřebuje obvod AS5048 čtveřici vodičů, jmenovitě se jedná o vodič Data in (DI), Data out (DO), Chip select (CS) a Clock (CLK). Jak již z názvu jistě vyplývá, tak vodič DI se využívá pro programování čipu, vodič DO je využit pro přenos vystupujících dat z integrovaného obvodu, vodičem CLK se pak taktuje komunikace. Úhel natočení obvod poskytuje též ve formě PWM modulovaného signálu, jehož nevýhodou ovšem je, že se musí zavést do jednotky input capturer mikrokontroléru, pomocí níž by došlo

k přesnému odvození střídavého signálu. Následně by musela být střída převedena na číselný údaj vhodný pro regulaci. Pokud ovšem pomineme samotný přepočít, tak do hry vstupuje fakt, že změření střídavého je zatíženo určitou chybou, další chybou je pak zatížena i produkce střídavého PWM samotným DSP procesorem, jenž je nedílnou součástí obvodu AS5048. Z tohoto důvodu se signálu PWM nevyužívá, i když je do MCU přiveden.

Pomocí programovacího vstupu DI integrovaného obvodu AS5045 lze do jeho registrů zapsat následující parametry:

- Inkrementace úhlu, kde lze nastavit:
  - Po směru hodinových ručiček,
  - Proti směru hodinových ručiček,
- Nulování pozice - 12bitové číslo,
- Blokové PWM výstupu – zapnuto/vypnuto,
- Upozornění při vychýlení magnetu – zapnuto/vypnuto,
- Frekvence PWM je rovna buď 122 Hz, nebo 244 Hz.

Hodnoty reprezentující absolutní úhel natočení magnetu nad povrchem obvodu mají 12bitový rozměr. Průběh komunikace mikrokontroléru s IO AS5045 je uveden na obrázku č. 6.2.



Obr. 6.2 - Komunikační protokol mezi MCU a obvodem AS5045

Na obrázku č. 6.2 jsou vidět průběhy signálů na jednotlivých pinech během komunikace. Obvod AS5045 se připraví ke komunikaci nahozením pinu DO do logické jedničky po shoení signálu CSn do logické nuly. Následně musí být dodržen minimální čas potřebný pro přípravu dat k odeslání. Dále se začíná komunikovat na vzestupnou hranu hodinového signálu, po jejímž náběhu obvod vystaví data na pinu DO. Data jsou platná při sestupné hraně hodinového signálu. Takto je postupně vystaveno 18 datových bitů na sběrnici. Hodinový signál se po přijetí všech dat přepne do logické jedničky, ve které setrvá až do další

komunikace. Před započítím další komunikace však musí být na datasheetem [9] stanovenou dobu nastaven signál CSn do logické jedničky. Datová zpráva obsahuje následující bity:

- D11:D0 – absolutní hodnota úhlu,
- OCF - logická jednička označuje ukončení kompenzace offsetu,
- COF – logickou jedničkou je indikováno vychýlení magnetu z některé osy,
- LIN – logickou jedničkou je indikována kritická hodnota linearity magnetického pole, což se děje v případě, kdy je magnet nadměrně vzdálen od povrchu čipu,
- Even Parity – hodnota bitu vypovídá o neporušenosti zprávy.

Pro další blok ve vývojovém diagramu je však z výše uvedeného výčtu nezbytná pouze hodnota vypovídající o úhlu natočení řídítek, tedy absolutní hodnota úhlu. Tato hodnota je společně s hodnotou pojednávající o natočení řídítek dosazena do níže uvedených vztahů, které jsou upravenými vztahy (40) a (41).

$$\omega_{levé} = \omega_{kola} \cdot \left( 1 + \frac{d_v \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2 \cdot L_v} \right) \quad (53)$$

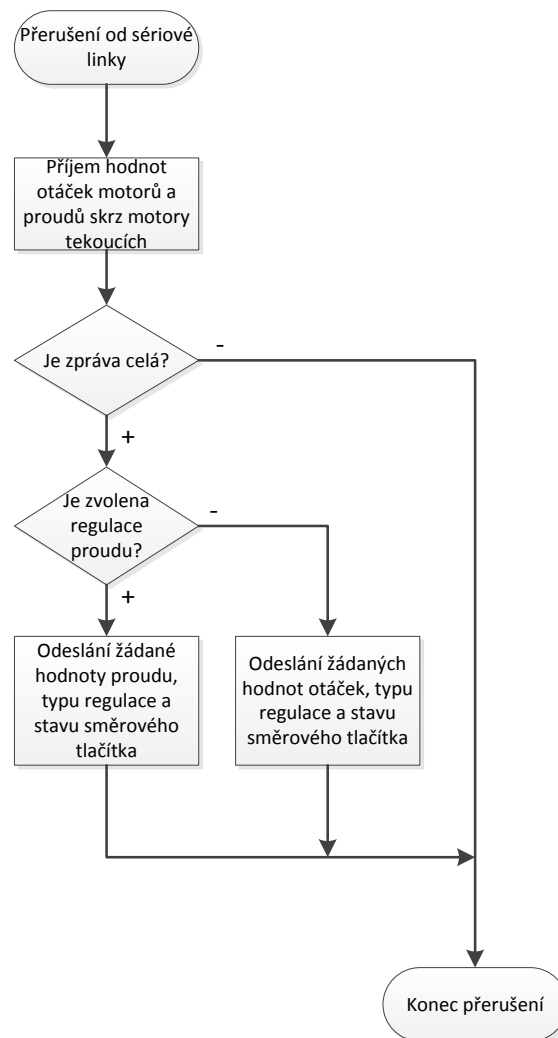
$$\omega_{pravé} = \omega_{kola} \cdot \left( 1 - \frac{d_v \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2 \cdot L_v} \right) \quad (54)$$

Po vypočtení otáček jednotlivých kol se samozřejmě musí výsledek přizpůsobit žádané hodnotě otáček. V konečném důsledku to znamená, že žádaná hodnota se musí pohybovat v intervalu od 0 do 10000, což je interval procentuální hodnoty s přesností na setiny procenta. Pro výpočet otáček jednotlivých kol by bylo možno použít i vyhledávací tabulku, tzv. „Lookup table“, kde by se nacházely s určitým odstupem hodnoty úhlu natočení a k nim ekvivalentní hodnoty otáček kol. Toto řešení by urychlilo činnost počítače, neboť by se nemusel provádět tolik výpočetně náročný tangens. Ten se totiž ve výpočetní technice nahrazuje Taylorovým rozvojem do mocninné řady. Zde platí úměra, čím větší přesnosti je zapotřebí, tak tím náročnější výpočet se musí provést.

Dále se v nekonečné smyčce zjišťuje, zda uživatel nestisknul některé z tlačítek určených pro posun v menu pomocné jednotky. Pokud dojde k zjištění, že uživatel dané tlačítko stisknul, tak se zvolí typ regulace. Pokud byla minule vybrána momentová regulace, tak od této chvíle bude pohon regulován na žádané otáčky a naopak.

### 6.1.2 Přerušeni od sériové linky

V přerušeni od sériové linky je realizován komunikační protokol mezi řídicí jednotkou a pomocnou mikrokontrolérovou jednotkou. Komunikaci jako takovou iniciuje řídicí jednotka tím, že odešle data do pomocné jednotky. Jakmile je zpráva doručena celá, tak pomocná jednotka odešle nazpět data dle zvoleného typu regulace. To znamená, že se zpráva skládá z údaje o poloze směrového tlačítka, dále pak z údaje o typu zvolené regulace a hlavně z žádané hodnoty odpovídající zvolené regulaci. Na níže uvedeném obrázku č. 6.3 je schematicky znázorněn průběh přerušeni.



Obr. 6.3- Přerušeni od sériové linky v pomocné mikrokontrolérové jednotce

## 6.2 Algoritmy pro řídicí mikrokontrolérovou jednotku

Sada dále rozebíraných algoritmů tvoří nejvýznamnější část z mnou navržených softwarových subsystémů, které jsou schopny mezi sebou komunikovat a tím pádem ovládat vozidlo prostřednictvím instalovaného hardwaru. Popisované algoritmy jsou totiž určeny pro řídicí



jednotku pohonu, která má na starost jednak eliminovat poruchy vzniklé během provozu výběhem vozidla, a potom hlavně zabezpečovat provoz, to znamená, regulovat pohon vozidla. Pro úspěšnou regulaci však jednotka potřebuje podpůrná data periodicky získávat z pomocné mikrokontrolérové jednotky umístěné na řídicích vozidla a potom také z BMS systému, s čímž program samozřejmě počítá. To však k regulaci nestačí, proto si další veličiny, například proudy a otáčky motorů, musí zajistit řídicí jednotka sama měřením. Dále jsou postupně popsány jednotlivé pochody, jež v řídicí jednotce probíhají.

### **6.2.1 Způsob implementace softwaru pro řídicí jednotku pohonu**

Běh programu v mikrokontroléru pomocné jednotky je jistě patrný z obrázku č. 6.4, který je z důvodů svých rozměrů umístěn na konci kapitoly. Program začíná na pozici inicializace, což pro MCU znamená, že musí definovat veškeré porty, periferie a proměnné, přesně tak, jako tomu bylo u pomocné jednotky. Inicializace tohoto konkrétního mikrokontroléru se dá shrnout do následujících bodů:

- Nastaveny frekvence časovačů,
- Nastavena rychlost sériové komunikace,
- Nastavena vzorkovací frekvence a režim interního 10bitového A/D převodníku,
- Nastavení portů pro ovládání kontrolních relé; porty jsou nastaveny jako výstupní,
- Nastavení portů pro ovládání měniče; porty jsou nastaveny jako výstupní.

Při inicializaci se dále provede prvotní nastavení měniče tak, aby byly jasně definovány napěťové úrovně na pinech DIS budiče HIP4081 fy Intersil [8]. Pokud je na těchto pinech logická jednička, tak je budič zablokovan, tudíž je na jeho sekundárních výstupech vedoucích na elektrody GATE jednotlivých tranzistorů nulové napětí, které je vztažené k elektrodě SOURCE daného tranzistoru. Pokud je tedy mezi zmíněnými elektrodami vždy nula voltů, tak je měnič uzavřen a je možno na něj přivést provozní napětí.

Po inicializaci řídicí jednotka prostřednictvím sériové linky vyžaduje souhlas k jízdě od jednotky BMS, která jej vydá, pokud nebude zjištěno podpětí na některém z článků či nadměrná provozní teplota u některého z článků baterie. V případě, že je souhlas k jízdě vydán, řídicí jednotka připojí napětí na trakční měnič pomocí hlavního trakčního relé KA1, jež je zakresleno ve schématu na obr. č. 3.3. Jestliže souhlas po inicializaci řídicí jednotka neobdrží, tak nedojde k připojení trakčního relé. Pokud dojde ke ztrátě souhlasu během jízdy, tak nejprve dojde k uzavření měniče a až následně k odpadnutí trakčního relé. Vozidlo se poté

dostává do fáze výběhu. Tato sekvence je vymyšlena z důvodu, aby nedocházelo ke zbytečnému opotřebení trakčního relé. Samozřejmě, pokud BMS či řídicí jednotka zjistí nadproud, tak relé odpojí svou přímou vazbou na něj dle obr. 3.3.

Dalším blokem v chronologii algoritmu je rozhodný úsek, který řeší, zda je zvolena regulace momentů nebo otáček motorů. Pokud je zvolena regulace momentů, tak řídicí jednotka odesílá prostřednictvím sériové komunikace zprávu pomocné MCU jednotce. Obsahem zprávy jsou hodnoty proudů tekoucích skrz motory. Naopak, jestliže je zvolena regulace otáčková, tak jsou odesílány do pomocné MCU jednotky hodnoty otáček jednotlivých motorů.

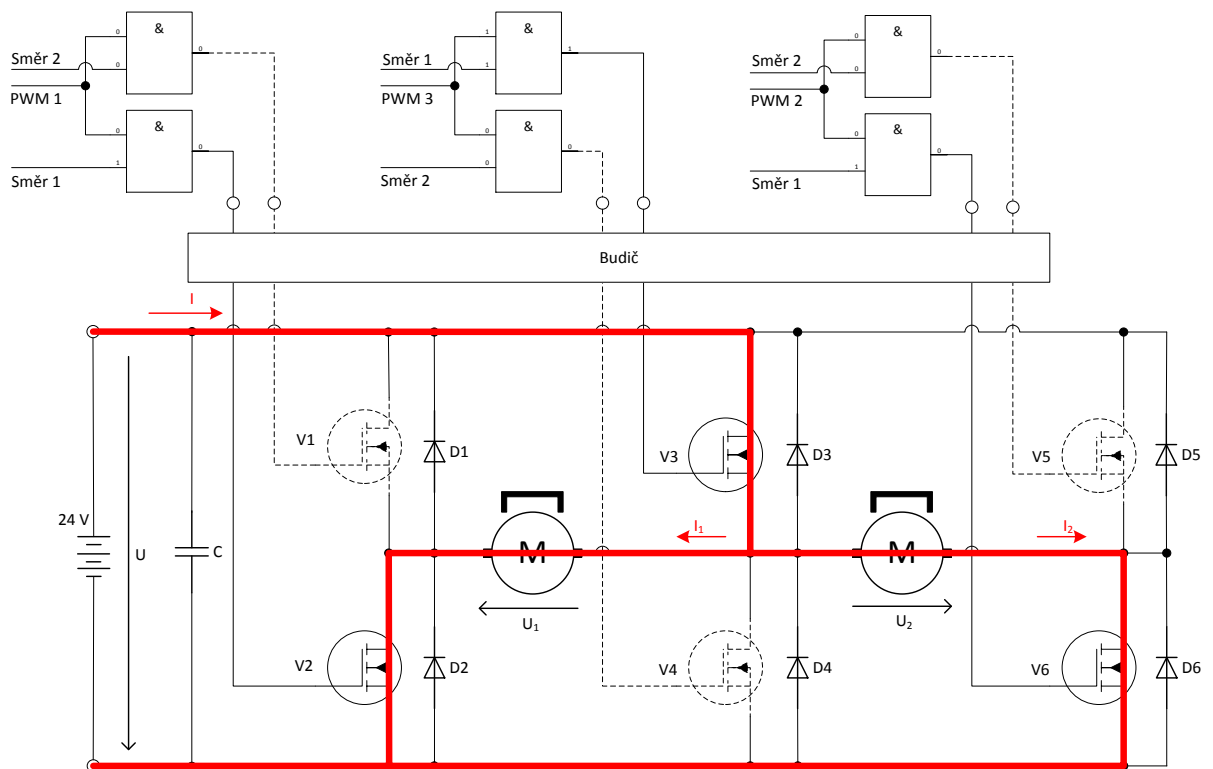
V následujícím bloku řídicí jednotka čeká na přijetí odpovědi. Pokud odpověď přijata není do předem stanoveného času, který je kontrolován v přerušení na obrázku č. 6.7, tak se vozidlo dostane do fáze výběhu. Stejně jako v případě neobdržení souhlasu k jízdě od systém BMS se vynulují regulační proměnné, měnič se uzavře.

