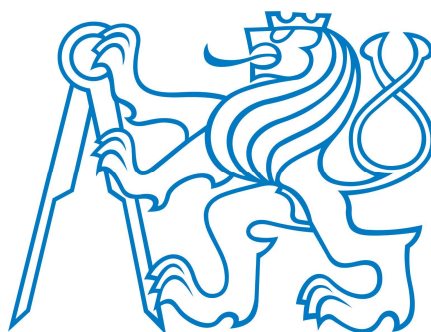


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**VÝVOJ ELEKTRICKÉ  
TRAKČNÍ ČÁSTI HYBRIDNÍ  
STUDENTSKÉ FORMULE**

IMPLEMENTATION OF ELECTRIC DRIVE INTO A HYBRID  
FORMULA STUDENT RACING CAR

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hazdra** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **482599**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Automatizační a přístrojová technika**  
Specializace: **Přístrojová technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vývoj elektrické trakční části hybridní studentské formule**

Název diplomové práce anglicky:

**Implementation of electric powertrain into a hybrid formula student car**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši možností aplikace elektrického pohonu v kategorii formula student combustion.
2. Zvolte vhodné komponenty a systém řízení pro realizaci takového pohonu.
3. Zajistěte vhodné řízení systému pro jeho aplikaci pro zvolené disciplíny soutěže.
4. Systém zprovozněte a nastavte na prototypovém vozidle.
5. Vyhodnoťte dosažené vlastnosti pohonu.
6. Zhodnoťte přínos systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Novák, J. Elektromechanické systémy v dopravě a ve strojírenství. Skriptum ČVUT, FS Praha, 2002  
[2] KRISHNAN, Ramu. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 9781420014235.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Zdeněk Novák, Ph.D. U12110.1**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **28.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.06.2023**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Zdeněk Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

Datum: .....

Podpis

## Anotační list

Jméno autora:	Bc. Martin Hazdra
Název DP:	Vývoj elektrické trakční části hybridní studentské formule
Anglický název:	Implementation of electric powertrain into a hybrid formula student car
Rok:	2023
Studijní program:	N0714A270001 APT
Ústav:	U12110 Ústav přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí a konzultant DP:	Ing. Zdeněk Novák, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran 94 počet obrázků 29 počet tabulek 9 počet grafů 22 počet příloh 1 CD
Klíčová slova:	BLDC, Elektrická trakce, hybridní pohon, Studentská formule
Keywords:	BLDC, Electric traction, hybrid powertrain, Formula student

**Anotace:** Tato práce se zabývá implementací elektrické trakce do původně čistě spalovacího vozu v soutěži formula student. Jsou popsány elektrické pohony, jejich konstrukční prvky a parametry. Jsou rozebrány způsoby skladování elektrické energie, jejich vlastnosti a aplikovatelnost. Dále je popsán vliv hybridního pohonu na závodní vůz. V praktické části je popsán proces výběru článků, vliv různých parametrů je přepočítán s pomocí jízdních dat na změnu času průjezdu tratí. Je popsán výběr motoru, sestavení matematického modelu pohonu, integrace systému do vozu, jeho řízení a chlazení. Součástí práce je i vývoj dílčích řídicích PCB. Matematické modely a vlastnosti pohonů jsou ověřeny. Nakonec je zhodnocen přínos systému jako celku.

**Abstract:** This thesis is concerned with the implementation of an electric traction into the originally purely combustion vehicle in the formula student competition. Electric drives, their design elements and parameters are described. Electrical energy storage, its properties and applicability are discussed. Furthermore, the effect of the hybrid drive on the racing car is described. In the practical part, the process of selecting cells is described, the effect of different parameters is calculated by fitting a longitudinal acceleration model to the driving data to establish time difference. The selection of the motor, creation of a mathematical model of the drive, the integration of the system into the vehicle, its control and cooling are described. Part of the work is also the development of control PCBs and validation of models. Finally, the contribution of the real system is evaluated.



## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Zdeňku Novákovi, Ph.D., za vedení mé diplomové práce a za cenné rady ohledně pohonů.

Dále děkuji mé rodině za podporu při psaní této práce a při studiu.

Děkuji také kolegům z týmu CTU CarTech za možnost realizace navrženého systému.

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	8
<b>2 Teoretická část</b>	9
2.1 Hybridní vozidla	9
2.1.1 Rozdělení	9
2.1.2 Formula student	9
2.2 Parametry elektrických pohonů	10
2.2.1 Mechanický výkon	13
2.2.2 Elektrický moment	13
2.2.3 Otáčky	14
2.2.4 Ztráty	15
2.3 Druhy elektrických pohonů	15
2.3.1 Stejnoseměrné motory	15
2.3.2 Asynchronní motory	16
2.3.3 Synchronní motory	16
2.3.4 BLDC motory	17
2.4 Skladování energie	19
2.4.1 Chemické	19
2.4.2 Elektrické	21
2.4.3 Kinetické	21
2.5 Teorie závodních vozů	22
2.5.1 Disciplíny v soutěži formula student	22
2.5.2 Požadavky závodního vozu	23
<b>3 Praktická část</b>	25
3.1 Vliv hybridního pohonu na vůz	25
3.1.1 Umístění a cílový výkon pohonu	25
3.1.2 Volba klíčových parametrů baterie	28
3.1.3 Vývoj software pro analýzu dat	28
3.2 Konstrukce baterie	33
3.2.1 Výběr článku	33
3.2.2 Hlídaní stavu baterie	37
3.2.3 Návrh vedení	40
3.2.4 Návrh elektrických spojů	43
3.2.5 Návrh chlazení baterie	45
3.3 Výběr elektromotoru	50
3.3.1 Parametry	50
3.3.2 Matematický model pohonu	51
3.3.3 Chlazení elektromotorů	54

3.4	Bezpečnostní obvody . . . . .	55
3.4.1	Zapínání hybridního systému . . . . .	55
3.4.2	Udržení bezpečných provozních podmínek . . . . .	58
3.5	Řízení . . . . .	60
3.5.1	Elektronika vozu . . . . .	60
3.5.2	Řídící systém elektrického pohonu . . . . .	61
3.5.3	Řízení hybridního systému . . . . .	66
3.6	Validace . . . . .	69
3.6.1	Příprava měření . . . . .	69
3.6.2	Výpočet momentu elektromotoru . . . . .	70
3.6.3	Validace chlazení baterie . . . . .	74
3.6.4	Odezva systému . . . . .	74
3.6.5	Vliv na jízdní vlastnosti vozu . . . . .	75
<b>4</b>	<b>Závěr . . . . .</b>	<b>77</b>
	<b>Seznam použitých značek a symbolů . . . . .</b>	<b>79</b>
	<b>Seznam použité literatury a zdrojů . . . . .</b>	<b>84</b>
	<b>Seznam příloh . . . . .</b>	<b>89</b>
	<b>Obsah přiloženého CD . . . . .</b>	<b>89</b>

# 1 Úvod

Téma elektrifikace přepravy je čím dál aktuálnější, to platí i pro studentskou soutěž formula student. Vyrábí se stále více elektrických osobních vozů a předpokládá se, že jejich podíl bude dále růst. Z toho důvodu se organizátoři hlavního závodu soutěže, který se koná v Německu, v roce 2019 rozhodli, že dojde k postupnému rušení kategorie spalovacích motorů [13]. Mezi organizátory všech ostatních závodů ale nepanovala shoda, jak se k tomuto procesu postavit. Provozování spalovacích formulí má některé velké výhody, hlavně pro začínající týmy. Jsou výrazně bezpečnější, díky tomu je jednodušší hned první rok projít kontrolou na závodech a s vozem soutěžit. Další výhodou je výrazně nižší cena vozu, která může být pro některé vysoké školy, které by se soutěže chtěly účastnit, rozhodující.

Proto se postupně začal rozvíjet plán realizace hybridní kategorie, která by umožnila začínajícím i již zavedeným týmům zkusit provoz elektrického pohonu s výrazně nižšími náklady, díky menší baterii, a vyšší bezpečností, zajištěnou nízkým napětím systému. Po dohodě organizátorů byl v září 2021 zveřejněn plán, jak splnit přesně tyto požadavky bez dalšího štěpení kategorií vozů [16].

Tento vývoj tým CTU CarTech sledoval. Nová kategorie byla vítaná výzva, kterou jsme chtěli využít. Podobná situace totiž nastala už o rok předtím, kdy pravidla otevřela možnost používat poháněné aerodynamické elementy. V týmu jsme ale zvolili příliš málo ambiciózní koncept takového zařízení (s výkonem 80 W), který nakonec nemělo smysl provozovat. Koncept týmu Renstall Esslingen, který sestavil systém poháněné aerodynamiky s výkonem 15kW pak všechny ohromil. Podobného výsledku jsme chtěli dosáhnout i my a toto nové otevření pravidel byla naše možnost.

Chtěli jsme proto postavit vůz s hybridním pohonem tak pokročilý, jak nám naše znalosti, zdroje a čas dovolily. V září už existovaly plány, co bude nový vůz obsahovat, takže bylo nutné převzít všechny schválené prvky a přidat hybridní pohon na vrchol. To vyžadovalo velké množství mechanických úprav a elektrických komponentů, které bylo nutné do vozu zabudovat. V této práci bych se chtěl věnovat inženýrskému postupu, který vedl k stavbě prvního hybridního vozu podle pravidel FSC na světě.

V práci popíšu, jak jsem vybral elektrické komponenty, které takový vůz potřebuje. Zdokumentuji, jakým způsobem byly rozhodnuty otázky ohledně umístění systému, konstrukce baterie a výběru elektromotorů. Popíšu nově navržené bezpečnostní systémy, které byly nutné k splnění požadavků soutěže, vysvětlím navržený systém řízení a jeho implementaci. Sestavený systém pak i otestuji.

Plán s hybridním vozem už v roce 2022 byl nakonec naplněn. Díky tomu je možné zhodnotit systém jako celek a zmínit i vady, které se v systému vyskytly, aby jim bylo možné v budoucnu předejít.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Hybridní vozidla

Hybridní vozidla využívají několik zdrojů energie pro pohon. Většinou se jedná o kombinaci spalovacího motoru a elektromotoru. Existují tři způsoby dělení takových vozidel do různých kategorií pro jejich klasifikaci.

#### 2.1.1 Rozdělení

První dělení je možné provést dle síly elektrického pohonu a napětí systému, viz tab. 1.

Parametr	Micro hybrid	Mild hybrid	Full hybrid	Plug-in hybrid
Napětí baterie[V]	12	48-160	200-300	300-400
Výkon elektrické části[kW]	2-3	10-15	30-50	60-100

**Tab. 1:** Klasifikace hybridů dle výkonu a napětí [1]

Další dělení je do 3 kategorií dle topologie. Jedná se o topologii sériovou, paralelní nebo sériovo-paralelní (tzv. power split systém).

V sériovém hybridním voze pohání spalovací motor generátor namísto kol. Tento generátor pak nabíjí baterii, ze které je následně napájen elektrický motor. Výhodou takového uspořádání je, že spalovací motor může být trvale udržován na optimálních otáčkách z hlediska účinnosti. Příkladem takového uspořádání může být vůz BMW i3 REx [12].

V paralelním hybridním voze je k hnané nápravě připojen paralelně elektrický motor/generátor i spalovací motor. Příkladem jsou hybridní vozy od výrobce Honda, s technologií “Integrated Motor Assist” [20].

V sériovo/paralelním hybridním voze (power split systém) je k spalovacímu motoru připojen dedikovaný generátor a zařízení na přemístění výkonu spalovacího motoru od kol ke generátoru. Takovou konfiguraci používá například vůz Toyota Prius [4].

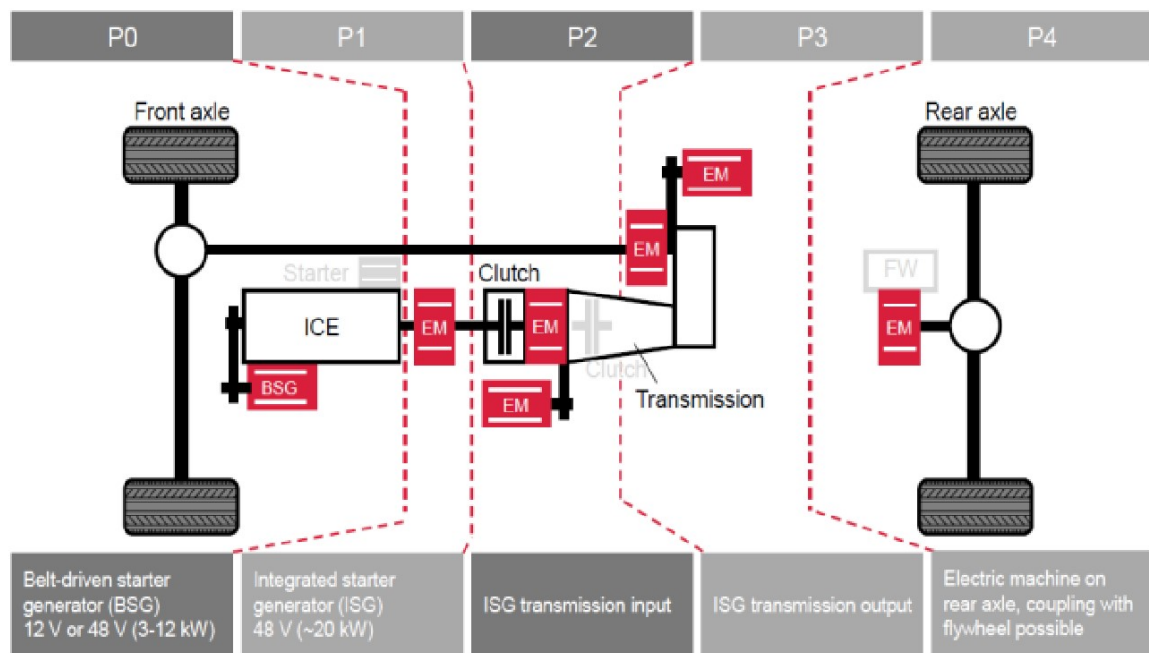
Je možné se setkat ještě s dělením na kategorie P1 až P5, kdy záleží na poloze elektrického motoru ve voze ve vztahu ke zbytku pohonného ústrojí, viz tab. 2. Umístění je vizualizováno na obr. 1.

#### 2.1.2 Formula student

V kategorii FSC konstruují studentské týmy závodní formule se spalovacím motorem. Spalovací motor je výkonově omezen restriktorem, který omezuje množství vzduchu pro spálení v motoru. To prakticky udává výkonový limit kolem 60 kW v této kategorii.

Typ	Popis
P0	Elektromotor je připojen ke spalovacímu s pomocí řemenu na rozvodech
P1	Elektromotor je připojen na klikovou hřídel spalovacího motoru
P2	Elektromotor je připojen k převodovce, od spalovacího motoru jej dělí spojka.
P3	Elektromotor je připojen za převodovkou, otáčí se s koly
P4	Elektromotor je na nápravě nehnané spalovacím motorem

**Tab. 2:** Klasifikace hybridů dle umístění



**Obr. 1:** Dělení hybridních pohonů dle síly [26]

Pro sezonu 2022 byly poprvé pravidly umožněny hybridní pohony. Trakční baterie v takových vozech může vážit maximálně 3 kg a její napětí nesmí překročit 60 V. Tato omezení znamenají, že zásadní vliv na výsledné dosažené parametry systému má právě baterie. Velikost trakčních motorů, jejich poloha, typ, ani způsob využívání není specifikovaný, což umožňuje značnou kreativitu v umístění a aplikaci. V sezoně 2022 hybridní pohony na závodech aplikovaly týmy CTU CarTech a Tampere formula student, ke konci sezony systém zprovoznil i Renstall Eslingen. Všechny týmy zvolily stejný koncept, a to použití BLDC motorů v přední kolové soustavě, dle výše stanovené klasifikace tedy verzi P4. V sezoně 2023 začíná používat hybridní pohon více týmů. Začínají se objevovat i první koncepty s jinou klasifikací než P4.

## 2.2 Parametry elektrických pohonů

Elektrický pohon je soustava sloužící k oboustranné elektromechanické přeměně energie [17]. Skládá se obecně z měniče, elektromotoru a převodovky. V případě trakčních pohonů se používají rotační elektromotory, teoreticky je ale možné

zkonstruovat i elektromotor lineární. Do soustavy můžeme zahrnout i řídicí systém, většinou založený na mikroprocesoru, který často zabezpečuje zpětnovazební regulaci. První typ motorů, který se používal, byly motory stejnosměrné v druhé polovině 19. století. Po objevu točivého pole se rozšířilo používání asynchronních motorů, které jsou konstrukčně výrazně jednodušší. Elektrické motory tak ve stacionárních aplikacích převážně nahradily parní stroje a plynové motory. Vynález polovodičových spínacích prvků vedl k další revoluci v možnostech elektrických pohonů. Elektromotor se tak stal po stránce účinnosti, spolehlivosti a říditelnosti univerzální hnací jednotkou. Výhody elektrických pohonů jsou

- široký rozsah dosahovaných výkonů - mW až MW, momentů - mNm až MNm a otáček - od nulových až po desítky tisíc
- jednoduchá údržba, jednoduchá konstrukce, spolehlivost
- proveditelnost v náročných prostředích (výbušné, kapalné)
- nízká cena
- jednoduchá změna směru otáčení
- možnost rekuperace při brzdění
- snadno ovlivnitelná změna parametrů řízením
- nízké zvlnění momentu
- ekologičnost - bez emisí, tichý

Nevýhody jsou

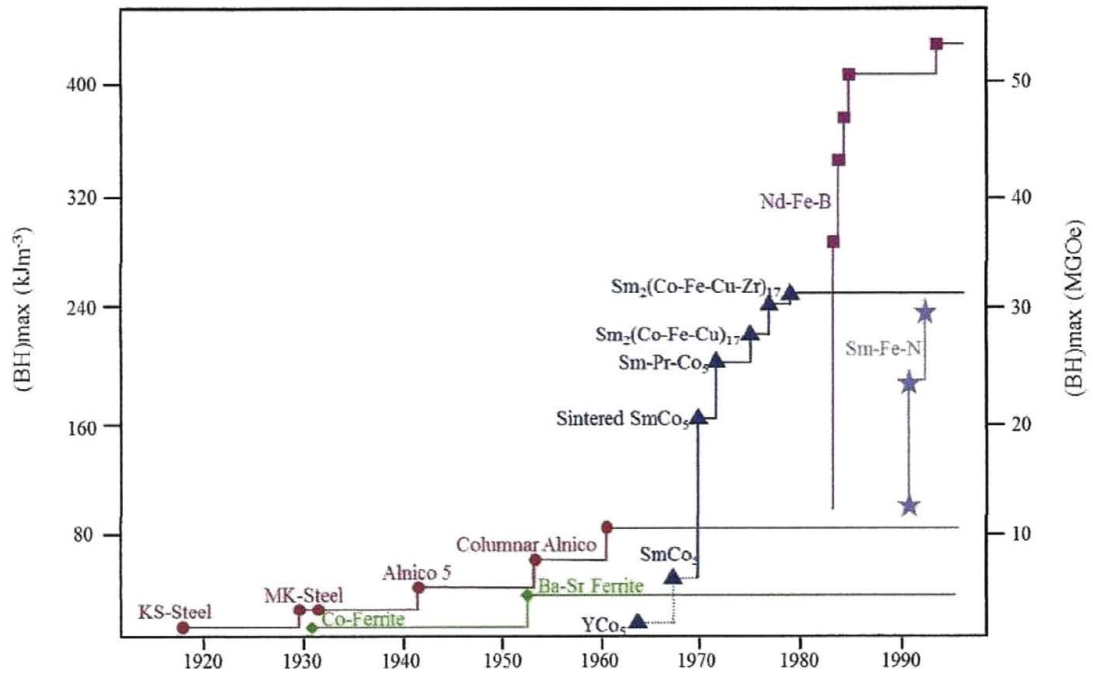
- závislost na elektrické energii - náročné skladování nebo nutnost připojení k síti
- horší poměr výkon/hmotnost oproti motorům pracujícím s kapalinami pod tlakem

Nový trend ve vývoji elektrických pohonů je stále širší využití motorů PMSM. To je možné díky zlepšení parametrů permanentních magnetů [6].

První známé permanentní magnety vznikaly přírodně, když uhodil blesk do magnetitu ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Takové magnety byly pro využití v pohonech příliš slabé. První s dostatečnou silou pro použití v elektrických pohonech byly vyrobeny až kolem roku 1930 [9].

Hlubší výzkum magnetů byl nastartován tímto objevem, protože magnety měly najednou více praktických využití.

Na grafu 1 můžeme vidět dramatické zlepšení magnetických vlastností nových magnetických materiálů. Na ose  $y$  je vynesena veličina  $(BH)_{max}$ , která se používá pro porovnávání síly magnetů. Chceme-li pole dané síly získat použitím co nejmenšího

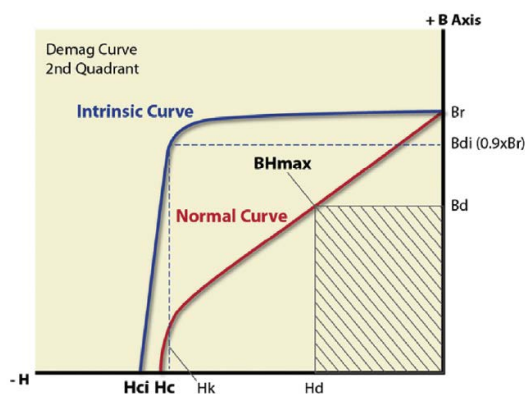


Graf 1: Historie vývoje permanentních magnetů [9]

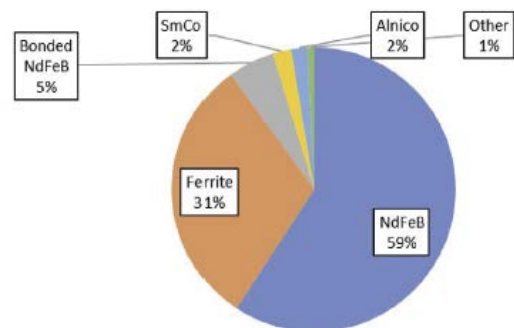
magnetu, musí mít takový magnet co nejvyšší hodnotu  $(BH)_{max}$ . Z grafu je patrné, že mezi lety 1917 a 2000 vzrostla veličina  $(BH)_{max}$  50 krát.

Všechny magnetické materiály vykazují hysterezi, tedy i permanentní magnety. Hysterezní křivka materiálu nám říká, jak materiál reaguje na vnější magnetické pole, vyznačené veličinou  $H$ . Výsledné externě dostupné magnetické pole je reprezentováno veličinou  $B$ .

Protože v praktických aplikacích jsou magnety používány pouze v druhém kvadrantu, v technických listech magnetů se uvádí právě tento kvadrant. Zobrazeným křivkám se říká demagnetizační.



(a) Demagnetizační křivka magnetu



(b) Velikost trhu pro magnety dle jejich materiálu

Obr. 2: Trh s magnety [9]

Významným milníkem ve vývoji magnetů byl objev sintrovaných feritových



magnetů, které jsou dodnes vyráběny v největším objemu. V elektrických pohonech se s nimi můžeme setkat v nízko výkonových stejnosměrných motorech pro pomocné pohyby.

Objev možnosti využití sloučeniny Samarium-kobalt v šedesátých letech opět výrazně stimuloval základní výzkum do magnetů. To vyústilo v objevení NdFeB magnetů, které mají nejvyšší  $(BH)_{max}$ . Magnety na tomto principu dosahují intenzity mag. pole až 1.2 T [23]. Jejich hlavní nevýhodou je relativně nízká Curieova teplota 310-370 °C. To prakticky znamená, že tento typ magnetů začne trvale ztrácet své magnetické vlastnosti už při teplotách okolo 80 °C. Je potřeba zajistit, aby prostředí, ve kterém budou provozovány, nedosáhlo takových teplot.

Právě díky tomuto technickému vývoji mají motory s permanentními magnety vysokou hustotu výkonu a kroutícího momentu, což nepřímo také zvýší účinnost celého pohonu. Asynchronní motory, které se používají v některých automobilech, například ve vyšších řadách od automobilky Tesla, jsou pro stejný výkon větší a méně účinné [25].

### 2.2.1 Mechanický výkon

Elektromotor je stroj, který převádí elektrickou energii na energii mechanickou. Rovnice pro mechanický výkon je:

$$P_m = M_k \cdot \omega \quad (1)$$

Obě veličiny mají limity, které určují dosažitelné výkonové hustoty elektromotorů.

### 2.2.2 Elektrický moment

Omezení maximálního elektrického momentu si ukážeme na stejnosměrném stroji s cizím buzením, který se díky své jednoduchosti analogicky používá pro popis všech elektromotorů.

Rovnice pro moment takového stroje je:

$$M = C_{ss} \cdot \phi \cdot i_a \quad (2)$$

Problém této rovnice spočívá v její neprůhlednosti, konstrukční parametry stroje jsou schovány do parametrů  $C_{ss}$  a  $\phi$ , ze kterých nejde poznat, jak moment skutečně vzniká.

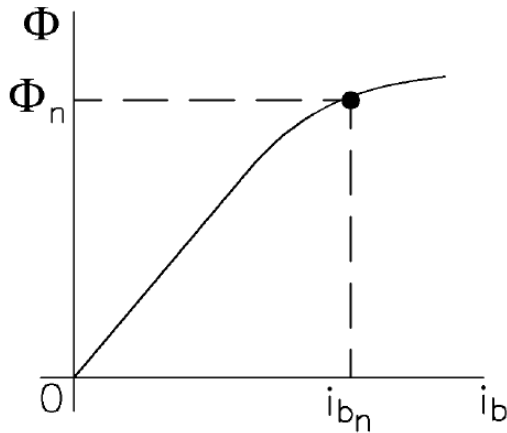
Z rozměrové analýzy rovnice 2, viz rovnice 3, zjistíme, že  $C_{ss}$  je buď bezrozměrná veličina, nebo má jednotku  $rad^{-1}$ , v závislosti na použití. Součin  $\phi \cdot i_a$  dává kroutící moment.

$$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} = C_{ss} \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1} \cdot s^{-1} \cdot A \quad (3)$$

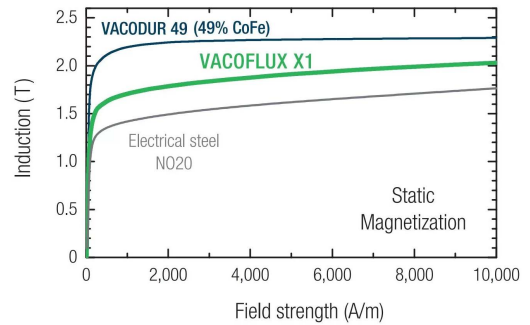
Veličina  $C_{ss}$  souvisí s mechanickými rozměry motoru. Můžeme ji určit z rovnice:

$$C_{ss} = \frac{P \cdot Z}{2 \cdot \pi \cdot A} \quad (4)$$

kde  $P$  je počet pólů motoru,  $Z$  je počet vodičů,  $A$  je počet paralelních cest. Parametry  $Z$  a  $A$  souvisí s typem vinutí a rozměry stroje, počet pólů udává, kolik dvojic magnetů se během práce stroje navzájem přitahuje.



(a) Závislost mag. indukčního toku na proudu [17]



(b) Závislost mag. indukčního toku na proudu příklad [32]

**Obr. 3:** Nasycení magnetické oceli

Magnetický tok spočítáme z rovnice 5, kde  $S$  je plocha pólu a  $B$  je magnetická indukce. Plocha pólu je omezena rozměry motoru, maximální možná magnetická indukce je omezena saturací materiálu.

$$\phi = \int_S B \cdot dS \quad (5)$$

Prakticky se motor konstruuje tak, aby pro jmenovitý proud, který ještě motor tepelně unese, nedošlo k přesycení magnetického obvodu. Jouleovy tepelné ztráty souvisí s odporem vinutí, které je přímo úměrné délce vodiče a nepřímo úměrné průřezu vodiče.

### 2.2.3 Otáčky

Otáčky elektromotoru jsou závislé na momentové konstantě. Jak můžeme vidět z rovnice:

$$u_i = C_{ss} \cdot \phi \cdot \omega_m \quad (6)$$

indukované napětí motoru  $u_i$  je přímo úměrné otáčkám motoru  $\omega_m$ , magnetickému indukčnímu toku  $\phi$  a momentové konstantě  $C_{ss}$  motoru. Maximální napětí systému je omezeno zdrojem napájení. Pokud zanedbáme ztráty systému, tak dosahuje motor maximálních otáček takových, že indukované napětí motoru je rovno napětí zdroje napájení. Bez změny některých z parametrů (odbuzování) pak už není možné dále otáčky zvyšovat, protože zdroj už nedokáže přes motor protlačit proud.

#### 2.2.4 Ztráty

Při provozu pohonu vzniká ztrátový výkon, který se uvolňuje ve formě tepla. Ztrátový výkon je důsledek účinnosti systému a je-li příliš vysoký, pak může vlivem přehřátí způsobit škodu. Proto je třeba věnovat pozornost správnému dimenzování součástí i odvodu nežádoucího tepla [17].

Veliká část ztrátového výkonu celého elektrického pohonu vzniká právě v elektromotoru. Pokud se jedná o elektromotor s neodymovými magnety, tak je zároveň na toto ztrátové teplo velice citlivý.

Ztráty lze rozdělit na závislé a nezávislé na zatížení. Ztráty závislé značíme  $P_j$ . Vznikají vlivem průtoku proudu přes odpor vinutí. Jejich podíl na celkových ztrátách motoru může být více než 50%. Nezávislých ztrát je více druhů, jsou to:

- ztráty v magnetickém obvodu  $P_{Fe}$
- ztráty mechanické (ztráty v třecí a ztráty aerodynamické)  $P_m$

Dohromady se součet nezávislých ztrát značí  $P_0$  a nazývají se ztrátami naprázdno.

### 2.3 Druhy elektrických pohonů

Dle konstrukce elektrického motoru rozlišujeme několik významných kategorií motorů, které se hodí pro různé situace. Každý motor obsahuje stator (který zůstává stát) a rotor, který se otáčí vůči statoru.

#### 2.3.1 Stejnoseměrné motory

Stejnoseměrné motory jsou vývojově nejstarší. Rotační magnetické pole vytváří s pomocí mechanického komutátoru, který po pootočení rotoru vůči statoru obrátí směr proudu, čímž umožní kontinuální pohyb rotoru. Mechanický komutátor funguje pomocí klouzání uhlíkových kartáčů na válci s kontakty připojenými k cívice na rotoru. Tento komutátor se během provozu stroje opotřebovává a po čase je nutné uhlíkové kartáče vyměnit. V bodě kontaktu komutátoru vznikají výkonové ztráty.

### 2.3.2 Asynchronní motory

Asynchronní motor je konstrukčně nejjednodušší elektrický stroj. Pro činnost potřebuje točivé elektrické pole. Rotor obsahuje klecovou konstrukci, kterou po umístění do rotačního magnetického pole začne téct elektrický proud. Tento proud vytváří elektromagnet, který následně interaguje s točivým magnetickým polem statoru za vzniku vzájemného pohybu. Rychlost otáčení rotoru je nižší než rychlost otáčení magnetického pole statoru, poměr těchto rychlostí nazýváme skluz.

### 2.3.3 Synchronní motory

Synchronní motor také potřebuje točivé magnetické pole pro provoz, na rotoru je ale umístěn zdroj konstantního magnetického pole. Toto magnetické pole může být tvořeno buď permanentními magnety nebo cívkou, kterou protéká stejnosměrný proud. Po vytvoření točivého magnetického pole statoru sleduje rotor toto pole se stejnými otáčkami. V závislosti na zatížení se mění úhel mezi póly rotoru a statoru. V případě použití permanentních magnetů používáme pro synchronní motory zkratku PMSM. Tradičně se synchronní motory připojovaly na elektrickou síť a používaly se především jako vysoce výkonné generátory v elektrárnách [10]. Takové motory musí mít sinusový průběh elektromotorického napětí. To je zajištěno správným uspořádáním cívek statoru a magnetického pole rotoru.

Díky velikému technickému pokroku u silových polovodičů a magnetů je dnes možné podobné motory používat v menších rozměrech pro přesné polohování nebo pro trakci. Hlavní výhodou synchronních motorů je jejich vysoká účinnost a mechanická jednoduchost. Tento druh pohonu se většinou používá s měničem.

Existují hlavní dvě konstrukce PMSM stroje a to:

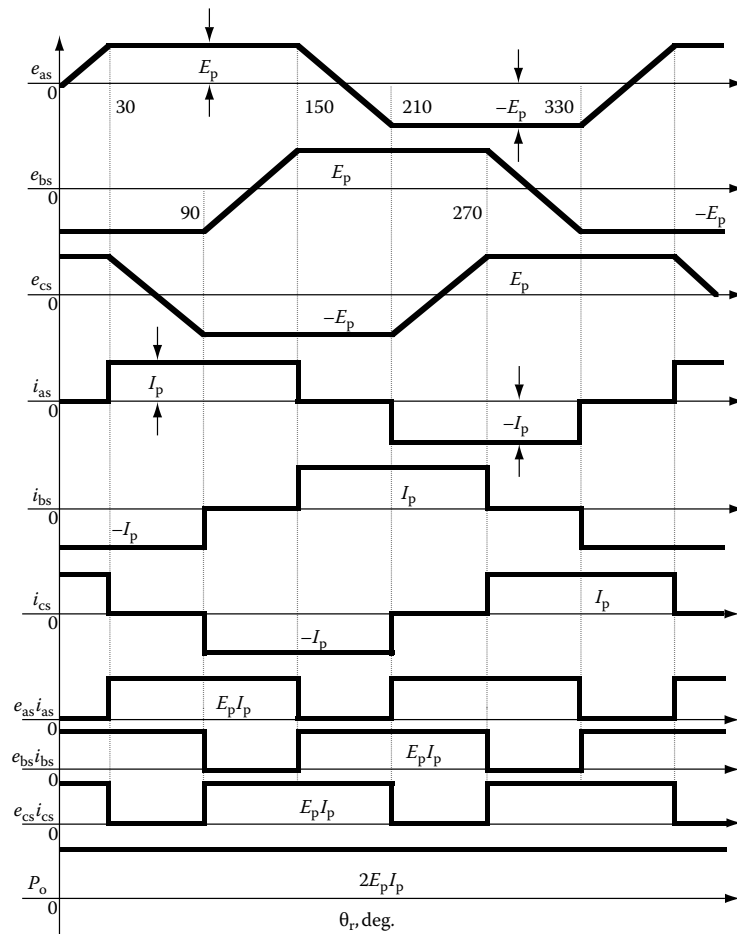
- radiální pole: směr magnetického pole je kolmý na osu rotoru
- axiální pole: směr magnetického pole je rovnoběžný s osou rotoru

V dnešní době se převážně stále používají stroje s radiálním polem. Axiální stroje mají výhodu ve vyšší výkonové hustotě a možnostech akcelerace [18].

Uspořádání magnetů na rotoru také výrazně ovlivňuje vlastnosti motoru. Stroje s magnety na povrchu dosahují vyšších výkonových hustot, stroje s magnety uvnitř pak vyšších maximálních otáček. Umístění ovlivňuje řízení, poměr  $L_q$  a  $L_d$  je u strojů s interními magnety různý od jedné. V některých strojích pak vzniká navíc vedle synchronního momentu i moment reluktanční.

### 2.3.4 BLDC motory

BLDC motory patří do skupiny motorů PMSM, jsou specifické svým trapezoidním průběhem elektromotorického napětí, viz graf 2. Hlavní výhodou motorů BLDC je v jejich jednoduchém řízení. Motor má 6 diskrétních pozic, které lze snadno snímat třemi sondami. Oproti tomu PMSM motory se sinusovým průběhem elektromotorického napětí potřebují pro řízení kontinuální snímání polohy, které vyžaduje dražší komponenty [18].



**Graf 2:** Průběh napětí a proudů fází BLDC motoru

Motory BLDC mají také vyšší výkonovou hustotu než PMSM, to je důsledkem toho, že poměr efektivní hodnoty ku maximální hodnotě magnetické indukce je vyšší u BLDC oproti PMSM [18].

Poměr výkonů je možné odvodit. Označme  $I_{ps}$  maximální hodnotou proudu statoru u PMSM a  $I_p$  maximální hodnotou proudu statoru u BLDC.

Pro efektivní hodnoty platí rovnice 7 a 8.

$$I_{sy} = \frac{I_{ps}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$I_d = I_p \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

Z rovnice pro Jouleovy ztráty ve statoru získáme vztah mezi maximálními proudy PMSM a BLDC, vyjádřený rovnicí 9.

$$I_p = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{ps} \quad (9)$$

Maximální hodnoty elektromotorických napětí obou strojů označíme  $E_p$ . Z průběhu napětí u BLDC, viz graf 2, je vidět, že pouze dvě ze tří fází vedou proud najednou. Z toho důvodu je okamžitý výkon tvořen vždy dvěma fázemi. Oproti tomu u PMSM jsou obecně využity všechny tři fáze.

Z těchto předpokladů můžeme sestavit rovnici 10 pro poměr výkonů BLDC a PMSM.

$$Pomer_P = \frac{P_{BLDC}}{P_{PMSM}} = \frac{2E_p I_p}{3 \frac{E_p}{\sqrt{2}} \frac{I_{ps}}{\sqrt{2}}} = 1.1547 \quad (10)$$

Rovnice předpokládá jednotkový účinník stroje PMSM.

Hlavní výhody BLDC motoru tedy jsou:

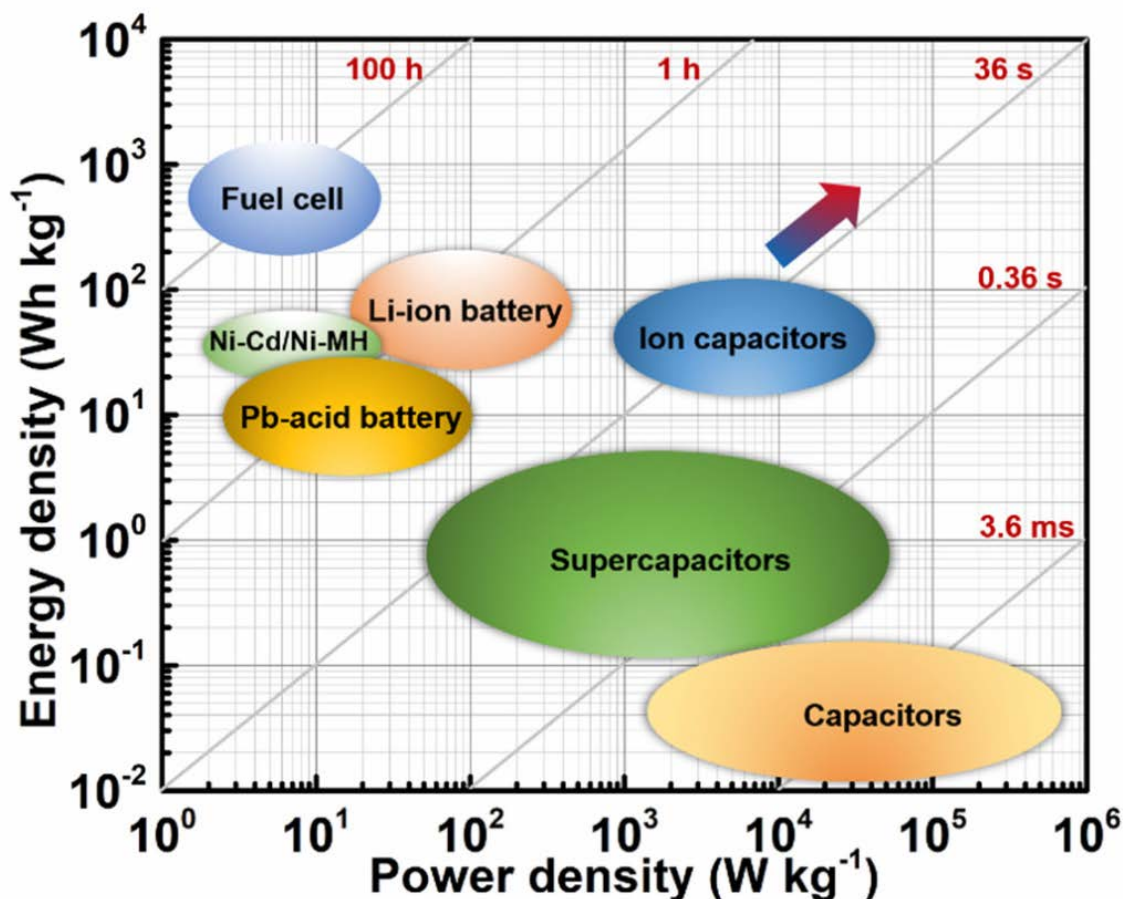
- pro stejné Jouleovy ztráty má BLDC o 15.4% vyšší výkonovou hustotu než PMSM
- snížené spínací ztráty v měniči, v jeden moment jsou činné pouze dvě ze tří fází
- proudy mají obdélníkový tvar, proto je jednodušší je vytvořit výkonovou elektronikou
- snížená komplexita systému odečítání polohy rotoru

Nevýhodou je zvlnění momentu, které je u BLDC motorů vlivem komutací vysoké. Proud fází má nějakou časovou konstantu, tato prodleva způsobí, že během komutace nastane okamžik, kdy stroj produkuje výrazně nižší moment. Toto zvlnění je u výkonnějších pohonů nepřijatelné.

Pro modelování nemůžeme použít d-q transformace, protože napětí nemají sinusový průběh [18]. Po zjednodušeném odvození získáme rovnici pro elektromagnetický moment 11. V rovnici je  $\lambda_p$  magnetický tok od permanentních magnetů,  $I_p$  je maximální hodnota proudu statoru u BLDC.

$$T_e^* = 2\lambda_p I_p^* \quad (11)$$

Ta zanedbává ztráty v železe, indukované proudy v rotoru vlivem harmonických polí



Graf 3: Základní parametry různých druhů skladování energie [34]

statoru a ztráty v magnetických obvodech, které se neuzavírají přes rotor.

Rovnice 11 říká, že moment je přímo úměrný proudu. Proud teče přes dvě vinutí, třetí vinutí není aktivní, proto jsou oba proudy stejné, viz graf 2.

## 2.4 Skladování energie

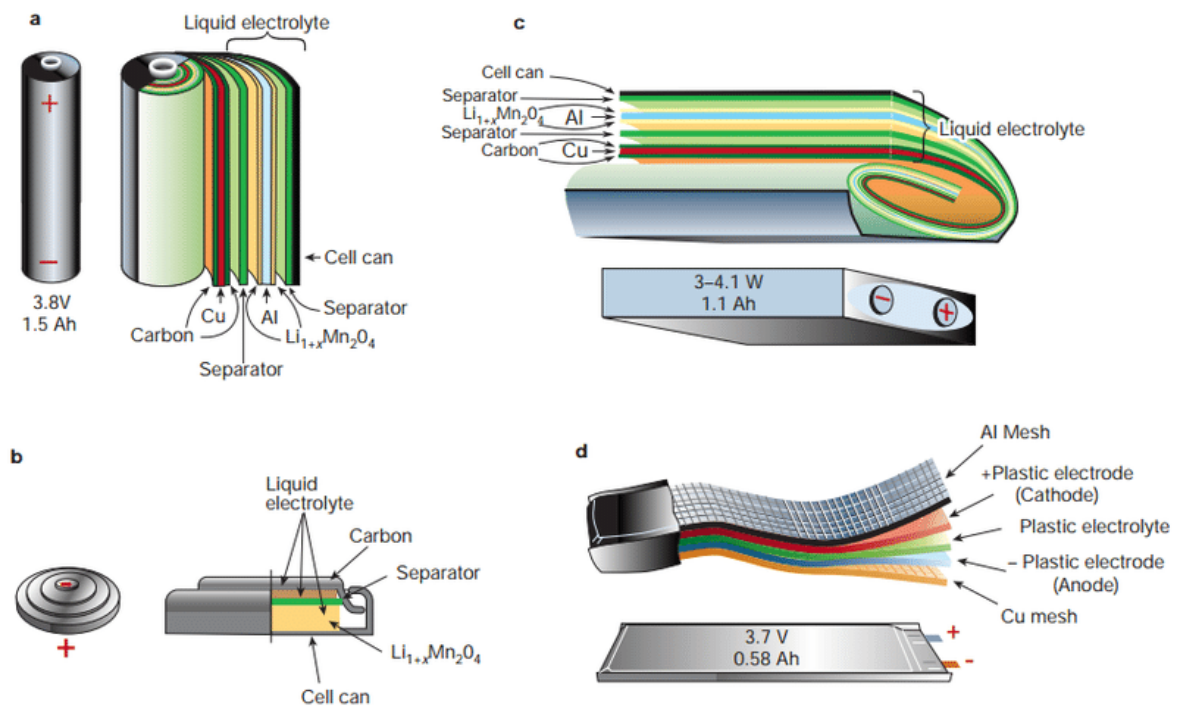
K realizaci hybridní studentské formule je potřeba zásobník energie. Pro vizualizaci základních parametrů různých způsobů skladování energie se používá graf s typickými energetickými a výkonovými hustotami, viz obr. 3. Ve všech aplikacích po zásobníku chceme co nejmenší rozměry, co nejnižší hmotnost, bezpečnost, vysoký výkon a velké množství skladované energie a to za dostupnou cenu. V praxi je vždy nutné najít kompromis mezi těmito parametry.

### 2.4.1 Chemické

Lithiové články skladují energii ve formě chemických vazeb [29]. Vznik a rozklad těchto vazeb může být velice rychlý a objemová i hmotnostní hustota uložené energie

je vysoká. Články je možné konstruovat různě, každá konstrukce pak má jisté výhody a nevýhody.

Podle způsobu zapouzdření aktivního materiálu článku existují 4 časté typy konstrukce, články cylindrické, články knoflíkové, články sáčkové a články prizmatické [22]. Články prizmatické, cylindrické a knoflíkové mají tvrdý obal, který zajišťuje stálý objem článku. Výhodou použití tohoto typu je jednodušší zástavba, větší bezpečnost a většinou také vyšší poměr uložené energie k hmotnosti článku, protože výrobce si může díky vnější mechanické ochraně do článku dát víc aktivního materiálu.



Obr. 4: Různé konstrukce článků [22]

Opakem tohoto přístupu jsou sáčkové články, kde aktivní materiál je chráněn vůči vnějšímu prostředí pouze elastomerovým sáčkem. Ten není odolný proti mechanickému poškození, je totiž velice měkký. Takové články vyžadují velkou opatrnost při manipulaci, neboť energie v nich je značná a nehodu je možné způsobit velice snadno. Tento druh článků má ale nejnižší vnitřní odpory a veliké výkonové hustoty, proto je jejich použití v kategorii FSE časté.

S touto konstrukcí článků se můžeme setkat ve spotřební elektronice, kde se nepředpokládá častý servis. Bezpečnost v takových aplikacích je dána tím, že v případě poruchy není mnoho energie na jednom místě, takže rozsah škody nebude tak veliký.

Každý typ článků má svá specifika na zástavbu, u cylindrických článků je konstrukce jednodušší protože o správné předpětí vrstev se stará výrobce, u sáčkových článků je potřeba udržet články předpjeté.



V každé z těchto kategorií lze daný článek z hlediska výroby optimalizovat buď na nízký vnitřní odpor a tím vysokou výkonovou hustotu, nebo na vysokou energetickou hustotu za cenu horších výkonových vlastností.

Pro snížení nákladů a dosažení jiných zajímavých vlastností se vývoj soustředí i na jiné typy článků než Lithium iontové. Pro různé druhy lithiových článků dle použité chemie byly zavedeny zkratky LCO, NCA, NMC, LFP a LTO.

Nejstarší technologie LCO(Lithium Cobalt Oxide) má stále nejvyšší specifické energie i výkonové hustoty, její nevýhodou je vysoká cena a nižší stabilita. S takovými články se setkáváme nejčastěji v elektronice, akumulátorovém nářadí a podobném menším zboží. Je možné je identifikovat podle názvu lithium-ion a jmenovitého napětí 3.7V.

V dnešní době se stále více používá technologie LFP(Lithium Iron Phosphate). Její hlavní výhodou je nižší cena zajištěná absencí kobaltu, delší životnost. Hlavní nevýhodou je nižší specifická energetická hustota oproti chemiím LCO, NCA i NMC. Charakteristickým prvkem těchto článků je jejich jmenovité napětí 3.3V.

#### **2.4.2 Elektrické**

Systémy skladování elektrické energie ve formě náboje se vyznačují nejvyššími možnými výkonovými hustotami. Uložená energie je ale nízká. Zařízení, které takto ukládá energii je kondenzátor. Existuje více různých konstrukcí - pro různá napětí.

Kondenzátory s nejvyššími poměry kapacity ku hmotnosti a rozměrům jsou mezi konvenčními elektrolytickými kondenzátory typicky hliníkové a tantalové. Kondenzátory, které dokážou uložit více energie jsou pak superkondenzátory, založené na principu elektrické dvojvrstvy. Nejnovější variantou s ještě vyššími výkony jsou Lithium-iontové kondenzátory, které fungují na podobném principu jako superkondenzátory, ale mají přidanou vrstvu lithia, která zvyšuje napětí a tím pádem i celkovou energii.

#### **2.4.3 Kinetické**

Je možné energii skladovat i v kinetické formě v setrvačnicích. Příkladem může být systém KERS ve Formuli 1 od roku 2009 [24]. Systém byl limitován maximálním možným přeneseným výkonem 60kW a uloženou energií 400kJ. Ve Formuli Student je zakázán.

## 2.5 Teorie závodních vozů

### 2.5.1 Disciplíny v soutěži formula student

Soutěž se skládá ze 4 dynamických disciplín, vozidlo je možné na každou z nich nastavit jinak. Elektrickou trakční část je možné provozovat na plný výkon v disciplíně Akcelerace, v disciplíně Autocross ji nastavíme tak, aby nedošlo k přehřátí a v disciplíně Endurance tak, aby v polovině nedošla elektrická energie a systém nemusel být náhle vypnut.

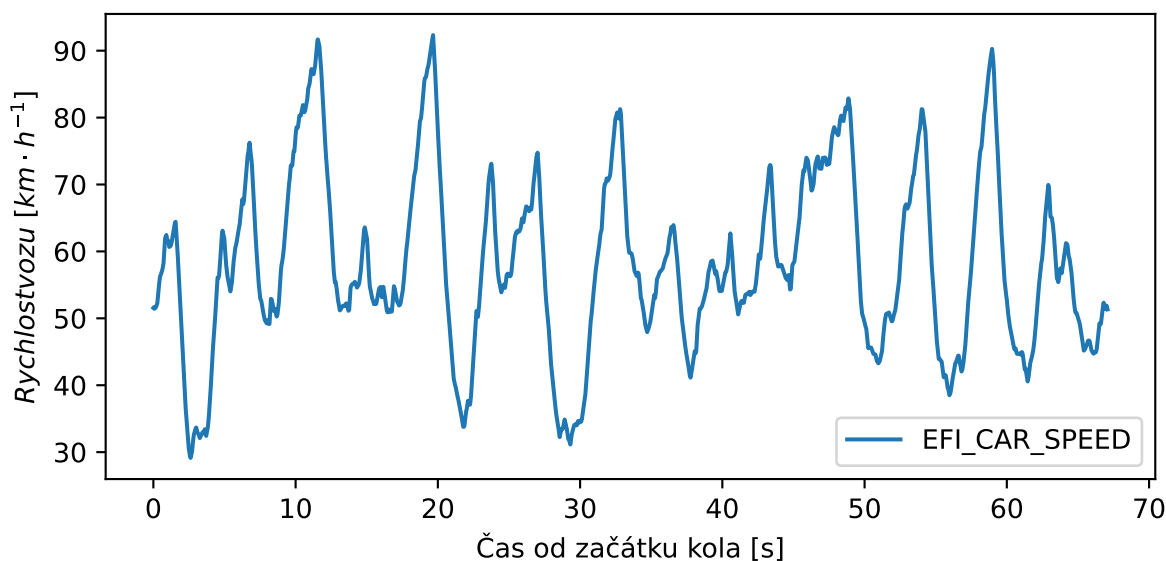
Pohled na problematiku tedy musí být komplexní, týmu jde především o maximalizaci počtu bodů napříč disciplínami. Akcelerace a Skidpad jsou hodnoceny až 75 body, Autocross 100 body, Endurance 325 body a Efficiency 100 body. Většina návrhových rozhodnutí vůz posune k lepším výsledkům v některé disciplíně a v jiné výsledky zhorší.

- Akcelerace hodnotí, za jakou dobu vůz urazí vzdálenost 75 m v rovné čáře.
- Skidpad se jezdí v kruhu, je hodnocena maximální možná boční akcelerace, pro kterou vůz neztratí trakci.
- Autocross je krátký sprint, vůz ujede kolem 700 m. Nemusíme se tedy tolik potýkat s tepelným namáháním, protože se komponenty nestihnou dostat do teplotního rovnovážného stavu.
- Endurance je dlouhý závod na 22 km, zde se už potýkáme s dlouhodobým provozem všech systémů auta, s nedostatkem benzínu či energie baterií a přehříváním.

Protože se jedná o soutěž pro studenty, na tratích se z důvodu bezpečnosti jezdí nižší rychlostí než u ostatních závodů. Tratě na disciplínách Endurance a Autocross mají pravidly určeny tato omezení:

- rovinky - nesmí být delší než 80m
- táhlé zatáčky - maximální průměr 5m
- serpentiny - minimální vnější průměr 9m
- slalomy - kuželky na přímce, se vzájemnou vzdáleností 7.5m až 12m
- minimální šířka tratě 3m

Rychlost tedy přímo omezena není, technické možnosti spalovací kategorie ale prakticky omezují maximální rychlost na 110km/h.



**Graf 4:** Graf rychlosti vozu během jednoho kola závodu Endurance

## 2.5.2 Požadavky závodního vozu

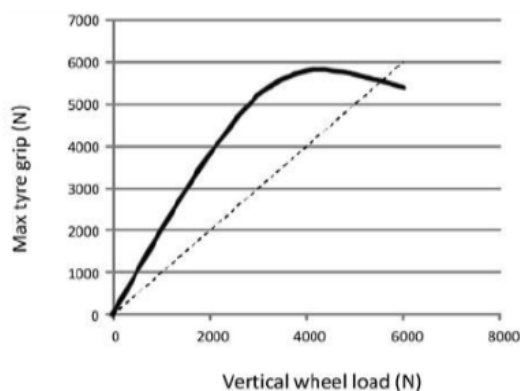
Úkolem závodního vozu je ujet závod v nejkratším možném čase [27]. Závodní vůz tedy musí:

- mít dostatečný výkon pro co nejvyšší zrychlení
- brzdit co nejpozději na co nejkratší brzdné dráze
- projet zatáčky co nejvyšší rychlostí, která je dále zachována

Z grafu 4 můžeme vidět, že řidič vozidlo prakticky nikdy neudrží při konstantní rychlosti. Vozidlo je stále vystavováno zrychlování. To je buď v ose x (longitudinální), které způsobuje změnu dopředné rychlosti nebo v ose y (laterální), které způsobuje změnu směru vozu. Laterální zrychlení nastává při zatáčení, longitudinální při zrychlování a brzdění.

Zajímavé jsou strmosti tangent při zrychlování a zpomalování. Z grafu je vidět, že jsou odlišné, zpomalování je rychlejší než zrychlování. To je způsobeno třemi faktory. Zrychlování při vyšších rychlostech je omezeno konečným výkonem motoru. Při nižších rychlostech je naopak problém, že dopředná síla bývá aplikována pouze přes jednu nápravu. Brzdění využívá všechny 4 pneumatiky vozu. Poslední faktor je aerodynamický odpor, který auto zpomaluje i bez jakéhokoliv přenášení síly přes pneumatiky.

Z Newtonova 2. pohybového zákona víme, že objekt v rovnoměrném přímočarém pohybu setrvává, pokud na něj nepůsobí vnější síla. Tato vnější síla u vozidel vzniká v bodě dotyku pneumatik s vozovkou. Říkáme jí trakční síla, její velikost pak určuje schopnost vozu měnit svoji rychlost.



**Graf 5:** Graf závislosti trakční síly na normálové síle [27]

Z mechaniky umíme tuto sílu teoreticky spočítat pomocí jednoduchého vzorce  $F_T = F_N \cdot \mu$ , kde  $F_T$  je trakční síla,  $F_N$  je normálová síla a  $\mu$  je koeficient přilnavosti.

Ze vzorce by se mohlo zdát, že na hmotnosti vozu tolik nezáleží, protože těžší vůz vyvine vyšší  $F_N$ . To povede k lineárně vyšší  $F_T$ , která umožní vozu hmotnost přemísťovat z 2. Newtonova pohybového zákona ( $a = \frac{F_T}{m}$ ) stejným zrychlením. Bohužel u pneumatik není toto jednoduché pravidlo splněno.  $F_T$  se sice zvyšuje s  $F_N$ , ale pro vyšší  $F_N$  s nižší strmostí až do přetížení pneumatiky, kdy dokonce začne  $F_T$  s rostoucím  $F_N$  klesat, viz graf 5.

S těmito mechanickými závislostmi je nutné počítat při návrhu pohonu vozu. Detailnější pohled na problematiku je možné získat prozkoumáním jevů, probíhajících při zrychlování vozu.

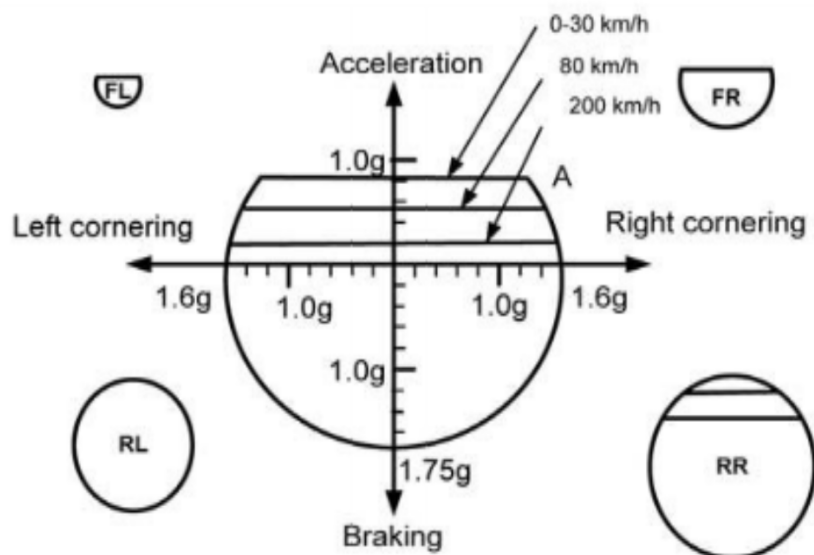
Zrychlování můžeme rozdělit do dvou fází. V první fázi je vozidlo omezeno trakční silou. Na kola je možné aplikovat velké kroutící momenty, které jsou vyšší než moment tvořený trakční silou a průměrem kola. Pak dojde k prokluzu nápravy, což dále sníží trakční sílu. V této fázi je vhodné využít veškeré dostupné prostředky k zabránění dalšímu prokluzu, a dále aplikovat maximální možný moment, který je náprava schopná přenést.

Při dosažení určité rychlosti nastává druhá fáze zrychlování. Z rovnice  $P = M \cdot \omega$  je zřejmé, že pokud máme omezený výkon, bude potřeba k dalšímu zvyšování rychlosti  $\omega$  snížit moment. Při dalším zvyšování rychlosti rostou odporové síly, obzvláště aerodynamická síla. Dojde k rovnováze sil a vozidlo udržuje terminální rychlost.

Při zrychlování auta je trakční síla  $F_T$  aplikována v rovině vozovky, ale setrvačná síla bránící zrychlování vozu je aplikována v místě těžiště vozu. Protože tyto síly nepůsobí ve stejné výšce, vzniká moment, který je kompenzován tím, že zadní náprava je přitěžována a přední odlehčována. Tento jev je nežádoucí, protože z popisu vzniku  $F_T$  vyplývá, že čím větší je přenesení váhy, tím více celkové trakční síly na všech kolech ztratíme vlivem nelineárního vztahu mezi  $F_T$  a  $F_N$ . Stejný jev je možné sledovat i při

průjezdu zatáčkou, přenesení pak probíhá mezi pravou a levou stranou vozu. Tento jev je hlavním důvodem, proč se u závodních vozů snažíme umístit těžiště co nejnižže.

Trakční síly a hmotnost vozu můžeme přepočítat na zrychlení. Možnosti zrychlení ve všech směrech je pak možné vynést do g-g diagramu. Vlivem aerodynamických sil a výkonových omezení není g-g diagram konstantní, pro různé rychlosti vozu se mění.



Obr. 5: g-g diagram pro jednotlivá kola vozu, vlivem přenosu váhy při průjezdu zatáčkou [27]

## 3 Praktická část

### 3.1 Vliv hybridního pohonu na vůz

#### 3.1.1 Umístění a cílový výkon pohonu

Před výběrem komponentů bylo nutné rozhodnout, jaké umístění elektromotorů zvolit. Elektrická trakce může spalovacímu vozidlu pomoci ve fázi zrychlování, případně při přechodových jevech.

Vzhledem k už existující pohonné soupravě na zadní nápravě formule by mohl být elektrický pohon méně komplikovaně a tím pádem s nižší celkovou hmotností finálního vozu aplikován na zadní nápravu. Tam by mohl pomoci v situacích, kdy už je zrychlování vozu omezeno výkonem. To nastává na dlouhých rovinkách. Tratě v soutěži FSC jsou ale sestaveny z krátkých rovinek a velkého množství zatáček a slalomů, proto je omezení výkonem méně časté než omezení trakcí.

Jak vidíme z g-g diagramu na obrázku 5, pneumatiky dokážou přenést sílu v jakémkoliv směru, její celková velikost je ale omezená. Pokud je cílem zrychlování ze zatáčky, je důležité udržet správný poměr boční a dopředné složky síly, překročení

limitu síly vede k prokluzu kol. Pokud má vůz hnanou pouze jednu nápravu, může dopředný potenciál při zrychlování ze zatáčky využít jenom na ní. Nehnaná náprava je pak použita jenom k přenosu boční síly, čímž nevyužíváme jejího potenciálu.

Z toho důvodu je výhodnější umístit elektromotory elektrického systému do předních kol. Tím získáme možnost využít dopředný potenciál vycházející z g-g diagramu i na přední nápravě. Přenos váhy popsaný pro zrychlování dále platí i pro brzdění, což zjednodušuje aplikaci rekuperace, protože přední náprava je při brzdění přítěžována, viz str. 24.

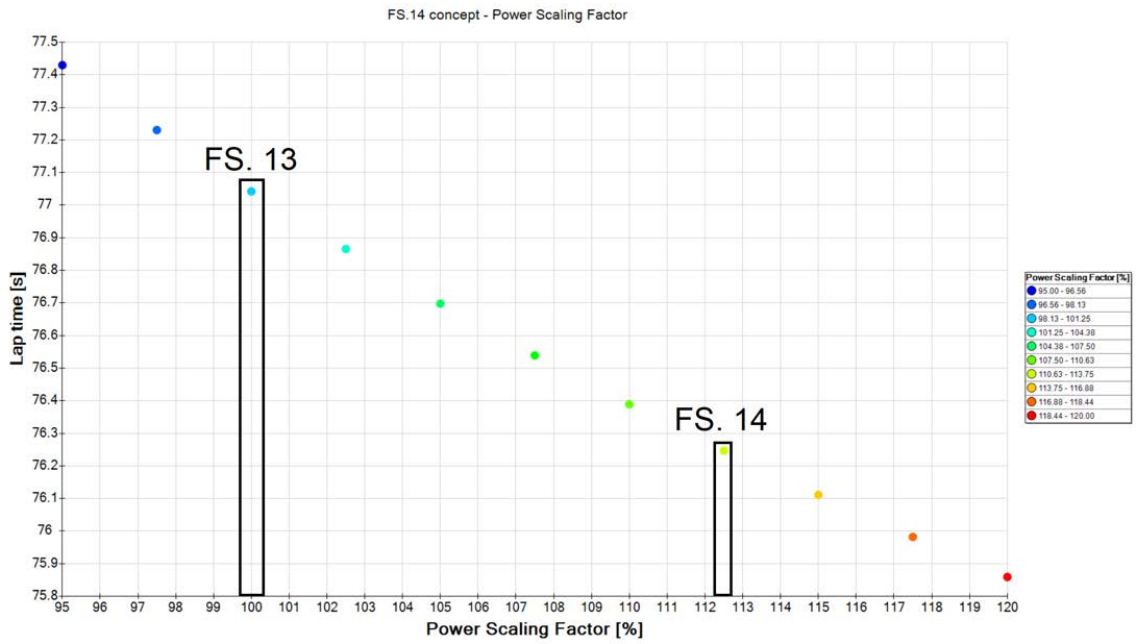
Po stanovení umístění systému zbývalo rozhodnout, jak silný systém zvolit. Nejvhodnější řešení je složité určit, protože vůz je komplikovaný systém. Vhodnému řešení se můžeme přiblížit, pokud zjistíme, jaký vliv na výsledný vůz mají parametry nového elektrického trakčního systému.

Úkol návrháře závodního vozu je minimalizace času průjezdu tratí. V případě, že bychom jej dokázali alespoň přibližně spočítat můžeme určit, co od systému požadujeme.