Pokud zpráva přijde celá, tak se z ní vyčtou jednotlivé proměnné pro regulaci, to se děje v bloku s názvem Zpracování přijatých dat.

Po vyčtení proměnných se program ubírá k dalšímu rozhodovacímu bloku, který řeší, zda je vyhodnocena nulová rychlost. Pokud nulová rychlost skutečně vyhodnocena je, tak program pokračuje uzavřením měniče a nulováním regulačních proměnných, na což dále navazuje případná možnost změnit směr či typ regulace. Jestliže však nulová rychlost vyhodnocena není, tak program přeskočí úsek s volbami a bezostyšně se dále provádí regulace pohonu, pokud však uživatel za jízdy ne zvolil typ regulace, pak vozidlo přechází do výběhu, protože přijímaná data se stanou nekonzistentními.

Než budou popsány regulační algoritmy, takže je potřeba se ještě zastavit v části kódu, kde dochází ke změně směru jízdy. Změnu směru jízdy iniciuje uživatel stisknutím tlačítka k tomuto úkonu určenému, jež se nachází na říditkách vozidla. Po stisknutí tlačítka se informace zpracuje pomocnou MCU jednotkou nacházející se rovněž na říditkách. Pomocná jednotka stav tlačítka zahrne do zprávy, kterou na žádost posílá do řídicí jednotky. Po příchodu zprávy, řídicí jednotka zprávu zpracuje a konkrétně stav tlačítka uloží do předem určené proměnné. Jak již bylo řečeno, tak se směr jízdy změní jen v případě, kdy je rychlost jízdy nulová. I když je rychlost jízdy nulová, tak je třeba měnič uzavřít z hlediska možného

průchodu proud, pak teprve může dojít k rekonfiguraci měniče. Pokud je uživatelem nastaven například směr jízdy vpřed, tak se měnič dostane do konfigurace uvedené na obrázku č. 6.4.



Obr. 6.4 - Konfigurace měniče při jízdě vpřed

Z výše uvedeného obrázku je jistě zřejmé to, že pokud je zvolena jízda vpřed, tak musí řídicí jednotka vystavit logickou jedničku na vodič SMĚR 1, tento je fyzicky připojen na port PB5 mikrokontroléru. Tímto způsobem jsou zpřístupněny signály k tranzistorům V2, V3 a V6. V režimu jízdy je tranzistor V3 trvale sepnut. PWM signál je přiveden pouze na tranzistory V2 a V6. Všechny tři PWM signály uvedené na obrázku jsou generovány jednotkou Output Compare, konkrétně jsou použity výstupy OC3 časovače T3. Programově je jednotka nastavena tak, aby generovala 10kilohertzovou PWM. Ke změně směru jízdy dojde v případě, že se otočí napětí na kotvě motorů, což se provede blokací tranzistorů V2, V3, V6 a zpřístupněním tranzistorů V1, V4, V5, opět pomocí signálů na vodičích směr.

Na volbu směru jízdy navazuje ta část programu, ve které se řeší typ regulace pohonu. O tom, jak bude vozidlo regulováno, se rozhodne dle přijaté zprávy z pomocné jednotky. Následně dojde k odblokování měniče, respektive PWM signálů, které otvírají tranzistory.

Dále se v programu kontroluje hodnota proudu odebíraného z baterie, kterou sleduje a řídicí jednotce zprostředkovává BMS systém prostřednictvím sériové komunikace. Pokud

dojde k vyhodnocení nadproudu, tak měnič pozbuje své regulační funkce a uzavře se. Vozidlo se tímto způsobem dostane do výběhu. Nestandardní stav se uživateli dá na zřetel blikáním kontrolní LED diody, jež je umístěna na desce řídicí jednotky. Odblokovat měnič bude možno až po ověření funkčnosti systému a zresetování mikrokontroléru.

Pokud uživatel během jízdy změní typ regulace, řídicí jednotka zajistí výběh vozidla, neboť dojde ke změně vysílaných žádaných hodnot pomocnou jednotkou. Špatná data přicházející po sériové komunikaci by zapříčinila selhání regulační struktury, proto vozidlo musí přejít do fáze výběhu, po které může pokračovat v jízdě s druhým typem regulace.

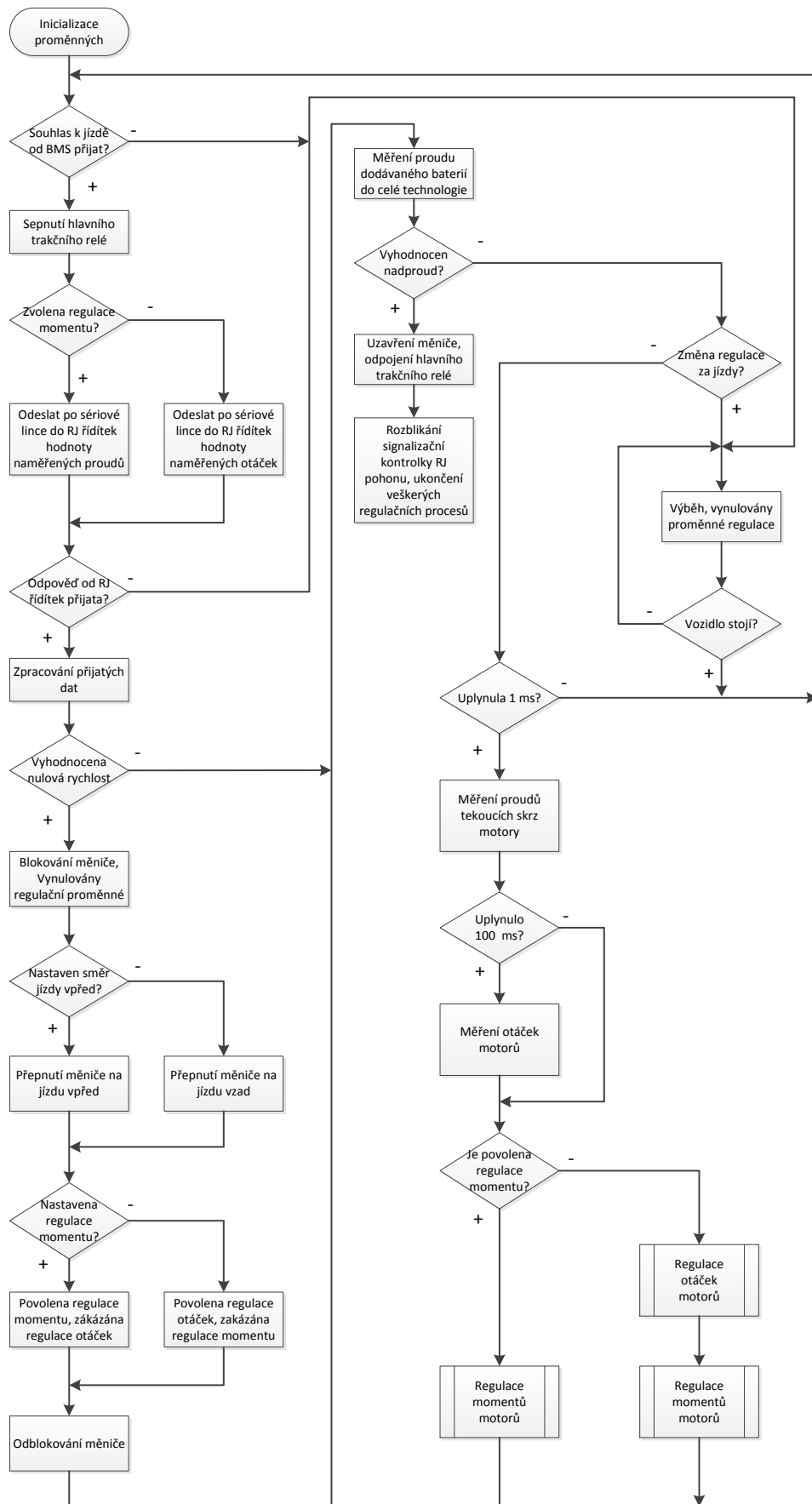
Jak je dále z obrázku č. 6.5 patrné, tak je regulace pohonu navržena tak, aby se prováděla jednou za 1 ms. Tento čas byl zvolen na základě parametrů regulované soustavy, respektive elektrické časové konstanty motoru, která se dá vypočítat dle vzorce (55), do něhož jsou níže rovnou dosazeny hodnoty indukčnosti a odporu kotvy dle tabulky č. 1.1.

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0,15 \cdot 10^{-3}}{45 \cdot 10^{-3}} = 3,3 \text{ ms} \quad (55)$$

Ze vztahu vyplývá, že při skoku svorkového napětí motoru se proud ustálí na nové hodnotě právě za dobu 3,3 ms. Pro včasnou detekci nadproudu je tedy dobré regulovanou veličinu, proud, pokud možno měřit častěji. V případě našeho elektromobilu elektrická časová konstanta dokonce nabývá ještě vyšší hodnoty, v obvodu kotvy se totiž vyskytuje další větší indukčnost ve formě vyhlazovací cívky. Samotné měření proudu se odehrává v interním 10bitovém AD převodníku MCU. První polovina rozsahu převodníku odpovídá zápornému naměřenému proudu, druhá pak kladnému proudu. Tento proud je převeden na procentuální hodnotu proudu, aby mohl být později porovnán v regulátoru s proudem žádaným.

Vzorkování otáček se provádí po 100 ms, aby byla zachována dobrá dynamika regulace. Samotné měření se odehrává v čítači T1 pro motor M1, respektive v čítači T2 pro motor M2. Načítaná hodnota se ukládá do osmibitové proměnné a po uplynutí doby 100 ms dojde k vypočtení otáček jednotlivých motorů na základě načítaných pulzů.

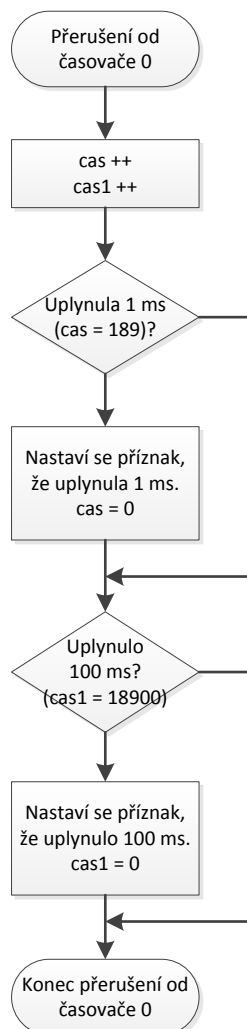
Navazující bloky zabezpečují regulaci v souladu s kapitolou č. 5, kde došlo k podrobnému rozboru problematiky.



Obr. 6.5- Softwarové jádro řídicí jednotky

### 6.2.2 Přerušení od časovače T0

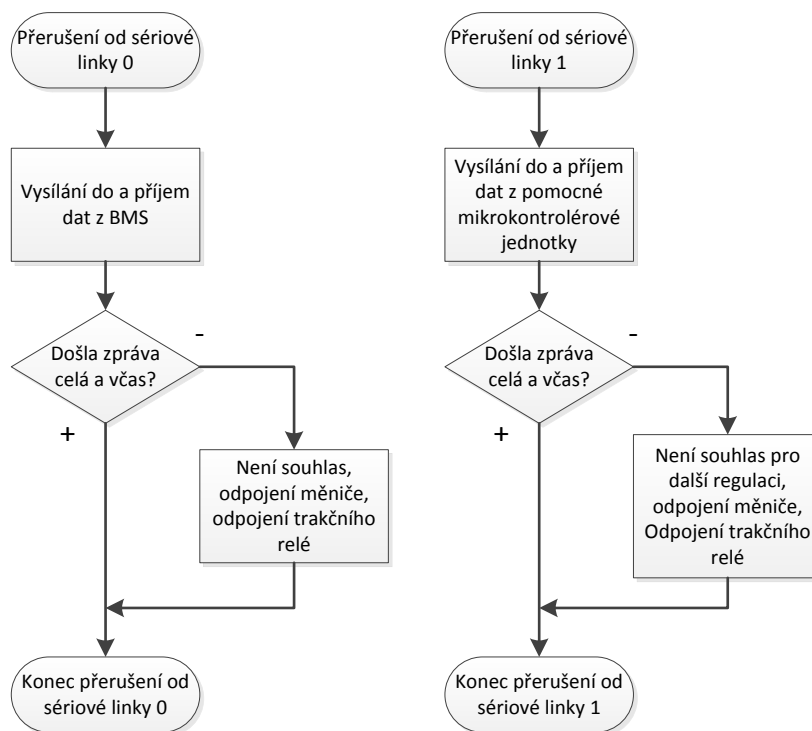
Časovač T0 slouží pro přesné definování dob souvisejících s regulací pohonu. Frekvence tohoto časovače je při inicializaci nastavena na hodnotu 187500 Hz, což odpovídá periodě 5,3  $\mu$ s. Aby mikrokontrolér určil periodu 1 ms, musí v každém novém přerušení inkrementovat určitou proměnnou, konkrétně v obrázku č. 6.6 označenou jako *cas*, potažmo *cas1*. Do jedné milisekundy se vejde perioda časovače 189krát, tudíž po dosažení této hodnoty právě uplynula 1 ms a program může nastavit příznak dokumentující tuto skutečnost. Výše uvedený postup platí analogicky pro dobu 100 ms, zde se příznak nastaví po dosažení hodnoty 18900, která je inkrementována v proměnné *cas1*.



Obr. 6.6 - Přerušení od časovače T0

### 6.2.3 Přerušování od sériových linek

Pomocí tohoto přerušování se jednak realizuje komunikační protokol mezi řídicí jednotkou a pomocnou MCU jednotkou, pak také mezi řídicí jednotkou a systémem BMS. Zvolený mikrokontrolér má dvě sériové linky, tudíž řídicí jednotka komunikuje s podřízenými jednotkami bez nutnosti komunikaci například přepínat. Řídicí jednotka komunikaci vždy iniciuje, pošle zprávu podřízené jednotce. Po odeslání zprávy řídicí jednotka očekává odpověď. Pokud ji nedostane včas, to znamená před další regulační smyčkou, tak vozidlo přechází automaticky do výběhu, kdy se vypne měnič a odpadne trakční relé. Tato situace může nastat při ztrátě komunikace, jejíž příčinou může být například uvolnění některého ze signálových vodičů sběrnice RS232. Princip práce obou komunikačních linek je uveden níže na obrázku č. 6.7.



Obr. 6.7 - Průběh přerušování od sériové linky řídicí jednotky

### 6.3 Specifika komunikačního protokolu zavedeného mezi MCU jednotkami pohonu

Sériová linka aplikovaná do vozidla funguje dle standardu UART. Rychlost přenosu dat se předpokládá 19200 Bd. Dále se předpokládá osmibitový typ přenášeného základní rámce bez parity. Celková velikost zprávy pak bude 6 bajtů v případě vysílání pomocné jednotky, respektive 5 bajtů pro zprávy jdoucí z řídicí jednotky. Celistvost zprávy bude zajišťována

ukončovacím bajtem. Následuje podrobný popis zpráv posílaných prostřednictvím komunikačního protokolu.

### Zpráva zpětně odesílaná pomocnou mikrokontrolérovou jednotkou

#### a) V případě momentové regulace.

Č. bajtu	0	1	2	3	4	5
Obsah bajtu	Proud L	Proud H	0	0	Směr / typ regulace	Potvrzení odeslání celé zprávy

Kde je význam bajtů následující:

*Proud L* – spodních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující zadaný proud,

*Proud H* – horních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující zadaný proud,

*Směr / typ regulace* – bajt obsahuje čtyři bity s hodnotou reprezentující směr a čtyři bity s hodnotou reprezentující typ regulace. Například, pokud bude zvolena jízda vpřed, které odpovídá logická jednička, tak budou všechny čtyři bajty rovny logické jedničce. Několikanásobná redundance logické hodnoty se provádí z důvodu možnosti chybného vyhodnocení této části zprávy řídicí jednotkou. Po přijetí zprávy řídicí jednotka mezi sebou vzájemně porovná logické hodnoty a následně vyhodnotí správnou volbu. Stejně tomu je i u druhé části bajtu, která obsahuje typ regulace. Pokud by tato funkcionality nebyla zavedena, tak by se vozidlo mohlo zbytečně dostat do výběhu.

*Potvrzení odeslání zprávy* – jedná se o poslední bajt, který obsahuje ASCII hodnotu pro znak středníku. Tuto hodnotu řídicí jednotka očekává po obdržení 5. bajtu.

#### b) V případě otáčkové regulace.

Č. bajtu	0	1	2	3	4	5
Obsah bajtu	Otáčky 1 L	Otáčky 1 H	Otáčky 2 L	Otáčky 2 H	Směr / typ regulace	Potvrzení odeslání celé zprávy

Kde je význam bajtů následující:

*Otáčky 1 L* – spodních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující žádané otáčky 1. motoru,

*Otáčky 1 H* – horních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující žádané otáčky 1. motoru,

*Otáčky 2 L* – spodních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující žádané otáčky 2. motoru,

*Otáčky 2 H* – horních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující žádané otáčky 2. motoru,



Další bajty jsou shodné s předchozím typem zprávy.

### Zpráva vysílaná řídicí jednotkou pohonu

#### a) V případě momentové regulace.

Č. bajtu	0	1	2	3	4
<b>Obsah bajtu</b>	Proud M1 L	Proud M1 H	Proud M2 L	Proud M2 H	Potvrzení odeslání celé zprávy

Kde je význam bajtů následující:

*Proud M1 L* - spodních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující skutečný proud 1. motorem,

*Proud M1 H* - horních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující skutečný proud 1. motorem,

*Proud M2 L* - spodních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující skutečný proud 2. motorem,

*Proud M2 H* - horních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující skutečný proud 2. motorem.

#### a) V případě otáčkové regulace.

Č. bajtu	0	1	2	3	4
<b>Obsah bajtu</b>	Otáčky M1 L	Otáčky M1 H	Otáčky M2 L	Otáčky M2 H	Potvrzení odeslání celé zprávy

Kde je význam bajtů následující:

*Otáčky M1 L* - spodních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující skutečné otáčky 1. motorem,

*Otáčky M1 H* - horních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující skutečné otáčky 1. motorem,

*Otáčky M2 L* - spodních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující skutečné otáčky d 2. motorem,

*Otáčky M2 H* - horních 8 bitů z 16bitové proměnné reprezentující skutečné otáčky 2. Motorem.

## 7 POPIS IMPLEMENTACE SOFTWARE

Technologie pohonu obsahuje dvojici mikrokontrolérů typu ATMEGA128, které jsou firmou Atmel Corp. optimalizovány pro programování pomocí jazyka ANSI C. Programování v jazyku C je velice efektivní, neboť se značně zrychlí vývoj samotné aplikace a navíc se zvýší čitelnost kódu oproti programování v jazyce symbolických adres. K samotnému programování v rámci této práce bylo využito vývojového prostředí CodeVision, které v sobě obsahuje editor pro psaní kódu a kompilátor pro přeložení zdrojového kódu do souboru typu HEX, respektive souboru typu COFF. Soubor typu HEX v sobě obsahuje strojový kód, který se kopíruje do paměti programu mikrokontroléru. Soubor COFF se používá při ladění na úrovni kódu v debuggeru. Mezi další výhody vývojového prostředí CodeVision patří:

- podpora datových typů: bit, char, int, short, long, float,
- možnost vkládat assembler do zdrojového kódu psaného v jazyku C,
- možnost automatické optimalizace strojového kódu spočívající v:
  - odstranění přebytečného kódu,
  - optimalizaci výsledného kódu pro rychlost nebo velikost,
- vestavěný generátor kódu,
- vestavěný soubor knihoven, kterými je možno obsluhovat: vybrané znakové LCD displeje, vybraná teplotní čidla, protokol SPI a protokol 1 Wire Dallas.

Vývojové prostředí CodeVision ovšem neumí obsluhovat použitý programátor společnosti PK design, proto byl samotný strojový kód do mikrokontrolérů nahrán pomocí vývojového prostředí AVR Studio. Programování obou MCU probíhá prostřednictvím programovací a ladící periferie JTAG.

Z důvodu větší přehlednosti jsou oba zdrojové kódy rozčleněny do několika oddělených souborů typu C, které jsou však vzájemně propojeny prostřednictvím hlavičkových souborů. Zdrojový kód pro řídicí jednotku pohonu je rozdělen na následující soubory:

- oziv.c – jádro programu a inicializace,
- pomocAD.c – zpracování signálů AD převodníkem,
- pwm.c – příprava PWM kanálů,
- SerialCommASCII\_USART1.c [10] – realizace komunikačního protokolu po sériové lince č. 1

Zdrojový kód, jenž je vložen do pomocné MCU jednotky je složen z těchto souborů:

- ridOziv.c – jádro programu a inicializace,
- pomocAD.c – zpracování signálů AD převodníkem,
- SerialCommASCII\_USART1.c [10] – realizace komunikačního protokolu po sériové lince č. 1
- LCD1.c [10] – knihovný soubor pro ovládání LCD displeje.

Veškeré programové vybavení, které jsem pro technologii trojkolového vozidla vytvořil, je součástí přílohy.

## 8 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI ALGORITMŮ A TECHNOLOGIE JAKO CELKU

Ve druhém ročníkovém projektu jsem se zabýval návrhem a realizací elektronických komponent pro technologii vozidla. Před sestavením celé technologie byly jednotlivé prvky ověřeny z hlediska jejich samostatného fungování. To znamená, že do každé mikropočítačové jednotky byl nahrán program, pomocí kterého se zjistilo, zda je v pořádku obvod MCU a zda tento obvod reaguje na vnější podněty ve formě signálů z periferií jím obsluhovaných. Výkonový stupeň byl otestován z hlediska svých jmenovitých parametrů, stejně tak i soubor ochranných. Veškeré komponenty fungovaly velice dobře.

V další etapě došlo ke spojení komponent řídicí jednotky pohonu, výkonového stupně a motoru na laboratorním stole. Pro řídicí jednotku pohonu jsem vytvořil jednoduchý program, který jsem do ní následně vložil. Program převáděl napěťový signál z plynové rukojeti a vypočítával z něho poměrné otevření měniče, které se realizovalo pomocí mikrokontrolérem vytvářeného PWM signálu. Tímto způsobem bylo možno motor roztočit na jeho jmenovité otáčky. Již v této části ověřovacího procesu se dalo s motorem točit oběma směry. Tato etapa je v příloze dokumentována jednak fotografií zachycující měřící pracoviště, a potom také oscilogramy, na nichž je vyobrazen průběh signálu PWM a proud motorem.

Během třetí a z hardwarového hlediska poslední etapy došlo k instalaci vyrobené a odzkoušené elektrické výzbroje na vozidlo. V tuto chvíli byla mezi řídicí jednotkou pohonu a pomocnou jednotkou fyzicky zavedena sběrnice, ovšem zatím bez iniciované komunikace. Proto byla zprvu pomocná jednotka na říditkách vybavena softwarem, jenž se staral o snímání natočení plynové rukojeti a odesílání naměřené hodnoty do řídicí jednotky pohonu. Zároveň do řídicí jednotky byl nahrán software, který se staral o zpracování přijatých dat a o poměrné otevření měniče založené na přijatých datech. Ruční ovládání fungovalo velice správně, motory se točily dle zadání. Proto jsem do přenášené zprávy z řídicí jednotky naimplementoval volbu směru jízdy, která taktéž fungovala. Začal jsem tedy pracovat na zcela nové verzi software, verzi obsahující momentovou regulaci pohonu.

V kapitole č. 5 je objasněna navržená regulace momentů jednotlivých motorů. Při regulaci jednoho motoru se vždy vychází z proudu tekoucího skrz daný motor. Informace o proudu procházejícím motorem je vedena zpětnou vazbou do rozdílového členu, kde je na základě požadavku na proud vypočtena regulační odchylka, na niž dále reaguje regulátor. Samotné měření proudu není nikterak jednoduchou záležitostí, protože do měření vstupuje

šum. Pro jeho eliminaci je ideální měřenou hodnotu nějakým způsobem filtrovat, což jsem vyzkoušel. Zavedl jsem tedy do mikrokontroléru softwarovou filtraci ve formě průměru s exponenciálním zapomínáním. Jelikož je nastavena frekvence PWM na hodnotu 12 kHz, tak bylo třeba signál vzorkovat rychleji. Podařilo se nastavit čtyřnásobnou vzorkovací frekvenci, tedy 48 kHz. Změřený proud byl zatížen chybou na posledním místě desetibitového čísla, což je zanedbatelná chyba v řádech setin ampéru. Takto naměřený proud byl převeden na procenta, aby mohla být provedena regulační odchylka a následný výpočet regulace. Konstanty regulátoru byly experimentálně nastaveny na takové hodnoty, které odpovídaly nejlepšímu průběhu přechodové charakteristiky uzavřeného regulačního obvodu. Po těchto nastaveních se zdálo, že je vozidlo schopno jízdy, pročez bylo sneseno ze zkušebního stavu na zem. Na vozidle proběhla sada prvních jízdních zkoušek v rámci prostor fakulty. Zdálo se, že momentový diferenciál funguje bezvadně. Během jízdy však došlo k chybě na měniči a vozidlo se samovolně zastavilo vlivem přepálení pojistky v trakčním obvodu. Zároveň došlo k přepálení pojistky na desce ochran a tím pádem k odpojení napájení veškerých komponent instalovaných na trojkolové vozidlo.

Při následné diagnostice komponent bylo zjištěno, že odešla jedna větev tranzistorů v bezpotenciálovém modulu GWM120-0075X1fy IXYS. Chyba na tranzistorech dále vedla ke zničení budičů HIP4081 fy Intersil. Z nevysvětlitelných důvodů také prošel proud, pravděpodobně skrz zničený budič, do řídicí jednotky pohonu, kde došlo k odpaření zemního plošného spoje, čímž byla paralyzována ta část desky plošných spojů, která se stará o řízení pohonu a komunikaci po USB.

Plošný spoj v řídicí jednotce byl opraven a zprovozněn, nicméně k opravě zbylého zařízení nedošlo, neboť jednak nebyla uspokojivě detekována příčina zničení měniče, ale hlavně nejsou k dispozici součástky pro včasné znovu zprovoznění celé technologie a doladění softwaru.