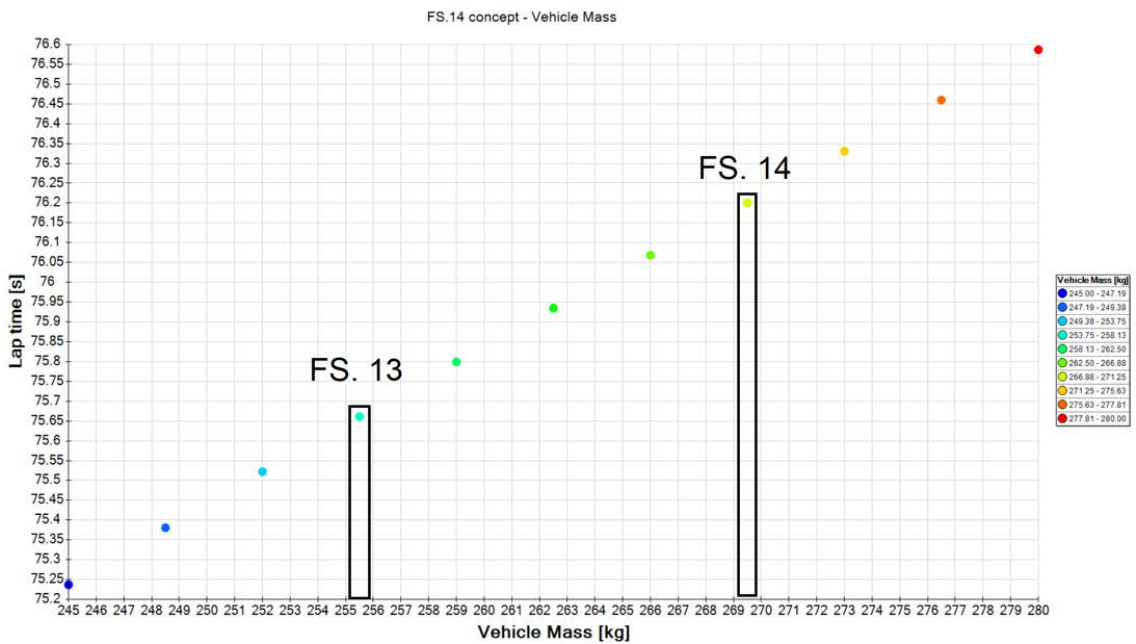
K určení času průjezdu tratí slouží výpočetní programy, které provádí "laptime simulace". Ty nejjednodušší (ustálené) udělají z auta hmotný bod, kterému ze zadaných veličin (aerodynamický přítlak a odpor, hmotnost, koeficient tření pneumatik, výkon motoru atd.) spočítají, jaké na něj mohou působit maximální síly. Pokud tento bod pak necháme cestovat po předem zvolené trajektorii s požadavkem udržení co nejvyšší rychlosti, ze zadaných veličin získáme teoretický nejlepší možný čas průjezdu tratí.

Klasické programy pro výpočet času průjezdu tratí, například program OptimumLap, dokáží simulovat jenom konstantní zvětšení výkonu, jaké by bylo při disciplíně Autocross. Jako první odhad jsem takový program použil i pro vůz FS.13. Program umí spočítat čas kola pro mnoho různých konfigurací vozu. Hybridní pohon zvýší výkon, hmotnost a pasivní odpory. Závislost času na kolo na změně těchto parametrů je vidět na grafech 8, 7 a 6. Na grafech jsou vyznačeny výchozí body, které označují dosažené parametry s vozem FS.13 a parametry dosažené s novým vozem FS.14. Z výpočtů vychází, že pokud na přidání výkonu 1kW potřebujeme přidat 2.8kg hmotnosti, pak se vlastnosti auta nezmění. Podle programu OptimumLap by tedy vůz FS14, s hybridním systémem o výkonu 7.5kW a hmotnosti 14kg měl dosáhnout o 0.2s lepší čas kola v disciplíně Autocross.

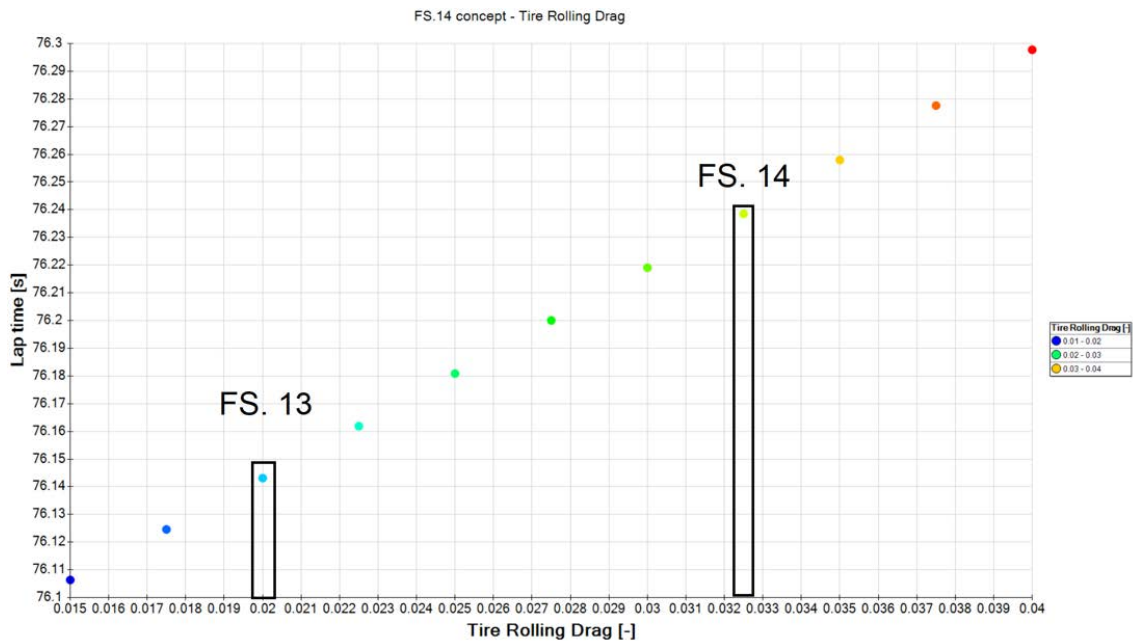
Protože hybridní systém má určitou minimální hmotnost a minimální komplexitu, je výhodné jej postavit s maximálním prakticky dosažitelným výkonem.



**Graf 6:** Citlivost vozu na změnu výkonu vycházející z laptime simulace (Nižší hodnota znamená lepší čas kola)



**Graf 7:** Citlivost vozu na změnu hmotnosti vycházející z laptime simulace (Nižší hodnota znamená lepší čas kola)



**Graf 8:** Citlivost vozu na změnu valivého odporu (reprezentující přidané ztráty) vycházející z laptime simulace (Nižší hodnota znamená lepší čas kola)

### 3.1.2 Volba klíčových parametrů baterie

Před výběrem konkrétního typu zásobníku energie je nutné stanovit, co přesně požadujeme. Je potřeba se soustředit na možnosti tratí ve studenské formuli, abychom neoptimalizovali baterii na parametr, který výsledně není důležitý. Otázkou je poměr maximálního výkonu a kapacity, což jsou dva parametry které jdou při dané hmotnosti proti sobě. Chci znát odpověď na otázku, jaký přínos má brzka aplikace výkonu oproti pozdější a dlouhodobější.

### 3.1.3 Vývoj software pro analýzu dat

Problémem laptime simulací je, že příliš zjednodušují všechny děje, kterým je auto vystaveno. Protože hybridní systém je aktivní pouze na některých sekcích závodu, nabízí se možnost simulovat jej pouze v těchto sekcích. Ostatní data je možné převzít beze změny. Výhodou takového přístupu bude rychlost výpočtu, veliká možnost aplikace různých strategií řízení a možnosti budoucího rozšíření.

Nevýhodou je, že neuvažujeme vliv hybridního pohonu na převzaté sekce z dat. Tam by auto vlivem přidané hmotnosti mělo být pomalejší. Toto zanedbání by ale mělo mít menší vliv než veškeré zanedbané proměnné při výpočtu z hmotného bodu, tak jak fungují ustálené laptime simulace.

Pro tyto výpočty jsem použil jazyk Python. Ten nabízí vospělé knihovny pro zpracování a vizualizaci dat [21]. Pro účely této práce byly využity knihovny Pandas a Matplotlib. Python jsem provozoval z prostředí Jupyter, které je analýze dat dobře



přizpůsobeno. Je v něm možné spouštět jednotlivé příkazy a pak přímo sledovat vliv na data.

V datech ze závodů tedy algoritmicky určím, kde auto zrychluje. V těchto místech vytvořím umělý kanál rychlosti, který rychlost vozu spočítá zjednodušeně z kinetické energie, dodané pohonným ústrojím po odečtení ztrátových výkonů. Umělý rychlostní kanál pak mohu srovnat se skutečným a dále pozměnit vstupní parametry simulace, aby rychlosti co nejlépe seděly. Čas z modelu získám tak, že v daném úseku zrychlování srovnám integrál rychlosti, určený ze skutečné rychlosti vozu, s integrálem rychlosti matematického modelu. Z rozdílu času, kdy se dráha matematického modelu rovná dráze určené ze skutečné rychlosti, a času konce segmentu, pak mohu spočítat ušetřený čas. Pokud by matematický model byl pomalejší než skutečnost, pak se ušetřený čas rovná 0, i výsledek matematického modelu vozu s čistě spalovacím motorem tedy bude rychlejší než skutečná data, protože pomalejší segmenty se nezapočítají. Proto musím vždy srovnávat modely vůči sobě.

Aby matematický model co nejlépe odpovídal skutečným datům, potřebuji správně určit počáteční parametry vozu. Změna kinetické energie se například neprojevuje pouze v přímočarém pohybu celé hmoty vozu, ale zároveň v roztočení hmot kol, diferenciálu, řetězu apod. Místo hmotnosti vozu budu proto dosazovat ekvivalentní hmotnost, která bude mít stejnou kinetickou energii jako celý systém pro danou rychlost. Pro každý komponent mohu tuto hmotnost spočítat z rovnosti kinetické energie, viz rovnice 12.

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (12)$$

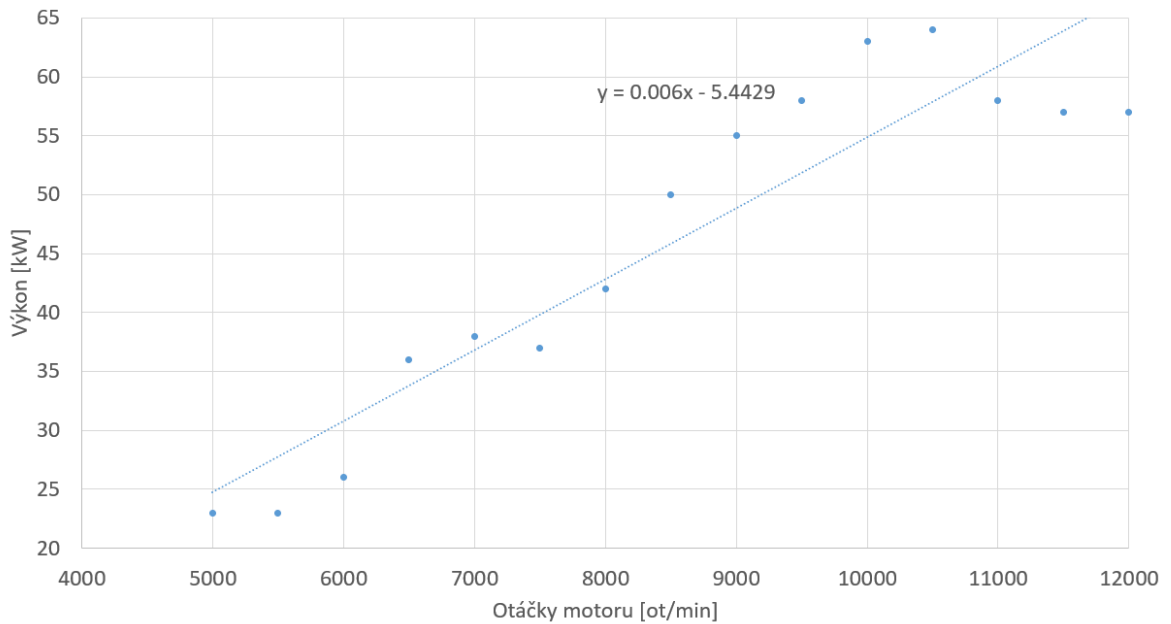
Pro úhlovou rychlost valící se pneumatiky platí rovnice 13, ekvivalentní posouvající se hmotu můžeme proto spočítat z rovnice 14.

$$\omega = \frac{v \cdot 2\pi}{O_{kola}} \quad (13)$$

$$m_{eq} = J_{kola} \cdot \left(\frac{2\pi}{O_{kola}}\right)^2 \quad (14)$$

Pro používané 18" pneumatiky Hoosier s hmotností 3.63 kg můžeme spočítat, že k hmotnosti vozu musíme přičíst 3.2 kg, abychom zahrnuli i energii potřebnou k roztočení této setrvačné hmoty.

Celková hmotnost, kterou je potřeba přičíst po zahrnutí hlavních rotačních komponent na voze (díly motoru, převodovky, řetěz, diferenciál, hnací hřídele, kolová sestava) je pro vůz FS.10, pro který byla nasbírána zpracovávaná data, 20 kg.



**Graf 9:** Výkonová charakteristika motoru Yamaha R6

Další potřebný parametr do simulace je výkonová křivka motoru. Použil jsem linearizovanou vnější charakteristiku pro maximálně otevřenou škrtkící klapku plynu, viz graf 9. Výkon jsem pak s pozicí plynu snižoval lineárně. Výkon spalovacího motoru je dále uvažován jako nulový v případě, že probíhá řazení. Další parametry, které jsem do modelu doplnil, jsou data o valivém a aerodynamickém odporu a účinnosti převodů.

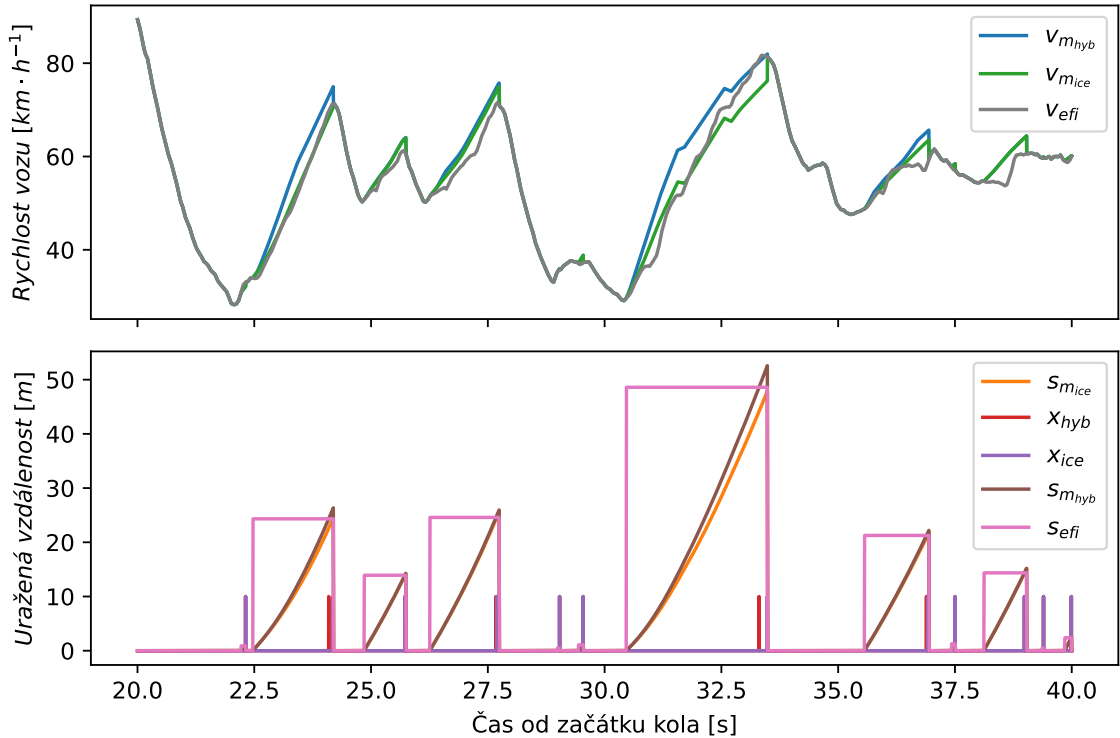
Z tohoto modelu sestavím umělý rychlostní kanál pro spalovací vůz. Rychlostní kanál pro hybridní vůz pak vytvořím stejným způsobem, jenom k výkonu spalovacího motoru přičtu očekávaného výkon elektrického pohonu a zvýším hmotnost vozu o hmotnost hybridního systému, která bude přibližně 15kg.

Pro vizualizaci modelu pak vykreslím časový průběh rychlostí ve vyšetřovaných segmentech, viz graf 10. V druhé části grafu je pak vidět integrál rychlostí z modelů.

Skutečná rychlost je označena " $v_{efi}$ ", rychlost spočítaná modelem pro původní vůz " $v_{m_{ice}}$ ", rychlost spočítaná modelem pro hybrid " $v_{m_{hyb}}$ ", uražená vzdálenost modelu původního auta " $s_{m_{ice}}$ ", skutečná vzdálenost segmentu " $s_{efi}$ ", uražená vzdálenost modelu hybridu " $s_{m_{hyb}}$ ", bod stejné uražené vzdálenosti modelu původního auta " $x_{ice}$ " a bod stejné uražené vzdálenosti modelu hybridu " $x_{hyb}$ ".

Pro disciplínu Endurance není možné výkon hybridního systému aplikovat vždy, protože by se baterie vybila. Při výběru článků nás proto zajímá i poměr rekuperované energie a energie uložené v baterii na startu závodu. Pokud by možnosti rekuperace během závodu byly omezené, pak by mohlo být použití článků s vysokou kapacitou výhodnější než použití článků schopných rekuperovat co nejvyšší výkon.

Pro určení tohoto poměru byla provedena podobná analýza. Pro různé teoretické



**Graf 10:** Porovnání průběhu rychlostí matematických modelů a skutečných dat

konfigurace článků byly spočítány jejich výkony při akceleraci a rekuperaci. Rekuperace byla uvažována velice optimisticky, tj. pro maximální výkon článků vždy, když se řidič nedotýká plynového pedálu. Z výkonů, časů a počáteční energie uložené v baterii je možné dopočítat, kolik energie zbyde v baterii na konci závodu.

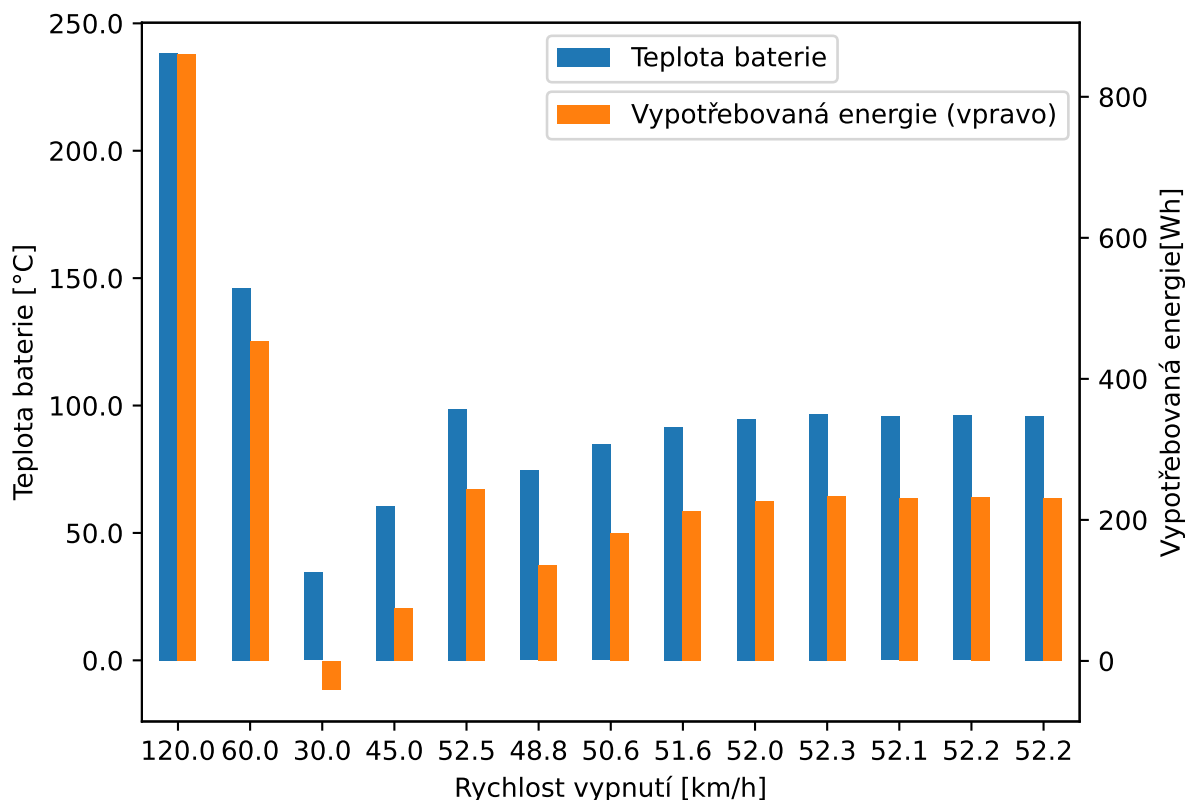
Pro kratší disciplínu Autocross je důležitý parametr výsledná teplota baterie. Abych vypočítal její nárůst, potřebuji znát poměr užitečné práce baterie a práce ztracené na teplo. Tuto účinnost baterie spočítám zjednodušeně z poměru napětí dostupného pro měnič při maximálním odběru proudu a napětí nezatíženého článku, viz 15. Postup je velice zjednodušený, zanedbává mnoho vnitřních procesů v článku. Zjednodušení je obhájeno na straně 45.

$$\eta = \frac{U_{max} - I_{max} \cdot R_{bat}}{U_{max}} \quad (15)$$

Výkonové cylindrické LFP články při nejvyšších vybíjecích proudech dosahují účinnosti 77 %, výkonové LCO sáčkové články 90 %. Cylindrické LCO články mají účinnost 85 %.

Výrobci udávají u článků především kapacitu v mAh, tu přepočítám na energii jejím vynásobením s jmenovitým napětím článku. Tato energie je pak využita jak na užitečnou práci mimo článek, tak i na ztráty v článku. Na trakti se pak může použít pouze ta energie, která netvoří ztráty.

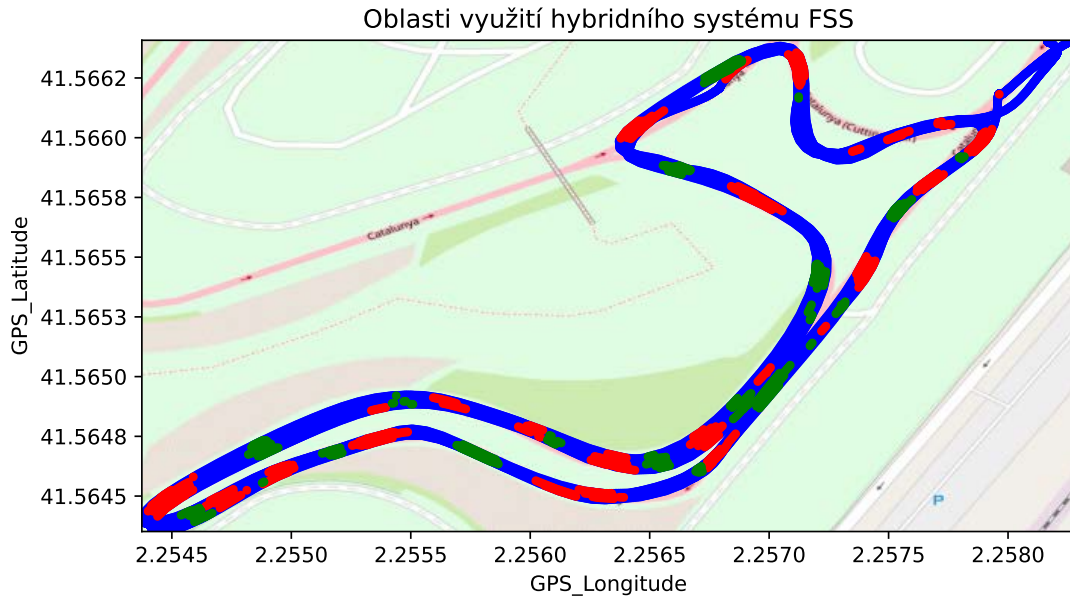
Pro určení limitů využití baterie jsem naprogramoval algoritmus binárního hledání, který pro daná data určí, při jaké rychlosti je nutné hybridní systém vypnout, aby energie vystačila na celý závod Endurance, případně abychom nepřehřáli baterii při disciplíně Autocross. Průběh binárního hledání, nastaveného pro disciplínu Endurance je vidět na grafu 11. Hodnoty konečné vypínací rychlosti vychází odlišně pro různé články použité v baterii, ty s vysokou kapacitou mají vyšší vypínací rychlost.



**Graf 11:** Průběh binárního hledání

Vizualizace omezení oblastí využití hybridního pohonu v disciplíně Endurance je na obr. 6, kde je na skutečné trati červenou barvou označeno, kdy je možné používat hybridní systém pro zrychlování (ve vyznačených datech do rychlosti  $55 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$ ) a zelenou barvou, kdy je možné rekuperovat (sekce brzdění).

Vliv vypínací rychlosti na čas kola je určen jejím zanesením do výkonu vozu v výše zmíněném modelu určení ušetřeného času. V rovnici pro celkový výkon je tedy do vypínací rychlosti započítán spalovací motor i výkon článku, po vypínací rychlosti už jenom spalovací motor. Díky tomu můžeme srovnat všechny zkoumané články a přiřadit jim ušetřený čas. Takto zpracovaná data jsem přiložil k tabulkám se seznamem parametrů různých konfigurací článků, viz tab. 3 a 4.



Obr. 6: Příklad využití hybridního systému na trati ve Španělsku

## 3.2 Konstrukce baterie

### 3.2.1 Výběr článku

Konstrukce baterie je omezena pravidly soutěže, je dána maximální hmotnost 3 kg a maximální napětí 60V. Je výhodné použít co nejvíc hmotnosti na články, protože právě ty tvoří kapacitu a výkon baterie. Dle zvolených článků se bude měnit jmenovité napětí baterie a její další parametry.

Jmenovité napětí baterie ovlivňuje možnosti mechanického převodu elektromotoru. Točící se elektromotor vytváří elektromotorické napětí. Když je toto napětí vyšší než napájecí napětí zdroje, pak měnič ztrácí kontrolu nad proudem tekoucím motorem, a ten tím pádem může téct přes mosfetové diody zpět do baterie. Takový proud bude vytvářet brzdný moment a bude také nekontrolovaně nabíjet baterii. Systém tedy musí být navržen tak, aby se do takového stavu nedostal.

Z analýzy jízdních dat vyšlo, že nejvyšších rychlostí formule dosahuje při disciplíně Akceleraace, a to 109 km/h. Převodový poměr byl navržen tak, aby v případě vyšší než plánované hmotnosti komponentů baterie bylo možné snížit počet článků v sérii o jeden. Elektrický pohon se i při této okolnosti nedostane do generátorického režimu.

Při výběru bylo potřeba vždy zanalyzovat, jaké parametry bude mít výsledná kombinace článků. Celkem jsem prozkoumal 33 různých článků, v této práci uvádím ty nejzajímavější, těchto typů konstrukcí a materiálů:

- LCO
  - cylindrická - nejlepší konfigurace - VTC5A

- sáčková - Melasta - SLPB5944143
- sáčková - Grepow - GRP 7549135 40
- sáčková - Electric Power - EP8745160HL
- LFP
  - cylindrická - Lithium Werks - APR18650M1
  - cylindrická - Lithium Werks - ANR26650M1B
  - sáčková - Grepow - GRP 7580090
- LTO
  - cylindrická - LWT - LTO1865-13

Pro určení hmotnosti, kterou je možné vyhradit pro články jsem provedl odhady hmotnosti všech ostatních komponent v baterii:

- |                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| – relé                             | 366 g |
| – krabice                          | 350 g |
| – spoje článků                     | 80 g  |
| – rámečky článků                   | 31 g  |
| – elektronika - senzory, konektory | 12 g  |
| – senzory teploty                  | 11 g  |

Ostatní nutné komponenty uvnitř baterie váží 869 g, na články tedy zbývá 2150 g.

Výběr článků je dobré provést ještě před výběrem motoru. Důležité je maximalizovat výsledný výkon baterie při jakémkoliv napětí, protože vhodnou volbou motoru a převodového poměru je možné dosáhnout libovolného průběhu elektromotorického napětí. Nevýhodou je zhoršená účinnost takového řešení kvůli nutnosti použít vyšší proudy za nižšího napětí, tu ale dokážeme vykompenzovat volbou většího průřezu vodičů.

Vzhledem k většímu množství článků je vhodné zvolit počty sériových a paralelních článků algoritmicky. Zvolený postup má tyto kroky:

- celkový požadovaný počet článků určíme podílem celkové dostupné hmotnosti pro články a hmotností jednoho článku
- vypočtený počet článků celočíselně vydělíme možnými počty paralelních článků - tím získáme počet článků v sérii pro různé počty paralelně
- vypočítáme jmenovité napětí celé baterie pro všechny konfigurace
- vybereme konfiguraci která má napětí z dovoleného rozsahu, nejnižší dovolené

napětí je 45V, nejvyšší pak 60V

- pokud z výpočtu nevychází žádná vhodná konfigurace, pak můžeme výpočet ovlivnit snížením počtu článků určených v kroku 1. Tím můžeme získat pro každý článek použitelnou konfiguraci do trakční baterie.

V tab. 3 a 4 jsou uvedeny parametry každého vyšetřovaného článku a vlastnosti sériovo-paralelní konfigurace vyrobené baterie.

Chemie a formát	LCO CYL	LCO PCH	LCO PCH	LCO PCH
Označení výrobce	VTC5A	SLPB5944143	GRP 7549135 40	EP8745160HL
Impedance [mΩ]	10	2.5	1.4	0.72
Maximální napětí [V]	4.25	4.2	4.2	4.2
Jmenovité napětí [V]	3.6	3.7	3.7	3.7
Nejnižší napětí [V]	2	3		3
Hmotnost článku [g]	47.1	79.5	99	123
Kapacita [mAh]	2600	3800	4500	5100
Kontinuální $I_{ch}$ [A]	6	7.6	12	25
Špička $I_{ch}$ [A]	6	15.2	12	76
Kontinuální $I_{dc}$ [A]	35	114	120	510
Špička $I_{dc}$ [A]	35	133	202.5	765
$t_{max_{ch}}$ [°C]	60	0-45	10-45	0-45
$t_{max_{dc}}$ [°C]	60	-20-60	10-45	-20-60
Konfigurace	15s3p	13s2p	16s1p	16s1p
$\Delta U$ článku @ $I_{max}$ [V]	0.35	0.3325	0.2835	0.5508
$P_{dc}$ článku [W]	113.8	447.9	691.8	2409.1
$P_{ch}$ článku [W]	21.6	56.2	44.4	281.2
Celkový $P_{dc}$ [W]	5118.8	11644.8	11069.5	38546.2
Celkový $P_{ch}$ [W]	972	1462.24	710.4	4499.2
Hmotnost článků [g]	2119.5	2067	1584	1968
Energie [Wh]	421.2	365.6	266.4	301.9
$\tau_{saved}$ Endurance [s]	0.4	2.0	0.2	4.4
$t_{fin}$ Endurance [°C]	49.2	47.0	36.5	81.4
$\tau_{saved}$ Autocross [s]	0.6	3.1	2.9	5.6
$t_{fin}$ Autocross [°C]	35.7	49.0	43.5	77.5

**Tab. 3:** První soubor vyhodnocovaných článků

Pro každou konfiguraci článků jsem spočítal ušetřený čas v disciplínách Autocross a Endurance s pomocí algoritmu, popsaném na str. 28. Důležitý je poměr ušetřeného času v disciplíně Autocross a ušetřeného času v disciplíně Endurance, který je kvůli omezené kapacitě baterie nižší.

Články sáčkového typu mívají v datových listech specifikovaný vysoký maximální vybíjecí proud. Jejich nejvyšší dovolené nabíjecí proudy ale bývají desetinné oproti proudům vybíjecím. Díky umístění motorů na přední nápravě má vůz FS.14 možnost rekuperovat veliké výkony, proto jsem hledal články, které by měly vybíjecí a nabíjecí

Chemie a formát	LFP CYL	LFP CYL	LFP PCH	LTO CYL
Označení výrobce	APR18650M1	ANR26650m1b	GRP7580090	LTO1865-13
Impedance [mΩ]	15	6	1.3	1
Maximální napětí [V]	3.6	3.6		2.8
Jmenovité napětí [V]	3.3	3.3	3.2	2.4
Nejnižší napětí [V]	2	2	2	1.5
Hmotnost článku [g]	41.5	76	94	39
Kapacita [mAh]	1100	2500	3300	1300
Kontinuální $I_{ch}$ [A]	4	10	3.3	6
Špička $I_{ch}$ [A]	10	20	3.3	6
Kontinuální $I_{dc}$ [A]	30	50	115.5	13
Špička $I_{dc}$ [A]	50	120	132	26
$t_{max_{ch}}$ [°C]	-80	-80	45	-60
$t_{max_{dc}}$ [°C]	-90	-90	45	-80
Konfigurace	17s3p	14s2p	18s1p	24s2p
$\Delta U$ článku @ $I_{max}$ [V]	0.75	0.72	0.17	0.03
$P_{dc}$ článku [W]	127.5	309.6	399.7	61.7
$P_{ch}$ článku [W]	33	66	10.6	14.4
Celkový $P_{dc}$ [W]	6502.5	8668.8	7195.5	2962.8
Celkový $P_{ch}$ [W]	1683	1848	190.08	691.2
Hmotnost článků [g]	2116.5	2128	1692	1872
Energie [Wh]	185.1	231	190.1	149.8
$\tau_{saved}$ Endurance [s]	-1.5	-0.5	-1.6	-2.6
$t_{fin}$ Endurance [°C]	64.3	69.8	28.8	24.2
$\tau_{saved}$ Autocross [s]	1.2	2	1.4	-0.3
$t_{fin}$ Autocross [°C]	67.2	78.4	32	23.8

**Tab. 4:** Druhý soubor vyhodnocovaných článků

proudy srovnatelné. Intuice by říkala, že takové články musí existovat, protože proces nabíjení i vybíjení je velice podobný. I po doptání na co nejlepší články čistě z hlediska nabíjecích proudů nedokázali hlavní výrobci takových článků (Melasta a Grepow) nic nabídnout. Z konverzace vyplynulo že nabíjení není obzvláště hlídaný parametr, výrobci tudíž články netestují tak důkladně a v datových listech jsou v konečném důsledku velmi konzervativní hodnoty.

Při oslovování výrobců sáčkových článků jsem narazil na firmu Lithium power, která po poptání ohledně co nejvyšších nabíjecích parametrů nabídla článek EP8745160HL, který měl v datovém listu udány až podezřele vysoké hodnoty, a to pro vybíjení proud až 765 A, pro nabíjení pak proud 76 A. I tento výrobce ale měl uvedenou maximální teplotu, při které je články možné bezpečně nabíjet 45 °C, což neumožňuje tak dobré chlazení, u kterého nás zajímá poměr teploty chladiwa a okolí. Díky nízkému odporu se takový typ článků ale příliš nezahřívá.

Veškeré prozkoumané cylindrické články byly specifikované pro širší teplotní rozsah



než články sáčkové. Cylindrické články také neměly specifikované různé proudové omezení pro různé operační teploty. LCO cylindrické články měly nejvyšší množství uložené energie, oproti sáčkovým článkům měly i vysoké specifikované nabíjecí proudy.

Z analýzy vyplynulo že pro disciplínu Endurance je kapacita baterie důležitý parametr, pro Autocross a akceleraci nikoliv. Rekuperace odpovídá zhruba 30 % kapacity u článků, které mají specifikované vysoké nabíjecí proudy, mít ji vysokou tedy není prioritou. V disciplínách Autocross a Akcelerace je nejdůležitější vysoký výkon.

Sáčkové LCO články vycházejí z tabulky nejlépe. Dosahují vysokých výkonů a mají i velkou kapacitu, proto jsou dobré i pro Endurance. Vzhledem k tomu, že toto bude první baterie sestavovaná týmem jsme se ale shodli, že je lepší zvolit bezpečnější, mechanicky odolnější cylindrické články.

Pokud se omezíme na cylindrické články, pak nejlépe vycházely články ANR26650 od firmy LithiumWerks. Jsou vyznačeny v tab. 4 světle žlutou barvou. Stejná firma nabízí jak články ve formátu 18650, tak větší 26650, větší typ má vyšší výkonovou hustotu na článek a umožňoval lepší zástavbu do vozu. Nevýhodou je téměř nejnižší možné konečné napětí, což snižuje celkovou účinnost provozu. Velikou výhodou je LFP chemie článků, která je bezpečnější než LCO.

Jak je vidět z tabulky, jedná se o nejlepší cylindrické články pro disciplínu Autocross, v případě zajištění dobrého chlazení. V disciplíně Endurance jsou sice trochu horší než alternativní cylindrické články VTC5A, ale vzhledem k tomu, že čas je uveden celkový na všechna kola, tak rozdíl je prakticky zanedbatelný. Díky vyšším výkonům totiž články ANR26650 umožňují aplikaci hybridního pohonu ve vhodnější čas. Nízkou účinnost zvolených článků bude potřeba řešit použitím olejového chlazení. Články se totiž u obou disciplín dostávají nad dovolenou hranici 60 °C.

### **3.2.2 Hlídní stavu baterie**

Baterie hybridních systémů musí být monitorovány, aby nedošlo k překročení jejich limitů. To je úkol řídicí jednotky baterie (BMS). Ta je dále zodpovědná za stanovení důležitých provozních parametrů baterie a udržování napětí článků v rovnováze.

Vlivem výrobních tolerancí nemá každý článek stejné vlastnosti a při používání baterie jako celku se vlivem tohoto jevu může napětí na různých článcích měnit. Vyrovnání napětí se dosahuje balancováním. Rozlišujeme dva druhy. U aktivního balancování je energie přelévána mezi jednotlivými články, což zajišťuje vyšší účinnost za cenu komplexity řešení. U pasivně balancujících BMS se články, které mají výrazně vyšší napětí než ostatní, vybíjejí, dokud není napětí všech článků v baterii stejné.

Pro hybridní systém ve voze FS.14 jsem vybral Energus Tiny BMS 750A. Ta má možnost pasivního balancování až 16 článků. Konkrétní BMS byla zvolena,

protože umožňovala ovládat mechanické relé, které je pravidly hybridní soutěže [11] požadováno. Ochrana proti zkratu je většinou zajištěna polovodičovými spínacími prvky integrovanými na jejich PCB.

Nevýhodou zakoupených BMS bývá omezené množství kanálů pro měření teplot článků. Většinou jsou dostupné pouze dva kanály, pravidla soutěže [14] ale stanovují, že se teplota musí měřit na 30 % článků v baterii. Týmy soutěžící v kategorii FSE většinou vyvíjejí vlastní BMS. Téměř každý integrovaný obvod pro správu baterie obsahuje větší množství analogových kanálů [15]. Při vývoji vlastní BMS je možné tyto piny vyvést na konektory a připojit na ně NTC termistory.

Vzhledem k omezené hmotnosti celé sestavy baterie jsem se rozhodl umístit BMS externě, aby její hmotnost neomezovala počet článků. Mimo baterii byl umístěn i proudový senzor, ze stejného důvodu.

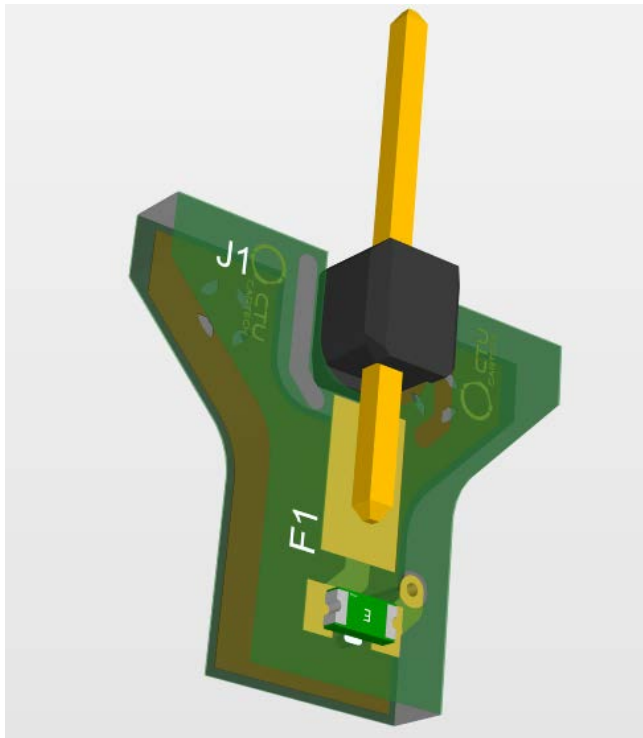
Takový postup vyžadoval robustní nadproudovou ochranu, neboť vodiče musely být delší. Zkrat nejištěného vodiče nesoucího napětí od článků k BMS vede k jeho shoření, neboť baterie je tvrdý zdroj napětí. Nadproudovou ochranu je dobré umístit co nejbliž k zdroji napětí, aby byla minimalizována délka nechráněného vedení.

Proto jsem se rozhodl umístit pojistky přímo na články. Pro tento účel jsem navrhl PCB určené k nalepení na spoj mezi články. Díky použití vodivého lepidla slouží lepená plocha zároveň jako elektrický kontakt. Na druhé přístupné straně PCB je SMD pojistka. Vnitřní svazek baterie je připojen na přístupný kolík, viz obr. 7.

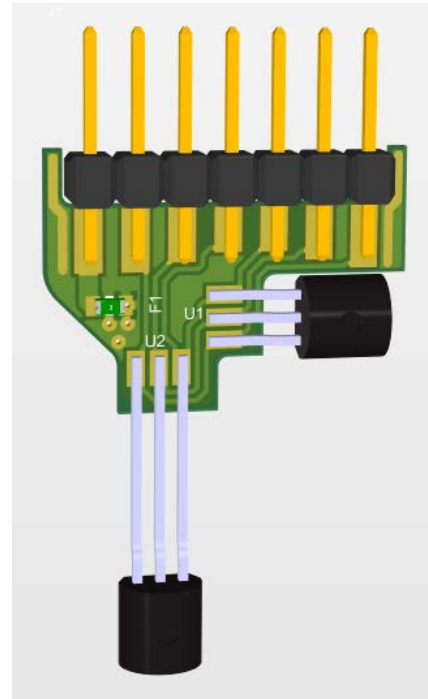
Mezi baterii a BMS bylo nutné umístit vodotěsný konektor, přes který se bude odpojovat BMS od baterie při určování hmotnosti na závodech. Pro ušetření rozměrů jsem se rozhodl použít IDC konektor Harting har-flex® s roztečí kolíků 1.27mm (Obr 8a). Volba se nakonec ukázala jako špatná. Nedostatečně dlouhé výstupy konektoru umožňovaly nesprávné zapojení (Natočeným konektorem bylo možné se při zapojování omylem dotknout nesprávných pinů), které vedlo k přepálení pojistek uvnitř baterie a k následnému zdlouhavému servisu. Pro další sezonu jsem jej nahradil kruhovým hermetickým konektorem Souriau (Obr 8b), kde toto není možné.

Protože zvolená BMS neumožňovala přímé měření dostatečného počtu teplot, bylo nutné použít externí teplotní senzory. Pro jejich vyhodnocení jsem se rozhodl vyvinout vlastní řídicí jednotku AMS. Jejím úkolem je mimo měření teplot ještě ověřování splnění všech podmínek pro běh hybridního systému a napájení hlavního hybridního relé. Zároveň komunikuje s BMS a informace přeposílá na sběrnici CAN, kde jsou zaznamenány.

Pro měření teploty jsem se rozhodl použít senzory MAX31820. Ty komunikují po digitální "OneWire" sběrnici. Datová linka je pro všechny senzory stejná, tudíž pro měření potřebných 10 teplot stačí jediný digitální pin mikrokontroleru. Oproti



(a) Měření napětí



(b) Měření napětí a dvou teplot

**Obr. 7:** PCB pro nalepení na články



(a) Konektor harting IDC



(b) Konektor souriau

**Obr. 8:** PCB pro nalepení na články a konektory

samostatným termistorům tím odpadá potřeba většího množství ADC převodníků a elektrického vedení k nim. Data ze senzoru jsou podepsána CRC číslem, takže splňují požadavky SCS signálů. Pro interakci se senzory jsou dostupné knihovny pro mikrokontrolery STM32. To, že pro měření teplot postačí jenom 3 piny umožňuje použít menší konektor mezi baterií a BMS. Pro měření napětí z 14 článků a teplot postačí konektor s 18 cestami.

Dalším úkolem BMS je určení stavu nabití baterie SOC. Ten ovlivňuje napětí a částečně i impedanci baterie, což jsou důležité parametry ovlivňující trakční pohon.

Lithiové články obecně a články LiFePO4 obzvlášť mají tu vlastnost, že jejich napětí je spíše než na stavu nabití závislé na proudu. Pro určení SOC se proto mimo aktuální napětí a proud používá i metoda “Coulomb counting”, kdy odhad SOC doplníme o integrál náboje, který baterii opustil. BMS pak nesmí být vypnuta, protože by došlo ke ztrátě informace o SOC.

Na implementace tohoto algoritmu v zakoupené BMS nebylo možné nahlédnout protože není volně přístupná, ale existuje spousta open source projektů, u kterých je možné se podívat na praktickou realizaci takového algoritmu. Jako příklad uvádím část firmware pro BMS desku “DieBieMS” [5].

```
uint32_t dt = HAL_GetTick() - modStateOfChargeLargeCoulombTick;
remainingCapacityAh = dt*modStateOfChargePackStatehandle->packCurrent/(3600*1000);

if(remainingCapacityAh > batteryCapacity)
    remainingCapacityAh = batteryCapacity;
if(remainingCapacityAh < 0.0f)
    remainingCapacityAh = 0.0f;

generalStateOfCharge = remainingCapacityAh / batteryCapacity * 100.0f;
```

Funkce je jednoduchá, při jejím zavolání se spočítá uběhlý čas od minulého volání z rozdílu HAL\_GetTick. Tento čas se pak vynásobí proudem a výsledkem je rozdíl kapacity.

Ve výše uvedeném algoritmu není vůbec aplikovaná metoda měření napětí, ta je ale obzvlášť při úplném nabití a úplném vybití baterie výrazná. To může být důvod proč byly údaje o SOC i z Tiny BMS často nesmyslné, pokud používá podobně jednoduchý algoritmus.

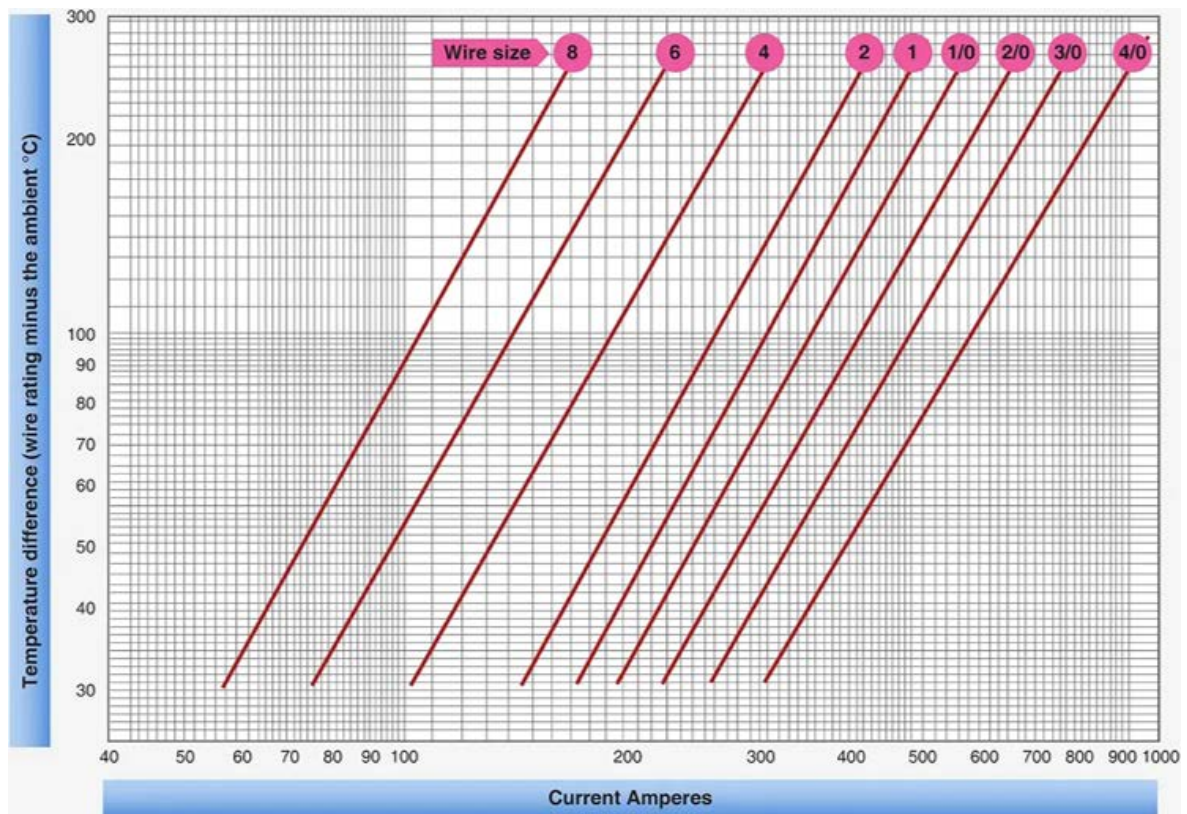
Pro maximální nabití je napětí kolem 3.4 V a při úplném vybití klesá napětí k 2 V [19]. Mezi těmito hodnotami je napětí úměrné stavu nabití, ale s málo strmou směrnicí. Pokles napětí je v rozsahu 0.65 Ah pouhých 0.1 V. Poměr signálu k šumu zde sice není veliký, ale pro opravu hrubých chyb by bylo vhodné metody kombinovat.

### 3.2.3 Návrh vedení

Při návrhu elektrického vedení musíme splnit 3 požadavky. Ztráty ve vedení musí být přijatelně nízké, měď ve vedení se nesmí zahřát více než je dovoleno v specifikaci izolačního materiálu a celý systém musí mít co nejnižší hmotnost.

Výrobci vodičů jen velice vzácně specifikují proudovou kapacitu vodičů, protože ta závisí velice silně na prostředí, ve kterém je vodič provozován. Každý silový vodič musí být chráněn pojistkou, která musí být nejslabším článkem, tzn. v případě přetížení se musí přepálit jako první.

30 % vedení hybridního systému je ponořeno v oleji uvnitř baterie, kde je dobře chlazeno. Věnovat se proto budu vodičům mimo baterii.



**Graf 12:** Závislost oteplení na efektivním proudu pro různé průřezy vodičů [33]

Při výpočtu jsem vycházel z grafu 12. Pro každý průřez vodiče je udána lineární závislost oteplení vodiče vůči okolí ve °C na efektivní hodnotě protékajícího proudu.

Hledání průřezu vodičů dle maximálního proudu baterie by vedlo k předdimenzování vedení, protože proud vodiči protéká v pulzech. Oteplení je na proudu závislé kvadraticky, takže pulz o amplitudě 2 oteplí vodič stejně, jako pulz o amplitudě 1 trvající 4x tak dlouho. Při výpočtu vycházíme z rovnice 16. Pro správné dimenzování vedení spočítám ekvivalentní RMS proud z typické trati disciplíny Autocross, trvající 60 s. Řidič zhruba třetinu času zrychluje, třetinu času udržuje stálou rychlost a třetinu času brzdí. Zde počítáme s plným trakčním výkonem při všech zrychlováních. Uvažujeme maximální možný proud zvolených článků 240 A. Vodiče tedy budou 20 s pod zátěží 240 A. Zbývajících 40 s nebudou pod žádnou zátěží, nebo budou zatíženy jen zanedbatelným proudem při rekuperaci.

$$t_{1a} \cdot R \cdot I_{1a}^2 + t_{1b} \cdot R \cdot I_{1b}^2 = (t_{1a} + t_{1b}) \cdot R \cdot I_{eq}^2 \quad (16)$$

Ekvivalentní efektivní hodnotu proudu určím z ekvivalence jím vygenerovaného ztrátového tepla. Předpokládám, že odvod tepla bude podobný, protože vlivem tepelné kapacity si vodič vygenerované teplotu nějakou dobu zachová i když jím už proud neprochází. Z rovnice 16 jsem odvodil rovnici 17. Po dosazení výjde výsledek 138.56A,

viz rovnice 18.

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{t_{1a} \cdot I_{1a}^2}{t_{1a} + t_{1b}}} \quad (17)$$

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{20 \cdot 240^2}{60}} = 138.56A \quad (18)$$

Toto je možné ověřit výpočtem oteplení vodiče při daném profilu pulzů. Délka pulzu, kdy teče do měničů proud 240 A, je nejdéle 3 s, s následným časem s nulovým proudem 6 s. Z rozměrů vodičů, tepelné kapacity mědi, předpokládané délky pulzu a proudové zátěže je možné spočítat, že v 1cm vodiče o průřezu  $16mm^2$  po 3s pulzu teplota naroste o  $3.4^\circ C$ . Z profilu zatížení vyplývá, že toto se opakuje každých 9 s. Pokud v této úvaze zanedbáme chlazení vodiče, pak vodiči trvá při takovém profilu proudu 4 minuty a 41s, než se v jádře ohřeje o kritických  $105^\circ C$ . Disciplína Autocross trvá 2 krát 60 s, proto uvažují tepelné kapacity za významné.

Hledám tedy adekvátní vodič pro ekvivalentní RMS proud 139 A. Do prostředí formule je vhodné zvolit odolnější třídu vodičů s lepší izolací, vyšší náklady jsou zanedbatelné díky malému potřebnému množství.

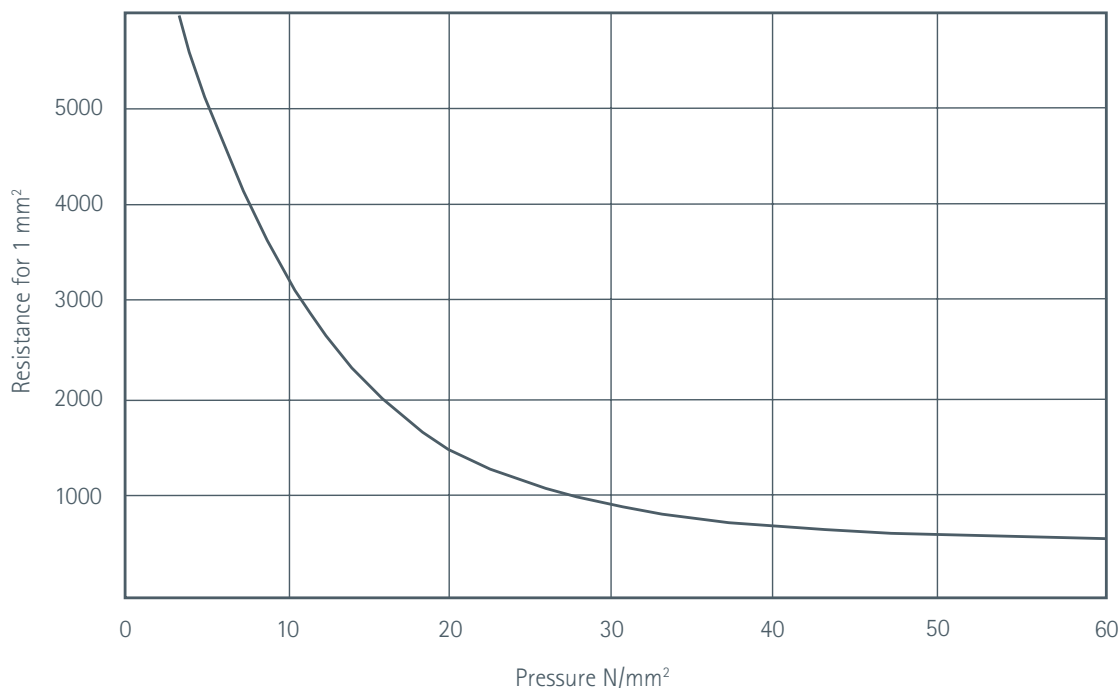
Důležité parametry vodičů jsou odolnost vůči abrazi, vedení bude vystaveno časté manipulaci při servisu, vysoká teplotní odolnost a pružnost. Požadavek na malé zástavbové rozměry a spolehlivost pak vede k volbě mědi namísto hliníku, ačkoliv by vyšel pro danou proudovou kapacitu lehčí.

Tyto požadavky splňují například vodiče řady TR16, vyrobené z radiačně upraveného polymeru, což vede k teplotní stabilitě až při  $125^\circ C$ . Vodič je splétaný, dílčí prameny jsou pak pocínovány, což zvyšuje odolnost vůči korozi. Podobné vlastnosti má i vodič ÖLFLEX® HEAT 205 SC, s izolací z fluoropolymeru FEP. Izolace z FEP mohou být tenčí, čímž se sníží rozměry vodiče i hmotnost. Takový vodič může fungovat až do teploty  $205^\circ C$ .

Z grafu 12 vidím, že požadavek na oteplení splňuje vodič o velikosti AWG4 ( $21.2mm^2$ ), při oteplení o  $50^\circ C$ , nebo vodič AWG6 ( $13.3mm^2$ ) při oteplení o  $95^\circ C$ . V okolí vodiče není žádný jiný zdroj tepla, proto můžeme počítat s okolní teplotou  $40^\circ C$ . Předpokládám, že se prostor okolo vedení nestihne během krátké disciplíny Autocross prohřát. Všechny ostatní disciplíny budou mít teplotní zátěž nižší.

Vodič o průřezu AWG6 je tedy nevyhovující, neboť by maximální teplotu přesáhl o  $10^\circ C$ . Volím tedy větší vodič o průřezu  $16mm^2$ , který by po vynesení do tabulky dosáhl teploty  $120^\circ C$ , což je v dovolených mezích vodiče.

Dosahované teploty se mohou zdát nesmyslně vysoké, ale je nutné brát v potaz, že



**Graf 13:** Graf závislosti kontaktního odporu na kontaktním tlaku [7]

výpočet provádím pro nejhorší možné podmínky provozu, ve kterých se systém může vyskytovat. Při skutečné aplikaci se bude výrazně projevovat tepelná kapacita a teploty budou nižší.

### 3.2.4 Návrh elektrických spojů

Mimo části přímo vedoucí proud je stejně důležité zajistit kvalitní elektrické spoje. Elektrický spoj je místo, kde přechází el. proud z jednoho kusu materiálu do druhého. Elektrický odpor spoje je výrazně závislý na kontaktním tlaku, viz graf 13.

Z grafu je zřejmé, že odpor kontaktní plochy je výrazně závislý na předpětí spoje. Odpor strmě klesá až do dosažení kontaktního tlaku 40 MPa.

Pro lepší představu požadovaných kontaktních tlaků jsem provedl úvahu. Klasická podložka pro šroub M3 má plochu přibližně 8x větší než nosný průřez závitů šroubu. Šroub třídy 8.8 s takovou podložkou je pro optimální odpor třeba dotáhnout na polovinu jeho meze kluzu, předpokládáme-li rovnoměrné rozložení kontaktního tlaku. Pro větší šrouby se tento poměr snižuje, v baterii jsem použil šrouby M6, pro které stačí dotažení na třetinu meze kluzu. Při použití větší podložky má smysl spojovací materiál utahovat až na jeho pevnostní limit, nejmenší používané šrouby pak bývají M5.

Konektory, které nevyžadují nástroje na rozebrání se zákonitě budou pohybovat v oblasti daleko od tohoto tlaku a budou tedy pro danou proudovou kapacitu

vyžadovat větší kontaktní plochu. Proto se pro vysoké proudy vodiče spojují především šroubovými spoji. Takové spoje totiž dokážou opakovaně vyvodit předpětí vedoucí k nízkým kontaktním odporům.

Při používání šroubových spojů se potýkáme s problémem rozložení kontaktního tlaku v oblasti pod šroubem. Měď sama o sobě vlivem jejího nízkého Youngova modulu pružnosti nedokáže kvalitně roznést napětí do větší plochy, pokud má malou tloušťku.

Šrouby s vnějším šestihranem, které jsou z důvodu možnosti utažení z boku nejvhodnější, nemají velkou plochu pod hlavou. Tu je možné zvětšit použitím speciálních šroubů s rozšířenou hlavou, nebo použitím podložek. Podložky by měly mít co nejvyšší tuhost, aby kvalitně roznášely kontaktní tlak do mědi. Takový požadavek splňují buď oceli, které mají zároveň výhodu dostupnosti a jednoduchosti výroby řezáním na laseru, nebo keramiky, které mají výhodu nižší hmotnosti. Z důvodu výroby jsem použil ocelové podložky.

Prostředí formule je zatěžováno vibracemi, které vznikají jak od spalovacího motoru, který je bez tlumení připevněn k rámu, tak od náprav, které používají pro lepší zpětnou vazbu řidiči co nejtuzší spojovací prvky. Všechny el. spoje musí být proto pojištěny proti uvolnění, v pravidlech FSE dokonce jenom specifickými prvky zvláště odolnými vůči uvolnění:

- drátování
- závlačky
- samojistné matice s polyamidovou vložkou
- matice zajištěné třením
- matice s tvarovým zámkem

U všech rozebíratelných spojů uvnitř baterie je nutné používat samojistné matice. Tam kde je od dodavatele komponentu vyroben vnitřní závit (relé, měniče) použijte lepidlo na závity.

O důležitosti zajištění jsme se přesvědčili na závodech v Maďarsku viz Obr. 9. Nedotažený šroub pojistky se povolil a výsledný vysoký odpor způsobil přehřátí a roztavení spoje, naštěstí bez další škody.

Pro matematický model trakčního systému a celkový přehled jsem určil odpory a maximální výkonové ztráty v celém trakčním systému. Výsledky jsou uvedeny v tab. 5.

V člancích se tedy tvoří 95 % veškerého tepla v systému. Díky jejich přímé teplotní ochraně vynucené pravidly se při správné montáži žádný jiný komponent neohřeje na nebezpečné hodnoty. Proto usuzuji, že průřezy vodičů v systému jsou navrženy





**Obr. 9:** Důsledek uvolněného šroubového spoje

adekvátně.

### 3.2.5 Návrh chlazení baterie

Teplo v článcích vzniká primárně vlivem Jouleových ztrát v interních vodičích. V článku mají jistý vliv i elektrochemické reakce [28] [29] [35].

V obrázku 11 vystupují veličiny  $q_D$ ,  $q_{IR}$ ,  $q_{rev}$ .  $q_D$  je teplo související s difuzí iontů lithia v článku,  $q_{IR}$  jsou Jouleovy ztráty a  $q_{rev}$  je reakční teplo. Z grafů na obrázku 11.b je vidět, že vliv vratného reakčního tepla je značný především při pomalém vybíjení 0.1C. Významná složka difuzního tepla také s vyšším proudem neroste tak, jako složka  $q_{IR}$ , která roste s druhou mocninou proudu.

Z toho důvodu je možné při výpočtech vznikajícího tepla počítat pouze s nevratným teplem vznikajícím ve článku při průchodu proudu. Ze studií lze odvodit, že článek klade jiný odpor při nabíjení a při vybíjení vlivem rozdílných elektrochemických reakcí.

Hodnota, kterou mám k dispozici pro výpočty je “AC impedance”. Pro jeho určení je na článek připojen zdroj střídavého proudu, vztah proudu a napětí článku je následně možné přepočítat na odpor. V takovém měření je obsaženo veškeré teplo, které článek vytváří, díky principu zachování energie. Někteří výrobci článků udávají i hodnotu “DC impedance”. Tato hodnota bývá vyšší, odhady teplot určené ze střídavé impedance jsou tedy optimističtější.

Nárůst teploty jsem počítal jako integrál Jouleových tepelných ztrát, které vznikají na vnitřním odporu článků dle rovnice  $P = I^2 \cdot R$ . Integrálem je energie, kterou následně přepočítám na teplotu z kalorimetrické rovnice  $\Delta t = \frac{Q}{C}$ .

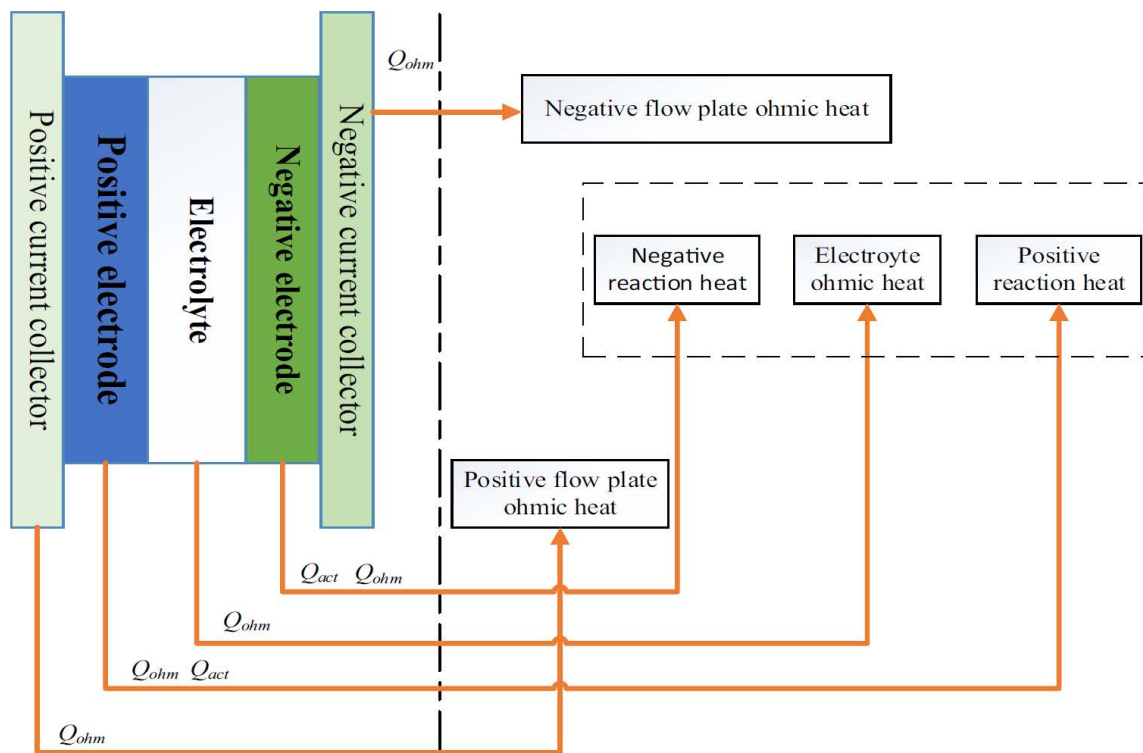
Název součásti	Ztráta výkonu [W]	Procentuální ztráta [%]
Měnič kladný kontakt	0.81	0.02
Kabelové oko	0.44	0.01
Drát $12mm^2$	20.77	0.59
Kabelové oko	0.44	0.01
Kontakt kabelových ok	0.81	0.02
Kabelové oko	0.44	0.01
Drát $25mm^2$	2.23	0.06
Kabelové oko	1.14	0.03
Měděný kontakt relé	1.14	0.03
Odpor relé	12.50	0.35
Vedení k pojistce	0.89	0.03
Kontakt pojistky	2.80	0.08
Odpor pojistky	15.00	0.43
Kontakt pojistky s průchodem	1.38	0.04
Průchod kladného pólu	8.90	0.25
Kontakt průchodu a výstupu článků	1.38	0.04
Přípojka článků	8.90	0.25
Vedení mezi články	10.01	0.28
Články	1687.50	47.81
Zadní spojení	8.90	0.25
Zadní kontakt	1.38	0.04
Zadní spojení	8.90	0.25
Druhá sada článků	1687.50	47.81
Vedení mezi články	10.01	0.28
Záporná přípojka článků	8.90	0.25
Kontakt přípojky a průchodu	1.42	0.04
Záporný průchod -	17.80	0.50
Kontakt záporného průchodu s měničem	1.38	0.04
Záporné vedení	4.77	0.14
Kontakt záporného vedení	0.81	0.02
Záporné vedení mezi měniči	8.34	0.24
Záporný kontakt měniče	0.81	0.02

**Tab. 5:** Odpor jednotlivých částí vedení

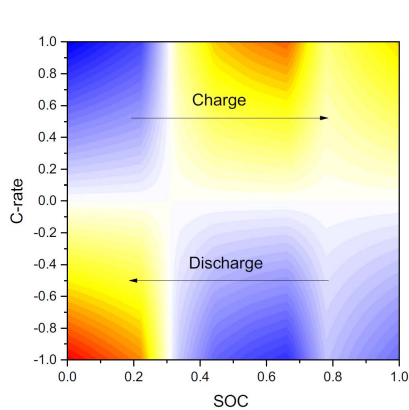
Největší část hmotnosti baterie tvoří samotné články. Proto bylo důležité určit jejich tepelnou kapacitu, protože to bude výrazná část celkové tepelné kapacity systému.