Nicméně, další etapou práce by byla validace momentového diferenciálu. Nad tímto by se vystavěl deterministický otáčkový diferenciál v souladu s kapitolou č. 5 této práce. Závěrem by byla celková validace pohonu, včetně stanovení účinností veškerých komponent pohonu. Z hlediska nynějšího nedostatku času řešení výše zmíněné problematiky, ač nerad, přenechávám mému případnému následníkovi.

## 9 NÁMĚTY PRO POKRAČOVÁNÍ V OŽIVOVÁNÍ VOZIDLA

Ze všeho nejdříve by bylo nutno zjistit příčinu chyby vzniklé na měniči. Tato chyba ovšem nebyla jistě způsobena špatnou koncepcí výkonového stupně pohonu. Spíše se domnívám, že ke zničení tranzistorů a budičů mohlo dojít vlivem chyby při výrobě plošného spoje, případně vlivem přepětí způsobeného rychlou změnou trakčního proudu v čase. Zmíněné a další možné příčiny bude nutno prozkoumat a odstranit po obnovení funkce zařízení.

Dále je třeba se zabývat ověřením implementovaného softwaru, respektive jeho doplněním o deterministický otáčkový diferenciál. Po ověření funkce obou diferenciálů je možno provést měření účinností pohonu při různém zatížení, zejména pak ve jmenovitých provozních bodech vozidla, které byly stanoveny v kapitole č. 2.5.

V následující etapě bude možno vozidlo dovybavit systémem elektrodynamické brzdy, a to jak brzdou ztrátovou odporovou, tak brzdou rekuperační, se kterou je v hardwarové koncepci počítáno. Dále se předpokládá naprogramování rozhraní HMI<sup>3</sup>, které je realizovatelné přes ovládací pult na říditkách vozidla. Hardware je připraven pro zobrazování stavových veličin vozidla na instalovaném dvouřádkovém displeji. Čtveřici tlačítek, jež jsou umístěny rovněž na ovládacím pultě, je možno použít pro ovládání menu pomocné MCU jednotky. Pomocí těchto tlačítek může být dále vytvořena parametrizace celé technologie. Z ovládacího pultu je také vyveden USB port, kterého je možno využít jednak pro ladění SW, a také pro celkovou reparametrizaci vozidlového systému počítačem bez přímé změny SW. Ovládací panel je vybaven rovněž konektorem pro připojení SD paměťové karty, jíž může být využito například pro logování veličin regulace.

---

<sup>3</sup> HMI – Rozhraní člověk-stroj (z angl. Human machine interface)

## 10 ZÁVĚR

V diplomové práci jako celku se zabývám obšírnou problematikou pojednávající o návrhu, realizaci a validaci elektrické výzbroje pohonu studentského experimentálního elektromobilu. Jelikož je záběr diplomové práce skutečně široký, tak musela být z hlediska časového managementu rozdělena na tři etapy. V první etapě jsem se věnoval stanovení trakční charakteristiky na základě výpočtů jízdních odporů vozidla. Dále jsem se zde věnoval koncepčnímu návrhu měniče a predikoval jsem možnosti regulace dvojice instalovaných stejnosměrných motorů s permanentními magnety. Na základě trakčních výpočtů, respektive stanovené trakční charakteristiky a předpokladů pro regulaci, jsem se dále věnoval návrhu a realizaci výkonové části pohonu. Rovněž jsem navrhl a zrealizoval řídicí jednotku pohonu a pomocnou mikrokontrolérovou jednotku, která jednak dokáže sbírat podpůrná data pro regulaci pohonu a rovněž realizuje rozhraní mezi obsluhou a vozidlem. Obě jednotky jsem fyzicky propojil sériovou komunikační linkou RS232. Dále jsem navrhl a vytvořil podpůrnou elektroniku pro měření natočení řídítek, elektroniku pro měření otáček motorů inkrementálním způsobem a soubor reléových ochranných prvků pro větší bezpečnost jízdy vozidla. Jednotlivé součásti byly podrobeny testům, během nichž došlo k ověření jejich správné funkce z hlediska požadovaných jmenovitých hodnot.

Na výše uvedené skutečnosti navazují v diplomové práci témata neméně závažnými, rozebírám v nich totiž východiska pro regulaci pohonu. Konkrétně ve čtvrté kapitole se zabývám rozbohem možností pro regulaci elektronického diferenciálu vozidla. Zde docházím k závěru, že je možno zrealizovat dvojí provedení diferenciálu. Jednak momentového diferenciálu, kdy je u každého kola umístěného v ose zadní nápravy regulován točivý moment nezávisle, a potom deterministického diferenciálu, jehož funkce spočívá v deterministickém přiřazení otáček jednotlivým kolům. Momentový diferenciál se uplatní hlavně při jízdě vozidla do zatáčky, kdy je třeba zajistit různé otáčky kol, ale stejný záběrný moment na jednotlivých kolech. Deterministický diferenciál se uplatní v situaci, kdy jedno kolo přijde o adhezi, druhému kolu jsou pak vnuceny otáčky dle natočení předního kola zajišťujícího rejď vozidla.

Na základě rozboru elektronického diferenciálu se v páté kapitole věnuji návrhu regulačních struktur pro regulaci pohonu. Opět je zde rozebrán jak princip momentového, tak deterministicky definovaného diferenciálu. Momentový diferenciál je založen na zpětnovazební regulaci momentu. Otáčkový deterministický diferenciál je založen na

zpětnovazební regulaci otáček s podřízenou regulací proudu. V kapitole šesté se potom zabývám návrhem algoritmů, jež řeší ovládání vozidla, komunikační protokol mezi MCU jednotkami, bezpečnost jízdy vozidla a regulaci pohonu. Z hlediska bezpečnosti jízdy se při návrhu programového vybavení nejvíce zaměřuji na výpadek komunikace mezi mikrokontroléry během jízdy, respektive na přepnutí typu regulace či tlačítka směru za jízdy. Nechtěná volba může být vyhodnocena buď vlivem hardwarové poruchy, nebo skutečným povelům obsluhy. V každém případě vozidlo musí přejít do fáze výběhu, po němž teprve může být tato volba akceptována řídicí jednotkou pohonu.

Osmá kapitola pojednává o fázi ověření funkce vozidla jako celku. V této kapitole popisují průběh ožívování vozidla z hlediska postupné implementace software. Do řídicí jednotky pohonu byl implementován zpětnovazební regulátor ve smyslu kapitoly č. 5.3. Trojkolové vozidlo se s jistotou pohybovalo vpřed i vzad. Při průjezdu zatáčkou nedocházelo k vytlačování vozidla ze zatáčky ven, ale vozidlo projíždělo plynule, z čehož se dá usuzovat na funkční nezávislou regulaci záběrného momentu zadních kol. Úkol naimplementovat regulační algoritmus do pohonu vozidla byl tedy splněn. Během testovací jízdy však došlo k průrazu na dvojici tranzistorů měniče, příčinu tohoto jevu se nepodařilo doposud objektivně vysvětlit. Krom tranzistorů došlo také ke zničení budičů. V testech nebylo možno dál pokračovat, neboť zatím nejsou k dispozici náhradní součástky pro výkonový stupeň pohonu.

Poslední kapitola práce podává náměty na další vylepšování vozidla a rozšiřování jeho funkcionalit.



## 11 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LELEK, Tomáš. *Experimentální elektromobil - trakční výpočty a ideový návrh pohonu*. Pardubice, 2012. Ročníkový projekt I. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Ondřej Černý, Ph.D.
- [2] SADÍLEK, Ondřej. *Návrh koncepce bateriového systému experimentálního elektromobilu* [CD-ROM]. Pardubice, 2012 [cit. 2013-04-09]. Ročníkový projekt I. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Ondřej Černý, Ph.D.
- [3] LELEK, Tomáš. *Experimentální elektromobil – návrh elektroniky pohonu*. Pardubice, 2013. Ročníkový projekt II. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Ondřej Černý, Ph.D.
- [4] SADÍLEK, Ondřej. *Elektronický diferenciál pro studentský experimentální elektromobil, návrh nabíječe trakčních baterií*. Pardubice, 2013. Ročníkový projekt II. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Ondřej Černý, Ph.D.
- [5] *Tření*. Wikipedie [online]. 2012, 21. 5. 2012 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tření>
- [6] *Měření momentu setrvačnosti kola z jízdního kola*. 2008. Dostupné z: [http://gamow.wz.cz/docs/praktikum/1/moment\\_setrvačnosti\\_kola.doc](http://gamow.wz.cz/docs/praktikum/1/moment_setrvačnosti_kola.doc)
- [7] GWL POWER. *LFP040AH – WB-LYP40AHA*. 2013. Dostupné z: <http://www.i4wifi.cz/img.asp?attid=255154>
- [8] *INTERSIL. HIP4081: 80V/2.5A Peak, High Frequency Full Bridge FET Driver*. 2004, 16 s. Dostupné z: <http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/fn36/fn3659.pdf>
- [9] *AMS. AS5045 12 Bit Programmable Magnetic Rotary Encoder*. 2013, 33 s. Dostupné z: <http://www.ams.com/eng/content/download/1288/7223/496>
- [10] MAŠEK, Zdeněk. *Přednášky z předmětu Aplikace mikroprocesorů*. Pardubice: Univerzita Pardubice – Dopravní fakulta Jana Pernera, 2012.
- [11] *ATMEL CORP. ATMEGA128: 8-bit Atmel Microcontroller*. 2011, 379 s. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc2467.pdf>
- [12] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C: 1. díl*. 6. vyd. České Budějovice: Kopp, 2009. ISBN 978-80-7232-383-8.
- [13] BALÁTEĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 978-80-7300-148-3.

- [14] MOHAN, Ned. *First course on power electronics and drives*. Minneapolis: MNPERE, 2003. ISBN 0-9715292-2-1.
- [15] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří LETTL. *Výkonová elektronika*. ČVUT Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [16] LARMINIE, James a John LOWRY. *Electric Vehicle Technology Explained*. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2003. ISBN 0-470-85163-5.
- [17] LEUCHTER, Jan. UNIVERZITA OBRANY. *Výkonové polovodičové měniče* [pdf.] Brno, 2011, 106 s. [cit. 24. 5. 2012].
- [18] XYS CORP. *Three phase full bridge GWM120-0075X1*. 2011, 6 s. Dostupné z: <http://ixapps.ixys.com/DataSheet/GWM120-0075X1.pdf>
- [19] YU-LUNG, Ke et al. Energy Recovery Electric Bicycle with Two-Quadrant DC Motor Drivers. In: [online]. IEEE, 2009 [cit. 2012-05-31]. ISBN 978-1-4244-3475-6. ISSN 0197-2618. DOI: 10.1109/IAS.2009.5324928. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5324928&contentType=Conference+Publications&queryText%3Denergy+recovery+electric+bicycle>

## 12 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr.1.1- Původní podoba vozidla .....	12
Obr. 1.2 - Mechanické uspořádání elektrické výzbroje na experimentálním elektromobilu....	14
Obr. 2.1- Trakční charakteristika vozidla při jízdě do stoupání .....	24
Obr. 3.1- Blokové schéma experimentálního elektromobilu .....	27
Obr. 3.2- Funkční schéma obvodu HIP4081 .....	30
Obr. 3.3 – Funkční schéma souboru ochran. ....	34
Obr. 3.4- Umístění magnetu nad obvodem AS5045 .....	36
Obr. 3.5 - Signály z IRC snímače .....	37
Obr. 3.6 – Kotouč IRC snímače.....	38
Obr. 3.7 - Funkční schéma senzoru LA55-P .....	38
Obr. 4.1- Kuželový diferenciál. ....	41
Obr. 4.2 – Schématické znázornění experimentálního elektromobilu.....	42
Obr. 4.3- Závislost úhlové rychlosti kol na úhlu natočení řídicích páčků při rychlosti vozidla 10 km/h .....	45
Obr. 5.1 - Řízení v otevřené regulační smyčce .....	47
Obr. 5.2- Řízení v uzavřené regulační smyčce .....	48
Obr. 5.3- Náhradní schéma stejnosměrného motoru s permanentními magnety.....	49
Obr. 5.4- Schéma regulace momentového diferenciálu.....	52
Obr. 5.5 – Schéma regulace otáčkového deterministického diferenciálu.....	55
Obr. 6.1- Softwarové jádro pomocné mikrokontrolérové jednotky.....	59
Obr. 6.2 - Komunikační protokol mezi MCU a obvodem AS5045 .....	61
Obr. 6.3- Přerušení od sériové linky v pomocné mikrokontrolérové jednotce.....	63
Obr. 6.4 - Konfigurace měniče při jízdě vpřed .....	66
Obr. 6.5- Softwarové jádro řídicí jednotky .....	68
Obr. 6.6 - Přerušení od časovače T0 .....	69
Obr. 6.7 - Průběh přerušení od sériové linky řídicí jednotky .....	70
Tabulka 1.1 - Základní parametry vozidla, motoru a trakčních baterií .....	11
Tabulka 2.1 - Pracovní body vozidla .....	25

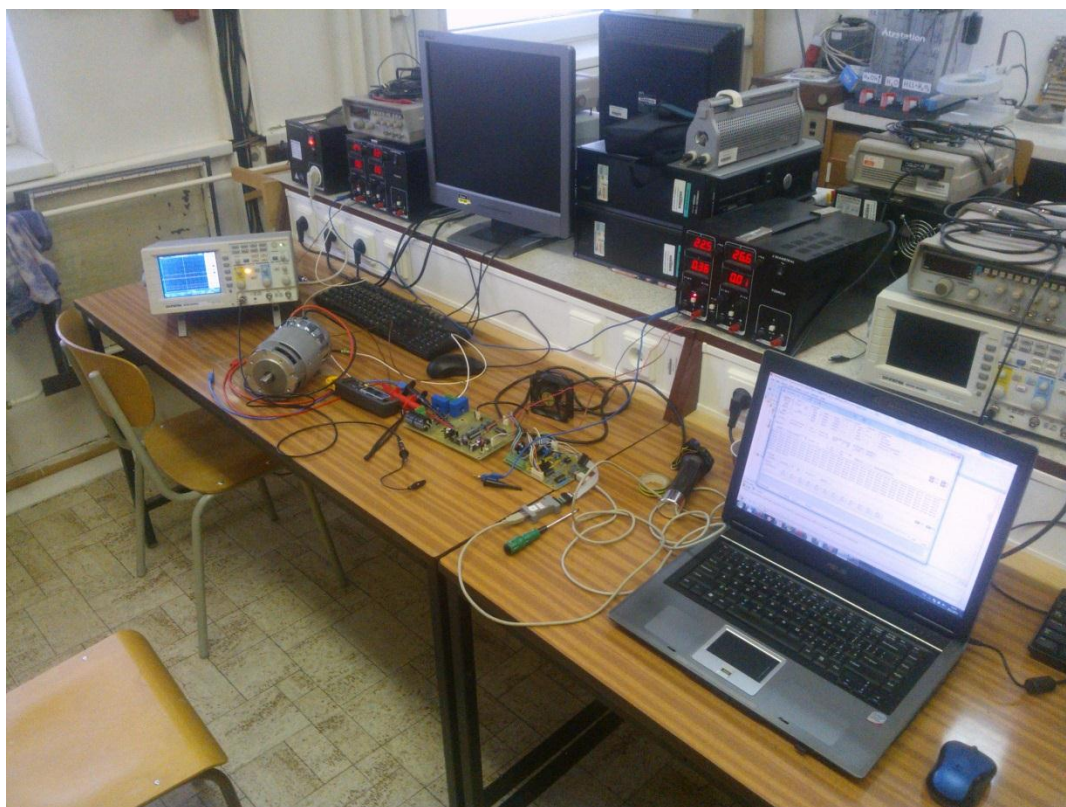
## 13 PŘÍLOHY

Příloha A <i>Ukázka měřicího pracoviště</i> .....	84
Příloha B <i>Ukázka vybraných naměřených průběhů</i> .....	85
Příloha C <i>Fotografie pořízené při komplexním oživování technologie</i> .....	86
Příloha D <i>Schéma zapojení pohonu experimentálního elektromobilu</i> .....	87
Příloha E <i>CD-ROM</i>	

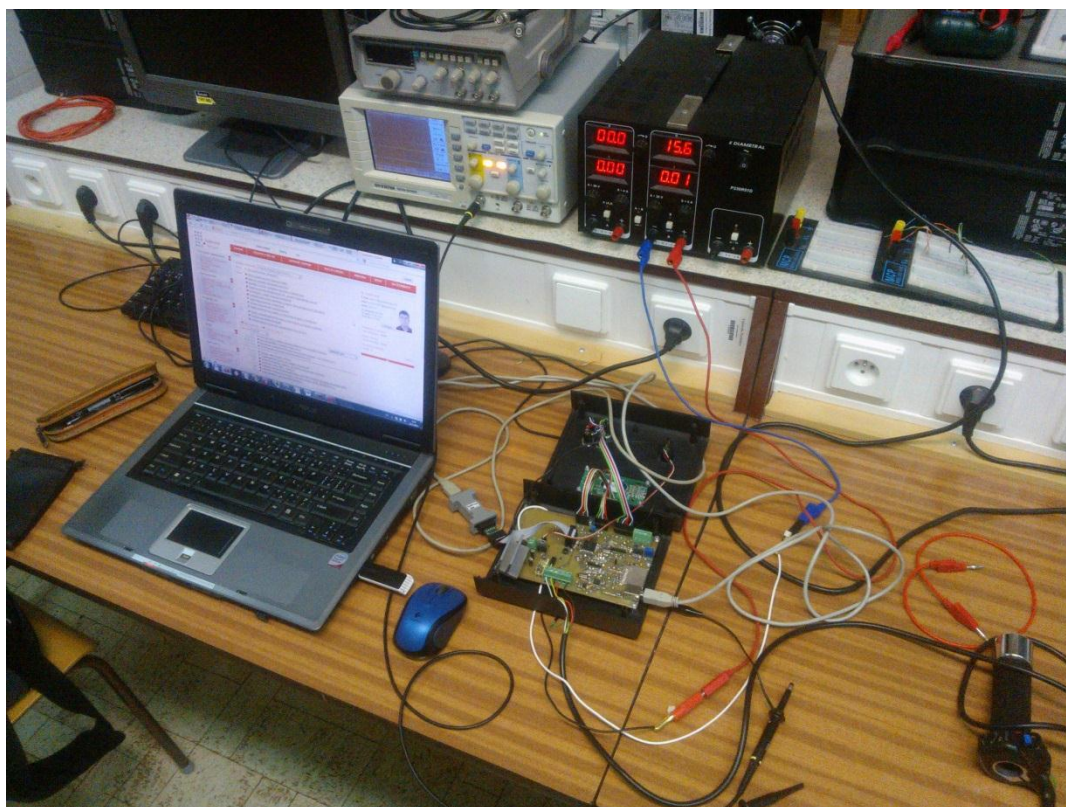
### *Obsah CD:*

- *Trakční výpočty*
- *Schéma zapojení experimentálního elektromobilu*
- *Layouty navržených desek plošných spojů*
- *Software pro MCU jednotky*
- *Software pro komunikaci s obvodem AS5045*

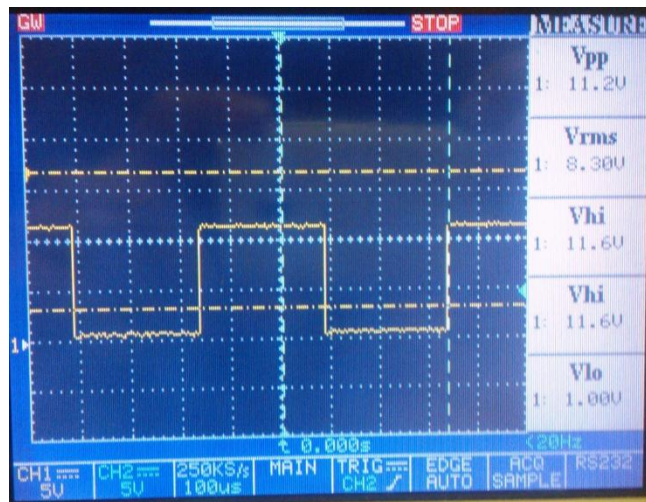
- Částečné oživení technologie – oživení řídicí jednotky pohonu



- Částečné oživení technologie – oživení pomocné MCU jednotky



- **Oscilogram s naměřeným průběhem na elektrodě G1**



**Legenda:**

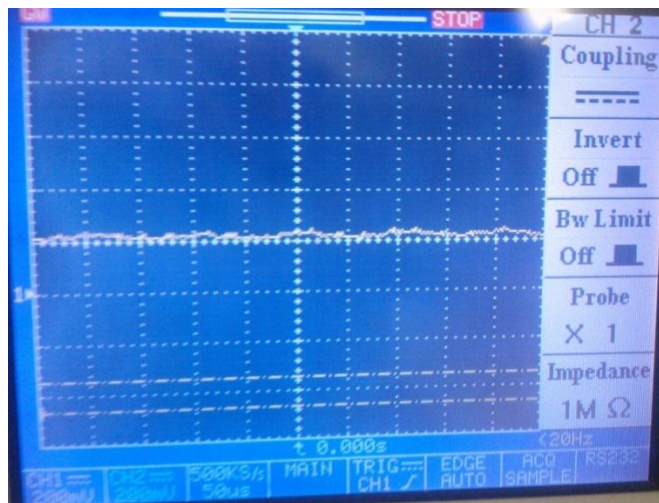
Časová základna nastavena na 100  $\mu$ s

CH1 [5V/dílek] – napětí na G1 tranzistoru T1 při frekvenci 2 kHz

**Komentář:**

Napětí na G1 dosahuje hodnoty 11,2 V, což naprosto stačí pro otevření daného tranzistoru.

- **Průběh proudu motorem, jenž je napájen výkonovým stupněm**



**Legenda:**

Časová základna nastavena na 50  $\mu$ s

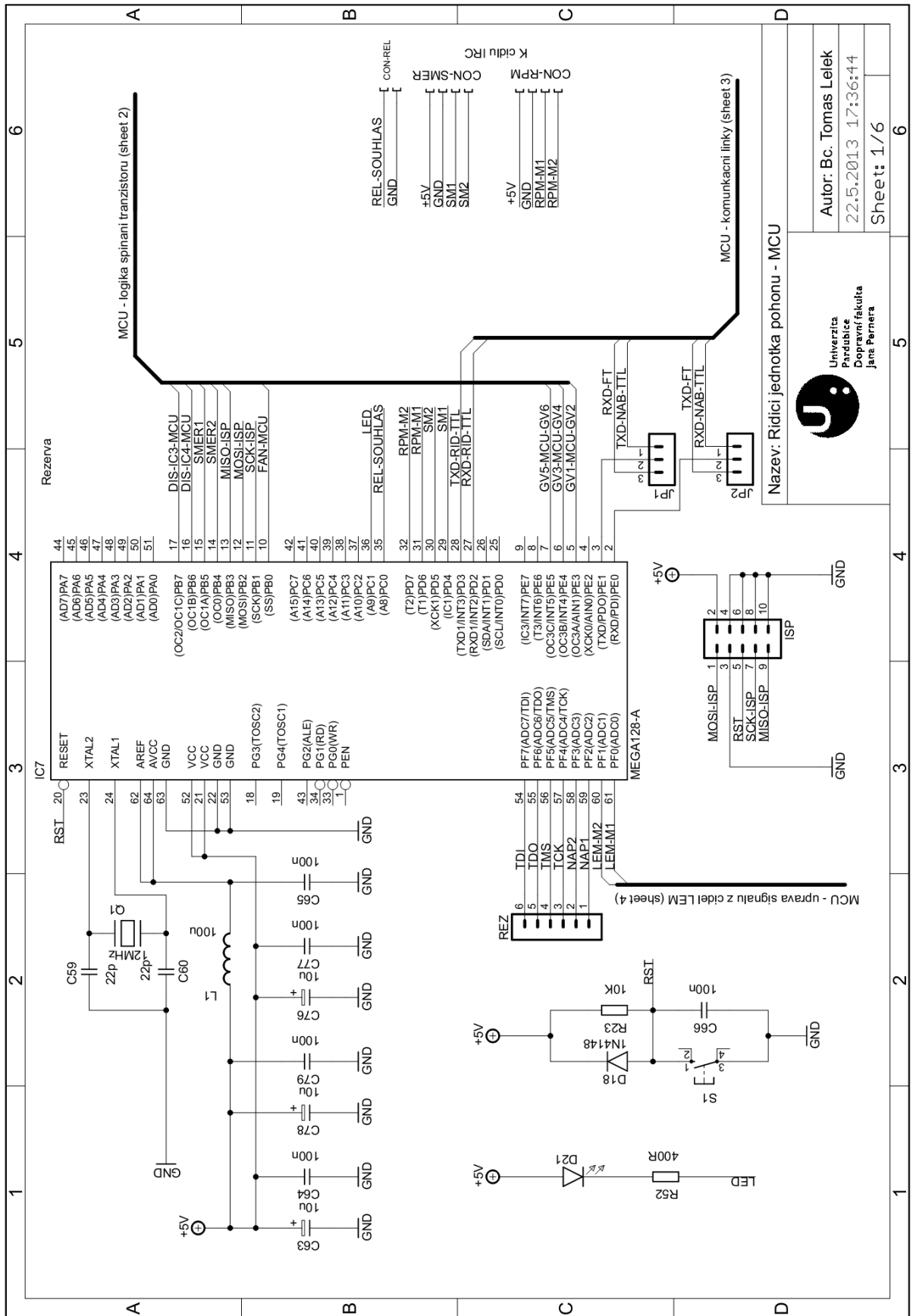
CH1 [200mV/dílek] – průběh proudu na snímacím rezistoru snímače LA55-P při frekvenci 2 kHz

**Komentář:**

Průběh proudu na oscilogramu byl naměřen na snímacím rezistoru snímače LA55-P. Protože je hodnota snímacího rezistoru rovna 100  $\Omega$ , tak je po přepočtu proud roven hodnotě 2 A.