Hodnota nebyla uvedena v datových listech, proto jsem kalorimetrické měření provedl sám. Na dílně jsem měl starší generaci LFP článků, ještě od firmy A123systems, které bylo možné jednoduše změřit. Měření jsem provedl na dvou člancích, výsledná naměřená hodnota vyšla  $C = 58 \pm 7 J \cdot K^{-1}$  s nejistotou  $1\sigma$ .

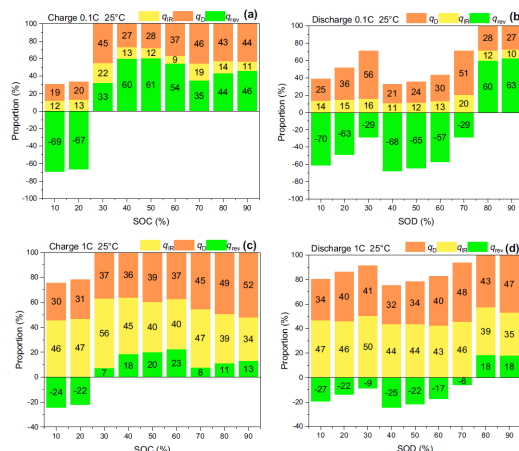
Další výraznou tepelnou kapacitou systému bude cirkulující olej. Jeho objem je možné odměřit ze zjednodušeného CAD modelu baterie. Vnitřní objem baterie je 1.66 l, objem článků je 0.97 l. Celková hmotnost oleje v baterii je 580 g.



Obr. 10: Tvorba tepla uvnitř článku [35]



(a) Reakční teplo dle SOC a rychlosti vybíjení [28]

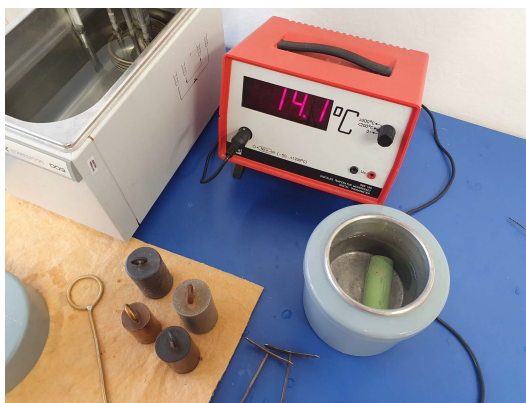


(b) Reakční teplo a jouleovo teplo proporce [28]

Obr. 11: Reakční teplo

Napočítané tepelné kapacity jsem dosadil do matematického modelu, vyvinutého k určení důležitosti poměru kapacity a výkonu článků. Předpokládám, že tepelná kapacita jakýchkoliv článků bude srovnatelná, pokud je konečná hmotnost stejná.

Výsledky v tabulkách 3 a 4 říkají, že nijak nechlazené články by se z optimistické počáteční teploty 23 °C dostaly na pravidly nepřipustnou teplotu 70 °C už v polovině disciplíny Endurance a dokonce 78.4 °C po prvních dvou pokusech prvního řidiče v disciplíně Autocross.



**Obr. 12:** Kalorimetrické měření tepelné kapacity článku

U inženýrských disciplín je vždy možné problém řešit různými způsoby, né všechny pak bývají obdobně obtížné. Pro řešení tohoto problému máme 4 možnosti:

- počítat s pasivním chlazením baterie, omezit odebíraný výkon při kterém nedojde k přehřátí
- vymyslet systém chlazení vzduchem
- články ponořit do vosku, který má teplotu tavení blízkou limitu článků, kdy se zbytkové teplo přemění na teplo tání vosku
- přes články aktivně prohánět nevodivé chladící médium - transformátorový olej

Pasivní chlazení baterie je atraktivní možnost z důvodu jednoduchosti řešení, malých zástavbových rozměrů a výrazného ušetření servisního i výrobního času. Tuto možnost je možné prozkoumat stejným způsobem, jakým jsem vyhodnocoval články z hlediska výkonu a kapacity.

Pro zvolené články ANR26650m1b jsem vypočítal, že v disciplíně Autocross musíme maximální proud z baterie omezit na 190A. Ztráta na čase pak je 0.53s na obě projetí, což představuje v disciplíně Autocross nezanedbatelný rozdíl na celkovém ohodnocení až 2.5 bodu [2]. Následně by se muselo čekat na vychladnutí baterie, což není na závodech většinou možné.

Během první poloviny disciplíny Endurance smí teplota narůst jen o 15°C, aby se vůz mohl chovat stejně i na druhé polovině. Pro splnění podmínky je potřeba omezit maximální proud z baterie na 80A, oproti používání baterie bez omezení nabere na polovině závodu čas 0.9s.

Chlazení je tedy nutné. Chlazení vzduchem jsem zavrhl z důvodu špatné distribuce teploty v baterii. U vstupu vzduchu je teplota nižší než u výstupu, a je zástavbově náročné se tomuto problému vyhnout. Chlazení vzduchem by navíc vyžadovalo průduchy v šasi vozu, což je veliká komplikace.





**Obr. 13:** Baterie s přetlakem uvnitř

Řešení s voskem je zajímavé, ale neumožňovalo by delší testování vozu. Hybridní systém by mohl běžet jenom do roztavení vosku, a pak by musel být vypnut. Servis vnitřku baterie by pak byl téměř nemožný.

Proto jsem se nakonec rozhodl pro olejové chlazení, se systémem složeném z chlazené baterie, pumpy, radiátoru a expanzní nádoby. Systém lze integrovat do existující koncepce vozu, hlavní nevýhodou je nutnost utěsnění baterie a přidaný čas pro odvodušnění okruhu.

U systému je potřeba olejové vedení zapojit tak, aby v baterii byl oproti atmosférickému tlaku vytvořen podtlak. V opačném případě se baterie začne nafukovat. To vede k hromadění oleje uvnitř baterie a z toho vyplývajícím nedostatku oleje pro pumpu. Změnou rozměrů baterie se také pravděpodobně změní proudění kolem článků, protože větší množství oleje bude protékat po okrajích baterie, a nikoliv mezi články, kde vzniká teplo.

Očekávané ztrátové výkony je také možné určit z matematického modelu baterie. Chceme-li udržet baterii na optimální teplotě 45 °C, pak je potřeba chladicí okruh navrhnout tak, aby v disciplíně Endurance uchlادil průměrný výkon 200 W pro rozdíl teplot 5 °C. K číslu 200 W se dostaneme zprůměrováním okamžitého tepelného výkonu v baterii během disciplíny Endurance. Předpoklady jsou, že přenos tepla mezi články a radiátorem je okamžitý.

Pro disciplínu Autocross je průměrný výkon výrazně vyšší, zde ale můžeme počítat s tepelnou kapacitou systému. Zde vychází průměrný ztrátový výkon v baterii na 650 W.

### 3.3 Výběr elektromotoru

Jak už jsem probral v konceptuální fázi, motory chceme použít na přední nápravě. Ze zkušeností elektrických týmů mi bylo doporučeno vyhnout se kroku nastavování měniče pro daný motor a raději objednat motor i měnič od stejného výrobce.

#### 3.3.1 Parametry

Z důvodu jejich nejlepšího poměru hmotnosti ku výkonu jsem se omezil na synchronní motory s permanentními magnety. Rozměrové omezení systému pak vyzdvihuje použití motorů BLDC, které, pravděpodobně díky jednoduššímu řízení, bývají dodávány s menšími měniči.

Motory musí být konstruovány pro nízké napětí. Z důvodu spolehlivosti celého systému chceme vyloučit stav, kdy se v motoru při plné rychlosti auta indukuje vyšší napětí než napětí baterie. Můžeme použít nízko-otáčkový motor bez převodovky, nebo vysokootáčkový s převodovkou. Možnosti převodovek jsou rozsáhlé, jednostupňová planetová převodovka může mít převodový poměr až 6, převodovka se složitějším vnitřním uspořádáním pak až 15.

Hlavním sledovaným parametrem motoru je poměr maximálních mechanických otáček motoru a jeho KV konstantě. To nám přibližně říká, na jakém napětí DC linku je vhodné motor provozovat.

Druhý důležitý parametr je poměr nejvyššího výkonu a hmotnosti. Skutečný BLDC motor má moment přibližně konstantní, dokud nenarazí na napěťový limit zdroje. Pro konstantní kroutící moment roste aplikovatelný výkon s otáčkami. Vybírané motory proto nutně musí mít specifikovaný vyšší maximální výkon, než je maximální výkon zvolené baterie.

Motor se zároveň musí vejít do používané kolové sestavy. Jeho rozměry ovlivňují možnosti kinematiky přední nápravy, která musí být přepracována. V tab. 6 uvádím parametry motorů od různých výrobců.

Výrobce	Model	$KV[rpm/V]$	$n_{max}[rpm]$	$m[g]$	$P_{max}[W]$	$d[mm]$	$l[mm]$
Plettenberg	HP620-50	195	12000	2500	10000	110	118
Tmotor	U15II	80	3546	1740	8580	147	55
Hacker	Q150-6M-V2	87	4000	2380	7881	150	60
Miromax	HPM-3000B	83	4000	7600	5900	182	107
Tmotor	U13II	130	6240	990	5659	100	57
Plettenberg	HP505	164	10000	1450	5000	86	97

Tab. 6: Parametry různých BLDC motorů

Na voze FS.14 jsou použity pneumatiky o vnitřním průměru 254 mm. Do ráfku se musí navíc vměstnat ramena a tyč řízení, s plným rozsahem zatáčení včetně nařízeného

pohybu nápravy ve vertikálním směru 50 mm. Délka motoru není z hlediska kinematiky přední nápravy tak velký problém jako průměr motoru, protože délka se projeví až vně ráfku, kde už je více místa.

Motory s vnějším rotorem mívají lépe využitou hmotu, protože nemají vnější obal. Jejich poměry výkonu ku hmotnosti jsou proto nejlepší. Většinou se používají v modelech letadel, kde je motor náporově chlazen vzduchem. To v případě formule není možné. Pravidla soutěže z navíc nařizují zakrytí vnějších otáčejících se částí, čímž bychom ztratili některé z výhod takového uspořádání.

Motory s vnitřním rotorem mají výhodu v tom, že jsou chráněny před vnějšími vlivy. Jsou také mnohem jednodušší na chlazení. Menší průměr rotoru ale snižuje moment, který je motor schopný vytvořit. Na rotor menšího průměru se také vejde méně pólů, takže tento způsob násobení momentu není tak efektivní. Celkový výkon motoru je možné zvýšit zvýšením otáček, které mohou být díky nižším setrvačným silám vyšší. Nejvyšší výkon požadujeme při otáčkách kola přibližně 600 rpm, maximální výstupní otáčky při nejvyšší rychlosti vozu jsou 1400 rpm. Velikou nevýhodou je nutnost použití převodovky pro mechanické násobení momentu.

Nakonec jsem se tedy rozhodl pro motor HP620-50. Ze zkoumaných motorů s vnitřním rotorem měl tento motor nejlepší poměr výkonu ku hmotnosti. HP620-50 měl také nejlepší poměr výkonu ku průměru, což jej dělá vhodný pro realizaci kvalitní kinematiky přední nápravy.

### 3.3.2 Matematický model pohonu

Pro účely řízení, pochopení vlivu jednotlivých parametrů a určení momentových možností bylo nutné vytvořit matematický model, který uvažuje jak ztráty v motoru, tak v baterii. Matematický model jsem vytvořil pro zvolený motor HP620-50, je ale aplikovatelný pro libovolnou kombinaci motoru a baterie.

Pro dosažení co nejlepších vlastností závodního vozu provozujeme baterii na jejím výkonovém limitu. Napětí baterie je v takovém případě proměnné. Nejlepší parametr, který máme dostupný pro modelování závislosti napětí na proudu baterie, je elektrický odpor systému, složený z odporu vedení a vnitřního odporu článků v baterii.

Pro určení maximálního výkonu, který může zařízení připojené na baterii odebírat, vyjdeme z rovnice  $P = U \cdot I$ , kde  $U = U_{max} - I_{bat} \cdot R_{bat}$ . Spojením získám rovnici 19.

$$P = U_{max} \cdot I_{bat} - I_{bat}^2 \cdot R_{bat} \quad (19)$$

V této kvadratické rovnici očekávám nejvyšší výkon v bodě jejího extrému, z derivace dle  $I$  tedy získám rovnici:

$$\frac{\partial P}{\partial I_{bat}} = 0 = U_{max} - 2 \cdot I_{bat} \cdot R_{bat} \quad (20)$$

ze které je možné odvodit vztah pro  $I_{bat}$ :

$$I_{bat} = \frac{U_{max}}{2 \cdot R_{bat}} = \frac{46.2}{2 \cdot 0.044} = 525 A \quad (21)$$

Z tohoto výpočtu je zřejmé, že držení se limitu 240 A, který výrobce udává v datovém listu článků, je pro maximalizaci výkonu správné. Výkon na výstupu baterie začne klesat až v případě, že bychom odebírali vyšší proud než 525 A. Je v pořádku uvažovat maximální časově omezenou hodnotu proudu z baterie, elektrický pohon totiž nebude nikdy zapnutý déle než 3 sekundy, což je doba trvání disciplíny Akcelerace.

Do matematického modelu je potřeba zavést také vnitřní odpor motorů, indukované napětí motorů a jejich proudové omezení. Pro účely řízení je možné BLDC motor modelovat jako stejnosměrný motor. Podobnost chování stejnosměrného a BLDC motoru je platná, pokud proud protéká pouze dvěma fázemi během časového intervalu, kdy je konstantní magnetický tok a všechny fáze jsou elektricky symetrické a vybalancované [18].

Pro každou rychlost pohybu vozu vytvoří motory jiné indukované elektromotorické napětí, které je možné spočítat z rovnice 22.

$$U_{BEMF} = \frac{v_{km \cdot h^{-1}} \cdot 60 \cdot i}{3.6 \cdot o_{kola} \cdot KV} \quad (22)$$

Snažíme se maximalizovat moment na předních kolech, tj. proud do motorů. Analytický postup určení všech napětí a proudů v systému byl vzhledem k omezením proudu i napětí obtížný, proto jsem nakonec zvolil numerický postup.

Pro každou rychlost vozu a jí odpovídající elektromotorické napětí určím, jaký elektrický výkon je potřeba pro cílový proud do motoru. Výpočet vždy začínám s maximálním specifikovaným proudem 180A. Elektrický výkon motoru je odlišný od mechanického, který je nižší vlivem třecích ztrát. Pro odvození elektrického výkonu vycházím ze zjednodušené rovnice 23 pro elektrický moment [18].

$$T_e = 2\lambda_p i_{as} = K_b i_{as} \quad (23)$$

Veličina  $K_b$  označuje konstantu elektromotorického napětí BLDC motoru. Napětí mezi dvěma fázemi BLDC pak můžeme spočítat z rovnice 24.



$$v_{is} = (R_a + sL_a)i_{as} + K_b\omega_m \quad (24)$$

Při modelování zanedbávám člen únikové indukčnosti  $L_a$ , definovaný rovnicí  $L_a = 2(L - M)$ , pro výrazné zjednodušení modelu. Ten ovlivňuje hlavně momentu BLDC při komutaci. Elektrický výkon získám vynásobením rovnice napětí statoru proudem statoru. Dále přeznačím veličiny  $U_{BEMF}$  na  $K_b\omega_m$ ,  $R_{mot}$  na  $R_a$  a  $I_{mot}$  na  $i_{as}$ . Tím vznikne rovnice 25.

$$P_{mot} = I_{mot}^2 \cdot R_{mot} + U_{BEMF} \cdot I_{mot} \quad (25)$$

Tento výkon následně zdvojnásobím, protože vůz má dva motory. Pokud uvažujeme Jouleovy ztráty v baterii, pak pro výkony v systému platí rovnice 26.

$$P_{mot} - U_{max} \cdot I_{bat} + I_{bat}^2 \cdot R_{bat} = 0 \quad (26)$$

Z rovnice je možné následně vyjádřit proud baterie, který je potřeba pro zvolený proud do motorů, viz rovnice 27.

$$I_{bat1,2} = \frac{U_{max} \pm \sqrt{U_{max}^2 - 4 \cdot R_{bat} \cdot P_{mot}}}{2 \cdot R_{bat}} \quad (27)$$

Z očekávaného chování systému odvodím tvar rovnice 28.

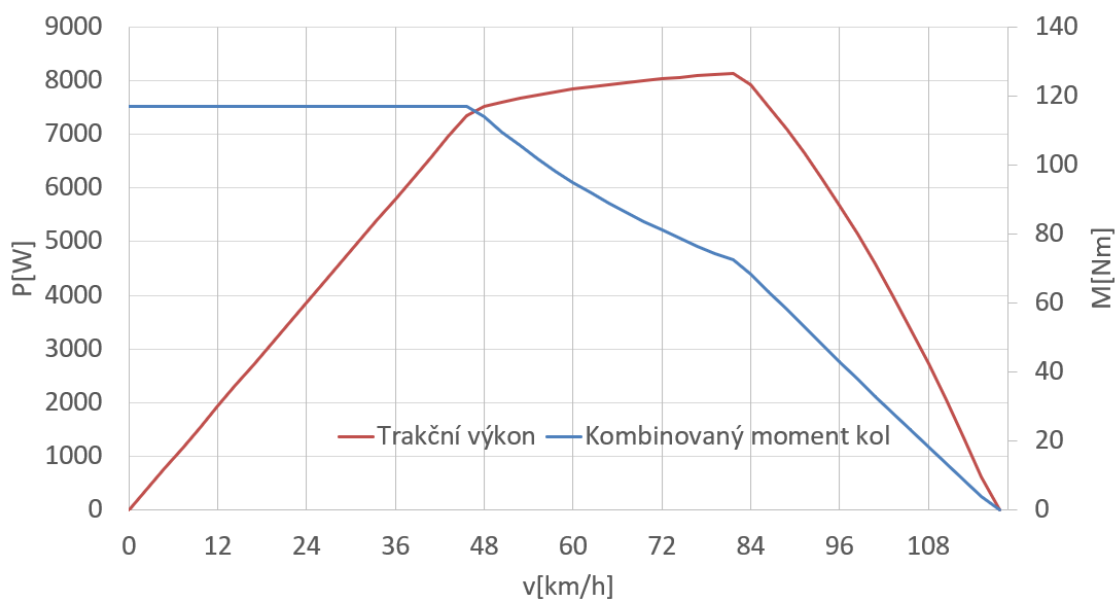
$$I_{bat} = \frac{U_{max} - \sqrt{U_{max}^2 - 4 \cdot R_{bat} \cdot P_{mot}}}{2 \cdot R_{bat}} \quad (28)$$

Tím máme vstupní parametr pro první podmínku, kterou musí splňovat proud baterie. Je-li vypočítaný proud baterie vyšší než 240 A, pak musíme snížit proud do motorů a výpočet opakovat.

Druhá podmínka je, že napětí na baterii nesmí být nižší než napětí na motoru. Toto napětí spočítáme z proudu motoru, odporu vinutí a elektromotorického napětí, z rovnice 29. Rovnice platí, BLDC motor modelujeme jako stejnosměrný motor v ustáleném stavu.

$$U_{mot} = I_{mot} \cdot R_{mot} + U_{BEMF} \quad (29)$$

Podobně spočítáme i napětí baterie, z rovnice 30.



**Graf 14:** Graf momentu a výkonu FS.14

$$U_{bat} = -I_{bat} \cdot R_{bat} + U_{max} \quad (30)$$

Pokud je napětí motoru  $U_{mot}$  vyšší než napětí baterie  $U_{bat}$ , pak je potřeba snížit proud motoru a výpočet opakovat. Když je napětí motoru nižší nebo rovno napětí baterie, tak se jedná o realizovatelný proud motoru a je možné přejít na další rychlost.

Z výpočtů pak mohu prozkoumat závislost pohonu na změnách parametrů. Z proudů mohu přímo spočítat Jouleovy ztráty a z toho určit účinnost systému.

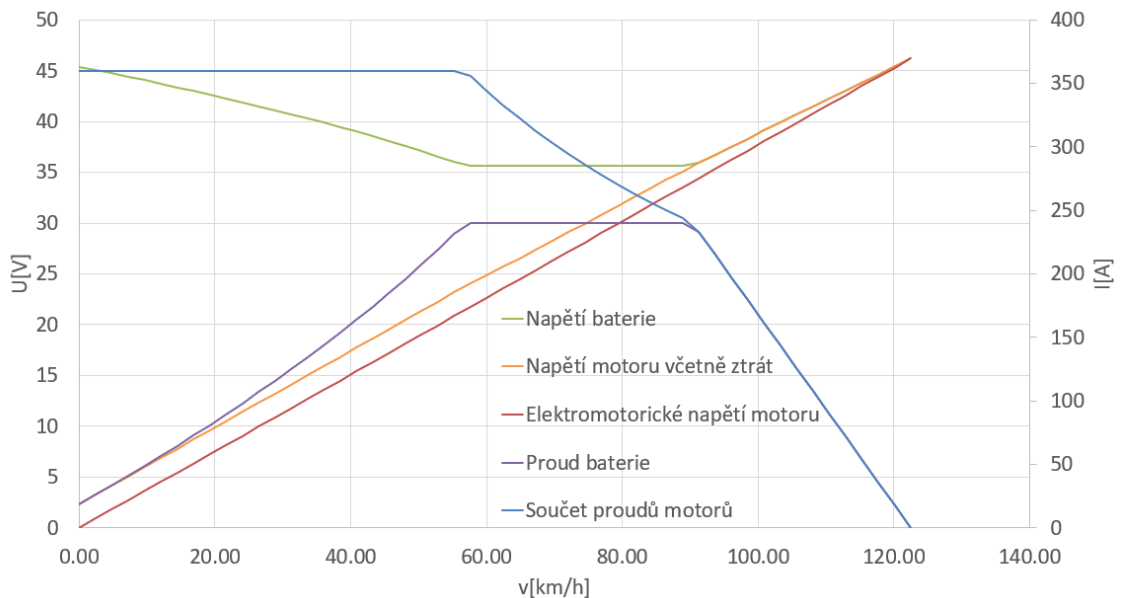
Díky matematickému modelu mohu vykreslit grafy klíčových parametrů systému. Je to hlavně závislost dosaženého momentu a výkonu v závislosti na rychlosti, viz Graf 14. Dále je to závislost napětí a proudu na rychlosti, viz Graf 15.

Postup ověřím v kapitole validace na straně 74.

### 3.3.3 Chlazení elektromotorů

Při objednávání motorů bylo potřeba rozhodnout, jaký způsob chlazení zvolím. Ztráty ve vinutí se projevují jen když motorem protéká proud, naopak ztráty v železe vznikají pouhou rotací motoru, tedy i když není hybridní systém zapnutý ale vůz jede na spalovací motor.

Od výrobce jsem dostal pro ztráty naprázdno odhad 300 W při 6000 ot/min pro jeden motor. Jouleovy ztráty ve vinutí lze spočítat z odporu vinutí a proudu vinutí. Pro získání průměrné hodnoty tepelných ztrát dosadím závislost ztrát na rychlosti do programu pro určení limitů baterie, viz str. 28. Průměrný ztrátový výkon obou motorů při disciplíně Endurance je 500 W, při disciplíně Autocross pak 835 W. Rozdíl není tak



**Graf 15:** Graf průběhu napětí a a proudu

veliký, to je způsobeno především nízkými Jouleovými ztrátami při vyšších rychlostech. Výkony už jsou významné, proto bylo zvoleno kapalinové chlazení. Jeho výhodou je i větší přetížitelnost motorů na budoucích monopostech týmu.

## 3.4 Bezpečnostní obvody

### 3.4.1 Zapínání hybridního systému

Pravidly jsou definovány podmínky, při kterých je možné hybridní systém používat. Systém musí být integrován do vypínacího obvodu celého auta, viz obr. 14.

Mimo veškeré vypínací prvky jsou ještě definovány další podmínky, které musí být pro funkci elektrického trakčního systému splněny.

První požadavek zajišťuje bezpečnost osob nacházejících se v blízkosti vozu. Činnost trakčního systému je totiž podmíněna nastartovaným spalovacím motorem, vůz se tudíž nemůže bez varování začít vlastním výkonem pohybovat.

Druhý požadavek je na bezpečný stav baterie. Ta je monitorována kombinací BMS a AMS. BMS vyhodnocuje, zda jsou napětí na článcích v bezpečných mezích a zda je proud nižší než maximální dovolený. AMS vyhodnocuje, zda jsou teploty článků nižší než 60 °C a všechny informace zpracovává.

Veškeré signály, které ovlivňují stav hybridního systému spadají do skupiny “System critical signals”, dále jen SCS, a dle jejich povahy musí po definovaných selháních systém zůstat v bezpečném (vypnutém) stavu.

Dle pravidla T11.9.2 [14] dělíme SCS do 4 kategorií.

1. Signály přenášené kabelem
  - rozpojený obvod
  - zkrat na zem
2. Signály senzorů s analogovým výstupem
  - zkrat na napájecí napětí
3. Chyby signálů senzorů používaných v programovatelných zařízeních
  - nemožnost přečtené hodnoty, například mechanicky nedosažitelný úhel měřený úhlovým senzorem
4. Chyby digitálně přenášených signálů
  - chyby v přenosu dat - data musí být ověřitelná např. kontrolním součtem
  - ztráta či zpoždění zpráv - systém musí vědět zdržení

Signály mohou spadat do více kategorií. V implementaci hybridního systému ve voze FS.14 se vyskytují signály druhu 1,2 a 4.

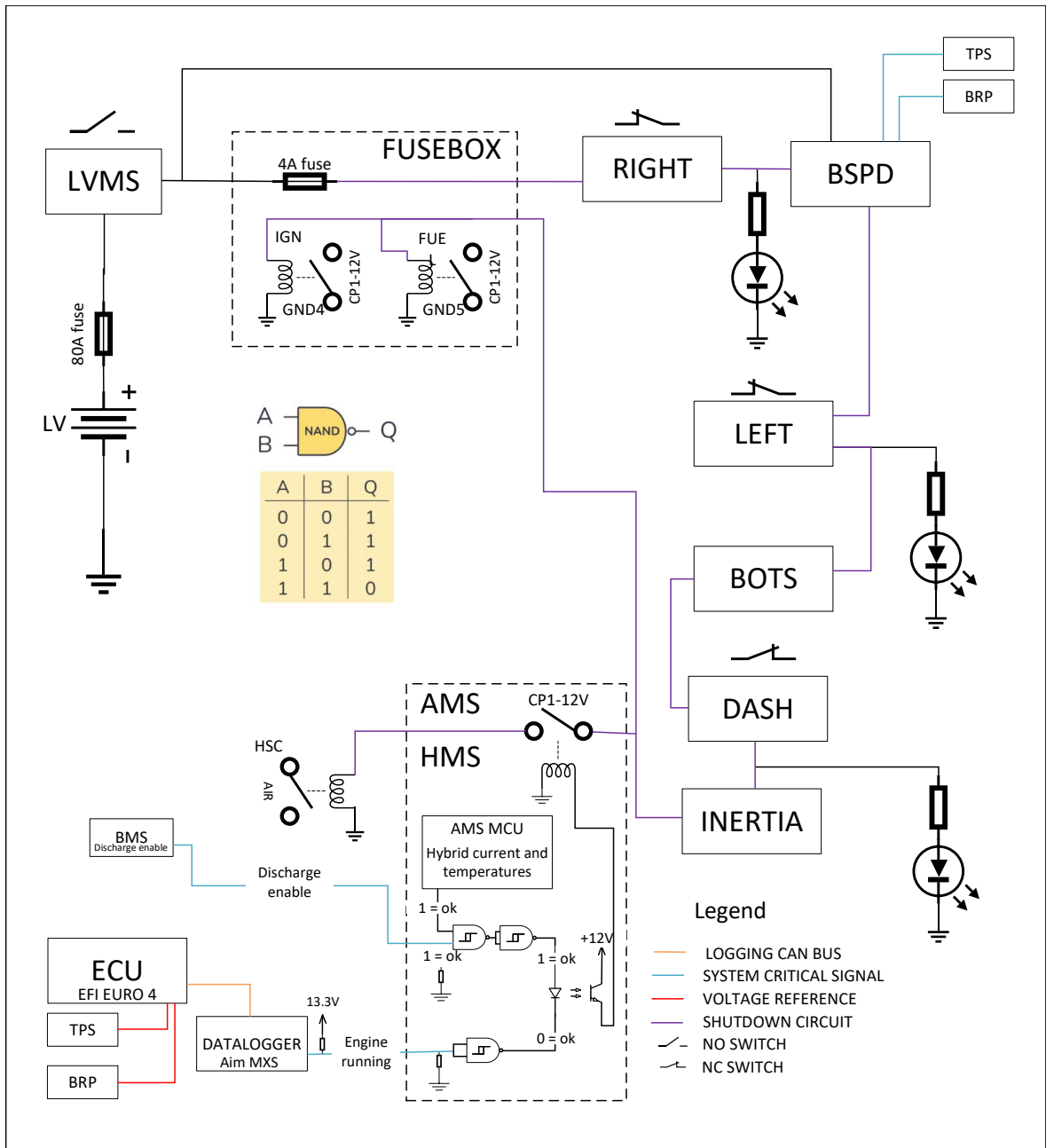
Veškeré signály vedené v kabelových svazcích, tj. mimo krabičky, spadají alespoň do kategorie 1. Bezpečnost je zajištěna rezistory mezi signálem a zemí, umístěnými na vstupech AMS, signál oznamující bezpečný stav systému je tedy vždy na pozitivním potenciálu oproti zemi. Pak se v případě zkratu na zem nebo odpojení systém vypne.

V systému je také použit datalogger AIM MXS. Mimo jiné je jeho úkolem detekce zapnutého spalovacího motoru. Od výrobce je vybaven dvěma silovými výstupy, do kterých může v aktivním stavu téct proud o velikosti až 1 A [3]. Dle obr. 15 se tedy na výstupu v neaktivním stavu vyskytuje napětí baterie 12 V, v aktivním stavu pak 0 V. Pro splnění pravidel je potřeba výstup používat obráceně než jaký je záměr výrobce, aby byl systém v bezpečném stavu v případě zkratu na zem.

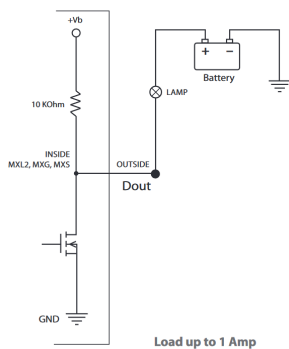
Protože na vstupu do logiky AMS je očekáván TTL signál, s napětovými hladinami 0 V nebo 5 V, je potřeba napětí snížit. To zajistíme děličem napětí. Z důvodu zajištění bezpečného stavu při odpojeném obvodu už takový rezistor na plošném spoji je, při volbě jeho správné hodnoty tudíž nemusíme žádný další rezistor přidávat. Hodnotu spočítám z rovnice pro dělič napětí:

$$U_{out} = U_{in} \left( \frac{R_{\downarrow}}{R_{\uparrow} + R_{\downarrow}} \right) \quad (31)$$

$$R_{\downarrow} = \frac{U_{out} R_{\uparrow}}{U_{in} - U_{out}} \quad (32)$$



Obr. 14: Schéma bezpečnostních obvodů FS.14



Obr. 15: AIM MXS digitální výstup

$$R_{\downarrow} = \frac{4.5 \cdot 10000}{14.2 - 4.5} = 4639 \approx 4.7k \quad (33)$$

Signál z BMS splňuje pravidla, pokud přidáme rezistor mezi signál a zem. To jasně definuje stav při přerušení vodiče ve svazcích.

Pro zajištění logického součinu všech podmínek jsem vybral logickou bránu SN74AHC132. Jedná se o 4 logické brány NAND v jednom pouzdře. Výhodou použití NAND či NOR brán je možnost jejich konfigurace do jakékoliv jiné brány.