Příloha C Fotografie pořízené při komplexním ožívování technologie

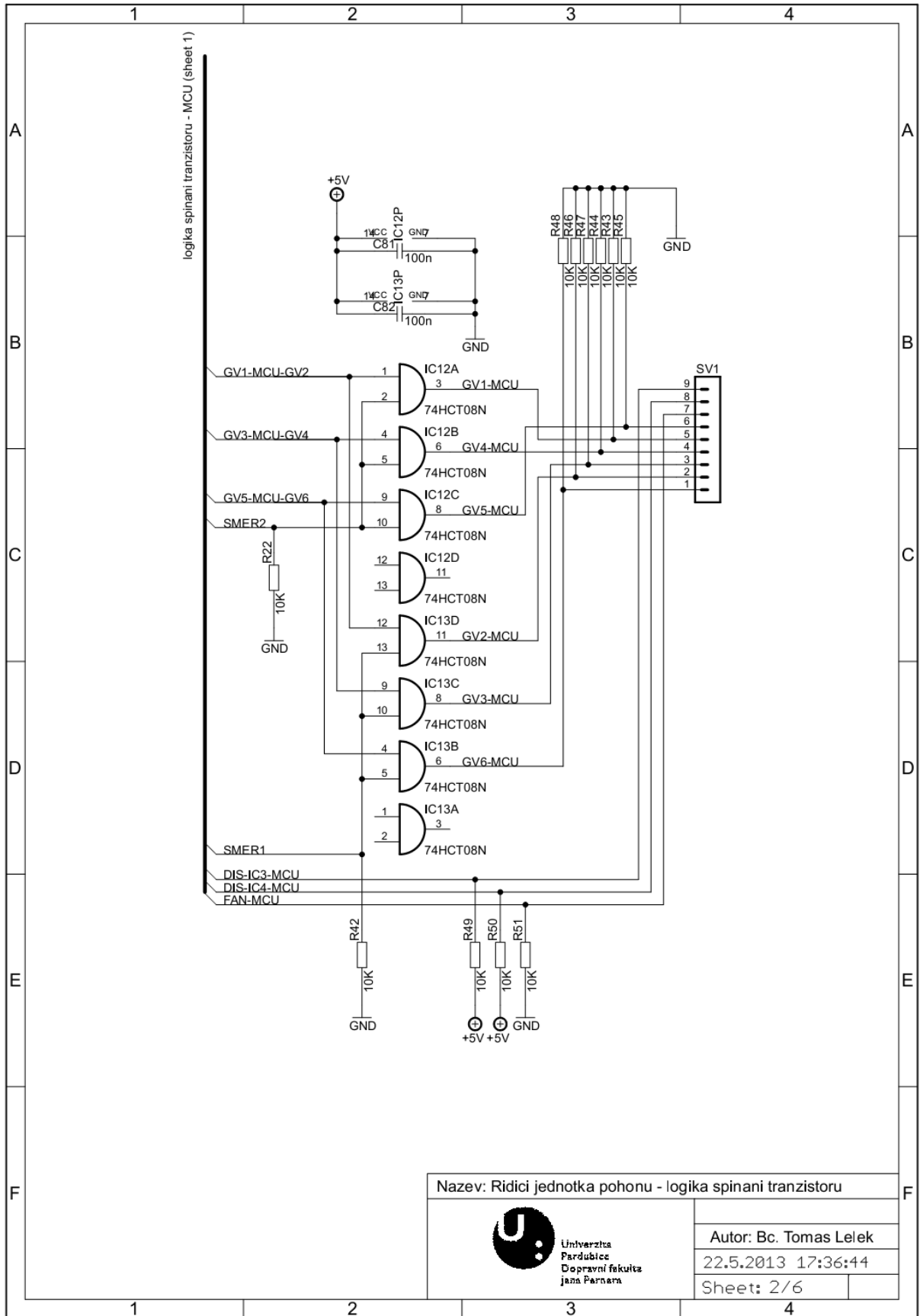


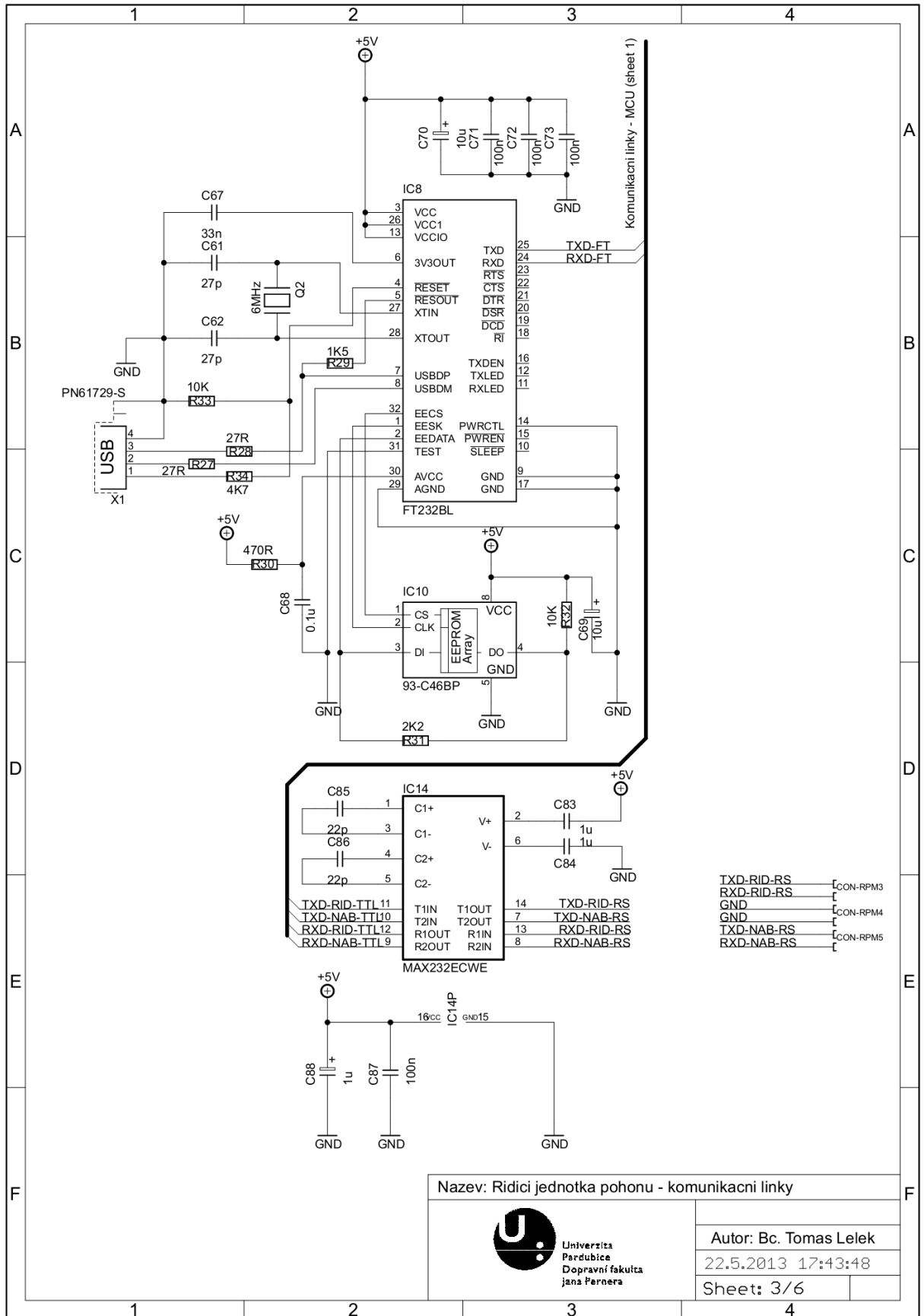


Univerzita  
Pardubice  
Dopravní fakulta  
Jana Pernera

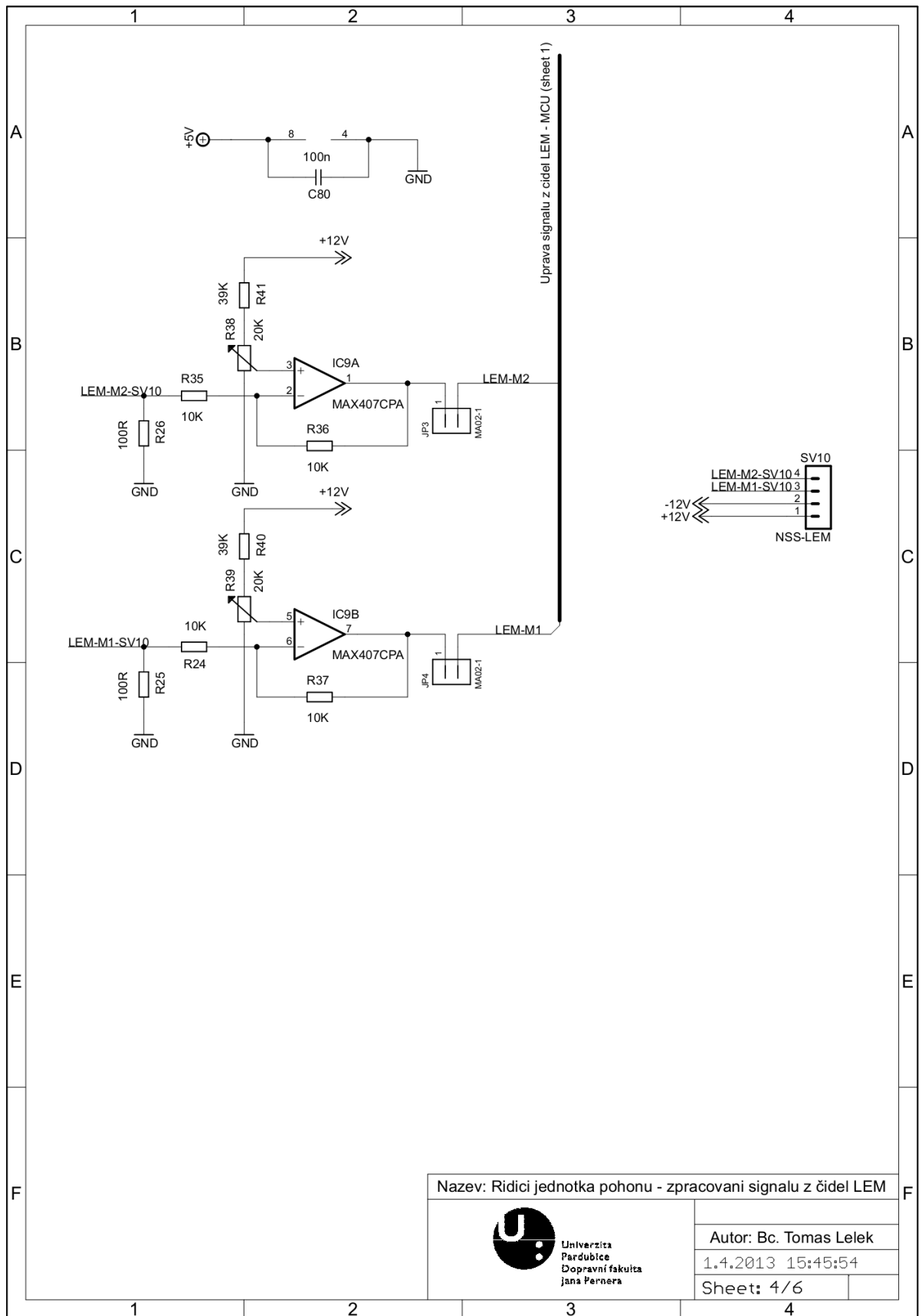
Autor: Bc. Tomas Lelek  
22.5.2013 17:36:44  
Sheet: 1/6