Stejný účel by mohl splnit i mikrokontroler, který už na plošném spoji je, použití další dedikované součástky pro tento účel je výhodné v zjednodušení programu v mikrokontroleru a větším rozsahu vstupních napětí logické brány. Signály putují kabelovými svazky, proto nelze chybné připojení vyloučit a cena mikrokontroleru je řádově vyšší než cena logické brány.

Logické obvody mají výstupní obvod typu push pull, který dokáže při stavu logické 1 být zdrojem proudu a při stavu logické 0 být odvod proudu. Proto je možné poslední podmínku AND zrealizovat pomocí řídicí diody v optoizolátoru, kdy proud teče přes diodu z jedné logické brány do druhé v případě splnění všech podmínek.

Pro napájení relé jsem zvolil optočlen TLP 152. Ten obsahuje integrovaný zesilovač, zajišťující proudy výstupu až 2.5A, dostatečný pro řízení relé CP1-12V. Toto relé v sepnutém stavu propustí napětí bezpečnostního obvodu až k hlavnímu relé hybridního systému. Výhody mechanických relé jsou v snadné diagnostice a vyšší spolehlivosti, proto je zde použito pro zesílení signálu pro následující hlavní relé.

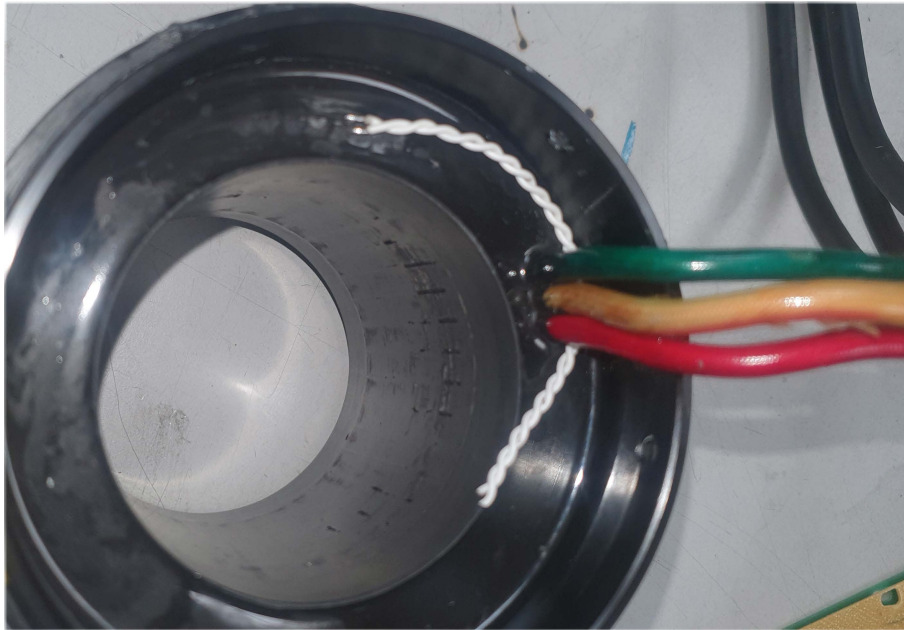
### 3.4.2 Udržení bezpečných provozních podmínek

Řídicí systém nesmí přetěžovat komponenty, důležitá je i možnost detekce poruchy.

Převážná většina selhání je způsobena nebo se projevuje zvýšenou teplotou, kterou je možné jednoduše měřit. Z naměřených teplot pak můžeme buď systém vypnout nebo dát pilotovi prostřednictvím upozornění na displeji vědět, že musí zastavit auto.

Bohužel výrobce neintegruje do elektromotorů v základní konfiguraci teplotní senzory, vzhledem k jejich důležitosti jsem se ale rozhodl snímače přidat dodatečně. K tomu bylo potřeba rozebrat elektromotor, vybrat vhodný termistor, ten nalepit dovnitř a motor znovu složit.

Na teplotu nejcitlivější komponent elektromotoru jsou magnety na rotoru, jejich teplotu je ale těžké přímo měřit kvůli jejich umístění. Je teoreticky možné teplotu vypočítat z teplotní závislosti parametrů magnetu, která je v rozsahu 5 až 10 % původních  $(BH)_{max}$  [31]. Když nepřekročíme rozsah operačních teplot magnetu, tak



**Obr. 16:** Umístění nového teplotního senzoru uvnitř motoru

se po následném zchlazení magnet vrátí na svoji původní hodnotu  $(BH)_{max}$ . Teplotní změna se ale projeví na indukovaném napětí motoru, což je možné využít pro její odhad. Bohužel použité měniče tento postup nevyužívají. Termistor jsem tedy přilepil na stator elektromotoru, viz Obr. 16. Teploty rotoru a statoru budou podobné vlivem jejich blízkosti.

Výrobce v datovém listu měničů definuje pouze hodnotu termistoru při pokojové teplotě  $R_0$ . Tato hodnota ale není pro výběr termistoru dostatečná, protože různé termistory mají rozdílné strmosti jejich exponenciální závislosti odporu na teplotě. Pro přesné určení i tohoto parametru jsem na měnič místo termistoru zapojil trojici trimrů s hodnotou  $22k\Omega$ . Nastavenou hodnotu odporu jsem změřil multimetrem a odečetl jsem i hodnotu teploty, kterou uváděl měnič.

Z měření vyšlo, že hodnota odporu, pro kterou měnič ukazuje  $25^\circ\text{C}$  je skutečně  $47k\Omega$ . Dalším krokem bylo spočítání požadované hodnoty  $\beta$ . Ta se příliš neliší, ať ji spočítáme mezi jakýmkoliv hodnotami konečných teplot [30]. Budu ji tedy počítat z hodnoty odporu při  $25^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$ , která je často uváděna výrobcem termistorů.

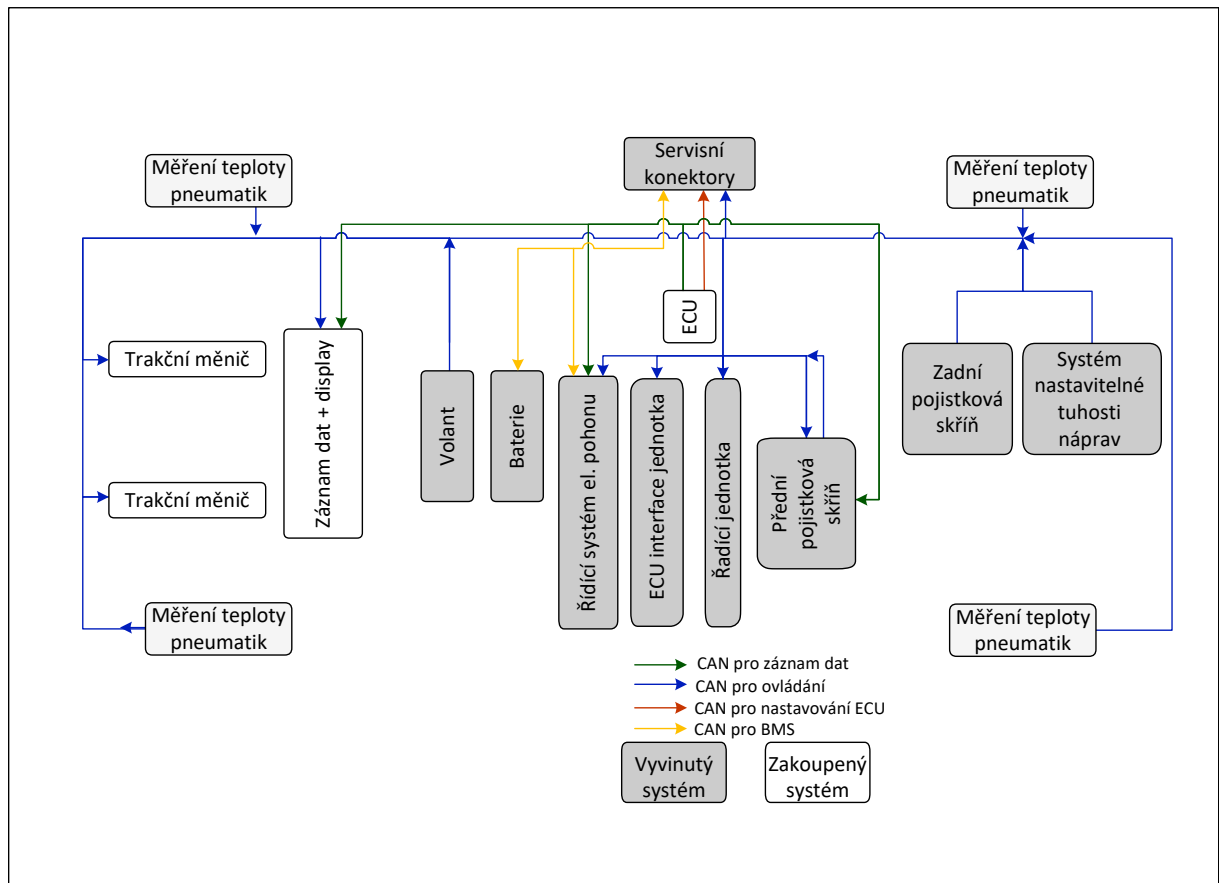
$$\beta = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{1/T_1 - 1/T_2} = \frac{\ln 47000 - \ln 2840}{1/298.15 - 1/373.15} = 4162K \quad (34)$$

Do motoru jsem tedy vybral termistor NTCG164CH473JT, který má hodnotu  $R_0 = 47k\Omega$  a hodnotu  $\beta = 4150K$ , což je nejbližší možná hodnota. Termistor byl dostupný pouze ve variantě SMD, což není pro připájení vodičů ideální a vyžaduje značnou opatrnost při lepení, klasická THT pouzdra ale bohužel nebyla dostupná.

## 3.5 Řízení

### 3.5.1 Elektronika vozu

Pro komunikaci mezi jednotkami v automobilech se hojně používá sběrnice CAN. Stejně tomu je i ve formuli. Všechny jednotky, které mají k sběrnici přístup jsou na obr. 17.



Obr. 17: Diagram zobrazující jednotky formule na sběrnici CAN

Praktičnost sběrnice CAN spočívá v možnosti provozu více samostatných jednotek a komunikaci mezi kterýmikoliv z nich [8]. Každá jednotka vždy vidí, co se na síti děje.

Je-li potřeba, aby jednotka vyslala zprávu, musí jí být na sběrnici uvolněno místo. To se stane vždy právě pro jedno zařízení díky procesu arbitrace. Na počátku každého CAN rámce je vysíláno ID zprávy všemi jednotkami zároveň. ID je vysíláno binárně, jednotky vždy vidí aktuální stav sběrnice. Stav binární 0 na sběrnici je dominantní nad stavem 1, tj, v případě že některá jednotka chce vyslat zprávu s nižším ID než jednotka druhá, jednotka druhá pozoruje jiný stav sběrnice než který vysílala. Díky unikátnosti všech ID na sběrnici po procesu arbitrace zůstane jediná jednotka, která následně vyšle svojí zprávu.

Z toho důvodu je při nastavování sběrnice CAN nutné dbát na ID jednotlivých



zařízení. Zprávy ovlivňující zásadní procesy auta, jako například řazení a ovládání hybridního pohonu mají prioritu nad např. aktuálními teplotami kol, které nijak neovlivní řízení auta a na sběrnici se vyskytují pro účely diagnostiky.

Hybridní systém součástí této sítě. Používané měniče od firmy Plettenberg jsem proto objednal ve variantě, která je ovládána přes sběrnici CAN. V nastavení měniče je možnost změnit ID, na kterých měniče přijímají data a na kterých vysílají informace o aktuálním stavu. Měniče spravuje řídicí systém el. pohonu, diagnostická data jsou zaznamenány dataloggerem AIM MXS, který zároveň slouží jako displej.

### 3.5.2 Řídicí systém elektrického pohonu

Pro řízení hybridního systému bylo potřeba zajistit novou řídicí jednotku. Jako tým jsme se chtěli vyhnout programování v nižších programovacích jazycích jako např. C. Cílem tedy bylo vyvinout jednotku, která bude velice dobře kompatibilní s rozhraním Simulink aby bylo její nastavování rychlejší a srozumitelné celému týmu, i členům kteří se zabývají primárně jízdní dynamikou.

Požadavky na mikrokontroler byly:

- vyspělá podpora v prostředí Simulink
- podpora potřebných komunikačních rozhraní - CAN, I2C, RS232
- dostupnost vývojových kitů
- výpočetní výkon, rychlost procesoru

Po zkušenostech z minulých let s vývojem vlastních plošných spojů jsem se rozhodl, že se vydáme cestou koupené vývojové desky. Takové rozhodnutí plyne z výhod a nevýhod každého přístupu.

Výhody	Nevýhody
Převážně lepší dostupnost čipů	Výrazně vyšší rozměry
Není potřeba pájet pouzdra s vysokou hustotou vývodů	Kvůli specifickým požadavkům auta je i přesto nutné vytvořit PCB, které se nasadí na vývojový kit
Knihovny v Simulinku atd. jsou vyvíjeny přímo pro tyto kity	Vyšší hmotnost řešení
Kvalita napájení, imunita vůči šumu je lepší - vícevrstvá PCB	
Jednodušší vývoj, ladící nástroje jsou zabudované do desky	

**Tab. 7:** Výhody a nevýhody použití vývojových kitů

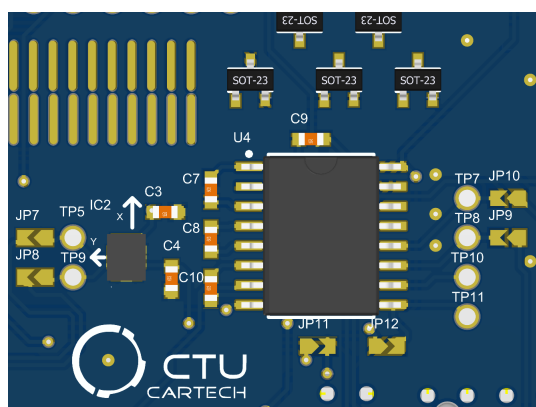
Existuje mnoho mikrokontrolerů, které splňují podobné požadavky. Čip od výrobce TI byl vybrán na základě pozitivních ohlasů z týmu elektrické formule.

Vývoj plošných spojů minulou sezonu byl specifický malými časovými možnostmi. Výroba plošných spojů v Česku trvá při zachování přijatelných cen nízké jednotky týdnů, v případě objednání z Číny trvá podobně dlouho doprava a celní proces. Aby bylo jisté, že objednaný plošný spoj bude možné použít i v případě drobných chyb, byly aplikovány dvě metody.

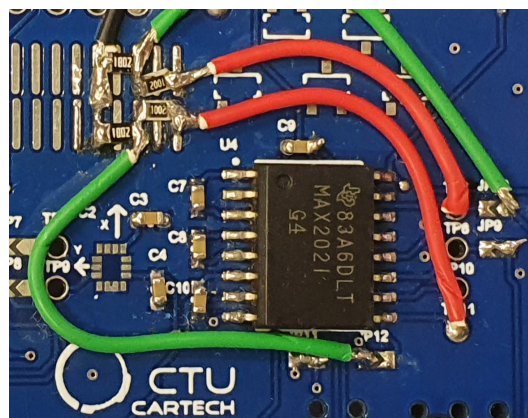
Pro případ chybného zvolení pinu mikrokontroleru, například kdyby vstup který byl plánován pro analogově digitální převodník bylo potřeba použít k jinému účelu, obsahuje každý komponent mezi jeho připojením k mikrokontroleru prvek "Jumper". Ten v zachování původního schématu stačí jednoduše přemostit cínem. Za "Jumperem" je vždy prokovený otvor o průměru 1 mm elektricky připojený na stranu komponentu. Tyto otvory je možné použít buď pro provléknutí vodiče, v případě nutnosti připojit dva jiné komponenty, nebo jako oboustranně přístupný přípojný bod ke komponentu.

Další konstrukční prvek který toto zajistí jsou neosazené univerzální stopy pro integrované obvody a oblasti s elektricky izolovanými průchozími dírami. Na tato místa je možné pak osadit jiné nutné pasivní nebo i aktivní komponenty.

Příklad využití obou prvků tohoto systému je vidět na obrázku 18. Zde je prostor využit pro dělič napětí. Ten snižuje napětí 5 V TTL signálu na 3.3 V, aby napětí na digitálních pinech mikrokontroleru zůstalo v dovolených mezích



(a) Původní návrh plošného spoje



(b) Dělič napětí

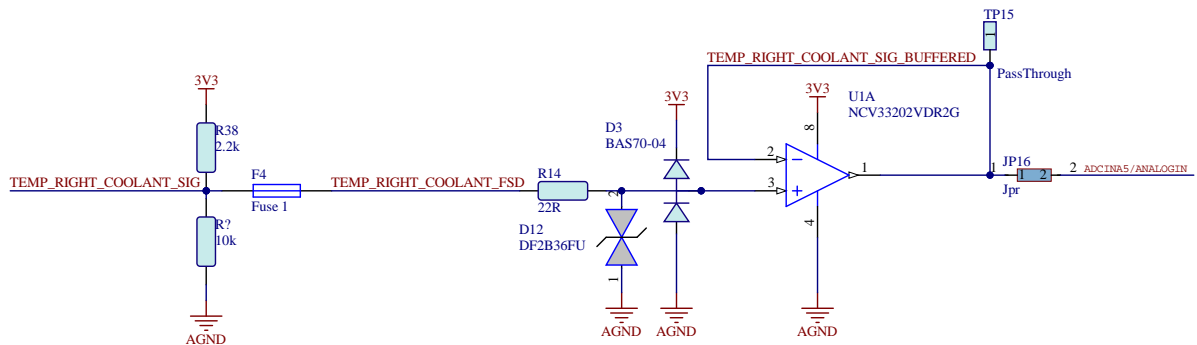
**Obr. 18:** Praktické využití stop komponentů navíc a možnosti odpojení zařízení od mikrokontroleru

Přestože jsem se rozhodl pro použití vývojového kitu s už osazeným mikrokontrolerem tak bylo potřeba sestavit PCB, které zajistí připojení k vozidlu.

Vývojový kit má v základu napěťové regulátory z napětí 5V na 3V3. Nemá žádný vstup pro vyšší napětí, proto je potřeba na přídatnou desku přidat napěťový regulátor.

Pro zajištění ochrany vstupu se používají Schottkyho diody, které omezí napětí na

vstupu do bezpečných mezí, viz obr. 19. V případě, že je přivedené napětí nižší než napětí na zemi pak jedna z diod D3 začne vodit a tím zvýší napětí na  $-0.3\text{V}$  oproti zemi. V případě přivedení napětí vyššího než je rozsah ADC je napětí sníženo tím, že je odváděno na napájecí větev 3V3.



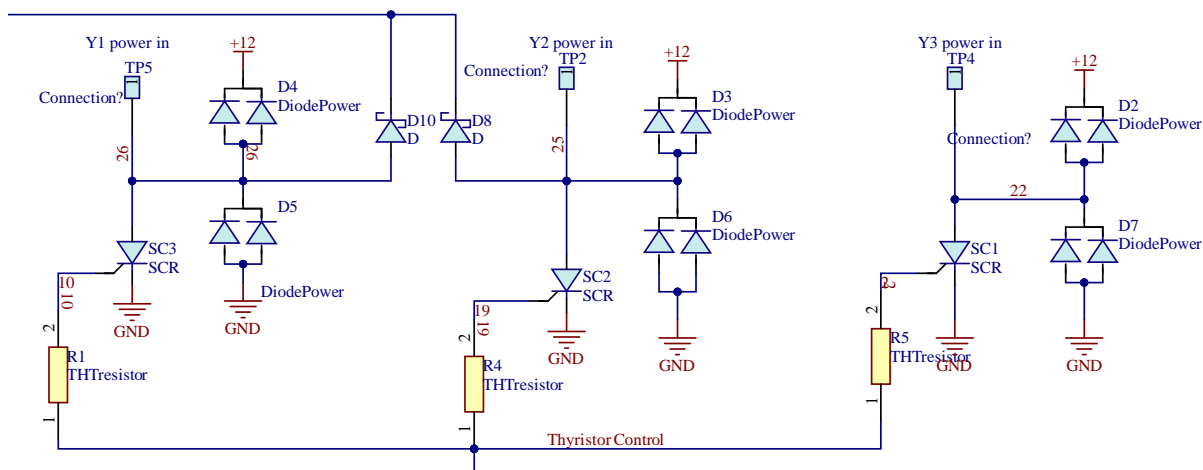
**Obr. 19:** Ochrana ADC vstupu

To funguje pouze v případě, že 3V3 větev dokáže kladný proud odvést. To lze usnadnit omezením možného proudu rezistorem R14. Když je ale přivedené napětí výrazně vyšší, pak lze počítat s zvednutím napětí na napájecí větvi, což může zničit veškeré komponenty které jsou na ní napojeny. Bohužel většina napěťových regulátorů nemá ochranu proti přílišnému napětí na výstupu, protože pro tento účel nemají žádné polovodičové obvody. Výjimkou jsou synchronní buck regulátory, které místo diody mají mezi zemí a snižující cívkou tranzistor, zajišťující průchod proudu ze země při vybíjení cívkou. Tímto tranzistorem je možné výstupní napětí připojit na zem a tím jej omezit. I synchronní buck regulátor ale musí být vybaven ochranou proti přepětí na výstupu, jinak může být v případě přepětí na výstupu zničen.

Příkladem využití zkratové regulace mohou být u napěťové regulátory u motocyklů s alternátory s permanentními magnety, viz obr. 20 a 22a. Obvod se jmenuje “crowbar circuit”. V případě, že napětí vzroste nad maximální možné napětí baterie tak regulátor napětí vyvodí v synchronním generátoru symetrický zkrat, čímž dojde k odbuzení a výstupní napětí je tak omezeno na požadovanou hodnotu.

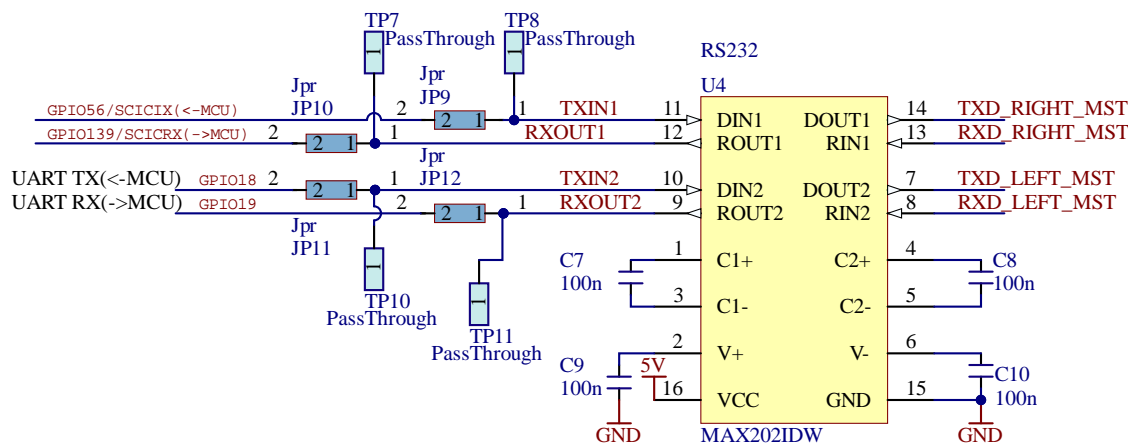
Pro používání sběrnice CAN s mikrokontrolery je potřeba převést diferenciální signál na sběrnici na digitální logické úrovně pro mikrokontroler. Tuto funkci provádí transceiver. Jeden takový už má vývojová deska zabudovaný. Aby mohla deska číst informace ze všech zařízení v autě, viz obr. 17, tak bylo nutné přidat ještě jeden transceiver.

Pro nastavování parametrů měničů, ke kterým nemáme na sběrnici CAN přístup, je využita sběrnice RS232. Ta funguje na vyšších napěťových úrovních, proto je potřeba zajistit podobný budič i pro tuto funkci. Použil jsem integrovaný obvod MAX202, který má kompatibilní vstupní i výstupní napětí a integruje i nábojovou pumpu pro zvýšení



Obr. 20: Schéma zkratového regulátoru

a převrácení napětí pro komunikaci, viz obr. 21.

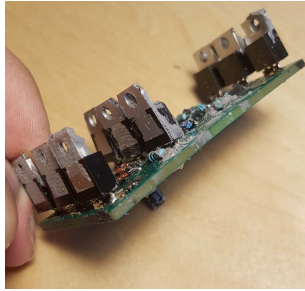


Obr. 21: Zapojení obvodu MAX2021DW

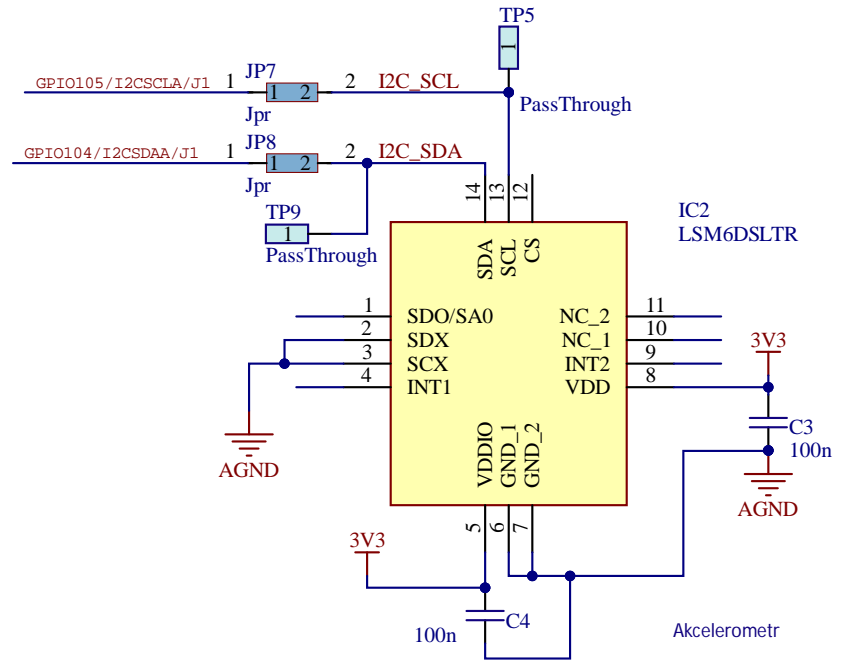
Vzhledem k veliké dostupnosti MEMS akcelerometrů jsem desku osadil integrovaným obvodem LSM6DSLTR. Jedná se o integrovaný akcelerometr a gyroskop s nastavitelným rozsahem zrychlení 2-8g a nastavitelným rozsahem úhlové rychlosti. Akcelerometr umístěný přímo na řídicí desce bude mít výrazně vyšší rychlost odezvy než akcelerometry umístěné jinde ve voze z důvodu možnosti použití dedikované I2C sběrnice. Jeho obvod je vidět na obr. 22b.

Protože je nutné hybridní systém chladit, baterii olejem a motory vodou, obsahuje řídicí deska také výkonovou elektroniku pro regulaci průtoku pump a monitorování jejich činnosti s pomocí proudového senzoru.

Podobně jako u jiných částí desky, i zde je počítáno s možnou změnou použití obvodu, ve schématu je proto paralelně zapojeno několik možných řešení spínání obvodu, pro případ že by použití jednoho konkrétního způsobu mělo problém.



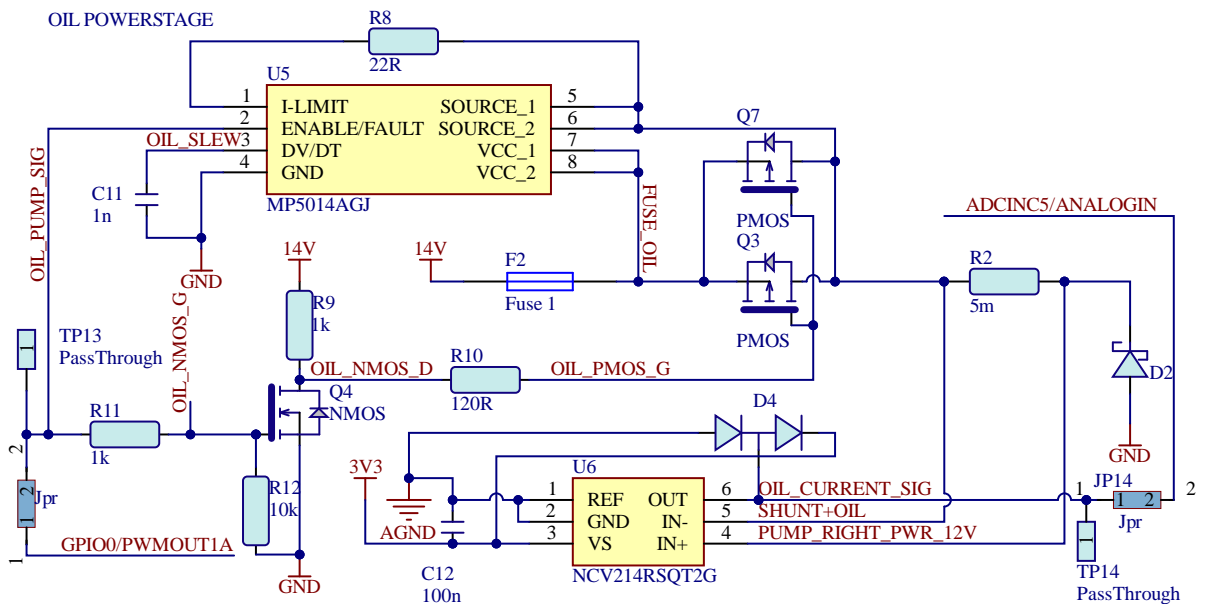
(a) Rozebraný zkratový regulátor napětí



(b) Obvod akcelerometru LSM6DSLTR

Obr. 22: Regulátor napětí, obvod akcelerometru

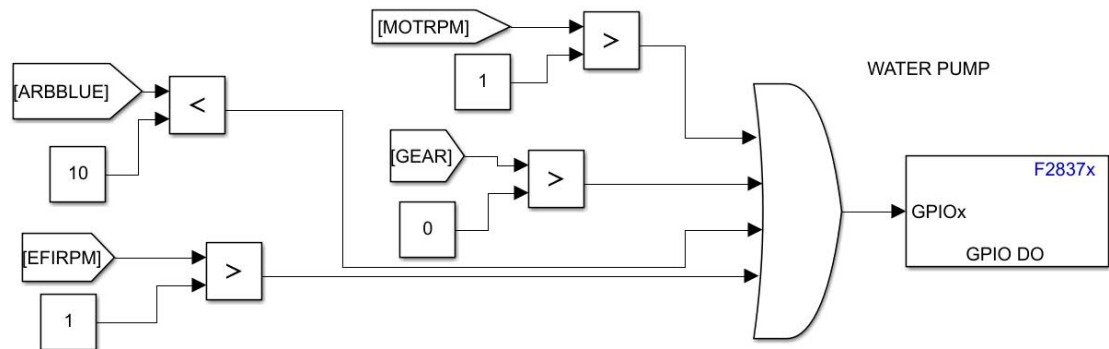
Primární plán byl po zkušenostech s neadekvátním napájením hradla MOSFET na projektu programovatelné pojistkové skříně použit integrovaný spínač na straně vyššího napětí MP5014AGJ, který je přímo přizpůsoben na řízení z mikrokontroleru a veškeré budící obvody jsou už integrovány do něj, viz obr. 23.



Obr. 23: Napájecí elektronika pumpy

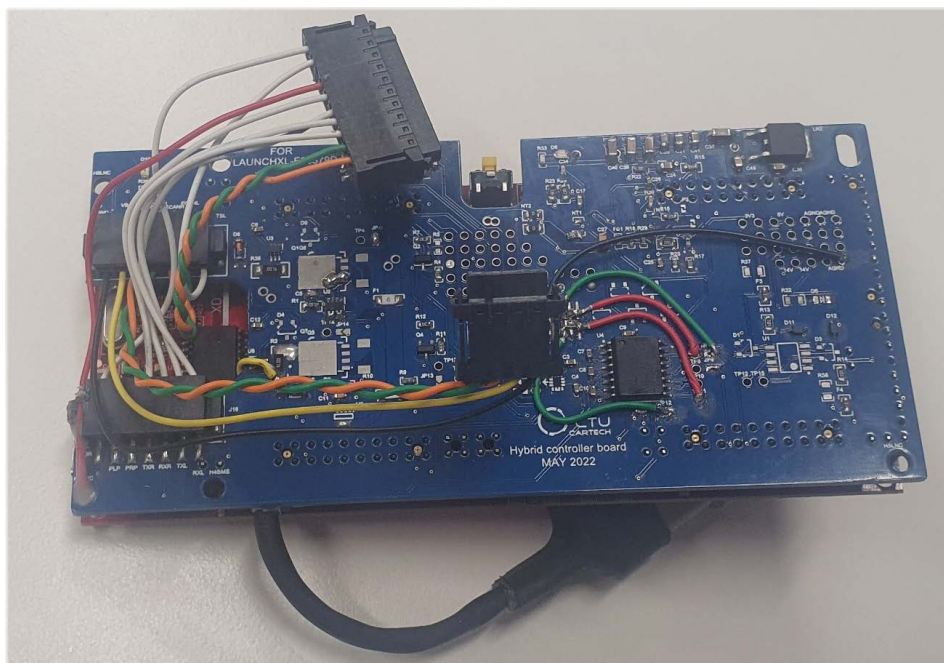
Mimo regulaci průtoku nám řízení činnosti pumpy umožňuje pumpu vypnout

v případech, kdy nechceme přenášet teplo mezi radiátory a chlazenými součástkami, viz obr. 24. Ze zástavbových důvodů jsou totiž radiátory spalovacího motoru umístěny za radiátory hybridního systému. Teploty chladiv jsou v těchto okruzích rozdílné, proto v případě zastavení vozidla např. při výměně pilotů při Endurance je vhodné zastavit pumpu, aby se teplo nepřeneslo ze spalovacího motoru do hybridního systému.