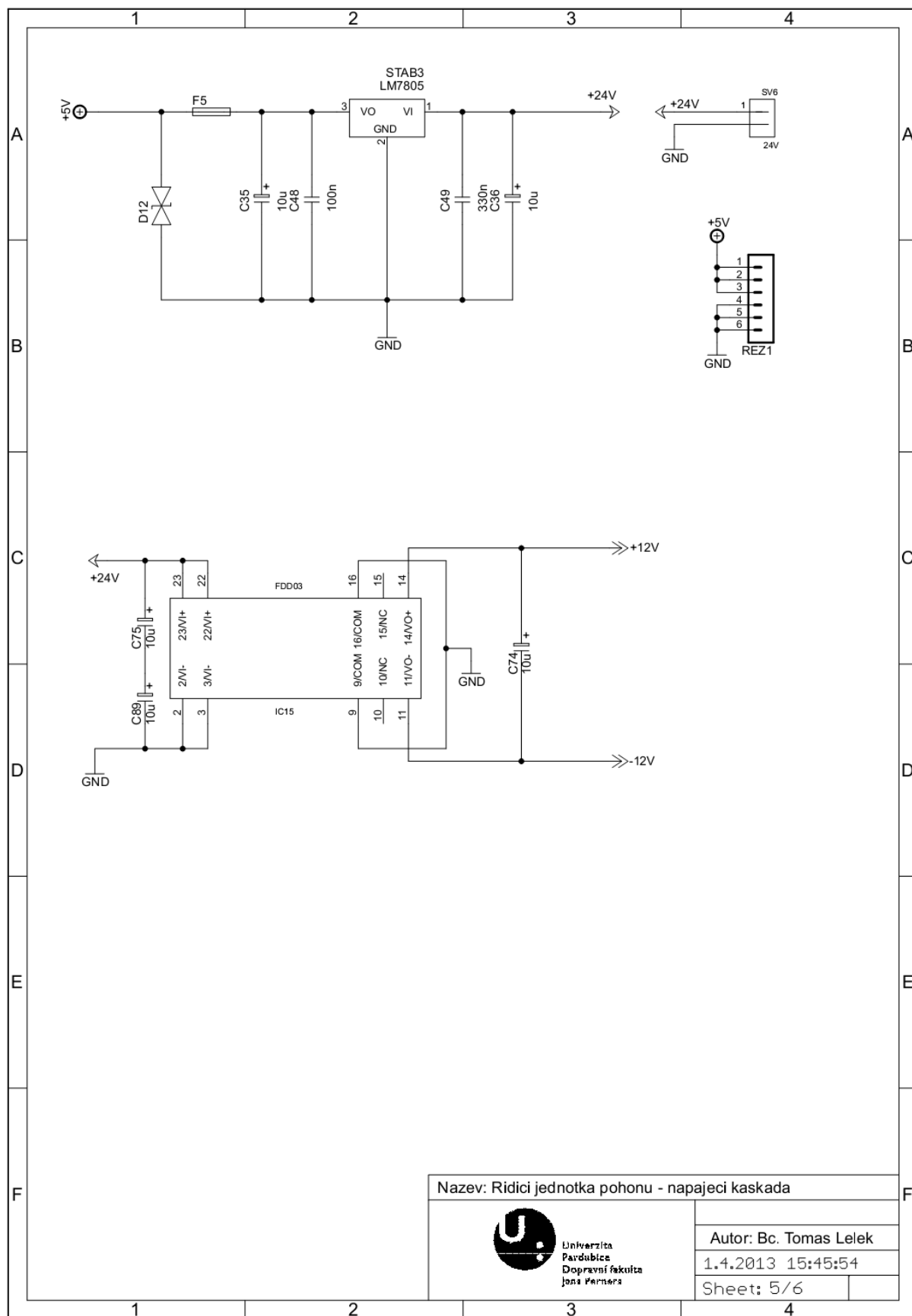


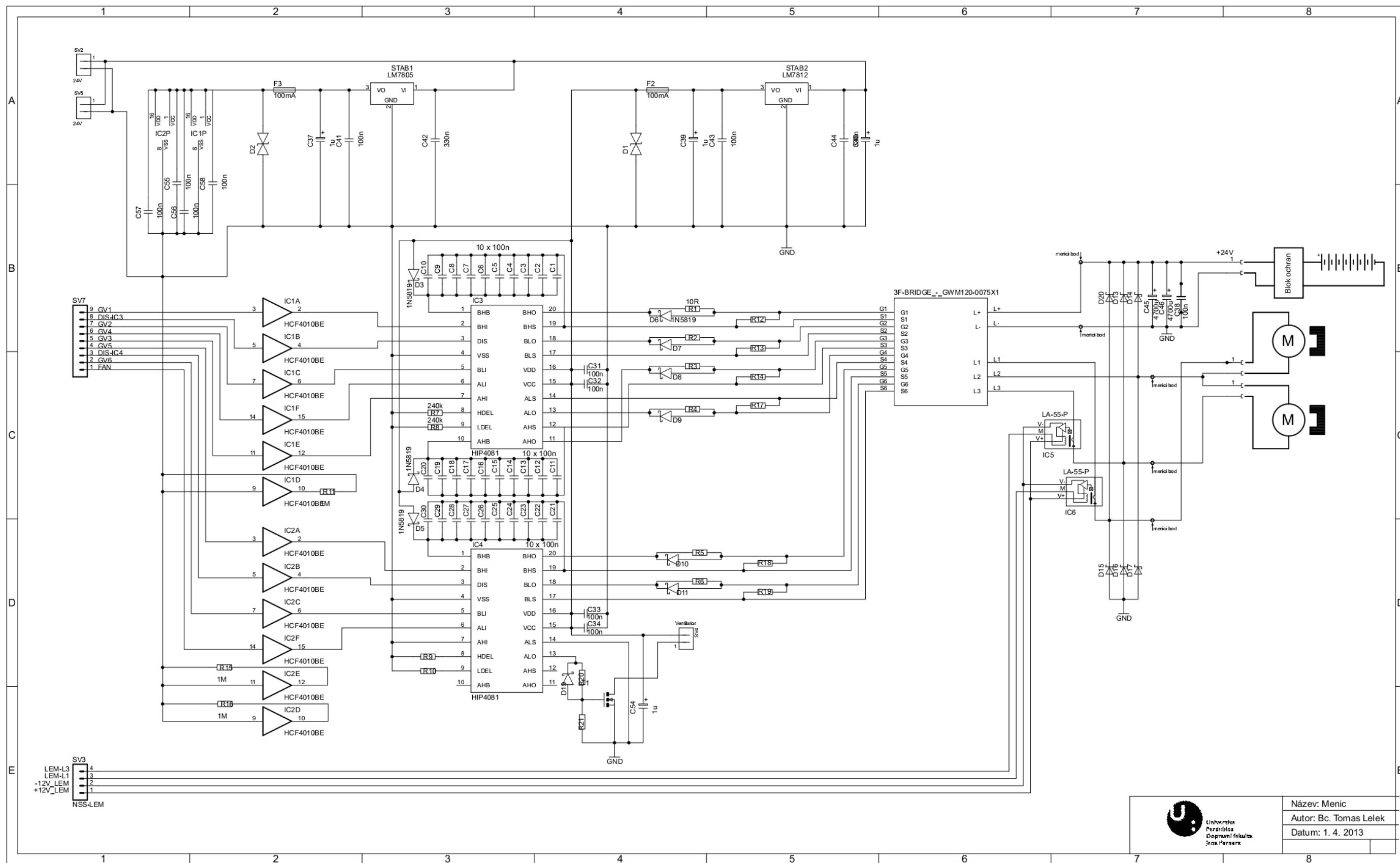



Příloha D Schéma zapojení pohonu experimentálního elektromobilu

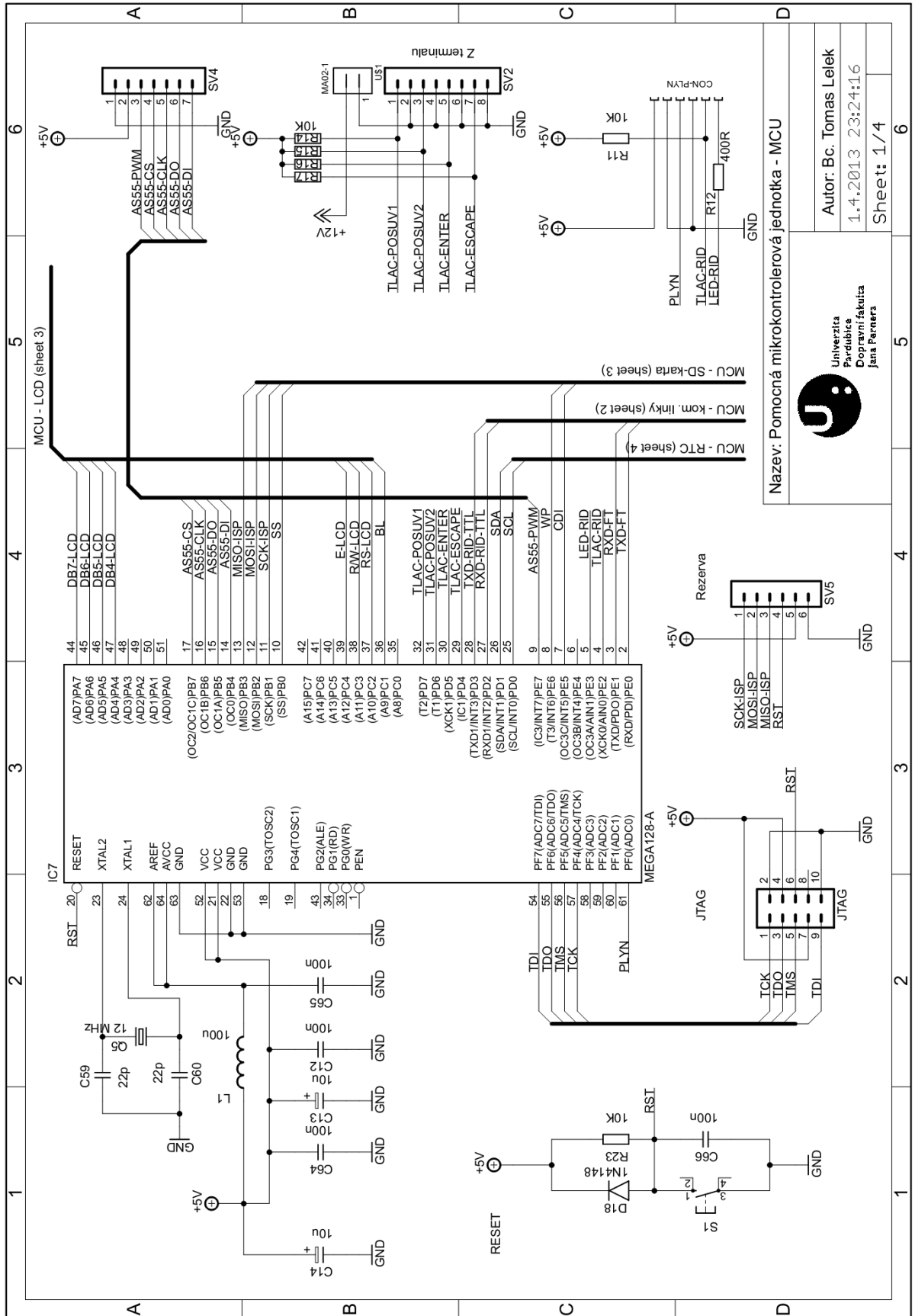


Příloha D Schéma zapojení pohonu experimentálního elektromobilu

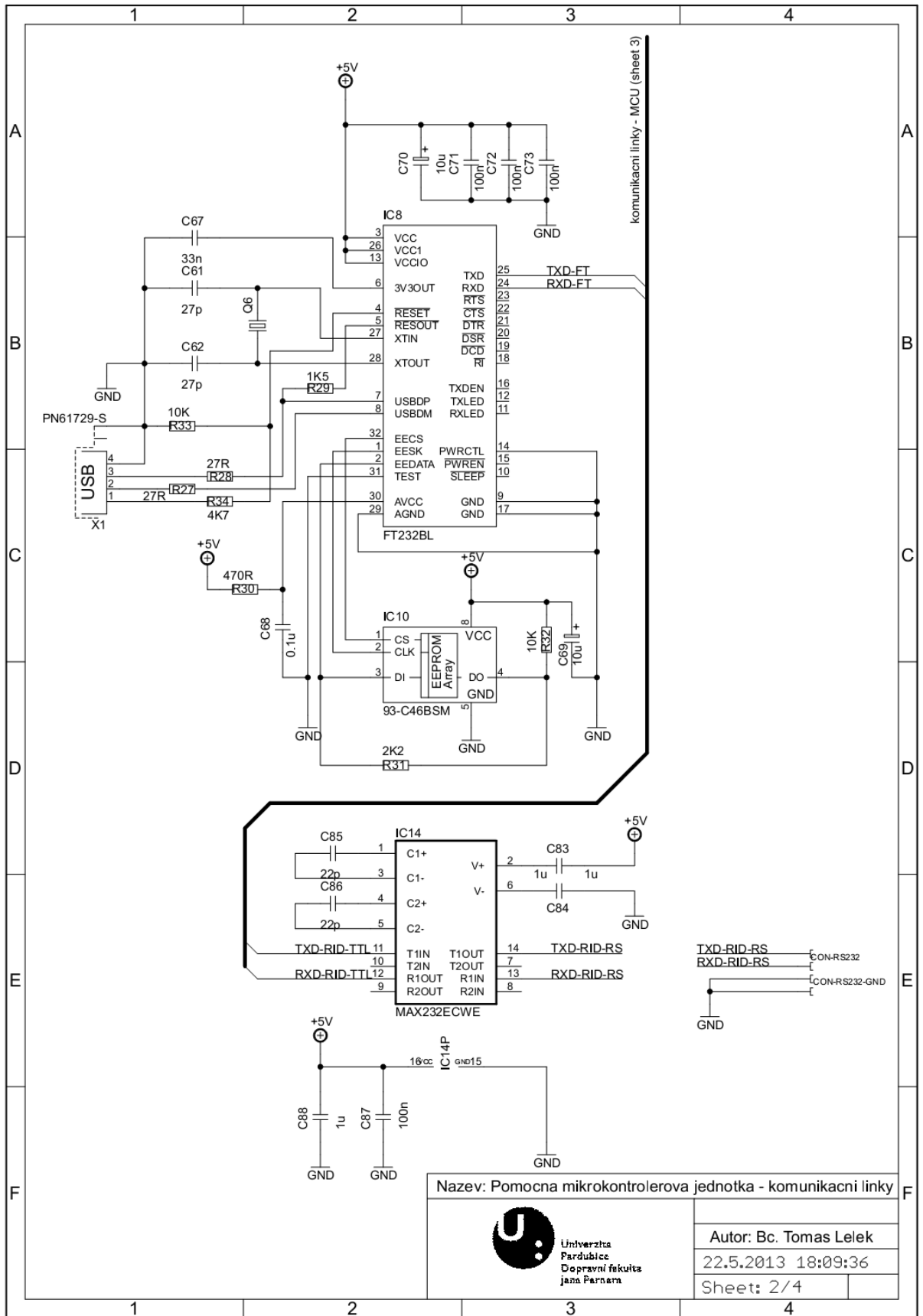




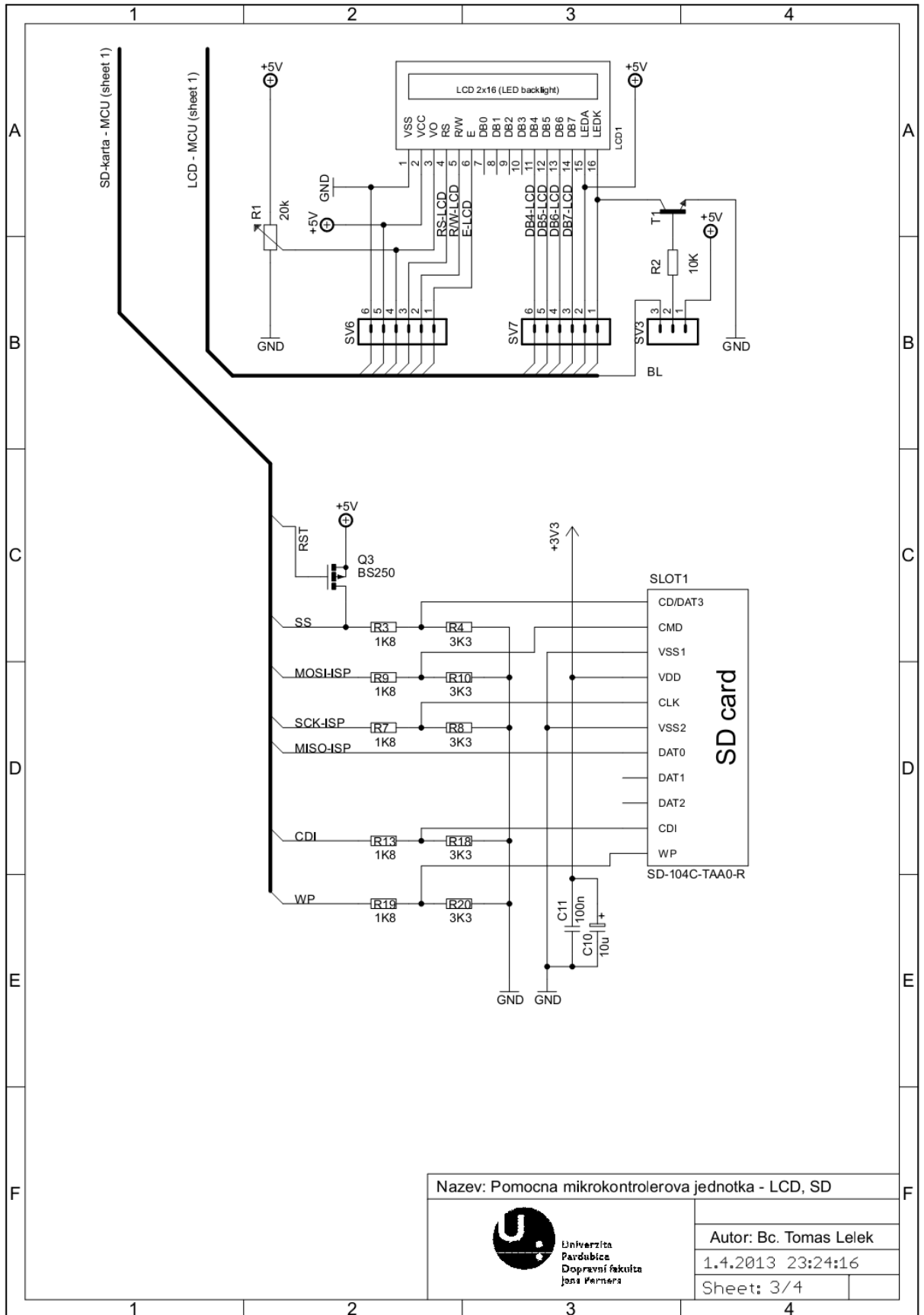
 Ústav fyziky Pedagogická Diagnostická Diagnostická Diagnostická	Název: Menic
	Autor: Bc. Tomas Lelek
	Datum: 1. 4. 2013