Obr. 24: Ovládání vodní pumpy

Pro účely diagnostiky pak řídicí deska obsahuje i dva vstupy pro teplotní snímače v okruzích a vstupy pro proud snímající zesilovače NCV2014RSQT2G, díky kterým je možné zjistit, zda pumpa odebírá obvyklý proud a tím pádem funguje.



Obr. 25: Výsledné PCB po sezoně

### 3.5.3 Řízení hybridního systému

V motorových vozidlech pozice plynového pedálu určuje kroutící moment, který vůz zrychluje vpřed.

Řidiči jsou s formulí zvyklí jezdit tak, že při průjezdu zatáčkou aplikují takový moment na zadní nápravu, který nevede k ztrátě trakce. Hybridní pohon by neměl tento způsob řízení narušovat. Nesmí tedy dojít k nečekaným změnám v chování během průjezdu zatáčky. Kvůli těmto požadavkům byl zvolen jednoduchý a předvídatelný způsob řízení, který je popsán v této kapitole.

Vstupem do řídicího algoritmu jsou rámce CAN z řídicí jednotky motoru. Řídicí jednotka elektrické trakce rámce přijme s pomocí bloku “eCAN Receive”. Zde specifikujeme, jaké ID rámců jsou propuštěny dál do dalšího bloku “CAN Unpack”.

Z důvodu urychlení a šetření místa na sběrnici jsou rámce převážně vysílány v maximální délce 8 bajtů. V každém z nich je pak obsaženo několik různých proměnných, navíc převedených z SI decimálních jednotek na jejich 16 bitovou reprezentaci. Převedení zpět na intuitivní decimální čísla pro výpočty v Simulinku zajišťuje blok “CAN Unpack”.

Name	Start bit	Length [bits]	Byte order	Data type	Factor	Offset
TPS	24	16	BE	unsigned	0	0.390625
CARSPD	56	16	BE	unsigned	0	0.1
EFIRPM	8	16	BE	signed	1	0

**Tab. 8:** Nastavení bloku CAN unpack pro jeden z rámců

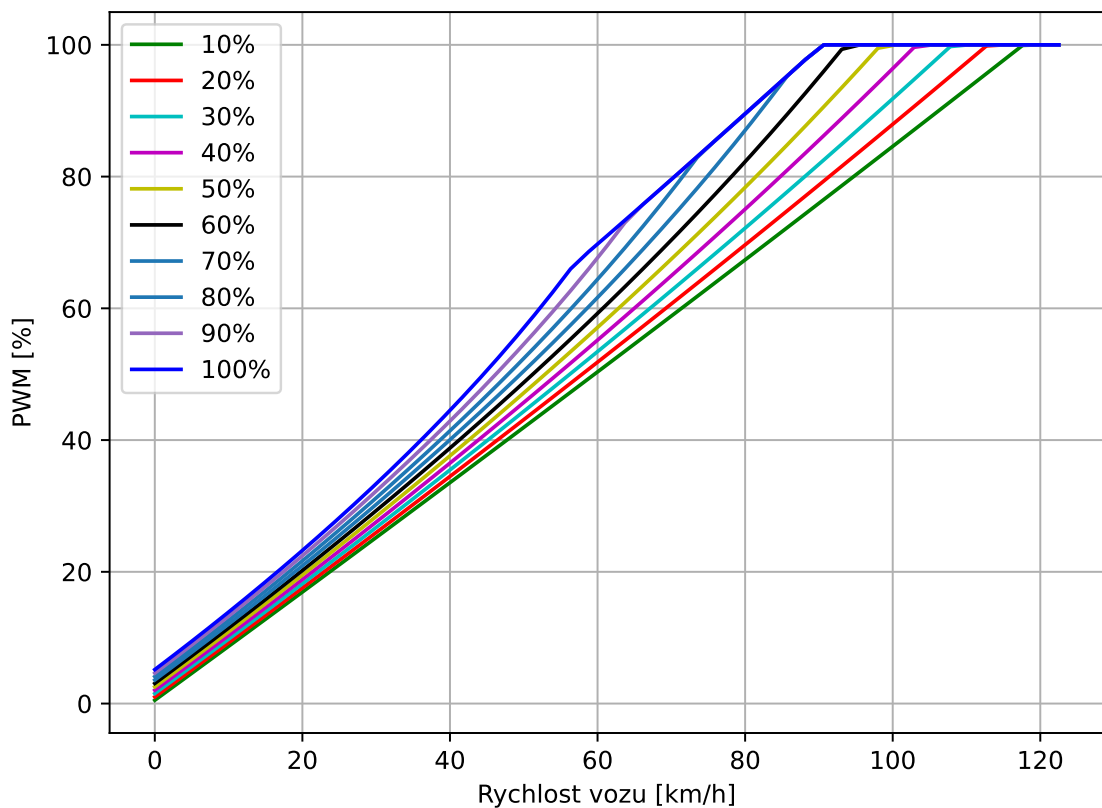
Momentový požadavek od řidiče je určen z polohy plynového pedálu. Systém se začíná postupně spouštět při překročení hranice 60 % TPS. Pokud by podmínky na trati nedovolovaly aplikaci nejvyššího možného kroutícího momentu, může řidič přepínačem na volantu specifikovat strmost náběhu momentu, tj. při jaké hodnotě klapky je aplikována jaká část dostupného momentu.

Používané měniče neobsahují zpětnovazební regulátor. Jako vstupní parametr vyžadují hodnotu PWM, která reprezentuje, kolik % času je na fázi motoru aplikováno napětí baterie. Moment BLDC motoru odpovídá proudu, který jím protéká [18]. Pro ovládání momentu je tedy potřeba ovládat proud. Měniče vysílají zprávy o aktuální hodnotě proudu motoru s frekvencí 10Hz, což není dostatečné pro zpětnovazební řízení ve vyvinuté řídicí jednotce. Samotné měniče mají možnost proudového omezovače, ten ale zatím nebyl otestován. Řízení je tedy prováděno v otevřené smyčce bez zpětné vazby.

Zakoupené motory dovolují proudy od 0A do 180A. Požadavek momentu, v rozsahu 0% - žádný až 100% - nejvyšší možný je tedy lineárně interpolován do rozmezí proudů každého z motorů. Pro převod proudu motoru na hodnotu PWM je potřeba graf s dvěma osami, protože proud záleží na aplikovaném napětí od baterie i elektromotorickém napětí motoru, závislém na rychlosti vozu. Uvedený graf 16 proto obsahuje průběhy PWM pro různé požadované momenty, oddělené barvami. Důležitý



je průběh pro maximální moment, takový průběh je použit v disciplíně Akcelerace. Graf byl odvozen z matematického modelu motoru, popsaného na str. 51.



**Graf 16:** Aplikované PWM pro různé požadované kroutící momenty bez překonání limitů

Podle pozice plynového pedálu a nastavené strmosti náběhu momentu el. trakčního systému je tedy interpolováno mezi průběhy PWM pro různé požadované momenty v závislosti na aktuální rychlosti vozu. V Simulinku lze tuto funkci splnit blokem “2D Lookup Table”.

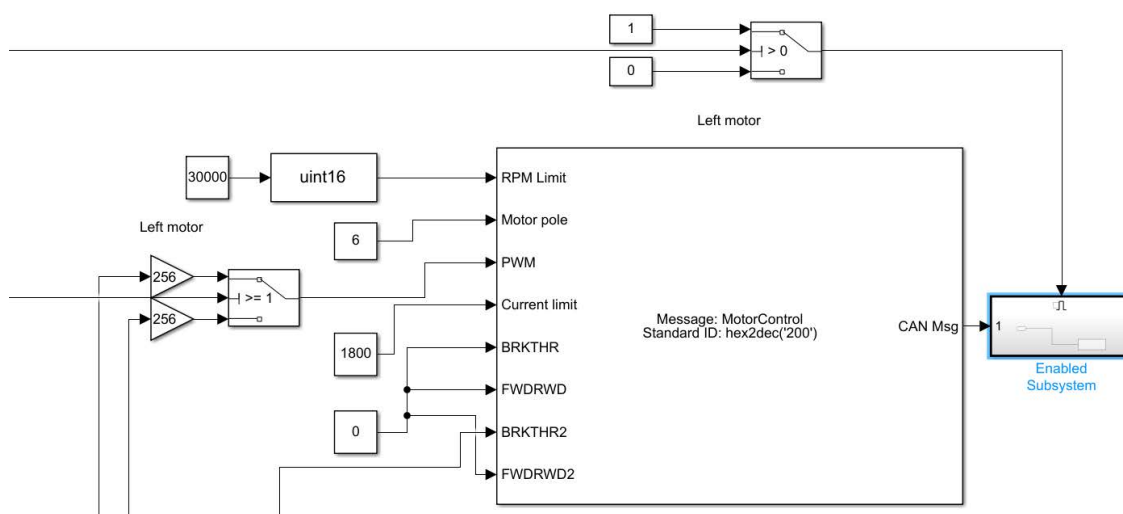
Řízení v disciplíně Akcelerace je jednoduché protože nemá žádné výkonové omezení. V disciplínách Autocross a Endurance je přehřátí a vybití zabráněno rychlostním omezením aktivace systému. Pokud se vůz pohybuje vyšší rychlostí než je limitní rychlost, pak už bude výsledné PWM vždy nula. Limitní rychlost se do systému zadává manuálně před konkrétní disciplínou, na kterou je systém nastaven. Protože Autocross a Endurance se jezdí na stejné trati, hodnota vypínací rychlosti pro Endurance je dopočítána analýzou dat z Autocrossu, jak bylo popsáno na str. 28.

Požadovaná hodnota PWM je následně zabalena do rámce pro ovládání měniče blokem “CAN Pack” a odeslána blokem “eCAN Transmit”, viz obr. 26.

Měniče mají ochranu proti náhlému spuštění, rámec tedy nemůže být odeslán průběžně. Zapnutí systému je zajištěno tak, že odesílající blok je schován v podmíněném subsystému, který je zapnut se zpožděním 100 cyklů po zapnutí el. trakčního systému



VOZU.



Obr. 26: Výstupní blok řídicí jednotky

## 3.6 Validace

### 3.6.1 Příprava měření

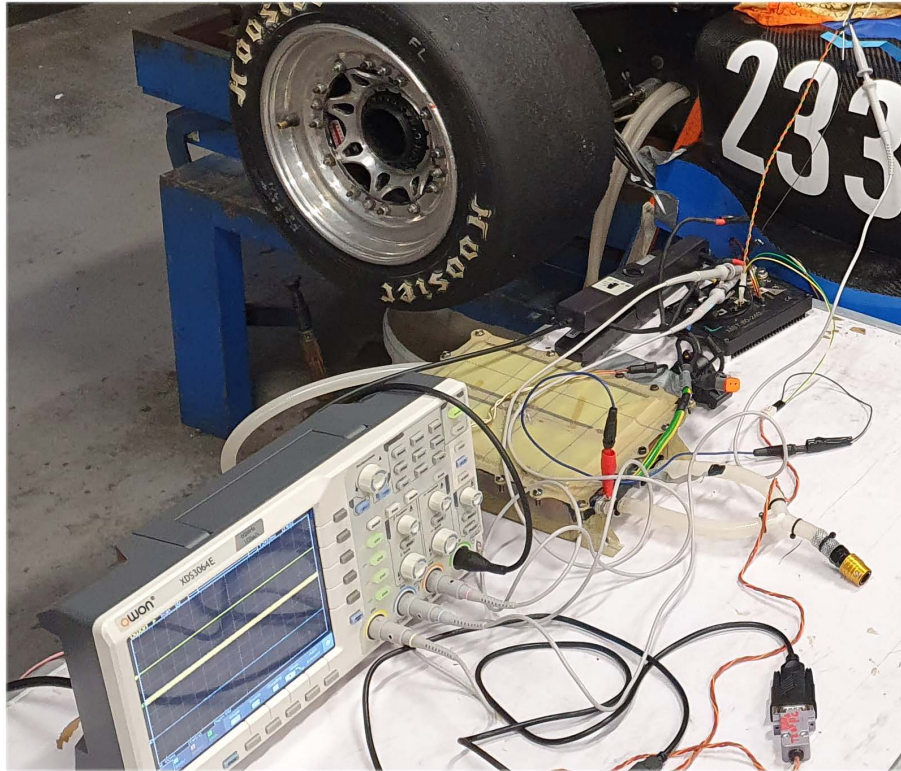
Po sezoně bylo potřeba zpracovat naměřená data nasbíraná během sezony, abychom našli veškeré možnosti na zlepšení, která systém poskytuje. Bylo potřeba určit, jakou má systém odezvu, jak přesně vypadá proud v motorech, jak se mění napětí baterie apod. Bylo také potřeba ověřit platnost matematický model motoru, odvozeného na str. 51.

Chtěl jsem také ověřit moment elektromotoru. Výrobce mi pro vybraný motor HP620-50 neposkytl data z dynamometru, protože jsem vybral prodlouženou variantu, která není tak obvyklá. Data v technickém listu motoru tedy vycházela z předpokladu, že větší délka motoru zajistí nárůst indukovaného napětí a momentu o 25% oproti kratšímu motoru.

Bohužel tým neměl z časových a finančních důvodů možnost takové měření zrealizovat na skutečném dynamometru, proto mě napadlo provést měření alespoň se zatížením ve formě setrvačníku, viz obr. 27. Moment lze v takovém případě spočítat z rovnice 35.

$$M_k = \frac{\alpha}{J} \quad (35)$$

V případě že dostatečně přesně měříme polohu rotoru, což lze provést numerickou analýzou z napětí na fázi motoru, pak můžeme z dvojité derivace polohy určit úhlové zrychlení. Digitální osciloskop OWON XDS3064E s pamětí 10 MB pak dokáže jev



**Obr. 27:** Měření se zátěží ve formě setrvačnosti kola

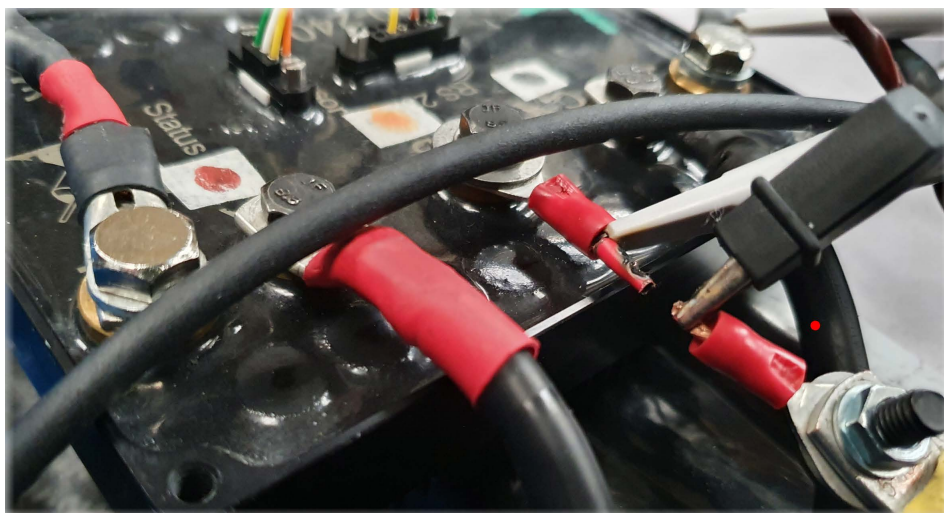
o délce 2 s zaznamenat s periodou vzorků 200 ns. Data z osciloskopu je vhodné vyexportovat v binární formě. Transformaci dat z binární na CSV, použitelné v další analýze, lze z důvodu šetření času během experimentů provést v aplikaci od výrobce osciloskopu na počítači.

S pomocí zapůjčené proudové sondy Tektronix A622 jsem provedl měření vstupních napětí a proudů. Sonda měla měřicí rozsah jenom 100 A, což nebylo pro použité motory adekvátní. Pro ověření platnosti měření v rozšířeném rozsahu jsem provedl měření zároveň na bočníku. Naměřené hodnoty se shodovaly s měřeným bočníkem i při proudech do 200 A, proto jsem uvažoval i vyšší naměřené hodnoty jako přesné. Z výpočtu mi vyšlo, že na navrženém bočníku by měla být pro jmenovitý proud motoru ztráta přibližně 9 W. To fungovalo pro kratší jev roztáčení motoru na maximální rychlost. Při následném ověřování chování měniče při nadproudu, trvajícím 500ms, došlo k přetavení bočníku, viz obr. 28.

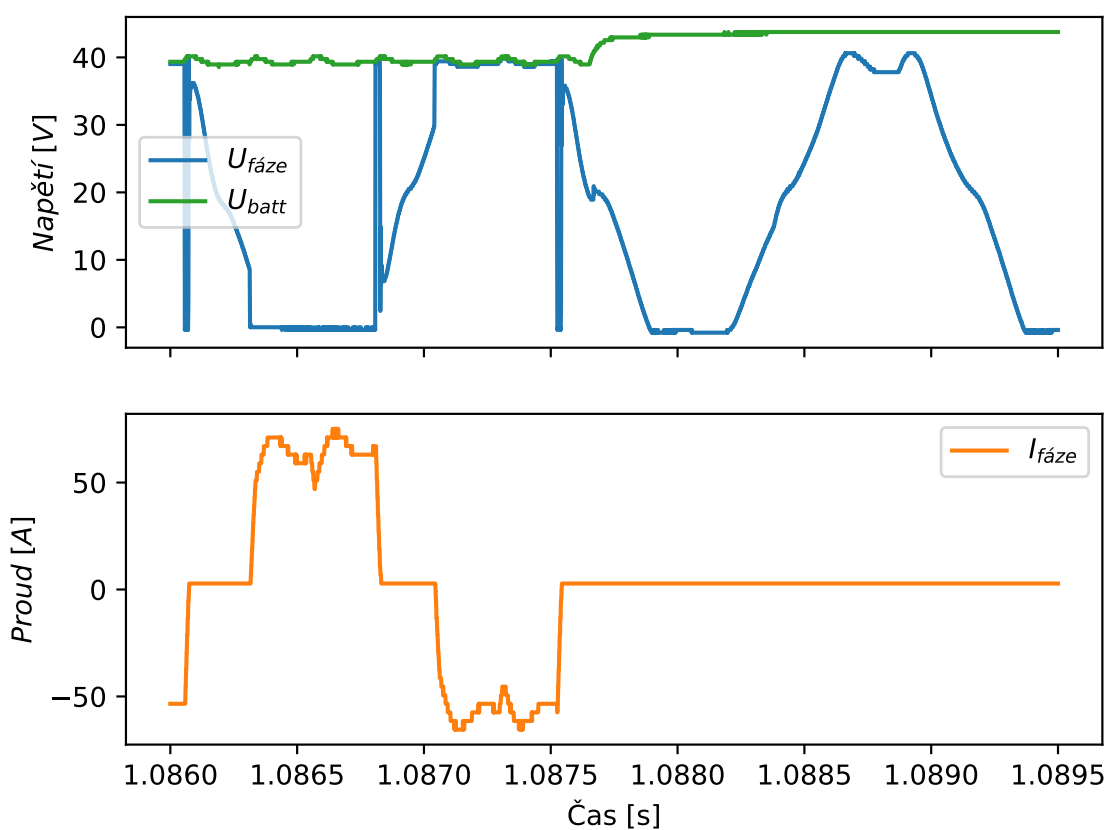
### 3.6.2 Výpočet momentu elektromotoru

První krok k určení momentu elektromotoru je znalost počtu komutačních událostí. Z počtu můžeme určit celkové natočení motoru, ze kterého pak můžeme dle rovnice  $\alpha = \dot{\varphi}$  dopočítat úhlové zrychlení.

Komutace BLDC motoru probíhá v 6 diskretních krocích, viz tab. 9.

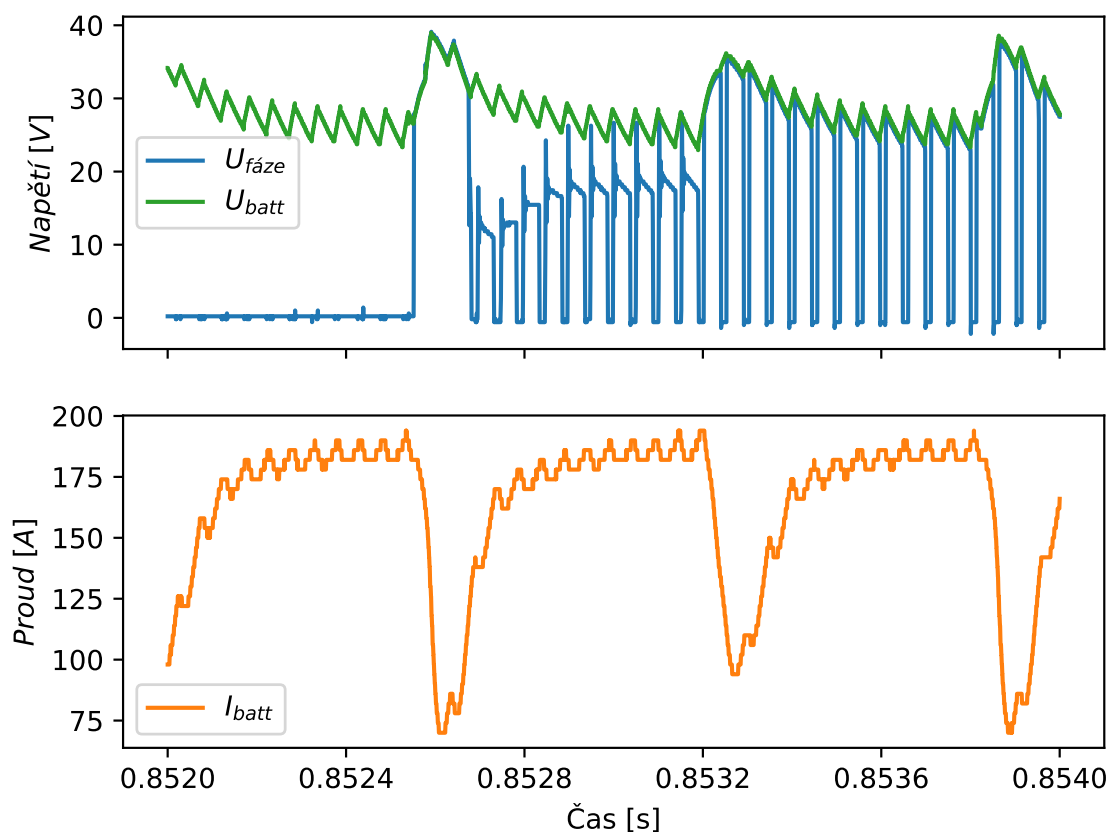


Obr. 28: Bočník



Graf 17: Průběh napětí a proudu jedné fáze při zapnutém a vypnutém měniči (100% PWM)

Z tabulky se zdá, že by mělo existovat 6 stavů měniče. Ve skutečnosti ale jde z dat poznat i mezistavy, které nastávají při přepínání mezi jednotlivými fázemi. Průběh  $U_{fáze}$  odpovídá fázi C(W) z tabulky 9. Před korkem 3 je ale zřetelný mezikrok, kdy je fáze připojena měničem na napájecí napětí baterie pro účel zastavení toku proudu, zřejmě viditelným z grafu 17. Z tohoto měření je vidět, že krok 3 (vedení fáze C do režimu vysoké impedance) nastane, až když proud jí tekoucí klesne na nulovou hodnotu.



**Graf 18:** Detail komutace BLDC motoru s viditelným PWM

		Krok 1	Krok 2	Krok 3	Krok 4	Krok 5	Krok 6	Chyba	Chyba
Fáze	A(U)	+	Z	-	-	Z	+	Z	Z
Fáze	B(V)	Z	+	+	Z	-	-	Z	Z
Fáze	C(W)	-	-	Z	+	+	Z	Z	Z
Senzor	A	1	1	0	0	0	1	0	1
Senzor	B	0	1	1	1	0	0	0	1
Senzor	C	0	0	0	1	1	1	0	1

**Tab. 9:** Komutační sekvence BLDC motoru

Vlna je velice podobná takové, která se používá pro řízení v režimu “phase advancing”. Cílem takového řízení je snížení zvlnění momentu [18].

Tyto mezikroky částečně komplikují odečet polohy rotoru, protože trvají různě dlouho dle velikosti fázového proudu. Další komplikací je pro nižší rychlosti otáčení zřetelná PWM regulace napětí, viz graf 18, která způsobuje výrazný šum a komplikuje nalezení konkrétního bodu přepnutí.

Pro detekci polohy motoru jsem používal postupně 3 různé metody.

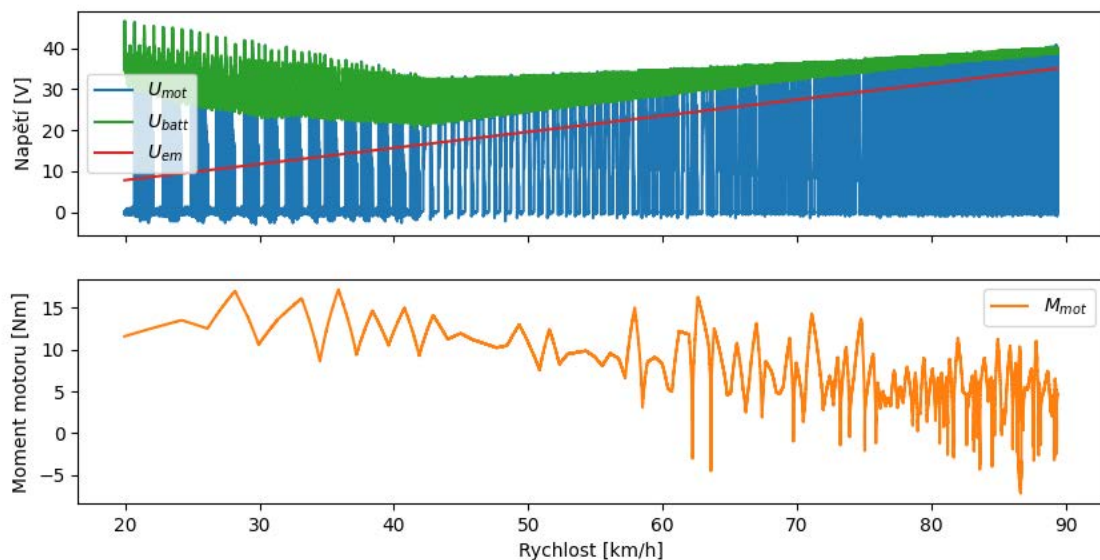
První metoda spočívala v sledování napětí baterie. Vlivem mezikroku pro zastavení proudu se v signálu objevují oblasti s výrazně vyšším napětím, které odpovídají přepínacím událostem. Tato metoda fungovala velice dobře pro nižší rychlosti, kde byl

proud statoru vysoký. Ve vyšších rychlostech už ale metoda nebyla spolehlivá, vlivem nižšího proudu statoru už oblasti vyššího napětí byly méně výrazné a ne všechny byly jednoznačně detekovatelné.

Proto jsem se snažil do algoritmu zabudovat i signál napětí fáze. Chtěl jsem rozpoznat stejné události jako u první metody, a využít čistotu tohoto signálu i ve vyšších rychlostech. Z velikosti fázového napětí šlo jednoduše rozpoznat, kdy byl signál připojen na napětí baterie a kdy byl připojen na zem. Vzhledem k tomu že jsem v naměřených datech měl pouze jedno fázové napětí tak nebylo možné jednoduše rozpoznat přechody uprostřed, tedy z tabulky rozdíl mezi stavy 1,2 a stavy 4,5. Ty jsem nakonec dopočítal tak, že jsem změřil délku události a tento přechod jsem umístil do středu.

Umístění komutačních událostí jsem následně zpracoval. Kumulativním sečtením bylo možné získat údaj o celkovém natočení rotoru motoru. Derivací jsem získal rychlost, která byla v případě použití všech 6 komutačních kroků výrazně zvlněná. Jako řešení se ukázalo brát v potaz jeden bod a to ten, kdy měnič fázi připojí na zem (krok 1 z tab. 9), čímž jsem eliminoval nepřesnosti detailnějšího zpracování celé komutace za cenu šestinového vzorkování. Tento bod bylo možné spolehlivě detekovat ve všech naměřených datech. Získaný rychlostní signál pak bylo možné dále zderivovat a získat tím signál o úhlovém zrychlení.

Pro určení momentu motoru jsem spočítal setrvačnost pneumatiky, což je nejtěžší část kolové sestavy, a dosadil jsem ji do rovnice  $M = \frac{a}{j}$ . Výsledná závislost momentu na rychlosti kola je vidět z grafu 19. Moment je blízky očekávané hodnotě 10Nm.

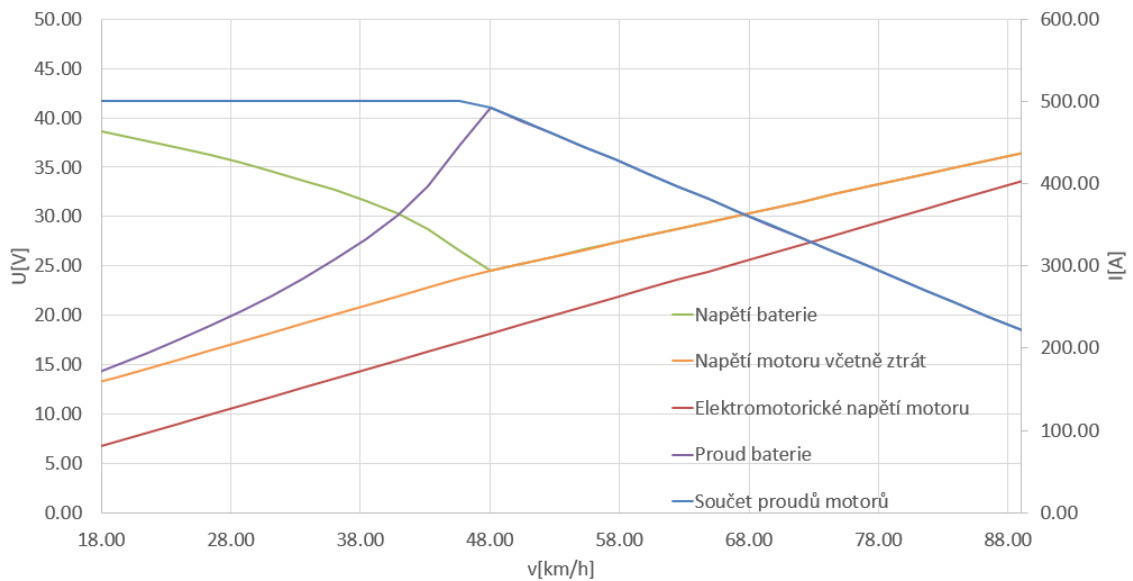


**Graf 19:** Průběh napětí a momentu motoru v závislosti na rychlosti

Z průběhu napětí baterie v grafu 19 je vidět, že se celkem shoduje s průběhem napětí v závislosti na rychlosti odvozeném z matematického modelu(str. 51), v grafu

15. Vlivem komutací je napětí výrazně zvlněné, skutečná naměřená data máme pouze pro nižší rychlosti, kterých bylo možné dosáhnout v omezeném času snímání osciloskopu. Měření bylo také prováděno s jedním motorem místo dvou motorů, pro které je vypracován matematický model. U měření také nebyly zapnuty žádné nadproudové ochrany.

Pro takové nastavení matematický model dává průběhy na grafu 20. Ten se už velice podobá naměřeným hodnotám, proto považuji matematický model za přesný.



Graf 20: Průběh napětí a proudu z matematického modelu pro experiment

### 3.6.3 Validace chlazení baterie

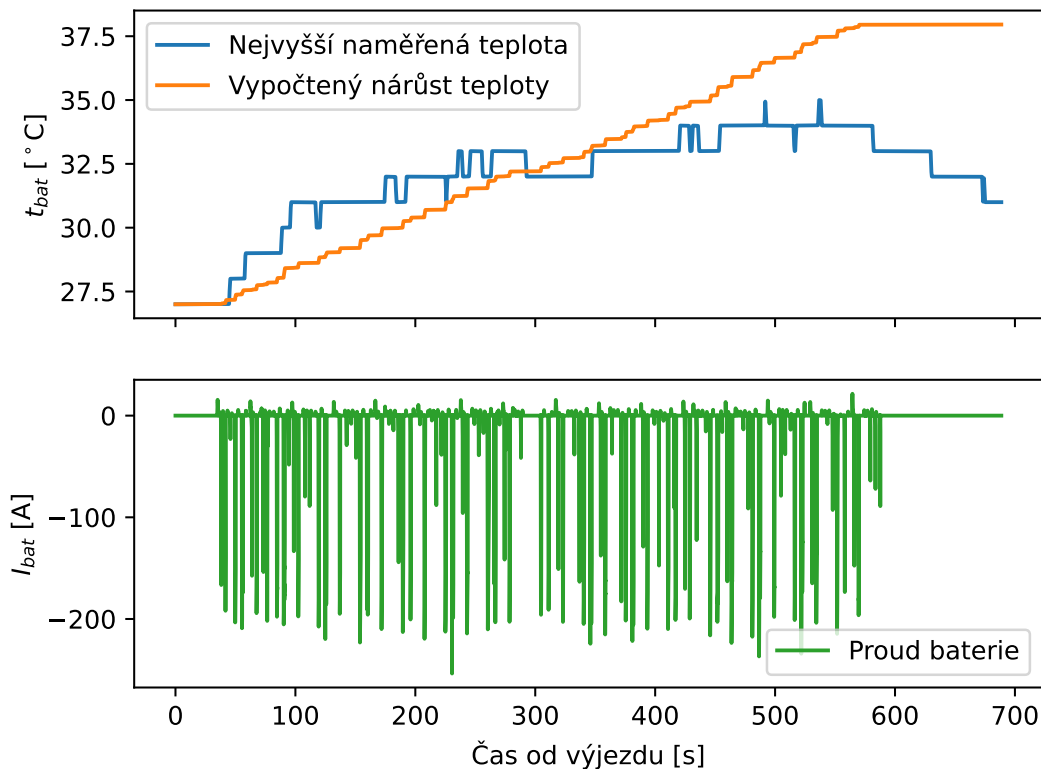
Pro validaci zvoleného postupu volby druhu chlazení jsem vytvořil graf 21. Zde je vynesena nejvyšší naměřená teplota uvnitř baterie společně s teplotou, na kterou by se při daném zatížení měla baterie teoreticky dostat.