Název: Pomocná mikrokontrolerová jednotka - MCU  
 Autor: Bc. Tomas Lelek  
 1.4.2013 23:24:16  
 Sheet: 1/4

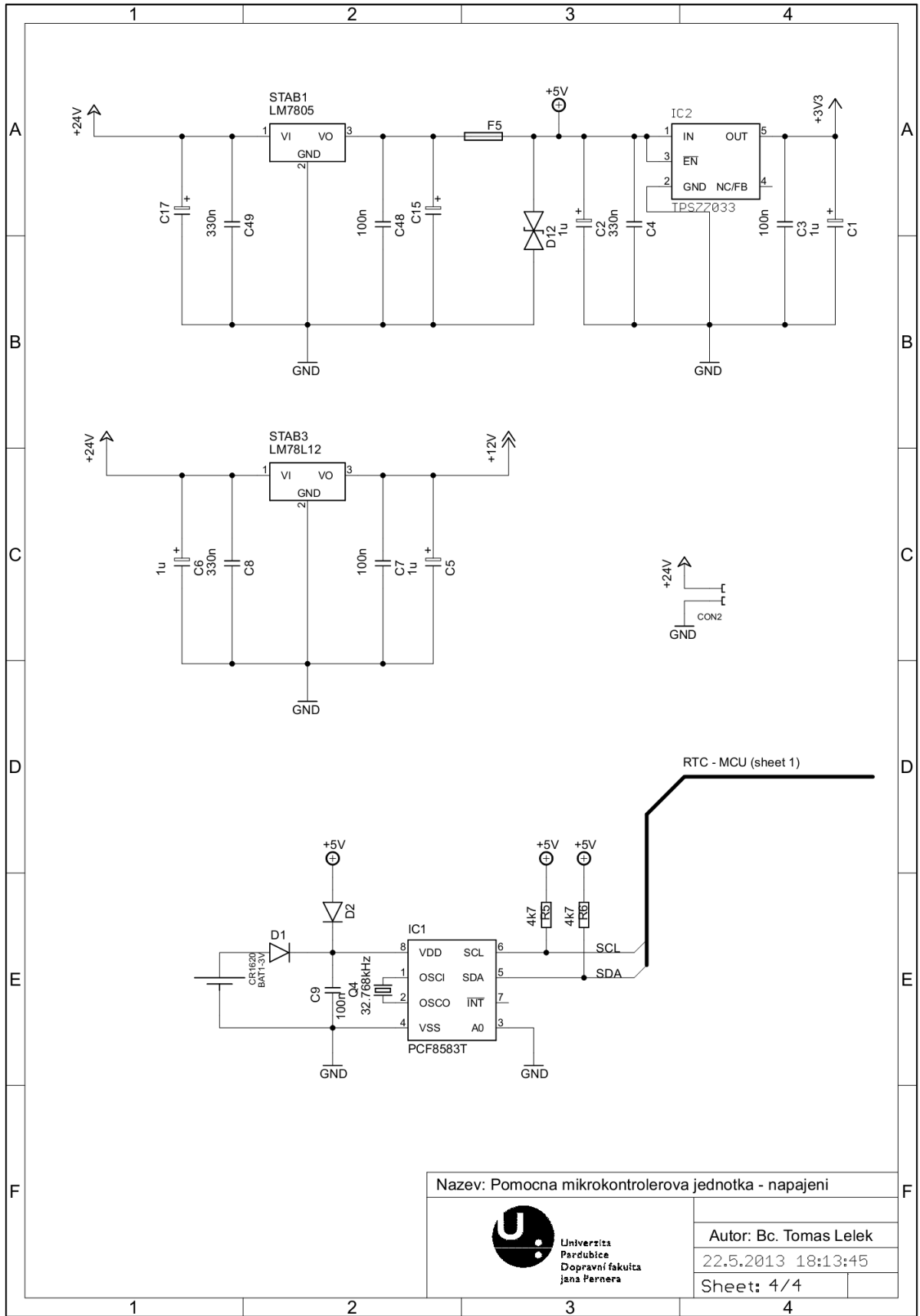



Příloha D Schéma zapojení pohonu experimentálního elektromobilu

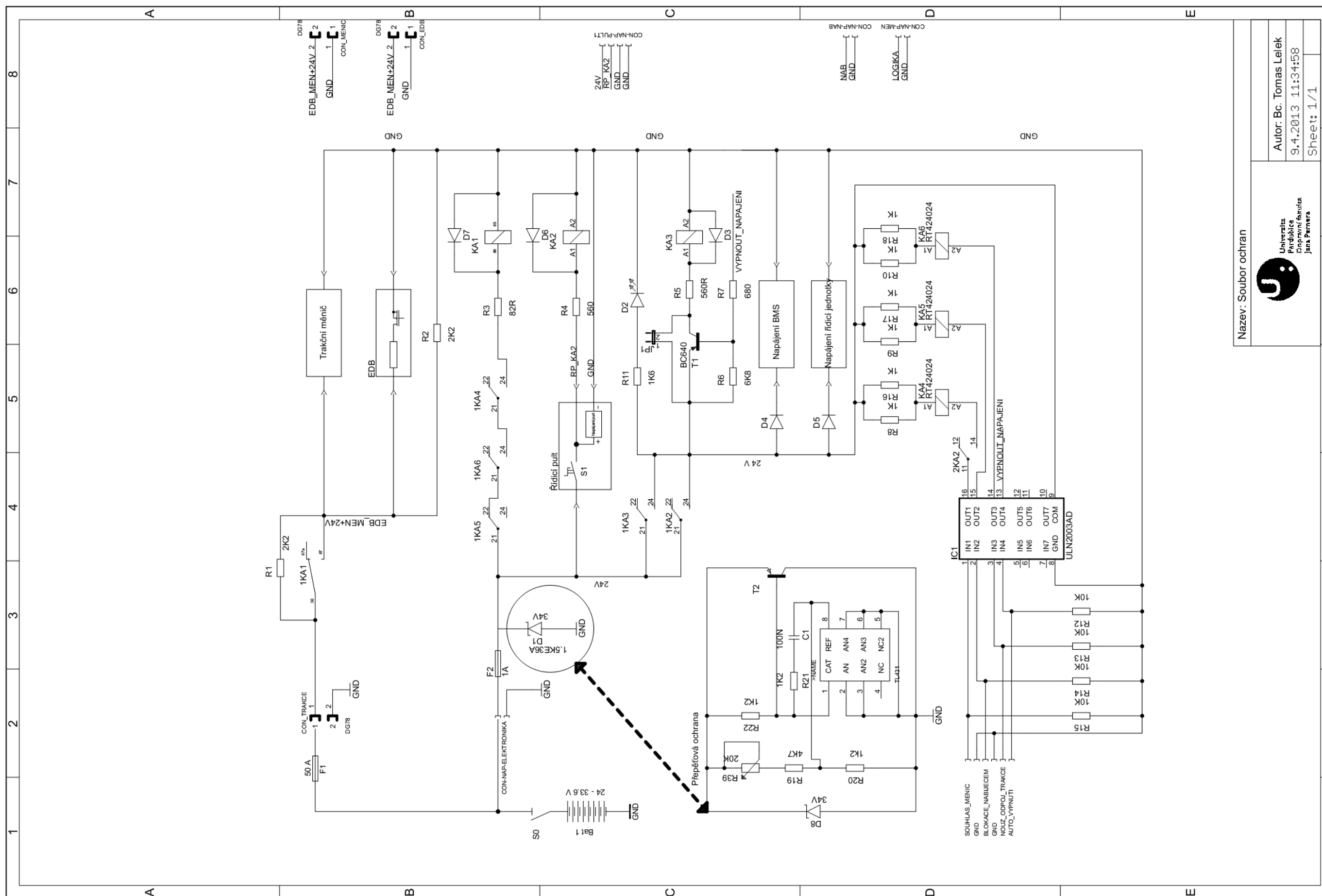




Příloha D Schéma zapojení pohonu experimentálního elektromobilu



Nazev: Pomocna mikrokontrolerova jednotka - napajeni	
 Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera	Autor: Bc. Tomas Lelek
	22.5.2013 18:13:45
	Sheet: 4/4

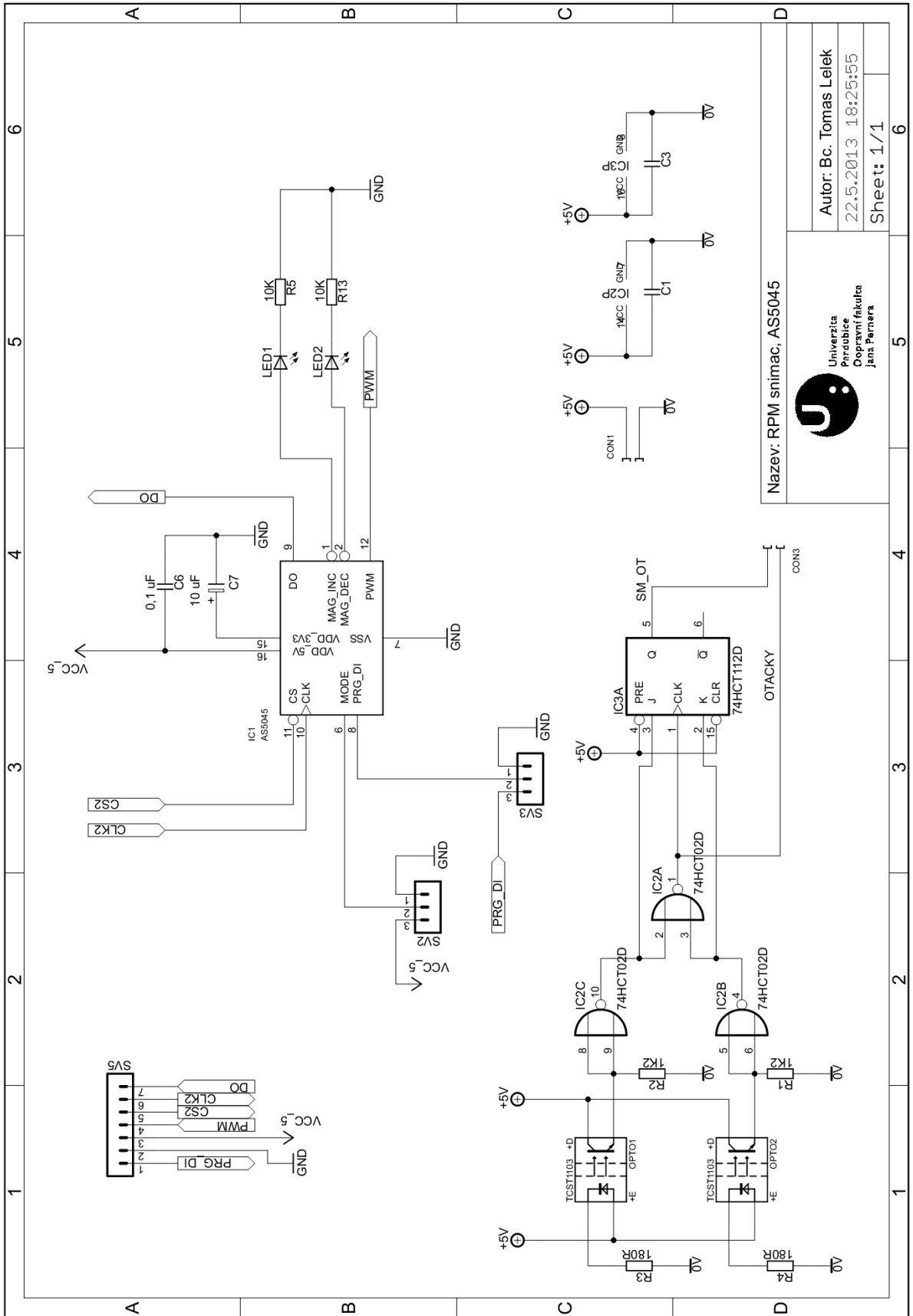


Nazev: Soubor ochran



Autor: Bc. Tomas Lelek  
9.4.2013 11:34:58  
Sheet: 1/1

Univerzita  
Pardubice  
Fakulta  
mechanická



Autor: Bc. Tomas Lelek  
22.5.2013 18:25:55  
Sheet: 1/1

Nazev: RPM snimac, AS5045

Univerzita  
Pardubice  
Opravní fakulta  
Jana Pernera