Použitý model oteplení je stejný, jaký byl používán při návrhu. Vstup do modelu je skutečný naměřený proud baterie. Vlivem efektivního chlazení olejem fakt, že skutečná teplota je na konci dat nižší než ta, která je určena modelem. Na začátku to je naopak, pravděpodobně díky tomu, že skutečná teplota v grafu je měřena kontaktně na negativních pólech článků v baterii, které se ohřejí rychleji než olej. Model a skutečnost je jinak podobný, proto zhodnocuji způsob určení nutnosti chlazení odvozený na str. 45 jako správný.

### 3.6.4 Odezva systému

Důležitým parametrem systému i pro návrh řízení je celková odezva, tj. jak brzy po příkazu řidiče můžeme počítat s reakcí měničů. Pro lepší vizualizaci celého řetězce byl





**Graf 21:** Nárůst teploty článků, porovnání výpočtu a naměřených dat

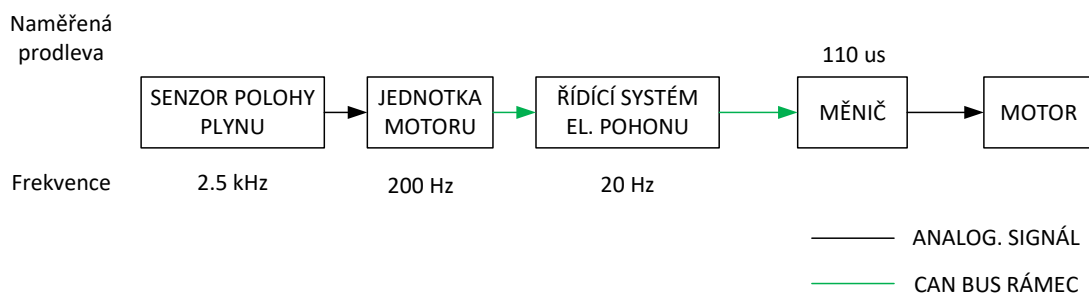
vytvořen diagram, viz obr. 29.

Prodleva senzoru je vzhledem k jeho vysoké frekvenci zanedbatelná. Řídící jednotka motoru emituje rámce s frekvencí 200 Hz, řídicí systém v Simulinku běží na frekvenci 20 Hz. Vlastní prodlevu měniče jsem změřil ze záznamu napětí na fázích a aktivity na řídicím CAN busu.

Největší část prodlevy způsobuje pravděpodobně řídicí systém el. pohonu, vzhledem k jeho nízké pracovní frekvenci. Celková prodleva systému tedy bude nejméně 55.5 ms. Bylo by vhodné změřit prodlevu přímo na voze, protože vlivem filtrování signálů se například změna polohy klapky nemusí hned propsat do aktuálně emitovaného rámce z řídicí jednotky motoru.

### 3.6.5 Vliv na jízdní vlastnosti vozu

Na voze se každou sezonu provede veliké množství úprav. Izolování jedné změny vozu a mezigenerační porovnání se proto dá těžko zrealizovat. Složitost auta, závislosti na okolní teplotě, teplotě vozovky, aktuálnímu stavu pneumatik, čistoty trati apod způsobují, že i když by řidič dokázal konzistentně trať projet, bude možné že změna času kola byla způsobena právě jedním z těchto parametrů.



**Obr. 29:** Diagram řetězce vedoucího k reakci el. pohonu

Veliký vliv má i placebo efekt, zřejmý z faktu, že elektrický pohon byl z pohledu řidičů daleko více cítit, když byl aktivovaný tlačítkem na volantu místo dle pozice plynového pedálu a rychlostí.

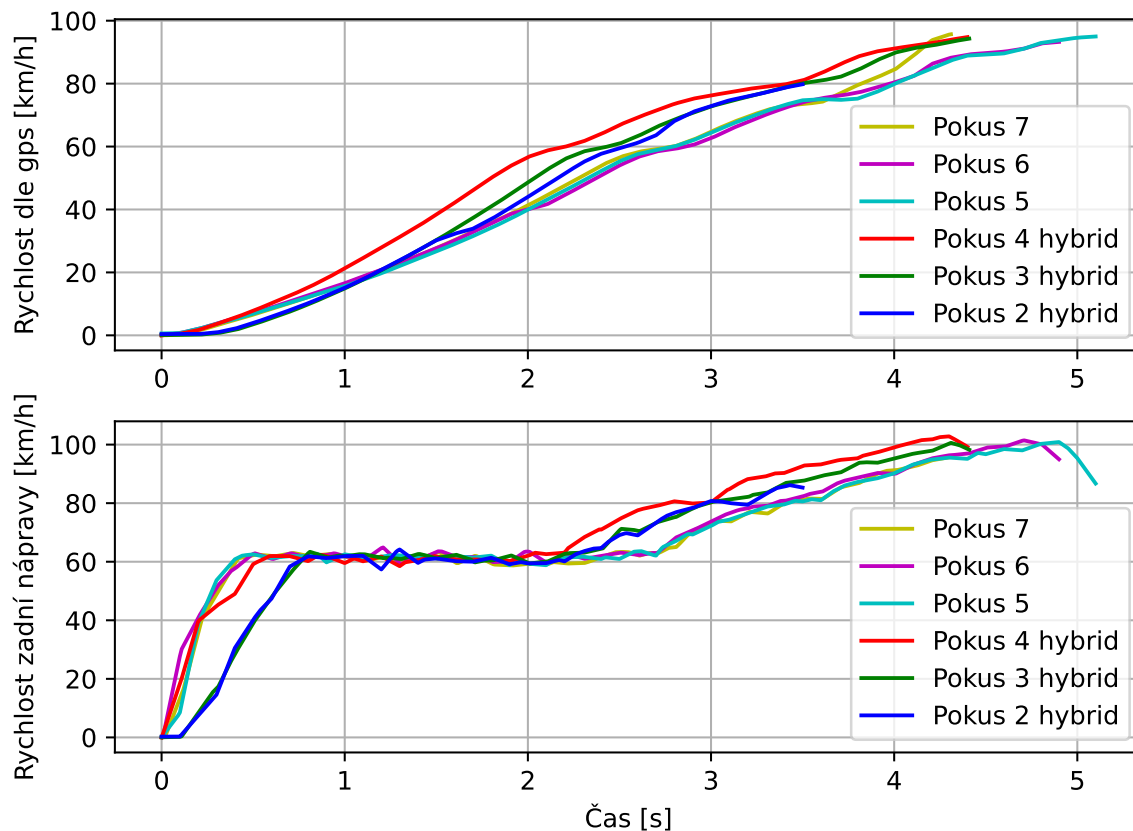
Srovnání které není prakticky proveditelné je tedy faktor přidané hmotnosti oproti přidaného výkonu. Auto, které by zakomponovalo ostatní zlepšení zrealizovaná na FS.14 ale bylo by o hybrid lehčí není možné postavit, protože pro zachování rovnoměrné zátěže na nápravách bylo auto celé posunuto dopředu.

Proto v této kapitole prozkoumám, jak se vůz chová v závislosti na stavu elektrického trakčního systému. Porovnání je tím pádem možné uskutečnit ve stejný den, v podobný čas se stejným řidičem, čímž odstraníme výše zmíněné vlivy okolního prostředí.

Nejjednodušší srovnání je v disciplíně Akcelerace. Na grafu 22 je vidět průběh rychlosti zadních kol. Oblast od 0. do 2. sekundy se vyznačuje prokluzem zadních kol, proto data začínají prudkým nárůstem rychlosti, dále je oblast konstantní rychlosti, kdy spalovací motor je řídicí jednotkou udržován na maximálních otáčkách. Prokluz končí pro vůz s vypnutým hybridním pohonem na 2.5s, pokud vůz má zapnutý hybridní pohon tak prokluz končí už druhou sekundou.

V reálných závodních podmínkách pak dokáže vůz s hybridním pohonem absolvovat disciplínu Akcelerace v čase 3.6s, s vypnutým hybridním pohonem pak dosáhne času 4s.





Graf 22: Rychlost zadní nápravy vozu při testování se zapnutým / vypnutým hybridním pohonem

## 4 Závěr

Výsledkem práce je funkční otestovaný hybridní systém, nasazený na závodním voze FS.14.

V 1. části práce jsem provedl rešerši možností aplikace hybridního pohonu v kategorii soutěže studentské formule. Byla vysvětlena teorie závodních vozů a obhájeno zvolené umístění systému.

V 2. části práce jsem vybral optimální způsob skladování energie, s přihlédnutím ke všem relevantním parametrům ovlivňujícím kvality systému v různých disciplínách soutěže. Dále jsem navrhl systém řízení baterie, splňující veškeré požadavky vytyčené v pravidlech soutěže. Nakonec byl vybrán vhodný elektromotor.

V 3. části jsem navrhl řízení systému, které je přívětivé pro řidiče a zároveň umožňuje využití výhod hybridního pohonu. Systém jsem individuálně nastavil pro disciplíny Akcelerace, Autocross a Endurance.

Ve 4. části byly popsány kroky, vedoucí k integraci systému do vozu FS.14 a jeho zprovoznění. Hlavní chyby které nastaly jsem zdokumentoval, aby jim bylo možné v budoucnu předejít. Problémové části systému jsem opravil.

V 5. části jsem provedl testování systému, ověření momentových a výkonových vlastností systému. Byly prověřeny vlastnosti elektromotoru i vyvinutý matematický model, použitelný pro další vývoj systému. Dále byla vyhodnocena odezva systému a jeho chlazení.

V závěrečné 6. části jsem vyhodnotil, jaký zisk systém poskytuje v disciplíně Akcelerace, kde jsem naměřil zlepšení času o 0.4s.

Vzhledem k funkčnosti konečného systému považuji práci za úspěšnou. Tým CTU CarTech se tak stal prvním týmem, který zrealizoval hybridní pohon dle pravidel Formula Student a prošel s ním kontrolu vozu na závodech. Byl také jediným týmem, který zvolil řešení s převodovkou v přední kolové sestavě.

Veliká komplexita systému bohužel způsobila výrazné zpoždění výjezdu auta. Jeho neotestovanost se nakonec negativně projevila ve výsledcích týmu v sezoně FS.14.

Systém byl od jeho koncepce braný jako investice, která se vyplatí v následujících letech. S novým konceptem vozu FS.15, soustředěným na zjednodušení náročných aspektů provozu systému při současném zlepšení všech hlavních výkonnostních parametrů očekávám, že se systém stane konkurenční výhodou týmu.

## Seznam použitých značek a symbolů

$(BH)_{max}$	Veličina popisující sílu magnetu
$\beta$	Beta faktor termistoru
$\Delta t$	Změna teploty
$\lambda_p$	Nejvyšší vzájemný magnetický indukční tok od magnetů BLDC motoru
$\omega$	úhlová rychlost rotačního tělesa
$\omega_m$	Úhlová rychlost rotoru motoru
$\phi$	Magnetický tok
$a$	zrychlení
$B$	Magnetická indukce
$C$	Tepelná kapacita
$C_{ss}$	Konstanta stejnosměrného stroje
$d$	Průměr
$I$	Proud
$i$	Převodový poměr
$i_a$	Okamžitý elektrický proud rotoru
$I_{1a}$	proud, který teče po dobu $t_{1a}$
$I_{1b}$	proud, který teče po dobu $t_{1b}$
$i_{as}$	Proud statoru motoru
$I_{bat}$	Proud baterie
$I_{ch}$	Specifikovaný nabíjecí proud baterie
$I_{dc}$	Specifikovaný vybíjecí proud baterie
$I_{eq}$	ekvivalentní RMS proud
$I_{mot}$	Proud motoru
$J$	moment setrvačnosti rotačního tělesa
$J_{kola}$	moment setrvačnosti kola
$K_b$	Konstanta BLDC motoru. Vyjadřuje, jaké naměříme napětí mezi dvěma fázemi při rychlosti otáčení 1 rad/s.
$KV$	Konstanta motoru, vyjadřující kolik otáček za minutu odpovídá maximálnímu napětí mezi dvěma fázemi 1 V

$L$	Vlastní indukčnost motoru
$l$	Délka
$L_a$	Úniková indukčnost motoru
$L_d$	Indukčnost v podélném směru
$L_q$	Indukčnost v příčném směru
$M$	Elektrický moment
$M$	Vzájemná indukčnost motoru
$m$	hmotnost
$M_k$	Mechanický moment
$m_{eq}$	ekvivalentní hmotnost rotačního tělesa
$n_{max}$	Maximální otáčky
$o_{kola}$	obvod kola
$P$	Výkon
$P_{ch}$	Nabíjecí výkon
$P_{dc}$	Vybíjecí výkon
$P_{max}$	Maximální výkon
$P_{mot}$	Elektrický výkon motoru
$P_m$	Mechanický výkon
$Q$	Teplo, tepelná energie
$R$	elektrický odpor
$R_1$	Odpor termistoru při teplotě $T_1$
$R_2$	Odpor termistoru při teplotě $T_2$
$R_{\downarrow}$	Hodnota rezistoru v děliči napětí na výstupu
$R_{\uparrow}$	Hodnota rezistoru v děliči napětí na vstupu
$R_a$	Odpor statoru motoru
$R_{bat}$	Odpor baterie
$R_{mot}$	Vnitřní odpor motoru
$T_1$	První teplota termistoru
$T_2$	Druhá teplota termistoru

$T_e$	Elektromagnetický moment motoru
$t_{1a}$	čas, kdy teče proud $I_{1a}$
$t_{1b}$	čas, kdy teče proud $I_{1b}$
$t_{max_{ch}}$	Nejvyšší možná teplota při nabíjení článku
$t_{max_{ch}}$	Nejvyšší možná teplota při vybíjení článku
$U$	Napětí
$U_{BEMF}$	Indukované elektromotorické napětí motoru
$U_{in}$	Napětí na vstupu děliče napětí
$U_{max}$	Napětí proudem nezatížené baterie
$U_{out}$	Napětí na výstupu děliče napětí
$v$	rychlost vozu
$v_{is}$	Napětí statoru motoru
$v_{km\cdot h^{-1}}$	Rychlost vozu v kilometrech za hodinu
ADC	Analog to digital converter, analogově digitální převodník
AIM MXS	Zaznamenávač dat a display zobrazující informace o voze řidiči
AMS	Accumulator management system - elektronický systém zodpovědný za dodržení bezpečných provozních podmínek v akumulátoru
apod.	a podobně.
BLDC	Brushless direct current, Bezkartáčový stejnosměrný motor
BMS	Battery management system - elektronická jednotka zodpovědná za hlídání napětí článků v baterii
CAN	Controller Area Network - sběrnice pro komunikaci mezi jednotkami vozu
CARSPD	Car Speed, rychlost vozidla
CRC	Cyclic redundancy check, česky cyklický redundantní součet, hashovací funkce používaná k nalezení chyb přenosu
CYL	Cylinder, konstrukce článku kdy obal je nerezový válec
DC link	Napětí zdroje který napájí měnič
EFIRPM	EFI Revolutions per minute, otáčky motoru dle řídicí jednotky EFI
el.	elektrické
FS.14	Čtrnáctý závodní monopost týmu CTU CarTech

- FSC Formula student combustion - soutěž které se jako tým účastníme, kategorie spalovacích vozů
- FSE Formula Student Electric - studenská soutěž v konstrukci a stavbě elektrických formulových vozů
- I2C Inter-Integrated Circuit - sériové rozhraní pro přenos dat mezi dvěma zařízeními
- ID Identifikátor - číslo, podle kterého jednoznačně rozpoznáme jednotku
- IDC Insulation displacing connector, druh konektorů pro beznástrojové použití na plochých kabelech
- laptime simulace Program na výpočet teoretického času, za který vůz zadaných parametrů projede trať
- Launchpad Řídící systém elektrického pohonu
- LCO Lithium Cobalt Oxide, starší a stále rozšířená drahá technologie lithiových článků
- LFP Lithium iron phosphate, druh chemie lithiových článků stabilnější chemie než LCO a levnější
- LTO Lithium titanate battery, druh chemie lithiových článků s nejnižší specifickou energií ale vyšší stabilitou
- MEMS Microelectromechanical systems, mechanické systémy na mikronovém měřítku  
např. například
- NCA Lithium nickel cobalt aluminum oxide, levnější varianta LCO nahrazující část kobaltu niklem a hliníkem
- NMC Lithium nickel manganese cobalt oxide, levnější varianta LCO nahrazující část kobaltu niklem a manganem
- NTC negative temperature coefficient - označení pro termistory kterým se s rostoucí teplotou snižuje hodnota odporu
- obr. obrázek
- PCB Printed Circuit Board - tištěná deska plošných spojů
- PCH Pouch, konstrukce článku kdy obal je měkký sáček
- PMSM Permanent magnet synchronous motor, synchronní motor s permanentními magnety
- PWM Pulse width modulation, Pulzně šířková modulace
- RMS Root mean square, česky efektivní hodnota, vyjadřuje jakou velikost musí mít

stejnoseměrný proud nebo napětí se stejným výkonem

rpm rotations per minute, Počet otáček za minutu

RS232 Recommended Standard 232 - sériové rozhraní pro přenos dat mezi dvěma zařízeními

SCS System critical signal

SI Soustava SI, soustava jednotek založená na sedmi základních jednotkách

SMD Surface mount device - Pouzdra elektrických komponentů montovaných plošně na plošný spoj

SOC State of charge, stav nabití baterie

STM32 32bitové mikrokontrolery od firmy STMicroelectronics

tab. tabulka

THT Through hole technology - elektronické součástky vyráběné s vývody pro montáž skrz plošný spoj

TI Texas Instruments - výrobce elektronických součástek

tj. to je; to jest

TPS Throttle Position Sensor, senzor polohy plynu

TTL Transistor-Transistor Logic - logická rodina integrovaných obvodů

tzn. to znamená

## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Tomáš Adamec. “Optimalizace využití energie hybridního monopostu Formule Student”. URI: <http://hdl.handle.net/10467/103547>. Diplomová práce. Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, 2022.
- [2] Rimac Group FS Alpe Adria. *Preliminary Full Results CV rev3*. [https://fs-alpeadria.com/?option=com\\_fileman&view=file&routed=1&name=Preliminary\\_Full%20Results%20CV%20rev3.pdf&folder=Templates-22&container=fileman-files](https://fs-alpeadria.com/?option=com_fileman&view=file&routed=1&name=Preliminary_Full%20Results%20CV%20rev3.pdf&folder=Templates-22&container=fileman-files). 2022. (Cit. 23.05.2023).
- [3] Aimtechnologies. *Digital outputs release 1.03 AIM Infotech - AIM Technologies*. <https://www.aimtechnologies.com/support/docs/Aim-Digital-Outputs-103.pdf>. 2019. (Cit. 01.04.2023).
- [4] Brad Anderson. *2023 Toyota Prius Is The Best Looking Ever, And The 220 HP Prime Is The Fastest Too*. Lis. 2022. URL: <https://www.carscoops.com/2022/11/2023-toyota-prius-makes-the-iconic-plug-in-hybrid-better-in-all-areas/>.
- [5] Danny Bokma. *DieBieMS-Firmware*. <https://github.com/DieBieEngineering/DieBieMS-Firmware>. 2019. (Cit. 23.05.2023).
- [6] Christian Buck. “Magnetic raw materials: The key to more efficient electric motors”. In: *Porsche Engineering Magazine* 01 (2023), s. 8–9. URL: <https://www.porscheengineering.com/peg/en/about/magazine/>.
- [7] Copper Development Association and European Copper Institute. *Copper for busbars*. <https://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/power-substations/copper-for-busbars-guidance>. 2014. (Cit. 19.04.2023).
- [8] Steve Corrigan. *Introduction to the Controller Area Network (CAN)*. <https://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>. Květ. 2016. (Cit. 08.06.2023).
- [9] John J. Croat a John Ormerod. “Chapter 1 - The history of permanent magnets”. In: *Modern Permanent Magnets*. Ed. John Croat a John Ormerod. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. Woodhead Publishing, 2022, s. 1–30. ISBN: 978-0-323-88658-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88658-1.00004-2>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323886581000042>.
- [10] Jiří Čermák. *Synchronní stroje - konstrukce, princip a použití*. <https://oenergetice.cz/elektrina/synchronni-stroje-konstrukce-princip-a-pouziti>. Květ. 2015. (Cit. 08.06.2023).
- [11] Formula Student East. *FS CV Hybrid Rules Extension 2023*. 2023. URL: <https://fseast.eu/wp-content/uploads/2023/01/FS-CV-Hybrid-Rules-Extension-2023-V1.2.pdf> (cit. 13.05.2023).



- [12] Stephen Edelstein. *2017 BMW i3 REx: 97-mile electric range, lower efficiency for range-extended model*. Zář. 2016. URL: [https://www.greencarreports.com/news/1105962\\_2017-bmw-i3-rex-97-mile-electric-range-lower-efficiency-for-range-extended-model](https://www.greencarreports.com/news/1105962_2017-bmw-i3-rex-97-mile-electric-range-lower-efficiency-for-range-extended-model).
- [13] *FSG Strategic Announcement*. [https://www.formulastudent.de/uploads/media/FSG\\_Strategic\\_Announcement\\_v20191023.pdf](https://www.formulastudent.de/uploads/media/FSG_Strategic_Announcement_v20191023.pdf). Říj. 2019. (Cit. 23.05.2023).
- [14] Formula Student Germany. *FS Rules 2023*. 2023. URL: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2023/rules/FS-Rules\\_2023\\_v1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.0.pdf) (cit. 09.03.2023).
- [15] Bc. Petr Hainc. “Návrh elektroniky pro akumulátorovou baterii elektromobilu”. Dipl. pr. Czech Technical University in Prague, květ. 2021. URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/95443> (cit. 09.03.2023).
- [16] *It's coming: FSC will gain a hybrid option starting 2022*. <https://fsaustria.at/its-coming-fsc-will-gain-a-hybrid-option-starting-2022/>. Zář. 2021. (Cit. 23.05.2023).
- [17] Novák Jaroslav. *Elektromechanické systémy v dopravě a ve strojírenství*. Vydavatelství ČVUT, 2002.
- [18] Ramu Krishnan. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press, 2010. ISBN: 9781315221489. DOI: 10.1201/9781420014235.
- [19] LithiumWerks. *APR18650M1B Datasheet*. Led. 2019. URL: [https://a123batteries.com/product\\_images/uploaded\\_images/APR18650M1B.pdf](https://a123batteries.com/product_images/uploaded_images/APR18650M1B.pdf) (cit. 09.03.2023).
- [20] Tony Martin. *Honda's parallel lines*. Led. 2020. URL: <https://www.vehicleservicepros.com/collision-repair/on-the-shop-floor/article/21174674/hondas-parallel-lines>.
- [21] Wes McKinney. *Python for Data Analysis, 2nd Edition*. O'Reilly Media, Inc., 2017.
- [22] Yemeserach Mekonnen, Aditya Sundararajan a Arif Sarwat. “A review of cathode and anode materials for lithium-ion batteries”. In: břez. 2016, s. 1–6. DOI: 10.1109/SECON.2016.7506639.
- [23] *NdFeB Neodymium Iron Boron*. 2019. URL: [https://www.eclipsemagnetics.com/site/assets/files/19485/ndfeb\\_neodymium\\_iron\\_boron-standard-ndfeb\\_range\\_datasheet\\_rev1.pdf](https://www.eclipsemagnetics.com/site/assets/files/19485/ndfeb_neodymium_iron_boron-standard-ndfeb_range_datasheet_rev1.pdf) (cit. 10.03.2023).
- [24] Formula One. *Kinetic Energy Recovery Systems (KERS)*. Archived from the original. 2010. URL: [https://web.archive.org/web/20100706001934/http://www.formula1.com/inside\\_f1/rules\\_and\\_regulations/technical\\_regulations/8699/fia.html](https://web.archive.org/web/20100706001934/http://www.formula1.com/inside_f1/rules_and_regulations/technical_regulations/8699/fia.html) (cit. 09.03.2023).

- [25] Gian-Mario Luigi Pellegrino et al. “Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 48.2 (2012), s. 554–562. DOI: 10.1109/TIA.2012.2227092. URL: [https://core.ac.uk/display/11430165?utm\\_source=pdf&utm\\_medium=banner&utm\\_campaign=pdf-decoration-v1](https://core.ac.uk/display/11430165?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1) (cit. 21.05.2023).
- [26] Ha Seongmin et al. “POWER DISTRIBUTION CONTROL ALGORITHM FOR FUEL ECONOMY OPTIMIZATION OF 48V MILD HYBRID VEHICLE”. In: *Int. Conference on Modeling and Applied Simulation 2017* (2017), s. 185–190.
- [27] Derek Seward. *Race Car Design*. Palgrave, 2014. ISBN: 9781137030146.
- [28] Weiwei Shao et al. “Study on the Reversible and Irreversible Heat Generation of the Lithium-Ion Battery with LiFePO<sub>4</sub> Cathode”. In: *Fire Technology* 59 (2022), s. 289–303.
- [29] Venkat Srinivasan a C Y Wang. “Analysis of electrochemical and thermal behavior of Li-ion cells”. In: *Journal of The Electrochemical Society* 150.1 (2002), A98.
- [30] TDK. *Commercial NTC Thermistor*. 2022. URL: [https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/chip-ntc-thermistor/catalog/tpd\\_commercial\\_ntc-thermistor\\_ntcg\\_en.pdf](https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/chip-ntc-thermistor/catalog/tpd_commercial_ntc-thermistor_ntcg_en.pdf).
- [31] *Temperature and Neodymium Magnets*. <https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=temperature-and-neodymium-magnets>. 18 Appletree Ln Pipersville, PA 18947. (Cit. 23.05.2023).
- [32] *VACOFLUX X1*. <https://vacuumschmelze.com/products/soft-magnetic-materials-and-stamped-parts/VACOFLUX-X1>. 25.lis. 2020. (Cit. 10.03.2023).
- [33] *Wire Size Selection - Aircraft Electrical System*. <https://www.aircraftsystemstech.com/2017/06/wire-size-selection.html>. Čvn. 2017. (Cit. 19.04.2023).
- [34] Zhang Yadi et al. “Sodium-ion capacitors: Materials, Mechanism, and Challenges”. In: *ChemSusChem* 13 (ún. 2020). DOI: 10.1002/cssc.201903440.
- [35] Shuwen Zhou, Zhenghao Song a Yuemin Zhao. “Analysis of the thermal effect of a lithium iron phosphate battery cell and module”. In: *Energy Science & Engineering* 9.5 (2021), s. 661–675.

# Seznam obrázků, grafů a tabulek

## Seznam obrázků

Obrázek 1	Dělení hybridních pohonů dle síly [26] . . . . .	10
Obrázek 2	Trh s magnety [9] . . . . .	12
Obrázek 3	Nasycení magnetické oceli . . . . .	14
Obrázek 4	Různé konstrukce článků [22] . . . . .	20
Obrázek 5	g-g diagram pro jednotlivá kola vozu, vlivem přenosu váhy při průjezdu zatáčkou [27] . . . . .	25
Obrázek 6	Příklad využití hybridního systému na trati ve Španělsku . . . . .	33
Obrázek 7	PCB pro nalepení na články . . . . .	39
Obrázek 8	PCB pro nalepení na články a konektory . . . . .	39
Obrázek 9	Důsledek uvolněného šroubového spoje . . . . .	45
Obrázek 10	Tvorba tepla uvnitř článku [35] . . . . .	47
Obrázek 11	Reakční teplo . . . . .	47
Obrázek 12	Kalorimetrické měření tepelné kapacity článku . . . . .	48
Obrázek 13	Baterie s přetlakem uvnitř . . . . .	49
Obrázek 14	Schéma bezpečnostních obvodů FS.14 . . . . .	57
Obrázek 15	AIM MXS digitální výstup . . . . .	57
Obrázek 16	Umístění nového teplotního senzoru uvnitř motoru . . . . .	59
Obrázek 17	Diagram zobrazující jednotky formule na sběrnici CAN . . . . .	60
Obrázek 18	Praktické využití stop komponentů navíc a možnosti odpojení zařízení od mikrokontroleru . . . . .	62
Obrázek 19	Ochrana ADC vstupu . . . . .	63
Obrázek 20	Schéma zkratového regulátoru . . . . .	64
Obrázek 21	Zapojení obvodu MAX202IDW . . . . .	64
Obrázek 22	Regulátor napětí, obvod akcelerometru . . . . .	65
Obrázek 23	Napájecí elektronika pumpy . . . . .	65
Obrázek 24	Ovládání vodní pumpy . . . . .	66
Obrázek 25	Výsledné PCB po sezoně . . . . .	66
Obrázek 26	Výstupní blok řídicí jednotky . . . . .	69
Obrázek 27	Měření se zátěží ve formě setrvačnosti kola . . . . .	70
Obrázek 28	Bočník . . . . .	71
Obrázek 29	Diagram řetězce vedoucího k reakci el. pohonu . . . . .	76

## Seznam grafů

Graf 1	Historie vývoje permanentních magnetů [9] . . . . .	12
--------	---	----

Graf 2	Průběh napětí a proudů fází BLDC motoru . . . . .	17
Graf 3	Základní parametry různých druhů skladování energie [34] . . . . .	19
Graf 4	Graf rychlosti vozu během jednoho kola závodu Endurance . . . . .	23
Graf 5	Graf závislosti trakční síly na normálové síle [27] . . . . .	24
Graf 6	Citlivost vozu na změnu výkonu vycházející z laptime simulace(Nižší hodnota znamená lepší čas kola) . . . . .	27
Graf 7	Citlivost vozu na změnu hmotnosti vycházející z laptime simulace(Nižší hodnota znamená lepší čas kola) . . . . .	27
Graf 8	Citlivost vozu na změnu valivého odporu (reprezentující přidané ztráty) vycházející z laptime simulace(Nižší hodnota znamená lepší čas kola) . . . . .	28
Graf 9	Výkonová charakteristika motoru Yamaha R6 . . . . .	30
Graf 10	Porovnání průběhu rychlostí matematických modelů a skutečných dat	31
Graf 11	Průběh binárního hledání . . . . .	32
Graf 12	Závislost oteplení na efektivním proudu pro různé průřezy vodičů [33]	41
Graf 13	Graf závislosti kontaktního odporu na kontaktním tlaku [7] . . . . .	43
Graf 14	Graf momentu a výkonu FS.14 . . . . .	54
Graf 15	Graf průběhu napětí a a proudu . . . . .	55
Graf 16	Aplikované PWM pro různé požadované kroutící momenty bez překonání limitů . . . . .	68
Graf 17	Průběh napětí a proudu jedné fáze při zapnutém a vypnutém měniči (100% PWM) . . . . .	71
Graf 18	Detail komutace BLDC motoru s viditelným PWM . . . . .	72
Graf 19	Průběh napětí a momentu motoru v závislosti na rychlosti . . . . .	73
Graf 20	Průběh napětí a proudu z matematického modelu pro experiment . . . . .	74
Graf 21	Nárůst teploty článků, porovnání výpočtu a naměřených dat . . . . .	75
Graf 22	Rychlost zadní nápravy vozu při testování se zapnutým / vypnutým hybridním pohonem . . . . .	77

## Seznam tabulek

Tabulka 1	Klasifikace hybridů dle výkonu a napětí [1] . . . . .	9
Tabulka 2	Klasifikace hybridů dle umístění . . . . .	10
Tabulka 3	První soubor vyhodnocovaných článků . . . . .	35
Tabulka 4	Druhý soubor vyhodnocovaných článků . . . . .	36
Tabulka 5	Odpory jednotlivých částí vedení . . . . .	46
Tabulka 6	Parametry různých BLDC motorů . . . . .	50
Tabulka 7	Výhody a nevýhody použití vývojových kitů . . . . .	61
Tabulka 8	Nastavení bloku CAN unpack pro jeden z rámců . . . . .	67
Tabulka 9	Komutační sekvence BLDC motoru . . . . .	72

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Schéma konektorů řídicí jednotky hybridního systému

Příloha 2: Schéma regulátorů řídicí jednotky hybridního systému

Příloha 3: Schéma integrovaných obvodů řídicí jednotky hybridního systému

Příloha 4: Přední strana PCB řídicí jednotky hybridního systému

Příloha 5: Zadní strana PCB řídicí jednotky hybridního systému

## **Obsah přiloženého CD**

- Elektronické schéma
- Navržené PCB
- Software pro analýzu jízdních dat
- Celé znění práce v pdf





